

· 环境地质 ·

海南岛琼中黎母山—湾岭地区土壤重金属元素分布特征及生态风险评价

高健翁^{1,2}, 龚晶晶^{1,2}, 杨剑洲^{1,2}, 唐世新^{1,2}, 马生明^{1,2*}

GAO Jianweng^{1,2}, GONG Jingjing^{1,2}, YANG Jianzhou^{1,2}, TANG Shixin^{1,2}, MA Shengming^{1,2*}

1. 自然资源部地球化学探测重点实验室, 河北 廊坊 065000;

2. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000

1. Key Laboratory for Geochemical Exploration Technology, Ministry of Natural Resources, Langfang 065000, Hebei, China;

2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, Hebei, China

摘要: 为了解琼中黎母山—湾岭地区土壤重金属元素分布特征及其潜在生态风险, 采集了表层(0~20 cm)土壤样品 2682 件, 对应中层(80~100 cm)及深层(180~200 cm)土壤样品各 304 件。分析测定 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As、Hg 八种重金属元素。对 8 种重金属元素空间分布特征进行多元统计分析, 并采用地累积指数法、潜在生态危害指数法对该区土壤重金属污染程度、生态风险进行评估。结果显示, 表层土壤中 8 种重金属元素均值均高于海南岛土壤重金属背景值, 表现出不同程度的积累; 不同土地利用类型及种植类型对表层土壤重金属富集影响较大; 垂向上, 由表层至深层, 土壤 Pb、Zn、Cu、Cr、Ni 五种重金属元素含量依次降低, 但差异不大; Cd、As、Hg 在垂向上表现出明显的表聚性。Pearson 相关性分析与因子分析结果显示, Cu、Cr、Ni 主要受地质背景影响, 其余 5 种元素均受地质背景及人为因素影响。地累积指数结果显示, 8 种金属元素均值除 Hg(0.08)外, 均小于 0, 总体为无污染—轻微污染; 生态风险评价显示, Cd 和 Hg 为主要危害元素, Cd 以轻微—中等危害为主, Hg 以中等—强风险为主, 其余元素危害指数均为轻微级, 96% 的土壤总体潜在生态危害指数在中等以下。

关键词: 琼中; 土壤; 重金属; 污染; 评价; 生态风险

中图分类号: X53; X820.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)05-0807-10

Gao J W, Gong J J, Yang J Z, Tang S X, Ma S M. Spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metal pollution in the soil of Limu Mountain—Wanling Town, Qiongzong, Hainan Province. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(5): 807–816

Abstract: In order to understand the spatial distribution and ecological risk assessment of heavy metal pollution in the soil of Limu Mountain—Wanling Town, Qiongzong, 2682 topsoil samples (0~20 cm) and 304 middle—soil layer samples (80~100 cm) and subsoil samples (180~200 cm) were respectively collected to analyze for 8 heavy metal elements (Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, Cd, As and Hg). Based on the metals' distribution, geoaccumulation index and potential ecological hazard index, multivariate statistics was conducted to evaluate the potential ecological risks. Results show that the mean values of 8 heavy metal elements in topsoils are higher than the soil background values of Hainan, showing different degree of accumulation effect. The accumulation of heavy metal in topsoils is associated with different land—use types and various planting patterns. Vertically, the contents of Pb, Zn, Cu, Cr, Ni decrease a little with depth, but contents of Cd, As and Hg are characterized by surface accumulation. Pearson correlation analysis and factor analysis suggest that Cu, Cr and Ni in the topsoils are mainly controlled by geological background, others are controlled by geological background and human activities. The mean geoaccumulation indexes of other heavy metal elements except for Hg(0.08) are less than 0. The ecological risk assessment show

收稿日期: 2020-08-10; 修订日期: 2020-11-13

资助项目: 中国地质调查局项目《海南岛热带特色农业区生态地质调查》(编号: DD20190305)

作者简介: 高健翁(1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事生态地质调查与研究工作。E-mail: gjianweng@mail.cgs.gov.cn

* 通信作者: 马生明(1963—), 男, 博士, 研究员, 从事生态地质调查与研究工作。E-mail: mshengming@mail.cgs.gov.cn

that Cd and Hg are the main hazard elements, Cd is mainly of slight to medium hazard, Hg is of medium to strong risk, and the hazard indexes of the other elements are all slight. The overall potential ecological hazard index of 96% of the soil is below medium hazard.

Key words: Qiongzong; soil; heavy metals; pollution; assessment; ecological risks

土壤中重金属元素的过度累积会通过消化系统、呼吸系统或皮肤接触进入人体并引发一系列疾病^[1-4]。自工业革命以来,人类活动对土壤重金属元素的自然循环过程造成了极大的干扰。除人类活动直接排放重金属外,人类活动导致地表生态环境改变同样可以影响重金属元素的自然循环过程^[5]。随着越来越多的土地污染及相应的人体健康问题被报道^[6-10]①,土壤重金属污染成为制约现今人类发展的重要生态环境问题之一。

海南岛独特的地理优势使其一直是中国生态环境质量较好的省份之一。但随着海南岛现代化进程不断加速,外来人口涌入,当地企业粗放型生产,农民无节制使用化肥、农药,使海南部分地区生态环境遭到破坏。关于海南岛农用地重金属污染的研究及报道越来越多^[11-14],完善海南岛农用地重金属污染情况调查,并提出合理的生态保护规划迫在眉睫。本次选取琼中黎族苗族自治县湾岭—黎母山南麓为研究区,以不同的土地利用类型为依据划分采样单元,摸清农用地重金属污染状况,以及不同土地利用方式下重金属富集特征,分析其来源,并进行重金属潜在生态风险评价,为当地土壤重金属背景值提供参考,也为土壤重金属生态风险防控及合理利用土地资源提供科学依据,助力琼中“脱贫攻坚”。

1 研究区概况

琼中黎族苗族自治县位于海南岛中部,五指山北麓,属热带海洋季风区北缘,全年降雨丰沛,气候温和。地形西南高、北东低,高山、低山、丘陵、台地河道、阶地等地貌均有发育。境内水系发达,海南岛三大河流南渡江、昌化江、万泉河均发源于该县境内,具有独特的地理特征。研究区位于湾岭镇—黎母山镇东南一带,并包含和平镇部分区域(图 1),面积共计 300 km²。地貌类型以丘陵为主,其次为少量山间盆地;成壤母质以二叠纪、侏罗纪、白垩纪酸性侵入岩为主,少量变质岩;土壤发育类型以砖红壤、水稻土为主。

2 材料与方法

2.1 样品采集与测试

表层土壤样品采集均以不同土地利用类型为基本调查单元开展,每个采样点采用三点组合采集表层(0~20 cm)样品,室内阴干后过 10 目(<2.00 mm)筛。

中深层土壤样品采集:在研究区每平方千米布设 1 个采样点,每个采样点使用手动螺旋采样钻采集表层(0~20 cm)、中层(80~100 cm)、深层土壤(100~200 cm)样品,本次研究共采集表层、中层、深层土壤各 304 件。采样时在采样点所代表的区域范围内,避开了点状分布的人工堆积土及污染区,选择更具有代表意义的采样点进行样品采集。土壤样品室内阴干后过 10 目(<2.00 mm)筛。

样品分析测试由华北有色地质勘查局燕郊中心实验室完成。分析方法和检出限见表 1。检出限参照《生态地球化学评价样品分析方法和技术要求》(DD 2005—03)^[15];分析检测过程的质量控制按照《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》(DZ/T 0258—2014)^[16]和《土地质量地球化学评估技术要求(试行)》(DD2008—06)^[17]规范执行。

2.2 评价方法

2.2.1 地累积指数法

根据全国土壤重金属背景值并结合生物生态

表 1 各指标分析及检出限
Table 1 The analytical methods and detection limits for various indicators

指标	分析方法	方法检出限/(mg·kg ⁻¹)
Cu	ICP	0.5
Pb	ICP-MS	2
Zn	XRF	2
Cr	XRF	2
Ni	ICP-MS	0.3
Cd	ICP-MS	0.02
As	AFS	0.2
Hg	AFS	0.0005
Zn	XRF	2

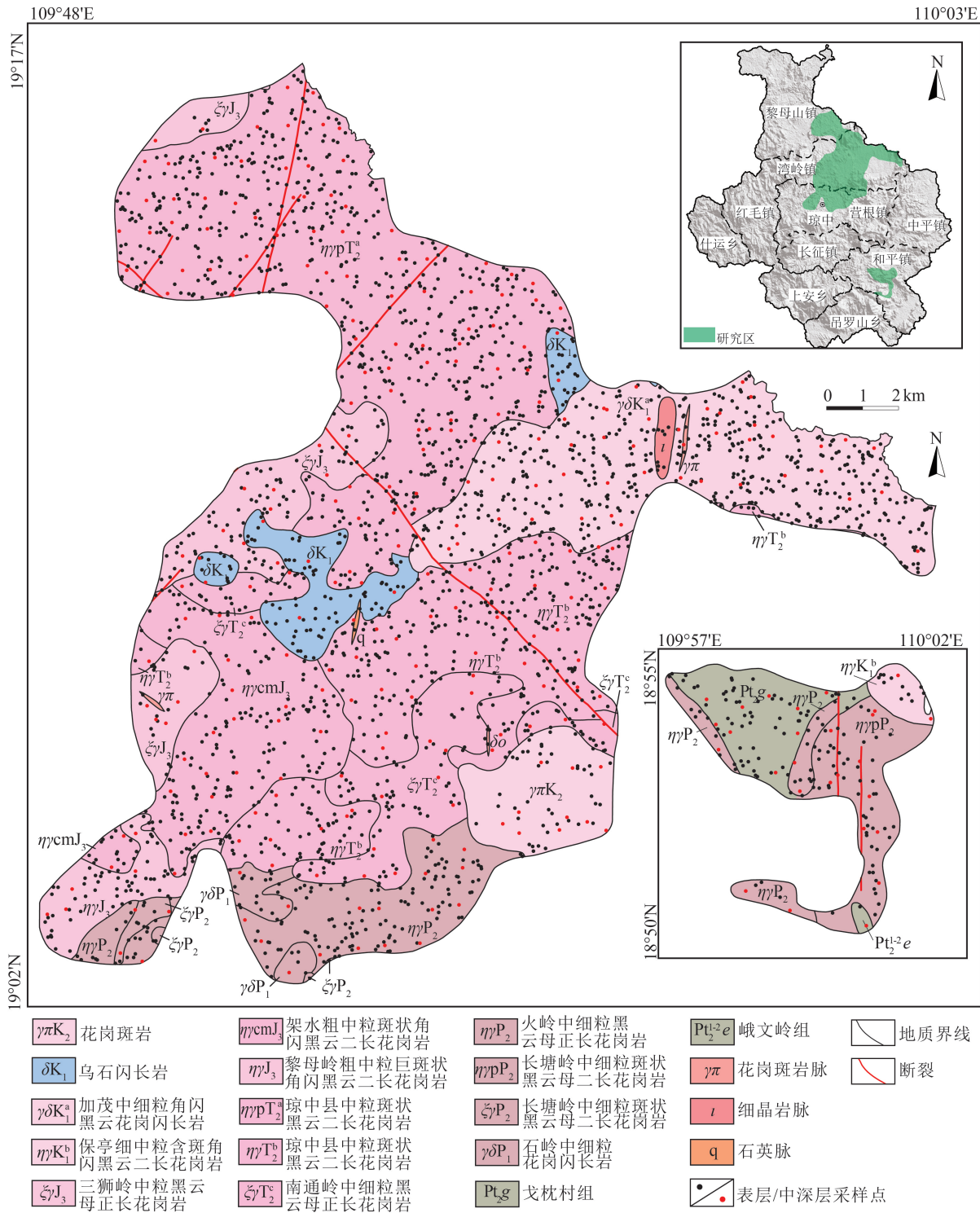


图 1 研究区位置及采样点位置

Fig. 1 Location of the study area and samples

效应制定的国家标准强化了生物生态效应指标的作用,其评价结果重点强调土壤中重金属含量对生

物可能产生的生态后果^[18];而参照海南岛土壤重金属元素背景值的评价方法在研究区评价人为污染

程度时具有更高的可靠性。因此,本次选取地累积指数法来评价土壤重金属污染程度。

地累积指数(I_{geo})也称为 Muller 指数^[19],被广泛应用于土壤重金属污染评价^[20]。其计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left[\frac{C_i}{k \times S_i} \right] \quad (1)$$

其中, C_i 为土壤中重金属元素含量的实测值; S_i 为参比值, k 为修正指数,一般取 1.5,用来表征沉积特征、岩石地质及其他影响。本文选取海南岛土壤重金属元素背景值^②为参比值。根据地累积指数 I_{geo} 进行重金属污染评价的等级划分标准^[21]见表 2。

2.2.2 Hakanson 潜在生态危害指数法

Hakanson 潜在生态危害指数法将重金属含量、生态效应、环境效应及毒理学联系起来,是目前进行生态风险评价广泛使用的方法^[22-24]。其计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^n Ei_r = \sum_{i=1}^n (Ti_r \times Ci_f) = \sum_{i=1}^n \left(Ti_r \times \frac{Ci}{Ci_n} \right) \quad (2)$$

其中, C_i 为土壤中某种重金属元素测值; Ci_n 为该素的参比值,本文选取海南岛土壤重金属元素背景值为参比值; Ci_f 为该元素的污染指数; Ti_r 为某种重金属元素的毒性响应参数($Zn = 1 < Cr = Mn = 2 < Cu = Ni = Pb = 5 < As = 10 < Cd = 30 < Hg = 40$)^[25-26]; Ei_r 为单项重金属潜在生态危害指数,各单项重金属潜在生态危害指数之和为总潜在生态危害指数 RI 。根据 Ei_r 与 RI 确定单因子潜在生态危害及总潜在生态危害分级(表 3)。

表 2 地累积指数污染评价标准

Table 2 Criteria for assessment of soil pollution with I_{geo}

地累积指数 I_{geo}	级别	污染程度
$I_{\text{geo}} < 0$	0	无污染
$0 \leq I_{\text{geo}} < 1$	1	轻污染
$1 \leq I_{\text{geo}} < 2$	2	中污染
$2 \leq I_{\text{geo}} < 3$	3	中-重污染
$3 \leq I_{\text{geo}} < 4$	4	重污染
$4 \leq I_{\text{geo}} < 5$	5	重-极重污染
$5 \leq I_{\text{geo}}$	6	极重污染

表 3 Hakanson 潜在生态危害指数评价标准

Table 3 Criteria for assessment of the potential ecological risk status with Ei_r & RI

生态危害	轻微	中等	强	很强	极强
Ei_r	<40	40~80	80~160	160~320	≥ 320
RI	<150	150~300	300~600	600~1200	≥ 1200

3 结果与讨论

3.1 土壤重金属分布特征

研究区表层土壤中 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As、Hg 八种重金属元素含量符合对数正态分布,其均值均高于海南岛土壤重金属背景值,表现出不同程度的积累(表 4)。其中 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、Hg 均值为海南岛土壤重金属背景值的 1.3~1.9 倍,As 均值为 3.30 mg/kg,是海南岛 As 背景值的 2.5 倍。Cd 变异系数为 4.66,明显高于其他元素。

研究区成壤母质以二叠纪、侏罗纪、白垩纪酸性侵入岩为主,少量变质岩(图 1)。统计不同成壤母质土壤中 8 种重金属平均含量(表 5),结果显示,由不同地质体形成的土壤表层重金属含量具有一定差异,可能与成壤母质矿物组成及物质来源相关,指示研究区表层土壤重金属受到成壤母质的影响。

3.2 不同土地利用类型表层土壤重金属累积特征

研究区土地利用类型主要为水田、旱地、水浇地、果园、茶园、其他园地(橡胶园、槟榔园)、林地(主要为灌木林地)、草地(荒草)及建筑、交通等用地。

表 4 研究区表层土壤重金属含量特征

Table 4 Concentration distribution of heavy metals in topsoil in the study area

特征参数	mg/kg							
	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd	As	Hg
最小值	1	5.73	6.62	2.96	1.15	0.020	0.5	0.005
最大值	128	463	500	2110	488	15.2	105	0.172
均值	9.93	33.4	60.1	49.9	13.4	0.063	3.30	0.035
中位数	7.57	30.9	55.4	34.85	9.5	0.048	1.53	0.032
标准差	8.16	16.4	26.9	82.1	16.8	0.295	6.41	0.017
变异系数	0.822	0.490	0.449	1.64	1.25	4.66	1.94	0.478
海南岛土壤背景值	6.1	24.4	44.4	27.5	7.24	0.040	1.34	0.020

表 5 不同成壤母岩形成的土壤重金属平均含量

Table 5 Comparison of soil heavy metals contents by different parent rocks

成壤母质	样本数量	mg/kg							
		Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd	As	Hg
黑云母花岗岩	634	11.59	29.73	62.49	64.55	17.29	0.06	2.65	0.04
闪长岩	91	21.43	26.38	78.44	106.98	25.75	0.08	6.18	0.03
花岗闪长岩	594	10.42	26.33	57.26	51.41	14.25	0.06	2.04	0.04
花岗岩斑岩	66	5.61	37.81	43.47	25.38	8.19	0.04	3.08	0.04
二长花岗岩	209	9.05	36.00	54.11	33.86	10.09	0.05	4.13	0.03
正长花岗岩	1018	8.57	36.99	60.01	39.67	10.48	0.07	3.60	0.03
石英闪长岩	2	5.22	47.00	34.70	40.75	11.73	0.04	1.18	0.02
云母片岩	1	3.78	24.60	48.10	3.75	1.44	0.19	10.20	0.01
斜长片麻岩	66	7.65	44.99	60.25	31.14	8.31	0.07	8.29	0.04
石英片岩	1	8.16	51.90	60.40	14.30	6.23	0.05	5.86	0.03

其中园地面积最大,占调查区面积的 83.40%;农田次之,占调查区面积的 13.13%;林地占调查区面积的 1.91%;草地占调查区面积的 0.99%;建设、交通等用地占调查区面积的 1.61%。

研究区不同土地利用类型中各重金属元素均值与海南岛土壤背景值比值差异较大(图 2)。As 在槟榔、橡胶种植区(园地)富集较明显,Cd 在农田、草地中富集较明显,Cr 在灌木林地中最富集。此外,Cu、Cr、Ni 均在果园中较富集,其次为水田和水浇地;Hg 在水田、果园中富集较明显,不同的土地利用类型及种植类型对 Pb、Zn 影响较小。这些

差异的形成,与不同植物根系对重金属的吸收富集能力不同有关,还是与不同的农业活动影响有关,有待进一步研究。建设、交通等用地较其他土地利用类型重金属富集不显著,表明研究区人类活动并不是表层土壤重金属富集的主要因素,不同农作物对重金属的富集及农业生产过程中化肥、农药的施用是影响表层土壤重金属含量的主要原因。研究区农用地除部分农田(如水田)外,果园、槟榔园、橡胶园等化肥、农药施用较多,可能是土壤重金属的重要来源之一,为今后生态环境质量评价及保护提供了依据和方向。

3.3 重金属垂向分布特征

在垂向上,各重金属元素表现出不同的分布特征(图 3)。As 与 Hg 表现出强烈的表聚性,其含量自表层土壤至深层土壤逐渐降低;Cd 在表层土壤中含量最高,在中层土壤中最低,深层土壤含量高于中层土壤;其余 5 种重金属元素 Pb、Zn、Cu、Cr、Ni 在垂向上含量并无太大差异,在表层土壤中的含量均略低于中深层土壤。

3.4 重金属来源分析

Pearson 相关性分析与因子分析在土壤重金属源分析上具有较好的效果^[27-28]。本次研究结果显示(图 4),研究区表层土壤中 As、Hg 与其他元素均不相关,这表明在土壤中 As、Hg 与其他重金属元素具有不同的地球化学行为或物质来源。除 As、Hg 外,Zn 与 Pb、Cu、Cr、Ni、Cd 均具有一定相关性,表明其物质来源较复杂。剩余 5 种元素明显分为 2 类:Cu、Cr、Ni 与 Pb、Cd,指示了不同的物源组成。

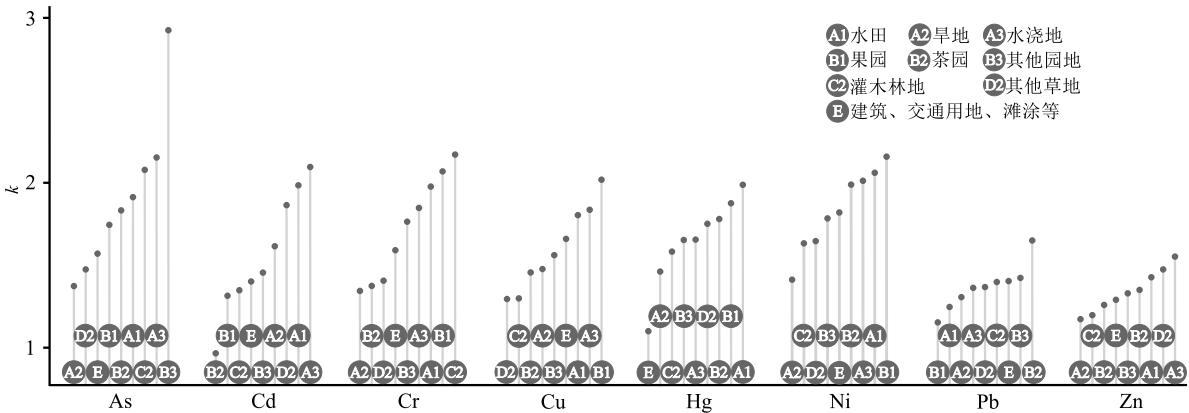


图 2 不同土地利用类型重金属累积对比
(k 为重金属元素含量与海南岛土壤背景值的比值)

Fig. 2 Accumulation of heavy metals in different land use types

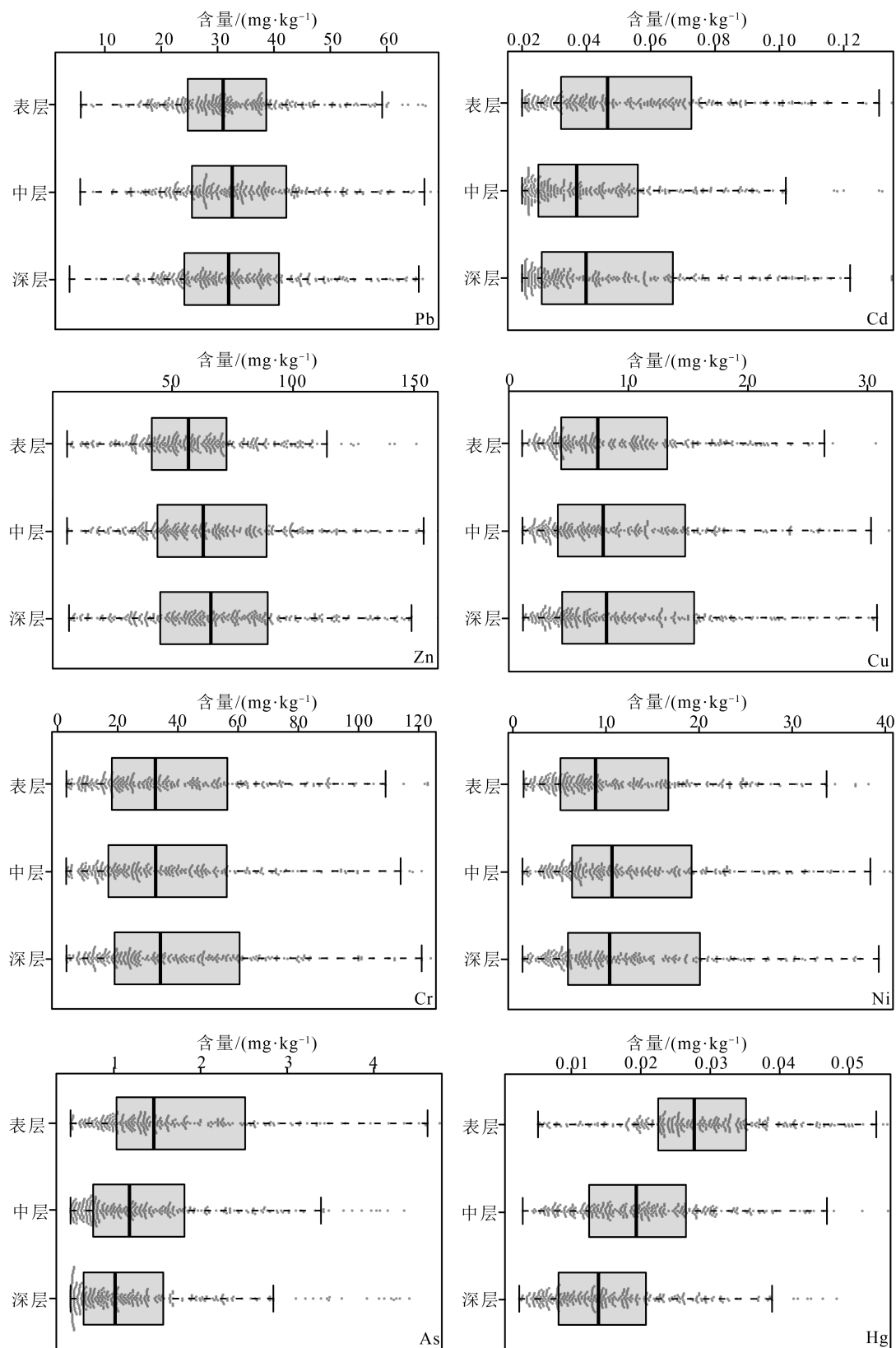


图3 不同重金属元素垂向分布特征

Fig. 3 Distributions of different heavy metals in certical direction

深层土壤受到较少的外源扰动,其重金属含量与成壤母质的相关性极高,因此,深层土壤重金属含量可作为成壤母质重金属含量的参考值。

各重金属元素在不同深度土壤含量间关系及表层土壤各元素间相关性关系如表 6 及图 4 所示。表层土壤中 As、Hg 与其他元素均不相关,与中深层土壤中 As、Hg 具有中等相关性,表现出与其他元素不同的地球化学行为或物质来源。表层土壤 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 与中深层土壤均具有较好的相关性,指示其物质来源为成壤母质。表层土壤中 Cd 与中深层土壤中 Cd 含量相关性较低,表明表层土壤中 Cd 受外来因素影响较大,而表层土壤中 Cd 与 Pb、Zn 具有较好的相关性,表明表层土壤中 Pb、Zn 部分受到外源影响。

2682 件表层土壤 KMO 抽样适度测定值为 0.613(大于 0.5),巴特利球星度检验 $P<0.05$,较适宜进行因子分析。对经极大方差标准化的表层土壤重金属元素进行因子分析,提取特征根大于 1 的因子,经旋转后主成分矩阵见表 6。共提取 4 个主成分,提取的主成分总方差贡献率为 77.96%(表 7;图 5)。

第一主成分贡献率为 31.89%,Ni、Cr、Cu、Zn 具有较高荷载,荷载系数分别为 0.93、0.87、0.76、0.49。Ni、Cr、Cu、Zn 一般在暗色矿物,如辉石、角闪石中含量较高,主要与成壤母质中暗色矿物的含量关系密切^[29]。第二主成分贡献率为 20.71%,Pb、Cd、Zn 荷载系数分别为 0.82、0.79、0.61。Pb、Cd、

Zn 元素更容易在花岗岩或其他长英质岩石中富集^[30-31],考虑到研究区地质背景为花岗岩区,所以,该地区土壤中 Pb、Cd、Zn 很可能更多来源于花岗岩风化,但是,表层土壤中 Cd 与中深层土壤中 Cd 相关性较低,表明其继承成壤母质较少,与此同时,表层土壤中 Cd 变异系数高达 4.66,变异系数越大,元素在土壤中分布越不均匀,受人类活动影响越大。研究表明,Cd 一般可作为施用农药、化肥等农业活动的标识元素^[32-33]。因此,第二主成分中的 3 种元素可能代表了同时受到成壤母质及人为因素影响。第三主成分贡献率为 12.84%,Hg 荷载系数为 0.96,表层土壤 Hg 与深层土壤 Hg 具有较高的相关性(0.45),因此,表层土壤中部分 Hg 可能来源于成壤母质。Hg 是唯一能在大气中以蒸汽形态存在的元素,具有较高蒸汽压和较长滞留时间,并容易沿裂隙自地下深处迁移至地表^[5]。其独特的迁移特征或许是其与其他重金属元素不相关的原因,亦可能与城市化进程、燃料燃烧、大气沉降相关^[34-36]。第四主成分贡献率为 12.52%,As 荷载系数为 0.99,表层土壤 As 与深层土壤 As 具有一定的相关性,但相关系数较低(0.24),表明其受人为因素影响更大。研究区 P 较缺乏,且缺乏区域面积达总面积的 83.98%(未刊数据),过多的使用磷肥可能是研究区表层土壤中 As 富集的一个重要原因^[37]。

3.5 重金属污染程度分析

以海南岛土壤总体地球化学基准值为评价标准,利用地累计指数对研究区土壤重金属污染程度进

表 6 各重金属元素在不同深度土壤中含量相关性

Table 6 Correlation between heavy metals in topsoil and subsoil

元素	Pb-B	Pb-Z	元素	Zn-B	Zn-Z
Pb-Z	0.78 **		Zn-Z	0.74 **	
Pb-S	0.52 **	0.62 **	Zn-S	0.63 **	0.86
元素	Cd-B	Cd-Z	元素	Cu-B	Cu-Z
Cd-Z	0.29 **		Cu-Z	0.81 **	
Cd-S	0.15 **	0.93 **	Cu-S	0.66 **	0.88 **
元素	Cr-B	Cr-Z	元素	Ni-B	Ni-Z
Cr-Z	0.73 **		Ni-Z	0.80 **	
Cr-S	0.72 **	0.87 **	Ni-S	0.74 **	0.90 **
元素	As-B	As-Z	元素	Hg-B	Hg-Z
As-Z	0.53 **		Hg-Z	0.55 **	
As-S	0.24 **	0.75 **	Hg-S	0.45 **	0.72 **

注:**表示在 0.01 级别相关性显著;元素符号后“-B”、“-Z”、“-S”分别代表表层、中层、深层土壤

表 7 因子分析旋转成分矩阵

Table 7 Rotated matrix of factor analysis

元素	成分				%
	1	2	3	4	
Ni	0.93	-0.01	-0.04	-0.04	
Cr	0.87	-0.07	-0.10	-0.05	
Cu	0.76	0.06	0.19	0.15	
Cd	0.05	0.82	-0.06	-0.08	
Pb	-0.17	0.79	-0.01	0.08	
Zn	0.49	0.61	0.27	0.07	
Hg	0.01	-0.01	0.96	-0.02	
As	0.03	0.01	-0.01	0.99	
特征值	2.55	1.66	1.03	1.00	
方差百分比	31.89	20.71	12.84	12.52	
累积方差解释率	31.89	52.61	65.44	77.96	

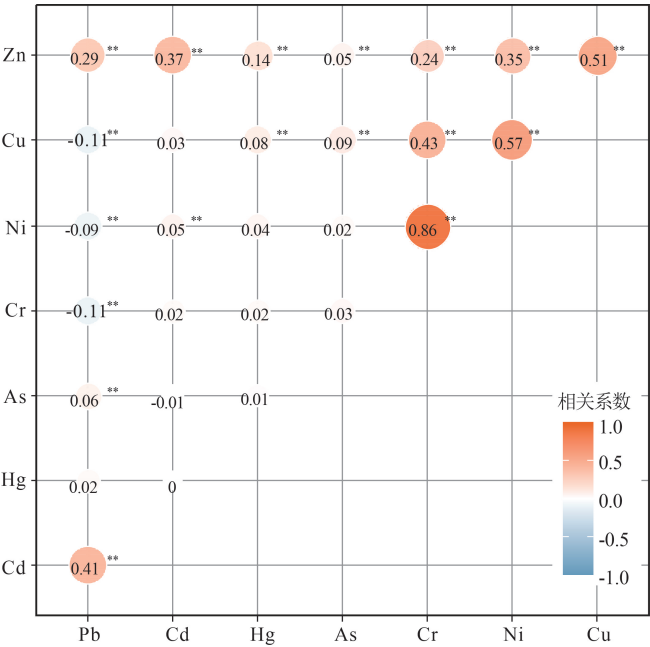


图 4 表层土壤中各重金属元素间相关性
(** 表示在 0.01 级别显著相关)

Fig. 4 Correlation between heavy metals in topsoil

行评价(表 8)。各重金属元素地累积指数均值由高至低依次为: $Hg > As > Ni > Pb > Cu > Cd > Zn > Cr$ 。其中,仅 Hg 地累积指数均值超过 0。不同地块单元中各元素地累积指数除 Hg 外,无污染地块面积均超过研究区总面积的 50%,无污染及轻微污染面积占研究区总面积的 80% 以上。 As 元素地累积指数达到 4、5、6 级的土地面积占研究区总面积的 3.83%。总体看,研究区土壤重金属污染不严重,仅有零星分

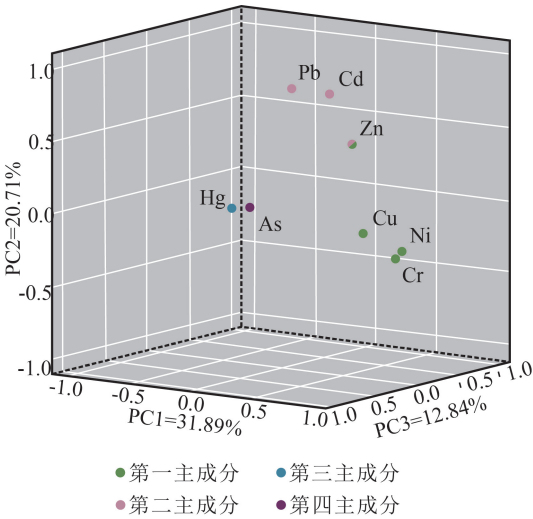


图 5 因子载荷图

Fig. 5 Factor loading graph

布的土壤 As 达到重-极重污染、极重污染级。研究区各重金属元素中污染及以上级别污染呈分散式“点状”分布。

3.6 重金属潜在生态风险评价

生态风险评价显示(表 9), Cd 和 Hg 为主要危害元素, Cd 以轻微-中等危害为主, Hg 以中等-强风险为主。其余元素危害指数均为轻微级,仅有零星面积土地为中等及以上风险等危害。研究区 52% 的土壤总体潜在生态危害指数处于轻微级别, 96% 的土壤中总体潜在生态危害指数在中等以下。总体看,研究区生态风险非常小,但需注意 Cd 、 Hg 的生态风险防控。

表 8 土壤重金属污染地累积指数分级

Table 8 The classification of heavy metals in soil based on the I_{geo}

重金属	指数均值	各级面积/km ²						
		无污染	轻污染	中污染	中-重污染	重污染	重-极重污染	极重污染
Cu	-0.25	160.57	87.41	26.16	3.20	0.40	0.00	0.00
Pb	-0.23	194.08	80.29	3.06	0.27	0.04	0.00	0.00
Zn	-0.28	184.53	89.47	3.71	0.02	0.00	0.00	0.00
Cr	-0.29	165.71	78.08	27.28	4.57	1.38	0.49	0.21
Ni	-0.18	158.19	81.15	31.70	5.03	1.43	0.20	0.03
Cd	-0.26	176.85	87.56	12.74	0.54	0.02	0.00	0.02
As	-0.08	180.65	50.77	22.75	12.93	7.95	2.21	0.47
Hg	0.08	123.08	140.37	13.18	1.11	0.00	0.00	0.00

表 9 土壤重金属的潜在生态危害指数统计

Table 9 Potential ecological risk coefficient for every heavy metal in soil

危害指数	重金属	分布范围		各级面积/km ²				
		最小值	最大值	轻微	中	强	很强	极强
Ei	Cu	0.82	104.92	276.09	1.37	0.27	0	0
	Pb	1.18	95.03	277.69	0.02	0.02	0	0
	Zn	0.15	11.25	277.73	0	0	0	0
	Cr	0.22	153.34	276.83	0.58	0.32	0	0
	Ni	0.79	337.02	274.44	3.05	0.15	0.06	0.03
	Cd	14.63	11400.00	156.71	99.07	20.73	1.14	0.08
	As	3.73	783.58	243.43	18.21	10.06	4.5	1.53
	Hg	10.40	344.00	33.78	171.88	65.18	6.79	0.11
RI		36.06	11634.76	142.19	123.2	11.56	0.77	0.02

4 结 论

(1)研究区表层土壤中 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As、Hg 八种重金属元素均值均高于海南岛土壤重金属背景值,表现出不同程度的积累。

(2)除 Pb、Zn 外,不同土地利用类型及种植类型对表层土壤重金属富集影响较大;研究区人类活动并不是表层土壤重金属富集的主要因素,不同农作物对重金属的富集,以及农业生产过程中化肥、农药的施用才是影响表层土壤重金属含量的主要原因。

(3)研究区表层土壤中 Cu、Cr、Ni 主要受地质背景影响,其余 5 种元素均受地质背景及人为因素影响。

(4)地累积指数显示,8 种金属元素地累积指数均值除 Hg 外,均小于 0(Hg 仅为 0.08),总体呈无污染—轻微污染,无污染或轻微污染面积达研究区总面积的 80% 以上。

(5)生态风险评价显示,Cd 和 Hg 为主要危害元素,Cd 以轻微—中等危害为主,Hg 以中等—强风险为主。其余元素危害指数均为轻微级。研究区 52% 的土壤总体潜在生态危害指数处于轻微级别,96% 的土壤中总体潜在生态危害指数在中等以下,总体生态风险较小。

致谢:感谢项目组所有成员的野外付出,感谢评审专家对本文提出的宝贵意见。

参考文献

[1] Ali L, Rashid A, Khattak S A, et al. Geochemical control of potential

toxic elements(PTEs), associated risk exposure and source apportionment of agricultural soil in Southern Chitral, Pakistan [J]. Microchemical Journal, 2019, 147: 516–523.

[2] Timofeev I, Kosheleva N, Kasimov N. Health risk assessment based on the contents of potentially toxic elements in urban soils of Darkhan, Mongolia[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 242: 279–289.

[3] Cao S, Duan X, Zhao X, et al. Health risks from the exposure of children to As, Se, Pb and other heavy metals near the largest coking plant in China [J]. Science of the Total Environment, 2013, 472C: 1001–1009.

[4] Zhang X, Yang L, Li Y, et al. Impacts of lead/zinc mining and smelting on the environment and human health in China [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2012, 184(4): 2261–2273.

[5] 刘广深, 曾毅强, 洪业汤. 陆地生态系统中汞的迁移与富集研究的重要意义[J]. 矿物岩石地球化学通讯, 1994, (4): 216–217.

[6] 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.

[7] Lamb D T, Hui M, Megharaj M, et al. Heavy metal (Cu, Zn, Cd and Pb) partitioning and bioaccessibility in uncontaminated and longterm contaminated soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 171: 1150–1158.

[8] Mahar A, Wang P, Ali A, et al. Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review [J]. Ecotoxicology & Environmental Safety, 2016, 126: 111–121.

[9] 刘瑞平, 徐友宁, 张江华, 等. 青藏高原典型金属矿山河流重金属污染对比[J]. 地质通报, 2018, 37(12): 2154–2168.

[10] 张江华, 王葵颖, 徐友宁, 等. 小秦岭太峪水系沉积物重金属污染生态危害评价[J]. 地质通报, 2018, 37(12): 2224–2232.

[11] 李福燕, 李许明, 吴鹏飞, 等. 海南省农用地土壤重金属含量与土壤有机质及 pH 的相关性[J]. 土壤, 2009, 41(1): 49–53.

[12] 何玉生. 海口城市土壤重金属污染特征与生态风险评估[J]. 生态学杂志, 2014, 33(2): 421–428.

[13] 徐方建, 闫慧梅, 田旭, 等. 海南岛东部陆架表层沉积物重金属污染评价[J]. 中国环境科学, 2016, 36(5): 252–261.

- [14] Wang A, Wang Q, Li J, et al. Geo-statistical and multivariate analyses of potentially toxic elements' distribution in the soil of Hainan Island (China): A comparison between the topsoil and subsoil at a regional scale[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, 197: 48-59.
- [15] 湖北省地质调查院. 生态地球化学评价样品分析方法和技术要求(试行)DD 2005-03[S]. 2005.
- [16] 中国地质调查局南京地质调查中心. 多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)DZ/T 0258-2014[S]. 2014.
- [17] 中国地质大学(北京), 国土资源部土地整理中心, 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 等. 土地质量地球化学评估技术要求(试行)DD2008-06[S]. 2008.
- [18] 吴燕玉, 周启星. 制定我国土壤环境标准(汞、镉、铅和砷)的探讨[J]. *应用生态学报*, 1991, 2(4): 344-349.
- [19] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geological Journals*, 1969, 2: 109-118.
- [20] 鲍丽然, 邓海, 贾中民, 等. 重庆秀山西北部农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. *中国地质*, 2020, 47(6): 1625-1636.
- [21] Förstner U, Ahlf W, Calmano W. Sediment quality objectives and criteria development in Germany[J]. *Water Science & Technology*, 1993, 28(8): 307-316.
- [22] 崔邢涛, 栾文楼, 牛彦斌, 等. 唐山城市土壤重金属污染及潜在生态危害评价[J]. *中国地质*, 2011, 38(5): 1379-1386.
- [23] 代杰瑞, 庞绪贵, 宋建华, 等. 山东淄博城市和近郊土壤元素地球化学特征及生态风险研究[J]. *中国地质*, 2018, 45(3): 617-627.
- [24] 管后春, 李运怀, 彭苗芝, 等. 黄山城市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. *中国地质*, 2013, 40(6): 1949-1958.
- [25] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control a sediment to logical approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [26] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(2): 112-115.
- [27] Wang A, Wang Q, Li J, et al. Geo-statistical and multivariate analyses of potentially toxic elements' distribution in the soil of Hainan Island (China): A comparison between the topsoil and subsoil at a regional scale[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2018, 197: 48-59.
- [28] 张素荣, 王昌宇, 刘继红, 等. 雄安新区西南部土壤重金属污染特征及生态风险评价[J/OL]. [2021-04-25]. 地学前缘, <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2020.7.1>.
- [29] Adrie V, Bert H. Sources of Cd, Cu, Pb and Zn in biowaste[J]. *Sci. Total Environ.*, 2002, 300: 87-98.
- [30] Ottesen R T, Birke M, Finne T E, et al. Mercury in European agricultural and grazing land soils[J]. *Applied Geochemistry*, 2013, 33 (Complete): 1-12.
- [31] Martin M H. The Heavy Metal Elements: Chemistry, Environmental Impact and Health Effects[J]. *Metals Pesados*, 1990, 69(4): 354-356.
- [32] Garcia&Malz I, Millan E. Heavy metal contamination analysis of road soils and grasses from Gipuzkoa (Spain)[J]. *Environmental Technology*, 1996, 17(7): 763-770.
- [33] Gray C W, McLaren R G, Roberts A H C. The effect of long-term phosphatic fertilizer applications on the amounts and, forms of cadmium in soils under pasture in New Zealand[J]. *Nutrient Cycling in Agroeco systems*, 1999, 54: 267-277.
- [34] Sun Y, Zhou Q, Xie X, et al. Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174(1): 455-462.
- [35] Kuo T H, Chang C F, Urba A, et al. Atmospheric gaseous mercury in Northern Taiwan[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 368 (1): 10-18.
- [36] Dy W, Xj S, Sq W. Accumulation and transformation of atmospheric mercury in soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 304(1/3): 209-214.
- [37] 曾希柏, 苏世鸣, 吴翠霞, 等. 农田土壤中砷的来源及调控研究与展望[J]. *中国农业科技导报*, 2014, 16(2): 85-91.
- ① 中国地质调查局. 中国耕地地球化学调查报告(2015 年). 国土资源部中国地质调查局, 2015.
- ② 傅杨荣, 杨奕, 何玉生, 等. 中华人民共和国多目标区域地球化学调查报告-海南岛. 海南省地质调查院, 2008.