



基于内梅罗指数法与地累积指数法的土壤重金属污染评价分析 ——以大兴安岭松岭地区为例

辛有涛,李蕴峰,陈 卓,于俊博,李少文

中国地质调查局 哈尔滨自然资源综合调查中心,黑龙江 哈尔滨 150086

摘 要: 依据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》,在大兴安岭松岭地区共采集 601 个土壤样品,检测土壤中的 As、Cd、Cr、Hg、Pb 等 5 种重金属元素含量,利用内梅罗指数法和地累积指数法,应用 Excel、ArcGIS 软件,研究该区域土壤中重金属的分布及污染程度。结果显示,研究区 As、Cd、Cr、Hg、Pb 含量平均值均低于国家标准的风险筛选值和污染管制值;Cd、Cr、Pb 个别高值区超过国家标准的风险筛选值,但未超过污染管制值,存在一定的污染风险,属于尚清洁;As、Hg 处于无污染水平。

关键词: 内梅罗指数法;地累积法;重金属;多因子综合评价模型;污染评价

EVALUATION AND ANALYSIS OF SOIL HEAVY METAL POLLUTION BASED ON NEMEROW INDEX AND GEOACCUMULATION INDEX METHODS: A Case Study of Songling Area in Daxinganling Mountains

XIN You-tao, LI Yun-feng, CHEN Zhuo, YU Jun-bo, LI Shao-wen

Harbin Natural Resources Comprehensive Survey Center, CGS, Harbin 150086, China

Abstract: According to the “Soil Environmental Quality Agricultural Land Soil Pollution Risk Control Standard (Trial)”, 601 soil samples are collected in Songling area of Daxinganling Mountains to test the contents of 5 heavy metal elements of As, Cd, Cr, Hg and Pb in soil. The distribution and pollution degree of soil heavy metals in the area are studied based on Nemerow index and geoaccumulation index methods, assisted by Excel and ArcGIS software. The results show that the average contents of As, Cd, Cr, Hg and Pb are lower than the national standard risk screening values and pollution control values. In a few high value areas, the contents of Cd, Cr and Pb exceed the national standard risk screening values but not exceed the pollution control values, which has certain pollution risk, belonging to still clean level. As and Hg are at the pollution-free level.

Key words: Nemerow index; geoaccumulation index; heavy metal; multi-factor comprehensive evaluation model; pollution evaluation

0 引言

土壤是人类赖以生存的根本^[1],我国是有着悠久历史的农业大国,但长期以来,由于土地利用不合理、

农用化学物质数量多、环境污染认识不到位等诸多原因,土壤污染严重,对农产品质量和人体健康构成了严重威胁^[2-6]。耕地的污染程度直接将影响到国家的粮

收稿日期:2022-05-10;修回日期:2022-12-16. 编辑:张哲.

基金项目:中国地质调查局项目“大兴安岭山区生态地质调查”(DD20191014);“松嫩平原绥化地区周边黑土地地表基质调查”(ZD20220103).

作者简介:辛有涛(1981—),男,高级工程师,从事基础地质调查工作,通信地址 黑龙江省哈尔滨市南岗区保健副路 1 号,E-mail//yougu1013@163.com

食安全,因此,研究、预测耕地的污染情况,可为粮食生产提供保障。

20世纪90年代,国外就已经提出利用地统计学方法,模拟土壤重金属属性值的空间分布^[7]。近年来由于GIS的广泛应用,我国不少学者利用ArcGIS强大的空间分析功能,对土壤重金属污染进行分析评价^[8-11]。

本研究依托中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心大兴安岭山区生态地质调查项目^[12],在大兴安岭北部松岭地区进行土壤生态地球化学调查,通过对土壤中As、Cd、Cr、Hg、Pb的检测,结合ArcGIS软件对土壤重金属污染情况进行评价。

1 研究区概况

研究区地处内蒙古自治区境内,行政区划隶属于黑龙江省大兴安岭地区加格达奇区和松岭区管辖,位于加格达奇市北侧森林覆盖区。该区属寒温带大陆性季风气候区,冬季长达7个月以上,而且日照时间非常短;夏季只有2个月左右,然而每年的6—8月份,日照时间长达17小时。年平均气温-3℃,年平均降水量600 mm。地势西高东低,全区为多年冻土带。调查区土壤类型主要是棕色针叶林土和暗棕土^[13]。

2 样品采集与分析

选取古源公社(M51E007018)、松岭区(M51E008018)两个图幅为研究区开展1:5万土壤采样,采集样品601件。按照1点/1 km²的密度,采取土壤A层样品(图1)。在样品采集过程中使用GPS精准定位,将采样点土壤类型、层位、采样深度、土壤颜色等内容详细记录,采取不小于400 g的原始样品装袋,作为待加工样品,确保细加工后的待测样品重量在150 g以上。

土壤样品自然风干,过筛剔除植物根叶及渣滓送至实验室。As、Hg元素含量运用原子荧光分光光度法(AFS)测得;Cr、Pb元素含量运用X射线荧光光谱法(XRF)测得;Cd元素含量运用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测得。

各元素测定的相对误差(RE)均小于15%,相对标准偏差(RSD)均小于10%,分析数据的准确度和精密度均满足DZ/T0258—2014《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》的要求,分析结果可信。

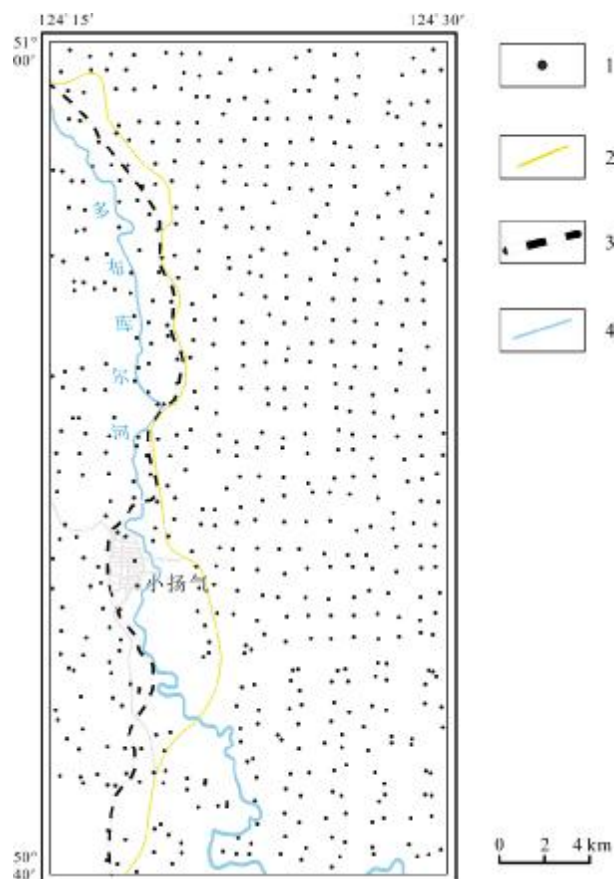


图1 采样点位分布图

Fig. 1 Distribution map of sampling sites

1—采样点位(sampling position); 2—国道(national highway); 3—铁路(railway); 4—河流(river)

3 评价方法与数据处理

内梅罗指数法和地累积指数法^[14-16]是目前国内外评价土壤重金属污染的普遍方法,可以直观地了解研究区的重金属元素分布情况、影响范围等信息,从而为有效利用土壤和科学开展土壤施肥工作提供依据^[17]。

3.1 内梅罗指数法

该方法先求出各因子的分指数(超标倍数),然后求出各分指数的平均值,取最大分指数和平均值计算。

单因子指数法,通过单因子评价,可以确定某重金属污染物对研究区的污染程度:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中, P_i 为土壤中重金属元素 i 的单因子污染指数; C_i 为土壤重金属元素含量的实测值; S_i 为土壤环境质量标准值。 $P_i \leq 1$, 为非污染; $1 < P_i \leq 2$, 为轻污染; $2 < P_i \leq 3$,

为中污染; $P_i>3$,为重污染. 所以, P_i 越小,则表示该农业土壤污染风险值越小.

综合指数法兼顾了污染指数平均值和最高值,可以突出污染较重的土壤重金属元素对研究区的综合污染程度,是当前国内外进行综合污染指数计算的最常用的方法之一^[18].

$$P_{\text{综}}=\sqrt{(P_{\text{平均}}^2+P_{\text{最大}}^2)/2}$$
 (2)

式中, $P_{\text{综}}$ 表示土壤重金属元素的综合污染指数; $P_{\text{平均}}$ 表示土壤重金属元素各单因子污染指数的平均值; $P_{\text{最大}}$ 表示土壤重金属元素各单因子污染指数的最大值.

$P_{\text{综}}$ 的分级标准: $P_{\text{综}}\leq 0.7$, 安全; $0.7<P_{\text{综}}\leq 1.0$, 警戒线; $1.0<P_{\text{综}}\leq 2.0$, 轻污染; $2.0<P_{\text{综}}\leq 3.0$, 中污染; $P_{\text{综}}>3$, 重污染.

3.2 地累积指数法

地累积指数^[19]不仅反映了重金属分布的自然变化特征,而且可以判别人为活动对环境的影响,是区分人为活动的重要参数^[20-23]. 其表达式为:

$$I_{\text{geo}}=\log_2(C_n/kB_n)$$
 (3)

式中, C_n 为土壤重金属元素 n 的实测含量; B_n 为研究区域土壤背景值; k 为由于岩石差异引起土壤背景值变动而取的修正系数,一般 $k=1.5$.

地累积指数 I_{geo} 一般分为 7 个等级: $I_{\text{geo}}<0$, 污染级别为 0 级,表示无污染; $0\leq I_{\text{geo}}<1$, 污染级别为 1 级,表示无污染到中度污染; $1\leq I_{\text{geo}}<2$, 污染级别为 2 级,表示中度污染; $2\leq I_{\text{geo}}<3$, 污染级别为 3 级,表示中度污染到强污染; $3\leq I_{\text{geo}}<4$, 污染级别为 4 级,表示强污染; $4\leq I_{\text{geo}}<5$, 污染级别为 5 级,表示强污染到极强度污染; $I_{\text{geo}}\geq 5$, 污染级别为 6 级,表示极强污染.

3.3 数据处理与分析

使用 Microsoft Excel 2016 软件进行土壤重金属含量的数据统计及相关分析, ArcGIS 10.8 投点制作采样点位分布图. 运用普通克里金差值采用 ArcGIS 10.8 软件的地统计分析模块,进行地理数据的处理,制作重金属空间分布图、内梅罗指数评价和地累积指数评价结果图.

4 评价结果与分析

4.1 重金属含量描述性分析

根据采样测试结果, 研究区内土壤 pH 值为 4.9~6.9, 平均值 5.64. 参照《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB15618—2018)^[24-25], 得知土壤中重金属 As、Cd、Cr、Hg、Pb 的风险筛选值及管制值.

对研究区内 5 种重金属元素地球化学参数进行统计, 结果如表 1 所示. 重金属 As、Cd、Cr、Hg、Pb 的值域分布范围较广, As 介于 1.8×10^{-6} ~ 24.1×10^{-6} 之间, Cd 为 0.02×10^{-6} ~ 0.609×10^{-6} , Cr 为 13.4×10^{-6} ~ 169.7×10^{-6} , Hg 为 0.015×10^{-6} ~ 0.264×10^{-6} , Pb 为 14.8×10^{-6} ~ 154.1×10^{-6} , 平均含量分别为 3.7×10^{-6} 、 0.043×10^{-6} 、 31.35×10^{-6} 、 0.0365×10^{-6} 、 26.0×10^{-6} . 重金属 As、Cd、Cr、Hg、Pb 的变异系数分别为 21.6%、53.5%、24.1%、23.3%、7.3%. 变异系数可反映各样点元素含量平均变异程度, 变异系数越大, 受到外界影响越大^[26]. 除 Cd 外, 其余重金属元素变异系数均小于 30%, 说明 4 种重金属元素在土壤中的分布较为均匀.

4.2 重金属污染评价

用内梅罗指数法对研究区重金属污染进行评价,

表 1 土壤重金属元素含量的统计
Table 1 Statistics of soil heavy metal content

元素	最大值/ 10^{-6}	最小值/ 10^{-6}	平均值/ 10^{-6}	标准差	变异系数/%	筛选值/ 10^{-6}	管制值/ 10^{-6}	研究区背景值 ^① / 10^{-6}
As	24.1	1.8	3.7	0.8	21.6	40	150	6.66
Cd	0.609	0.02	0.043	0.023	53.5	0.3	2	0.078
Cr	169.7	13.4	31.35	7.55	24.1	150	850	51.82
Hg	0.264	0.015	0.037	0.0085	23.3	1.8	2.5	0.043
Pb	154.1	14.8	26	1.9	7.3	90	500	27.96

①于俊博,等. 大兴安岭地区松岭区土壤地球化学调查工作总结报告. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心. 2019.

从表 2 中看出: 重金属元素 As、Cd、Cr、Hg、Pb 的采样点位污染率分别为 0、0.67%、0.17%、0、0.67%, 单因子污染指数均小于 1, 分别是 0.16、0.26、0.34、0.02、0.31. 总的来看, 5 种重金属元素几乎位于无风险至低风险范围, 仅有 Cd 和 Pb 在个别地区有一定程度的累积.

表 2 单因子指数评价
Table 2 Evaluation of single factor index

元素	最大值/ 10 ⁻⁶	最小值/ 10 ⁻⁶	平均值/ 10 ⁻⁶	各污染等级样品数/个			
				非污染 (P≤1)	轻污染 (1<P≤2)	中污染 (2<P≤3)	重污染 (P>3)
As	0.6	0.045	0.16	601	0	0	0
Cd	2.03	0.067	0.26	597	3	1	0
Cr	1.13	0.089	0.34	600	1	0	0
Hg	0.147	0.008	0.02	601	0	0	0
Pb	1.712	0.164	0.31	597	4	0	0

n=601

从综合指数来看 (表 3), As 和 Hg 处于安全阶段, Cr 处于污染警戒线, Cd 和 Pb 处于轻污染阶段. 说明研究区整体污染程度较轻, 仅有少部分地区存在重金属积累.

表 3 综合指数评价
Table 3 Evaluation of comprehensive index

元素	评价指数	污染程度
As	0.44	安全
Cd	1.45	轻污染
Cr	0.83	警戒线
Hg	0.10	安全
Pb	1.23	轻污染

采用地累积指数法对研究区表层土壤污染程度进行分析, 以确定的研究区土壤重金属背景值作为评价标准, 5 种重金属处于不同污染程度的样品数量见表 4.

根据表 4 得出, 重金属 As、Cd、Cr、Hg、Pb 处于无污染程度的样品数量分别占总样品数量的 96.84%、86.19%、98.50%、93.68%、97.34%, 只有 Cd、Hg 无污染的样品占全部样品数量的比例低于 95%; 重金属 As、Cd、Cr、Hg、Pb 处于无污染到中度污染的样品数量占全

表 4 重金属处于不同污染程度的样品数量
Table 4 Number of samples of heavy metals at different levels of pollution

污染程度	As	Cd	Cr	Hg	Pb
无污染	582	518	592	563	585
无污染到中度污染	18	74	8	37	12
中度污染	1	8	1		4
中度污染到强污染		1		1	

n=601

部样品数量的比例分别为 3.0%、12.31%、1.33%、6.16%、2.0%, 除 Cd 污染样品占全部样品的比例较高之外, 其余重金属所占比例都很低; 重金属 Cd、Pb 处于中度污染的样品占全部样品数量的比例分别为 1.33%、0.67%. 从评价结果来看, 仅 Cd 和 Hg 各有一最高值位于中度污染到强污染, 其他重金属再无中度污染到强污染以上样品.

从内梅罗指数污染评价结果 (图 2) 看出, 重金属 As 和 Hg 无污染风险, 重金属 Cd 和 Cr 低风险和中风险值数量少且不集中, 在差值图中体现不出来, 差值图整体显现出的是无污染风险. 根据地累积指数评价结果 (图 3), 可以明显看出: 5 种重金属污染分布各不相同, 除 Cd 元素呈面状分布外, 其余均呈星点状分布, 其中 As 元素污染程度最轻, Cd 元素污染分布面积最大. 整体来看, 5 种重金属元素皆处于无污染至轻污染程度, 仅 Cd 和 Pb 在个别地区存在聚集, 相对存在轻微污染.

5 结论

1) 5 种重金属中, Cd、Cr、Pb 个别值超过了国家标准的风险筛选值, 但未超过污染管制值, 存在一定的污染风险, 属于尚清洁; As、Hg 处于无污染水平, 但从地累积指数差值图上看到, Hg 存在一定程度的聚集.

2) 结合内梅罗指数法和地累积指数法, 综合分析 5 种重金属元素可知, As、Cr、Hg 分布范围小, 污染程度低; Cd、Pb 存在一定的污染.

3) 通过内梅罗指数法和地累积指数法对研究区重金属污染情况的对比分析, 可以看出 2 种方法的评价结果无论是在空间分布还是污染程度方面都存在着一定差异. 单因子污染指数只是简单地使用土壤环境标准值对土壤重金属含量进行量化, 较为简单; 地累积指

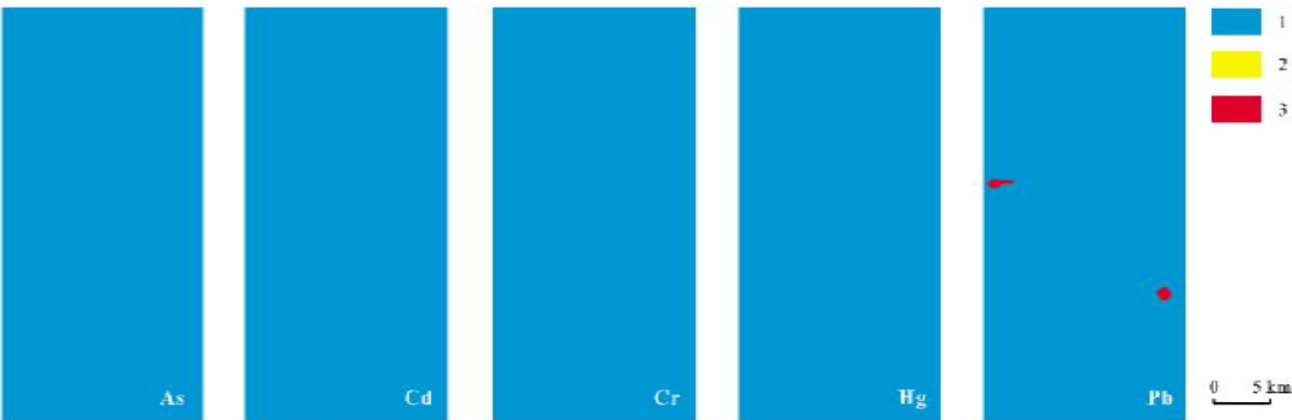


图2 内梅罗指数污染评价结果

Fig. 2 Evaluation results of pollution by Nemerow index

1—非污染(non-pollution); 2—轻污染(light pollution); 3—中污染(moderate pollution)

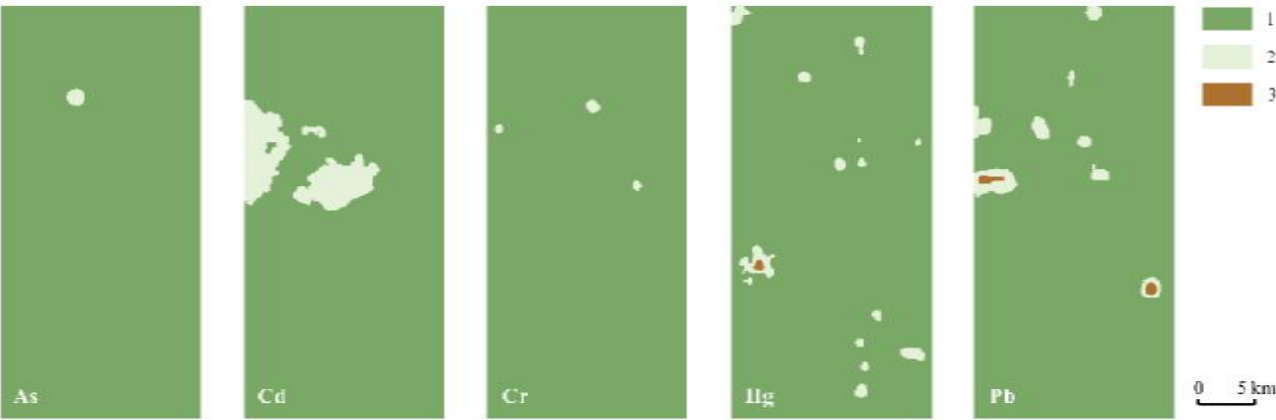


图3 地累积指数污染评价结果

Fig. 3 Evaluation results of pollution by geoaccumulation index

1—无污染(zero pollution); 2—无到中污染(zero to moderate pollution); 3—中污染(moderate pollution)

数法用修正系数平衡了土壤背景值的差异性，能够较为客观地评价重金属元素的污染水平，但该方法主要在于背景值的选取，如果背景值不同，对评价结果也会产生很大差异。两种方法对于重金属污染评价各有优劣，在评价过程中应相互验证，彼此结合，才能更加准确地反映研究区土壤污染状况。

参考文献(References):

[1]杨苏才,南忠仁,曾静静.土壤重金属污染现状与治理途径研究进展[J].安徽农业科学,2006,34(3):549-552.
Yang S C, Nan Z R, Zeng J J. Current situation of soil contaminated by heavy metals and research advances on the remediation techniques [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2006, 34(3): 549-552.
[2]Huang Y, Chen Q Q, Deng M H, et al. Heavy metal pollution and

health risk assessment of agricultural soils in a typical peri-urban area in southeast China[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 207: 159-168.
[3]白玉杰,沈根祥,陈小华,等.三种蔬菜对镍累积转运规律及食用安全研究[J].农业环境科学学报,2018,37(8):1619-1625.
Bai Y J, Shen G X, Chen X H, et al. Accumulation and transport of nickel in three vegetable crops and their edible safety[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(8): 1619-1625.
[4]李秋燕,魏明辉,戴慧敏,等.锦州市土壤重金属污染特征及生态风险评价[J].地质与资源,2021,30(4):465-472.
Li Q Y, Wei M H, Dai H M, et al. Characteristics of soil heavy metal pollution and ecological risk assessment of Jinzhou City[J]. Geology and Resources, 2021, 30(4): 465-472.
[5]黑龙江省第三次国土调查主要数据公报[J].黑龙江国土资源,2021,19(11):18.

- Major data bulletin of the third national land survey of Heilongjiang Province[J]. Heilongjiang Land and Resources, 2021, 19(11): 18. (in Chinese)
- [6]宋伟, 陈百明, 刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2): 293-298.
- Song W, Chen B M, Liu L. Soil heavy metal pollution of cultivated land in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(2): 293-298.
- [7]Goovaerts P. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties[J]. Biology and Fertility of Soils, 1998, 27(4): 315-334.
- [8]李冰茹, 王纪华, 马智宏, 等. GIS在土壤重金属污染评价中的应用[J]. 测绘科学, 2015, 40(2): 119-122, 164.
- Li B R, Wang J H, Ma Z H, et al. Application of Geographic Information System in analyzing the soil heavy metals[J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(2): 119-122, 164.
- [9]王大鹏, 于成广, 宋淑娥, 等. 基于 ArcGIS 的表层土壤元素空间插值与地球化学分级分析[J]. 土壤通报, 2015, 46(6): 1307-1313.
- Wang D P, Yu C G, Song S E, et al. The comparative analysis of surface soil elements and its geochemical grade use interpolation and measured data based on ArcGIS[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(6): 1307-1313.
- [10]陆敬刚. 基于 GIS 技术的土地生态环境污染信息监测研究[J]. 环境科学与管理, 2021, 46(5): 125-129.
- Lu J G. Study on land ecological environment pollution information monitoring based on GIS technology[J]. Environmental Science and Management, 2021, 46(5): 125-129.
- [11]杜臣昌. 基于 GIS 的土壤环境监测信息分析与评价研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- Du C C. The research on analysis and assessment for soil environmental monitoring information based on GIS[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
- [12]聂洪峰, 肖春蕾, 戴蒙, 等. 生态地质调查工程进展与主要成果[J]. 中国地质调查, 2021, 8(1): 1-12.
- Nie H F, Xiao C L, Dai M, et al. Progresses and main achievements of ecogeological survey project[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(1): 1-12.
- [13]李天杰, 郑应顺, 王云. 土壤地理学[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 1983: 42-55.
- Li T J, Zheng Y S, Wang Y. Soil geography[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 1983: 42-55. (in Chinese)
- [14]范拴喜, 甘卓亭, 李美娟, 等. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(17): 310-315.
- Fan S X, Gan Z T, Li M J, et al. Progress of assessment methods of heavy metal pollution in soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(17): 310-315.
- [15]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.
- [16]徐燕, 李淑芹, 郭书海, 等. 土壤重金属污染评价方法的比较[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(11): 4615-4617.
- Xu Y, Li S Q, Guo S H, et al. Comparison of assessment methods of heavy metal pollution in soil[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(11): 4615-4617.
- [17]张敏, 贺鹏飞, 陈伟强. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异分析[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(3): 53-58.
- Zhang M, He P F, Chen W Q. Spatio-temporal variability analysis of soil nutrients based on GIS and Geostatistics[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(3): 53-58.
- [18]谢双扬. 九龙坡区土壤重金属空间分布特征及其影响因素研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- Xie S Y. Spatial Distribution characteristics and impact factors of soil heavy metal in Jiulongpo District[D]. Chongqing: Southwest University, 2016.
- [19]Müller G. Schwermetalle in den sedimenten des rheins-veränderungen seit 1971[J]. Umschau in Wissenschaft und Technik, 1979, 79(24): 778-783.
- [20]王娟, 李玉成, 黄欣欣, 等. 铜陵矿区植物重金属富集行为及健康风险评估[J]. 生物学杂志, 2020, 37(3): 76-80.
- Wang J, Li Y C, Huang X X, et al. Enrichment of heavy metals and health risk assessment of plants in Tongling mining area[J]. Journal of Biology, 2020, 37(3): 76-80.
- [21]Sun Q F, Zheng J L, Sun Z A, et al. Study and risk assessment of heavy metals and risk element pollution in shallow soil in Shanxi Province, China[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2022, 31(4): 3819-3831.
- [22]Sun Q F, Sun Z A, Wang J H, et al. Heavy metal pollution and risk assessment of farmland soil in eco-tourism resort[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 15(6): 491.
- [23]Sun Q F, Sun Z A, Xing W G, et al. Ecological health risk assessment of heavy metals in farmland soil of Changchun New Area[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2021, 30(6): 5775-5787.
- [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(试行)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration of Market Supervision and Administration of the People's Republic of China. GB 15618—2018 Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.

- Liu Y X. Evaluation of land ecological security based on SPSS analysis[J]. *Agriculture and Technology*, 2022, 42(13): 131–136. (in Chinese)
- [27] 萨娜, 赵金羽, 寇旭阳, 等. “山水林田湖草沙生命共同体”耦合框架、模型与展望[J]. *生态学报*, 2023, 43(11): 4333–4343.
- Sa N, Zhao J Y, Kou X Y, et al. Coupling mountains-waters-forests-farmlands-lakes-grasslands-sandlands life community: Framework, models and prospect [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43 (11): 4333–4343.
- [28] 李依, 刘煜杰, 张强, 等. 基于山水林田湖草耦合视角的阿勒泰地区生态保护修复对策研究(英文)[J]. *资源与生态学报*, 2021, 12 (6): 791–800.
- Li Y, Liu Y J, Zhang Q, et al. Research on ecological protection and restoration measures in Altay region based on the coupling perspective of the mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands system [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2021, 12(6): 791–800.
- [29] 钟业喜, 邵海雁, 徐晨璐, 等. 基于文献计量分析的流域山水林田湖草生命共同体研究进展与展望[J]. *江西师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(1): 95–101.
- Zhong Y X, Shao H Y, Xu C L, et al. The research progress and prospect of life community of mountain, river, forest, farmland, lake and grassland in watershed based on bibliometric analysis[J]. *Journal of Jiangxi Normal University (Natural Science)*, 2020, 44(1): 95–101.
- [30] 刘昌明. 加强水在自然资源要素耦合作用中的观测研究探究山水林田湖草生命共同体统一管理[J]. *中国地质调查*, 2021, 8(2): 1–3, doi: 10.19388/j.zgdzdc.2021.02.01.
- Liu C M. Enhancing the observational study of the coupling effect of water on natural resource elements and exploring the unified management of the life community of mountains, waters, forests, farmland, lakes and grassland[J]. *Geological Survey of China*, 2021, 8(2): 1–3, doi: 10.19388/j.zgdzdc.2021.02.01.
- [31] 李楠, 郝喆, 田亚光, 等. 基于流域尺度的水环境分区识别与评价——以辽河流域(浑太水系)山水林田湖草沙一体化保护和修复工程为例[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(12): 5322–5331.
- Li N, Hao Z, Tian Y G, et al. Identification and evaluation of water environment zoning based on watershed scale: A case study of the integrated protection and restoration projects of mountains, rivers, forests, fields, lakes, grasses and sand in the Liaohe River Basin (Huntai river system) [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(12): 5322–5331.
- [32] 常江, 李灿坤, 冯姗姗, 等. 煤炭城市山水林田湖草生态保护修复分区及规划策略研究——以古交市为例[J]. *生态经济*, 2021, 37 (6): 222–229.
- Chang J, Li C K, Feng S S, et al. Research on zoning and planning strategy of ecological protection and restoration of mountain-water-forest-field-lake and grassland in coal city: Taking Gujiao City as an example[J]. *Ecological Economy*, 2021, 37(6): 222–229.
- [33] 李爽, 田野, 唐明方, 等. 景感生态学在流域生态系统保护与修复实践中的应用——以大凌河流域北票段为例[J]. *生态学报*, 2021, 41(14): 5849–5856.
- Li S, Tian Y, Tang M F, et al. Landsenses ecology theory application in ecological protection and restoration of watershed full-array ecosystems: A case study in Beipiao section, Daling River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14): 5849–5856.
- [34] 于少康, 汪浩, 何蕾. 县域国土空间生态修复分区研究——以江西省湖口县为例[J]. *自然资源情报*, 2023(12): 68–74.
- Yu S K, Wang H, He L. Ecological restoration zoning of territorial space at county level: A case of Hukou County, Jiangxi[J]. *Natural Resources Information*, 2023(12): 68–74.
- [35] 包玉斌, 黄涛, 王耀宗, 等. 基于生态重要性与敏感性的六盘山区生态保护修复分区[J]. *干旱区地理*, 2023, 46(11): 1778–1791.
- Bao Y B, Huang T, Wang Y Z, et al. Zoning for ecological conservation and restoration in Liupan Mountain area based on ecological importance and sensitivity evaluation [J]. *Arid Land Geography*, 2023, 46(11): 1778–1791.

(上接第 201 页/Continued from Page 201)

- [25] 高琳, 林晓燕, 林昌华, 等. 基于 GIS 的农田土壤重金属空间分布及风险评价[J]. *南方农业*, 2019, 13(29): 161–166.
- Gao L, Lin X Y, Lin C H, et al. Spatial distribution and risk assessment of heavy metals in farmland soil based on GIS[J]. *South China Agriculture*, 2019, 13(29): 161–166. (in Chinese)
- [26] 王粟, 史风梅, 裴占江, 等. 松嫩平原农田土壤污染现状分析与评价——以黑龙江省绥化地区为例[J]. *东北农业大学学报*, 2015, 46(5): 75–83.
- Wang S, Shi F M, Pei Z J, et al. Evaluation and analysis of farmland soils pollution status of Songnen Plain: For example Suihua area of Heilongjiang Province[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2015, 46(5): 75–83.