

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.03.026

孙奥, 段碧辉, 王芳, 等. 鄂西咸丰地区土壤元素地球化学分布及其影响因素. 土壤, 2022, 54(3): 637–645.

鄂西咸丰地区土壤元素地球化学分布及其影响因素^①

孙奥, 段碧辉*, 王芳, 项剑桥, 夏伟, 王天一

(湖北省地质科学研究院, 武汉 430034)

摘要: 本研究以鄂西咸丰县土壤为研究对象, 统计了区内表层土壤中 30 种元素指标的地球化学背景值, 再结合因子分析方法, 探讨了地球化学背景值的成因机制, 分析了土壤元素空间分布及其影响因素。结果表明, 咸丰地区土壤 B、Cd、Cr、F、Hg、Se 元素的含量明显高于全国和湖北省背景值, I、Mo、Sr、CaO、Na₂O 等元素较全国贫乏。因子分析结果表明成土母质、工矿活动、腐殖质过程、风化作用、地形因素以及人类的生产活动共同影响着研究区内表层土壤的背景值特征, 其中成土母质决定了土壤中化学元素的分布特征, 但是工矿活动、地形特征和人类活动等过程重塑了区域元素分布特征。

关键词: 咸丰县; 富硒土壤; 地球化学背景值; 土壤元素分布特征; 因子分析

中图分类号: S159 文献标志码: A

Geochemical Distributions and Influencing Factors of Soil Elements in Xianfeng County, Western Hubei Province, China

SUN Ao, DUAN Bihui*, WANG Fang, XIANG Jianqiao, XIA Wei, WANG Tianyi
(Hubei Institute of Geology, Wuhan 430034, China)

Abstract: Taking the soil of Xianfeng County in Western Hubei as the research object, this study counted the geochemical background values of 30 element indexes in the surface soil in the area. Moreover, factor analysis was conducted to analyze the genetic mechanism of geochemical background values and to evaluate the spatial distribution and influencing factors of soil elements in Xianfeng County. The results showed that the contents of B, Cd, Cr, F, Hg and Se were significantly higher than the national and Hubei background values, the contents of I, Mo, Sr, CaO and Na₂O were lower than the national levels. Factor analysis showed that soil parent materials, industrial and mining activities, humus process, weathering, terrain factors and human activities jointly affected the background values of surface soils in the study area. Soil parent material determined the distribution characteristics of chemical elements in soils, and the terrain factors and human activities like mining reshaped the regional distribution patterns of elements.

Key words: Xianfeng County; Selenium-rich soil; Geochemical background; Elemental distribution pattern in soil; Factor analysis

土壤是地表生物赖以生存的物质基础, 是岩石圈和生物圈等圈层相互作用关键带的核心部分, 具有强的异质性和时空差异性, 在自然环境的发展和变化中起着至关重要的作用。土壤地球化学背景值是指一定区域内自然状态下, 未受或少受人类活动(特别是人为污染)影响的土壤环境中化学元素的自然含量, 是反映一个地区土壤地球化学元素特征的基本指标^[1]。20 世纪以来, 随着环境问题的日渐凸显, 研究人员

在我国各个地区陆续开展了土壤背景值的研究。研究和掌握土壤环境背景状况, 对地质找矿、农业研究、生态环境保护、预警^[2-6]等工作都具有十分重要的科学意义。

湖北省恩施州是著名的“世界硒都”, 具有丰富的硒资源, 但对于其土壤背景并未有完整详细的报道。近年来, 随着对于硒产业发展的需求, 恩施州开展了全域土地质量地球化学评价暨土壤硒资源普查

①基金项目: 咸丰县土地质量地球化学评价暨土壤硒资源普查项目(ESXPC20190106)、湖北省咸丰县土地质量地球化学评价(一期)项目(HBTDD20180106)和湖北省长江经济带耕地质量地球化学评价项目(HBECC-ZB-ZC21055)资助。

* 通讯作者(351927858@qq.com)

作者简介: 孙奥(1992—), 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事农业地质调查研究工作。E-mail: 569146561@qq.com

工作。本文利用 2018—2020 年开展的“咸丰县土地质量地球化学评价暨硒资源普查”所获得的数据资料,统计得出了研究区内 30 种元素指标的背景值,并结合因子分析方法分析其成因,为研究区土壤环境质量评价、制定土壤环境标准、发展特色农产业、环境监测与保护等工作提供基础的科学依据与支持。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于湖北省恩施土家苗族自治州的西南部,国土总面积 2 550 km²,其中耕地面积 4.4 万 hm²。研究区地处武陵山东部,鄂西南边陲,地形以山区为主,平均海拔 800 m 左右,地貌以碳酸盐岩组成的高原型山地为主体,兼有盐酸盐岩组成的低山峡谷与溶

蚀盆地等(图 1)。该区处于亚热带季风性山地湿润气候,年平均气温 16.2 °C,降水丰沛,年平均降水量为 1 600 mm。

研究区处于中扬子地区西部,位于宜都—鹤峰复背斜带^[7-8]。区内背斜核部未见出露,地层发育较全,从寒武系至白垩系均有分布,其中以唐崖区—清坪区一带为界,其北面 and 南面的长断层之间主要出露三叠系,中心位置出露少量白垩系;北面断层以北主要以二叠系、奥陶系和志留系为主,仅在黄金洞区北端出露有少量三叠系;南面断层以南则主要以寒武系、奥陶系和志留系为主(图 1A)。区内矿产资源丰富,有世界罕见的高品质硒矿床约 1.67 万 hm²,此外还有煤炭、汞矿、重晶石、大理石、方解石、铜矿、高岭土等 40 多种矿产。

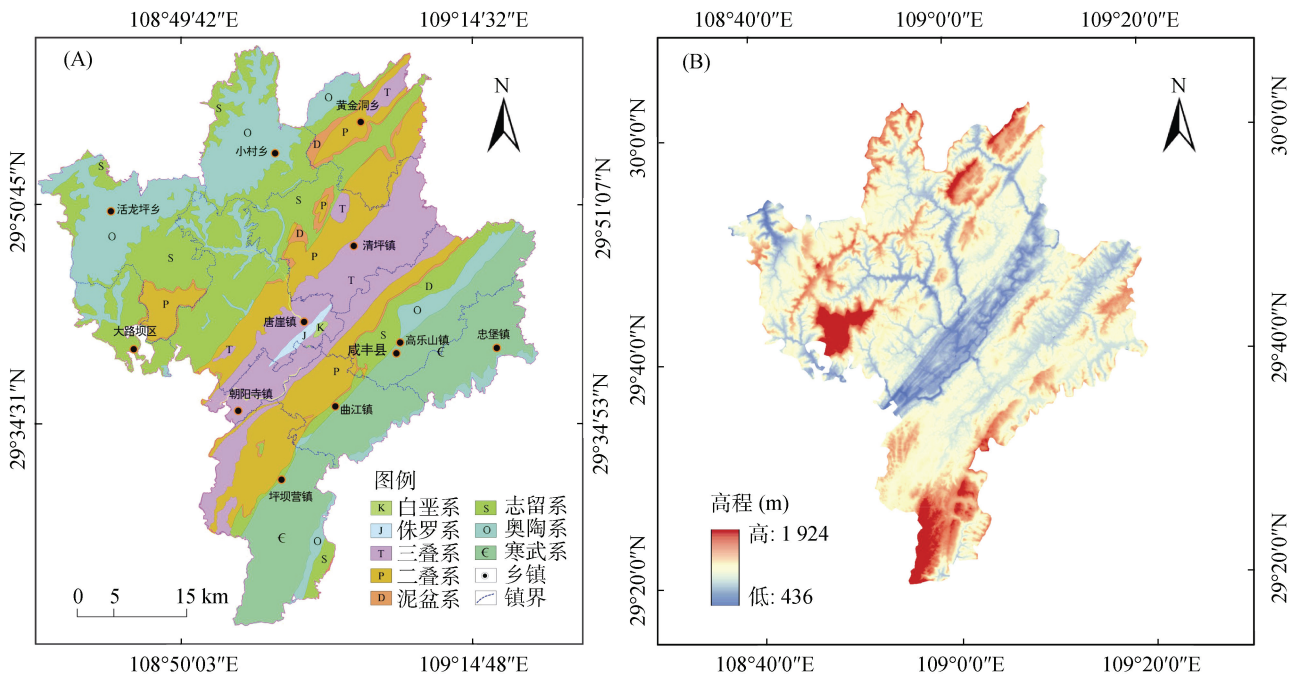


图 1 研究区地质图(A)和地形示意图(B)

Fig. 1 Geological map (A) and topographic map (B) of study area

1.2 样品采集与处理

本研究依托“咸丰县土地质量地球化学调查评价暨土壤硒资源普查”项目,依照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)^[9]、《多目标区域地球化学调查规范(1:250000)》(DZ/T 0258—2014)^[10]进行样品布设,采样密度平均为 4 件/km²,采样深度为 0~20 cm,以五点取样法进行采集,原始样品重量不低于 1 kg。

土壤样品经自然风干后过 10 目尼龙筛,剔除土壤以外的杂物,采用四分法留取 500 g,其中 300 g 装入塑料瓶作为副样留存,200 g 装入纸样袋送检,

共获取了 8 450 件表层土壤分析样。

1.3 样品测试分析

样品分析由湖北省地质实验测试中心(国土资源部武汉矿产资源监督检测中心)完成。依据分析质量要求,采用 X 射线荧光光谱法(XRF)、电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-OES)和电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)为主体,辅以原子荧光光谱法(AFS)、离子电极法(ISE)、容量法(VOL)等方法测定了 30 项指标(表 1)。采用了密码样、监控样、标准样等多种监控手段,保证样品分析质量的合理性、可靠性。测试项目及测试精度均满足规范要求。

表1 样品分析方法及检出限
Table 1 Analytical methods and detection limits

序号	元素	分析方法	检出限	序号	元素	分析方法	检出限
1	As	AFS	0.2	16	P	ICP-OES	5
2	B	ICP-MS	0.81	17	Pb	ICP-MS	0.2
3	Cd	ICP-MS	0.02	18	S	XRF	15
4	Cl	XRF	5	19	Se	AFS	0.01
5	Co	ICP-MS	0.1	20	Sr	ICP-OES	2
6	Cr	ICP-OES	1.5	21	Zn	ICP-MS	1
7	Cu	ICP-MS	0.1	22	Al ₂ O ₃	XRF	0.05
8	F	ISE	30	23	CaO	ICP-OES	0.02
9	Ge	ICP-MS	0.05	24	TFe ₂ O ₃	XRF	0.02
10	Hg	AFS	0.0005	25	K ₂ O	XRF	0.03
11	I	ICP-MS	0.2	26	MgO	ICP-OES	0.02
12	Mn	ICP-OES	5	27	Na ₂ O	ICP-OES	0.02
13	Mo	ICP-MS	0.15	28	SiO ₂	XRF	0.05
14	N	VOL	15	29	Corg.	VOL	0.02
15	Ni	ICP-OES	0.2	30	pH	ISE	0.1

注: Corg.及氧化物的单位为 %, 其余元素单位为 mg/kg, 下表同。

1.4 土壤元素背景值统计

按照多目标区域地球化学调查规范要求,先对土壤数据的频率分布形态进行正态检验,若数据服从正态分布,用算数平均值代表背景值,若服从对数正态分布,用几何平均值代表背景值。当二者都不服从时,按照算数平均值加减3倍标准差进行剔除^[1, 11-12],经反复剔除后若服从正态分布或对数分布,用算数平均值或几何平均值代表背景值。经反复剔除后若仍不服从正态分布或者对数分布,当呈现偏态分布时,以众值或算数平均值代表土壤背景值,当呈现双峰或多峰分布时,以中位值或算数平均值代表土壤背景值。

对于数据正态分析的检验,依据《数据的统计处理和解释正态性检验》(GB/T 4882—2001)^[13],在置信度 $\alpha=0.05$ 的水平下,采用偏度-峰度法来进行检验;检验对数正态分布时,需将原始数据转换为对数后再用偏度-峰度法进行计算;在进行 pH 参数统计时,应先将土壤 pH 换算成[H⁺]平均浓度进行统计计算,然后再换算成 pH。

1.5 因子分析

因子分析是采用降维的方法,将原始数据中多项指标减少为几个综合指标来反映数据信息的方法^[14]。因此借助因子分析方法对土壤地球化学元素进行分解和组合,有助于分析研究区内地球化学分布特征及其影响因素。由于本文数据量较大,为了降低数据特高值的影响,先对原始数据进行对数转换,再

对所选数据进行因子分析。

本研究中背景值数据的统计和分析利用 Excel 2013 和 SPSS 23.0 完成;数据的检验以及因子分析均利用 SPSS 23.0 进行计算,因子得分图则通过 MapGIS 6.7 和 Coreldraw 2020 进行绘制与整饰。

2 结果与分析

2.1 土壤地球化学背景值特征

全区土壤地球化学背景值见表2。表中富集系数 K_1 为咸丰县土壤元素背景值/全国土壤元素背景值,富集系数 K_2 表示咸丰县土壤元素背景值/湖北省土壤元素背景值。

分析变异系数可知,原始数据的变异系数为 0.17~5.21,其中 Cd、Hg、Mo、Se、CaO 的变异系数均大于 1,表明土壤中这些元素指标在空间上分布很不均匀;剔除后的数据变异系数介于 0.15~0.76,其中 B、Cr、Cu、Ge、Ni、Pb、Sr、Zn、Al₂O₃、TFe₂O₃、SiO₂ 变异系数小于 0.25,分布均匀;As、Cd、Cl、Co、F、Hg、P、S、Se、K₂O、MgO、Na₂O、Corg. 变异系数为 0.25~0.5,分布比较均匀;I、Mn、Mo、CaO 变异系数大于 0.5,表明其可能由于成土母质的差异、成土过程中表生作用以及外源组分的影响,导致空间变异性较强,在区域上表现为一定的富集或者贫乏的特征^[11-12]。

从表3中可以看到,区内 Na₂O、CaO、Sr 元素明显低于全国和全省的背景值。区内成土母质以沉积岩为主,主要由碎屑岩和碳酸盐岩组成。虽然在沉积岩中 CaO 为主要的成土产物,但是区内地势较高,雨水充足,沉积岩中的矿物易受到风化淋滤作用^[15],使得一些碱金属及碱土金属元素迁移淋失,这些元素的迁移顺序为 Ca>Sr>Na>Mg>K,在化学风化作用下 Ca 和 Sr 非常活跃,迁移能力很强^[16-17],因此造成了区内 Na₂O、CaO 和 Sr 元素异常贫乏。

土壤中的 I 主要来源于大气沉降^[18],部分来源于母岩风化^[19],因此含量通常高于原岩。与全国土壤背景值相比,I 的相对贫乏一方面可能是继承了区内碳酸盐岩、碎屑岩等母岩的化学成分,另一方面指示了咸丰地区土壤中的 I 并不是以溶于水的化合物的形式所存在^[20]。与湖北省相比 I 元素含量与之相当。

土壤中的钨钼族元素的富集可能与矿化作用有关,区内 Mo 元素显示为贫乏,表明研究区内可能没有钼矿的富集,表生条件下元素淋溶流失造成 Mo 的贫乏。Mo 元素是人体和动物生长发育所必需的微量元素,土壤中 Mo 的转化主要是受土壤酸碱度的影

表 2 全区土壤地球化学背景值特征
Table 2 Characteristics of geochemical background values in whole region

元素	原始数据($n=8\ 450$)			剔除后数据统计					土壤 A 层平均值		K_1	K_2
	平均值	离差	变异系数	样本数	离差	变异系数	背景值	分布类型	全国	湖北		
As	11.2	7.4	0.66	8 301	5.2	0.48	10.8	偏态	11.2	12.3	0.96	0.88
B	103.2	94.1	0.91	7 280	15.8	0.21	75.0	偏态	47.8	48.4	1.57	1.55
Cd	0.449	0.574	1.28	7 625	0.16	0.49	0.33	偏态	0.097	0.172	3.42	1.93
Cl	58	28	0.49	7 967	16	0.30	53	偏态	-	-	-	-
Co	16.1	4.4	0.27	8 374	4.0	0.25	16.0	正态	12.7	15.4	1.26	1.04
Cr	90	27	0.30	7 981	13.0	0.15	85.9	偏态	61	86	1.41	1.00
Cu	29.1	12.2	0.42	8 139	6.5	0.23	27.8	偏态	22.6	30.7	1.23	0.90
F	1 230	1 213	0.99	6 722	188	0.25	748	偏态	478	674	1.57	1.11
Ge	1.6	0.3	0.21	8 347	0.29	0.19	1.54	偏态	1.7	1.7	0.91	0.91
Hg	0.158 7	0.827 3	5.21	8 034	50.582 3	0.45	0.111 7	偏态	0.065 0	0.080 0	1.72	1.40
I	2.79	2.43	0.87	8 166	1.9	0.76	2.5	偏态	3.76	2.90	0.67	0.87
Mn	748	594	0.79	8 208	477	0.69	691	偏态	583	712	1.19	0.97
Mo	1.9	3.1	1.69	7 415	0.6	0.55	1.1	偏态	1.7	1.7	0.65	0.65
N	1 719	548	0.32	8 288	474	0.28	1 682	偏态	-	-	-	-
Ni	36.8	13.2	0.36	8 219	8.1	0.23	35.5	偏态	26.9	37.3	1.32	0.95
P	724	279	0.39	8 226	229	0.33	677	对数	-	-	-	-
Pb	33	12	0.37	8 138	5.8	0.18	31.8	偏态	26	37	1.22	0.87
S	370	294	0.79	7 869	127	0.41	313	偏态	-	-	-	-
Se	0.56	0.63	1.13	7 815	0.17	0.40	0.44	偏态	0.29	0.28	1.51	1.60
Sr	58	27	0.46	8 036	12	0.23	54	偏态	167	116	0.32	0.47
Zn	92.3	24.2	0.26	8 316	17	0.19	91	偏态	74.2	83.6	1.22	1.09
Al ₂ O ₃	13.54	2.78	0.21	8 442	2.77	0.20	13.54	偏态	12.51	13.59	1.08	1.00
CaO	0.42	1.03	2.48	7 688	0.13	0.52	0.25	偏态	2.15	0.73	0.12	0.35
TFe ₂ O ₃	5.4	1.2	0.22	8 390	1.11	0.21	5.35	偏态	4.2	5.6	1.27	0.96
K ₂ O	2.57	0.97	0.38	8 447	0.96	0.38	2.57	偏态	2.24	2.28	1.15	1.13
MgO	2.04	1.96	0.96	7 541	0.68	0.45	1.49	偏态	1.29	1.26	1.16	1.19
Na ₂ O	0.34	0.18	0.52	7 848	0.12	0.40	0.30	偏态	1.37	0.85	0.22	0.35
SiO ₂	69.13	5.68	0.08	8 390	5.42	0.08	69.14	偏态	-	-	-	-
Corg.	1.8	0.8	0.44	8 187	0.60	0.35	1.70	偏态	1.8	1.9	0.95	0.92
pH	5.5	1.0	0.17	8 422	0.94	0.17	5.50	偏态	6.7	6.5	0.82	0.85

注：“-”表示无数据。

表 3 咸丰县表层土壤元素富集与贫乏组合
Table 3 Combination of enrichment and poverty of surface soil elements in Xianfeng County

	非常富集 $K \geq 1.4$	富集 $1.2 < K < 1.4$	相当 $0.8 \leq K \leq 1.2$	贫乏 $0.6 < K < 0.8$	非常贫乏 $K \leq 0.6$
与全国相比(K_1)	B、Cd、Cr、 F、Hg、Se	Co、Cu、Ni、Pb、Zn、 TFe ₂ O ₃	As、Ge、Mn、Al ₂ O ₃ 、K ₂ O、MgO、 Corg.、pH	I、Mo	Sr、CaO、Na ₂ O
与湖北省相比 (K_2)	B、Cd、Hg、 Se	-	As、Co、Cr、Cu、F、Ge、I、Mn、 Ni、Pb、Zn、Al ₂ O ₃ 、TFe ₂ O ₃ 、K ₂ O、 MgO、Corg.、pH	Mo	Sr、CaO、Na ₂ O

响,土壤酸化可能会导致 Mo 的有效性降低^[21],因此,区内土壤有效钼的含量需引起关注。

研究区内 99.7% 的土壤样品 Se 含量大于 0.125 mg/kg, 58% 的土壤样品 Se 含量大于 0.4 mg/kg, 总体表现为足 Se 或富 Se 土壤, 说明咸丰地区土壤 Se 含量整体处于较高水平。与全国土壤和湖北省土壤相比, 富集系数分别为 1.51 和 1.60, 均显示非常富集, 有利于利用富 Se 土地资源发展特色农产品。已有研究发现, 成土母质是影响土壤 Se 含量的最主要因素, 土壤 Se 含量与其母质的含 Se 量有极其显著的正相关关系^[22-23]。研究区内二叠系成土母质的土壤 Se 含量最高, 平均含量为 0.95 mg/kg。二叠系地层岩性主要为砂岩、黑色泥岩、页岩、灰岩等且夹有煤层, 与恩施鱼塘坝晒矿的赋存的二叠系茅口组黑色岩系具有时空耦合性^[24-26]。因此可以认为咸丰地区土壤中较高的 Se 含量主要来源于其成土母质。

与全国和湖北省土壤背景值相比, B 的富集系数为 1.57 和 1.55, 非常富集。土壤中的 B、Fe 等微量元素主要来源于成土母质^[27]。通常认为沉积岩发育的土壤比火成岩发育的土壤 B 含量高。土壤中 B 元

素富集不代表有效硼含量丰富^[28], 因此考虑土壤养分条件时需注意有效硼的含量。

研究区内土壤中的重金属元素 Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 均较全国土壤富集, 其中 Cd、Cr、Hg 非常富集, 富集系数分别为 3.42、1.41、1.72。除受成土母质的影响外, 研究区内的工矿活动、生活垃圾、农业施肥以及大气沉降等也可能导致了上述元素在表层土壤的富集^[29-30]。

2.2 土壤元素空间分布及其影响因素

不同沉积环境中由于成土条件的差异, 在空间上通常会表现为不同的元素地球化学共生组合。为进一步探讨研究区内表层土壤环境元素的来源和影响因素, 本文对上述元素指标进行因子分析。经检验 KMO 值为 0.788>0.5, 显著性(sig.)<0.001, 符合 Kaiser 标准条件, 表明变量之间的相关性较强, 数据适宜进行因子分析^[14]。并基于主成分模型, 提取出特征值大于 1 的 7 个主因子为研究对象, 其表达的信息量占总信息量的 77.155%(表 4), 基本能够反映咸丰地区表层土壤的主要地球化学特征。根据各采样点的因子得分, 绘制了因子分布图(图 2)。

表 4 咸丰县土壤因子负载矩阵
Table 4 Matrix of soil factor loadings of Xianfeng County

元素	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7
As	0.572	-0.006	0.649	-0.002	0.143	0.239	0.103
B	-0.105	-0.025	0.077	-0.100	0.124	0.879	0.179
Cd	0.585	0.277	0.162	0.274	0.487	-0.200	0.084
Cl	0.286	-0.221	0.059	0.158	0.238	0.640	-0.059
Co	-0.140	0.507	0.669	-0.208	0.150	0.072	-0.094
Cr	0.283	0.754	0.126	-0.008	0.024	-0.214	-0.093
Cu	-0.082	0.810	0.099	0.117	-0.008	0.198	-0.068
F	0.169	-0.067	0.008	-0.019	0.206	0.159	0.909
Ge	-0.511	0.365	0.085	0.085	-0.172	0.578	-0.091
Hg	0.613	-0.094	0.299	0.245	-0.008	0.206	0.202
I	0.339	-0.135	0.775	-0.022	0.098	-0.046	0.115
Mn	0.073	0.209	0.815	-0.220	0.273	-0.010	-0.082
Mo	0.820	0.240	0.102	0.153	0.037	0.143	-0.086
N	-0.103	0.062	-0.153	0.902	-0.045	-0.102	0.069
Ni	-0.093	0.925	0.017	-0.020	-0.039	-0.045	0.085
P	0.096	0.152	0.262	0.579	0.006	0.097	-0.071
Pb	-0.068	0.250	0.593	0.301	-0.024	0.076	-0.099
S	0.378	-0.027	-0.086	0.716	0.162	0.216	-0.075
Se	0.755	0.266	0.103	0.419	0.055	-0.025	-0.033
Sr	0.204	0.048	0.085	0.094	0.739	0.025	0.023
Zn	-0.322	0.681	0.242	0.249	-0.017	-0.183	-0.002

续表 4

元素	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7
Al ₂ O ₃	-0.763	0.387	0.086	0.059	-0.234	0.236	0.107
CaO	0.034	-0.090	0.147	0.095	0.905	0.084	0.160
TFe ₂ O ₃	-0.400	0.539	0.569	-0.142	0	0.142	-0.005
K ₂ O	-0.777	0.298	0.015	0.034	-0.178	0.37	0.141
MgO	-0.269	-0.046	-0.104	-0.051	0.139	-0.084	0.906
Na ₂ O	-0.686	0.152	-0.038	0.059	0.041	-0.090	0.019
SiO ₂	0.631	-0.263	-0.166	-0.084	-0.131	-0.198	-0.516
Corg.	0.052	-0.052	-0.139	0.928	0.038	-0.073	0.006
pH	-0.077	-0.033	0.092	-0.136	0.853	0.141	0.181
特征值	5.515	3.991	3.251	3.234	2.764	2.202	2.189
方差%	18.384	13.304	10.838	10.779	9.213	7.341	7.297
累计方差%	18.384	31.688	42.526	53.304	62.518	69.858	77.155

因子 F_1 为二叠系成土母质因子(图 2A), 该因子占总变量方差的 18.384%, 元素 Hg、Mo、Se、Cd 与造岩元素(SiO₂、Al₂O₃、K₂O、Na₂O)具有良好的相关性, 呈北东南西向分布, 与地质图(图 1A)对比可知, F_1 因子的高值区基本上与研究区内的二叠系基岩分布一致, 说明该因子主要继承成土母岩的地球化学特征。

因子 F_2 为工矿因子(图 2B), 该因子占总变量方差的 13.304%, 金属元素 Ni、Cu、Cr、Zn 具有良好的相关性, 研究区内工矿企业用地主要分布于坪坝营镇、曲江镇、清坪镇、黄金洞乡一带, 这些地区因子相关性较高, 并且局部呈点状分布, 是由于受到了矿物开采加工等人类活动的影响。

因子 F_3 为成土母质和人类活动共同作用因子(图 2C), 该因子占总变量方差的 10.838%, 亲 Fe 元素(Mn、Co、TFe₂O₃)、重金属元素(As、Pb)与卤族元素(I)具有良好的相关性。因子高值区与二叠系地层在空间上具有一定的耦合性, 部分呈条带状分布, 一定程度上反映了成土母质的特征。而在南部的异常高值区呈点状, 主要分布于坪坝营镇南部, 可能与该区域采矿活动、工业污染有关, 因此该因子是受到成土母质和人类活动共同作用的结果。

因子 F_4 为腐殖质过程因子(图 2D), 该因子占总变量方差的 10.779%, 元素 N、S、Corg.、P 之间具有良好的相关性, 其中 N 和 Corg. 的因子相关系数均大于 0.9。区内海拔较高的地区相关性较强, 是由于高山地区植被覆盖率较高, 较为发育的动植物残体通过一系列生物化学和化学作用变为腐殖质, 并在土

壤表层积累, 为土壤提供了丰富的营养物质。同时, 局部呈点状分布, 也表明在一定程度上受到了人类农业施肥的影响。

因子 F_5 为碳酸盐岩风化作用因子(图 2E), 占总变量方差的 9.213%, 元素 Sr、CaO、pH 之间具有良好的相关性。因子得分较高的地区(清平镇、唐崖镇、朝阳寺镇一带, 高乐山镇、曲江镇、坪坝营镇一带)地势较低, 土壤偏碱性, 碳酸盐岩长期在雨水的作用下发生化学溶蚀造成 CaO 在表层土壤富集^[15]; CaO、Sr 的富集与碳酸盐岩风化有关, 二者离子半径相似, 具有相似的地球化学行为, 容易受到化学作用以碳酸盐的形式随着土壤溶液或地表水迁移^[31], 在适当的地质地形条件下沉淀富集。土壤中 OH⁻ 的主要来源之一为碳酸钙的水解, Ca²⁺ 增加, OH⁻ 浓度升高, Ca 元素在一定程度上影响着土壤的 pH, 而 pH 又控制着微量元素的表生变化及分布^[32]。因此, 元素 Sr、CaO 和 pH 三者之间具有很强的相关性。该因子反映了在碳酸盐岩风化成土的过程中, 受到地形气候等因素的影响, 土壤中 CaO、Sr 逐渐富集的过程。

因子 F_6 为寒武系成土母质作用因子(图 2F), 占总变量方差的 7.341%, 与元素 B、Cl、Ge 具有良好的相关性, 土壤中有益元素 B、Cl、Ge 的含量主要受控于成土母质, B 元素通常在碳酸盐岩地区含量最高^[4]。图中呈带状分布的因子高值区位于咸丰县东南部, 其成土母质为一套寒武系海相沉积的地层, 岩性以碳酸盐岩为主。

因子 F_7 为地形作用因子(图 2G), 占总变量方差的 7.297%, 元素 F 和 MgO 具有良好的相关性, F 元

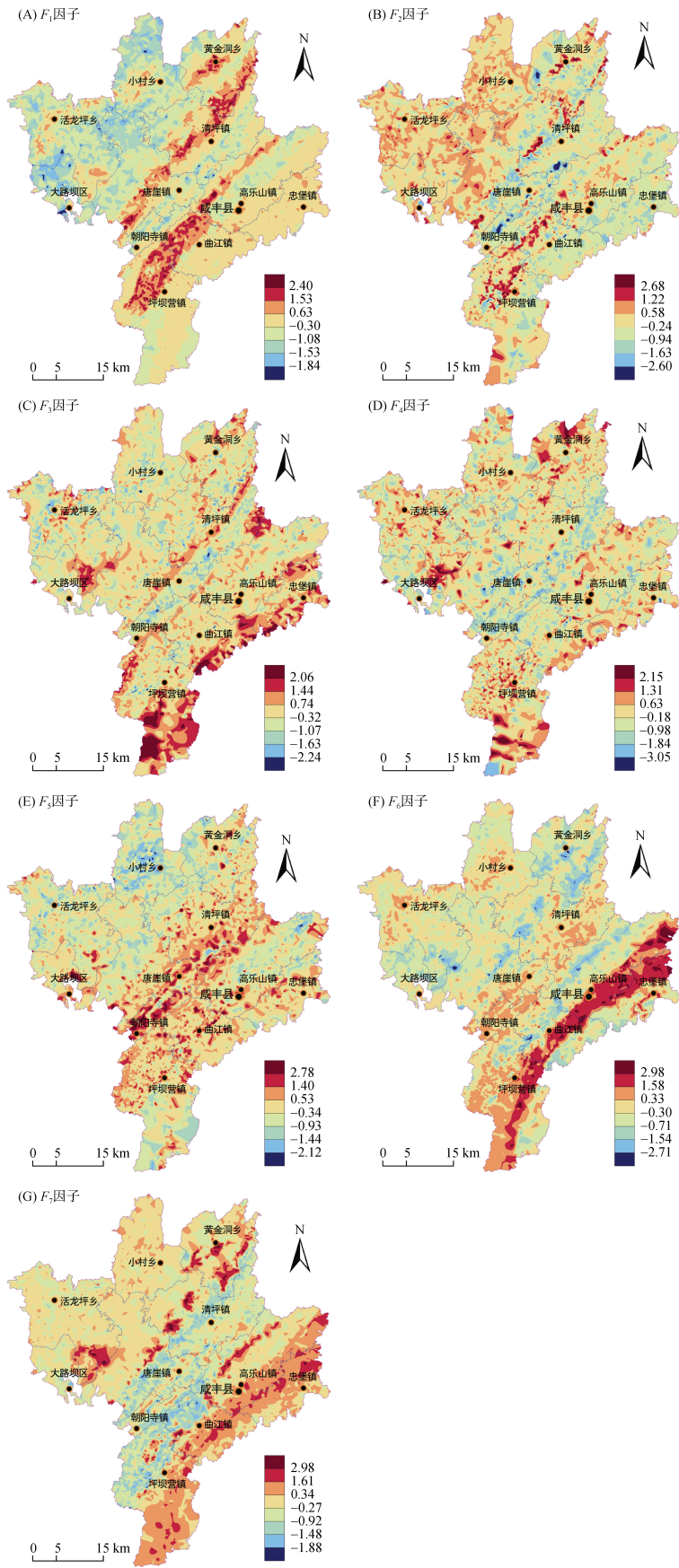


图 2 咸丰县因子得分分布
Fig. 2 Diagrams of factor scores in Xianfeng County

素在风化过程中具有较高的活性,与地形图相比地势较高的地区相关性较强,地势较低的部分相关性偏弱。同时具有条带状分布的特征,可能还受到部分成土母质的控制。

3 结论

1)与全国表层土壤元素含量相比,咸丰地区土壤 B、Cd、Cr、F、Hg、Se、Co、Cu、Ni、Pb、Zn、 TFe_2O_3 元素含量相对富集, I、Mo、Sr、CaO、 Na_2O 元素背景值较全国均显示贫乏。与湖北省相比,除 Co、Cu、Ni、Pb、Zn、 TFe_2O_3 、I 元素含量相当外,其他元素均与全国一致。区内表层土壤 B、F、Se、Co 等有益元素富集,适合发展生态富 Se 特色农业。

2)采用因子分析法将相关性较高的元素划分为 7 组因子,通过对其化学特征的研究表明,研究区内表层土壤元素的地球化学背景值是受到了成土母质的母岩类型、工矿活动、腐殖质过程、风化作用、地形作用以及人类生产活动共同影响的结果。

3)咸丰地区土壤元素地球化学分布特征主要由成土母岩所决定,但是地形作用和农业施肥、工矿活动等人类生产活动过程影响着区域地球化学元素的再分布。

参考文献:

- [1] 国家环境保护局主持,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.
- [2] 刘建权, 王海峰, 高攀, 等. 冀北上黄旗地区水系沉积物地球化学背景特征与找矿远景[J]. 矿产与地质, 2016, 30(3): 431-438.
- [3] 杨泽, 刘国栋, 戴慧敏, 等. 黑龙江兴凯湖平原土壤硒地球化学特征及富硒土地开发潜力[J]. 地质通报, 2021, 40(10): 1773-1782.
- [4] 刘灵飞, 龙健, 万洪富, 等. 贵州喀斯特山区锑冶炼厂对农业土壤污染特征的影响及风险评价[J]. 土壤, 2013, 45(6): 1036-1047.
- [5] 李静, 俞天明, 周洁, 等. 铅锌矿区及周边土壤铅、锌、镉、铜的污染健康风险评价[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2327-2330.
- [6] 张阿龙, 高瑞忠, 张生, 等. 吉兰泰盐湖盆地土壤重金属铬、汞、砷分布的多方法评价[J]. 土壤学报, 2020, 57(1): 130-141.
- [7] 李海, 白云山, 王保忠, 等. 湘鄂西地区下古生界页岩气保存条件[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(6): 22-25, 112.
- [8] 王秀平, 牟传龙, 肖朝晖, 等. 鄂西来凤-咸丰地区五峰组-龙马溪组岩石学特征及其成因[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(1): 50-66.
- [9] 中华人民共和国国土资源部. 土地质量地球化学评价规范: DZ/T 0295—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [10] 中华人民共和国国土资源部. 目标区域地球化学调查规范(1:250000): DZ/T 0258—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [11] 王乔林, 宋云涛, 吕许朋, 等. 云南省西部地区土壤地球化学基准值特征及成因分析[J]. 现代地质, 2021, 35(2): 412-424.
- [12] 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]. 地质前缘, 2014, 21(3): 265-306.
- [13] GB/T 4882—2001, 数据的统计处理和解释正态性检验[S]. 北京: 国家质量技术监督局, 2001.
- [14] Zhang S, Yang D, Li F L, 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.
- [15] 成杭新, 彭敏, 赵传冬, 等. 表生地球化学动力学与中国西南土壤中化学元素分布模式的驱动机制[J]. 地质前缘, 2019, 26(6): 159-191.
- [16] 黄润, 朱诚, 郑朝贵, 等. 长江三峡中坝遗址地层中 Rb 和 Sr 的分布特征及其古气候演变[J]. 第四纪研究, 2004, 24(5): 531-536.
- [17] 杨守业, 李从先, 李徐生, 等. 长江下游下蜀黄土化学风化的地球化学研究[J]. 地球化学, 2001, 30(4): 402-406.
- [18] Fuge R, Johnson C C. The geochemistry of iodine - a review[J]. Environmental Geochemistry and Health, 1986, 8(2): 31-54.
- [19] 廖莉萍, 廖桂香, 黄芳. 贵州碘缺乏病区生态地质环境特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, 35(1): 104-108.
- [20] 杨笑笑, 曾道明, 罗先熔, 等. 珠三角新会地区表层土壤硒、氟、碘地球化学特征研究[J]. 地球与环境, 2020, 48(2): 181-189.
- [21] Brennan R F, Bolland M D A, Bowden J W. Potassium deficiency, and molybdenum deficiency and aluminium toxicity due to soil acidification, have become problems for cropping sandy soils in south-western Australia[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 2004, 44(10): 1031.
- [22] 曾庆良, 余涛, 王锐. 土壤硒含量影响因素及富硒土地资源区划研究——以湖北恩施沙地为例[J]. 现代地质, 2018, 32(1): 105-112.
- [23] 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.
- [24] 宋成祖. 鄂西南渔塘坝沉积型硒矿化区概况[J]. 矿床地质, 1989, 8(3): 83-89.
- [25] 郭宇. 恩施地区硒的地球化学研究及富硒作物栽培实验研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
- [26] 梁有彬, 朱文凤, 王宗学. 我国黑色岩系中硒矿资源及其前景分析[J]. 矿产与地质, 1994, 8(4): 39-45.
- [27] 任鹏, 孙志高, 赵全升, 等. 黄河口盐沼土壤硼和铝的分布特征[J]. 湿地科学, 2015, 13(6): 728-734.
- [28] 金立新, 唐金荣, 刘爱华, 等. 成都地区土壤硼元素含量及其养分管理建议[J]. 第四纪研究, 2005, 25(3): 363-369.
- [29] 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.
- [30] 王佛鹏, 宋波, 黄宇妃, 等. 广西西江流域土壤中铬空间分布与背景值再研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(4): 889-899.
- [31] 雷晨, 庞奖励, 黄春长, 等. 渭河上游地区樊家城黄土-古土壤剖面 Rb、Sr、Ba 存留特征及意义[J]. 中国沙漠, 2019, 39(6): 90-98.
- [32] 潘涵香, 谷志云, 张妍, 等. 浙江温州山地丘陵地区土壤地球化学特征与生态环境评价[J]. 矿产勘查, 2020, 11(5): 1016-1028.