



内蒙古赤峰锡伯河流域土壤-中药材系统中的重金属元素 ——含量分布特征及生态效应评价

梁 帅^{1,2,3}, 戴慧敏^{1,2,3}, 张广阳⁴, 刘 凯^{1,2,3}, 翟富荣⁵, 李秋燕^{1,2,3}, 魏明辉^{1,2,3}

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 自然资源部黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 110034; 3. 辽宁省黑土地演化与生态效应重点实验室, 辽宁 沈阳 110034; 4. 辽宁省地质矿产调查院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110034; 5. 辽宁省地质矿产研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110034

摘 要: 基于表层土壤、中药材及根系土等样品的测试数据, 研究了赤峰市锡伯河流域牛家营子镇中药材种植区表层土壤 As、Cd、Cu、Hg、Pb 五种重金属元素的含量、空间分布特征、污染程度及不同中药材对土壤重金属元素的累积特征和草药重金属污染程度。结果表明, 中药材种植区表层土壤 As、Cd、Cu、Hg、Pb 五种重金属元素成因来源一致, 为伴生关系, 主要来自成土母质, 其含量均值分别为 8.729×10^{-6} 、 0.142×10^{-6} 、 21.146×10^{-6} 、 0.036×10^{-6} 、 23.651×10^{-6} ; Hg、Cd 元素变异系数分别为 0.639、0.472, 达到强度变异, 原因是二者土壤本底含量较低, 更易受到各种因素影响。土壤重金属单项和综合污染指数均小于 0.7, 土壤质量清洁, 符合中药材 GAP 基地建设土壤环境要求。桔梗、北沙参和牛膝 3 种中药材药用部位重金属富集系数或污染指数均小于 0.50, 其含量都远低于中药材重金属含量限定值, 牛家营子镇中药材种植区产出的中药材均符合绿色行标要求。

关键词: 重金属; 中药材; 生物富集; 生态效应; 赤峰市

HEAVY METAL CONTENTS IN SOIL-CHINESE HERBAL MEDICINE SYSTEM IN XIBO RIVER BASIN, CHIFENG CITY, INNER MONGOLIA: Distribution Characteristics and Ecological Effect Evaluation

LIANG Shuai^{1,2,3}, DAI Hui-min^{1,2,3}, ZHANG Guang-yang⁴, LIU Kai^{1,2,3},
ZHAI Fu-rong⁵, LI Qiu-yan^{1,2,3}, WEI Ming-hui^{1,2,3}

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China;

2. Key Laboratory of Black Soil Evolution and Ecological Effects, Ministry of Natural Resources, Shenyang 110034, China;

3. Liaoning Provincial Key Laboratory of Black Soil Evolution and Ecological Effects, Shenyang 110034, China;

4. Liaoning Institute of Geology and Mineral Survey Co., Ltd., Shenyang 110034, China;

5. Liaoning Institute of Geology and Mineral Resources Co., Ltd., Shenyang 110032, China

Abstract: Based on the test data of topsoil, Chinese medicinal materials and root soil samples, the paper studies the contents, spatial distribution characteristics and pollution degrees of five heavy metal elements including As, Cd, Cu,

收稿日期:2022-04-11;修回日期:2022-11-18. 编辑:张哲.

基金项目:中国地质调查局项目“兴凯湖平原及松辽平原西部土地质量地球化学调查”(DD20190520).

作者简介:梁帅(1986—),男,博士,高级工程师,主要从事基础地质和生态地质研究,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河大街 280 号,E-mail//ls476476@163.com

通信作者:刘凯(1989—),男,硕士,高级工程师,主要从事土壤地球化学和生态地质研究工作,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河大街 280 号,E-mail//liu.kai@mail.cgs.gov.cn

Hg and Pb in the topsoil of Chinese medicinal materials planting area of Niujiayingzi Town in Xibo River Basin, Chifeng City, Inner Mongolia, as well as the accumulation characteristics of soil heavy metals by different Chinese medicinal materials and heavy metal pollution degree of herbs. The results show that the five elements in the topsoil of Chinese medicinal materials planting area share the same origin, mainly from the parent material, and in association, with the mean contents of 8.729×10^{-6} , 0.142×10^{-6} , 21.146×10^{-6} , 0.036×10^{-6} and 23.651×10^{-6} , respectively. The variation coefficients of Hg and Cd are 0.639 and 0.472 respectively, reaching the intensity variation, for their low soil background contents and more susceptible to various factors. Both the single and comprehensive pollution indexes of the soil heavy metals are less than 0.7, which shows a clean level of soil quality and meets the soil environmental requirements for the GAP base construction of Chinese medicinal materials. The concentration coefficients or pollution indexes of heavy metals in the medicinal parts of *platycodon grandiflorum*, *glehnia littoralis* and *achyranthes bidentata* are all less than 0.50, with their contents much lower than the limit value of heavy metals in Chinese medicinal materials. The Chinese medicinal materials produced in the planting area of Niujiayingzi Town all meet the requirements of green standard.

Key words: heavy metal; Chinese herbal medicine; bioconcentration; ecological effect; Chifeng City

0 引言

土壤是人类赖以生存的重要物质基础^[1]. 随着城市化和工业化进程的加快, 砷、镉、汞等重金属元素通过工业“三废”排放、居民生活垃圾产生、农业生产中农药和化肥的大量使用等多种渠道进入土壤, 进而长期影响农产品质量甚至危及人体健康^[2-3]. 因此土壤重金属污染带来的农产品安全问题及其相关的土壤环境质量、生态安全风险评价越来越引起相关科研机构和学者的关注^[4-8].

近年来中药材在国际市场逐渐升温, 引起世界相关医疗机构和学者对中药材的研究热潮^[9-12]. 同时, 其产品质量与安全性也成为公众关注的焦点, 尤其是中药材中的重金属元素含量超标问题已成为中药材国际化进程的重要障碍^[13-16]. 土壤是中药材中重金属的主要来源, 开展中药材种植区土壤质量调查, 研究土壤中重金属来源及生态效应, 确保中药材生长环境清洁是保障中药材产品质量安全的先决条件. 内蒙古赤峰市牛家营子镇是北方重要的中药材生产基地之一, 迄今针对中药材种植核心区土壤重金属含量状况与评价方面的报道很少^[17-19]. 本文基于“典型地区 1:5 万土地质量调查及成果转化应用研究”课题, 在系统分析牛家营子镇表层土壤及中药材样品重金属含量的基础上, 对种植区土壤及中药材药用部位重金属含量进行质量评价, 以期对地方道地药材增产增效、绿色发展和乡村

振兴提供地学依据和科技支撑.

1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区赤峰市西南部, 行政区划隶属喀喇沁旗牛家营子镇. 锡伯河是老哈河的主要支流之一, 发源于喀喇沁旗西部茅荆坝梅林沟, 自南向北流淌经过(图 1). 该区属温带大陆性季风气候, 多年平均气温 7°C , 无霜期年平均 130 天; 年平均降水量 400 mm, 降雨集中在每年 6—8 月. 锡伯河流域牛家营子段为冲洪积平原, 沿河两岸土地肥沃. 牛家营子具有 300 多年的中药材种植历史, 1999 年被科技部列为中药材现代化研究与产业开发专项研究基地之一, 是全国闻名的药材之乡, 被誉为“中国北沙参乡”, 种植有北沙参、桔梗、党参、牛膝、黄芪、板蓝根、紫草、黄芩等 20 余种道地药材, 常年种植面积保持在 5500 hm^2 左右, 年产商品药材 $30 \times 10^4\text{ t}$ 左右, 已成为当地乡村振兴支柱产业. 岩石及其风化物是形成土壤的物质基础, 对土壤的形成、性状及肥力有显著影响, 直接影响中药材质量. 以锡伯河为界, 西部主要出露晚侏罗系玛尼吐组、早白垩系白音高老组和义县组、更新统乌尔吉组, 东部主要出露更新统乌尔吉组、全新统冲洪积物(图 1). 据 1:25 万土地质量地球化学调查报告^①, 土壤成土母质划分为冲洪积物母质、冲积物母质和黄土状物质, 土壤类型主要为褐土(碳酸性褐土、潮褐土)

①中国地质调查局沈阳地质调查中心. 内蒙古自治区喀喇沁旗 1:25 万土地质量地球化学调查报告. 2018.

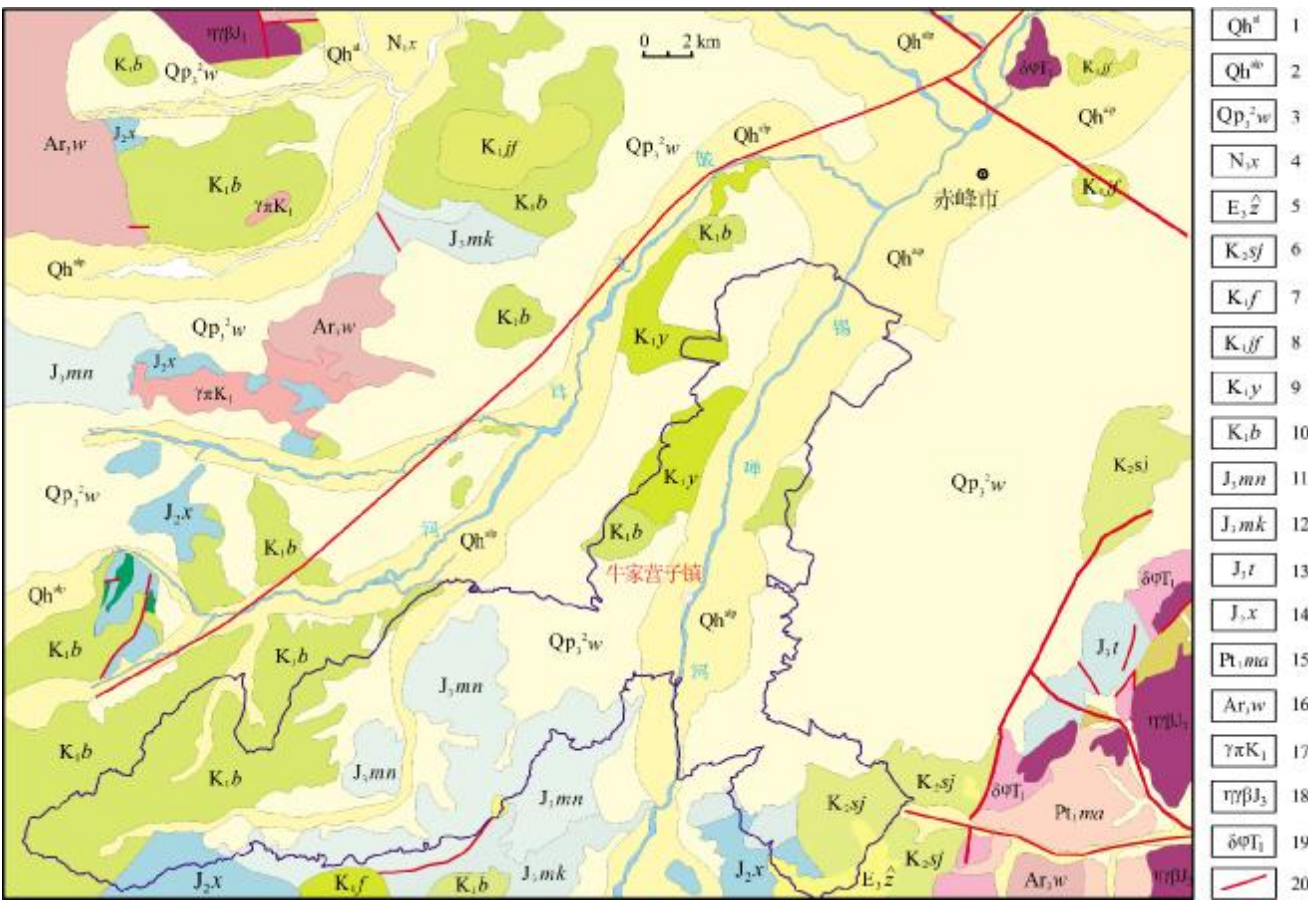


图 1 研究区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the study area

1—冲积物 (alluvium); 2—冲洪积物 (alluvium-diluvium); 3—乌尔吉组 (Wuerji fm.); 4—西山组 (Xishan fm.); 5—昭乌达组 (Zhaowuda fm.); 6—孙家沟组 (Sunjiagou fm.); 7—阜新组 (Fuxin fm.); 8—九佛堂组 (Jiufotang fm.); 9—义县组 (Yixian fm.); 10—白音高老组 (Baiyingaolao fm.); 11—玛尼吐组 (Manitu fm.); 12—满克头鄂博组 (Manketouebo fm.); 13—土城子组 (Tuchengzi fm.); 14—新民组 (Xinmin fm.); 15—明安山组 (Minganshan fm.); 16—乌拉山组 (Wulashan fm.); 17—花岗斑岩 (granite porphyry); 18—黑云母二长花岗岩 (biotite monzogranite); 19—角闪闪长岩 (hornblende diorite); 20—断层 (fault)

和黄土 (黄绵土)^[20].

2 样品采集与处理

表层土壤样品、中药材及根系土样品采集点位信息见图 2. 表层土壤样品按照土地质量地球化学评价规范 (DZ/T 0295—2016)^[20], 选用网格法, 采样密度 4~6 件/km², 采样深度 0~20 cm, 样品原始重量大于 1 500 g; 每个土壤样品由 3 个子样等量组合而成, 每 2 个子坑间距 30 m, 子样坑呈三角形分布, 共采集表层土壤样品 2 343 件 (含中药材种植区样品 472 件). 中药材及根系土采样点结合中药材种植区生产情况, 重点采集了种植区种植面积较广泛的桔梗、北沙参和牛膝; 样品

的采集时间选在秋季采收季节, 在典型地块上连续采集 3~5 棵中药材药用部位 (根部), 装入自封袋、编号、备用. 根系土取样依据选定的中药材采集位置, 采集 20 cm 的耕层土壤, 装入塑封袋、编号、备用. 共集中药材及根系土样品 45 套. 土壤样品阴干、拣出杂质, 用木槌全样压碎、混匀, 过孔径 20 目尼龙筛, 采用四分法取其 200 g 待测. 中药材样品用自来水冲洗除去其上的泥土等附着物, 去除药用部分以外的部分, 分别用蒸馏水、去离子水冲洗 3 遍, 阴干, 用微型粉碎机 (塑料内胆, 不锈钢刀片) 粉碎后, 取其 200 g 送待测.

土壤及中药材样品分析测试均由国土资源部沈阳矿产资源监督检测中心完成, 测试指标包括 As、Cd、

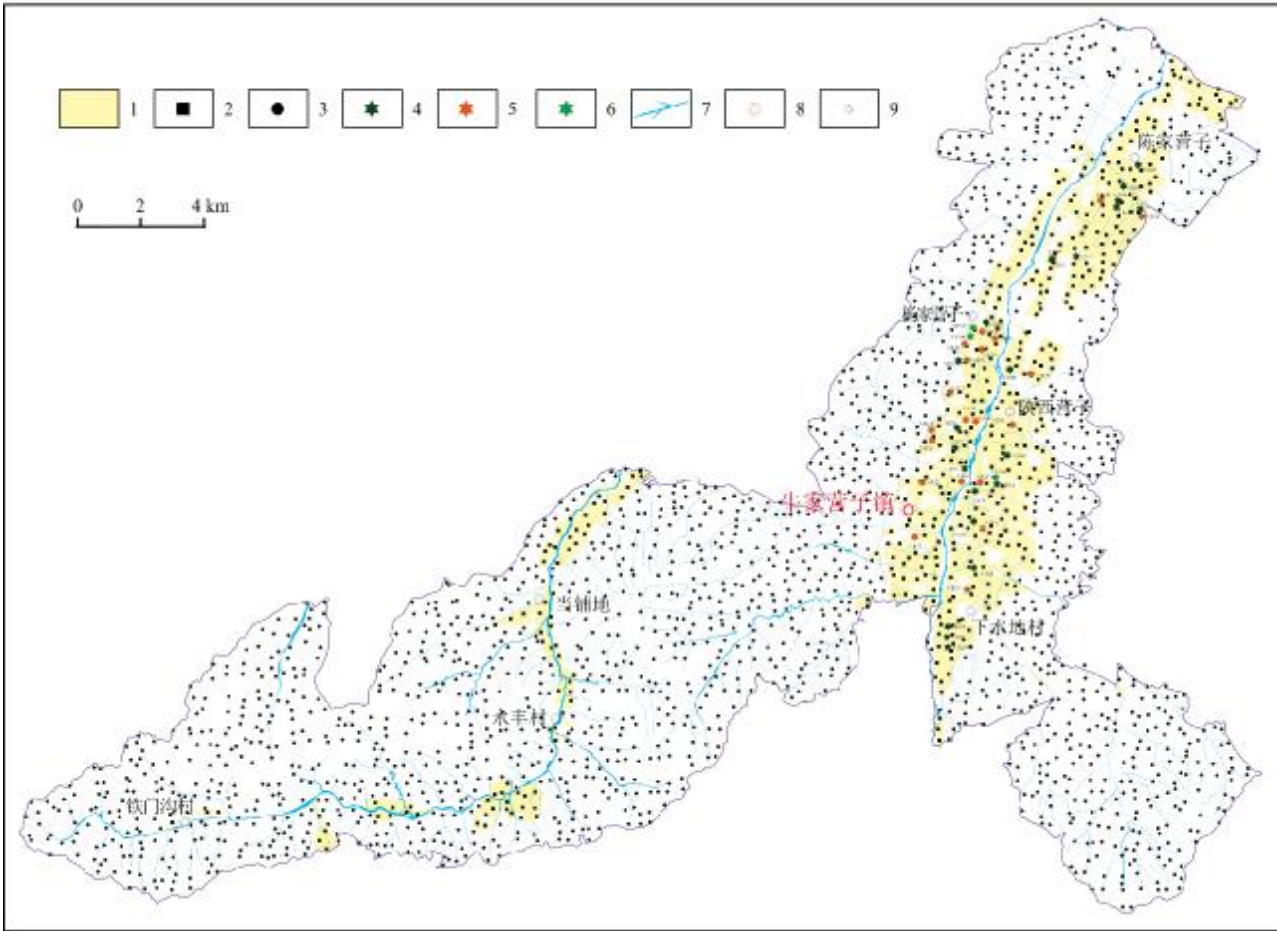


图2 表层土壤、中药材及根系土样品采集点位图

Fig. 2 Sampling points of surface soil, Chinese medicinal materials and root soil samples

1—中药材种植分布区 (planting area of Chinese herbal medicine); 2—中药材种植区表层土壤采样点 (sampling point of surface soil within Chinese herbal medicine planting area); 3—非中药材种植区表层土壤采样点 (sampling point of surface soil outside of Chinese herbal medicine planting area); 4—北沙参及根系土采样点 (glehnia littoralis and root soil sampling point); 5—桔梗及根系土采样点 (platycodon grandiflorum and root soil sampling point); 6—牛膝及根系土采样点 (achyranthes bidentata and root soil sampling point); 7—锡伯河(Xibo River); 8—乡镇(town); 9—村庄(village)

Cu、Hg、Pb、pH 等,各指标的测试方法及检出限见表 1. 各项元素分析方法的检出限、报出率、准确度、精密度的质量指标均达到《土地质量地球化学评价规范(DZ/T 0295—2016)》要求^[20].

3 评价方法与标准

本研究中描述性统计、Pearson 相关分析等统计内容均是通过 SPSS ver.22.0(IBM, New York, USA)完成. 图件主要采用 ArcGIS 10.2 (Esri, RedLands, USA)和 MapGIS 6.7(中地数码,中国武汉)软件进行绘制.

以单项污染指数和综合污染(Nemerow, 内梅罗)指数法对中药材种植区土壤(中药材药用部位)重金属含量的环境质量进行评价^[21-23].

表 1 样品重金属元素检出限及分析方法

Table 1 Detection limits and analysis methods of heavy metal elements in samples

氧化物	检出限/%	分析方法	元素	检出限/10 ⁻⁶	分析方法
SiO ₂	0.05	XRF	As	0.5	AFS
Al ₂ O ₃	0.02	ICP-OES	Cd	0.02	ICP-MS
TFe ₂ O ₃	0.02	XRF	Cu	0.29	ICP-MS
K ₂ O	0.02	ICP-OES	Hg	0.0003	AFS
Na ₂ O	0.03	XRF	Pb	0.3	ICP-MS
CaO	0.03	XRF			
MgO	0.03	XRF	pH	0.10	ISE

XRF—X 射线荧光光谱法; ICP-OES—电感耦合等离子体发射光谱法; AFS—原子荧光光谱法; CP-MS—电感耦合等离子体质谱法; ISE—离子选择性电极法.

单项污染指数法是目前国内普遍采用的评价方法之一,其计算公式为:

$$P_i=\frac{C_i}{S_i}$$

式中, P_i 为土壤(中药材药用部位)中污染物 i 的单项污染指数, C_i 为土壤(中药材药用部位)中污染物 i 的实测数据, S_i 为污染物 i 的土壤(中药材药用部位)评价标准^[24-25]. $P_i<1$,表示土壤未受污染; $P_i\geq 1$,表示土壤受污染. P_i 越大,受污染程度越重.

内梅罗综合污染指数公式为:

$$P_{综合}=\sqrt{(P_{max}^2+P_{ave}^2)/2}$$

式中, $P_{综合}$ 为内梅罗综合污染指数, P_{max} 为单项污染指数最高值, P_{ave} 为参加评价的单项污染指数的算术平均值. 内梅罗综合污染指数的分级标准为:当 $P_{综合}<0.7$ 认为其污染等级为清洁(安全级), $P_{综合}$ 在 0.7~1 之间时为警戒限, $P_{综合}$ 在 1~2 间属轻度污染, $P_{综合}$ 在 2~3 范围属中度污染,当 $P_{综合}>3$ 时为重度污染.

4 结果与讨论

4.1 中药材种植区土壤重金属地球化学特征

中药材种植区土壤重金属元素 As、Cd、Cu、Hg、Pb 含量和 pH 统计情况见表 2. 结果显示 As 含量为 4.510×10^{-6} ~ 27.900×10^{-6} ,均值为 8.729×10^{-6} ;Cd 含量为 0.077×10^{-6} ~ 1.010×10^{-6} ,均值为 0.142×10^{-6} ;Cu 含量为 13.120×10^{-6} ~ 61.950×10^{-6} ,均值为 21.146×10^{-6} ;Hg 含量为 0.012×10^{-6} ~ 0.295×10^{-6} ,均值为 0.036×10^{-6} ;Pb 含量为 18.360×10^{-6} ~ 60.260×10^{-6} ,均值为 23.651×10^{-6} . 变异

系数范围为 0.141~0.639, 变异强度依次为 Hg>Cd>Cu>As>Pb, 其原因是喀喇沁旗土壤中 Hg、Cd 元素本底含量相对较低^①,更易受到各种人为因素扰动,而其他元素本底含量较高,人为扰动同等条件下,波动较小. K-Stest 分析显示,土壤 As、Cd、Cu、Hg、Pb 含量数据均不符合正态分布,说明土壤环境存在受人类活动扰动而引起的元素局部富集现象.

依据国家《土壤环境质量:农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[24], 472 件样品中有 2 件样品 As 含量超过管控值,最高值(27.9×10^{-6})超过管控值(20×10^{-6})的 39.5%; 1 件样品 Cd 含量超过管控值,最高值(1.01×10^{-6})超过管控值(0.80×10^{-6})的 26.25%;其余样品均低于管控值,整体上样品重金属含量超管控值率极低. 土壤 As、Cd、Cu、Hg、Pb 五种重金属元素及其大量元素含量相关性分析结果见表 3, 五种元素间均呈显著正相关, 且与土壤大量元素呈显著(正/负)相关(Al、Fe 氧化物或结核对重金属具有较强的吸附作用,与重金属呈显著正相关),说明五种元素来源一致,为伴生关系,应该主要来源于成土母质^[16-17].

4.2 中药材种植区土壤重金属污染评价

土壤重金属单项污染指数法和综合污染指数法评价结果见表 4. Cd 和 Pb 两种重金属元素处于轻度污染状态, 其余 3 种重金属含量与喀喇沁旗土壤基准值一致,处于未受污染状态. 结合区域地质条件(图 1)和土壤重金属基准值(表 2)^①,研究区整体处于未污染-轻度污染临界状态. 现行《中药材生产质量管理规范》

表 2 表层土壤重金属、pH 和背景值统计表
Table 2 Statistics of heavy metals, pH and background values in topsoil

元素	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数	土壤背景值 ^[20]	土壤基准值 ^[20]	富集系数	土壤环境质量管理值 ^[24] (pH>7.5)
As	4.510	27.90	8.729	1.731	0.198	8.80	8.70	1.164	20
Cd	0.077	1.010	0.142	0.067	0.472	0.11	0.08	2.679	0.8
Cu	13.12	61.95	21.15	4.634	0.219	21.9	20.8	1.468	100
Hg	0.012	0.295	0.036	0.023	0.639	0.042	0.02	0.900	1.0
Pb	18.36	60.26	23.65	3.335	0.141	21.80	25.1	1.375	240
pH	6.500	9.190	8.280	0.246	-	-	-	-	-

注:土壤背景值以表层土壤算术平均值为参考,基准值以深层土壤算术平均值为参考. n=472 件.

①中国地质调查局沈阳地质调查中心. 内蒙古自治区喀喇沁旗 1:25 万土地质量地球化学调查成果报告. 2018.

表 3 重金属元素间相关性统计分析表

Table 3 Statistical analysis of correlation between heavy metal elements

	As	Cd	Cu	Hg	Pb	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO
As	1											
Cd	0.74**	1										
Cu	0.78**	0.80**	1									
Hg	0.56**	0.61**	0.67**	1								
Pb	0.60**	0.82**	0.69**	0.52**	1							
SiO ₂	-0.55**	-0.23**	-0.18**	-0.14**	-0.06	1						
Al ₂ O ₃	0.36**	0.09*	0.08	0.11*	0.37**	-0.05	1					
TFe ₂ O ₃	0.56**	0.16**	0.15**	0.13**	0.35**	-0.41**	0.88**	1				
K ₂ O	-0.43**	-0.11*	-0.13**	-0.02	0.12**	0.76**	0.17**	-0.17**	1			
Na ₂ O	-0.65**	-0.21**	-0.18**	-0.18**	-0.14**	0.83**	-0.43**	-0.69**	0.66**	1		
CaO	0.29**	0.17**	0.12**	0.07	-0.14**	-0.80**	-0.46**	-0.13**	-0.70**	-0.44**	1	
MgO	0.66**	0.27**	0.22**	0.21**	0.21**	-0.77**	0.51**	0.71**	-0.60**	-0.86**	0.42**	1

注:** 为在 0.01 级别(双尾),相关性显著;* 为在 0.05 级别(双尾),相关性显著. n=472 件.

(国家药品监督管理局[2022 年第 22 号])要求中药材种植地块土壤符合国家《土壤环境质量:农用地污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[24],以此为评价标准采用单项污染指数法和综合污染指数法对采样区土壤重金属质量进行评价,结果如表 5 所示.各单项污染指数及综合污染指数均小于 0.7,说明所有土壤样品均清洁,土壤环境质量属安全级.

表 4 土壤样品污染指数

Table 4 Contamination indexes of soil samples

污染指数	土壤背景值 ^[20]	污染程度	土壤环境质量管控值 ^[25]	污染程度
P _{As}	0.99	未受污染	0.44	未受污染
P _{Cd}	1.29	轻度污染	0.18	未受污染
P _{Cu}	0.97	未受污染	0.21	未受污染
P _{Hg}	0.86	未受污染	0.04	未受污染
P _{Pb}	1.08	轻度污染	0.10	未受污染
P _{综合}	1.09	轻度污染	0.30	清洁

依据土地质量地球化学评价规范(DZ/T 0295—2016)^[20],运用 ArcGIS10.2 软件,选择反距离权重法对

研究区土壤重金属单项和综合含量数据进行评价,结果如图 3 所示.研究区土壤环境综合无风险面积占比 99.33%,风险可控面积 0.67%,土壤环境清洁.研究区东北部陈家营子村(冲洪积平原地貌,主要为城镇建设用地,堆放大量生活与建筑垃圾)出现的局部土壤 As、Cd、Cu 风险可控区,推测主要为居民生活废弃物大量堆积释放所致,可采取有效措施加以控制.西南部铁沟门村(山地丘陵地貌,主要为林地)出现的局部土壤 Cd 风险可控区,推测应为成土母质(残坡积类型)所致.

以国家《土壤环境质量:农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[24]和《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)^[20]作为参照,种植区土壤环境清洁,完全符合中药材生产质量管理规范(GAP)种植基地对于土壤重金属含量的要求^[26-27];但以喀喇沁旗土壤背景值作为参考^①,中药材种植区个别土壤样品重金属含量属轻微污染(表 2、4).中药材同等生长环境下采取不同的评价标准得到不同的结果,原因是以喀喇沁旗背景值为标准得到的结果主要侧重外源输入(背景值与基准值对比)重金属在土壤中

①中国地质调查局沈阳地质调查中心.内蒙古自治区喀喇沁旗 1:25 万土地质量地球化学调查成果报告. 2018.

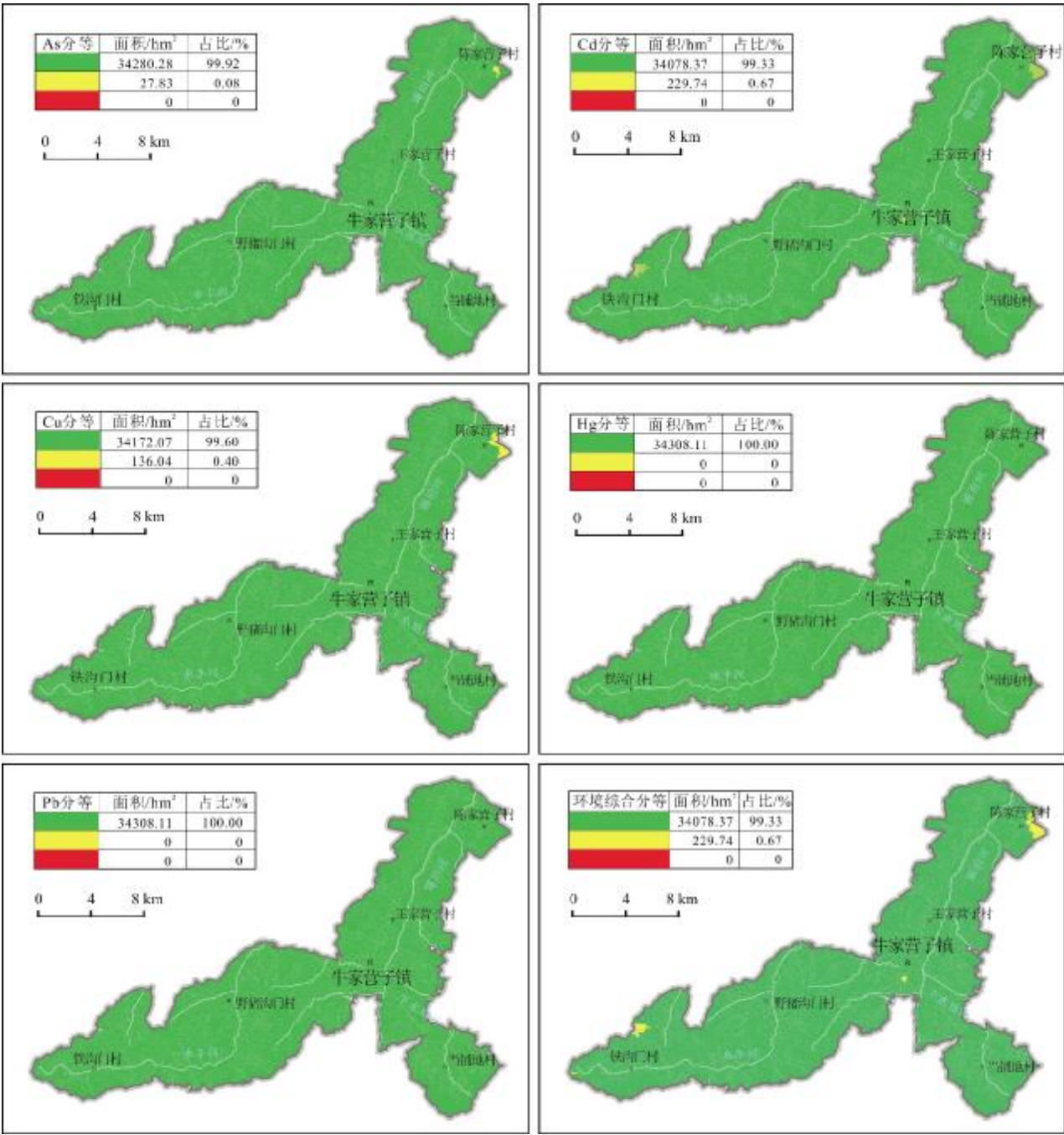


图 3 重金属元素地球化学评价图

Fig. 3 Geochemical evaluation map of heavy metal elements

富集的状况，而国家标准和土地质量地球化学评价规范主要侧重土壤环境质量生态预警，即土壤重金属含量若超过此标准则很可能给生物造成一定危害。由于中药材自身养分吸收规律、种植区土壤类型和地质背景复杂性等因素^[28-31]，故本研究进一步分析了不同中药材重金属含量状况并对其重金属的富集能力进行分析与评价。

4.3 中药材重金属累积状况分析

中药材对土壤中的重金属吸收具有一定的专属性，即中药材可能对于特定重金属元素具有较高的吸收累积能力。研究认为生物富集系数（BCF=植物中元素含量/土壤中元素含量）可以一定程度上反映土壤-植物体系中元素迁移和富集的难易程度，是植物将重金属吸收转移到体内能力大小的重要评价指标^[32]。研

究区 3 种中药材的生物富集系数统计结果 (表 5) 显示, As 的富集系数为 0.014~0.018, 最高为桔梗; Cd 富集系数为 0.261~0.380, 最高为牛膝; Cu 富集系数为 0.264~0.480, 最高为北沙参; Hg 富集系数为 0.083~0.167, 最高为桔梗; Pb 富集系数为 0.006~0.008, 最高为桔梗. 各种中药材药用部位重金属富集系数差异意味着不同中药材对重金属吸收特性、积累特征不同, 即在相同的土壤条件下桔梗中 Hg 含量可能是牛膝的 2 倍, 但都远低于《中华人民共和国药典(一部)》与《药用植物及制剂外经贸绿色行业标准 (WM/T2—2004)》中药材重金属含量限定值^[25, 33], 均符合绿色行标要求.

表 5 中药材重金属富集系数
Table 5 Concentration coefficient of heavy metals in Chinese herbal medicine

元素	桔梗(21)	北沙参(21)	牛膝(3)
As _{BCF}	0.018	0.014	0.014
Cd _{BCF}	0.261	0.296	0.380
Cu _{BCF}	0.437	0.480	0.264
Hg _{BCF}	0.167	0.111	0.083
Pb _{BCF}	0.008	0.007	0.006

3 种中药材重金属含量和污染指数等特征见表 6. 结果显示 As 含量为 $0.058\times10^{-6}\sim0.421\times10^{-6}$, 平均污染指数最高的为桔梗 (0.08); Cd 含量为 $0.013\times10^{-6}\sim0.096\times10^{-6}$, 平均污染指数最高的为牛膝(0.18); Cu 含量为 $5.96\times10^{-6}\sim17.60\times10^{-6}$, 平均污染指数最高的为北沙参(0.50); Hg 含量为 $0.002\times10^{-6}\sim0.016\times10^{-6}$, 平均污染指数最高的为桔梗(0.03); Pb 含量范围为 $0.06\times10^{-6}\sim0.56\times10^{-6}$, 平均污染指数最高的为桔梗(0.04). 3 种中草药样品中均未出现重金属含量超限样品^[25, 34], 说明牛家营子镇中药材种植区产出的中药材均符合绿色行标要求.

当前, 中药材种植区土壤重金属元素含量评价通常采用国家《土壤环境质量: 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[24], 而且土壤重金属标准仅给定一个参考阈值管控值, 未考虑土壤中重金属有效量、中药材类型不同而产生的对重金属吸收、积累能力的差异, 容易产生土壤重金属超标而中药材重金属含量正常或土壤重金属含量处于安全级而中药材重金属含量超标的现象. 建议引入基于生物学的重金

表 6 中药材采集类型及其重金属含量和污染指数
Table 6 Heavy metal contents and pollution indexes of collected Chinese medicinal materials

元素	指标	桔梗(21)	北沙参(21)	牛膝(3)	限量标准参数 ^[26]
范围/ 10^{-6}					
As	均值/ 10^{-6}	0.160	0.121	0.121	2.0
	污染指数	0.08	0.06	0.06	
范围/ 10^{-6}					
Cd	均值/ 10^{-6}	0.037	0.042	0.054	0.3
	污染指数	0.12	0.14	0.18	
范围/ 10^{-6}					
Cu	均值/ 10^{-6}	9.244	10.144	5.573	20
	污染指数	0.46	0.50	0.27	
范围/ 10^{-6}					
Hg	均值/ 10^{-6}	0.006	0.004	0.003	0.2
	污染指数	0.03	0.02	0.02	
范围/ 10^{-6}					
Pb	均值/ 10^{-6}	0.197	0.171	0.147	5.0
	污染指数	0.04	0.03	0.02	

属评价方法, 对具体土壤类型和中药材品种进行适当的调整, 进一步提高评价的可靠性和科学性^[23, 35-36].

5 结论

(1)赤峰牛家营子镇中药材种植区表层土壤重金属 As、Cd、Cu、Hg、Pb 平均含量分别为 8.729×10^{-6} 、 0.142×10^{-6} 、 21.146×10^{-6} 、 0.036×10^{-6} 、 23.651×10^{-6} ; Hg、Cd 元素变异系数分别为 0.639、0.472, 达到强度变异, 原因是土壤中 Hg、Cd 元素本底值较低, 更易受到各种因素影响. As、Cd、Cu、Hg、Pb 五种重金属元素成因来源一致, 为伴生关系, 主要来源于成土母质.

(2)以喀喇沁旗土壤基准值进行表层土壤重金属污染评价, Cd 和 Pb 两种元素处于轻度污染, 其余 3 种元素处于未受污染状态. 以国家《土壤环境质量: 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)和《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)进行表层土壤重金属污染评价, 土壤重金属单项和综合污染指数均小于 0.7, 土壤质量清洁, 符合中药材 GAP 基地建设土壤环境要求.

(3)桔梗、北沙参和牛膝3种中药材药用部位重金属富集系数或污染指数均小于0.50,且表现出不同中药材类型对重金属吸收特性、积累特征和污染指数不同,但都远低于中药材重金属含量限定值,说明牛家营子镇中药材种植区产出的中药材均符合绿色行标要求。

参考文献(References):

- [1] Weil R R, Brady N C. The nature and properties of soils[M]. 15th ed. Boston: Pearson, 2017: 1-5.
- [2] 朱迪, 谢玉敏, 谭丹, 等. 不同来源白及药材中重金属及有害元素含量测定及其评价[J]. 中国卫生检验杂志, 2015, 25(4): 471-476.
Zhu D, Xie Y M, Tan D, et al. Determination and evaluation of heavy metals content in *Bletilla striata* from different sources[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2015, 25(4): 471-476.
- [3] 胡省英, 冉伟彦, 范宏瑞. 土壤-作物系统中重金属元素的地球化学行为[J]. 地质与勘探, 2003, 39(5): 84-87.
Hu S Y, Ran W Y, Fan H R. Geochemical behaviour of heavy metals in soil-crop system[J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(5): 84-87.
- [4] 李婷, 吴明辉, 王越, 等. 人类扰动对重金属元素的生物地球化学过程的影响与修复研究进展[J]. 生态学报, 2020, 40(13): 4679-4688.
Li T, Wu M H, Wang Y, et al. Advances in research on the effects of human disturbance on biogeochemical processes of heavy metals and remediation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4679-4688.
- [5] 王茜, 张光辉, 田言亮, 等. 农田表层土壤中重金属潜在生态风险效应研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 165-172.
Wang Q, Zhang G H, Tian Y L, et al. Research on the potential ecological risk of farmland top-soil of heavy metals[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(4): 165-172.
- [6] 马成玲, 王火焰, 周健民, 等. 长江三角洲典型县级市农田土壤重金属污染状况调查与评价[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3): 751-755.
Ma C L, Wang H Y, Zhou J M, et al. Investigation and evaluation of the heavy metal pollution in farmland of a typical county in Yangtze River delta[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(3): 751-755.
- [7] 刘庆, 王静, 史衍玺, 等. 绿色食品产地土壤重金属空间分布与污染评价[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 90-94.
Liu Q, Wang J, Shi Y X, et al. Distribution and evaluation of soil heavy metal in green food producing area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(3): 90-94.
- [8] 黄泽春, 宋波, 陈同斌, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜的锌含量及其健康风险评估[J]. 地理研究, 2006, 25(3): 439-448.
Huang Z C, Song B, Chen T B, et al. A survey of zinc concentrations in vegetables and soils in Beijing and their health risk[J]. Geographical Research, 2006, 25(3): 439-448.
- [9] Zhu X B, Guo M, Zhang Z H, et al. Chinese herbal injections for Coronavirus Disease 2019 (COVID-19): A narrative review[J]. Integrative Medicine Research, 2021, 10(4): 100778, doi: 10.1016/j.imr.2021.100778.
- [10] Zhang K, Tian M L, Zeng Y, et al. The combined therapy of a traditional Chinese medicine formula and western medicine for a critically ill case infected with COVID-19[J]. Complementary Therapies in Medicine, 2020, 52: 102473, doi: 10.1016/j.ctim.2020.102473.
- [11] Huang F F, Li Y, Leung E L H, et al. A review of therapeutic agents and Chinese herbal medicines against SARS-CoV-2 (COVID-19)[J]. Pharmacological Research, 2020, 158: 104929, doi: 10.1016/j.phrs.2020.104929.
- [12] Du A S, Zheng R, Disoma C, et al. Epigallocatechin-3-gallate, an active ingredient of traditional Chinese medicines, inhibits the 3CLpro activity of SARS-CoV-2[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 176: 1-12, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.02.012.
- [13] 赵连华, 杨银慧, 胡一晨, 等. 我国中药材中重金属污染现状分析及对策研究[J]. 中草药, 2014, 45(9): 1199-1206.
Zhao L H, Yang Y H, Hu Y C, et al. Current situation analysis and countermeasures on contamination of heavy metal in traditional Chinese medicinal materials in China[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2014, 45(9): 1199-1206.
- [14] 褚卓栋, 刘文菊, 肖亚兵, 等. 中草药种植区土壤及草药中重金属含量状况及评价[J]. 环境科学, 2010, 31(6): 1600-1607.
Chu Z D, Liu W J, Xiao Y B, et al. Survey and assessment of heavy metals in soils and herbal medicines from Chinese herbal medicine cultivated regions[J]. Environmental Science, 2010, 31(6): 1600-1607.
- [15] 褚卓栋. 土壤-中草药重金属含量及中药中砷汞生物可给性研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2008.
Chu Z D. Concentrations of heavy metals in soils-Chinese herbal medicines and bioaccessibility of arsenic and mercury in traditional Chinese medicines[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2008.
- [16] 钱华, 王衍彬. 中药材不同吸收特性对土壤重金属含量标准要求的变化[J]. 中国现代中药, 2006, 8(11): 34-36.
Qian H, Wang Y B. Changes in the requirements of different absorption characteristics of Chinese medicinal materials on soil heavy metal content standards[J]. Modern Chinese Medicine, 2006, 8(11): 34-36. (in Chinese)
- [17] 杨玲, 田磊, 白光宇, 等. 内蒙古新巴尔虎右旗土壤重金属生态风险与来源分析[J]. 中国地质, 2022, 49(6): 1970-1983.
Yang L, Tian L, Bai G Y, et al. Ecological risk assessments and source analysis of heavy metals in the soil of Xin Barag Youqi, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2022, 49(6): 1970-1983.
- [18] 赵盼盼. 赤峰市中草药种植集中区土壤及草药中重金属污染综述[J]. 现代营销, 2014(7): 92.
Zhao P P. Summary of heavy metal pollution in soil and herbal medicines

- in the concentrated Chinese herbal medicine planting area of Chifeng City[J]. Marketing Management Review, 2014(7): 92. (in Chinese)
- [19] 安阳, 谢明. 赤峰市中药材产业现状及发展对策浅析[J]. 中国现代中药, 2013, 15(5): 394-397.
- An Y, Xie M. The analysis on present situation and development countermeasures of Chinese medicinal material industry in Chifeng [J]. Modern Chinese Medicine, 2013, 15(5): 394-397.
- [20] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0295—2016 土地质量地球化学评价规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0295—2016 Determination of land quality geochemical evaluation [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [21] 郭笑笑, 刘丛强, 朱兆洲, 等. 土壤重金属污染评价方法[J]. 生态学杂志, 2011, 30(5): 889-896.
- Guo X X, Liu C Q, Zhu Z Z, et al. Evaluation methods for soil heavy metals contamination: A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(5): 889-896.
- [22] 韩小丽, 张小波, 郭兰萍, 等. 中药材重金属污染现状的统计分析[J]. 中国中药杂志, 2008, 33(18): 2041-2048.
- Han X L, Zhang X B, Guo L P, et al. Statistical analysis of residues of heavy metals in Chinese crude drugs[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2008, 33(18): 2041-2048.
- [23] 窦磊, 周永章, 高全洲, 等. 土壤环境中重金属生物有效性评价方法及其环境学意义[J]. 土壤通报, 2007, 38(3): 576-583.
- Dou L, Zhou Y Z, Gao Q Z, et al. Methods and environmental implications of measuring bioavailability of heavy metals in soil environment[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(3): 576-583.
- [24] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. GB 15618—2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- Ministry of Ecology and Environment, State Administration GB 15618—2018 Soil environmental quality Risk control standard for soil contamination of agricultural land [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [25] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(一部)[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.
- Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China (Part 1) [M]. Beijing: China Medical Science Press, 2020. (in Chinese)
- [26] 任德权, 周荣汉. 中药材生产质量管理规范(GAP)实施指南[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- Ren D Q, Zhou R H. Guidelines for the implementation of the good manufacturing practice of Chinese medicinal materials (GAP) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003.
- [27] 秦樊鑫, 张明时, 张丹, 等. 贵州省地道药材 GAP 基地土壤重金属含量及污染评价[J]. 土壤, 2008, 40(1): 135-140.
- Qin F X, Zhang M S, Zhang D, et al. Heavy metal contents and pollution evaluation of soils in Chinese medicinal herbs GAP bases in Guizhou Province[J]. Soils, 2008, 40(1): 135-140.
- [28] 张伟成, 刘兴雁. 影响中草药质量的因素分析[J]. 中兽医学杂志, 2018(7): 69.
- Zhang W C, Liu X Y. Analysis of factors affecting the quality of Chinese herbal medicine[J]. Chinese Journal of Traditional Veterinary Science, 2018(7): 69. (in Chinese)
- [29] 陈文德, 彭培好, 李贤伟, 等. 岩-土-植系统中重金属元素的迁聚规律研究[J]. 土壤通报, 2009, 40(2): 369-373.
- Chen W D, Peng P H, Li X W, et al. The transportation and accumulation characteristics of heavy metal in rock-soil-plant system [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(2): 369-373.
- [30] 张宝贤, 刘婷婷, 夏峥, 等. 桔梗不同生育期对大量元素的积累规律[J]. 西北农业学报, 2014, 23(2): 131-136.
- Zhang B X, Liu T T, Xia Z, et al. Accumulation of major elements in different growth periods of *Platycodon grandiflorum* [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2014, 23(2): 131-136.
- [31] 黄白飞, 辛俊亮. 植物积累重金属的机理研究进展[J]. 草业学报, 2013, 22(1): 300-307.
- Huang B F, Xin J L. Mechanisms of heavy metal accumulation in plants: A review[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(1): 300-307.
- [32] 梁帅, 朱建新, 戴慧敏, 等. 黑龙江拜泉地区硒元素在土壤-植物系统中的迁移富集规律[J]. 地质与资源, 2021, 30(4): 456-464, 478.
- Liang S, Zhu J X, Dai H M, et al. Migration and enrichment of selenium in soil-plant system in Baiquan Area, Heilongjiang Province [J]. Geology and Resources, 2021, 30(4): 456-464, 478.
- [33] 中华人民共和国商务部. WM/T 2—2004 药用植物及制剂外经贸绿色行业标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- Ministry of Commerce of the People's Republic of China. WM/T 2—2004 Green standards of medicinal plants and preparations for foreign trade and economy[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [34] International Organization for Standardization. ISO 18664: 2015 Traditional Chinese medicine: Determination of heavy metals in herbal medicines used in traditional Chinese medicine[S]. Geneva: ISO, 2015.
- [35] 田柱萍, 何邦平, 王小燕, 等. 中药材的药效与其所含微量元素关系的研究进展[J]. 微量元素与健康研究, 2005, 22(4): 54-56.
- Tian Z P, He B P, Wang X Y, et al. The efficacy of medicine of the Chinese herbal medicine with its a research for containing trace element relating to progress[J]. Studies of Trace Elements and Health, 2005, 22(4): 54-56.
- [36] 仇劲, 李国清, 毕研文, 等. 中药材桔梗中常量元素和微量元素含量分析[J]. 农学报, 2017, 7(7): 43-46.
- Zhang J, Li G Q, Bi Y W, et al. Contents of macroelements and trace elements in medicinal plant *Platycodon grandiflorum* [J]. Journal of Agriculture, 2017, 7(7): 43-46.