



重庆典型农业区富锗土壤分布特征及影响因素

余 飞^{1,2}, 张永文^{1,2}, 王 宇^{1,2}, 罗 凯^{1,2}, 陈达兵^{1,2}, 谢 建^{1,2}

1. 重庆土地质量地质调查重点实验室, 重庆 400038; 2. 重庆市地质矿产勘查开发局 川东南地质大队, 重庆 400038

摘 要: 通过采集重庆市典型农业区南川区 8496 件表层土壤样品, 测定土壤锗及其他元素的含量, 对锗含量特征及其影响因素进行分析探讨. 研究表明: 南川区土壤锗含量变化范围为 0.13×10^{-6} ~ 13.59×10^{-6} , 平均值为 1.54×10^{-6} , 高于重庆市“一小时经济圈”和重庆紫色土壤中锗的平均含量. 研究区富锗(1.4×10^{-6} 以上)土壤面积达 1 559.8 km², 主要分布在研究区南部. 南川区高锗土壤主要分布在二叠系上统吴家坪组、长兴组和三叠系下统大冶组、嘉陵江组. 土壤锗含量主要受成土母质控制, 与土壤有机质呈显著正相关关系, 与 8 项重金属元素存在伴生关系. 中部高值区受密集的煤矿和人为影响较大.

关键词: 土壤; 锗; 元素分布; 成土母质; 重庆市

DISTRIBUTION CHARACTERISTICS AND INFLUENCING FACTORS OF GERMANIUM-RICH SOIL IN TYPICAL AGRICULTURAL AREA OF CHONGQING MUNICIPALITY

YU Fei^{1,2}, ZHANG Yong-wen^{1,2}, WANG Yu^{1,2}, LUO Kai^{1,2}, CHEN Da-bing^{1,2}, XIE Jian^{1,2}

1. Chongqing Key Laboratory of Land Quality Geological Survey, Chongqing 400038, China;

2. Southeast Sichuan Geological Brigade, Chongqing Bureau of Geology and Mineral Exploration, Chongqing 400038, China

Abstract: By collecting 8 496 topsoil samples from Nanchuan district, a typical agricultural area in Chongqing Municipality, the study tests the contents of germanium (Ge) and other elements in soil and discusses their characteristics and influencing factors. The results show that the soil Ge content is 0.13×10^{-6} ~ 13.59×10^{-6} , averagely 1.54×10^{-6} , higher than the average Ge content in the “one-hour economic circle” and purple soil in Chongqing. The Ge-rich ($>1.4 \times 10^{-6}$) soil area is up to 1 559.8 km², mainly distributed in the south of the study area. The high-Ge soil in Nanchuan district is mainly distributed in the Upper Permian Wujiaping Formation and Changxing Formation, as well as the Lower Triassic Daye and Jialingjiang formations. The soil Ge content is mainly controlled by parent materials, which is positively correlated with soil organic matter and associated with 8 heavy metals. The high-value area in the middle is greatly affected by concentrated coal mines and human activities.

Key words: soil; germanium; element distribution; parent material; Chongqing Municipality

0 引言

锗(Ge)与硒元素相似, 是人体生命必需的有益元

素, 能够提供人体细胞的供养能力, 对人体具有广泛的防病治病等功效^[1-2]. 此外, 锗对土壤、作物及农产品

收稿日期: 2020-10-12; 修回日期: 2021-01-15. 编辑: 张哲.

基金项目: 重庆市国土房管科技计划项目“重庆市典型富锗区锗地球化学特征及富锗土地开发利用研究”(KJ-2017004); 重庆市规划和自然资源局项目“重庆市重金属地质高背景值区土壤生态健康风险评估”([2019]128-12).

作者简介: 余飞(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事土地质量调查和评价研究, 通信地址 重庆市沙坪坝区临泉路 5 号, E-mail//yfcags@126.com

也存在明显的影响. 林匡飞等^[3]研究指出低浓度锆($2 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-6}$)对土壤脲酶有刺激作用, 高浓度则产生抑制作用. 王晓洁等^[4]发现, GeO_2 (40~240 mg/L)浸种显著提高了大麦种子的发芽率. 较低浓度的锆溶液($< 500 \times 10^{-6}$)可促进黄豆芽的生长并缩短出芽时间, 但浓度继续增高则会转变成抑制作用^[5]. Puerner等^[6]通过锆酸盐培养试验表明, 锆在大麦、小麦、黄瓜和萝卜生长上的作用存在着响应差异. 由此可见土壤锆水平与农产品和人体健康密切相关, 而人体锆的摄入途径主要为食物链, 归根结底来源于土壤. 因此研究土壤中锆的含量、分布特征及其影响因素对于区域农产品及人体健康具有重要意义.

南川区属于长江流域水稻优势区, 西南马铃薯、生猪优势区, 云贵高原夏秋蔬菜生产优势区域, 长江中上游特色和出口绿茶重点区域, 重庆市加工辣椒、酿酒高粱等特色农产品区域, 是重庆市国家级现代农业示范区. 本研究通过对重庆市典型农业区南川区土壤的系统调查、采样和分析, 研究土壤锆的含量和分布特征, 探讨土壤锆的影响因素, 为当地政府科学利用富锆土地资源, 推动地方土地开发利用、特色农产品、生态旅游以及精准扶贫等工作提供科学支撑.

1 研究区概况

南川区位于重庆市南部, 地理坐标介于东经 $106^{\circ}54' - 107^{\circ}27'$, 北纬 $28^{\circ}46' - 29^{\circ}30'$ 之间(图 1), 是重庆市国家级现代农业示范区. 该区处于四川盆地东南边缘与云贵高原过渡地带, 地形以山为主, 地势呈东南向西北倾斜. 大体以湘渝高速公路为界, 以南属大娄山褶皱地带, 呈中山地貌, 以北呈丘陵低山地貌^[7]. 本区沉积岩广泛发育, 大面积出露古生界和中生界地层, 主要包括寒武系(C), 奥陶系(O), 志留系(S), 二叠系上统吴家坪组(P_{3w})、长兴组(P_{3c})和中统梁山组(P_{2l})、栖霞组(P_{2q})、茅口组(P_{2m}), 三叠系下统大冶组(T_{1d})、嘉陵江组(T_{1j}), 中统巴东组(T_{2b})和上统须家河组(T_{3xj}), 侏罗系下统珍珠冲组(J_{2z})、自流井组(J_{2z}), 中统新田沟组(J_{2x})、沙溪庙组(J_{2s})和上统遂宁组(J_{3sn}). 寒武系—三叠系岩性为灰岩、中粒长石石英砂岩, 下部夹炭质页岩; 侏罗系岩性为长石石英砂岩、泥岩、粉砂岩^[8]. 区内矿产资源丰富, 主要集中在中部地区, 有煤、铝土矿、硫铁矿等, 其中煤矿资源最为丰富, 而煤已经成为

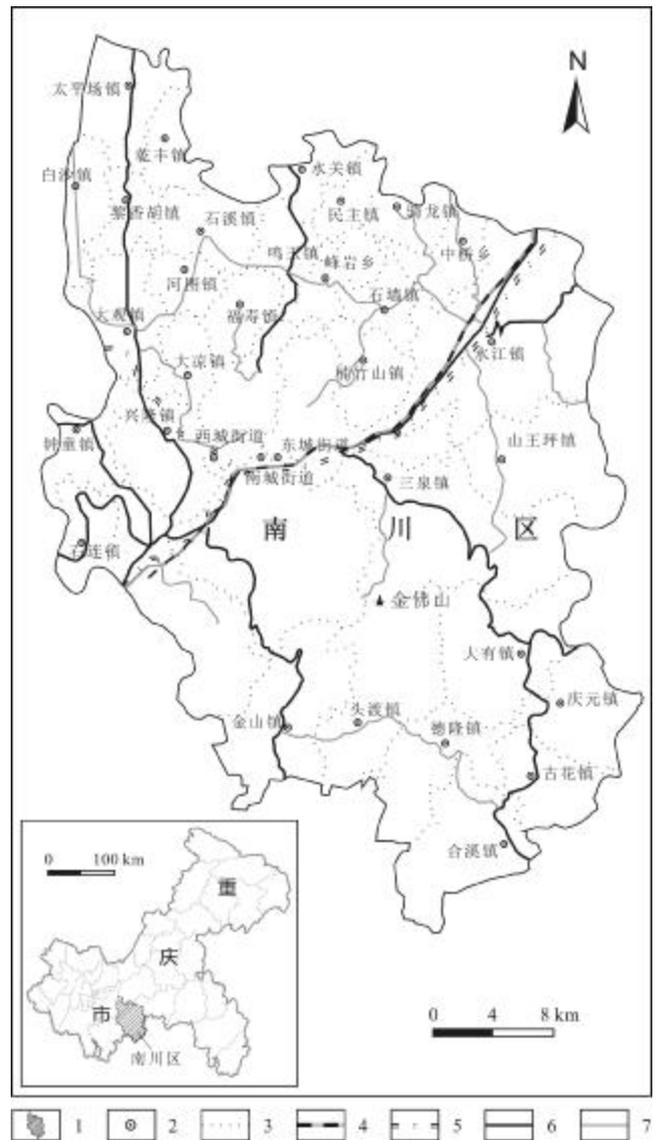


图 1 研究区交通位置图

Fig. 1 Location map of the study area

1—研究区(study area); 2—乡镇(township); 3—乡镇界线(boundary of rural towns); 4—铁路(railway); 5—高速公路(highway); 6—省道(provincial highway); 7—县道(county highway)

世界上工业用锆的主要来源^[9-10]. 南川区土地总面积为 $2\,602\text{ km}^2$, 林地和耕地是全区主要的用地类型, 分别占 54.43% 和 22.29% . 耕地主要分布在区北部, 林地主要分布在区南部.

2 样品采集与分析

本研究涉及的样品为 1:5 万土地质量地球化学调查采集的表层土壤样品, 严格按照中国地质调查局《土地质量地球化学评估技术要求(试行)》(DD2008—06)

中的规定,按照 4~6 个点/km² 的密度采集,在采集空间上均匀分布,兼顾土地利用类型.样品主要位于耕地,采样深度为 0~20 cm,每个样点由周围 50 m 范围内 4~5 个子样组合而成,采样时避开新近搬运的堆积土和明显的局部污染区,2015 年 12 月到 2016 年 6 月在南川区共获得表层土壤样品 8946 个.采样原始质量大于 1 kg,自然风干后,过 10 目尼龙筛,按 250 g/个送实验室进一步处理以便测试分析.

对表层土壤样品进行了 pH、有机碳(C_{org})以及 Ge、As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 等重金属的全量分析,所有样品分析均在自然资源部重庆矿产资源监督检查中心完成. pH 采用 pH/ISE 测试仪测定,C_{org} 采用硫酸亚铁铵容量法测定,SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、K₂O、Na₂O、CaO、MgO 采用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定,As 和 Hg 元素采用原子荧光法(AFS)测定,土壤中重金属 Zn、Pb、Cr 采用 X 射线荧光光谱法测定,Ge、Cd、Cu、Ni 元素采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定.测试过程严格按照《DZ/T0295—2016 土地质量地球化学评价规范》的有关规定执行.测试指标准确度和精密度的控制方法为:以密码样插入 4 个与土壤酸碱性相匹配的国家标准物质(GBW)进行分析,每个指标的每次测试分析结果计算测定值与标准值对数偏差($\Delta \lg C$),用来衡量样品分析的准确度.选择 4 个不同国家一级标准土壤,重复分析完毕后,计算重复样测量值对数标准偏差(λ),用来衡量样品分析的精密度.准确度和精密度采用国家一级标准物质进行控制,元素分析准确度和精密度合格率均高于 98%,元素报出率高于 99.98%.

富集因子(Enrichment Factor, EF)主要用于环境中污染物元素来源、污染程度的分析,通过与元素背景值的比较来反映人类活动对自然环境扰动的程度,由 Zoller 等^[11]首次提出.富集因子的基本含义是将样品中元素的浓度与背景元素的浓度进行对比,其计算公式为:

$$EF = (C_i / C_n)_{\text{sample}} / (C_i / C_n)_{\text{baseline}} \quad (1)$$

式中, C_i 为土壤中元素 i 的浓度; C_n 为相对标准因子的浓度; $(C_i / C_n)_{\text{sample}}$ 为研究区土壤锆元素的浓度与标准化元素浓度的比值; $(C_i / C_n)_{\text{baseline}}$ 为研究区土壤锆元素背景值与标准化元素背景值的比值.用作标准化的参比元素一般选择表生过程中地球化学性质稳定的元

素,如 Al、Ti、Sc、Zr 等,本研究选择 Al 作为标准化的参比元素,以重庆市土壤环境背景值作为土壤锆元素的背景值^[12].采用 Sutherland 等^[13]的标准,将影响程度划分为 6 个级别(表 1).

表 1 富集因子分级表

Table 1 Grading of enrichment factors

级别	富集因子(EF)	污染程度
1	≤1	无污染
2	1~2	轻微污染
3	2~5	中度污染
4	5~20	显著污染
5	20~40	高度污染
6	>40	极度污染

实验测得数据采用 Excel 2007 和 SPSS19.0 统计软件进行分析,图形的处理采用 ArcGIS10.2 软件,分析了研究区土壤锆的含量特征和空间分布特征.运用富集因子分析研究区人类活动对土壤锆扰动程度,同时运用皮尔逊(Pearson)法对土壤性质和土壤锆含量进行了相关性分析.

3 结果与讨论

3.1 土壤锆含量特征

重庆市南川区土壤锆的含量统计分析(表 2)表明,研究区土壤锆含量变化范围为 0.13×10^{-6} ~ 13.59×10^{-6} ,平均值为 1.54×10^{-6} ,低于全国土壤背景值(1.70×10^{-6}),高于重庆市“一小时经济圈”和紫色土壤中锆的平均含量,是世界土壤锆平均含量的 1.54 倍.

表 2 研究区与其他地区表层土壤锆含量对比

Table 2 Comparison of Ge contents in surface soil of the study area and other areas

地区	范围/ 10^{-6}	平均值/ 10^{-6}	资料来源
重庆市南川区	0.13-13.59	1.54	本文
重庆市“一小时经济圈”	0.62-3.57	1.47	文献[1]
重庆紫色土	0.28-2.0	0.48-0.94	文献[14]
贵州省沿河县	1.01-4.21	2.17	文献[15]
新疆省若羌县	0.72-1.60	1.16	文献[16]
中国	1.20-2.40	1.70	文献[17]
世界	0.60-1.30	1.00	文献[18]

变异程度可分为弱变异性($C_v < 10\%$)、中等变异性($10\% \leq C_v < 100\%$)和强变异性($C_v > 100\%$)^[19]. 研究区土壤锆含量的空间变异系数为 22.28%, 属于中等变异, 说明南川区土壤锆空间分布变异性弱.

3.2 土壤锆空间分布特征

锆元素属于稀有分散元素, 目前国内外还没有统一的锆元素分级标准, 已见报道的文献中青海^[20]、新疆^[16]等地区将土壤中锆含量大于 1.30×10^{-6} 的土壤划分为富锆土壤. 鲍丽然等^[21]在南川金佛山方竹笋营养安全品质和立地土壤评价中将土壤锆以 1.2×10^{-6} 、 1.3×10^{-6} 、 1.4×10^{-6} 、 1.5×10^{-6} 为界, 分为较缺乏、缺乏、中等、较丰富、丰富 5 个等级. 根据这一划分标准, 选择空间插值法中精度更高的反距离权重法^[22]绘制了南川区土壤锆的地球化学空间分布图(图 2). 基于空间统计分析, 研究区土壤锆丰富、较丰富、中等、较缺乏和缺乏区面积分别为 1 118.4、441.4、417.9、506.8 和 117.5 km², 其中丰富区和较丰富区($> 1.4 \times 10^{-6}$)占采样点调查面积的 60%(表 3). 空间上土壤锆含量大致呈现出南部高, 北部低的特点. 根据行政区划细分南川区不同乡镇的锆元素的分布, 山王坪镇、南平镇、南城街道、三泉镇、头渡镇、德隆乡、金山镇、大有镇、合溪镇、庆元镇、古花镇、水江镇、东城街道土壤锆含量较高.

表 3 研究区土壤锆含量分级

Table 3 Grading of soil Ge content in the study area

等级	丰富区	较丰富区	中等区	较缺乏区	缺乏区
标准范围/ 10^{-6}	>1.5	1.4~1.5	1.3~1.4	1.2~1.3	≤ 1.2
面积/km ²	1118.4	441.4	417.9	506.8	117.5
占比/%	43	17	16.1	19.5	4.5

3.3 富锆土壤成因分析

成土母质、土壤性质及人类活动等均是影响土壤锆含量的主要因素^[15-17]. 此外, 锆作为一种极其重要的半导体材料, 广泛应用于电子、超导、航空等领域, 这些行业都有可能产生含锆废物进入土壤; 燃煤和一些冶炼厂产生的排放物中锆含量也较高, 也会引起周围土壤中锆含量增加^[15].

3.3.1 成土母质

土壤是在母质的基础上发育起来的, 成土母质是指岩石经风化、搬运、堆积等过程于地表形成的疏松物质层, 是形成土壤的物质基础. 因此成土母质是土壤

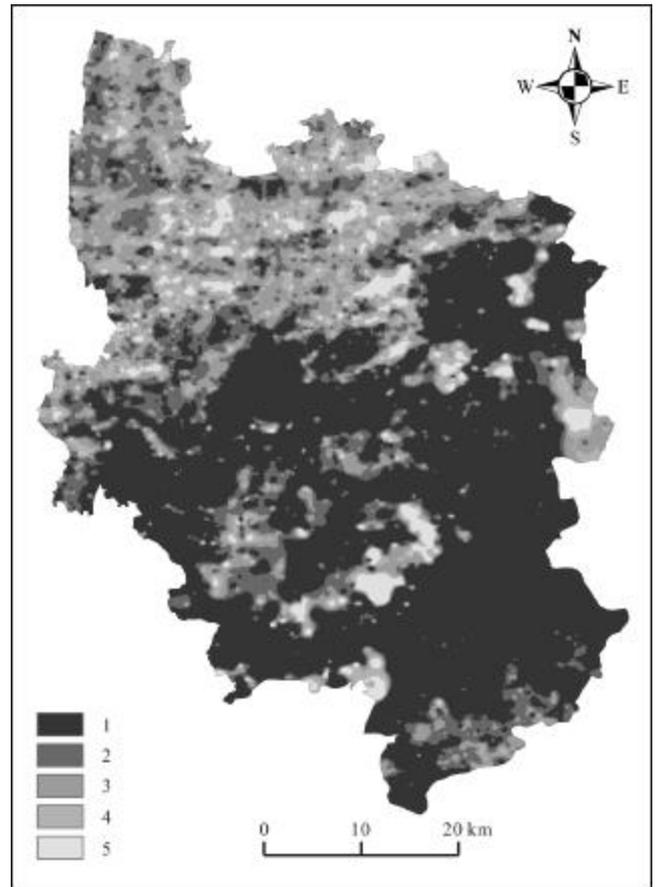


图 2 研究区土壤锆地球化学分级图

Fig. 2 Geochemical grading map of soil Ge content in the study area

1—丰富(rich); 2—较丰富(relatively rich); 3—中等(medium); 4—较缺乏(relatively deficient); 5—缺乏(deficient)

锆的主要来源^[23], 很大程度上决定了土壤锆的含量.

根据研究区不同地层、不同成土母质的分布情况对土壤中锆含量进行统计(表 4), 结果表明不同成土母质土壤锆含量平均值在 1.32×10^{-6} ~ 1.97×10^{-6} 之间, 其中二叠系上统吴家坪组和长兴组母质发育的表层土壤中锆含量明显高于其他地层母质发育的土壤, 其次是三叠系下统大冶组和嘉陵江组母质发育的土壤, 奥陶系、志留系母质发育的土壤中锆元素含量也相对较高, 侏罗系母质发育的土壤中锆元素的含量相对较少. 土壤锆含量受不同地层、不同成土母质的影响较大, 研究区寒武系—三叠系地层碳酸盐岩发育, 碳酸岩在风化过程中所产生的次生矿物及其土壤溶液, 造成了有利于锆残留富集的表生地球化学环境, 即在岩石风化成土过程中, 锆的淋滤流失少, 残留富集多, 导致土壤锆含量富集.

3.3.2 土壤性质

在土壤的基本理化性质中, 土壤 pH 和有机质含量是影响土壤中各种元素迁移、转化和生物有效性的两个重要因素^[24], 因此探讨土壤 pH 和有机质对土壤中锆含量的影响十分必要. 通过对研究区表层土壤锆含量与土壤属性的相关性分析(表 5), 发现土壤锆与土壤 pH、有机碳、Al、Fe、Mn、K 含量呈正相关关系, 与 Si、Mg、Ca、Na 等呈负相关关系. 同时, 也发现与土壤中主要重金属元素均存在显著的正相关关系(表 6).

土壤 pH 是许多化学性质的综合反映, 在一定程度上决定了土壤中元素的赋存形态和有效性^[25]. 在土壤中锆的不同形态分布及影响因素中, pH 值较高的土壤中水溶态锆含量更高^[26]. 南川区土壤 pH 在 3.75–8.73 之间, 平均值为 6.03, 整体表现为微酸性, 中性、碱性土壤在中部水江镇–南城街道–南平镇一带和头渡镇分布较多. 土壤锆与土壤 pH 呈正相关关系, 研究区中部地区土壤锆呈明显富集.

土壤有机质是表征土壤肥力和质量的重要因子, 对土壤中的微量元素有一定的吸附与固定作用^[27]. 谢永泉^[28]研究表明, 广州和珠江三角洲有机质含量较高的沉积物中, 往往锆含量较高(通常为 $30 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$). 魏显有等^[26]在研究土壤中锆的形态分布及影响

因素中指出有机质能富集锆. 卢家烂等^[29]研究表明, 地质体(煤/泥岩)中锆含量主要与有机质类型有关. 南川区有机质含量在 $0.02 \times 10^{-6} \sim 17.24 \times 10^{-6}$ (平均值为 1.55×10^{-6}), 普遍较低, 总体表现为南高北低, 与土壤锆含量呈显著正相关, 说明有机质含量越高越有利于土壤锆的富集.

土壤 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 及 MnO 含量的增加有利于土壤锆的富集, 土壤在成土过程中, 会发生淋滤作用, 尤其是在雨水充沛且气温较高的地区, 土壤中的盐基离子(K、Na、Ca 及 Mg)会不断淋失, 而铁、锰、铝的氧化物和氢氧化物则不断富集, 这些物质能提供化学吸附的表面位点, 增加土壤对锆的吸附, 不容易淋失, 导致在表层出现富集现象. 此外, 土壤锆与主要重金属元素均存在显著的正相关关系, 说明伴生关系密切, 在发展富锆土地资源的同时需注意重金属元素的影响.

3.3.3 其他因素

根据富集因子(EF)计算结果, 研究区土壤锆无污染($EF < 1$)、轻微污染($1 < EF < 2$)、中度污染($2 < EF < 5$)和显著污染($EF > 5$)的样点个数分别为 4864、4036、44 和 2 个, 说明研究区大面积未受人类影响或者人类活动影响较弱, 极少部分区域受到人类活动的中度和显著影响(图 3).

表 4 研究区不同地层出露区土壤锆含量

Table 4 Soil Ge contents in different formations of the study area

地层	J ₃ p	J ₃ sn	J ₂ s	J ₁ z-J ₂ x	T ₃ kj	T ₁ b	T ₁ d-j	P ₃ w-c	P ₁ l-m	S	O	Є
平均值/ 10^{-6}	1.32	1.38	1.35	1.45	1.50	1.45	1.84	1.97	1.55	1.68	1.62	1.53
样本数/个	653	602	1609	547	400	301	773	217	281	1509	1604	450

表 5 研究区土壤锆含量与土壤性质的相关性

Table 5 Correlation coefficients of Ge contents and soil properties in the study area

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	C _{org}	pH
Ge	-0.415**	0.407**	0.575**	-0.08**	-0.064**	-0.204**	0.211**	0.206**	0.255**	0.137**

注: * 和 ** 分别表示相关性达到显著水平($P < 0.05$)和极显著水平($P < 0.01$).

表 6 研究区土壤锆含量与土壤主要重金属元素的相关性

Table 6 Correlation coefficients of soil Ge contents and heavy metal contents in the study area

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Ge	0.197**	0.072**	0.413**	0.523**	0.044**	0.513**	0.175**	0.264**

注: * 和 ** 分别表示相关性达到显著水平($P < 0.05$)和极显著水平($P < 0.01$).

前人研究表明,褐煤含 0.005%~0.1%的锆,某些无烟煤的灰中锆含量高达 4%~7.5%,所以煤矿已经日益成为锆资源的重要来源之一^[9-10].从空间分布来看,EF 的高值区主要集中在中部南平镇、文凤镇、南城、水江镇.南川区中部属于黔中-渝南成矿带,主要有煤、铝土矿、硫铁矿,其中煤炭资源最为丰富.EF 的高值区与中部地区煤矿资源丰富有较大的关系.此外,南川区中部城镇化水平较高,存在较多的工业企业.统计南川区不同用地类型土壤锆的含量(表 7),其中城镇用地类型土壤锆含量最高,与城镇企业“三废”排放和城

市垃圾堆存等人为活动有关.

4 结论

1) 研究区土壤锆含量为 $0.13 \times 10^{-6} \sim 13.59 \times 10^{-6}$,平均值为 1.54×10^{-6} ,低于全国土壤背景值,是世界土壤锆平均含量的 1.54 倍.与重庆市其他地方相比,南川区土壤锆含量总体水平较高.

2) 研究区土壤锆含量丰富和较丰富区分别占 43%和 17%,富锆土壤($\geq 1.4 \times 10^{-6}$)面积达 1 559.8 km².富锆土壤主要分布在区南部,零星分布在区北部.其

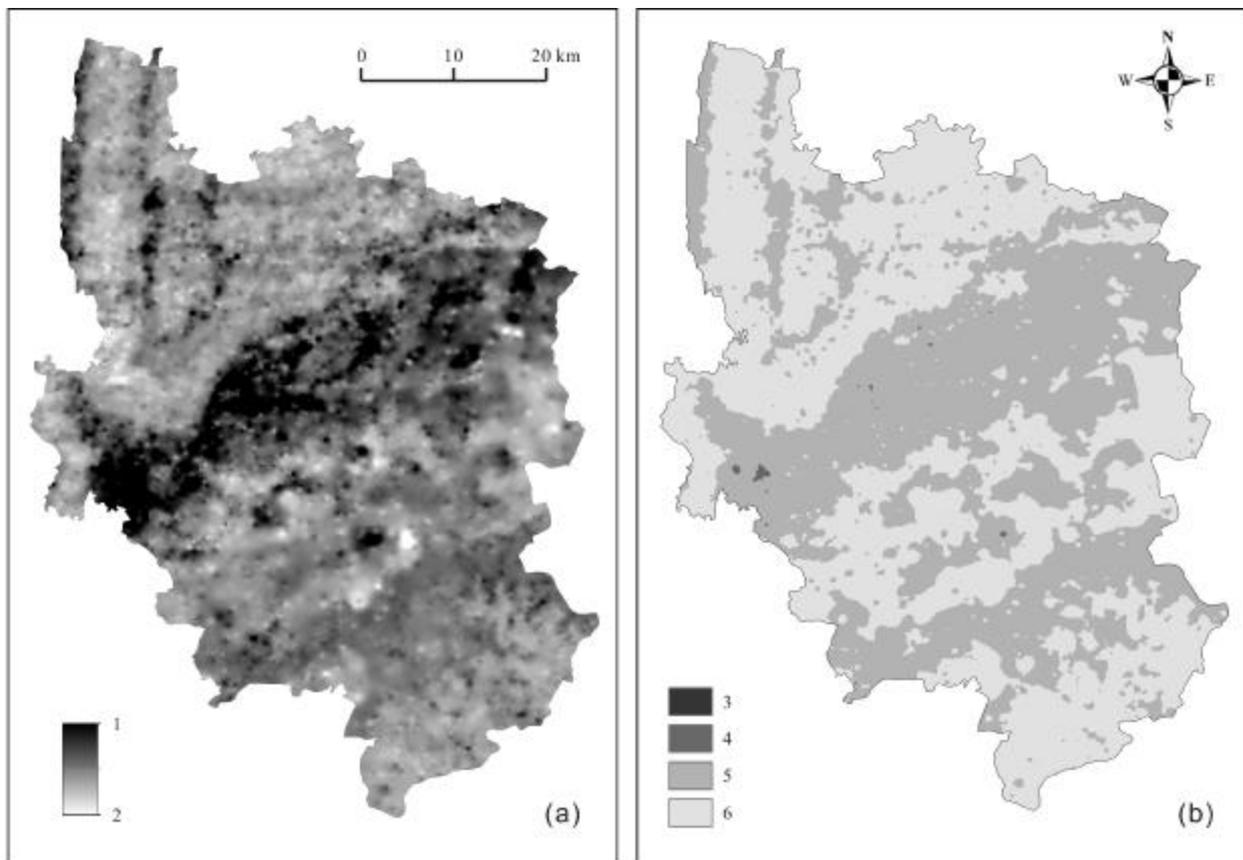


图 3 研究区土壤锆富集因子分布和分级评价图

Fig. 3 Distribution and grading evaluation of soil Ge EFs in the study area

a—富集因子分布(distribution of EF); b—富集因子分级(grading of EF); 1—高值(high value); 2—低值(low value); 3—显著污染(significant pollution); 4—中度污染(moderate pollution); 5—轻微污染(light pollution); 6—无污染(non-pollution)

表 7 研究区不同土地利用方式下土壤锆含量

Table 7 Soil Ge contents by land use types in the study area

土地利用类型	水田	旱地	林地	园地	草地	村庄	城镇	道路	其他用地
样品数/个	2831	2193	2849	250	192	456	56	10	109
平均含量/ 10^{-6}	1.50	1.60	1.52	1.58	1.66	1.60	2.15	1.74	1.49

中山王坪镇、南平镇、南城街道、三泉镇、头渡镇、德隆乡、金山镇、大有镇、合溪镇、庆元镇、古花镇、水江镇、东城街道土壤锗含量较高。

3) 研究区土壤锗含量主要受成土母质的影响,同时与土壤 pH 值、有机碳、Al、Fe、Mn、K 含量呈显著的正相关关系。从富集因子来看,研究区大面积未受人为活动影响,中部地区受人为活动影响明显。

参考文献(References):

- [1]谭林,贾中民.重庆市“一小时经济圈”土壤锗元素地球化学特征[J].中国金属通报,2018(3):81,83.
Tan L, Jia Z M. Geochemical characteristics of germanium in soils of the “one-hour economic circle” in Chongqing [J]. China Metal Bulletin, 2018(3): 81, 83. (in? Chinese)
- [2]Seaborn C D, Nielsen F H. Effects of germanium and silicon on bone mineralization[J]. Biological Trace Element Research, 1994, 42(2): 151-164.
- [3]林匡飞,徐小清,金霞,等.锗对水稻的生态毒理效应及临界指标[J].生态学报,2005,25(1):108-114.
Lin K F, Xu X Q, Jin X, et al. Eco-toxicological effects of germanium stress on rice (*Oryzasativa* L.) and their critical value[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(1): 108-114.
- [4]王晓洁,阮新,孙科深,等.大麦苗富锗的研究[J].食品科学,2007,28(10):171-175.
Wang X J, Ruan X, Sun K S, et al. Production of enriched germanium barley seedling[J]. Food Science, 2007, 28(10): 171-175.
- [5]陈启航.不同品种小麦中铜、锗、铬的含量及其与生长土壤的相关性研究[D].郑州:河南农业大学,2008.
Chen Q H. Determination of copper, germanium and chromium contents in wheats and correlation research with their growth soil[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2008.
- [6]Puermer N J, Siegel S M, Siegel B Z. The experimental phytotoxicology of germanium in relation to silicon[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1990, 49(1/2): 187-195.
- [7]余飞,贾中民,李武斌,等.锗在土壤-水稻系统的迁移累积及其影响因素[J].三峡生态环境监测,2018,3(1):66-74.
Yu F, Jia Z M, Li W B, et al. Translocation and accumulation of germanium in paddy soil-rice plant system[J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2018, 3(1): 66-74.
- [8]张风雷.重庆市水江地区水稻重金属含量特征与健康风险评估[J].农业工程,2018,8(11):71-73.
Zhang F L. Heavy metal content characteristics and health risk assessment of rice in Shuijiang area of Chongqing City[J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(11): 71-73.
- [9]Seredin V V, Dai S F, Sun Y Z, et al. Coal deposits as promising sources of rare metals for alternative power and energy-efficient technologies[J]. Applied Geochemistry, 2013, 31: 1-11.
- [10]黄少青,张建强,张恒利.东北赋煤区煤中锗元素分布特征及富集控制因素[J].煤田地质与勘探,2018,46(3):6-10.
Huang S Q, Zhang J Q, Zhang H L. Distribution and controlling factors of enrichment of germanium in coal-bearing region of Northeast China[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(3): 6-10.
- [11]Zoller W H, Gladney E S, Duce R A. Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the South Pole[J]. Science, 1974, 183(4121): 199-201.
- [12]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.
- [13]Sutherland R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii [J]. Environmental Geology, 2000, 39(6): 611-627.
- [14]肖广全,木志坚,魏世强,等.重庆地区紫色土锗的背景含量及分布特征[J].水土保持学报,2009,23(5):171-174,214.
Xiao G Q, Mu Z J, Wei S Q, et al. Background values and distribution characteristics of germanium of purple soils in Chongqing areas [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(5): 171-174, 214.
- [15]刘艳娟.贵州省沿河县土壤及特色农产品硒锗调查[D].贵州:贵州大学,2009.
Liu Y J. Investigation of selenium, zinc and germanium in soils and characteristics agricultural products in Yanhe County, Guizhou [D]. Guizhou: Guizhou University, 2009 (in? Chinese).
- [16]曾妍妍,周金龙,郑勇,等.新疆若羌县绿洲区富锗土壤地球化学特征及成因分析[J].土壤通报,2017,48(5):1082-1086.
Zeng Y Y, Zhou J L, Zheng Y, et al. Geochemical features of germanium-rich soils and its causes in oasis region of Ruoqiang County, Xinjiang [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(5): 1082-1086.
- [17]国家环境保护局,中国环境监测总站.中国土壤元素背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1990.
State Environmental Protection Administration, China National Environmental Monitoring Centre. Background values of soil elements in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990. (in Chinese)
- [18]木志坚.重庆地区紫色土锗的背景含量及分布特征[D].重庆:西南大学,2001.
Mu Z J. Background values and distribution characteristics of germanium of purple soils in Chongqing area [D]. Chongqing: Southwest University, 2001.
- [19]王绍强,朱松周,周成虎.中国土壤土层厚度的空间变异性特征[J].地理研究,2001,20(2):161-169.

- Wang S Q, Zhu S L, Zhou C H. Characteristics of spatial variability of soil thickness in China[J]. *Geographical Research*, 2001, 20(2): 161-169.
- [20] 林南琴. 青海省首次发现大面积富锗土壤[J]. *西部资源*, 2014(5): 60.
- Lin N Q. A large area of germanium rich soil was found for the first time in Qinghai Province[J]. *Western Resources*, 2014(5): 60-60. (in Chinese)
- [21] 鲍丽然, 贾中民, 李瑜, 等. 南川金佛山方竹笋营养安全品质和立地土壤评价[J]. *物探与化探*, 2018, 42(5): 1089-1094.
- Bao L R, Jia Z M, Li Y, et al. Evaluation of nutritional and safe quality of *Chimonobambusa utilis* bamboo shoots and the surrounding soil in Nanchuan, Chongqing [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(5): 1089-1094.
- [22] 马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 等. 典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价[J]. *环境科学*, 2018, 39(10): 4685-4693.
- Ma H H, Yu T, Yang Z F, et al. Spatial interpolation methods and pollution assessment of heavy metals of soil in typical areas [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(10): 4685-4693.
- [23] 谢佰承, 张春霞, 薛绪掌. 土壤中微量元素的环境化学特性[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(S1): 132-135.
- Xie B C, Zhang C X, Xie X Z. Characteristics of environmental chemistry for trace elements in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(S1): 132-135.
- [24] 王擎运, 张佳宝, 赵炳梓, 等. 不同施肥方式对典型壤质潮土中微量元素积累及其有效性的影响[J]. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1104-1113.
- Wang Q Y, Zhang J B, Zhao B Z, et al. Influence of different long-term fertilization practices on accumulation and availability of micronutrients in typical loamy fluvo-aquicsoil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(6): 1104-1113.
- [25] 罗友进, 韩国辉, 孙协平, 等. 三峡库区(重庆段)土壤硒分布特征及影响因素[J]. *土壤*, 2018, 50(1): 131-138.
- Luo Y J, Han G H, Sun X P, et al. Distribution of soil selenium in Three Gorges Reservoir Region (Chongqing Section) and its influential factors[J]. *Soils*, 2018, 50(1): 131-138.
- [26] 魏显有, 刘云惠, 王秀敏, 等. 土壤中锗的形态提取和形态分布研究[J]. *环境化学*, 2000, 19(3): 250-255.
- Wei X Y, Liu Y H, Wang X M, et al. Study on form extraction of germanium in soil and its form distribution [J]. *Environmental Chemistry*, 2000, 19(3): 250-255.
- [27] 袁园. 理化性质对土壤-农作物系统重金属生物有效性影响研究进展[J]. *地球科学前沿*, 2014, 4(4): 214-223.
- Yuan Y. Research progress in the effect of physical and chemical properties on heavy metal bioavailability in soil-crop system [J]. *Advances in Geosciences*, 2014, 4(4): 214-223.
- [28] 谢永泉. 锗的环境生态研究[J]. *广东微量元素科学*, 1998, 5(2): 23-25.
- Xie Y Q. A study on environmental ecology of germanium [J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 1998, 5(2): 23-25.
- [29] 卢家烂, 庄汉平, 傅家谟, 等. 临沧超大型锗矿床的沉积环境、成岩过程和热液作用与锗的富集[J]. *地球化学*, 2000, 29(1): 36-42.
- Lu J L, Zhuang H P, Fu J M, et al. Sedimentation, diagenesis, hydrothermal process and mineralization of germanium in the Lincang super large germanium deposit in Yunnan Province, China [J]. *Geochimica*, 2000, 29(1): 36-42.

(上接第 608 页/Continued from Page 608)

- [17] 邵爱英, 谢东华, 牛蔚欣. 顺平县贫困人口长效脱贫对策研究[J]. *乡村科技*, 2020(13): 16-17.
- Shao A Y, Xie D H, Niu W X. Study on long-term poverty alleviation countermeasures of poor population in Shunping County [J]. *Rural Science and Technology*, 2020(13): 16-17. (in Chinese)
- [18] 王辉, 李江海, 吴桐雯. 太行山地质遗迹特征与成因分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(3): 546-554.
- Wang H, Li J H, Wu T W. Characteristics and genesis of geoheritage resources of Taihang Mountain [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2018, 54(3): 546-554.
- [19] 潘雅辉, 范平, 冯杭建. 磐安大盘山地质公园地质遗迹景观资源及旅游开发[J]. *科技通报*, 2016, 32(4): 42-47.
- Pan Y H, Fan P, Feng H J. Geological relic landscape resources in Dapanshan Geopark and its tourism development [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2016, 32(4): 42-47.
- [20] 杨涛, 于吉涛, 王让, 等. 新构造运动对河南关山国家地质公园地质遗迹景观的影响[J]. *湖北民族学院学报(自然科学版)*, 2015, 33(3): 342-346, 351.
- Yang T, Yu J T, Wang R, et al. Effect of neotectonic movement on the geological heritage landscape of Guanshan National Geopark [J]. *Journal of Hubei University for Nationalities (Natural Sciences Edition)*, 2015, 33(3): 342-346, 351.
- [21] 聂泽同, 梁定益, 赵崇贺, 等. 一种新的地质地貌景观类型——河北省白石山大理岩构造峰林特点及成因[J]. *地质通报*, 2002(6): 357-362.
- Nie Z T, Liang D Y, Zhao C H, et al. A new type of geological-geomorphological landscape: The Baishi Mountain marble structural "peak forest" (hoodoos) and its origin [J]. *Geological Bulletin of China*, 2002(6): 357-362.