

doi: 10.12029/gc20230912001

孙厚云, 刘卫, 樊彦超, 彭香景, 马峰, 卫晓锋, 陈自然, 杨忠芳. 2025. 河北承德锶元素地球化学特征与富锶生态产业发展潜力[J]. 中国地质, 52(3): 801-833.

Sun Houyun, Liu Wei, Fan Yanchao, Peng Xiangjing, Ma Feng, Wei Xiaofeng, Chen Ziran, Yang Zhongfang. 2025. Geochemical characteristics of strontium and development potential of strontium-rich ecological industry in Chengde, Hebei[J]. Geology in China, 52(3): 801-833(in Chinese with English abstract).

河北承德锶元素地球化学特征与富锶生态产业发展潜力

孙厚云¹, 刘卫^{2,3,4}, 樊彦超^{2,3}, 彭香景^{2,3}, 马峰¹, 卫晓锋⁵, 陈自然⁵, 杨忠芳^{3,4}

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 华北地勘生态资源监测中心(河北)有限公司, 河北 承德 067000; 3. 河北省地质资源勘探开发与生态保护重点实验室, 河北 承德 067000; 4. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 5. 北京矿产地质研究院有限责任公司, 北京 100012)

摘要:【研究目的】厘清基岩-风化壳-土壤-特色作物体系中锶的丰度、物质来源、迁移聚集规律,对助力承德市富锶土壤标准建立,指导富锶生态产业发展具有重要意义。【研究方法】通过参比元素标准化方法厘定了承德全区和红旗—大庙小流域表层土壤的锶元素地球化学基线;采用多元统计分析 GIS 方法、岩石风化元素化学损耗分数 CDF、元素生物富集系数 BCF,电子探针和原位微区分析等方法阐明了不同地质建造基岩、风化层和土壤,不同水体和特色作物样品的 Sr 元素丰度、空间分异与迁聚特征,识别了高锶特征寄主矿物类型,探讨了承德市锶元素异常的地球化学成因。系统归纳总结了国内外富锶生态产业的发展现状,结合承德市特色生态资源禀赋特征,评价了承德市富锶生态产业发展潜力。【研究结果】承德全区和红旗—大庙小流域土壤 Sr 地球化学基线值分别为 206.87~216.49 mg/kg 和 241.69~260.51 mg/kg。全区表层土壤 Sr 平均含量为 514.59 mg/kg,其中 59.05% 和 68.10% 样品 Sr 含量超过全区地球化学基线值和中国表层土壤 Sr 背景基准值。承德全区基岩 Sr 含量平均达 546.57 mg/kg,富锶寄主矿物为辉石、橄榄石、磷灰石、钙长石和角闪石。化学风化过程中,斜长岩、斜长片麻岩和花岗岩 Sr 淋溶损失程度较高。基岩 Sr 丰度空间分异与区域构造格架具有良好的耦合关系,华北克拉通大陆地壳减薄隆起造成丰宁—隆化和大庙—娘娘庙深大断裂之间富锶的太古宇变质基底物质上涌,基性岩浆与陆壳混染、结晶分离形成的大庙斜长岩体、海西期侵入岩,火山岩和太古代变质基底建造多具富锶特征。滦河流域 58.08% 水样,红旗—大庙斜长岩体周边 81.61% 井水和 53.57% 泉水 Sr²⁺浓度超过锶矿泉水标准限值,地热温泉水 Sr²⁺浓度平均达 0.78 mg/L。区内 34 种经济作物 Sr 平均含量范围为 0.77~26.60 mg/kg,道地黄芩 Sr 含量范围为 15.94~116.51 mg/kg,显著高于我国其他黄芩产区。【结论】承德市富锶水土资源禀赋优势突出,地理标志生态产品、道地中药材富锶明显,在饮用矿泉水、地热温泉康养、饮料饮品和酿酒,特色生态农业、绿色食品和农副产品开发,道地药材等富锶生态产业方面具有巨大的发展潜力。

关键词: 锶;生态地球化学;岩石风化;元素迁移;生态富锶产业;承德;水文地质工程

创新点: (1)系统梳理了承德市不同地质建造内基岩-风化壳-土壤 BRS 体系、水体、特色作物和中药材的锶丰度特征;(2)采用多种方法识别了承德市基岩高锶特征寄主矿物类型,探讨了锶元素异常的地球化学成因;(3)系统总结了国内外富锶生态产业发展现状,评价了承德市富锶生态产业发展潜力。

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)03-0801-33

收稿日期: 2023-09-12; 改回日期: 2024-02-19

基金项目: 承德市研发投入强度增长奖励资金科技专项—承德市富锶功能农产品产业化关键技术研究(202304B047),河北省重点研发计划专项(21327504D)与中国地质调查局项目(DD20190822)联合资助。

作者简介: 孙厚云,男,1990年生,博士,助理研究员,主要从事水文地球化学与环境地球化学研究;E-mail: shyun2016@126.com。

通信作者: 刘卫,男,1985年生,博士研究生,主要从事环境地球化学与健康地质研究;E-mail: 625382448@qq.com。

Geochemical characteristics of strontium and development potential of strontium-rich ecological industry in Chengde, Hebei

SUN Houyun¹, LIU Wei^{2,3,4}, FAN Yanchao^{2,3}, PENG Xiangjing^{2,3}, MA Feng¹, WEI Xiaofeng⁵,
CHEN Ziran⁵, YANG Zhongfang^{3,4}

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 2. Hebei North China Geological Exploration Ecological Resources Monitoring Center Co., Ltd., Chengde 067000, Hebei, China; 3. Hebei Key Laboratory of Geological Resources Exploration and Ecological Protection, Chengde 067000, Hebei, China; 4. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 5. Beijing Institute of Geology for Mineral Resources Co., Ltd., Beijing 100012, China)

Abstract: This paper is the result of hydrogeological survey engineering.

[Objective] It is of great significance to the establishment of strontium-rich soil standards and the development of strontium-rich ecological industries to clarify the abundance, sources, and migration patterns of strontium in the bedrock – regolith – soil–plant continuum system. **[Methods]** The geochemical baseline values of the strontium in topsoil of the Chengde region and the Hongqi–Damiao small catchment were determined using the reference element method. Multivariate statistical analysis, GIS methods, chemical depletion fraction (CDF), bioconcentration factor (BCF), electron probe microanalysis, and in-situ microanalysis were systematically conducted to elucidate the abundance, spatial variation, migration and accumulation characteristics of strontium in bedrock–regolith–soil layers of different geological formations, different types of water and plant samples, as well as to identify the host minerals of strontium in bedrock and the causes of geochemical anomalies of strontium in Chengde City. The development potential of strontium-rich ecological industry in Chengde was evaluated combining the current research status of strontium-rich ecological industry at home and abroad with the ecological resource endowment of Chengde City. **[Results]** The geochemical baseline value of the strontium in topsoil from the Chengde region and the Hongqi–Damiao catchment was 206.87–216.49 mg/kg, and 241.69–260.51 mg/kg, respectively. The average Sr content in the topsoil of Chengde was 514.59 mg/kg, with 59.05% and 68.10% of topsoil samples exceeding the geochemical baseline value of the entire region and the Sr background value of Soil Layer A in China. The average Sr content in the bedrock of the Chengde region was 546.57 mg/kg, and the Sr-rich host minerals were identified as pyroxene, olivine, apatite, calcium feldspar, and hornblende. The leaching–loss intensity of strontium during the chemical weathering process of anorthosite, plagioclase gneiss, and granite was relatively higher than that of other geological formations. The spatial variation of strontium abundance in bedrock exhibited good spatial coupling with regional tectonic framework. The uplifting and thinning of the continental crust in the North China Craton led to the upwelling of Sr-rich Archean metamorphic basement materials between the Fengning–Longhua and the Damiao–Niangniangmiao deep faults. Consequently, the Damiao anorthosite rock mass, Hercynian intrusive rocks, volcanic rocks, and Archean metamorphic basement formed by the mixing and crystallization separation of basic magma and continental crust along the deep fault belt are enriched in strontium. The water samples in the Luanhe River Basin, well and spring water samples in Hongqi–Damiao catchment with Sr²⁺ concentration higher than 0.4 mg/L accounted for 58.08%, 81.61% and 53.57% respectively, and the average Sr²⁺ concentration of geothermal water and hot spring samples was 0.78 mg/L. The average Sr content of 34 economic crops ranged from 0.77 to 26.60 mg/kg, of particular note was that the Sr content of *Scutellaria baicalensis* was 15.94–116.51 mg/kg, which was significantly higher than other producing areas in China. **[Conclusions]** Chengde possesses prominent advantages in strontium-rich water and soil resources, and its geographical-indication products and authentic Chinese herbal medicines exhibit distinct strontium-rich characteristics. The strontium-rich ecological industry in Chengde—including drinking mineral water, geothermal health industries, beverage and wine production, characteristic ecological agriculture, organic green foods, agricultural and sideline products, and authentic Chinese herbal medicine derivatives—holds significant development potential.

Key words: strontium; eco-geochemistry; rock weathering; element migration; strontium-rich ecological industry; Chengde; hydrogeological survey engineering

Highlights: (1) The strontium abundance characteristics of bedrock-regolith-soil-plant continuum system, water environment, and traditional Chinese herbal medicine were systematically summarized in Chengde; (2) The host minerals of strontium in bedrock and the causes of strontium geochemical anomalies in Chengde were identified; (3) The development potential of the strontium rich ecological industry in Chengde was evaluated based on the systematically combing the current development status of the strontium-rich ecological industry at home and abroad.

About the first author: SUN Houyun, male, born in 1990, Ph.D., assistant researcher, engaged in the research on hydrogeochemistry and environmental geochemistry; E-mail: shyun2016@126.com.

About the corresponding author: LIU Wei, male, born in 1985, Ph.D. candidate, engaged in the research on ecological geochemistry and health geology research; E-mail: 625382448@qq.com.

Fund support: Supported by the project of Chengde Key R&D Plan (No.202304B047), Hebei Province Key R&D Plan (No.21327504D) and the project of China Geological Survey (No.DD20190822).

1 引言

锶(Strontium)在自然界主要以化合态存在,大都以痕量元素分布在造岩矿物和副矿物中,在地壳中广泛分布但含量甚微,丰度约为 0.04%(Stanley, 1981; Watts and Howe, 2010; 王学求等, 2021),是碱土金属中丰度第二小的元素。自 1972 年明确锶是人体必需的微量元素以来(Schroeder et al., 1972),国内外针对锶元素与人的健康关系,高锶水土资源利用及健康效应,富锶生态产品与锶在农业种植、医疗、营养学领域的应用等方面开展了系列研究。

锶与人体健康相关的研究主要包括锶元素的生理功能、人体对锶的摄入需求、环境介质中锶的毒理学研究、锶的安全性及安全阈值等方面。研究表明,锶对促进骨骼健康,预防龋齿和骨质疏松、心血管疾病,缓解抑郁症,促进生殖健康具有十分重要的作用(韩娟和郭燕枝, 2022; 黄胥莱等, 2023; 席雪瑶等, 2023)。芬兰(Varo et al., 1982)、丹麦兽医与食品管理局(Danish Veterinary and Food Administration, 2002)、法国食品、环境和职业健康安全局(Millour et al., 2012)相继对其国内常见动植物产品和食物样本中的 Sr 含量进行了研究。我国居民从食物中摄取的锶平均为 0.83 mg/d,占国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的每日膳食锶含量(1.90 mg/d)的 44%(Schroeder et al., 1972; 席雪瑶等, 2023)。我国公共饮用水中锶的质量浓度平均为 0.36 mg/L,居民每日由公共饮用水摄取的锶占每日总锶摄入量的 24%~42%(Peng et al., 2021);居民从

饮用水和食物中摄取的锶普遍不足。富锶水土资源利用研究主要聚焦于饮用矿泉水、富锶医疗热矿水(Medical thermomineral water),锶在环境介质中的分布、迁移富集与健康效应等方面(孙厚云等, 2020a; 朱雪芹等, 2020)。研究表明,欧洲地区包装饮用水和自来水 Sr²⁺质量浓度中位数分别为 0.536 mg/L ($n=1785$)和 0.406 mg/L ($n=579$)(Birke et al., 2010),美国 32 个典型供水含水层浅层地下水中 Sr²⁺的质量浓度范围为 <0.005~32.0 mg/L ($n=4824$)(Musgrove, 2021)。塞尔维亚国标旅游康养水疗中心和运动休闲泳池 Sr 标准限值为 2.0 mg/L(Košić et al., 2011);韩国全域内常温和地热矿泉水 Sr 浓度范围为 0.006~0.410 mg/L(Lee et al., 2021)。另外,水果、蔬菜、大宗粮食作物、坚果、肉蛋奶、海鲜等类型食品(Howe et al., 2005; Kamar et al., 2018),药用植物(Cindrić et al., 2005; Xu, 2009; Zeinera et al., 2015; Bonari et al., 2019; Dyakova, 2023)、茶叶作物与茶叶制品(Karadaş and Kara, 2012; Martins et al., 2015; Fernandes et al., 2022)、酒类(韩深等, 2014; Bruna et al., 2023)产品中的锶元素丰度研究也相继开展。

近年来,绿色富锶食品成为继富硒食品后重要的研发方向,与富锶生态产业相关的农业种植与农副产品开发、锶的药物研发、生态产品营养学价值开发等研究相继开展。国际上针对富锶食品开展系列营养学、医学、农业种植方面的科研工作,探索了高质量富锶食品的农艺加工策略优化、生物强化技术,研发了雷奈酸锶(SrR)等药物(韩娟和郭燕枝, 2022)。在国内,湖北随州北部(胡江龙等, 2019)、山东菏泽定陶地区(曹艳玲等, 2021)、山西

大同桑干河流域(刘军帅等, 2022)等根据土壤 Sr 背景值对富锶土壤等级进行了划分, 王东晓和袁德志等(2023)探讨了河南固始史河一带的富锶土壤标准, 计算了花生、小麦、玉米的富锶推荐值。山东省沂源县依托于富锶水土资源, 拟打造“中国锶都”, 与中国农业科学院共同发布了《山东省沂源县富锶苹果产业发展报告》与《中国富锶苹果标准》(韩娟和郭燕枝, 2022; 王贵平等, 2022)。除此之外, 国内多地陆续推出不同类型富锶农产品, 如贵州省道真县的晒锶茶、甘肃省临泽县富锶黑小麦、山西省灵丘县富锶水稻、山西祁县来远富锶小米等, 水稻(虞德容和张启军, 2012; 罗军强等, 2019), 神农架富锶植物资源蔬菜、水果等(卜怡然等, 2020; 肖潇等, 2022), 黄芩等道地药材(赵曼茜等, 2010; 王升等, 2014; 郭兰萍等, 2014; 汪丹等, 2022)中的锶富集程度研究也陆续跟进。当前, 国内对富锶生态产品的研发尚处于起步阶段, 还未建立统一的标准和农产品种植范式, 已有富锶生态产品质量参差不齐, 富锶生态产业的发展潜力亟待开发(韩娟和郭燕枝, 2022)。

承德市矿泉水、山泉水资源丰富, 天然山泉水产业是其十大绿色产业之一, 拟打造华北最大的水产业基地和中国高锶矿泉水城(王京彬等, 2020)。区内地热资源丰富, 位于华北陆内造山带燕山隆起地下热水区(Yang et al., 2012; Sun et al., 2023; 孙厚云等, 2025)。与此同时, 承德市是重要的农业、蔬菜和水果基地, 被纳入首都菜篮子体系, 是华北地区最大的食用菌生产基地, 中国北方地区重要的中药材生产基地。在区内钒钛磁铁矿资源开发趋紧和绿色发展背景下, 水产业、生态农业、绿色食品及生物医药产业已成为地区经济发展的重要产业。查明区内锶元素生态地球化学特征, 对承德市发挥富锶水土资源生态优势, 提高生态产品附加值, 打造地理标志和地方特色优质品牌, 促进富锶特色产业具有重要意义。

岩石风化为生物生产提供了土壤, 为土壤、水体和生物提供了丰富的矿质营养元素, 制约着植物生长状况和生态产品的品质(刘丛强, 2007)。基于关键带 BRSPC(Bedrock-Regolith-Soil-Plant Continuum)连续体探索锶元素生物地球化学循环规律, 阐述不同环境介质中 Sr 的丰度特征与元素地球化学行为, 对富锶土壤标准建立、富锶生态产业

的发展具有重要意义(孙厚云等, 2020b, 2021a; Wei et al., 2022; Li et al., 2022)。本文在地球关键带 BRSPC 连续体研究框架下, 阐明了承德市不同地质建造基岩、风化壳、土壤锶的丰度与空间分异特征, 地下水(矿泉水)、地表水(灌溉用水)和特色生态产品(经济作物)中的锶的富集特征, 厘定了锶的土壤环境地球化学基线, 探讨了富锶土壤划分标准。采用多种多元统计分析方法和地球化学方法识别了基岩中锶的特征寄主矿物, 阐明了岩石高锶异常地球化学成因。系统梳理总结了国内外富锶生态产业发展现状, 结合承德市特色生态资源禀赋特征, 从矿泉水与地热温泉开发、饮品和酿酒、生态农业和道地药材产业等方面探讨评价了承德市富锶生态产业的发展潜力, 助力服务乡村振兴, 巩固脱贫攻坚成果。

2 研究区概况

承德市地处内蒙古高原到华北平原过渡地带, 地势总体北高南低, 地貌由坝上高原、燕山山脉中低山、燕山南麓丘陵逐步过渡为华北平原。区域构造上位于燕山沉陷带与高原后背斜过渡带, 地貌类型以浅切割的侵蚀—剥蚀中低山丘陵为主。区内水系发育, 横跨辽河流域、滦河流域、潮河—白河—蓟运河三大流域单元, 水资源相对较为丰富。全域年均自生水量 37.6 亿 m^3 , 其中地表水和地下水资源量分别占 45% 和 55%。研究区属暖温和中温带半湿润大陆季风型燕山山地气候, 雨热同季, 年平均降水量 519.1 mm。

研究区位于华北—蒙古联合板块边缘的燕山构造带上, 大地构造隶属于华北陆块, 处于燕山台褶带与内蒙地轴的过渡带。区内基底构造自北至南, 主要有近东西向康保—围场(F_1)、丰宁—隆化(F_2)、大庙—娘娘庙(F_3)、尚义—平泉深断裂(F_4)四大东西向断裂和北东向深大断裂上黄旗—乌龙沟深断裂(F_5)、平坊—桑园大断裂(F_6)和密云—兴隆—喜峰口(F_7)大断裂(图 1)。区内地层分布由北向南分别为第四系风成沙, 新近系汉诺坝玄武岩; 侏罗系和白垩系的中酸性流纹岩、凝灰岩、安山岩; 侏罗纪、二叠纪、石炭纪和新太古代花岗岩以及侏罗纪二长花岗岩、碱性花岗岩, 太古宙闪长岩、斜长岩杂岩体以及侏罗纪、二叠纪正长岩建造; 陆相砂

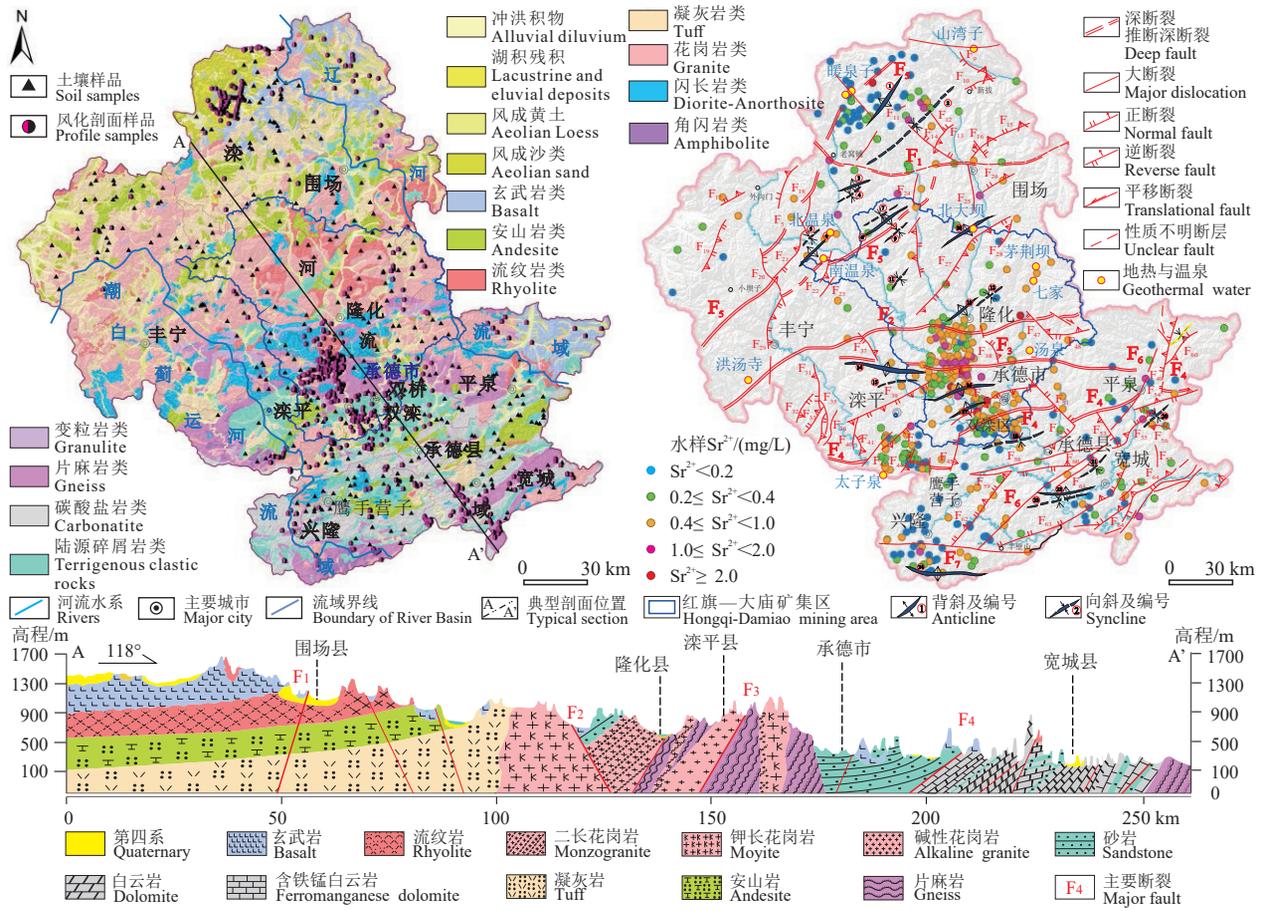


图 1 承德市地质建造分区, 样品采集与水样 Sr²⁺质量浓度与构造耦合分布图

Fig.1 Geological formation, sampling sites, and coupling distribution map of Sr²⁺ concentration in water samples with tectonic structures of Chengde City

砾岩、砂岩、页岩, 碳酸盐岩白云岩, 古元古界的片麻岩、片麻岩(王京彬等, 2020; 孙厚云等, 2020b)。承德属我国第二大型钒钛磁铁矿资源基地, 土地利用类型以林地、草地和耕地为主, 其中林地面积占 67.97%, 草地面积占 12.33%, 耕地面积占 10.89%, 另分布有工矿用地占比约 0.80%, 土壤类型以褐土、棕壤、粗骨土和潮土为主。承德市目前已初步构建起以文化旅游、钒钛制品、装备制造、食品医药、清洁能源五大主导产业体系, 矿泉水产业、特色生态农业、中药材种植产业发展前景良好。

3 材料与方法

3.1 样品采集与测试

根据区内土地质量地球化学调查和已有相关研究结论(孙厚云等, 2020a), 承德市中部大庙杂岩

体(斜长岩—辉长岩—角闪石岩)位于区域锶元素地球化学异常带上, 为阐明研究区内锶元素生态地球化学空间分异特征与异常成因, 本次样品采集分承德全区(主要为滦河流域)和典型研究区(红旗—大庙钒钛磁铁矿矿集区)(图 1)两个尺度开展, 野外采集的岩(土)矿样品包括承德全区表层土壤样品、岩石风化垂向土壤—风化壳—基岩剖面样品, 典型钒钛磁铁矿矿石样品、尾矿砂样品, 河谷第四系包气带垂向土壤样品。水样包括地下水、地表水和地热温泉水等。典型研究区内, 岩石(土壤)与浅层地下水样品布设采集进行了相应加密, 保障地球化学异常区的查证剖析, 具体样品采集分类与数量见表 1。承德全域采集不同建造单元内基岩—风化壳—土壤样品 1145 件, 另收集有全区 1:25 万化探扫面样品 11248 件(王京彬等, 2020), 采集表层土

表 1 承德市锶元素地球化学岩(土)与植物样品采集类型与数量

Table 1 Collection types and quantities of strontium geochemical rock (soil) and plant samples in Chengde City

样品类型	数量	总计	样品类型	数量	总计		
岩石风化剖面 BRS体系	斜长岩—辉长岩	17	其他岩土样品	红旗小流域深层土壤	26		
	斜长片麻岩—变粒岩	24		坝上地区风沙土	140		
	钾长片麻岩	15		全区黄土	24		
	花岗岩	201		钒钛磁铁矿—铁磷矿石	50	418	
	变质闪长岩	36		铅锌矿石	15		
	玄武岩	196		钒钛磁铁矿尾矿砂	68		
	安山岩	154		水系沉积物	95		
	流纹岩—凝灰岩	167		水质样品	滦河流域浅层地下水	167	
	陆源碎屑砂砾岩	98			承德全区地热温泉	40	
	长石石英砂岩	15			红旗—大庙小流域井	223	
	泥页岩	34			红旗—大庙小流域泉	28	892
	白云岩	168			红旗—大庙矿山废水	28	
	灰岩	20			红旗—大庙河水	83	
承德全区	376	滦平盆地等浅层地下水	323				
表层土壤 (0~20 cm)	承德滦河流域	351	植物样品	道地药材—黄芩	66		
	红旗—大庙小流域	181		其他植物样品	69	135	

壤共 557 件,其他岩土、矿石、尾矿砂、水系沉积物样品共 418 件。采集和收集水质样品 892 件,其中地热水样 40 件。植物样品以地理标志产品经济作物、大宗粮食作物和道地大宗药材为主,共 135 件,包括承德杏仁、国光苹果、京东板栗、山楂、核桃,隆泉大米、万寿菊、围场马铃薯,道地大宗药材黄芩、黄芪、桔梗、苦参、连翘、防风、板蓝根等;其中“热河黄芩”采集有 66 件,其他植物样品 69 件,另收集有区内其他植物样品锶含量数据若干。

岩(土)矿样品测试指标为 N、P、K₂O、CaO、MgO、S、TFe₂O₃、B、Mn、Cu、Zn、Mo、SiO₂、Na₂O、Sr、Ni、Se、Ge、Al₂O₃、TiO₂、Co、Cd、Cr、Pb、Ni、As、Hg、Rb、Nb、Ba、LOI 和稀土元素(La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu 和 Y);土壤样品和风化层样品加测土壤 pH、有机质(SOM)指标(过 10 目筛样品直接测试)。岩(土)矿样品和作物样品采集和前处理、分析测试按《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)要求的测试方法进行,元素分析测试仪器型号与检出限与文献孙厚云等(2020b)一致。水样采集保存和测试参照《水质样品的保存和管理技术规定》(HJ 493—2009)和《食品安全国家标准 饮用天然矿泉水检验方法》(GB 8538—2022)执行, Sr²⁺采用离子体发射光谱(ICAP6300)测试,检出限为 0.05 mg/L。植物样品主要测试指标为 Sr,采用

高分辨等离子体质谱仪(X series 2 / SN01831C)进行测试,检出限为 0.05 mg/kg。样品检测分析在河北省地质资源勘探开发与生态保护重点实验室(承德)完成,实验室分析测试过程中,不同指标分别添加 10% 空白样品和 20% 平行样品,土壤元素分析方法准确度和精密度采用国家一级土壤标准物质(GBW07349)控制,各指标的加标回收率均在国家标准参比物质的允许范围内。

3.2 数据分析方法

在样品测试分析基础上,利用 SPSS 对不同地质建造基岩—风化层—土壤(Bedrock-Regolith-Soil, BRS)体系,水系沉积物、不同水体和植物样品的 Sr 元素含量进行描述性统计。采用标准化方法厘定了承德全区和红旗—大庙小流域表层土壤的锶元素地球化学基线,采用化学损耗分数(Chemical Depletion Fraction, CDF)评价了锶元素在不同地质建造岩石化学风化过程中的迁聚、分散和富集特征。通过岩土样品主微量元素含量皮尔森相关分析(Pearson correlation coefficients, PCCs)和主成分分析(Principal component analysis, PCA),结合典型矿物电子探针、微区原位主微量元素分析,识别了研究区基岩 Sr 的特征寄主矿物,阐明了承德市锶元素异常的地球化学成因。采用生物富集系数(Bioconcentration Factor, BCF)评价了大宗道地药材黄芩—土壤体系的 Sr 元素迁聚特征,对比分析了承德特色作物与已有富锶作物的锶丰度差异。

3.2.1 化学损耗分数

化学损耗分数 CDF 可以很好地衡量岩石化学风化过程中元素的损益程度, 其计算方法为:

$$\text{CDF} = 1 - \frac{[X_i]_{\text{parent}}}{[X_i]_{\text{weathered}}} \quad (1)$$

式中: X_i , 土壤和基岩中相应元素的实测值; $[X_i]_{\text{parent}}$, 新鲜基岩中对应元素的含量; $[X_i]_{\text{weathered}}$, 风化壳层或土壤中对应元素的含量值。当 CDF 值 >0 时, 表明化学风化过程中元素相对富集; 当 CDF 值 <0 时, 表明化学风化过程中元素表现为淋滤亏损; 当元素 CDF=0 时, 表明该元素在风化过程中未发生明显的迁移(刘丛强等, 2007; 孙厚云等, 2020b)。

3.2.2 生物富集系数

土壤-作物系统中的 Sr 元素分配规律采用生物富集系数 BCF 来表征, 其计算方法为:

$$\text{BCF} = \frac{[X_i]_{\text{plant}}}{[X_i]_{\text{soil}}} \quad (2)$$

式中, $[X_i]_{\text{plant}}$ 和 $[X_i]_{\text{soil}}$ 分别表示作物样品和土壤样品中元素 i 的含量, 根据生物富集系数 BCF 值的大小, 可将中药材对土壤元素的摄取强度分为 4 个等级: BCF >1.0 时为强烈摄取, $0.1 < \text{BCF} \leq 1.0$ 时为中等摄取, $0.01 < \text{BCF} \leq 0.1$ 为微弱摄取, BCF < 0.01 时为极弱摄取(孙厚云等, 2021a)。

3.2.3 空间插值分析

本研究采用两种路径进行空间插值分析(孙厚云等, 2021b), 阐明基岩与土壤 Sr 元素的空间分异特征。路径一为基于地统计半方差函数模型的 GIS 普通克里金插值方法, 地统计分析采用 GS+ 9.0 完成; 路径二借助土地质量地球化学调查与评价数据管理与维护应用系统完成。基岩 Sr 含量空间分布图根据收集的区域 1:25 万化探数据成图(王京彬等, 2020), 插值图斑为地质建造(1:25 万区域地质图归并, 图 1)和微流域(DEM 流域分析)图斑, 赋值搜索半径设置为 500 m。土壤采样密度相对较小, 且分布不均, 在 GIS 地统计克里金插值分析的基础上, 同时采用地质建造图斑单元进行插值分析, 赋值搜索半径设置为 2000 m, 通过图层属性的空间分异, 识别元素分布的空间差异。

4 锶元素地球化学基线与分布特征

4.1 土壤 Sr 元素地球化学基线

4.1.1 土壤 Sr 元素地球化学基线的厘定

本次研究根据参比元素标准化方法厘定承德市全区和红旗—大庙钒钛磁铁矿矿集区小流域表层土壤的锶元素地球化学基线。根据样品采集整理出承德全区表层土壤样品共计 541 件, 红旗—大庙小流域表层土壤样品 71 件。将承德全区和典型研究区土壤样品 Sr 元素含量与常用参比元素 Li、Ce、Sc、Ti、V、Rb、Cs、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、Zr、Nb、La、Eu 和 Sm(孙厚云等, 2021b)含量分析数据进行显著性检验, 将置信限 95% 以外的点剔除后, 通过 Pearson 相关分析, 计算 Sr 元素与参比元素的相关系数, 选取相关性较好的作为参比元素。经过相关系数对比筛选后, 采用 Sc、 Fe_2O_3 、La、Eu 作为参比元素。确定参比元素后, 利用置信限 95% 内测试数据进行回归分析(图 2), 建立 Sr 元素含量与标准元素含量的回归方程, 将标准元素含量(95% 置信限内)的平均值代入回归方程, 即得到 Sr 元素的地球化学基线值(表 2)。经过计算, 承德市全区表层土壤 Sr 元素地球化学基线值为 206.87~216.49 mg/kg, 红旗—大庙一带钒钛磁铁矿矿集区小流域表层土壤 Sr 元素地球化学基线值为 241.69~260.51 mg/kg。

4.1.2 富锶土壤标准的探讨

目前富锶土壤的划定尚无统一标准, 仅有部分地区根据全国土壤 Sr 背景值对富锶土壤资源等级进行了划分。根据已有研究, 不同介质 Sr 元素丰度为大陆地壳中 480 mg/kg(Wedepohl, 1995)、表层土壤中 170 mg/kg(迟清华和鄢明才, 2007), 全国土壤 Sr 元素地球化学背景基准值为 197 mg/kg(王学求等, 2016), 中国土壤 A 层 Sr 元素背景值为 165 mg/kg, 土壤 C 层 Sr 元素背景值为 170 mg/kg(中国环境监测总站, 1990), 剔除异常值后全国表层土壤与深层土壤 Sr 含量算数平均值分别为 148 mg/kg($n=372020$)和 152 mg/kg($n=94459$)(侯青叶等, 2020), 中国第二环境土壤 Sr 含量背景值为 148 mg/kg(奚小环等, 2021); 水系沉积物中 Sr 含量算数平均值为 146 mg/kg($n=1285107$)(史长义等, 2016), 浅海沉积物中 Sr 平均含量为 230 mg/kg(赵一阳和鄢明

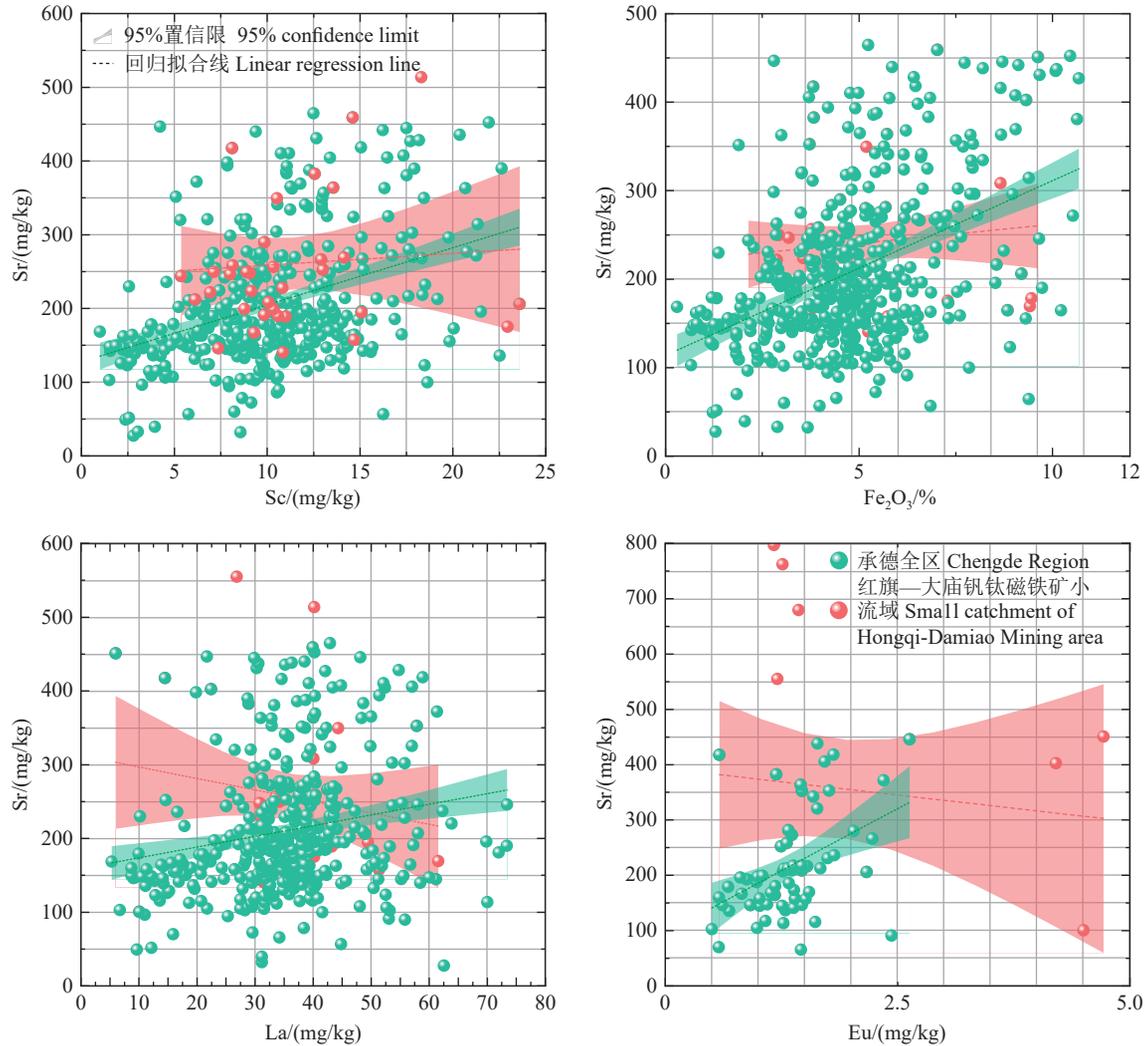


图2 承德全区、典型研究区表层土壤锶与其参比元素 95% 置信限内的回归曲线

Fig.2 Regression curves for strontium and their respective normalizers within 95% confidence intervals in surface soils

表2 标准化方法确定的土壤 Sr 元素化学基线 (mg/kg)

Table 2 Geochemical baseline value of soil strontium determined by standardization method (mg/kg)

元素	承德全区 (n=541)				红旗—大庙钽磁铁矿矿区流域 (n=71)			
	回归方程	R ²	P	基线值	回归方程	R ²	P	基线值
Sr	Sr = 7.741Sc+127.76	0.153	0.01	206.871	Sr = 1.604Sc+242.64	0.624	0.01	260.513
	Sr = 19.746Fe ₂ O ₃ +113.87	0.192	0.01	209.243	Sr = 4.277Fe ₂ O ₃ +218.94	0.012	0.01	241.693
	Sr = 1.452La+159.16	0.039	0.01	210.473	Sr = -1.554La+312.37	0.026	0.01	257.996
	Sr = 89.620Eu+96.40	0.185	0.01	216.494	Sr = -22.200Eu+393.48	0.004	0.01	353.298

才, 1994)。研究区下游黄淮海平原土壤 Sr 元素生态地球化学基准值为 177 mg/kg (n=219), 在我国九大平原中仅次于松辽平原 (231 mg/kg, n=138), 远高于长江三角洲平原地区 (117 mg/kg, n=57) (朱立新, 2006)。

王东晓等 (2023) 参照土壤锶背景值和锶生态景

观土壤分级值, 结合河南省土壤锶含量将河南固始地区土壤富锶标准确定为 205 mg/kg; 胡江龙等 (2019) 根据全国土壤 A 层 Sr 背景值和 C 层 Sr 背景值, 结合表层土壤和深层土壤 Sr 平均含量, 将湖北随州北部富锶土壤标准限值确定为 200 mg/kg。参照类似地球化学数据统计方法, 曹艳玲等 (2021)

将山东省菏泽地区富锶土壤标准限值确定为 204 mg/kg, 刘军帅等(2022)将山西大同桑干河流域富锶土壤标准限值确定为 240 mg/kg。通过对比分析可知, 承德全域表层土壤 Sr 的地球化学基线值(206.87~216.49 mg/kg)相对高于中国土壤 Sr 元素背景值(中国环境监测总站, 1990), 第二环境土壤背景值, 全国土壤 A 层和 C 层 Sr 元素背景值, 黄淮海平原土壤 Sr 元素生态地球化学基准值, 与剔除异常值后的河北省表层土壤与深层土壤 Sr 含量算数平均值 203 mg/kg($n=23162$)和 206 mg/kg($n=6132$)(侯青叶等, 2020), 华北克拉通表层土壤 Sr 含量(222 mg/kg, $n=613$)及深层土壤 Sr 含量(220 mg/kg, $n=613$)中位数(王学求等, 2021), 河南固始、湖北随州、山东菏泽富锶土壤标准限值相近, 但低于山西大同桑干河流域富锶土壤标准限值。与此同时, 红旗—大庙一带钒钛磁铁矿矿区小流域表层土壤 Sr 元素地球化学基线值(241.69~260.51 mg/kg)与山西大同桑干河流域富锶土壤标准限值、华北克拉通表层土壤(248 mg/kg, $n=613$)与深层土壤 Sr 含量算术平均值(252 mg/kg, $n=613$)(王学求等, 2021)相近, 高于承德全域土壤 Sr 地球化学基线值、河北省表层土壤与深层土壤 Sr 含量算数平均值(侯青叶等, 2020)和其他地区富锶土壤标准限值, 可能与元素环境地球化学基线的流域尺度效应有关, 在相对靠近元素异常中心的空间尺度相对较小流域内, 元素地球化学基线值相对较高(孙厚云等, 2021b)。综上所述, 在承德范围内划定土壤富锶标准时, 采用表层土壤 Sr 含量地球化学基线值相对较为科学适用。

4.2 土壤 Sr 元素总体含量特征

承德全区表层土壤 Sr 含量范围为 10.02~8621.0 mg/kg, 平均含量为 514.59 mg/kg, 远高于大陆上地壳和不同介质 Sr 元素平均含量, 是中国土壤 A 层 Sr 背景值(165 mg/kg)的 3.12 倍, 亦相对高于湖北随州中酸性火山岩成土母岩区表层土壤(263.4 mg/kg)和深层土壤(252.74 mg/kg) Sr 平均含量(胡江龙等, 2019), 山东省菏泽定陶地区表层土壤(225.69 mg/kg)和深层土壤(222.82 mg/kg) Sr 平均含量(曹艳玲等, 2021), 山西大同桑干河流域前寒武纪变质岩成土母质土壤 Sr 含量平均值 261.7 mg/kg(刘军帅等, 2022)及山东省沂源县富锶苹果产区土

壤样品中 Sr 平均含量 160.0 mg/kg(韩娟和郭燕枝, 2022)。根据不同富锶土壤标准评价统计可知, 承德全区 68.10% 土壤样品 Sr 含量超过中国土壤 A 层 Sr 背景值; 65.48% 土壤样品 Sr 含量超过黄淮海平原土壤生态地球化学基准值 177 mg/kg; 61.91% 土壤样品 Sr 含量超过湖北随州和山东菏泽土壤富锶标准限值 200 mg/kg; 59.05% 的土壤样品 Sr 含量超过承德全区土壤 Sr 元素地球化学基线值 216.49 mg/kg; 31.05% 的土壤样品超过红旗—大庙岩体成土母质区土壤 Sr 元素地球化学基线值 260.51 mg/kg。

从空间分布上来看(图 3a、b), 承德全区土壤 Sr 高异常区主要分布于三处: 一处为承德北部康保—围场深大断裂(F_1)及黄旗—乌龙沟断裂以北, 成土母质地质建造为汉诺坝玄武岩和晚侏罗世张家口安山岩—凝灰岩—流纹岩建造和早白垩世义县安山岩—粗安岩建造。一处为丰宁—隆化(F_2)和凤山—太平庄—波罗诺—红旗一带的大庙—娘娘庙(F_3)深大断裂交汇韧性剪切带周围。由于流域侵蚀风化、水力搬运和人为扰动, 土壤 Sr 元素异常区的浓集范围相对高于基岩 Sr 异常范围。大庙斜长杂岩体辉长岩—斜长岩地质建造成土母岩区是土壤 Sr 的浓集中心之一。丰宁至隆化北侧郭家屯至韩家店一带存在一处土壤 Sr 富集中心, 其下伏基岩地质建造为古元古代丰宁变质花岗岩系列和波罗诺变质闪长岩系列, 包括变质二长花岗岩、变质巨斑二长花岗岩、变质花岗闪长岩、变质石英二长闪长岩。第三处为承德南部兴隆—鹰手营子—承德县—宽城地区尚义—平泉深大断裂一带。

另外, 研究区其他锶潜在来源环境介质 Sr 元素丰度均相对较高(表 3)。承德全区马兰黄土 Sr 含量范围为 23.24~315.80 mg/kg, 平均为 186.97 mg/kg。丰宁至围场坝上一带风积粉细砂 Sr 含量范围为 92.47~1138.0 mg/kg, 平均为 152.93 mg/kg。哈叭沁—铁马—红旗河谷第四系包气带深层土壤 Sr 含量范围为 179.60~368.90 mg/kg, 平均为 233.74 mg/kg, 是中国土壤 C 层 Sr 背景值(170 mg/kg)的 1.37 倍。研究区钒钛磁铁矿矿石 Sr 含量范围为 64.11~4486.0 mg/kg, 平均为 811.59 mg/kg。流域尺度上, 典型研究区红旗—大庙钒钛磁铁矿矿区小流域滦河干流、伊逊河干流和哈叭沁川支流水系沉积物 Sr 平均含量分别为 249.48 mg/kg、327.69 mg/kg

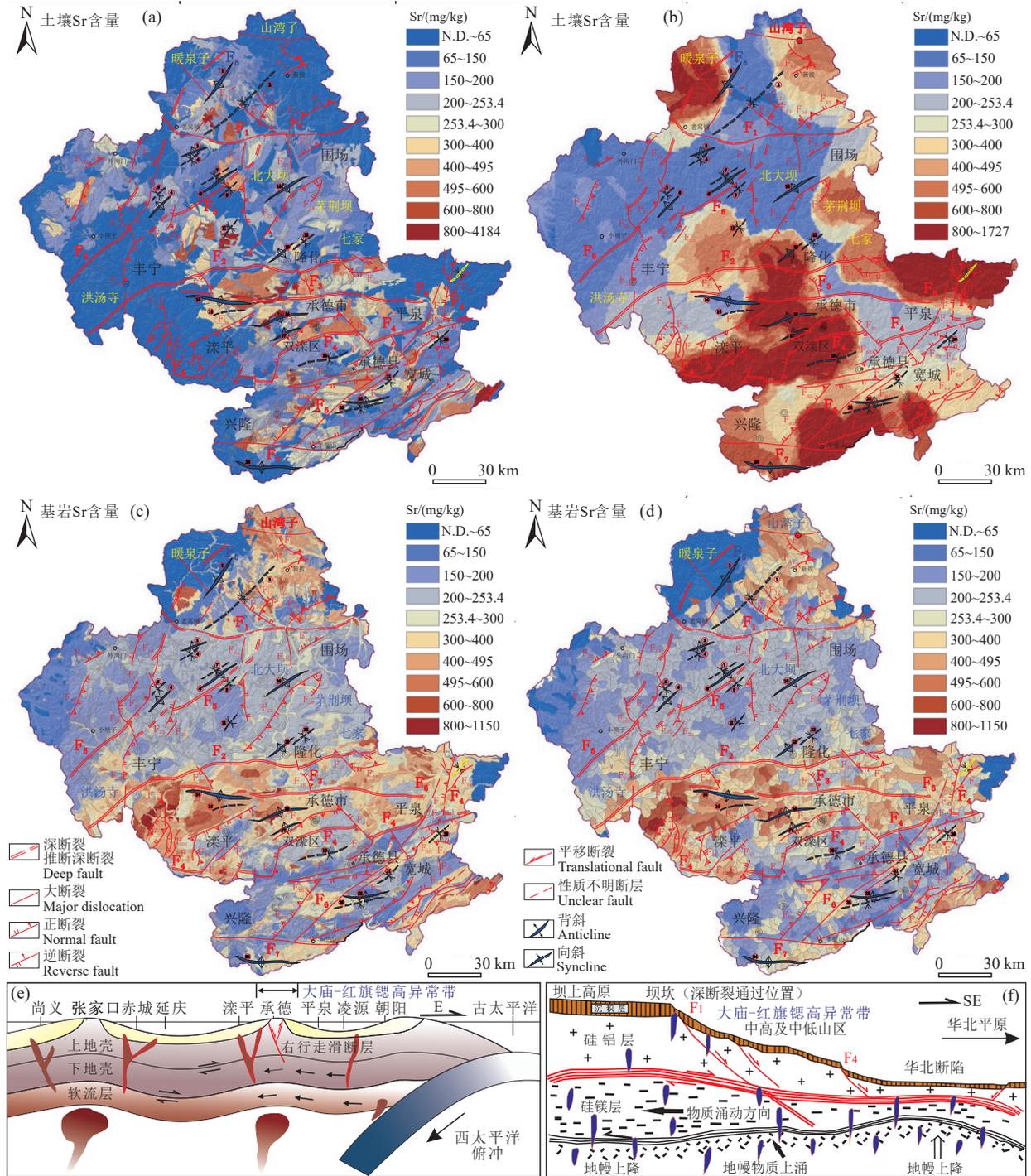


图3 承德市全域基岩和土壤 Sr 含量空间分布图及构造演化动力学模型

a—土壤样品地质建造图斑赋值(插值半径 2000 m); b—土壤样品地统计普通克里金插值; c, d—化探数据地质建造和微流域图斑赋值(插值半径 2000 m); e—承德—张家口构造盆地—燕山板内造山带逆冲推覆构造演化动力学模型(许欢等, 2011); f—承德区内新构造运动演化趋势图(Sun et al., 2023)

Fig.3 Spatial distribution of Sr content in bedrock and soil, and constructing evolutionary dynamics models of Chengde City
 a—Polygon value assignment of Sr content in soil samples based on geological formation (interpolation radius: 2000 m); b—Ordinary Kriging geostatistical interpolation of Sr content in soil samples; c, d— Geochemical value assignment of Sr content in bedrock to geological formation and micro-watershed polygons (interpolation radius: 2000 m); e—dynamical basin evolution model of thrust and nappe tectonics in Yinshan–Yanshan uplift areas (Chengde–Zhangjiakou) (Xu Huan et al., 2011); f—Neotectonic movement evolution trend map of Chengde region (Sun et al., 2023)

表 3 承德地区不同地质建造成土母质区典型剖面岩石—风化层—土壤系统及其他环境介质 Sr 丰度统计特征
 Table 3 Strontium abundance of bedrock—regolith—soil samples in typical weathering profiles of different geological formations and other environmental medias in Chengde area

分层	土壤						风化层						基岩						CDF		华北克拉通
	Min	Max	Mean	Cv	Min	Max	Mean	Cv	Min	Max	Mean	Cv	Min	Max	Mean	Cv	S-P	R-P	Mean	Baseline	
斜长岩—辉长岩	196.10	1301.00	536.40	0.815	237.30	1594.00	672.25	0.593	447.50	3289.00	1289.13	0.692	-1.40	-0.92	486.0	305.0					
斜长片麻岩—变粒岩	57.67	949.90	354.52	0.533	67.40	1364.00	388.20	0.651	27.72	1354.00	493.21	0.612	-0.39	-0.27	319.0~432.0	288.0~411.0					
钾长片麻岩	265.80	698.60	469.17	0.464	163.50	929.70	564.62	0.514	148.00	884.10	372.60	0.839	0.21	0.34	432.0	411.0					
安山岩类	32.86	1000.00	386.69	0.667	21.79	1598.00	662.62	0.645	22.27	1638.00	658.32	0.742	-0.70	0.01	614.0	614.0					
流纹岩—凝灰岩类	27.53	584.30	186.74	0.407	14.62	1976.00	221.66	1.560	14.10	8621.00	401.18	2.820	-1.15	-0.81	211.0~293.0	195.0~205.0					
变质闪长岩	171.90	1077.00	594.67	0.473	125.00	1477.00	738.29	0.446	97.31	1527.00	891.55	0.463	-0.50	-0.21	721.0	568.0					
花岗岩类	100.30	1365.00	357.61	0.698	57.10	3977.00	513.78	0.985	28.18	1966.00	472.49	0.897	-0.32	0.08	298.0	263.0					
陆源碎屑岩	69.60	790.10	268.74	0.582	39.49	980.80	322.07	0.776	10.02	928.00	395.45	0.700	-0.47	-0.23	391.0	283.0					
长英质砂岩	130.70	511.30	255.97	0.570	75.30	618.30	296.27	0.854	89.96	711.20	312.19	1.109	-0.22	-0.05	284.0	233.0					
泥页岩	32.52	251.90	130.80	0.488	35.29	161.80	71.56	0.558	41.03	157.70	95.16	0.466	0.27	-0.33	169.0	142.0					
玄武岩	132.70	994.80	276.60	0.560	119.30	2087.00	471.33	0.700	28.90	3016.00	643.13	0.736	-1.33	-0.36	602.0	548.0					
白云岩	48.78	299.10	127.51	0.428	18.97	304.70	69.70	0.768	17.25	317.70	60.37	1.026	0.53	0.13	67.0	63.0					
灰岩	97.20	124.30	111.67	0.077	97.00	253.90	137.68	0.563	169.20	374.50	251.80	0.430	-1.25	-0.83	286.0	271.0					
其他	钒钛磁铁矿—石 (n=50)																		地壳		
	64.11	4486.00	811.59	1.263	110.60	1049.00	457.21	0.411	179.60	368.90	233.74	0.165	中国东部大陆地壳			480.0					
	黄士 (n=24)																		全国土壤背景值		
	23.24	315.80	186.97	0.347	92.47	1138.00	152.93	0.732	钒钛磁铁矿—尾矿砂 (n=68)			0.165	黄淮海平原土壤			177.0					
水系沉积物	滦河干流																		水系沉积物		
	247.60	251.30	249.48	0.006	161.40	985.40	327.69	0.462	伊逊河干流			0.203	哈叭沁—铁马支流			146.0					
	坝上高原孔隙裂隙水 (n=35)																		浅海沉积物		
	0.04	2.28	0.30	1.460	0.07	0.98	0.46	0.540	燕山山地滦河中游裂隙水 (n=68)			0.203	滦河中游孔隙岩溶裂隙水 (n=64)			230.0					
承德滦河	井 (n=223)																		地热温泉 (n=40)		
流域	0.04	2.28	0.30	1.460	0.07	0.98	0.46	0.540	泉 (n=28)			0.850	地表水 (n=83)			0.78					
水环境	红旗—大庙																		矿山废水 (n=28)		
	0.09	9.49	0.82	1.227	0.13	1.69	0.58	0.734	地表水 (n=83)			0.610	地表水 (n=28)			1.85					

注: Min表示最小值; Max表示最大值; Mean表示均值; Cv表示变异系数; CDF—Chemical Depletion Fraction, 化学损耗分数; S-P (Soil-Parent material) 表示土壤相对于成土母质化学损耗分数; R-P (Regolith-Parent material) 表示风化层相对于成土母质化学损耗分数; Sr含量单位为mg/kg。

和 586.07 mg/kg, 均相对高于全国水系沉积物 Sr 平均含量 146.0 mg/kg 和东部浅海沉积物 Sr 含量 230.0 mg/kg(史长义等, 2016; 王学求等, 2021)。水系沉积物 Sr 含量随流域汇水面积的减小呈逐渐升高特征, 与土壤 Sr 元素地球化学基线值的流域尺度效应相一致。

4.3 不同建造岩石-风化层-土壤元素含量特征

4.3.1 不同建造土壤 Sr 元素含量特征

根据表 3, 区内不同地质建造区表层土壤 Sr 平均含量大小关系为变质闪长岩>斜长岩—辉长岩>钾长片麻岩>安山岩>花岗岩>斜长片麻岩—变粒岩>玄武岩>陆源碎屑砂岩>长英质砂岩>流纹岩—凝灰岩>泥页岩>白云岩>灰岩。变质闪长岩风化土壤 Sr 元素含量最高, 范围为 171.90~1077.0 mg/kg, 平均值达 594.67 mg/kg; 其次为滦平至隆化双滦红旗—大庙一带钒钛磁铁矿周边斜长—辉长岩风化土壤, 表层土壤 Sr 元素含量为 196.10~1301.0 mg/kg, 平均为 536.40 mg/kg。钾长片麻岩建造区土壤 Sr 含量范围为 265.80~698.60 mg/kg, 平均为 469.17 mg/kg。安山岩、花岗岩、斜长片麻岩—变粒岩建造区土壤 Sr 平均含量较为相近, 分别为 386.69 mg/kg、357.61 mg/kg 和 354.52 mg/kg。玄武岩、陆源碎屑岩和长英质砂岩 Sr 含量相近, 分别为 276.60 mg/kg、268.74 mg/kg 和 255.97 mg/kg, 与长石类矿物风化过程中 Sr 的淋滤亏损释出有关(White et al., 2008)。承德南部兴隆至宽城碳酸盐岩及其泥页岩夹层土壤 Sr 含量相对较低, 平均在 11.67~130.80 mg/kg。

4.3.2 不同建造岩石 Sr 元素含量特征

中国锶元素地球化学基准图(王学求等, 2021)表明, 我国锶元素地质高背景区(以累积频率 85% 为异常下限圈定)主要分布在天山—兴蒙造山带、华北克拉通北部、塔里木克拉通上。研究区承德中部位于华北克拉通北部 Sr 高背景区, 异常区内 Sr 元素含量范围为 175.0~801.0 mg/kg, 平均为 356.0 mg/kg($n=58$)。对研究区 471 组基岩样品分析结果进行统计表明, 研究区基岩 Sr 元素含量范围为 14.86~8621.0 mg/kg, 平均为 546.57 mg/kg, 远高于不同学者给出的研究区及周边大陆地壳 Sr 元素丰度值, 如中国中东部大陆地壳 Sr 丰度值 285 mg/kg(高山等, 1999), 中国东部大陆地壳 Sr 丰度值 350 mg/kg(鄯明才和迟清华, 1997)及 480 mg/kg

(黎彤, 1976), 全球大陆地壳 Sr 丰度为 150 mg/kg(Goldschmidt, 1933, 1954)、340 mg/kg(Vinogradov, 1962), 375 mg/kg(Taylor, 1964)、260 mg/kg(Taylor and McLennan, 1985)、333 mg/kg(Wedepohl, 1995)、320 mg/kg(Rudnick and Gao, 2003), 华北克拉通北部基岩 Sr 元素平均值 356.0 mg/kg(王学求等, 2021)。

分类统计不同地质建造基岩样品 Sr 元素丰度特征(表 3), 结果表明, 基岩 Sr 元素丰度斜长—辉长岩>变质闪长岩>安山岩>玄武岩>斜长片麻岩—变粒岩>花岗岩>流纹岩—凝灰岩类>陆源碎屑岩>钾长片麻岩>长英质砂岩>灰岩>泥页岩>白云岩, 与华北克拉通高锶异常区不同地层岩石 Sr 的丰度排序(太古宇>古近系和新近系>石炭系>白垩系>二叠系>侏罗系>三叠系>泥盆系>奥陶系>志留系>寒武系>元古宇)总体一致(王学求等, 2021)。研究区斜长岩—辉长岩体 Sr 元素含量范围为 447.50~3289.00 mg/kg, 平均含量达 1289.13 mg/kg; 变质闪长岩基岩 Sr 元素平均含量为 891.55 mg/kg(97.31~1527.0 mg/kg), 与相邻区域高锶花岗岩 Sr 含量相近。华北克拉通北缘中生代高锶花岗岩 Sr 平均含量为 740.42 mg/kg(229.1~1829.25 mg/kg)(刘红涛等, 2002), 冀北中生代高锶花岗岩 Sr 平均含量为 764.48 mg/kg(335~1292.5 mg/kg)(李承东等, 2004), 远高于非高锶花岗岩 Sr 一般低于 100 mg/kg)。安山岩与玄武岩基岩 Sr 元素含量较为接近, 平均分别为 658.32 mg/kg 和 643.13 mg/kg; 斜长片麻岩—变粒岩与花岗岩 Sr 平均含量较为相近, 分别为 493.21 mg/kg 和 401.18 mg/kg, 与区内太古代斜长片麻岩—变粒岩变质基底为花岗岩, 变质相为麻粒岩相—角闪岩相有关。火山岩建造流纹岩—凝灰岩, 陆源碎屑砂砾岩 Sr 元素平均含量相近, 分别为 401.18 mg/kg 和 395.45 mg/kg。由于火山岩特殊的成岩韵律旋回使得岩石胶结结构和矿物成分分异明显, 使得流纹岩—凝灰岩建造的岩石 Sr 含量分异明显, 变异系数相对最大, 达 2.82。由于火山岩成岩过程中存在化学组分变化与再循环等后生作用过程, 使得火山岩基质斑晶矿物成分相对不均一(孙厚云等, 2021a), 火山岩建造流纹岩—凝灰岩基岩 Sr 元素含量分异较为明显。钾长片麻岩、长英质砂岩 Sr 平均含量分别为 372.60 mg/kg 和 312.19 mg/kg, 与其岩石矿物主要以石英和钾长石

组成有关。灰岩、白云岩和泥页岩主要分布于承德南部兴隆—宽城一带, 基岩 Sr 含量相对火成岩建造明显偏低, 平均分别为 251.80 mg/kg、95.16 mg/kg 和 60.37 mg/kg。研究区中元古代长城—蓟县系碳酸盐岩为一套未变质或轻变质的地台型海相富镁碳酸盐岩, 基岩 Sr 含量相对低于南方碳酸盐岩。

结合区域地质构造和基岩 Sr 元素空间分布关系(图 3c、d)来看, 承德市基岩 Sr 含量空间分异与区域构造格架具有良好的耦合关系, Sr 高异常区位于承德北部坝上康保—围场深大断裂(F_1)以北, 承德中部丰宁—隆化(F_2)和红石砬—大庙—娘娘庙(F_3)深大断裂之间的广大区域以及承德东部尚义—平泉深大断裂(F_4)周边逆冲带区域内(图 3e、f), 构造运动伴随的岩浆分异结晶影响着地层 Sr 元素含量分布特征。基岩 Sr 异常中心位于滦平盆地东北侧的丰宁—隆化(F_2)和凤山—太平庄—波罗诺—红旗一带的大庙—娘娘庙(F_3)深大断裂交汇韧性剪切带周围。丰宁—隆化断裂与其南侧的大庙—娘娘庙断裂, 是古生代晚期到中生代早期形成的低角度向南逆冲的较大规模的逆冲构造系统(万加亮, 2012)。东西向深断裂带对区域成岩地质建造起到主导作用, 沿断裂带分布有 140 多个不同时代侵入的基性—超基性岩体, 形成一条与断裂带近于平行的近东西向的岩浆岩带。燕山运动期间区域内中生代地壳的强烈构造伸展、岩浆活动伴随着板内造山带晚侏罗世强烈的逆冲和褶皱变形和岩石圈的减薄。深大断裂空间展布延伸普遍达上百千米, 与冀北基底太古宇隆起带相接, 部分深入至硅镁层或上地幔(图 3f), 使得断裂间富锶的太古宇基底物质上涌出露(刘健, 2006; 许欢等, 2011; 万加亮, 2012)。丰宁—隆化断裂与大庙—娘娘庙断裂带中间的韧性剪切带区域中新元古—古生界沉积盖层普遍发育, 并发生了强烈的褶皱和冲断。宏观上沿断裂发育有与燕山褶皱冲断带地层层序和主要岩性基本相同的中元古界, 中元古界地层的厚度与燕山中南部兴隆—蓟县一带相比显著变薄(Ren et al., 2002; Liu et al., 2019), 使得岩石 Sr 元素含量空间分布上相对较高。太古宇变质基底古老花岗岩由铷同位素衰变导致的 Sr 含量放射性内生长亦可能是丰宁—隆化断裂与大庙—娘娘庙深断裂交汇处岩体 Sr 元素含量高异常的原因之一(王萌,

2014; He et al., 2016; Li et al., 2019)。

综上所述, 研究区位于华北克拉通北部 Sr 高背景区, 基岩锶的平均丰度高于大陆上地壳中锶平均丰度, 土壤锶含量高于全国土壤锶背景值, 表层土壤 Sr 高异常区与基岩 Sr 高异常区的分布一致但相对更为分散。基岩和土壤 Sr 元素的地球化学基线值具有流域尺度效应, 随着评价区域空间尺度的缩小, 即全国表层—一级流域海河流域(河北省背景值)—二级流域滦河流域—三级流域伊逊河流域(红旗—大庙矿集区流域), Sr 元素基线值逐渐升高, 呈现出累积效应, 与区域矿致异常元素铁族元素 V、Ti、Co、Ni 和 Cr 等环境地球化学基线值的升高趋势相一致(孙厚云等, 2021b), 表明典型研究区内基岩—土壤 Sr 元素的浓集异常与大庙斜长岩体密切相关。斜长—辉长岩、变质闪长岩、安山岩、玄武岩、斜长片麻岩—变粒岩、花岗岩、流纹岩—凝灰岩与陆源碎屑岩地质建造区 BRS 体系均具有较高的 Sr 丰度, 为表层生态系统, 人类农林生产提供了丰富的锶物质来源。

4.3.3 岩石风化 Sr 元素化学损耗

岩石风化过程中 Sr 属于淋溶元素, Sr 的地球化学行为与 Ca 相似, 但不易淀积, 化学风化过程中 Sr 的地球化学活动性在碱金属和碱土金属元素中相对较高(马英军, 1999; 顾尚义, 2001)。根据表 3 可知, 承德地区土壤层相对基岩 Sr 元素化学损耗分数 CDF 大小关系为: 斜长—辉长岩 < 玄武岩 < 灰岩 < 流纹岩—凝灰岩 < 安山岩 < 变质闪长岩 < 陆源碎屑砂岩 < 片麻岩—变粒岩 < 花岗岩 < 长英质砂岩 < 0 < 钾长片麻岩 < 泥页岩 < 白云岩。除钾长片麻岩、白云岩和泥页岩外, 表层土壤层相对基岩层 Sr 元素总体均表现为淋滤流失。斜长岩—辉长岩地质建造区土壤层相对基岩 Sr 元素平均化学损耗分数 CDF 值为 -1.40, 相对最小, 化学风化过程中斜长岩—辉长岩 Sr 元素淋滤亏损强度相对最大。其次为玄武岩和灰岩建造区, CDF 值分别为 -1.33 和 -1.25, 这可能与岩石的矿物组成及其风化敏感性有关。根据矿物风化敏感性, 大庙斜长岩体辉石、斜长石、角闪石等矿物含量较高, 玄武岩主要以斜长石、橄榄石组成(Sun et al., 2025), 而碳酸盐岩矿物的风化水解为全等一致溶解, 故风化过程中 Sr 元素淋滤亏损强度相对最大。

另外,风化层相对基岩 Sr 元素 CDF 平均值大小关系为:斜长岩—辉长岩<灰岩<流纹岩—凝灰岩<玄武岩<泥页岩<斜长片麻岩—变粒岩<陆源碎屑岩<变质闪长岩<长英质砂岩<0<安山岩<花岗岩<白云岩<钾长片麻岩(表 3)。安山岩、花岗岩、白云岩和钾长片麻岩风化剖面的风化前锋,即风化壳与土壤界面一定程度上存在 Sr 元素的次生富集。与土壤层—基岩 Sr 元素迁聚特征相比,白云岩和钾长片麻岩建造区的土壤和风化层 Sr 元素均相对基岩表现为富集,钾长片麻岩化学风化过程中 Sr 元素较难从矿物晶格中释出。白云岩为泥晶—粉晶白云岩,为初次沉积,受后生作用影响较小;但沉积分选使得部分夹层矿物易风化矿物沉积,从而导致某些微量元素富集(Wei et al., 2022)。

在安山岩、花岗岩典型风化剖面中,风化层 Sr 元素较基岩表现为相对富集,土壤层相对基岩表现为淋滤流失,这与安山岩、花岗岩的岩石结构、矿物组成、矿物风化敏感程度有关。安山岩属中性的钙碱性喷出岩,为致密块状—斑状结构,斑晶主要为斜长石及暗色矿物,斜长石以中长石、拉长石为主,常具环带及熔蚀结构(孙厚云等, 2021a);石英(52%~63%)和铁氧化物含量相对较高, Sr 元素的淋滤迁移受到火山碎屑岩铁(羟)氧化物膜固定吸附影响,土壤层和风化壳发育深度较小,化学风化活动性相对较弱,土壤层与基岩层地球化学特征分异明显,风化前锋(即土壤层与风化壳界面)易发生元素和矿物次生淋溶富集(顾尚义, 2001)。花岗岩风化剖面中, Sr 的地球化学分布类似于 Ca, Sr 总是随着岩石风化程度的增高而减少,因为 Sr 的半径大而使 Sr 比 Ca 更容易被置换到黏土矿物中(White et al., 2008)。斜长岩—辉长岩、流纹岩—凝灰岩、玄武岩风化层相对基岩 Sr 元素化学损耗分数分别为 -0.92、-0.81 和 0.36(表 3),化学风化过程,暗色矿物(斜长石(富钙系列)、辉石(富钙系列)、橄榄石、角闪石等)含量较高的斜长岩—辉长岩仍为 Sr 淋滤最为明显的地质建造。流纹岩—凝灰岩由于岩石结构的不均一性,表现为土壤—风化壳—基岩 Sr 元素的垂向异质性最为明显。安山岩与花岗岩石英含量相对较高,花岗岩和钾长片麻岩中钾长石含量一般较斜长石多,这可能是这三类岩石风化过程中 Sr 元素表现出一定程度的相对富集的原因。

结合已有研究和研究区内不同地质建造典型风化剖面岩石矿物组成和元素含量垂向变化特征,研究区岩石风化过程中 Sr 的淋滤释放主要由斜长石非全等溶解主导,受暗色矿物辉石、橄榄石和角闪石全等溶解、硫化物金属矿物氧化产酸影响,酸性介质环境下, Sr 的淋滤释出强度相对更高。与此同时,风化过程中磷灰石的风化溶解和次生淀积固定,钾长石、黑云母经钾交代和盐基淋溶作用形成伊利石和白云母、次生方解石和白云石的形成也影响着元素质量迁移活性,但其对 Ca 的质量迁移影响明显高于 Sr。

4.4 锶的特征寄主矿物识别与高锶异常地球化学成因

通过全岩主微量元素含量数据相关分析和主成分分析,结合收集的研究区岩石典型矿物电子探针、微区原位主微量元素分析结果,识别 Sr 的特征寄主矿物,阐明锶元素异常的地球化学成因。

4.4.1 锶的特征寄主矿物识别与丰度特征

由承德市滦河流域 351 件表层土壤元素分析数据进行因子分析提取的 2 个主成分 PC1 和 PC2 特征值方差分别为 23.23% 和 15.54%。典型研究区红旗—大庙钒钛磁铁矿矿集区 229 件表层土壤样品元素分析数据因子分析提取的 2 个主成分 PC1 和 PC2 特征值方差分别为 27.90% 和 18.30%; 266 件基岩样品则分别为 28.03% 和 13.17%, 均可有效的解释分析变量(图 4)。

承德滦河流域表层土壤 Sr 含量与碱土金属及铁族元素含量呈显著的正相关关系(图 4a)。Sr 与 Na_2O 、 Al_2O_3 、 CaO 和 MgO 的相关系数分别为 0.511、0.232、0.111 和 0.181($p < 0.01$), 与 SiO_2 和 K_2O 呈负相关关系, 相关系数分别为 -0.307 和 -0.280($p < 0.01$)。一定程度上表明, 土壤中 Sr 主要以 Ca 的类质同象形式存在; 而钾长石含量较高的土壤, Sr 含量相对较低。与此同时, Sr 与 P 及铁族元素(Fe、Ti、V、Co、Cr), 即钒钛磁铁矿—铁磷矿床矿致异常元素相关关系较显著。Sr 与 P 相关系数达 0.586, 与 Fe_2O_3 、Ti、V、Co、Cr 相关系数分别为 0.389、0.484、0.478、0.497 和 0.292, 表明 Sr 除存在于斜长石中以外, 还可能存在于辉石、磷灰石等矿物中, 或以铁锰吸附结合态形式存在于土壤中(王东晓等, 2023)。另一方面, Sr 与 TC 和 Corg 呈负相关关系, 相关系数分别为 -0.249 和 -0.207, 表明腐殖质—腐

殖酸存在环境下不利于土壤 Sr 的固定, Sr 较少以腐殖酸结合态形式存在, 酸性环境有利于岩石—风化壳—土壤中 Sr 的释出。

主成分分析结果表明, 红旗—大庙钒钛磁铁矿矿集区土壤中 Sr 与 CaO、MgO、P 和铁族元素 (Fe₂O₃、Ti、V、Ni、Mn、Co) 为一组, 且 Sr、Na₂O、Ba 与第二轴呈一定的正相关关系 (图 4b)。土壤中 Sr 与 P 显著相关, 相关系数为 0.636; 与 CaO、Na₂O、pH、Ti、Mn、Ba 相关系数分别为 0.590、0.482、0.482、0.597、0.420 和 0.486, 与 Fe₂O₃、MgO、Co 相关系数则为 0.332、0.393 和 0.350。与此同时, Sr 与 SiO₂、K₂O 呈负相关, 相关系数分别为 -0.517 和 -0.363。红旗—大庙钒钛磁铁矿矿集区土壤 Sr 与其他元素相关关系总体与滦河流域一致, Sr 的赋存矿物相似。基岩全岩元素组分主成分分析表明, Sr 与 Na₂O、Al₂O₃、Ba、pH 为一组, CaO、MgO 和铁族元素为一组 (图 4c)。Sr 与 Na₂O、Al₂O₃、Ba 的相关系数分别为 0.184、0.186 和 0.323, 与 CaO、P、MgO 和 Fe₂O₃ 的相关系数分别为 0.359、0.298、0.187 和 0.195。Sr 的可能来源为斜长石、磷灰石、钙铁辉石、铁钙铝榴石、钙镁蒙脱石、绿帘石、阳起石, 含钡矿物和少量含锶单矿物硫磷铝锶石、磷铝锶石、锶磷灰石等。另外, 基岩中 Sr 元素含量与 SiO₂、K₂O 和 Rb 呈负相关, 相关系数为 -0.333、-0.299 和 -0.307, 即 Sr 元素含量与岩石酸度呈负相关关系, 钾长石含量较高时, 岩石趋向于贫 Sr。另一方面, 太古宇变质基底古老花岗岩

由铷同位素衰变导致的 Sr 含量放射性内生长亦可能是岩体 Sr 元素含量高异常的原因之一 (He et al., 2016; Li et al., 2019)。

综上所述, 通过基岩与土壤层 Sr 元素含量相关关系, 宏观上识别出 Sr 主要以类质同象形式存在于含钙、含钡矿物中。土壤中主要赋存于斜长石、磷灰石、角闪石、钙铝榴石、铁铝榴石、钙蒙脱石和绿泥石中, 或存在于风化成壤次生矿物羟基磷灰石、磷石膏、方解石和白云石 (碳酸盐结合态) 中, 或以铁锰吸附结合态形式存在。Sr 与 pH 值正相关, 碱性环境有利于岩土中 Sr 元素的固定。Sr 与有机组分总体呈负相关关系, 岩石—土壤的微生物—生物风化有利于 Sr 的淋滤释出。基岩中 Sr 的赋存矿物更为多样, Sr 的可能来源为斜长石、磷灰石、钙铁辉石、橄榄石、铁钙铝榴石、普通角闪石 (斜长岩—辉长岩、安山岩中)、低铁钠闪石、钛闪石 (花岗岩中)、绿泥石、绿帘石、阳起石和少量含锶单矿物硫磷铝锶石、磷铝锶石、锶磷灰石等。Sr 主要以类质同象形式存在于含钙矿物中, 不同地质建造基岩 Sr 含量均与 CaO 含量呈正相关关系, 其中斜长岩体 ($R^2=0.278$) 和花岗岩体 ($R^2=0.296$) 显著程度相对较高 (图 5a), 与其侵入岩体成因类型为岩浆型, 岩石地球化学组分较为均一有关。Sr 的空间分布与斜长岩体铁磷矿床的分布密切相关, 基岩—土壤 Sr 的高异常中心为大庙斜长岩体。

典型研究区红旗—大庙小流域岩矿样品主量矿物电子探针和原位主微量元素分析表明, 单矿物

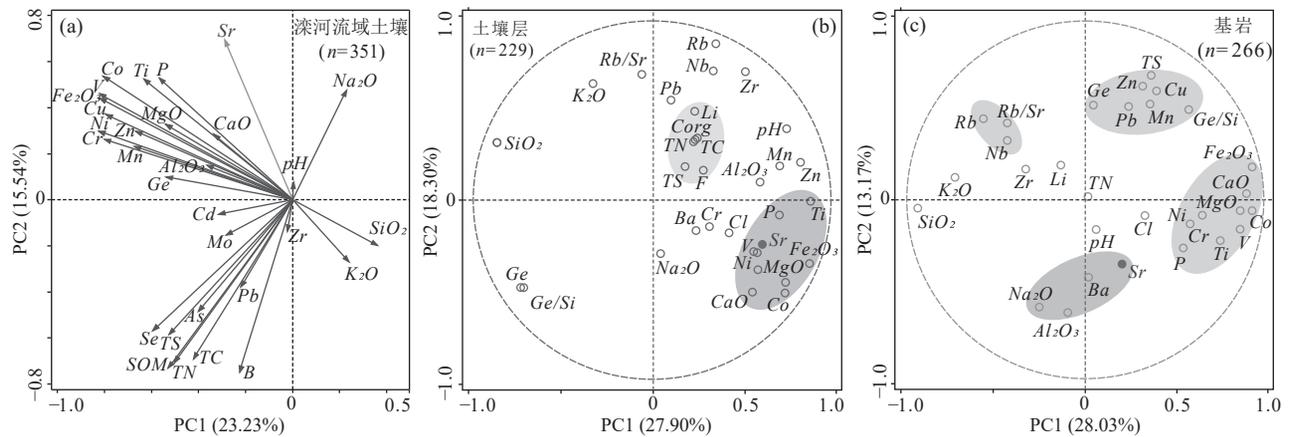


图 4 承德市滦河流域表层土壤 (a), 红旗—大庙矿集区表层土壤 (b) 与基岩 (c) 元素含量主成分分析因子载荷图
Fig.4 The PCA factor loading of element content in soil of the Luanhe River basin (a), soil (b) and bedrock (c) of the Hongqi-Damiao Vanadium titanium magnetite mining area in Chengde City

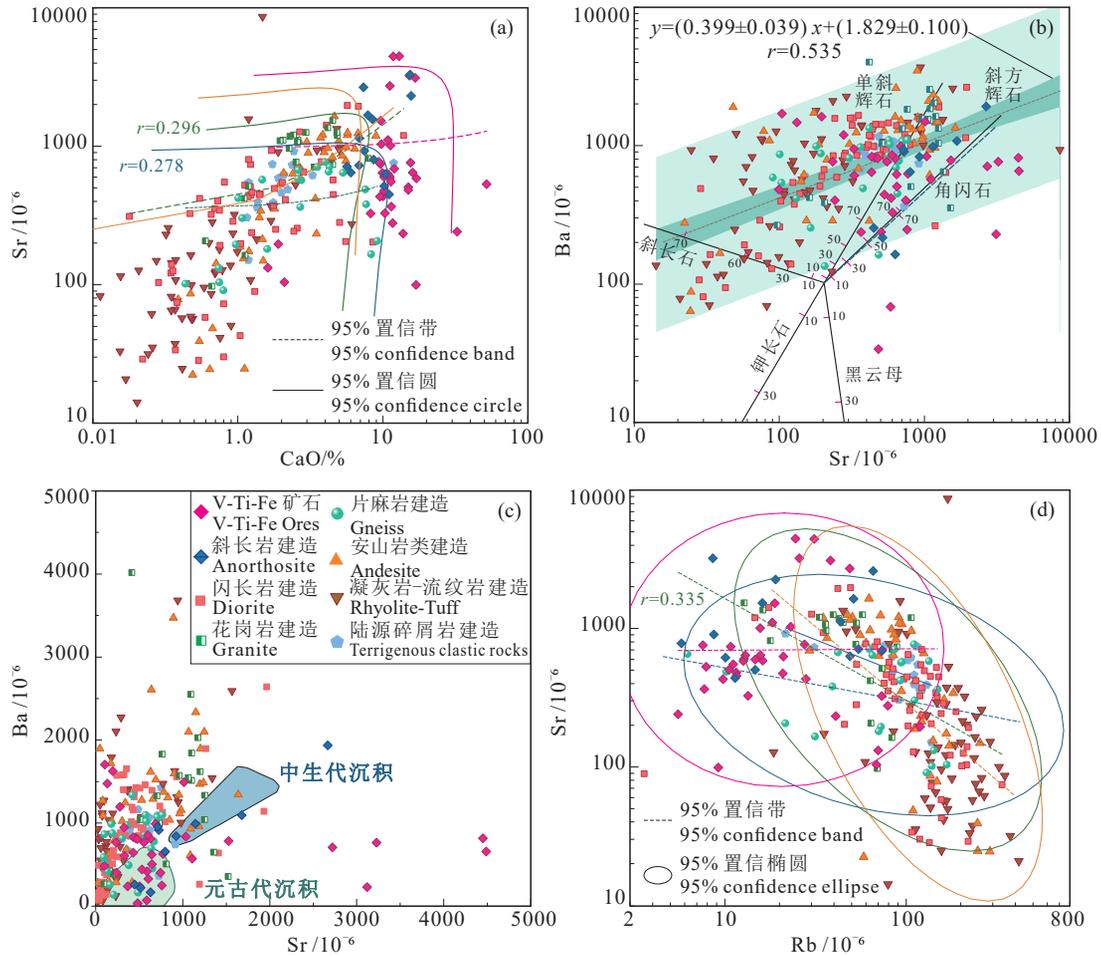


图5 承德市不同地质建造基岩样品 Sr 与 Ba、CaO 和 Rb 含量相关关系及地球化学判别图解

a—Sr 与 CaO 含量相关关系; b—花岗岩岩浆源(初始 Sr 含量 200×10^{-6} , Ba 含量 100×10^{-6})矿物结晶分异趋势反演矢量图, 指示岩浆分异过程单斜辉石、斜方辉石、角闪石、黑云母、钾长石和斜长石结晶分异的趋势; 矢量线的方向指示岩浆分级结晶过程中逐渐去除特定相时残留液体的组成变化。角闪石和黑云母分配系数数据 Arth (1976), 其余矿物分配系数数据 Nash 和 Crecraft (1985); c—Ba-Sr 地球化学判别图解(据 Coish and Sinton, 1992); d—Sr 与 Rb 含量相关关系

Fig.5 Geochemical discrimination diagrams and correlation between Sr content and Ba, CaO, and Rb content of bedrock samples from different geological formations in Chengde City

a—Correlation between Sr and CaO contents; b—Inversion vector diagram illustrating mineral crystallization differentiation trends of granitic magma source (initial Sr = 200×10^{-6} , Ba = 100×10^{-6}), indicating differentiation pathways of clinopyroxene, orthopyroxene, hornblende, biotite, K-feldspar, and plagioclase during magma evolution. Vector orientations reflect compositional variations of residual melt during fractional crystallization. Partition coefficients for hornblende, and biotite follow Arth (1976); Others are from Nash and Crecraft (1985); c—Ba-Sr geochemical discrimination diagram (after Coish and Sinton, 1992); d—Correlation between Sr and Rb contents

Sr 平均丰度辉石>铬铁矿(钛铁矿或硫磷铝锶石、锶磷钙铝矾)>磷灰石>斜长石>钾长石>石榴石>黑云母>角闪石。中位数大小排序为磷灰石>辉石>斜长石>铬铁矿(钛铁矿或硫磷铝锶石、锶磷钙铝矾)>石榴石>钾长石>黑云母>角闪石。辉石 Sr 丰度为 $67.65 \times 10^{-6} \sim 44520.30 \times 10^{-6}$, 平均为 9146.49×10^{-6} , 在单矿物中相对最高, 但受辉石种类影响较为明显。斜长岩中辉石类型主要为钙铁辉石、斜顽辉石, 个别

为普通辉石和易变辉石, 钙铁辉石 Sr 丰度显著较高。变质岩建造辉石类型皆为钙铁辉石, Sr 含量较高。磷灰石 Sr 含量范围为 $1161.29 \times 10^{-6} \sim 2005.59 \times 10^{-6}$, 平均为 1555.29×10^{-6} 。钛铁磷灰岩和辉长钛铁磷灰岩 Sr 含量较高($520 \times 10^{-6} \sim 1100 \times 10^{-6}$), 而苏长岩中磷灰石 Sr 含量较低($500 \times 10^{-6} \sim 600 \times 10^{-6}$)(王萌, 2014)。斜长石 Sr 含量范围为 $59.19 \times 10^{-6} \sim 2858.09 \times 10^{-6}$, 平均为 977.96×10^{-6} , 总体上长石的牌号(An)越高,

Sr 含量越高。斜长岩中钙长石 Sr 含量均高于 2500×10^{-6} , 苏长岩中的斜长石 An 牌号与 Sr 含量呈很好的正相关关系, 与 Tellnes 矿床中的斜长石类似 (Charlier et al., 2015)。钾长石 Sr 含量范围为 $59.19 \times 10^{-6} \sim 1978.68 \times 10^{-6}$, 平均为 608.35×10^{-6} 。另外, 石榴石 Sr 含量范围为 $321.32 \times 10^{-6} \sim 448.16 \times 10^{-6}$, 平均为 387.74×10^{-6} 。黑云母 Sr 含量范围为 $186.03 \times 10^{-6} \sim 575.00 \times 10^{-6}$, 平均为 327.36×10^{-6} 。角闪石 Sr 含量范围为 $67.64 \times 10^{-6} \sim 735.66 \times 10^{-6}$, 平均为 310.75×10^{-6} 。

研究区造岩矿物 Sr 元素主要以 Ca 的类质同象形式存在于硅酸盐矿物晶格中, 硅酸盐矿物的结构对 Sr 元素含量存在一定影响; 造岩矿物中 Sr 的丰度主要取决于矿物晶格中 Ca 被类质同象系列取代的程度 (Watts and Howe, 2010)。除长石类矿物外, 硅酸盐矿物晶格 Sr 含量随着矿物晶体结构键合度的降低而降低, 总体呈正硅酸盐(钙镁—钙铁橄榄石) > 环状—链状硅酸盐矿物(辉石) > 层状硅酸盐(黑云母、角闪石和绿泥石) > 三维架状硅酸盐岩(石英)。

4.4.2 岩石高铈异常地球化学成因

已有研究表明, 研究区侵入体(大庙斜长岩体和海西期花岗岩建造等)基性岩浆为大陆岩石圈地幔部分熔融形成, 其中富铈岩体则为基性岩浆通过陆壳混染和结晶分离形成(刘红涛等, 2002; 李承东等, 2004; He et al., 2016)。基性岩浆与上地壳的熔融混染程度, 及熔融混染过程中的矿物结晶分离影响着岩体的 Sr 丰度。华北克拉大陆地壳通减薄隆起造成区内大面积太古宇变质基底出露, 片麻岩—变粒岩建造岩石地球化学性质与上陆壳相近, 混染熔融程度相对较低, 岩相为石榴麻粒岩或角闪石榴麻粒岩, 矿物组成为石榴石+辉石±角闪石±斜长石(刘红涛等, 2002; 李承东等, 2004)。古元古代变质花岗岩系列与晚太古界变质岩呈侵入交代接触关系, 为深成相, 熔体在岩浆房中结晶分异不太明显, 残留相为榴辉岩或角闪榴辉岩。海西期侵入花岗岩建造(包括大庙杂长岩体)属中成相, 燕山期侵入花岗岩属浅成相。成岩过程中, 古元古代变质闪长岩建造、海西期侵入岩、燕山期侵入岩岩浆分异程度逐渐升高。

各期侵入岩呈成岩过程中, 岩石的地球化学特征受角闪石(单斜辉石、斜方辉石)、斜长石(钾长

石)以及石榴子石的分离结晶控制。Sr 和 Eu 元素在斜长石中的分配系数较高, 故此在岩浆分异结晶过程中, 斜长石是 Sr 和 Eu^{2+} 的主要捕获者(王学求等, 2021)。Sr、Ba 与 Ca 化学性质较为相似, 但在火成岩中 Sr 主要与 Ca 产生类质同象, 而 Ba 则较多地与 K 产生类质同象(Mason and Moore, 1982)。一定条件下, Sr、Ba 和 Eu 均可以通过类质同象的方式替换斜长石中的 Ca。造岩矿物云母是岩石中 Rb 的主要寄主矿物, 故此太古宇变质基底片麻岩—麻粒岩和与其侵入交代熔融产生的大庙斜长岩体具有较高的 Sr、Ba、Ca, 较低的 Rb 和 Sr 同位素比值。在岩浆分异结晶过程中, 若长石从岩浆中分离结晶出来, 或部分熔融混染作用下长石残留在岩浆源区, 往往会引起熔浆中 Eu 元素强烈负异常(Rollinson, 1993); 但角闪石、辉石以及石榴子石等矿物的分离结晶亦会造成 δEu 正异常。花岗岩岩浆矿物结晶分异趋势图(图 5b)表明, 岩石中 Sr 与 Ba 呈较显著的正相关关系($R^2=0.535$), 熔体从源区抽取后的岩浆过程中没有发生过明显的斜长石(钾长石)分离结晶作用, 但角闪石(单斜辉石、斜方辉石)参与了成岩结晶作用, 造成了岩体 δEu 总体为正异常(最高达 2.77)(Chen et al., 2015), Sr 与 δEu 呈正相关关系, 与大庙矿床中显示的矿物结晶顺序相一致: 斜长石—橄榄石—磁铁矿(出溶钛铁矿)—磷灰石—单斜辉石—斜方辉石(王萌, 2014)。

由于 Ba 是大离子亲石元素, 地球核幔分异时 Ba 总体均进入地幔之中; 在后期地幔熔融岩浆结晶分异过程中, 又由于 Ba 元素的强不相容特性, Ba 元素大部分进入熔体, 故地壳中 Ba 含量相对最高, 大陆表生带 Ba 主要由长石风化释出(Coish and Sinton, 1992; Wang et al., 2021)。岩浆演化晚期源区仍无斜长石的残留, 元古代岩石趋向于富 Sr 贫 Ba, 中生代岩体 Sr 和 Ba 含量均较高(图 5c), 与岩浆演化晚期正长石含量相对增高有关。区内侵入岩体岩浆演化序列研究表明, 随着岩浆分异演化程度的升高, 岩石酸性程度越来越高。斜长石含量呈逐渐递减趋势, 具明显的环带结构。钾长石含量呈逐渐增加趋势, 早单元以微斜长石为主, 晚单元以条纹长石为主。矿物结构由一期结构演变成二期结构, 整个侵入岩成岩序列属钙碱性岩系列, 表现为 Sr、Ba 富集。

研究区高 Sr 岩体既有普通钙碱性岩石又有高钾钙碱性岩石, 岩石明显富 Al_2O_3 , 多为 Al 饱和质, δEu 呈正异常(Charlier et al., 2015; Chen et al., 2015; He et al., 2016; Li et al., 2019), 表明成岩过程中斜长石在残留相中不稳定而进入熔体中, 酸性岩浆熔出后的残留相由辉石+石榴石+角闪石组成, 侵入岩和火山岩起源于加厚地壳底部或壳幔过渡带的较为原始的岩浆, 与太古宙变质基底岩石成分相一致。另一方面, 区内元古代变质岩片麻岩—变粒岩建造(变质原岩为花岗岩), 变质闪长岩建造 Sr 含量相对较高。不同地质建造基岩 Sr 含量均与 Rb 含量呈负相关关系, 其中花岗岩类建造 Rb 与 Sr 负相关显著程度($R^2=0.335$)相对最高(图 5d)。此外, 华北克拉通变质基底古老花岗岩由 Rb 同位素衰变导致的 Sr 含量放射性内生亦是岩体 Sr 元素含量高异常的原因之一。

5 富锶生态产业发展潜力讨论

5.1 矿泉水及其相关产业

5.1.1 饮用天然矿泉水

承德市水资源总量丰富, 全域多年平均水资源总量达 $37.6 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中地表水资源量占 45%, 地下水占 55%。区内 2020 年承德市用水规划总量控制为 $11.76 \times 10^8 \text{ m}^3$, 全区总体仍具有较高的水资源开发潜力^①。区内已查明饮用天然矿泉水出露点达 400 余处(2015 年), 天然流量年均累计约 4000 万吨, 锶型天然饮用矿泉水储量较大。天然矿泉水和山泉水开发已具有一定规模, 目前已有伊逊山泉、木兰山泉、皇家二泉、龙泉溪、万泉山、太子泉、江龙、水神等矿泉水生产企业, 总生产规模达 $11 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{年}$ 。鉴于区内丰富的矿泉水资源, 承德市拟打造华北最大的水产业基地和中国(承德)高锶矿泉水城。

浅层地下水中锶主要来源于水岩反应溶滤作用, 在已发现的富锶天然矿泉水田区, 其基岩—风化壳—土壤体系不同程度具有富锶特征(Musgrove, 2021)。新疆于田县富锶天然饮用矿泉水开发区含水层正长花岗岩中 Sr 含量为 433 mg/kg, 片麻岩和片岩中 Sr 平均含量分别为 307 mg/kg 和 173 mg/kg, 岩石风化为地下水提供了丰富的 Sr^{2+} (刘永林等, 2013)。湖南省新田富锶矿泉水田区含水层泥盆系地层不同基岩(灰岩、泥质灰岩和泥页岩)Sr 平均含

量为 67.28~448.0 mg/kg, 其中泥盆系余田桥组 Sr 元素含量最高达 838.0 mg/kg(苏春田等, 2021)。承德区内 BRS 体系中高丰度的锶为富锶矿泉水的形成提供了丰富的物质来源, 使得区内分布有玄武岩、粗安岩火山碎屑岩型, 火山岩和侵入岩(或花岗岩原岩变质岩)型、斜长岩型, 碳酸盐岩型多种含水介质成因类型的富锶地下水。全区 189 件浅层地下水样中, Sr^{2+} 浓度超过 0.20 mg/L 样品占比为 64.40%, 超过 1.0 mg/L 样品占比为 5.29%。硅酸盐岩含水层地下水中锶的含量与地层中锶的含量总体呈正相关关系, 水井开采条件下, 安山岩、花岗岩和凝灰岩区井水 Sr^{2+} 浓度较高, 平均为 0.71 mg/L、0.74 mg/L 和 0.58 mg/L, 灰岩区井水 Sr^{2+} 平均浓度亦达 0.55 mg/L; 泉水出露条件下, 安山岩、凝灰岩、花岗岩、玄武岩地层出露泉水 Sr^{2+} 浓度平均为 0.48 mg/L、0.41 mg/L、0.39 mg/L 和 0.30 mg/L(朱雪芹等, 2020)。从地下水 Sr^{2+} 浓度空间分布图来看(图 1), Sr^{2+} 浓度高值区主要位于深大断裂周围, 与基岩和土壤锶元素地球化学高异常区空间耦合程度较高。

承德市滦河流域 167 件地下水样 Sr^{2+} 浓度范围为 0.04~3.42 mg/L, 其中 97 件 Sr^{2+} 浓度超过富锶饮用天然矿泉水标准限值($<25^\circ\text{C}$)(GB 8537—2018)0.40 mg/L, 占总样品数的 58.08%。坝上高原孔隙裂隙水亚系统区地下水 Sr^{2+} 浓度平均为 0.30 mg/L, 高值区主要分布于围场西北粗安岩—玄武安山岩火山碎屑岩出露一带。燕山山地滦河中上游裂隙水亚系统地下水 Sr^{2+} 浓度平均为 0.46 mg/L, 高值区主要沿围场隆化交界处康保—围场深大断裂一带, 丰宁—隆化、大庙—娘娘庙深断裂一带及滦平盆地上缘侵入岩接触带分布。滦河中游孔隙岩溶裂隙水亚系统地下水 Sr^{2+} 浓度平均为 0.59 mg/L, 锶含量超过 0.40 mg/L 点分布最为集中, 沿宽城—平泉、兴隆—喜峰口、尚义—平泉深断裂一带分布(孙厚云等, 2020a)。典型研究区红旗—大庙斜长岩体周边井水 Sr^{2+} 浓度平均达 0.82 mg/L, 其中 182 件样品 Sr^{2+} 浓度超过 0.40 mg/L, 占样品总数的 81.61%。泉水 Sr^{2+} 浓度范围为 0.13~1.69 mg/L, 平均为 0.58 mg/L, 53.57% 样品 Sr^{2+} 浓度超过 0.40 mg/L。地表水 Sr^{2+} 浓度范围为 0.09~2.39 mg/L, 平均为 0.61 mg/L, 超 0.40 mg/L 样品占 81.97%(表 3)。地下水 Sr^{2+} 浓度高异常区的分布与钒钛磁铁矿赋矿

岩体的空间展布耦合程度较高,大庙斜长岩体至红旗铁马矿区、塔子沟矿集区微流域、张百湾周台子矿山分布密集区水体 Sr^{2+} 浓度较高。另外,地势较高的分水岭一侧林草地泉水排泄带地下水 Sr^{2+} 浓度亦相对较高。植被覆盖较好的斜长岩、安山岩、流纹岩—凝灰岩、陆源碎屑火山岩流域山前宽缓沟谷与导水断裂交汇带,太古宙变质结晶基底、侵入岩体与中生代侏罗—白垩沉积盆地上缘倾斜接触带是富锶型矿泉水开采潜力区。

当前国内以包装饮用水为代表的健康饮品市场增长十分迅猛,2014—2019 年的复合年增速达 11.0%,锶型矿泉水的品牌开发仍具潜力(韩娟和郭燕枝, 2022)。2022 年 11 月,山西省名优土特新产品协会团体标准《富锶包装饮用水(Strontium-enriched packaged drinking water)》(T/SXMYT 6.1-2022)公布实施,将山西省富锶包装饮用水锶含量范围限为 0.6~6 mg/L。从水资源量来看,承德市仍具较高的水资源开采潜力;从水质来看,承德市地下水(井和泉)锶浓度总体均较高。由此来看,承德区内仍具有较大的富锶饮用天然矿泉水开发潜力。依托于富锶水资源禀赋,承德需整合水产业优势,打造高锶矿泉水“京津水源·皇家山泉”特色品牌,探索建立富锶饮用矿泉水相关技术标准,开发饮用天然矿泉水产业潜力。

5.1.2 地热温泉康养产业

承德地区原属“热河”,地热资源丰富,分布有隆化茅荆坝、七家、北大坝温泉,围场山湾子、暖泉子,丰宁洪汤寺,滦平太子泉,承德县汤泉等众多地热温泉(Yang et al., 2012; Sun et al., 2023)。承德总体位于华北陆内造山带燕山隆起构造带地下热水区,区内发育的深大断裂和次级断裂对深部地热的向上传导起到重要的控制作用。华北克拉通破坏造成的地壳变形、地幔物质上涌、地震及岩浆活动,为华北断陷盆地深部热能向西北运移,地热水循环对流创造了有利条件(Ren et al., 2002; 孙厚云等, 2025)。在京津冀能源供应结构调整背景下(Wang et al., 2020),承德区内地热资源开发利用程度逐年提高,中心城区、各县城周边浅层地温能和中深层地热能勘查开发陆续展开。截至 2019 年,承德市已查明地热流体年可开采量为 $492.0058 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,其中,探明和控制的地热水资源可开采量

$302.8244 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 勘查推断可开采量 $189.1813 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 其热资源量为 $2240.92 \times 10^{12} \text{ J/a}$, 相当于标准煤 76462.20 t/a。全市 2019 年地热水开采总量约为 $76.128 \times 10^4 \text{ m}^3$, 主要用于旅游康养洗浴,少量用于烘干和养殖(承德市地热水资源保护与开发利用规划(2018—2020))。目前,区内除隆化茅荆坝、七家和丰宁洪汤寺等 3 处地热开发利用程度较高,用于规模较大的商务、疗养、健身、娱乐外,其余主要为较低端的洗浴、养殖等。地热温泉产品较为单一,层级结构不合理,不能满足承德国际旅游城市建设和社会经济发展的需求。

地热温泉的旅游开发价值主要在于医疗热矿泉的康养理疗保健功能,我国《食品安全国家标准饮用天然矿泉水》(GB 8537—2018)给定的 25°C 以上地热温泉水锶的界限指标浓度为 0.2 mg/L,《地热资源地质勘查规范》(GBT 11615—2010)确定的理疗热矿水水质标准锶界限指标浓度为 10 mg/L。承德全区地热温泉温度在 $43\sim 120^\circ\text{C}$, 断裂对流型地热泉或单井涌水量 $5.92\sim 81 \text{ m}^3/\text{h}$, 盆地传导型地热井涌水量 $22\sim 186 \text{ m}^3/\text{h}$ (Sun et al., 2023), 洗浴用水多数为理疗热矿水,类型以硅水、氟水为主。地热温泉 Sr^{2+} 浓度范围为 0.15~3.81 mg/L, 平均为 0.78 mg/L(表 3), 其中北部中低温火山岩热储层地热水($n=28$) Sr^{2+} 浓度范围为 0.17~3.81 mg/L, 平均为 0.74 mg/L; 南部中低温碳酸盐岩热储层地热水($n=12$) Sr^{2+} 浓度范围为 0.15~2.02 mg/L, 平均为 0.95 mg/L。地热温泉水 Sr^{2+} 浓度大部分超过饮用天然矿泉水锶界限浓度,但未达理疗热矿水标准,仍具有洗浴、康养、饮用和旅游开发价值。承德现有温泉水锶单项指标浓度虽然未达标值,但部分水样偏硅酸、 CO_2 、F、Rn 浓度达到理疗热矿水标准,属锶氟、锶氢温泉。根据承德市地热开发规划,至 2025 年,承德地热水资源预可行性勘查面积将由 2020 年的 110 km^2 增至 150 km^2 。承德旅游康养产业仍具有较为广阔的含锶理疗保健型地热温泉开发利用前景,如以七家茅荆坝皇家温泉为康养度假核心区,辐射带动东茅沟河观星露营休闲、宝山营富锶矿泉康养体验 2 个特色旅游区发展(殷志强等, 2022); 全区发展森林草原、皇家温泉、燕山山水、长城人家等康养旅游片区,建设隆化县温泉文化小镇、热河山谷特色文化小镇等。

5.1.3 饮品和锶泉酿酒

当前国内饮料市场规模稳步增长,消费者更倾向于选择天然、健康、无糖、无添加饮料产品,饮料产业由 1980 年代碳酸饮料、瓶装水、茶饮料浪潮发展到 21 世纪初果汁、凉茶、功能饮料热潮,再逐渐过渡至如今的含乳饮料、植物蛋白饮料蓬勃发展阶段(石丹和李洲, 2020)。在国家发展改革委修订发布的《产业结构调整指导目录(2019 年本)》鼓励浆果果汁、谷物饮料、本草饮料、茶浓缩液、茶粉、植物蛋白饮料等高附加值植物饮料的开发与加工背景下,承德市拥有杏仁、板栗、山楂、核桃、苹果、胡萝卜、大米、玉米、莜麦、高粱、万寿菊(茶)、道地药材等潜在富锶饮品和酿酒原材料,富锶山泉水和矿泉水资源,以及承德露露植物蛋白饮料等著名品牌,具备富锶饮品开发潜力。区内已有地理标志产品杏仁、国光苹果、京东板栗、山楂、核桃,隆泉大米、万寿菊、马铃薯、道地黄芩、甘草、黄芪、板蓝根等作物的富 Se、富 Ge 相关研究(孙厚云等, 2020b, 2021a; 卫晓锋等, 2020; Wei et al., 2022; Li et al., 2022)。相关植物 Sr 含量分析亦表明,杏仁、山楂、苹果、板栗、核桃等作物具富锶潜力,如山楂果肉、叶和种子的 Sr 平均含量分别为 0.406 mg/kg、1.14 mg/kg 和 0.19 mg/kg(Cindrić et al., 2005),土耳其杏仁中 Sr 含量平均达 150.61 mg/kg(Kamar et al., 2018),神农架地区苹果、板栗和野核桃仁 Sr 含量平均为 0.132 mg/kg、0.044 mg/kg 和 1.018 mg/kg(卜怡然等, 2020; 肖潇等, 2022)。Fernandes et al. (2022)测定了葡萄牙 25 种常见商业凉茶植物和相应冲泡茶饮的微量元素组成,发现埃及洋甘菊 Sr 含量为(36.8 ± 1.5) mg/kg,葡萄牙狭叶松果菊 Sr 含量为(32.6 ± 1.3) mg/kg,西班牙阔叶薰衣草 Sr 含量为(75.8 ± 2.1) mg/kg,保加利亚药葵 Sr 含量为(53.1 ± 1.6) mg/kg,各类茶饮植物冲泡液中 Sr²⁺浓度为 0.09~0.56 mg/L,锶元素浸出率在 8.47%~59.8%,部分茶饮 Sr²⁺浓度已超过富锶矿泉水锶浓度标准限值 0.4 mg/L。此外,市场上常见的茶叶产品锶含量为绿薄荷((111.5 ± 1.7)~(122.07 ± 2.68) mg/kg) > 波耳多叶((90 ± 1.20) mg/kg) > 洋甘菊((79.50 ± 1.30) mg/kg) > 绿茶((45.42 ± 1.88) mg/kg) > 红茶((27.90 ± 0.78) mg/kg) > 白茶((14.70 ± 0.50) mg/kg) > 迷迭香((4.44 ± 0.49) mg/kg)(Karadaş and Kara, 2012;

Martins et al., 2015)。贵州省道真硒锶茶确定的富锶道真绿茶锶含量地方标准限值为 2.5~10.0 mg/kg,法国常见饮料产品 Sr²⁺浓度平均为 0.62 mg/L,常见水果蔬菜及谷类中锶含量平均亦分别达 1.82 mg/kg 和 1.31 mg/kg(Millour et al., 2012)(表 4)。

承德地区与茶饮相关的金鸡奖菊花、波斯菊叶、薄荷的锶平均含量分别为 4.46 mg/kg、7.78 mg/kg 和 12.2 mg/kg,与道真硒锶茶(DB 52/T 1219—2017)和生物标准物质茶叶(GB08505)锶含量相近,远高于神农架木鱼茶叶(卜怡然等, 2020)。承德市具备发展富锶饮品产业的天然优势,可进一步挖掘富锶杏仁、山楂、沙棘等浆果果汁,谷物饮料、植物蛋白饮料,万寿菊、黄芩、甘草、黄芪、板蓝根等中药材草本茶饮(凉茶)产品研发潜力,扩大保健品、功能性饮品生产规模,加强生态品牌建设,提升品牌价值。

另一方面,国内外优质酒类品牌建设和酿酒工艺也均已涉及到微量元素锶的研究(Bruna et al., 2023),如韩深等(2014)测得法国、智利、摩尔多瓦三个产地 41 支赤霞珠干红葡萄酒中的 Sr²⁺浓度平均为 0.10~5.00 mg/L;典型酱香型白酒茅渡酒中 Sr²⁺浓度相对较高,为 14.37 μg/L,茅台酒中 Sr²⁺浓度为 5.37 μg/L;酿酒用高粱籽锶含量为 0.48~2.29 mg/kg,平均为 1.28 mg/kg,酿酒用水与粮食作物对白酒中锶均有贡献(姜涛, 2013)。锶泉酿酒制造技术相关专利申请也已有锶泉白酒及其制造方法,含锶纯生啤酒及酿造方法和富锶酒的制作工艺专利等,部分白酒 Sr²⁺浓度达 0.75~1.30 mg/L。采用 Sr²⁺浓度为 0.787 mg/L 泉水酿造的黄酒是一种低度、保健型的酿造酒, Sr²⁺浓度均超过 0.05 mg/L(表 4)。承德市作为我国十大白酒生产基地之一,拥有多个著名白酒品牌,依托于富锶泉水和潜在富锶作物水稻、高粱、小米、杂粮资源(范庆杰等, 2018),推动粮食深加工酿酒产业发展,打造地理标志性特色酒产品。

5.2 富锶生态农业

当前富锶产业的研究热点主要为富锶生态农产品的研究开发,以及富锶食品标准的探索建立(韩娟和郭燕枝, 2022; 黄胥莱等, 2023)。承德市“十四五”农业农村现代化规划的发展定位为“京津绿色有机农产品供应基地”和“京北生态宜居美丽乡村”,立足良好的生态资源、特色农林资源,围绕蔬

表 4 常见食品锶含量及富锶食品研究开发现状 (mg/kg)

Table 4 Strontium content in common foods, research and development status of strontium-rich foods (mg/kg)					
项目	Sr含量	项目	Sr含量/	项目	Sr含量
谷类及谷类制品 ^a	1.82	赤霞珠干红葡萄酒 ^l	0.10~5.00	薯类(牙买加) ⁿ	0.71~16.70
水果和蔬菜 ^a	1.31	酱香型白酒 ^k	0.00537~0.01437	土豆(神农架) ⁱ	0.132~0.268
坚果 ^b	9.759±5.181	锶泉白酒 ^l	0.75~1.30	红薯(神农架) ⁱ	0.138~1.540
饮料 ^a	0.62	锶泉黄酒 ^m	>0.05	富锶水稻 ^l	0.524~0.533
食用油 ^a	0.11	水果(牙买加) ⁿ	0.48	富锶大米 ^s	0.65
淡水鱼类与海鲜类 ^a	7.17~9.56	叶类蔬菜(牙买加) ⁿ	0.15~0.42	富锶小米 ^r	38.2
综合 海州湾水产 ^c	1.14~3.33	根茎类蔬菜(牙买加) ⁿ	0.35~2.05	小麦	3.0
肉类及内脏 ^a	0.18~1.20	水果(丹麦) ^o	0.79	小麦	1.742~3.693
乳及乳制品 ^a	0.54	叶类蔬菜(丹麦) ^o	1.60	筛分后小麦精粉	0.78±0.05
蛋及蛋制品 ^a	0.52	根茎类蔬菜(丹麦) ^o	1.30	麦麸	2.97±0.15
盐、香料等调味品 ^a	1.12	葫芦科(神农架) ⁱ	0.32	完整小麦颗粒	1.42±0.07
富锶酱 ^d	≥0.30	茄科(神农架) ⁱ	0.36	荞麦	2.70~6.80
中药材(105种) ^e	23.50	苋科(神农架) ⁱ	2.47	燕麦	1.30
埃及洋甘菊 ^f	36.8±1.5	十字花科(神农架) ⁱ	2.25	黑麦	7.8~70.2
葡萄牙狭叶松果菊 ^f	32.6±1.3	山楂果肉 ^p	0.406	大麦	43.20
西班牙阔叶薰衣草 ^f	75.8±2.1	山楂叶 ^p	1.14	玉米	0.0008~0.02
保加利亚药葵 ^f	53.1±1.6	山楂种子 ^p	0.19	玉米(河南固始) ^s	0.431~0.629
绿薄荷 ^g	122.07±2.68	富锶苹果 ^q	1.36~1.66	玉米(神农架) ⁱ	0.132~0.274
波耳多叶 ^g	90±1.20	苹果(神农架) ⁱ	0.132	大豆(鲜重) ⁱ	0.268
洋甘菊 ^g	79.50±1.30	富锶葡萄 ^q	0.34	大豆(干重)	138.0
绿茶 ^g	45.42±1.88	葡萄(神农架) ⁱ	0.132	牛肝(标准物质) ^e	0.53±0.03
红茶 ^g	27.90±0.78	富锶草莓 ^q	1.72	对虾(标准物质) ^e	40.6±1.7
白茶 ^g	14.70±0.50	富锶猕猴桃 ^q	1.10	贻贝(标准物质) ^e	12.8±0.6
道真绿茶 ^h	2.5~10.0	富锶山药 ^r	1.73~10.6	牛肝(标准物质) ^e	0.138
菊花(承德)	4.46	富锶大榛子 ^q	1.06	其他 牡蛎肉(标准物质) ^e	10.36
木鱼茶叶(神农架) ⁱ	0.524	花生(河南固始) ^s	2.493~7.747	豆腐 ^a	2.71
茶叶(标准物质) ^e	15.2±0.7	杏仁(土耳其) ^t	150.61	高锶金针菇	0.35~6.7
茶叶(标准物质) ^e	10.8±1.8	野核桃仁(神农架) ⁱ	1.018	富锶豆芽	0.50~2.5
茶叶树(标准物质)	52.4±5.6	板栗(神农架) ⁱ	0.044	富锶粉条/淀粉	≥12.73

注: a—Millour et al., 2012; b—González et al., 2013; c—王雪莲等, 2022; d—席雪瑶等, 2023; e—管竞环和李恩宽, 1998; f—Fernandes et al., 2022; g—Martins et al., 2015; h—DB 52/T 1219—2017; i—卜怡然等, 2020; 肖潇等, 2022; j—韩深等, 2014; k—姜涛, 2013; l—沈阳市锶泉酒厂, 1995, 1996; m—余亚芳, 2014; n—Howe et al., 2005; o—Danish Veterinary and Food Administration, 2002; p—Cindrić et al., 2005; q—韩娟和郭燕枝, 2022; r—杨思宇, 2019; s—王东晓等, 2023; t—Kamar et al., 2018; u—罗军强等, 2019。

菜、中药材、果品、畜牧、休闲农业等优势特色产业
发展绿色生态高效农业和都市农业。区内国土空
间优化布局致力于形成“高原生态农业区—坝上绿
色生态产品区”、“山地高效农业区—山地特色农产
品发展区”、“都市精品农业区—环京津都市农业
环”的现代农业农村发展格局(安永龙等, 2022), 重
点发展“一号风景大道”休闲农业示范带、京沈高铁
沿线“平泉香菇”示范带、“塞罕坝”高寒地区马铃薯
示范带、滦河流域道地中药材示范带、金山岭长
城沿线优质果品示范带五条优势特色产业带, 和食
用菌、山楂、板栗、山杏、马铃薯、中药材、牛羊肉、
生猪肉禽八个农产品加工产业集群。依托特色生
态农业资源, 结合区内已有富锶作物和相关食品研
究, 承德市在富锶生态农产品的研发上具有巨大潜
力, 在富锶品牌培育上具有显著优势, 具有推动富

锶特色生态食品行业标准建立的现实基础。

5.2.1 富锶经济作物

正常成年人每天摄入的膳食锶含量为 2~4 mg, 其中 1.2~2.3 mg 来自食物(蔬菜、谷类、坚果和乳制品)。根据法国 1319 个食物样本锶含量测试结果(Millour et al., 2012), 水果和蔬菜、食用油锶平均含量达 1.82 mg/kg 和 0.11 mg/kg。国内已有富锶经济作物研究包括富锶苹果、富锶葡萄、锶茶等(表 4), 其中贵州道真“古龙春茶”“道真晒茶”茶叶 Sr 含量为 7.0 mg/kg, 市场销售价格比普通茶叶高出 20%~30%; 山东“沂源红”富锶苹果锶含量达 1.36~1.66 mg/kg; 济南金箭山富锶葡萄锶含量达 0.34 mg/kg; 另有富锶草莓、猕猴桃和榛子锶含量分别为 1.72 mg/kg、1.10 mg/kg 和 1.06 mg/kg(韩娟和郭燕枝, 2022)。此外, 我国目前已申请专利的富锶

食品还包括富镉花生(镉下限值 1.08 mg/kg),高镉金针菇(0.35~6.7 mg/kg)、富镉豆芽(0.5~2.5 mg/kg)、富镉薯类粉条、富镉淀粉(≥ 12.73 mg/kg)等(王东晓和袁德志, 2023; 席雪瑶等, 2023)。

承德市内围场马铃薯和胡萝卜、隆化水稻、平泉玉米、兴隆山楂等产品规模化生产基地先后被认定为“全国绿色食品原料标准化基地”,围场、平泉、兴隆、宽城、承德县等区县先后获批“中国马铃薯之乡”、“中国食用菌之乡”、“中国山楂之乡”、“中国板栗之乡”、“中国国光苹果之乡”称号(卫晓锋等, 2020; Wei et al., 2022), 具有较大的富镉绿色食品开发潜力。承德五条优势特色生态农业产业带上,“一号风景大道”休闲农业示范带分布有隆化草莓公社,金莲花种植、茶饮和保健品产业,沙棘、锦绣海棠等特色林果基地;京沈高铁沿线“平泉香菇”示范带包括 58 个食用菌产业乡镇和 54 个蔬菜产业乡镇;“塞罕坝”高寒地区马铃薯示范带重点建设围场马铃薯产业,发展全粉、精淀粉、速冻粉条、即食粉、休闲食品等加工产品,还包括胡萝卜、荞麦、莜麦、小米种植;金山岭长城沿线优质果品示范带包括京东板栗、兴隆山楂、国光苹果标准化种植示范园区,推进山楂黄酮、原花青素、膳食纤维、红酒等高附加值精深产品研发。另外,承德 2016—2020 年间,推进了 54 个现代农业园区、“八大”林果产业基地的建设,包括百万亩板栗产业基地(研发栗蓉、栗肉、奶露等板栗精深产品)、八十万亩苹果产业基地(不同县域种植金红、黄太平、寒富、红星、国光、富士等不同品种苹果)、八十万亩果品观光采摘业基地(包括梨、桃、杏、李、葡萄、草莓、鲜食枣等时令鲜果和设施果树)、百万亩仁用杏产业基地(依托露露等市场龙头企业,打造杏仁露、杏仁油特色品牌)、八十万亩沙棘产业基地(研发特色沙棘保健品、食品、功能性饮品)、六十万亩苗木花卉和木本药材产业基地、五十万亩山楂产业基地(研发特色山楂食品,扩大蜜饯、果脯、罐头、果汁加工能力)、五十万亩干果油料产业基地(开发甜杏仁油、榛子油、核桃油等油料产品)。基于土地质量地球化学调查和基岩—土壤—风化壳—作物体系元素传导和迁聚规律研究,承德市兴隆—宽城一带对林果业种植区划进行了优化调整,筛选划分了山楂、核桃、板栗和苹果种植适宜区(王京彬等, 2020;

卫晓锋等, 2020)。

自然环境中,镉很容易被植物吸收,人与动物食用的植物中镉的积累取决于土壤中镉的含量和植物的类型(Kabata and Mukherjee, 2007)。通过对研究区 15 种蔬菜,12 种水果和 7 种粮食作物样品镉含量(以鲜重计)的测试分析表明,区内 34 种植物样品 Sr 平均含量范围为 0.77~26.60 mg/kg,大部分高于法国常见谷类及谷类制品(1.82 mg/kg)、水果和蔬菜(1.31 mg/kg)镉平均含量(Millour et al., 2012),牙买加常见水果镉含量 0.48 mg/kg($n=27$)、叶类蔬菜镉含量 0.15~0.42 mg/kg($n=14$)、根茎类蔬菜镉含量 0.35~2.05 mg/kg(平均 0.74 mg/kg, $n=16$)(Howe et al., 2005),丹麦常见水果镉含量 0.79 mg/kg、叶类蔬菜镉含量 1.60 mg/kg 和根茎类蔬菜镉含量 1.30 mg/kg(Danish Veterinary and Food Administration, 2002),神农架常见蔬菜镉含量(0.32~2.25 mg/kg)(表 4)。区内 12 种水果样品镉含量大小关系为板栗(0.91~12.50 mg/kg)>山楂(11.20 mg/kg)>西梅(0.50 mg/kg)>香水梨(0.37 mg/kg)>杏(果肉, 0.21 mg/kg)>李子(0.13 mg/kg)>桃、茉莉士苹果(0.12 mg/kg)>红苹果(0.09 mg/kg)>红金青苹果(0.07 mg/kg)。典型蔬菜作物镉含量:小白菜(26.60 mg/kg)>油菜(22.40 mg/kg)>茼蒿(15.80 mg/kg)>大葱(10.90 mg/kg)>生菜(9.76 mg/kg)>油麦菜(7.85 mg/kg)>白萝卜(5.58 mg/kg)>红薯(5.55 mg/kg)>土豆(3.63 mg/kg)>豆角(3.47 mg/kg)>毛豆(3.15 mg/kg)>花生(2.74 mg/kg)>辣椒(1.74 mg/kg)>小西红柿(1.19 mg/kg)>紫色长茄(0.77 mg/kg),叶菜类作物样品富镉能力相对均高于根茎类作物(郭颖超等, 2023),设施农业和特色瓜类、茄果类、叶菜类绿色、有机富镉蔬菜产品研发潜力巨大。

区内地理标志性作物板栗、山楂、杏、国光苹果、马铃薯均具有较高的镉含量,其中板栗仁镉含量在 12 类水果样品中相对最高,远高于已有富镉坚果类食品,如河南固始富镉花生镉含量 1.08 mg/kg(王东晓和袁德志, 2023)、富镉榛子(1.06 mg/kg)、神农架板栗(0.044 mg/kg)和野核桃仁(1.018 mg/kg)(卜怡然等, 2020)。山楂果肉 Sr 含量显著高于一般山楂样品 0.406 mg/kg(Cindrić et al., 2005)、河南药用山楂(干重)9.84 mg/kg(Xu, 2009)

及已有富锶水果:沂源富锶苹果(1.36~1.66 mg/kg),富锶草莓(1.72 mg/kg),富锶猕猴桃(1.10 mg/kg)和金箭山富锶葡萄(0.34 mg/kg)(韩娟和郭燕枝, 2022)。山东沂源北流水村富锶水(11.1 mg/L)灌溉的苹果园生育期苹果叶片锶含量为 32.4~95.2 mg/kg,果肉锶含量为 0.287~1.28 mg/kg;灌溉水锶含量较低的璞邱四村果园苹果叶片锶含量为 9.87~18.4 mg/kg,果肉 Sr 含量为 0~0.512 mg/kg(王贵平等, 2022)。目前区内采集的苹果样品锶含量相对低于山东沂源县《富锶鲜苹果》团体标准预期最低限值 0.5 mg/kg,但本次采集苹果品种不包含国光苹果,在区内果园布局优化、品种结构优化、土壤生态改良基础上,承德市仍具有富锶苹果产品研发潜力。区内土豆(马铃薯)和红薯锶含量显著高于牙买加木薯、马铃薯、红薯和紫薯锶平均含量 1.47 mg/kg(0.71~16.70 mg/kg, $n=46$)(Howe et al., 2005),以及神农架地区土豆锶平均含量(0.132~0.268 mg/kg)和红薯锶平均含量 0.138~1.540 mg/kg(卜怡然等, 2020)。马铃薯和红薯深加工产品全粉、精淀粉、速冻粉条、即食粉、休闲食品等亦具有富锶食品研发潜力。区内杏果肉锶含量(0.21 mg/kg)相对低于杏仁,但承德市内山杏产品主要为仁用杏,而常见杏仁中 Sr 含量平均达 150.61 mg/kg(Kamar et al., 2018),杏仁露等植物蛋白饮品,甜杏仁油、榛子油、核桃油等特色富锶产品仍具开发价值。

5.2.2 富锶粮食作物

除蔬菜、果品等传统大宗农产品外,承德还是我国北方重要的粮食、杂粮杂豆产品生产基地,常见的大田粮食作物有水稻、玉米、谷子(小米)、莜麦、大豆等。通过粮食作物采样分析发现,区内大田作物锶平均含量大小关系为芝麻(8.40 mg/kg)>小米(谷子)(6.55 mg/kg)>高粱(2.42 mg/kg)>玉米(0.92 mg/kg)(郭颖超等, 2023)。研究区高粱样品锶平均含量高于贵州茅渡酒和茅河酒产地酿酒高粱锶平均含量 1.28 mg/kg(姜涛, 2013);玉米锶含量高于常见玉米锶含量 0.0008~0.02 mg/kg、神农架玉米锶含量 0.132~0.274 mg/kg(卜怡然等, 2020)及河南固始玉米锶含量 0.431~0.629 mg/kg(平均为 0.513 mg/kg),接近富锶玉米标准限值 1.08 mg/kg;芝麻和小米锶含量高于常见大田作物小麦 3.0 mg/kg、荞麦 2.7~6.8 mg/kg、燕麦 1.3 mg/kg,河南固

始小麦锶含量 1.742~3.693 mg/kg(平均为 2.943 mg/kg)和花生锶含量 2.493~7.747 mg/kg(平均为 5.092 mg/kg)、富锶小麦锶标准限值 1.08 mg/kg 及一般小麦样品锶含量(筛分后小麦精粉(0.78±0.05) mg/kg、麦麸(2.97±0.15) mg/kg、完整小麦颗粒(1.42±0.07) mg/kg),但略低于山西祁县来远富锶小米(38.2 mg/kg),一般黑麦(7.8~70.2 mg/kg)、大麦(43.2 mg/kg)和大豆(138.0 mg/kg)样品(Kabata and Mukherjee, 2007; Martins et al., 2015; 王东晓和袁德志, 2023)。

Varo et al.(1982)和 Schroeder et al.(1972)根据不同国家食品消费统计数据,表明人体每日从膳食中摄入的锶主要来源于水稻、小麦、玉米等大宗粮食作物,故针对粮食作物锶含量的研究起步相对较早,富锶食品开发相对较多(虞德容和张启军, 2012)。裘凌沧等(1993)对国内外 252 份稻米锶含量分析表明,普通白米、红米和紫米中的锶含量分别为 0.24 mg/kg、0.17 mg/kg、0.10 mg/kg;科尔沁沙地衬膜水稻和滩涂水稻中锶平均含量分别为 0.5 mg/kg 和 0.6 mg/kg(宋豫秦等, 2000);云南 55 个水稻改良品种的糙米、精米锶平均含量分别为 0.35 mg/kg 和 0.24 mg/kg(曾亚文等, 2009);湖北钟祥地区 8 个品种水稻锶平均含量为 0.426~1.893 mg/kg(罗军强等, 2019)。王东晓和袁德志(2023)根据人体每日需摄入锶推荐值(2.0 mg),在假定每日锶摄取 50% 来源于谷物类条件下,确定了河南固始地区的富锶大米标准限值为 0.65 mg/kg,固始地区大米 Sr 含量范围为 0.355~0.913 mg/kg,平均达 0.623 mg/kg。山东定陶地区山药根部 Sr 含量达 1.73~10.6 mg/kg,平均为 5.29 mg/kg;茎叶 88.0~263 mg/kg,平均为 186.38 mg/kg(杨思宇, 2019)。

承德市较具地方特色的粮食作物包括隆化隆泉大米、滦平玉米、丰宁和围场小米和莜麦等。“十四五”阶段,承德市鼓励开展油葵、油菜、大豆、红薯、小米、高粱等特种产品种植,推进隆化有机水稻、丰宁有机小米特色粮食及杂粮产品优势基地标准化建设。立足富锶水土资源优势,结合地方特色粮食作物种植结构,承德市具有显著的富锶粮食作物高质量生态产品开发潜力。

5.2.3 富锶农副产品

除水果蔬菜和粮食作物外,副产品的开发也

是富锶食品研发的重要方向,如目前已知的高锶金针菇、富锶豆芽、富锶豆腐、富锶小麦芽等(席雪瑶等, 2023), 吉林省长春市张大村富锶鹅产品, 甘肃省临泽县鸭暖镇富锶螃蟹养殖, 辽宁省法库县富锶驴肉、康平县卧龙湖“锶鱼”等(彭闯, 2018; 韩娟和郭燕枝, 2022)。常见鱼类锶平均含量约为 7.17~9.56 mg/kg, 我国海州湾水产花蛤、牡蛎、海螺、虾姑、梭子蟹、虾虎鱼肌肉中的锶含量分别为 2.28 mg/kg、1.14 mg/kg、2.48 mg/kg、2.59 mg/kg、2.25 mg/kg、3.33 mg/kg(王雪莲等, 2022)。一般肉类及内脏锶平均含量为 0.18~1.20 mg/kg, 乳及乳制品、蛋及蛋制品锶平均含量分别为 0.54 mg/kg 和 0.52 mg/kg, 豆腐锶平均含量达 2.71 mg/kg(Millour et al., 2012)。承德处于农牧交错地带, 除粮食、蔬菜、生猪、肉鸡等传统大宗农产品外, 承德还是京津地区重要的高档肉牛、肉羊、生鲜奶等草食畜产品供应基地。在肉牛、生猪、肉鸡、蛋鸡、肉鸭等食粮型畜牧业稳定发展基础上, 承德市还具备深化富锶地表水湖库养殖、富锶温泉养殖, 开发富锶畜牧和水产养殖产品潜力。

5.3 道地药材产业

除上述生态农粮产业外, 承德的另一主导特色生态产业为中药材。承德市目前已查明的药用野生动植物资源多达 640 余种, 是华北生态最优、品质最优的“种质资源宝库”。故此, 承德市“十四五”发展规划将实施“绿色食品及生物医药产业重大工程”, 建设河北省燕山中药材经济核心示范区, 推进标准化中药种植基地建设和中药质量标准提升。“十三五”发展阶段, 承德市中药材种植空间总体布局为“百万亩中药花海一带三区”, 其中“一带”指滦平—隆化—围场坝下古御道中药花海示范带, 以种植黄芩、桔梗、黄芪、枸杞、沙棘、连翘、射干、玫瑰为主; “三区”指丰宁—围场坝上高原中药花海示范区(以种植黄芪、金莲花、桔梗、苦参为主)、中南部承德县—平泉—兴隆—宽城特色中药花海示范区(以种植黄芩、枸杞、桔梗、丹参、凤仙花、人参、石竹为主)、双滦—双桥—鹰手营子城郊型中药花海示范区(种植黄芩、桔梗、北苍术、药用百合、药用牡丹、椴树花、鸡冠花为主)。

承德市道地药材以黄芩最具盛名, 种植面积最大, 其年均收购量约占全国的 40%。对承德市御道

中药花海示范带金沟屯、城郊型中药花海示范带五道岭栽培黄芩种植示范区, 大庙—红旗钒钛磁铁矿矿集区周边野生黄芩产区, 我国主要黄芩产区(赵曼茜等, 2010; 王升等, 2014; 郭兰萍等, 2014)黄芩根、茎、叶不同组织和根系土锶含量, 承德区内其他中药材(鲜重)(孙厚云等, 2020b; 郭颖超等, 2023)、我国常见 105 种中药材(管竞环和李恩宽, 1998)、其他中药材微量元素 Sr 含量(赵金等, 1996; Xu, 2009; 邵文军, 2009; Zeinera et al., 2015; Bonari et al., 2019; Dyakova, 2023)等进行对比统计分析, 具体结果见表 5。

已有研究表明, 承德市钒钛磁铁矿出露集中区特殊的地质背景和生态地球化学条件适宜于高品质黄芩的生长, 土壤丰富的 Fe、P、Ge 和 Sr 元素含量为优质黄芩生长提供了有利条件, 区内 Fe 族元素含量丰富, pH 呈微碱性的沙壤质土壤为道地药材黄芩适宜生长和定向栽培种植区(孙厚云等, 2020b; Sun et al., 2025)。大庙—红旗钒钛磁铁矿矿集区内野生黄芩根系土 Sr 含量范围为 100.50~4613.0 mg/kg(平均为 1106.5 mg/kg), 显著高于五道岭和金沟屯栽培黄芩种植区内根系土壤 Sr 含量 141.70~687.40 mg/kg(平均为 228.94 mg/kg), 为黄芩作物 Sr 的富集提供了丰富的物质来源。承德区内所有黄芩根系样品 Sr 含量范围为 15.94~116.51 mg/kg, 平均为 34.24 mg/kg($n=34$); 所有黄芩茎叶样品 Sr 含量范围为 22.19~159.93 mg/kg, 平均为 48.82 mg/kg($n=32$)。区内黄芩样品根系、茎叶 Sr 平均含量均相对高于 Sr 元素在植物类中药中的理论含量平均值 28.9 mg/kg, Sr 在 105 味中药中的含量平均值 23.5 mg/kg(管竞环和李恩宽, 1998)及湖北恩施地区道地中草药 Sr 平均含量 15.49 mg/kg(汪丹等, 2022)。锶元素在中药材植株、粮食和蔬菜经济作物的叶片组织中相对更为富集(亓琳, 2014; 卜怡然等, 2020; 肖潇等, 2022), 叶菜类蔬菜和以叶入药中药材样品的 Sr 含量相对高于根茎类蔬菜和以根入药的中药材样品(郭颖超等, 2023)。五道岭栽培黄芩根系 Sr 含量范围为 17.19~27.61 mg/kg, 平均为 22.79 mg/kg; 金沟屯栽培黄芩根系 Sr 含量范围为 20.10~36.00 mg/kg, 平均为 28.41 mg/kg; 斜长片麻岩成土母质区栽培黄芩 Sr 平均含量相对低于流纹岩—凝灰岩成土母质区, 但两处栽培黄芩种植区内

表 5 承德地区与国内外典型药材产区根系土、栽培黄芩、野生黄芩及其他常见药材锶含量 (mg/kg)

Table 5 Strontium content in root soil samples, cultivated and wild *Scutellaria baicalensis*, and other common medicinal materials in Chengde and typical domestic and foreign medicinal material production areas (mg/kg)

黄芩种类	项目	Sr含量			承德药材	鲜重Sr含量	常见药材Sr含量	产地
		Min	Max	Mean				
野生黄芩 (大庙—红旗)	土壤	100.50	4613.0	1106.5	黄芪	11.90	47.00	辽宁(干重) ^b
	根	15.93	116.51	45.74	桔梗	9.89	11.60	湖北(干重) ^b
	茎叶	24.68	153.93	67.62	苦参	18.10	7.56	河北 ^b
栽培黄芩 (五道岭—金沟屯)	土壤	141.70	687.40	228.94	山楂	11.20	9.84	河南(干重) ^c
	根	17.19	36.00	25.16	柴胡	11.39	18.80	湖北(干重) ^b
	茎叶	22.19	66.74	32.24	郁李仁	2.75	3.08	内蒙古(干重) ^b
金沟屯栽培黄芩	土壤	141.70	687.40	240.71	华北大黄	44.56	60.13	恩施(干重) ^d
	根	20.10	36.00	28.41	射干	10.49	0.57	神农架(鲜重) ^e
	茎叶	27.36	66.74	39.55	土贝母	7.27	2.31	恩施(干重) ^d
五道岭栽培黄芩	土壤	146.80	455.50	220.38	紫苏叶	10.40	3.74	神农架(鲜重) ^e
	根	17.19	27.61	22.79	当归根茎	3.59	18.70	甘肃(根干重) ^b
	茎叶	22.19	34.90	28.25	当归叶	12.80	32.10	恩施(根干重) ^d
采样位置	Sr含量与生物富集系数			党参根	20.50	46.20	湖北(根干重) ^b	
	土壤	黄芩	BCF	党参茎	52.00	51.86	恩施(根干重) ^d	
承德滦平 (以鲜重计)	所有样品	616.08	34.24	0.118	党参叶	61.70	18.00	山西潞党参 ^b
	野生黄芩	1106.46	45.74	0.106	何首乌根	11.80	1.91	神农架(鲜重) ^e
	栽培黄芩	228.94	25.16	0.128	何首乌茎	12.20	0.40	俄罗斯(鲜重) ^f
	金沟屯黄芩	240.71	28.41	0.112	甘草	21.21	294.0	内蒙古(干重) ^b
	五道岭黄芩	220.38	22.79	0.150	荆芥叶	23.00	11.70	意大利(鲜重) ^g
河北围场 ^a	41.46	211.16	5.09	板蓝根	4.51	连翘	8.30 湖北 ^b	
河北赤城 ^a	33.53	156.14	4.66	苍术	13.26	11.40	克罗地亚 ^h	
黑龙江呼玛 ^a	181.08	48.56	0.27	知母	8.97	丹参	43.30 湖北 ^b	
黑龙江杜尔伯特 ^a	92.07	23.08	0.25	地榆	25.11	6.52	山东 ^b	
吉林白城 ^a	156.01	27.42	0.18	藿香茎	8.38	葛根	5.46 广西 ^b	
吉林延吉 ^a	105.39	17.19	0.16	藿香叶	18.43	104.3	恩施 ^d	
内蒙古林西 ^a	88.41	24.16	0.27	穿山龙	119.00	94.30	湖北 ^b	
内蒙古赤峰 ^a	38.97	19.31	0.50	威灵仙根	15.90	黄柏	99.69 恩施 ^d	
内蒙古额尔古纳 ^a	70.44	15.32	0.22	威灵仙茎	21.00	百合	0.39 恩施 ^d	
甘肃合水 ^a	58.86	17.11	0.29	威灵仙叶	52.20	菊花	14.30 湖北 ^b	
北京延庆 ^a	120.90	16.77	0.14	马鞭草茎	21.60	神农香菊	13.07 恩施 ^d	
陕西延安 ^a	71.40	14.69	0.21	马鞭草叶	74.20	桃仁	11.50 陕西 ^b	
陕西太白 ^a	32.95	10.16	0.31	瞿麦茎	15.30	杏仁	7.92 陕西 ^b	
陕西山阳 ^a	27.22	9.24	0.34	瞿麦叶	26.40	明党参	14.20 安徽 ^b	
山西五台 ^a	39.16	13.49	0.34	千屈菜	9.83	太子参	12.00 山东 ^b	
山西汾阳 ^a	32.14	12.15	0.38	藁本根	14.82	温热药	40.03 总计105种中药材 ^b	
				鸡冠花叶	23.18	寒凉药	56.73	

注: a—王升等, 2014; b—管竞环和李恩宽, 1998; c—Xu, 2009; d—汪丹等, 2022; e—卜怡然等, 2020; 肖潇等, 2022; f—Dyakova, 2023; g—Zeinera et al., 2015; h—Bonari et al., 2019。

黄芩 Sr 平均含量均相对低于野生黄芩。与此同时, 王升等(2014)通过对全国 16 个不同产地的 92 个野生黄芩样本 Sr 含量对比分析表明, 河北地区黄芩 Sr 含量显著高于其他地区, 其中承德市围场和张家口赤城地区采集的黄芩根系(干重)Sr 含量分别达 211.16 mg/kg 和 156.14 mg/kg, 约为其他 14 个产地黄芩样品的 11 倍和 8 倍, 远高于其他产区黄芩 Sr 平均含量 9.24~48.56 mg/kg 和 105 味中药中的 Sr 平均含量 23.5 mg/kg。

根据表 5, 区内所有黄芩根部样品 Sr 元素 BCF 值范围为 0.014~0.281, 平均为 0.118; 茎叶样

品 Sr 元素 BCF 值范围为 0.024~0.487, 平均为 0.159, 黄芩不同组织对 Sr 元素的摄取强度总体为中等摄取。野生黄芩和栽培黄芩根部对 Sr 摄取的 BCF 平均值分别为 0.106 和 0.128, 人工栽培种植对改善黄芩对 Sr 元素的摄取富集具有有利影响。五道岭斜长片麻岩成土母质区栽培黄芩 Sr 元素 BCF 平均值为 0.150, 相对高于金沟屯流纹岩—凝灰岩成土母质区黄芩 Sr 元素 BCF 平均值 0.118, 可能与土壤理化性质的差异有关, 如 pH 和 SOM 含量差异造成的元素形态和生物有效性差异(孙厚云等, 2020b)。赵曼茜等(2010)、王升等(2014)和郭兰萍

等(2014)对全国范围内野生黄芩内无机元素研究表明,黄芩对各元素的吸收能力受产地的影响较大,黄芩中 P 和 Sr 含量分别与黄芩产地海拔和年均温呈显著负相关,与经度和纬度呈显著正相关,指示高温不利于黄芩根对 P 和 Sr 的吸收;土壤中 P 和铁族元素(Cr、Fe、Mn)、Mg 和 Sr 对黄芩中无机元素积累影响较大,黄芩对 Zn、Fe、Ge、Mg、Mn 和 Sr 的吸收具有协同作用。河北围场和赤城黄芩根系土中 Cr、Fe、Ge、K、Mn、Sr 显著高于其他产地,河北地区黄芩对 Sr 的生物富集系数 BCF 达 3.52,赤城和围场地区黄芩对 Sr 的摄取 BCF 平均值达 4.66 和 5.09,对 P 富集系数亦达到 1.27,均表现为强烈富集,显著高于其他 14 个产区黄芩对 Sr 摄取的 BCF 平均值 0.14~0.50(中等摄取)。

锶是中药功效的重要影响因素,秦俊法等(1982, 1983)对 126 种中草药 Sr 含量整理分析表明,各类中药 Sr 含量范围为 0.21~70.5 mg/kg,其中抗癌药、补益药中 Sr 含量总体较高。管竞环和李恩宽(1998)研究表明,110 种炮制中药首方剂中 Sr 含量平均达 310 mg/kg,温热药和寒凉药 Sr 含量平均分别为 40.03 mg/kg 和 56.73 mg/kg。“植物类中药无机元素含量区间表”将自然界植物中无机元素分成 1 到 10 级,等级越高表明该植物中某种元素在自然界的相对水平越高,其中河北黄芩 Sr 含量达到 5 级,其他产地黄芩 Sr 含量则主要为 4 级(赵曼茜等, 2010; 王升等, 2014; 郭兰萍等, 2014)。承德富 Sr 地区多为栽培黄芩适宜种植区,富锶黄芩和中药材相关生态产业具有较大开发前景。根据表 5,承德区内其他 27 种中药材植株 Sr 平均含量为 2.75~119.0 mg/kg(鲜重),其中穿山龙、马鞭草叶、党参叶、威灵仙叶、华北大黄、瞿麦叶、地榆鲜重 Sr 含量即已超过 105 味中药中的 Sr 平均含量 23.5 mg/kg;甘草、威灵仙茎、党参根鲜重 Sr 含量亦接近 23.5 mg/kg。不同产地同种药材 Sr 含量对比分析表明,研究区内大宗药材苦参、山楂、射干、土贝母、紫苏叶、党参、何首乌、荆芥叶鲜重 Sr 含量已超过国内外同种药材干重 Sr 含量,如区内苦参 Sr 含量(18.10 mg/kg)是河北其他地区苦参 Sr 含量的 2.39 倍,射干、紫苏、何首乌根、何首乌茎 Sr 平均含量分别为湖北神农架地区的 18.47、2.78、6.17 和 30.2 倍(卜怡然等, 2020; 肖潇等, 2022),土

贝母锶含量是湖北恩施的 3.15 倍(汪丹等, 2022),荆芥 Sr 含量(23.0 mg/kg)是意大利荆芥样品的 1.97 倍(Zeiner et al., 2015)。另外,承德地区种植面积较大的连翘、丹参、葛根、黄柏、桃仁、杏仁、党参等中药材亦具富锶潜力,如克罗地亚地区连翘 Sr 含量达 11.40 mg/kg(Bonari et al., 2019),湖北地区丹参、葛根和黄柏 Sr 平均含量达 43.30、104.3 和 97.0 mg/kg(管竞环和李恩宽, 1998; 汪丹等, 2022)。

中药资源是国家重要的战略性资源,挖掘利用好中医药资源,开展富锶、富硒、富锗、富锌中草药开发研究,对实现中医药标准化和产业化具有重要现实和长远意义。依托中药材“种质资源”优势和富锶水土生态地球化学条件,在承德市“十四五”规划“绿色食品及生物医药产业”重大工程开展和河北省燕山中药材经济核心示范区建设背景下,承德市标准化中药种植基地建设和中药质量标准提升工程持续推进,为区内富锶中药材产业的发展提供了良好条件。阐明区内主要中药材锶含量特征后,承德市能有序开展富锶道地—药食两用中药材的引种、驯化、野生种质资源收集科技研发工作,果药、林药、粮药、药药、种养结合等复合高效栽培模式的试验工作,助力推进培育中药养生文化,发展药茶、药浴、药膳、中药饮片及相关保健品等富锶中药材产业,推进中药材旅游观光养生项目建设,加速实现中药材产业与旅游业同步发展,有利于巩固拓展脱贫攻坚成果和全面推进乡村振兴。

5.4 富锶产品安全阈值

富锶生态产品锶含量达到一定限值后,需考虑 Sr 超安全阈值引起的健康风险。目前,世界卫生组织还没有建立饮用水中锶的标准值,但国际上已有一些国家的饮用水质量标准对锶浓度进行了限制,如美国环境保护局(USEPA)规定的饮用水 Sr²⁺浓度健康风险筛选限值(HBSL, Health-Based Screening Level)为 4.0 mg/L(Musgrove, 2021),加拿大卫生部 2019 年颁布了相关标准,限定饮用水的 Sr²⁺浓度界限值为 7.0 mg/L(Health Canada, 2019)。骨质疏松症患者口服锶治疗研究表明,日摄入 680 mg 对患者来说是安全的。从目前的数据来看,日常饮食中的锶含量不足以对人体产生危害(韩娟和郭燕枝, 2022)。

6 结论

(1) 承德市全区、红旗—大庙钒钛磁铁矿矿集区小流域表层土壤 Sr 元素地球化学基线值分别为 206.87~216.49 mg/kg、241.69~260.51 mg/kg。承德全区表层土壤 Sr 含量范围为 10.02~8621.0 mg/kg, 平均达 514.59 mg/kg, 68.10% 样品 Sr 含量超过中国土壤 A 层 Sr 背景值 165 mg/kg。承德中部位于华北克拉通北部 Sr 高背景区, 全区基岩 Sr 含量平均为 546.57 mg/kg。不同地质建造基岩 Sr 元素丰度斜长—辉长岩>变质闪长岩>安山岩>玄武岩>斜长片麻岩—变粒岩>花岗岩>流纹岩—凝灰岩类>陆源碎屑岩>钾长片麻岩>长英质砂岩>灰岩>泥页岩>白云岩。

(2) 区内 Sr 含量较高的特征寄主矿物为辉石、橄榄石、磷灰石、钙长石和角闪石。岩石化学风化过程中, 除钾长片麻岩、白云岩和泥页岩外, 不同地质建造关键带土壤层相对基岩 Sr 元素总体均表现为淋滤流失; 斜长岩、斜长片麻岩和花岗岩 Sr 淋溶损失程度较高。

(3) 承德市基岩 Sr 含量空间分异与区域构造格架具有良好的耦合关系, Sr 高异常区位于坝上康保—围场深大断裂以北, 丰宁—隆化和红石砬—大庙—娘娘庙深大断裂之间的广大区域以及承德东部尚义—平泉深大断裂周边逆冲带区域内。华北克拉通大陆地壳通减薄隆起导致的深大断裂间富锶太古宇变质基底物质上涌出露, 基性岩浆通过陆壳混染和结晶分离, 使得出露的火山岩、侵入岩和变质基底建造具明显的富锶特征, 形成区域锶地球化学异常。

(4) 承德市滦河流域地下水 Sr^{2+} 浓度范围为 0.04~3.42 mg/L, 58.08% 样品 Sr^{2+} 浓度超过 0.40 mg/L。红旗—大庙斜长岩体周边 81.61% 井水和 53.57% 泉水样品 Sr^{2+} 浓度超过 0.40 mg/L。地热温泉水 Sr^{2+} 浓度范围为 0.15~3.81 mg/L, 平均为 0.78 mg/L。富锶矿泉水、地热温泉康养、饮品和锶泉酿酒产业仍具开发潜力。

(5) 区内 34 种植物样品 Sr 平均含量为 0.77~26.60 mg/kg, 地理标志作物板栗、山楂、杏、国光苹果、马铃薯均具有较高的锶含量。道地药材黄芩

根系 Sr 含量范围为 15.94~116.51 mg/kg, 显著高于中国其他黄芩产区, 且野生黄芩 Sr 平均含量均相对高于栽培黄芩。区内其他 27 种中药材植株 Sr 含量范围为 2.75~119.0 mg/kg(鲜重), 富锶生态农业、中药材生态产业开发潜力巨大。

注释

① 自然资源部中国地质调查局. 2019. 承德自然资源图集 [R]. 1-113.

References

- An Yonglong, Liu Dongda, Wang Xiaofeng, Yin Zhiqiang, Wang Aijun, Wan Liqin, Qi Huan, Shao Hai. 2022. Thoughts on "the 14th Five-Year Plan" of municipal natural resources under the new development pattern—Taking Chengde City of Hebei Province as an example[J]. *Natural Resource Economics of China*, 35(3): 66-72 (in Chinese with English abstract).
- Arth J G. 1976. Behavior of trace elements during magmatic processes: A summary of theoretical models and their applications[J]. *Journal of Research of the U. S. Geological Survey*, 4: 41-47.
- Birke M, Rauch U, Harazim B, Lorenz H, Glatte W. 2010. Major and trace elements in German bottled water, their regional distribution, and accordance with national and international standards[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 107: 245-271.
- Bonari G, Monaci F, Nannoni F, Angiolini C, Protano G. 2019. Trace element uptake and accumulation in the medicinal herb *Hypericum perforatum* L. across different geolithological settings[J]. *Biological Trace Element Research*, 189: 267-276.
- Bruna S A, Lorenzo F, Massimo D' A, Vincenzo M, Mariano M, Ross S, David W. 2023. Characterizing wine terroir using strontium isotope ratios: a review[J]. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 59(4-6): 327-348.
- Bu Yiran, Wu Libang, Huang Qiang, Zhou Yide, Zhang Xiuqin, Gao Rongjie, Wei Xiuli, Liu Zhiguo. 2020. Investigation on the resources of strontium-rich plants in Shennongjia[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 11(3): 932-937 (in Chinese with English abstract).
- Cao Yanling, Wu Bo, Fan Zhenhua, Cui Su, Liu Qianran, Guo Peng, Wang Yanting. 2021. Study on geological origin of strontium rich soil in Dingtao Area in Shandong Province[J]. *Shandong Land and Resources*, 37(1): 28-36 (in Chinese with English abstract).
- Charlier B, Namur O, Bolle O, Latypov R, Duchesne J. 2015. Fe-Ti-V-P ore deposits associated with Proterozoic massif-type anorthosites and related rocks[J]. *Earth-Science Reviews*, 141: 56-81.
- Chen W T, Zhou M F, Gao J F, Zhao T P. 2015. Oscillatory Sr isotopic signature in plagioclase megacrysts from the Damiao anorthosite complex, North China: Implication for petrogenesis of massif-type

- anorthosite[J]. *Chemical Geology*, 393–394: 1–15.
- China National Environmental Monitoring Centre. 1990. Background Values of Soil Elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 87–91 (in Chinese).
- Cindrić I J C A, Zeiner M, Konanov D M, Stingeder G. 2005. Metal characterization of White Hawthorn organs and infusions[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(6): 1798–1802.
- Coish R A, Sinton C W. 1992. Geochemistry of mafic dikes in the Adirondack mountains: Implications for late Proterozoic continental rifting[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110: 500–514.
- Danish Veterinary and Food Administration. 2002. Danish Food Composition Databank [DB/OL]. National Food Institute, Technical University of Denmark. Available from: www.foodcomp.dk.
- Dyakova N A. 2023. Features of accumulation of macro- and trace elements by medicinal plant raw materials of Voronezh region[J]. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 56: 1471–1476.
- Fan Qingjie, Han Jianguo, Xiang Fuxing, Ji Zhiqiang. 2018. Introduction and demonstration of new brewing varieties of Sorghum in Chengde[J]. *Horticulture & Seed*, 38(1): 51–54 (in Chinese with English abstract).
- Fernandes J, Reboredo F H, Luis I, Silva M M, Simões M M, Lidon F C, Ramalho J C. 2022. Elemental composition of commercial herbal tea plants and respective infusions[J]. *Plants*, 11(11): 1412.
- Goldschmidt V M. 1933. Grundlagen der quantitativen Geochemie[J]. *Fortschr Mineral*, 17: 112–156.
- Goldschmidt V M. 1954. *Geochemistry*[M]. Oxford: Clarendon Press.
- González W D, Rubio C, Gutiérrez Á J, González G L, Mesa J M C, Gironés C R, Ojeda A B, Hardisson A. 2013. Dietary intake of barium, bismuth, chromium, lithium, and strontium in a Spanish population (Canary Islands, Spain)[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 62: 856–868.
- Guan Jinghuan, Li Enkuan. 1998. Quantification of TCM Theory and Trace Elements[M]. Wuhan: Hubei Publishers of Science and Technology (in Chinese).
- Guo Lanping, Wang Sheng, Zhang Ji, Yang Guang, Zhao Manxi, Ma Weifeng, Zhang Xiaobo, Li Xuan, Han Bangxing, Chen Naifu, Huang Luqi. 2014. Effects of ecological factors on secondary metabolites and inorganic elements of *Scutellaria baicalensis* and analysis of geoherbism[J]. *Science China: Life Science*, 44(1): 66–74 (in Chinese with English abstract).
- Guo Yingchao, Sun Zhihui, Liu Wei, Zhao Jing, Fan Yanchao, Jing Zhihua. 2023. Characteristics of strontium-rich soils and strontium content of crops in Chengde[J]. *Mineral Exploration*, 14(7): 1289–1296 (in Chinese with English abstract).
- Han Juan, Guo Yanzhi. 2022. Report on the Development of Strontium-rich Food in China[M]. Beijing: China Light Industry Press, 1–120 (in Chinese).
- Han Shen, Liang Nana, Kong Weiheng, Gu Jin, Gao Feng, Wang Peiyue, Liu Yin. 2014. Varietal characterization of mineral elements in Cabernet Sauvignon dry red wines and its application in geographical origin traceability[J]. *China Brewing*, 33(12): 34–41 (in Chinese with English abstract).
- He H L, Yu S Y, Song X Y, Du Z S, Dai Z H, Zhou T, Xie W. 2016. Origin of nelsonite and Fe–Ti oxides ore of the Damiao anorthosite complex, NE China: Evidence from trace element geochemistry of apatite, plagioclase, magnetite and ilmenite[J]. *Ore Geology Reviews*, 79: 367–381.
- Health Canada. 2019. Guidelines for Canadian drinking water quality summary table[S]. Ottawa: Health Canada.
- Hou Qingye, Yang Zhongfang, Yu Tao, Xia Xueqi, Cheng Hangxin, Zhou Guohua. 2020. *Soil Geochemical Parameters in China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–1249 (in Chinese).
- Howe A, Fung L H, Lalor G, Rattray R, Mitko V. 2005. Elemental composition of Jamaican foods 1: A survey of five food crop categories[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 27: 19–30.
- Hu J L, Hu S X, Yang F Q, Wang N, Yin M. 2019. Geochemical characteristics and resource potential evaluation of Strontium-rich soil in Northern Suizhou, Hubei Province[J]. *Resources Environment & Engineering*, 33(3): 341–346, 367.
- Huang Xulai, Gao Yanan, Zhang Yangdong, Wang Jiaqi, Zheng Nan. 2023. Research progress of strontium function in food[J]. *Food Science*, 44(15): 397–406 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Tao. 2013. *Environmental Geochemistry of Geographic Origin and Chemical Labels of Sauce Flavor Type-Liquor*[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Kabata P A, Mukherjee A B. 2007. *Trace Elements from Soils to Human* [M]. Berlin Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Kamar V, Dağalp R, Taştekin M. 2018. Determination of heavy metals in Almonds and mistletoe as a parasite Growing on the almond tree using ICP-OES or ICP-MS[J]. *Biological Trace Element Research*, 185: 226–235.
- Karadaş C, Kara D. 2012. Chemometric approach to evaluate trace metal concentrations in some spices and herbs[J]. *Food Chemistry*, 130: 196–202.
- Košić K, Pivac T, Romelić J, Lazić L, Stojanović V. 2011. Characteristics of thermal-mineral waters in Backa region (Vojvodina) and their exploitation in spa tourism[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15: 801–807.
- Lee J M, Koh D C, Chae G T, Kee W S, Ko K S. 2021. Integrated assessment of major element geochemistry and geological setting of traditional natural mineral water sources in South Korea at the national scale[J]. *Journal of Hydrology*, 598: 126249.
- Li Chengdong, Zhang Qi, Miao Laicheng, Meng Xianfeng. 2004. Mesozoic high-Sr, low-Y and low-Sr, low-Y types granitoids in the northern Hebei Province: Geochemistry and petrogenesis and its relation to mineralization of gold deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 269–28 (in Chinese with English abstract).

- Li L X, Li H M, Zi J W, Rasmussen B, Sheppard, Simon A W, Meng J. 2019. Role of fluids in Fe–Ti–P mineralization of the Proterozoic Damiao anorthosite complex, China: Insights from baddeleyite–zircon relationships in ore and altered anorthosite[J]. *Ore Geology Reviews*, 115: 103186.
- Li Tong. 1976. Chemical element abundances in the Earth and it's major shells[J]. *Geochimica*, (3): 167–174 (in Chinese with English abstract).
- Li X, Wei X F, Wu J, Yin Z Q, Wan L Q, Sun H Y, An Y L. 2022. Geochemical characteristics and growth suitability assessment of *Scutellaria baicalensis* Georgi in the Earth's critical zone of North China[J]. *Journal of Mountain Science*, 19(5): 1245–1262.
- Liu Congqiang. 2007. Biogeochemical Processes and Cycling of Uutrients in the Earth's Surface: Cycling of Nutrients in Soil–plant System of Karstic Environments, Southwest China[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Liu Hongtao, Sun Shihua, Liu Jianming, Zhai Mingguo. 2002. The Mesozoic high–Sr granitoids in the northern marginal region of NorthChina Craton: Geochemistry and source region[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 257–274 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jian. 2006. Yanshanian Tectonic Evolution of the Chengde Basin and the Adjacent Area in the Eastern Segment of the Yanshan Fold–and–thrust Belt[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Liu J G, Cai R H, Pearson D G, Scott J M. 2019. Thinning and destruction of the lithospheric mantle root beneath the North China Craton: A reviews[J]. *Earth–Science Review*, 196: 102873.
- Liu Junshuai, Zheng Jilin, Cai Yanlong, Wei Xiaoyong, Guo Xiaoyu, Wang Dake, Sun Jingyao, Yang Zhiwei. 2022. Geochemistry and resource potential evaluation of strontium–rich soil in Sanggan River Basin of Datong, Shanxi Province[J]. *Geology and Resources*, 31(5): 675–683, 692 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yonglin, Luo Kunli, Ni Runxiang, Wang Shaobin, Tian Xinglei, Wang Lin, Zhang Xiaojun, Gao Xing. 2013. High quality natural Li–rich and Sr–rich drinking–water in Yutian County, Xinjiang and its development Prospect[J]. *Journal of Natural Resources*, 28(12): 2150–2158 (in Chinese with English abstract).
- Luo Junqiang, Wang Shijun, Bai Yang, Zheng Xiongwei, Zhang Yuanpei, Wu Yin, Zheng Guoqun, Hu Qing. 2019. Strontium in rice and its cumulative effect in the east of Zhongxiang City[J]. *Resources Environment & Engineering*, 33(4): 491–494 (in Chinese with English abstract).
- Ma Yingjun. 1999. Trace Element and Strontium Isotope Geochemistry During Chemical Weathering[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Martins C A, Cerveira C, Scheffler G L, Pozebon D. 2015. Metal determination in tea, wheat, and wheat flour using diluted nitric acid, high–efficiency nebulizer, and axially viewed ICP OES[J]. *Food Analytical Methods*, 8(7): 1652–1660.
- Mason B, Moore C B. 1982. Principles of Geochemistry (Fourth Edition) [M]. Toronto, Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Millour S, Noël L, Chekri R, Vastel C, Kadar A, Sirot V, Leblanc J C, Guérin T. 2012. Strontium, silver, tin, iron, tellurium, gallium, germanium, barium and vanadium levels in foodstuffs from the Second French Total Diet Study[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 25(2): 108–129.
- Musgrove M. 2021. The occurrence and distribution of strontium in U. S. groundwater[J]. *Applied Geochemistry*, 126: 104867.
- Nash W P, Crecraft H R. 1985. Partition coefficients for trace elements in silicic magmas[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49: 2309–2322.
- Peng H, Yao F F, Xiong S, Wu Z H, Niu G, Lu T T. 2021. Strontium in public drinking water and associated public health risks in Chinese cities[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 28: 23048–23059.
- Qi Lin. 2014. Accumulative Characteristics and Stress Responses of Triticeae Crops to Sr[D]. Gansu: Lanzhou University (in Chinese with English).
- Qin Junfa, Rong Tingwen, Zhao Houshao, Ye Dehua, Wang Yun, Ma Jixiao, Bao Xuesheng, Jiao Donghai, Liu Xunchu. 1982. Energy dispersive X–ray analysis of trace elements in Chinese herbal medicine[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 13(9): 14–18 (in Chinese).
- Qin Junfa, Ye Dehua, Wang Yun, Ma Jixiao, Bao Xuesheng. 1983. Energy dispersive X–ray analysis of trace elements in Chinese herbal medicine[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 14(11): 12–13 (in Chinese).
- Qiu Lingcang, Pan Jun, Duan Binwu. 1993. The mineral nutrient component and characteristics of color and white, brown rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 7(2): 95–100 (in Chinese with English abstract).
- Ren J Y, Tamaki K, Li S T, Zhang J J. 2002. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas[J]. *Tectonophysics*, 344(3–4): 175–205.
- Rollinson H R. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation[M]. London, UK: Longman Group UK Ltd.
- Rudnick R L, Gao S. 2003. Composition of the Continental Crust[M]. Holland H D, Turekian K K(eds.). Treatise on Geochemistry. Amsterdam, Netherlands and London, UK: Elsevier Ltd, 1–51.
- Schroeder H A, Tipton I H, Nason A P. 1972. Trace metals in man: Strontium and barium[J]. *Journal of Chronic Disease*, 25(9): 491–517.
- Shao Wenjun. 2009. Determination of trace cobalt, copper, manganese, Strontium and zinc in pollen, ginseng and *Raidx Astragali* by ICP–MS[J]. *Beverage Industry*, 12(5): 24–26 (in Chinese with English abstract).
- Shi Changyi, Liang Meng, Feng Bin. 2016. Average background values

- of 39 chemical elements in stream sediments of China[J]. *Earth Science*, 41(2): 234–251.
- Shi Dan, Li Zhou. 2020. The Development Status and Trend of Beverage Industry in China[J]. *Food and Fermentation Sciences & Technology*, 56(4): 69–74 (in Chinese with English abstract).
- Song Yuqin, Zhang Lixiao, Cao Shuyan. 2000. Study on Elements Composition of Two Kinds of Paddy in Horqin Sandland[J]. *Journal of Desert Research*, 20(Suppl.): 77–80 (in Chinese with English abstract).
- Stanley C S. 1981. *Handbook of Stable Strontium*[M]. New York and London: Plenum Press.
- Su Chuntian. 2021. Formation mechanism of Strontium-rich groundwater in Xintian County, Hunan Province[D]. Wuhan: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Sun H Y, Sun X M, Wei X F, Chen Z R, Zhang H Q. 2025. Occurrence and enrichment of phosphorus in the shallow aquifer of a Fe–V–Ti–P deposit headwater catchment: Insights from rock-weathering, hydrochemical and isotopic approaches[J]. *Journal of Hydrology*, 133557.
- Sun H Y, Sun X M, Wei X F, Huang X K, Ke G Q, Wei H. 2023. Geochemical characteristics and origin of Nuanquanzi geothermal water in Yudaokou, Chengde, Hebei, North China[J]. *Journal of Earth Science*, 34(3): 838–856.
- Sun Houyun, Ma Feng, Zhu Xi, Yu Mingxiao, Chen Ziran, Wei Xiaofeng. 2025. Hydrogeochemical evolution of geothermal fluids and its indications in the Yanshan uplift– North China fault basin, northern Hebei[J]. *Acta Geologica Sinica*, 99(5): 1711–1742.
- Sun Houyun, Sun Xiaoming, Jia Fengchao, Wang Yanli, Li Duojie, Li Jian. 2020b. The eco-geochemical characteristics of germanium and its relationship with the genuine medicinal material *Scutellaria baicalensis* in Chengde, Hebei Province[J]. *Geology in China*, 47(6): 1646–1667 (in Chinese with English abstract).
- Sun Houyun, Wei Xiaofeng, Gan Fengwei, Wang Heng, Jia Fengchao, He Zexin, Li Duojie, Li Jia, Zhang Jing. 2020a. Genetic type and formation mechanism of strontium-rich groundwater in the upper and middle reaches of Luanhe River basin [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 41(1): 65–79 (in Chinese with English abstract).
- Sun Houyun, Wei Xiaofeng, Jia Fengchao, He Zexin, Sun Xiaoming. 2021b. Geochemical baseline and ecological risk accumulation effect of soil heavy metals in the small-scale drainage catchment of V– Ti– magnetite in the Yixun River basin, Chengde[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(2): 588–604 (in Chinese with English abstract).
- Sun Houyun, Wei Xiaofeng, Sun Xiaoming, Jia Fengchao, Li Duojie, Li Jian. 2021a. Element migration and accumulation characteristics of Bedrock–Regolith–Soil–Fruit Plant Continuum of the Earth’s Critical Zone in Chengde almond producing area[J]. *Earth Science*, 46(7): 2621–2645 (in Chinese with English abstract).
- Taylor S R. 1964. The abundance of chemical elements in the continental crust: A new table[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28: 1273–1285.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. *The continental crust: Its composition and evolution*[M]. London, UK: Blackwell Scientific Publications.
- Varo P, Saari E, Paaso A, Koivisto P. 1982. Strontium in Finnish foods[J]. *International Journal for Vitamin and Nutrition Research*, 52(3): 342–350.
- Vinogradov A P. 1962. Average concentration of chemical elements in the chief types of igneous rocks of the crust of the Earth[J]. *Geochemistry*, 7: 555–571 (in Russian).
- Wan Jialiang. 2012. Deformation and Geochronology of the Fengning–Longhua Fault Zone in Yanshan Intraplate Belt, North China[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Wang A H, Wang Z H, Liu J K, Xu N C, Li H L. 2021. The Sr/Ba ratio response to salinity in clastic sediments of the Yangtze River Delta[J]. *Chemical Geology*, 559: 1–17.
- Wang Dan, Yan Jiali, Wang Mengyuan, Xia Wei, Zhou Wei, Zhang Yangyang. 2022. Study on content characteristics and influencing factors of selenium, strontium, germanium and zinc in Chinese herbal medicine in Enshi prefecture[J]. *Resources Environment & Engineering*, 36(5): 651–657 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dongxiao, Shui Haoche, Zeng Qingbo, Gu Hao, Wang Leil, Cao Wei. 2023. Discussion on soil strontium geochemical characteristics and soil rich standard of strontium: An example of Shihe river area in Gushi County of Henan[J]. *Mineral Resources and Geology*, 37(2): 360–370 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dongxiao, Yuan Dezhi. 2023. Strontium in soil–crop migration and enrichment and discussion on the standard of strontium enrichment in crops: taking the area of the Shihe River in Gushi, Henan as an example[J]. *Geoscience*, 37(3): 767–777 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jingbing, Wei Xiaofeng, Zhang Huiqiong, Gan Fengwei. 2020. The eco-geological survey based on geological formation, exemplified by integrated geological survey of National Ecological Civilization Demonstration Area in Chengde City, Hebei Province[J]. *Geology in China*, 47(6): 1611–1624 (in Chinese with English abstract).
- Wang Meng. 2014. Origin of the Proterozoic Massif-type Nelsonite—A case study on the Damiao anorthosite complex, North China Craton[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Wang Sheng, Zhao Manxi, Guo Lanping, Yang Gung, Zhang Xiaobo, Chen Meilan, Lin Shufang, Huang Luqi. 2014. The contents of inorganic elements of *Scutellaria baicalensis* from different origins and its relationship with inorganic elements in relevant rhizosphere soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 34(16): 4734–4745 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xuelian, Dong Dongxue, Ding Yanshuai, Fang Zaixi, Wang Linjiang, Wang Shujun, LÜ Mingsheng. 2022. Distribution and

- release of trace element strontium in aquatic products of Haizhou Bay[J]. *Food Research and Development*, 43(15): 182–186 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xueqiu, Liu Hanliang, Wang Wei. 2021. *Geochemistry of Rare and Dispersed Elements in China*[M]. Beijing: Science Press, 389–409.
- Wang Xueqiu, Zhou Jian, Xu Shanfa, Chi Qinghua, Nie Lanshi, Zhang Bimin, Yao Wensheng, Wang Wei, Liu Hanliang, Liu Dongsheng, Han Zhixuan, Liu Qingqing. 2016. China soil geochemical baselines networks: Data characteristics[J]. *Geology in China*, 43(5): 1469–1480 (in Chinese with English abstract).
- Watts P, Howe P. 2010. *Strontium and Strontium Compounds*[M]. Geneva, Switzerland: World Health Organization.
- Wedepohl K H. 1995. The composition of the continental crust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7): 1217–1232.
- Wei X F, Sun H Y, Chen Z R, Li X, Wei H, Jia W R, Li W. 2022. Element migration and enrichment characteristics of bedrock–regolith–soil–plant continuum system in the chestnut planting area, Chengde, China[J]. *Acta Geochimica*, 41(5): 839–860.
- Wei Xiaofeng, Sun Houyun, Zhang Jing, Li Xia, Fan Liuyang, He Zenxin. 2020. Eco–geochemical process of characteristic forest fruit resources and its significance of quality improvement in Chengde City[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 47(6): 99–108 (in Chinese with English abstract).
- White A F, Schulz M M S, Vivity D V, Blum A E, Stonestrom D A, Anderson S P. 2008. Chemical weathering of a marine terrace chronosequence, Santa Cruz, California I: Interpreting rates and controls based on soil concentration–depth profiles[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(1): 36–68.
- Xi Xiaohuan, Hou Qingye, Yang Zhongfang, Ye Jiayu, Yu Tao, Xia Xueqi, Cheng Hangxin, Zhou Guohua, Yao Lan. 2021. Big data–based studies of the variation features of Chinese soil's background value versus reference value: A paper written on the occasion of Soil Geochemical Parameters of China's publication[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 45(5): 1095–1108 (in Chinese with English abstract).
- Xi Xueyao, Gao Yanan, Wang Jiaqi, Zheng Nan. 2023. Osteogenic mechanism of strontium and research and development status of Strontium–rich foods[J]. *Modern Food Science and Technology*, 39(9): 380–392 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Xiao, Cui Yuanyuan, Zhang Tingdi, Zhang Xiuqin, Niu Zuoqing, Liu Zhiguo, Wei Xiuli. 2022. Determination of strontium content in common vegetables in Shennongjia forest district and variation influential factors investigation[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 13(1): 208–216 (in Chinese with English abstract).
- Xu H. 2009. Analysis of trace elements in Chinese Therapeutic Foods and Herbs[J]. *The American Journal of Chinese Medicine*, 37(4): 625–638.
- Xu Huan, Liu Yongqing, Liu Yanxue, Kuang Hongwei. 2011. Stratigraphy, sedimentology and tectonic background of basin evolution of the Late Jurassic–Early Cretaceous Tuchengzi Formation in Yinshan–Yanshan, North China[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(4): 88–106. (in Chinese with English abstract)
- Yang G F, Zhuo S G, Wang B, Zhang J X, Xu X J. 2012. The types of thermal spring and its geological distributive characteristics in Yanshan orogenic belt, China[J]. *Advanced Materials Research*, 518–523: 5846–5850.
- Yang Siyu. 2019. *Soil Geochemical Characteristics and Suitability Evaluation of Dingtao Yam Planting Area in Shandong Province*[D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Yin Zhiqiang, Hao Aibing, Wu Aimin, Ren Jinwei, Zhou Ping, Wei Xiaofeng, Peng Ling, Li Xia, Shao Hai, Pang Jumei. 2021. The key progress in Chengde and the national proposal of the integrated survey of natural resources[J]. *Geological Bulletin of China*, 41(12): 2087–2096 (in Chinese with English abstract).
- Zeinera M, Cindrić I J, Požgaj M, Pirkla R, Šilić T, Stingedera G. 2015. Influence of soil composition on the major, minor and trace metal content of Velebit biomedical plants[J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 106: 153–158.
- Zeng Yawen, Wang Luxiang, Du Juan, Yang Shuming, Wang Yuchen, Li Qiwan, Sun Zhenghai, Pu Xiaoying, Du Wei. 2009. Correlation of mineral elements between milled and brown rice and soils in Yunnan studied by ICP –AES[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 29(5): 1413–1417 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Manxi, Lü Jinrong, Guo Lanping, Ge Xiaoguang, Song Liangke. 2010. Effects of inorganic elements of soil on contents of inorganic elements and baicalin in scutellaria[J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 16(9): 103–106 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yiyang, Yan Mingcai. 1994. *Geochemistry of shallow sea sediments in China*[M]. Beijing: Science Press.
- Zhu Lixin, Ma Shengming, Wang Zhifeng. 2006. Soil eco–geochemical baseline in alluvial plains of eastern China[J]. *Geology in China*, 33(6): 1400–1405 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xueqin, Liu Wenbo, Li Zhiming, Chen Tan, Ren Yuxiang, Shao Hai, Wang Longfeng. 2020. Distribution and characterization analyses of strontium–bearing mineral spring water in the Chengde region[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 47(6): 65–73 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 安永龙, 刘东达, 王晓峰, 殷志强, 王爱军, 万利勤, 齐欢, 邵海. 2022. 新发展格局下市级自然资源“十四五”规划的思考——以河北省承德市为例[J]. *中国国土资源经济*, 35(3): 66–72.
- 卜怡然, 吴礼邦, 黄强, 周毅德, 张秀琴, 高荣杰, 位秀丽, 刘志国. 2020. 神农架富锶植物资源调查研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 11(3): 932–937.
- 曹艳玲, 吴波, 范振华, 崔素, 刘倩然, 郭鹏, 王艳婷. 2021. 山东省定

- 陶地区富铈土壤地质成因研究[J]. 山东国土资源, 37(1): 28-36
- 迟清华, 鄢明才. 2007. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社.
- 范庆杰, 韩建国, 项福星, 季志强. 2018. 承德地区酿酒专用高粱新品种引进与示范[J]. 园艺与种苗, 38(1): 51-54.
- 高山, 骆庭川, 张本仁, 张宏飞, 韩吟文, 赵志丹, HartmutKern. 1999. 中国东部地壳的结构和组成[J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 29(3): 204-213.
- 顾尚义. 2001. 酸性火山岩风化壳氧化还原界面地球化学研究——以广西凭祥英安岩与蚀变流纹岩风化壳为例[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所.
- 管竞环, 李恩宽. 1998. 中医药理论量化与微量元素[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社.
- 郭兰萍, 王升, 张霁, 杨光, 赵蔓茜, 马卫峰, 张小波, 李璇, 韩邦兴, 陈乃富, 黄璐琦. 2014. 生态因子对黄芩次生代谢产物及无机元素的影响及黄芩道地性分析[J]. 中国科学: 生命科学, 44(1): 66-74.
- 郭颖超, 孙志辉, 刘卫, 赵婧, 樊彦超, 景志华. 2023. 承德地区富铈土壤与农作物铈含量特征[J]. 矿产勘查, 14(7): 1289-1296.
- 韩娟, 郭燕枝. 2022. 中国富铈食品发展报告[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1-120.
- 韩深, 梁娜娜, 孔维恒, 古瑾, 高峰, 王珮玥, 刘莹. 2014. 赤霞珠葡萄酒中矿质元素的品种特点及其在产地鉴别中的应用[J]. 中国酿造, 33(12): 34-41.
- 侯青叶, 杨忠芳, 余涛, 夏学齐, 成航新, 周国华. 2020. 中国土壤地球化学参数[M]. 北京: 地质出版社, 1-1249.
- 胡江龙, 胡绍祥, 杨清富, 万能, 尹猛. 2019. 湖北随州北部富铈土壤地球化学特征及资源潜力评价[J]. 资源环境与工程, 33(3): 341-346, 367.
- 黄胥莱, 高亚男, 张养东, 王加启, 郑楠. 2023. 食品中铈功能的研究进展[J]. 食品科学, 44(15): 397-406.
- 姜涛. 2013. 酱香型白酒的原产地环境地球化学及其特征组分研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所.
- 黎彤. 1976. 化学元素的地球丰度[J]. 地球化学, (3): 167-174.
- 李承东, 张旗, 苗来成, 孟宪锋. 2004. 冀北中生代高 Sr 低 Y 和低 Sr 低 Y 型花岗岩: 地球化学、成因及其与成矿作用的关系[J]. 岩石学报, 20(2): 269-284.
- 刘丛强. 2007. 生物地球化学过程与地表物质循环——西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环[M]. 北京: 科学出版社.
- 刘红涛, 孙世华, 刘建明, 翟明国. 2002. 华北克拉通北缘中生代高铈花岗岩类: 地球化学与源区性质[J]. 岩石学报, 18(3): 257-274.
- 刘健. 2006. 燕山褶皱带东段承德盆地及邻区燕山期构造演化[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 刘军帅, 郑吉林, 蔡艳龙, 魏小勇, 郭晓宇, 王大可, 孙靖尧, 杨志伟. 2022. 山西大同桑干河流域富铈土壤地球化学特征及资源潜力评价[J]. 地质与资源, 31(5): 675-683, 692.
- 刘永林, 雒昆利, 倪润祥, 王少彬, 田兴磊, 王林, 张晓, 高星. 2013. 新疆于田县优质富锂富铈天然饮用矿泉水及其开发前景[J]. 自然资源学报, 28(12): 2150-2158.
- 罗军强, 王世俊, 白洋, 郑雄伟, 张元培, 吴颖, 郑国权, 胡青. 2019. 钟祥市东部地区水稻中铈及其累积效应研究[J]. 资源环境与工程, 33(4): 491-494.
- 马英军. 1999. 化学风化作用中的微量元素和铈同位素地球化学[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所.
- 彭闯. 2018. 富铈肉驴产业化开发前景分析[J]. 现代畜牧科技, (10): 26-27.
- 亓琳. 2014. 麦类作物对铈的富集特征和生理响应[D]. 甘肃: 兰州大学.
- 秦俊法, 荣廷文, 张厚绍, 叶德华, 王韵, 马寄晓, 包雪生, 焦东海, 刘训初. 1982. 中草药中微量元素的能量色散 X 射线分析[J]. 中草药, 13(9): 14-18.
- 秦俊法, 叶德华, 王韵, 马寄晓, 包雪声. 1983. 中草药中微量元素的能量色散 X 射线分析[J]. 中草药, 14(11): 12-13.
- 裘凌沧, 潘军, 段彬伍. 1993. 有色米及白米矿质元素营养特征[J]. 中国水稻科学, 7(2): 95-100.
- 邵文军. 2009. 电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 测定花粉、人参、黄芪中微量钴、铜、锰、铈和锌[J]. 饮料工业, 12(5): 24-26.
- 史长义, 梁萌, 冯斌. 2016. 中国水系沉积物 39 种元素系列背景值[J]. 地球科学, 41(2): 234-251.
- 沈阳市铈泉酒厂. 1995. 铈泉白酒[P]. 中国: CN93112080.2.
- 沈阳市铈泉酒厂. 1996. 铈泉白酒及其制造方法[P]. 中国: CN94110400.1.
- 石丹, 李洲. 2020. 我国饮料产业发展现状与趋势[J]. 食品与发酵科技, 56(4): 69-74.
- 宋豫秦, 张力小, 曹淑艳. 2000. 科尔沁沙地衬膜与滩涂水稻主要营养元素分析[J]. 中国沙漠, 20(增刊): 77-80.
- 苏春田. 2021. 湖南新田县富铈地下水形成机理研究[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 孙厚云, 马峰, 朱喜, 余鸣潇, 陈自然, 卫晓锋. 2025. 冀北燕山隆起—华北断陷盆地地热流体地球化学特征及地热学意义[J]. 地质学报, 99(5): 1711-1742.
- 孙厚云, 卫晓锋, 甘凤伟, 王恒, 贾凤超, 何泽新, 李多杰, 李健, 张竞. 2020a. 滦河流域中上游富铈地下水成因类型与形成机制[J]. 地球学报, 41(1): 65-79.
- 孙厚云, 孙晓明, 贾凤超, 王艳丽, 李多杰, 李健. 2020b. 河北承德锆元素生态地球化学特征及其与道地药材黄芩适生关系[J]. 中国地质, 47(6): 1646-1667.
- 孙厚云, 卫晓锋, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健. 2021a. 承德杏仁产区关键带基岩-土壤-作物果实 BRSPC 系统元素迁聚特征[J]. 地球科学, 46(7): 2621-2645.
- 孙厚云, 卫晓锋, 贾凤超, 何泽新, 孙晓明. 2021b. 承德伊逊河钒钛磁铁矿小流域土壤重金属地球化学基线及生态风险累积效应[J]. 地质学报, 95(2): 588-604.
- 万加亮. 2012. 燕山地区丰宁—隆化断裂带构造变形与时代[D]. 北京: 中国科学院地质与地质物理研究所.
- 汪丹, 闫加力, 王梦园, 夏伟, 周伟, 张阳阳. 2022. 恩施州中草药硒、铈、锆、锌元素含量特征及其影响因素研究[J]. 资源环境与工程, 36(5): 651-657.
- 王东晓, 水浩澈, 曾庆波, 谷浩, 王雷, 曹伟. 2023. 土壤铈地球化学特征及土壤富铈标准探讨——以河南固始史河一带为例[J]. 矿产与地质, 37(2): 360-370.

- 王东晓,袁德志. 2023. 镉在土壤-作物中迁移富集机制及作物富镉标准探讨:以河南固始史河一带为例[J]. 现代地质, 37(3): 767-777.
- 王贵平,杨成发,薛晓敏,王金政. 2022. 山东省沂源县“富镉”苹果成因研究与分析[J]. 烟台果树, (1): 13-16.
- 王京彬,卫晓锋,张会琼,甘凤伟. 2020. 基于地质建造的生态地质调查方法——以河北省承德市国家生态文明示范区综合地质调查为例[J]. 中国地质, 47(6): 1611-1624.
- 王萌. 2014. 元古宙斜长岩体铁钛磷灰岩的成因研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 王升,赵曼茜,郭兰萍,杨光,张小波,陈美兰,林淑芳,黄璐琦. 2014. 不同产地黄芩中无机元素含量及其与根际土壤无机元素的关系[J]. 生态学报, 34(16): 4734-4745.
- 王雪莲,董冬雪,丁延帅,方再郗,王林江,王淑军,吕明生. 2022. 海州湾水产品体内微量元素镉的分布与释放研究[J]. 食品研究与开发, 43(15): 182-186.
- 王学求,刘汉粮,王玮. 2021. 中国稀有分散元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 389-409.
- 王学求,周建,徐善法,迟清华,聂兰仕,张必敏,姚文生,王玮,刘汉粮,刘东盛,韩志轩,柳青青. 2016. 全国地球化学基准网建立与土壤地球化学基准值特征[J]. 中国地质, 43(5): 1469-1480.
- 卫晓锋,孙厚云,张竞,李霞,樊刘洋,何泽新. 2020. 承德特色林果资源的生态地球化学过程及其品质提升意义[J]. 水文地质工程地质, 47(6): 99-108.
- 奚小环,侯青叶,杨忠芳,叶家瑜,余涛,夏学齐,成杭新,周国华,姚岚. 2021. 基于大数据的中国土壤背景值与基准值及其变化特征研究——写在《中国土壤地球化学参数》出版之际[J]. 物探与化探, 45(5): 1095-1108.
- 席雪瑶,高亚男,王加启,郑楠. 2023. 镉的成骨机制及富镉食品的研发现状[J]. 现代食品科技, 39(9): 380-392.
- 肖潇,崔媛媛,张亭迪,张秀琴,牛作敬,刘志国,位秀丽. 2022. 神农架林区常见蔬菜镉含量测定及变化原因初探[J]. 食品安全质量检测学报, 13(1): 208-216.
- 许欢,柳永清,刘燕学,旷红伟. 2011. 阴山—燕山地区晚侏罗世—早白垩世土城子组地层、沉积特征及盆地构造属性分析[J]. 地质前缘, 18(4): 88-106.
- 鄢明才,迟清华. 1997. 中国东部地壳与岩石的化学组成[M]. 北京: 科学出版社.
- 杨思宇. 2019. 山东定陶山药种植区土壤地球化学特征研究及适宜性评价[D]. 长春: 吉林大学.
- 殷志强,郝爱兵,吴爱民,任金卫,周平,卫晓锋,彭令,李霞,邵海,庞菊梅. 2022. 承德自然资源综合调查主要进展与全国自然资源综合调查总体思路[J]. 地质通报, 41(12): 2087-2096.
- 余亚芳. 2014. 一种富锌富镉黄酒的生产方法[P]. 中国: CN103789142A.
- 虞德容,张启军. 2012. 水稻中镉的研究进展[J]. 江苏农业科学, 40(8): 79-81.
- 曾亚文,汪禄祥,杜娟,杨树明,王雨辰,黎其万,孙正海,普晓英,杜威. 2009. ICP-AES法检测云南稻精米和糙米与土壤矿质元素间的关联性[J]. 光谱学与光谱分析, 29(5): 1413-1417.
- 赵金,郑亚玉,柴立,任应全. 1996. 甘草富含镉的初步研究[J]. 贵阳中医学院学报, 18(1): 62.
- 赵曼茜,吕金嵘,郭兰萍,格小光,杨光,宋良科. 2010. 土壤无机元素对黄芩无机元素及黄芩苷含量的影响[J]. 中国实验方剂学杂志, 16(9): 103-106.
- 赵一阳,鄢明才. 1994. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 中国环境监测总站. 1990. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社.
- 朱立新,马生明,王之峰. 2006. 中国东部平原土壤生态地球化学基准值[J]. 中国地质, 33(6): 1400-1405.
- 朱雪芹,刘文波,李志明,陈坦,任玉祥,邵海,王龙凤. 2020. 承德地区天然含镉矿泉水空间分布及特征分析[J]. 水文地质工程地质, 47(6): 65-73.