

doi: 10.11720/wtyht.2022.1408

李永春, 苏日力格, 周文辉, 等. 宁夏南部山区葫芦河流域土壤地球化学特征及影响因素分析[J]. 物探与化探, 2022, 46(4): 999–1010. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1408>

doi: 10.11720/wtyht.2022.1408

Li Y C, Su R L G, Zhou W H, et al. Geochemical characteristics and influencing factors of soil in Hulu River Basin in the southern mountainous region of Ningxia[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(4): 999–1010. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1408>

宁夏南部山区葫芦河流域土壤地球化学特征及影响因素分析

李永春, 苏日力格, 周文辉, 邵苏日嘎拉, 陈国栋, 王永亮, 高琪, 张祥, 张栋
(中国地质调查局 呼和浩特自然资源综合调查中心, 内蒙古 呼和浩特 010000)

摘要: 基于宁夏固原地区土地质量地球化学调查数据资料, 采用数理统计方法研究了表层土壤 30 项元素(指标)的背景值, 对比分析了不同成土母质(岩)和土地利用类型元素空间分布特征和富集贫化规律, 进一步采用主成分分析法从元素组合特征的角度分析了制约元素分布特征的因素。结果表明: 研究区土壤中亲铁元素(Ni)、亲钨元素(Mo)、碱(土)金属元素(Na_2O 、 MgO 、 CaO)及卤族元素(I、F)、亲铜元素(As)含量高于全国背景值, Hg、Se、有机质、N、Pb 等亲生物元素与全国背景值相比相对贫化。成土母质(母岩)是土壤元素含量特征的主要控制因素, 在成土过程中, 自然及人为影响造成了部分元素的贫化富集。N、Mo、I、有机质、S 等受红土母质和其母岩控制明显, Ca^{2+} 、 Na^+ 则在水动力影响下造成风化淋失。河谷平原土壤元素含量介于红土和黄土母质之间, 在表生环境下易溶于水的 Na_2O 、 K_2O 、Cl 在水动力的作用下于河口、河谷地带富集, P、Hg、Se、Mo 则受人为干扰出现局部富集。因子分析表明, 成土母质(岩)、成土过程中的风化、淋滤、生物富集等作用及人类生产活动共同影响着研究区表层土壤的背景值特征。该研究成果可为区域资源环境评价提供基础地球化学信息。

关键词: 地球化学特征; 表层土壤; 主成分分析; 元素含量; 葫芦河流域

中图分类号: P632

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2022)04-0999-12

0 引言

土壤是生命的摇篮, 是人类实物生产最基本的生产资料, 与人类的生产和生活息息相关^[1]。土壤圈是最活跃与最富有生命力的圈层, 处于相互关联的地球系统之中, 与其他圈层进行着永恒的能量和物质交换^[2-3]。土壤地球化学调查作为勘查地球化学的组成部分之一, 在解决人类资源与环境的重大问题上发挥巨大作用^[4], 主要研究土壤中元素的地球化学特征、分布、迁移、累积及其时间空间演化规律, 通过对成土因素、土壤化学成分与母岩的继承关系以及土壤环境中各种地球化学作用过程的研究, 揭示土壤发生演化的规律^[5]。同时, 研究土壤地球

化学元素的含量和分布特征, 对生态环境保护、人类健康保障及土地利用规划具有指导作用^[6]。

多目标区域地球化学调查实施 20 年以来, 在全国范围内获取了大量土壤地球化学数据, 深入研究了土壤背景值特征与成土母质、表生环境作用及人类生产活动之间的内在联系, 在支撑土壤环境污染防治、土地资源管理、国家重大立法、精准扶贫等方面做出了重大贡献, 显著拓展了地质工作服务链, 为科学利用土壤资源提供了地球化学信息^[4,7]。但以往的调查研究多集中于我国中东部的平原地区, 对西北地区的研究相对较少。我国西北地区中小城市是当前国内快速城镇化过程中特殊的地域实体, 随着城镇化进程的不断加快, 如何科学利用土地资源逐渐受到人们的关注^[8]。宁夏南部山区地处我国

收稿日期: 2021-07-24; **修回日期:** 2021-12-03

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20191015)

第一作者: 李永春(1989-), 男, 工程师, 地球化学专业, 主要从事勘查地球化学及生态地球化学调查和评价工作。Email: 369517099@qq.com

通讯作者: 周文辉(1980-), 男, 高级工程师, 资源勘查专业, 主要从事矿产勘查、区域地质调查、生态环境地质调查研究工作。Email: Zhouwen-

hui8005@163.com

西北黄土高原腹地,区域内有 3 条大的河流,即清水河、泾河、葫芦河,均发源于六盘山山脉,六盘山植被发育,是宁夏降水、地表径流最丰富的地区之一,在调节气候、涵养水源、保持生态平衡等方面发挥着重要的作用^[9]。

本文依托于宁夏固原地区新近完成的 1 : 50 000 土地质量地球化学调查获取的土壤样品测试数据,选取葫芦河流域典型地貌区,探讨了表层土壤中 30 项元素(指标)地球化学特征,利用主成分分析法,结合统计结果,剖析了土壤元素空间分布规律和控制因素,为后续在研究区开展资源环境评价、土壤环境监测和国土空间规划提供更加准确、详实的基础

数据。

1 研究区概况

研究区属于宁夏南部的固原市辖区,行政区包括隆德县、西吉县(图 1),该地区位于黄土高原腹地,六盘山西麓,系祁连山地槽与华北地台的过渡带,总体呈东高西低、南高北低之势。地貌类型主要为黄土丘陵、阴湿土石山区(红层丘陵)和河谷平原。研究区属葫芦河流域上游区,系陇西系的西吉新断陷盆地展布范围。区内主要河流——葫芦河为渭河一级支流,发源于六盘山西麓及其余脉月亮山,



图 1 研究区位置

Fig.1 Location map of study area

流经宁夏西吉、隆德县后进入甘肃省静宁县北峡口。葫芦河在研究区内一级支流主要有淪河、濫泥河、马莲河等。区内土壤主要成土母质为新近纪红色泥岩及其上覆的黄土,分布格局受葫芦河及各支流侵蚀切割及构造运动影响(图 2),于河流附近形成河谷平原及阶地^[10-12]。

2 样品采集、分析测试及数据处理

2.1 样品采集与处理

按照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T

0295—2016),采用网格加图斑的原则布设样点。采样点密度为 4~8 点/km²,在耕地分布区根据耕地面积大小及集中程度样点密度设置为 6~8 个点/km²,其他地类分布区样点密度为 4 点/km²。样品介质为表层土壤(0~20 cm),在样点周围 20~50 m 范围内 3~5 处多点取样混合。样品自然风干后剔除石块、植物根系等,碾碎过 10 目筛用于测试 pH,过 60 目筛用于测试有机质,剩余样品采用玛瑙罐无污染粉碎至 200 目,用于测试全量元素。于 2020 年 5~11 月在工作区范围内采集样品 6 392 件,控制面积约 1 173 km²。

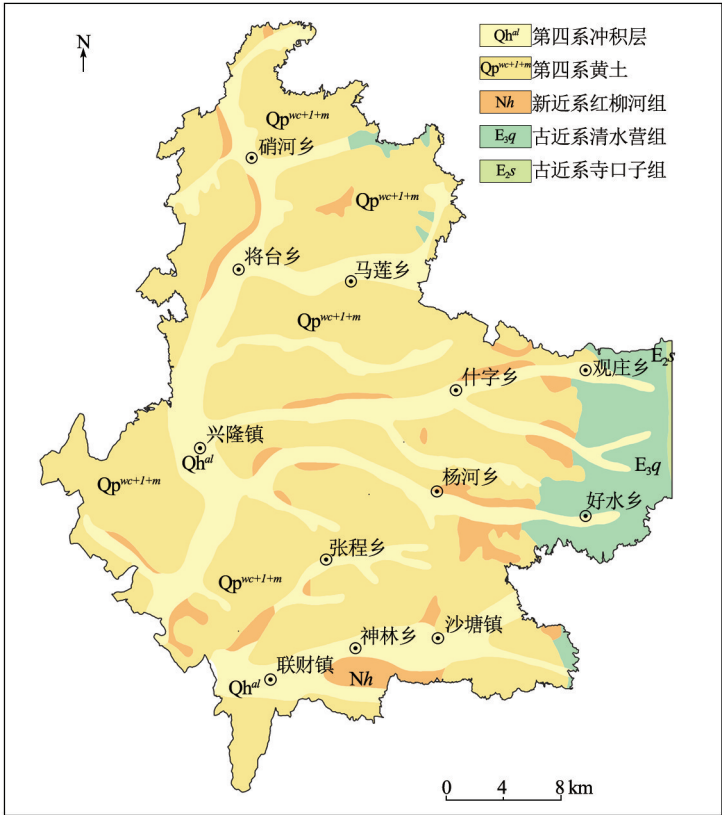


图 2 研究区地质简图

Fig. 2 Geological map of study area

2.2 样品分析

样品测试工作由承德华勘五一四地矿测试研究有限公司承担,质量监控要求按照《多目标地球化学调查规范(1 : 250 000)》(DZ/T 0258—2014)执行,通过国家一级标准物质(GSS2、GSS3、GSS8、GSS9、GSS13、GSS14、GSS15、GSS20、GSS23、GSS25、

GSS26、GSS28)监控测试分析准确度和精密度,所有监控样测试分析准确度和精密度均在监控允许范围内,各分析指标的分析检出限要求等于或小于相关规范要求,所取得分析数据均通过中国地质调查局质量验收,数据真实可靠。各元素(指标)分析方法及检出限见表 1。

表 1 各项指标的分析方法及检出限

Table 1 The analysis method and detection limit of target elements

检测指标	分析方法	规范要求 最低检出限	方法检出限	检测指标	分析方法	规范要求 最低检出限	方法检出限
SiO ₂	XRF	0.1	0.06	Cu	ICP-MS	1	0.5
Al ₂ O ₃	XRF	0.05	0.04	F	ISE	100	30
TFe ₂ O ₃	ICP-OES	0.05	0.04	Ge	ICP-MS	0.1	0.05
MgO	ICP-OES	0.05	0.04	Hg	AFS	0.0005	0.0003
CaO	ICP-OES	0.05	0.04	I	ICP-MS	0.5	0.1
Na ₂ O	ICP-OES	0.1	0.05	Mn	ICP-OES	10	5
K ₂ O	ICP-OES	0.05	0.04	Mo	ICP-MS	0.3	0.1
Corg.	HFIR	0.1	0.1	N	VOL	20	10
pH	ISE	0.1	0.1	Ni	ICP-OES	2	1
As	AFS	1	0.5	P	ICP-OES	10	5
B	ICP-MS	1	0.4	Pb	ICP-MS	2	1
Cd	ICP-MS	0.03	0.02	S	ICP-OES	30	10
Cl	XRF	20	20	Se	AFS	0.01	0.005
Co	ICP-MS	1	0.5	V	ICP-OES	5	1
Cr	ICP-OES	5	3	Zn	ICP-OES	4	1

注:氧化物和有机质(Corg.)含量单位为%,pH 无量纲,其他元素含量单位为 10⁻⁶。XRF 为 X 射线荧光光谱法;ICP-OES 为电感耦合等离子体发射光谱法;HFIR 为燃烧红外法;ISE 为离子选择性电极法;ICP-MS 为电感耦合等离子体质谱法;VOL 为容量法。

2.3 数据分析方法及图件编制

通过乌鲁木齐金维图信息科技有限公司开发的 GeoIPAS4.2 软件和 OfficeExcel2016 协同完成数据及分区数据(成土母质、土地利用方式)的均值、几何均值、中位数、标准离差、变异系数、最大值、最小值的描述统计。遵照《多目标地球化学调查规范(1:250 000)》(DZ/T 0258—2014)要求,先进行土壤数据频率分布正态检验,服从正态或对数正态分布的,分别用算术平均值和几何平均值代表背景值;当数据不服从正态分布或对数正态分布的,则按算术平均值加(减)3 倍标准差反复剔除离群数据,剔除后的均值代表背景值;剔除后仍不满足正态分布的,则以中位数代表背景值^[4,13-17]。主成分分析在 SPSS22.0 软件中完成;因子得分图利用中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所研发的 Geo-ChemStuio3.5 软件完成,并转化成 Shp. 格式后使用 ArcGis10.2 进行图面修饰。

3 结果与讨论

3.1 表层土壤元素含量特征

研究区表层土壤中 30 项元素(指标)含量统计特征值见表 2。引入富集系数 K_1 、 K_2 ,分别为研究区元素土壤背景值/全国土壤背景值、研究区元素土壤背景值/宁夏土壤背景值的比值。

变异系数(coefficient of variation, C_v)通常用标准离差与平均值的比值来表示,可以比较不同量纲的数据,表征元素空间分布的均匀程度。Wilding 将变异系数分为低度变异($C_v<0.16$)、中等变异($0.16<C_v<0.36$)和高度变异($C_v>0.36$)^[18]。从变异系数来看,研究区土壤中 30 项元素(指标) C_v 值介于 0.02~1.98,其中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 、As、B、Co、Cr、Cu、F、Ge、Mn、Ni、Pb、V、Zn、pH 等 20 项元素(指标)属低度变异元素,说明

表 2 研究区表层土壤元素地球化学特征统计表
Table 2 Characteristics of geochemical in the whole region

元素 指标	样品数 N	均值 $\bar{X}$	几何均值 X_1	中位数 M	标准离差 S	变异系数 C_v	最大值 $X_{\max}$	最小值 $X_{\min}$	剔除后 样品数 N_1	背景值 X_0	K_1	K_2
SiO_2	6392	54.91	54.87	54.80	2.14	0.04	68.33	40.33	6242	54.93	0.85	0.79
Al_2O_3	6392	11.63	11.62	11.60	0.47	0.04	14.90	8.74	6092	11.60	0.89	1.24
Fe_2O_3	6392	4.60	4.59	4.60	0.31	0.07	6.28	2.83	6258	4.60	1.06	1.39
MgO	6392	2.55	2.54	2.53	0.24	0.10	6.87	1.53	6226	2.54	1.74	1.40
CaO	6392	9.27	9.14	9.43	1.43	0.15	18.22	1.32	6276	9.35	3.36	1.76
Na_2O	6392	1.67	1.67	1.67	0.16	0.10	2.47	0.58	6322	1.68	1.32	0.96
K_2O	6392	2.57	2.56	2.54	0.23	0.09	4.03	1.01	6336	2.56	1.09	1.20
Corg.	6392	0.70	0.65	0.67	0.28	0.40	3.21	0.10	6237	0.68	0.63	1.74
pH	6392	8.33	8.33	8.34	0.18	0.02	9.71	7.34	6363	8.33	1.17	1.00
As	6392	13.10	13.02	12.95	1.49	0.11	27.90	4.55	6240	13.00	1.43	1.35
B	6392	54.97	54.68	54.19	5.92	0.11	131.12	30.87	6228	54.55	1.13	1.33
Cd	6392	0.15	0.15	0.15	0.02	0.16	0.52	0.09	6298	0.15	1.02	1.29
Cl	6392	65.23	61.70	58.19	30.35	0.47	864.26	25.09	5953	59.61	0.82	0.90
Co	6392	12.37	12.32	12.29	1.13	0.09	19.15	6.59	6268	12.33	1.05	1.37
Cr	6392	62.55	62.32	62.29	6.34	0.10	358.05	32.67	6226	62.44	0.99	1.16
Cu	6392	24.54	24.39	24.20	3.37	0.14	192.50	14.56	6226	24.31	1.07	1.43
F	6392	618.10	613.48	617.00	76.41	0.12	1702.00	313.00	6282	616.72	1.23	1.46
Ge	6392	1.22	1.21	1.22	0.06	0.05	1.52	0.77	6257	1.22	0.90	1.01
Hg	6392	24.18	22.28	20.97	15.71	0.65	479.93	5.02	5986	21.72	0.44	1.14
I	6392	2.41	2.27	2.17	1.01	0.42	20.26	0.41	5969	2.21	1.23	1.70
Mn	6392	645.24	643.58	642.00	47.47	0.07	1268.00	399.00	6263	643.48	1.17	1.36
Mo	6392	0.94	0.90	0.85	0.52	0.56	18.72	0.55	5905	0.86	1.29	1.39
N	6392	893.41	850.55	870.00	283.08	0.32	2834.00	256.00	6276	875.37	0.78	1.90
Ni	6392	32.49	32.32	32.27	3.60	0.11	168.00	16.58	6310	32.45	1.24	1.35
P	6392	813.01	801.12	793.00	143.90	0.18	2388.00	408.00	6319	807.07	1.18	1.88
Pb	6392	20.32	20.20	20.00	2.45	0.12	86.31	14.35	6216	20.09	0.79	1.12
S	6392	236.98	220.55	214.40	469.05	1.98	34480.00	121.50	6183	218.04	0.84	1.06
Se	6392	0.14	0.14	0.14	0.04	0.31	0.94	0.07	6244	0.14	0.63	0.93
V	6392	78.19	78.02	78.09	5.21	0.07	110.88	49.85	6254	78.09	0.98	1.26
Zn	6392	71.20	70.94	70.44	6.10	0.09	121.80	42.03	6169	70.80	1.05	1.48

注:氧化物和有机质(Corg.)含量单位为%,Hg含量单位为 10^{-9} ,pH无量纲,其他元素含量单位为 10^{-6} 。

以上指标在区内土壤中含量相对稳定,分布均匀。有机质、I、Cl、Mo、Hg、S 等变异系数大于 0.36,属高度变异,说明上述指标在区域内分布不均,表明它们受成土母质来源差异、表生作用过程和外源成分混合的影响,具有较强的空间变异性,存在区域性贫化或富集的可能。需要指出的是 S 变异系数为 1.98,明显大于其他元素,说明 S 在不同成土母质中分布极不均匀或后期的表生作用、人为干扰等因素对 S 的分散富集造成了较大的影响。Cd、Se、N、P 等属中等变异元素,Cd、Se 具有亲硫、亲生物特性,在表层土壤中容易发生贫化或富集,受表生作用影响较大^[19-22]。N、P 为农业施肥的主要成分,受人类活动干扰因素较大。

与全国表层土壤(0~20 cm)地球化学背景值^[23]相比,研究区表层土壤中 I、F、Ni、Mo、Na₂O、As、MgO、CaO 等较为富集($K_1>1.2$),其中 MgO、CaO 强烈富集,含量分别为全国土壤背景值的 1.74 和 3.36 倍。碱(土)金属元素(Na₂O、MgO、CaO)及卤族元素(I、F)、亲铜元素(As)相对富集的原因可能与区内地质背景有关,程旭学等在《宁夏中南部严重缺水地区地下水勘查与供水安全示范成果报告》^[24]中认为,六盘山及其周缘地区在渐新世时,逐渐发展为宽阔的河湖盆地,气候持续干燥炎热,沉积了清水营组河湖相红色砂泥质含膏盐建造,为以上元素富集提供物源。亲铁元素(Ni)、亲钨元素(Mo)则与区内主要成土母质之一——红土母质有关。Cl、S、SiO₂、Al₂O₃、Ge、V、Cr、Cd、Co、Zn、Fe₂O₃、Cu、K₂O、B、Mn、P 等含量与全国土壤背景值相当($0.8<K_1<1.2$),Hg、Se、有机质、N、Pb 等与全国背景值比相对贫化,其中 Hg 仅为全国背景值的 44%。Hg、Pb 等受人类活动干扰影响较大^[7],区内 Hg、Pb 相对贫乏与研究区工业发展水平较低保持一致。有机质、N、Pb、Se 含量低与区内分布最广的黄土母质有关。

与宁夏表层土壤(0~20 cm)地球化学背景值^[23]相比,K₂O、Al₂O₃、V、Cd、B、Ni、As、Mn、Co、Mo、Fe₂O₃、MgO、Cu、F、Zn、I、有机质、CaO、P、N 等大部分指标相对富集,其中 I、有机质、CaO、P、N 等含量较宁夏表层土壤背景值高出 1.5 倍以上,CaO 的富集与调查区广泛发育的第四系黄土有关,有机质、P、N 与区内广泛发育的熟化土壤层有关。Cl、Se、Na₂O、pH、Ge、S、Pb、Hg 等指标与宁夏表层土壤相当($0.8<K_2<1.2$),SiO₂ 含量与宁夏表层土壤基本相当($K_2=0.79$)。

3.2 土壤元素含量分布影响因素分析

前人研究表明,不同成土母质、土地利用方式会影响土壤化学成分组成^[25-27]。为对比不同控制单元元素含量特征,引入局部富集系数 K_3 和 K_4 ,分别为不同成土母质平均值/全区背景值、不同土地利用类型平均值/全区背景值的比值。具体参数见表 3、图 3、图 4。

3.2.1 不同成土母质元素含量差异

研究区内土壤层发育,按成土母质可划分为黄土母质、红土母质、冲洪积母质 3 大类,其中黄土母质在研究区分布最广,面积最大,其成因目前尚未形成定论,以风成说为主流^[28],黄土母质在区内厚度介于 30~200 m,可以认为,黄土母质元素成分受下覆基岩影响较小;红土母质主要源于六盘山出露的红色泥岩、粉砂岩,经自然风化形成,为残坡积物,其元素成分继承于成土母岩;冲洪积母质土壤分布于区内水力较强的低海拔河口、河谷和狭长平原地区,其物质来源于两侧丘陵区黄土和红土母质,经自然和人为改造后现多为农田。

黄土母质因分布面积广,采集样品数多,在参与计算时背景值权重重大,故所有元素含量与全区背景值基本一致,在此不做讨论。

除 CaO、Na₂O 外,K₂O、P、SiO₂、Cl、Ni、V、Ge、Co、MgO、Fe₂O₃、Mn、Al₂O₃、As、Zn、Cr、F、Cu、Cd、Se、Pb、B、Hg 等造岩元素、卤族元素、亲铁亲铜元素含量在红土母质中略高于黄土母质($1.0<K_3<1.2$),说明以上指标在红土母质中含量高于黄土母质。N、Mo、I、有机质、S 等在红土母质中则表现出明显的富集特征(K_3 介于 1.25~1.64)。红土母质分布区多位于六盘山麓,降雨充沛,植被茂密,红土进一步风化形成的土壤黏性较强,黏粒较多,吸附性强,加之常年植被落叶腐化,引起 N、有机质富集,Mo、I、S 的富集与红土的成土母岩有关,特别是 S,与区内含石膏(CaSO₄)地层有直接关系。

冲洪积母质中大部分元素含量介于黄土土母质和红土母质之间,且含量相差不大,这与上文所述冲洪积母质物质来源是红土和黄土的观点相吻合。Na₂O、K₂O、P、Se、Hg、Mo、Cl 等含量在冲洪积母质中最高,说明以上元素在成土过程中出现二次富集。在表生环境下 Na⁺、K⁺、Cl⁻易溶于水,在水力牵引的作用下由高海拔区溶出向低海拔区迁移,在河谷及两岸产生二次富集,P、Hg 则受人为干扰出现局部富集(冲洪积母质位于的河谷平原地带人类活动程度明显高于红土、黄土母质所处的丘陵山区)。Se、Mo 的富集可能与黏土矿物、有机质吸附及人为活动

表 3 不同单元土壤元素富集系数统计

Table 3 Enrichment coefficient of different units

元素 (指标)	全区 背景值 X	不同成土母质富集系数 K_3			不同土地利用类型富集系数 K_4				
		冲积母质 $n=1020$	红土母质 $n=571$	黄土母质 $n=4801$	水浇地 $n=1099$	旱地 $n=4334$	林地 $n=676$	草地 $n=132$	其他 $n=151$
SiO ₂	54.93	1.01	1.01	0.99	1.02	1.00	0.98	0.99	0.99
Al ₂ O ₃	11.60	1.00	1.05	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00
Fe ₂ O ₃	4.60	0.99	1.04	1.00	0.99	1.00	0.99	1.00	1.00
MgO	2.54	1.03	1.04	1.00	1.02	1.00	1.00	1.00	1.03
CaO	9.35	0.91	0.89	1.02	0.88	1.01	1.04	1.04	1.00
Na ₂ O	1.68	1.01	0.95	1.00	1.00	1.01	0.96	0.99	0.98
K ₂ O	2.56	1.03	1.01	0.99	1.03	1.00	0.99	0.97	1.00
Corg.	0.68	1.12	1.40	0.97	1.16	0.98	1.22	0.98	1.05
pH	8.33	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.01	1.01	1.01
As	13.00	1.01	1.05	1.00	1.02	1.00	1.02	0.99	1.03
B	54.55	1.06	1.10	0.99	1.08	0.99	1.03	0.98	1.03
Cd	0.15	1.07	1.09	0.98	1.08	0.99	1.01	0.95	1.01
Cl	59.61	1.46	1.02	1.02	1.41	1.04	0.92	1.00	1.29
Co	12.33	0.99	1.04	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.01
Cr	62.44	1.00	1.05	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01
Cu	24.31	1.03	1.07	1.00	1.05	1.00	1.01	0.99	1.02
F	616.72	1.03	1.07	0.99	1.04	0.99	0.99	0.97	1.02
Ge	1.22	1.01	1.03	0.99	1.01	1.00	0.99	0.99	0.99
Hg	21.72	1.34	1.11	1.06	1.38	1.08	0.95	1.00	1.01
I	2.21	1.28	1.37	1.01	1.33	0.99	1.30	1.00	1.25
Mn	643.48	1.02	1.04	0.99	1.02	1.00	0.98	0.99	1.01
Mo	0.86	1.45	1.29	0.99	1.45	1.01	1.02	0.97	1.21
N	875.37	1.09	1.25	0.98	1.11	0.98	1.16	0.98	1.02
Ni	32.45	1.00	1.03	1.00	0.99	1.00	0.99	1.00	1.00
P	807.07	1.15	1.01	0.98	1.17	0.99	0.87	0.92	0.96
Pb	20.09	1.03	1.10	1.00	1.04	1.00	1.02	0.99	1.02
S	218.04	1.26	1.64	0.98	1.24	1.00	1.40	0.97	1.13
Se	0.14	1.27	1.09	0.96	1.29	0.95	1.06	0.94	1.14
V	78.09	0.99	1.03	1.00	0.99	1.00	0.99	0.99	1.01
Zn	70.80	1.03	1.05	0.99	1.04	1.00	0.99	0.98	1.01

注:氧化物和有机质(Corg.)含量单位为%,Hg含量单位为 10^{-9} ,pH无量纲,其他元素单位为 10^{-6} 。其他用地包括建设用地、未利用土地及交通、水利、农业设施用地等。

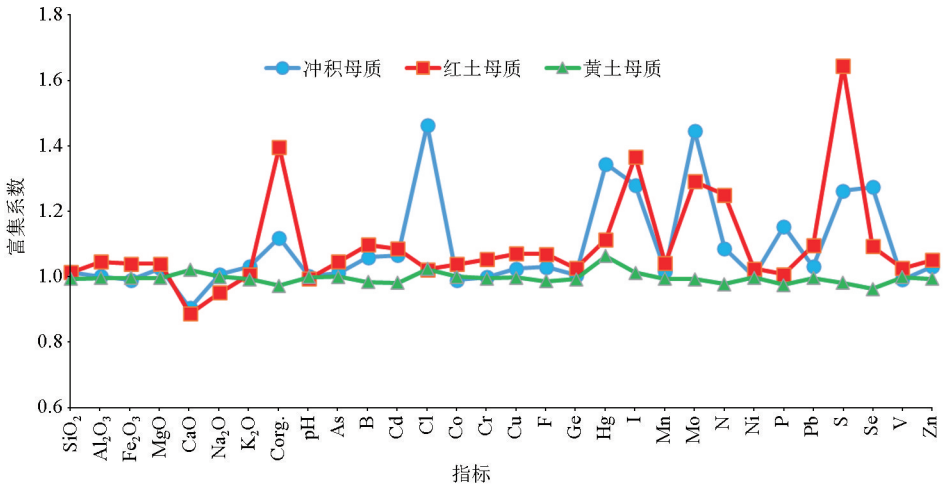


图 3 不同成土母质表层土壤元素富集系数

Fig. 3 Enrichment coefficient of surface soil elements in different parent material

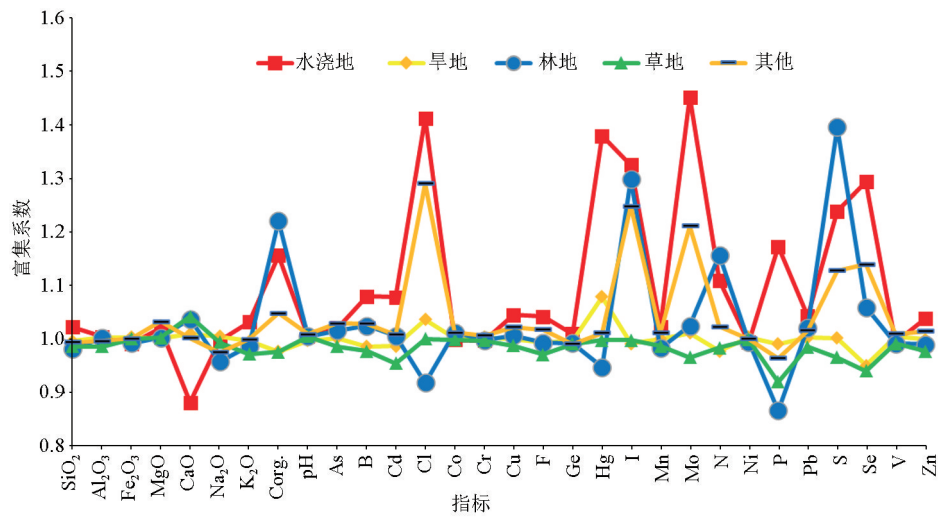


图 4 不同土地利用类型表层土壤元素富集系数

Fig. 4 Enrichment coefficient of surface soil elements in different parent material

影响等有关^[29]。

成土母质是表层土壤最直接的物质来源,在复杂的成土过程中,不仅能在原地残留形成土壤,也能在海拔高差和水动力作用下形成冲积物土壤^[17],也能在风力搬运、堆积、沉降下形成黄土。总体来看,不同成土母质土壤元素含量存在较大差异,说明成土母质是土壤元素含量特征的主要控制因素。红土和黄土母质元素含量总体受成土母质或下覆母岩控制,并在成土作用过程中受地形地貌、降雨等表生作用的影响。冲洪积母质土壤元素含量则与其物质来源有关。同时,人类活动对部分元素的富集贫化产生一定影响。

3.2.2 不同土地利用类型元素含量差异

研究区土地利用方式以旱地为主,广泛分布于丘陵山区,其成土母质多为黄土和红土母质,发育为黄绵土和黑垆土等。其次为水浇地,多分布于地势较低的沟谷、狭长平原地带。林地多分布于六盘山山麓,草地与林地、旱地插花分布。本次统计将样品数较少的建设用地、交通用地、水利、农业设施用地及未利用土地合并为其他用地。

旱地是研究区面积最大的土地利用方式,采集样品数多,在参与计算时,背景值权重重大,故所有元素含量与全区背景值基本一致。草地与旱地插花相邻分布,土壤地球化学特征与旱地基本一致,在此均不做讨论。

水浇地中 Fe₂O₃、V、Ni、Na₂O、Cr、Co、Al₂O₃、Ge、MgO、As、Mn、SiO₂、K₂O、Zn、F、Pb、Cu、Cd、B、N、有机质、P 等与全区土壤背景值相当,CaO 显示贫乏,S、Se、I、Hg、Cl、Mo 显示富集特征,这与水浇地的成土母质——冲洪积母质地球化学特征基本一致。Ca²⁺

在人为浇水的干扰下向下层淋溶,造成表层贫化;S、Se、I、Hg、Cl、Mo 的富集则是在特定的地形地貌下,细粒黏土矿物由高海拔向河谷平原运移,造成以上易被吸附的元素随之迁移到平原区。

P、Cl、Hg 在林地中的含量低于其他土地利用方式,N、有机质、I、S 则表现出富集特征。如上文所述,林地多分布于海拔相对较高的山地,受人类活动影响较小,P、Hg 等与人类活动密切相关的元素含量相对较低,Cl⁻则在水动力作用下迁移到下游水浇地中。林地中植被凋落物、生物作用强烈,引起 N 和有机质的富集。I、S 的富集则与林地主要分布区的成土母质——红土母质的土壤成分一致。其他用地中 Mo、I、Cl 显示富集,这与采样点多位于水利设施周边、狭长沟谷或干沟等未利用土地区域有关。水动力将以上元素从上游土壤中带出,在下游沟谷、洼地水动力减弱,水量蒸发,逐步析出到土壤中。

土地利用方式一定程度反映了人类活动,因此不同用地类型土壤中元素含量的差异反映了人类活动对土壤元素含量的影响,工业活动、种植类型、施肥、灌溉等因素会改变土壤的理化性质并影响元素的运移与转化。水浇地作为人类干扰最大的用地方式,其元素含量与全区相比变化较大,而旱地、林草地大部分元素含量与全区基本相当,个别元素的富集贫化多受表生作用影响较大,与人类活动关系不大。

3.3 主成分分析

主成分分析是因子分析(PCA)的一种计算模型,是利用降维的思想,对多个变量进行简化,在减少原始数据信息损失的前提下将多个变量简化成几个因子,从而实现对原始变量的分类,揭露原始变量

之间的内在联系,因子间既不相关,又能反映原有的指标信息^[30-31]。本文采用 SPSS22.0 软件对土壤中各元素(指标)进行主成分分析。首先,对研究区数据进行相关关系检验,检验是否适合进行因子分析。研究区表层土壤各变量 KMO 值为 0.841,显著性水平(sig.)为 0,说明变量间的相关性较强,表明原始数据适合进行因子分析^[31]。基于主成分计算模型,选取出 9 个特征值大于 1 的公因子,累积方差贡献率为 70.83%,较大程度地代表原有变量所蕴含的信息。为了使因子载荷矩阵系数更加显著,相关系数向 0→1 分化,采用最大方差法对初始因子载荷矩阵进行旋转,使因子和原始变量间的关系重新分配^[32]。同时为便于发现各因子元素组合特征,本次仅截取因子载荷较高(≥10.51)的变量组合,见表 4。同时,根据各采样点的因子得分,绘制了因子得分分布图,结果见图 5。

F1 因子方差贡献率为 15.68%,在所有因子中所占比例最高,占较高载荷的元素组合为亲铁元素(Fe₂O₃、V、Ni、Mn)、亲铜元素(Zn)和造岩元素(Al₂O₃)。从空间分布看,高值区主要分布于与研究区北部红土层和东南部六盘山山麓区域红土发育地带,一定程度指示了区内主要红土层的分布。

F2 因子方差贡献率为 9.49%,载荷占比较高的元素组合为亲铜元素(Cu、Pb、Cd)和亲铁元素(Co)。从空间部分来看,高值区与新近系泥岩、砂岩等分布区吻合度高,反映了成土母岩的特征。F1 和 F2 因子共同反映了红土母质及母岩的分布,笔者认为,F2 因子更侧重反映母岩的地球化学特征,而 F1 因子则侧重指示红土由母岩—土壤风化的过程,元素运移距离相对较远。

F3 因子方差贡献率为 8.99%,载荷占比较高的元素组合为 N、有机质、(-pH)(此处的负号表示

表 4 因子分析正交旋转因子载荷矩阵和特征值与累积方差贡献率

Table 4	Orthogonal rotation factor load matrix, eigenvalue and cumulative variance contribution rate of factor analysis								
指标	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Fe ₂ O ₃	0.84								
V	0.83								
Ni	0.82								
Cr	0.82								
Mn	0.79								
Zn	0.69								
Al ₂ O ₃	0.50								
Co		0.78							
Pb		0.74							
Cu		0.73							
Cd		0.67							
N			0.87						
Corg.			0.83						
pH			(-0.62)						
As									
F				0.75					
B				0.68					
Ge				0.67					
SiO ₂					0.86				
CaO					(-0.71)				
Mo						0.79			
Se						0.70			
I									
Na ₂ O							0.80		
K ₂ O							0.80		
Hg								0.71	
P								0.66	
Cl									
S									0.88
MgO									0.51
特征值	4.70	2.85	2.70	2.36	2.06	1.92	1.69	1.62	1.36
方差/%	15.68	9.49	8.99	7.87	6.87	6.38	5.63	5.40	4.54
累积方差/%	15.68	25.17	34.15	42.02	48.89	55.27	60.90	66.30	70.83

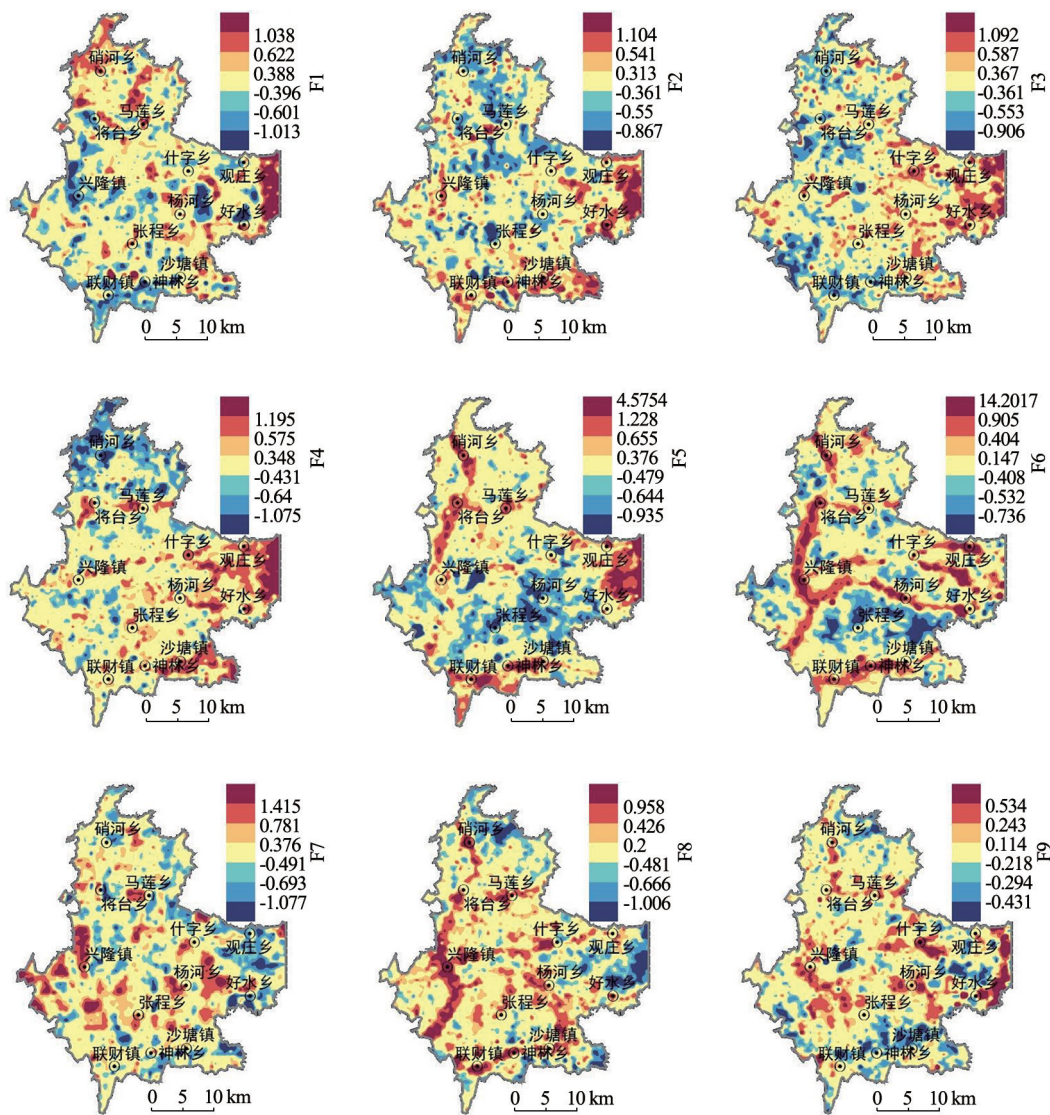


图 5 研究区因子得分分布

Fig. 5 Diagrams of factor scores in Study area

负相关,余同),为生命元素组合。一般认为土壤中 C/N 达到平衡状态,土壤氮素含量大体上决定有机碳的含量,反过来土壤有机碳含量的高低间接反映出土壤的供氮能力^[33]。因调查区为农区,人类频繁活动(如耕作施肥等)对 N 和有机碳的干扰较大,分布并无明显规律。总的来看,高值分布区与林地分布有一定吻合度。林地植被发育,覆盖率高,根系生长、枝叶残落等生物地球化学循环过程与累积作用强烈,固氮能力较强。而耕地中土壤耕作改变了土壤密度、孔隙度、土壤持水力、土壤水分以及团聚体等土壤物理属性,破坏了土壤原有的团聚体结构,暴露出更多的有机碳,加速土壤微生物对有机碳的分解作用,降低了土壤有机质含量。

F4 因子方差贡献率为 7.87 %,载荷占比较高的元素组合为 F、B、Ge,受元素本身化学特征影响较大,特别是在黄土母质中含量稳定,变异性小。高含

量区分布于基岩区附近,同时受水动力影响,高值区呈串珠状分布于下游河谷地区。

F5 因子方差贡献率为 6.87 %,载荷占比较高的元素组合为 SiO_2 、 $(-\text{CaO})$,为常量元素氧化物组合,能够反映成土母质的基本信息。 CaO 的低含量区为 SiO_2 高含量区,分布于葫芦河及其支流两岸及基岩裸露区附近,该地区以冲洪积形成的砂质沉积物和残积形成的半成土为主,而其他地区多以黄土为主。杨河乡一带是 CaO 的高含量区,其物质来源于上游含石膏层岩层。

F6 因子方差贡献率为 6.38 %,元素组合为 Mo、Se,为亲生物元素,易在生物驱动下富集,F6 因子高含量区多分布于水浇地,水浇地均位于河流阶地,同时也反映了人类对土地资源的改造利用。该因子体现了在人类活动和表生作用共同影响下有益元素趋向富集的特征。

F7 因子元素组合为 Na_2O 、 K_2O ，方差贡献率为 5.63%，F9 因子元素组合为 S、 MgO ，方差贡献率为 4.54%。 Na_2O 、 K_2O 和 S、 MgO 整体分布相反， Na_2O 、 K_2O 活性强，在丘陵山区淋失严重，高含量区集中分布于河谷，而 S、 MgO 总体迁移距离较短，仅在局部沟谷呈现高含量特征。

F8 因子方差贡献率为 5.40%，元素组合为 Hg、P，该组元素明显受控于人类活动。在农业生产活动频繁的河谷平原原有磷肥输入，工业活动造成 Hg 高值分布区与主干道路和城镇高度吻合。该因子的空间分布表明人类活动的频繁程度，人类活动越频繁，土壤中的 Hg 含量越高。

因子分析的目的不仅仅是找出影响因子，更重要的是研究因子代表的成因意义。研究区内成土母质既有残积物，又有零散冲积物和风成物（黄土），其来源既受母岩影响，也受表生作用和人类活动影响。通过因子分析发现，受母岩影响的元素有：F1、F2 因子；受成土母质影响的有 F4、F5 因子；受表生作用影响的有 F6、F7、F9 因子；受人类活动影响较大的元素 F3、F8 因子。

4 结 论

1) 与全国表层土壤元素含量相比较，研究区 I、F、Ni、Mo、 Na_2O 、As、 MgO 、CaO 等较为富集，Hg、Se、有机质、N、Pb 等与全国背景值比相对贫化。与宁夏表层土壤元素含量相比较， K_2O 、 Al_2O_3 、V、Cd、B、Ni、As、Mn、Co、Mo、 Fe_2O_3 、 MgO 、Cu、F、Zn、I、Corg.、CaO、P、N 等相对富集，这主要与地质背景和研究区广泛发育的熟化土壤层有关。其余 Cl、Se、 Na_2O 、pH、Ge、S、Pb、Hg 与宁夏表层土壤相当。

2) 成土母质（岩）和土地利用方式均是影响土壤元素含量分布的重要因素，不同因素对土壤元素分布的影响具有差异性。成土母质（岩）是表层土壤元素地球化学背景值的主要控制因素，土地利用方式对部分元素背景值亦有一定的影响。

3) 采用主成分分析法对表层土壤元素地球化学特征成因研究表明，成土母质（岩）、成土过程中的风化、淋滤、生物富集作用及人类生产活动共同影响着研究区表层土壤元素地球化学特征，其中受母（质）岩影响较大的元素有：F1（ Fe_2O_3 、V、Ni、Cr、Mn、Zn、 Al_2O_3 、Zn）、F2（Cu、Pb、Cd、Co）、F4（F、B、Ge）、F5（ SiO_2 、-CaO）；受表生作用影响的有 F6（Mo、Se）、F7（ Na_2O 、 K_2O ）、F9（S、 MgO ）；受人类活动影响较大的元素有 F3（N、有机质、-pH）、F8（Hg、P）。

参考文献 (References) :

[1] 陈同斌. 区域土壤环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
Chen T B. Regional soil environmental quality [M]. Beijing: Science Press, 2015.

[2] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
Chen H M. Environmental soil science [M]. Beijing: Science Press, 2018.

[3] 奚小环. 生态地球化学: 从调查实践到应用理论的系统工程[J]. 地学前缘, 2008, 15(5): 1-8.
Xi X H. Ecological geochemistry: From a geochemistry survey to an applied theory[J]. Earth Science, 2008, 15(5): 1-8.

[4] 代杰瑞, 庞绪贵, 喻超, 等. 山东省东部地区土壤地球化学特征及污染评价[J]. 中国地质, 2011, 38(5): 1387-1395.
Dai J R, Pang X G, Yu C, et al. Geochemical features and contamination assessment of soil elements in east Shandong Province[J]. Geology in China, 2021, 38(5): 1387-1395.

[5] 赵庆令, 李清彩. 济宁南部区域耕作层土壤地球化学特征及其成因分析[J]. 地球与环境, 2016, 44(1): 25-35.
Zhao Q L, Li Q C. Geochemical characteristics of plowing layer soil in south Jining Region, Shandong Province, China and its contribution factors[J]. Earth and Environment, 2016, 44(1): 25-35.

[6] 李欢, 黄勇, 张沁瑞, 等. 北京平原区土壤地球化学特征及影响因素分析[J]. 物探与化探, 2021, 45(2): 502-516.
Li H, Huang Y, Zhang Q R, et al. Soil geochemical characteristics and influencing factors in Beijing Plain[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(2): 502-516.

[7] 李括, 彭敏, 赵传冬, 等. 全国土地质量地球化学调查二十年[J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 128-158.
Li K, Peng M, Zhao C D, et al. Vicennial implementation of geochemical survey of land quality in China[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(6): 128-158.

[8] 马贵, 韩新宁, 魏卫星, 等. 固原市表层土壤重金属空间分布及健康风险评价[J]. 宁夏师范学院学报, 2021, 42(4): 51-60.
Ma G, Han X N, Wei W X, et al. Distribution and health risk assessment of heavy metals in topsoil of urban areas of Guyuan City [J]. Journal of Ningxia Normal University, 2021, 42(4): 51-60.

[9] 安宏英, 黄贵. 宁夏南部山区河流水资源状况及变化分析[J]. 宁夏农林科技, 2011, 52(12): 261-265.
An H Y, Huang G. Analysis of water resources status and changes of mountain rivers in Southern Ningxia[J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2011, 52(12): 261-265.

[10] 李林科, 苏小兵, 刘彬, 等. 静宁县幅区域地质调查报告[R]. 兰州甘肃省地质调查院, 2004.
Li L K, Su X B, Liu B, et al. Regional geological survey report of Jingning County[R]. Geological Survey of Gansu Province, 2004.

[11] 吴学华, 倪万魁, 刘海松, 等. 宁夏回族自治区西吉县地质灾害详细调查报告[R]. 宁夏国土资源调查监测院, 2011.
Wu X H, Ni W K, Liu H S, et al. Report on geological disasters in Xiji, Ningxia Hui Autonomous Region [R] Ningxia Institute of Land Resources Investigate and Monitor, 2011.

[12] 徐建明, 于艳青, 王建中, 等. 宁南典型地区生态环境调查与生态建设模式成果报告[R]. 中国地质科学院水文地质环境地

- 质研究所,2006.
- Xu J M, Yu Y Q, Wang J Z, et al. Ecological environment investigation and ecological construction model achievement report in the southern region of Ningxia Hui Autonomous Region[R]. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, 2006.
- [13] 庞绪贵,代杰瑞,董健,等. 山东省土壤地球化学基准值[J]. 山东国土资源,2017,33(11):43-47.
- Pang X G, Dai J R, Dong J, et al. Soil geochemical reference value in Shandong Province[J]. Shandong Land and Resources, 2017, 33(11):43-47.
- [14] 朱立新,马生明,王之峰. 中国东部平原土壤生态地球化学基准值[J]. 中国地质,2006,33(6):1400-1405.
- Zhu L X, Ma S M, Wang Z F, et al. Soil eco-geochemical baseline in alluvial plains of eastern China[J]. Geology in China, 2006, 33(6):1400-1405.
- [15] 鲍丽然,龚媛媛,严明书,等. 渝西经济区土壤地球化学基准值与背景值及元素分布特征[J]. 地球与环境,2015,43(1):31-40.
- Bao L R, Gong Y Y, Yan M S, et al. Element geochemical baseline and distributions in soil in Chongqing West Economic Zone, China[J]. Earth and Environment, 2015, 43(1):31-40.
- [16] 张秀芝,杨志宏,马忠社,等. 地球化学背景与地球化学基准[J]. 地质通报,2006,25(5):626-629.
- Zhang X Z, Yang Z H, Ma Z S, et al. Geochemical background and geochemical baseline[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(5):626-629.
- [17] 王乔林,宋云涛,王成文,等. 滇西保山—临沧地区土壤元素背景值特征及成因分析[J]. 昆明理工大学学报:自然科学版,2021,2(46)37-50.
- Wang Q L, Song Y T, Wang C W, et al. Characteristics and genesis of soil element background Baoshan-Lincang area in Western Yunnan Province[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology: Natural Sciences, 2021, 2(46):37-50.
- [18] Wilding L P. Spatial variability: Its documentation, accommodation and implication to soil surveys[G]//Nielsen D R, Bouma J. Soil spatial variability. Wageningen: PUDOC publishers, 1985: 166-194.
- [19] 王锐,余涛,杨忠芳,等. 富硒土壤硒生物有效性及影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(7):1647-1654.
- Wang R, Yu T, Yang Z F, et al. Bioavailability of soil selenium and its influencing factors in selenium-enriched soil[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(7):1647-1654.
- [20] 杨忠芳,余涛,侯青叶,等. 海南岛农田土壤 Se 的地球化学特征[J]. 现代地质,2012,26(5):837-849.
- Yang Z F, Yu T, Hou Q Y, et al. Geochemical characteristics of soil selenium in farmland of Hainan Island[J]. Geoscience, 2012, 26(5):837-849.
- [21] 唐世琪,万能,曾明中,等. 恩施地区土壤与农作物硒镉地球化学特征[J]. 物探与化探,2020,44(3):607-614.
- Tang S Q, Wan N, Zeng M Z, et al. Geochemical characteristics of selenium and cadmium in soil and crops in Enshi area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(3):607-614.
- [22] Li Z, Liang D L, Peng Q, et al. Interaction between selenium and soil organic matter and its impact on soil selenium bioavailability: A review[J]. Geoderma, 2017, 295:69-79.
- [23] 侯青叶,杨忠芳,余涛,等. 中国土壤地球化学参数[M]. 北京:地质出版社,2020.
- Hou Q Y, Yang Z F, Yu T, et al. Soil geochemical dataset of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2020.
- [24] 程旭学,王雨山,陆文庆,等. 宁夏中南部严重缺水地区地下水勘查与供水安全示范成果报告[R]. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心,宁夏回族自治区地质调查院,2015.
- Cheng X X, Wang Y S, Lu W Q, et al. Report on demonstration results of groundwater exploration and water supply safety in severely water-deficient area in the middle and south of Ningxia[R]. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, China Geological Survey, Geological Survey Institute of Ningxia Hui Autonomous Region, 2015.
- [25] 林才浩,许美辉,杨军华. 福建沿海经济带生态地球化学调查与评价[J]. 地质通报,2007,26(5):605-612.
- Lin C H, Xu M H, Yang J H. Eco-geochemical investigations and assessments of the coastal economic zone of Fujian Province, China[J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(5):605-612.
- [26] 孙启祥,张建锋, Franz M. 不同土地利用方式土壤化学性状与酶学指标分析[J]. 水土保持学报,2006,20(4):98-101, 159.
- Sun Q X, Zhang J F, Franz M. Evaluation of soil chemical properties and enzymes activity under different land use systems[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(4):98-101, 159.
- [27] 成杭新,李括,李敏,等. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J]. 地学前缘,2014,21(3):265-306.
- Cheng H X, Li K, Li M, et al. Geochemical background and baseline value of chemical elements in urban soil in China[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(3):265-306.
- [28] 吴海斌,刘秀铭,吕镔,等. 中国黄土成因争论及其启示[J]. 亚热带资源与环境学报. 2016,11(3):38-45.
- Wu H B, Liu X M, Lyu B, et al. Debates about the origin of loess and their significances[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2016, 11(3):38-45.
- [29] 余涛,杨忠芳,王锐,等. 恩施典型富硒区土壤硒与其他元素组合特征及来源分析[J]. 土壤,2018,50(6):1119-1125.
- Yu T, Yang Z F, Wang R, et al. Characteristics and sources of soil selenium and other elements in typical high selenium soil area of Enshi[J]. Soils, 2018, 50(6):1119-1125.
- [30] 陈国光,梁晓红,张洁,等. 丘陵区土地质量地球化学调查方法技术——以服务赣州六县精准脱贫土地质量地球化学调查为例[J]. 物探与化探,2020,44(3):463-469.
- Chen G G, Liang X H, Zhang J, et al. Geochemical survey method of land quality in hilly areas: A case study of the geochemical survey of land quality in Canzhou[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(3):463-469.
- [31] 袁胜元,李长安. 基于因子分析的江汉盆地第四纪沉积物源讨论[J]. 现代地质,2014,28(5):980-985.
- Yuan S Y, Li C A. Study on sediment provenances in Jiangnan Basin since Quaternary based on factorial analysis[J]. Geoscience,

2014,28(5):980-985.

[32] Zhang S, Yang D, Li F, et al. Determination of regional soil geochemical baselines for trace metals with principal component regression: A case study in the Jiangnan plain, China[J]. Applied Geochemistry, 2014, 48: 193-206

[33] 刘景双, 杨继松, 于君宝, 等. 三江平原沼泽湿地土壤有机碳的垂直分布特征研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 5-8.

Liu J S, Yang J S, Yu J B, et al. Study on vertical distribution of soil organic carbon in Wetlands Sanjiang Plain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(3): 5-8.

Geochemical characteristics and influencing factors of soil in Hulu River Basin
in the southern mountainous region of Ningxia

LI Yong-Chun, SU Ri-Li-Ge, ZHOU Wen-Hui, TAI Su-Ri-Ga-La, CHEN Guo-Dong,
WANG Yong-Liang, GAO Qi, ZHANG Xiang, ZHANG Dong
(Hohhot Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Hohhot 010000, China)

Abstract: Based on the data derived from the geochemical survey of land quality in the Guyuan region, Ningxia, this study studied the background values of 30 elements (indicators) in the surface soil using mathematical statistics. This study compared the distribution and enrichment (or dilution) characteristics of elements in different parent materials (parent rocks) and land use types and further analyzed the factors restricting the distribution of the elements from the perspective of element association characteristics using the principal component analysis method. The results show that the contents of iron-philic element Ni, tungsten-philic element Mo, alkaline (earth) metal elements Na₂O, MgO, CaO, halogen elements I, F, and copper-philic element As were all higher than corresponding national background values, while the contents of the biophilic elements such as Hg, Se, organic matter, N, and Pb were lower than corresponding national background values. Parent materials (parent rocks) were the main factor controlling the characteristics of element contents in soil. In the process of soil formation, natural and man-made influences have caused the enrichment or dilution of some elements. N, Mo, I, organic matter, and S are significantly controlled by the laterite parent material and their parent rocks, and the erosion of Ca²⁺ and Na⁺ causes weathering and leaching due to hydrodynamic effects. The element contents in the soil in the river valley plain were between those of laterite and those of loess parent material. In a supergene environment, Na₂O, K₂O, and Cl, which are prone to dissolve in water, are rich in estuaries and valleys due to hydrodynamic action. P, Hg, Se, and Mo elements are locally rich due to human interference. The factor analysis shows that parent materials (parent rocks), weathering, leaching, and bioaccumulation in the process of soil formation, and human production activities all affect the background values of the surface soil in the study area. The study results will provide basic geochemical information for the assessment of the regional resources and environment.

Key words: geochemical characteristics; surface soil; principal component analysis; element content; Hulu River Basin

(本文编辑:蒋实)