

黄山城市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价

管后春^{1,2} 李运怀² 彭苗枝² 刘道彬²

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210093; 2. 安徽省地质调查院, 安徽 合肥 230001)

摘要:以黄山市城区(屯溪区、徽州区、经济开发区)和城郊的表层土壤为研究对象,采用地积累指数法和潜在生态危害指数法对区内表层土壤重金属(As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn)污染进行了分析和评价;应用 SPSS 处理软件,采用因子分析法对表层土壤重金属元素含量数据进行分析研究。结果表明:研究区土壤重金属污染总体处于 0~2 级,8 种重金属的污染程度由强至弱依次为: $Hg > Cd > Cu > As > Zn > Cr > Pb > Ni$; 各种重金属的潜在生态危害由强至弱依次为: $Hg > Cd > As > Cu > Pb > Ni > Cr > Zn$; 潜在生态危害综合指数平均值为 211.80,表明黄山市土壤总体处于中等危害程度,其中 Hg 对潜在生态危害指数 RI 值的贡献最突出,其次是 Cd; 总体上讲,黄山土壤重金属污染及其潜在生态危害主要是由城镇区域和耕地区域内的日常生活和生产活动所致,如农业施肥、污水灌溉、工厂排污、生活垃圾局部泛滥、燃煤排放等。

关键词:重金属污染;表层土壤;地积累指数;潜在生态危害指数;因子分析

中图分类号:P66 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2013)06-1949-10

在城市化进程不断加快的今天,评价和研究城市土壤重金属污染程度,研究城市土壤重金属污染特征、污染来源以及在环境中迁移、转化机理,并对城市环境污染治理和城市进一步的发展规划提出科学建议,不仅有利于城市生态环境良性发展,有利于人类与自然和谐,也有利于人类社会健康和城市可持续发展^[1-9]。

重金属污染评价方法种类繁多,从环境地球化学角度出发,应用于土壤重金属污染评价中的有单因子指数评价法、内梅罗综合污染指数法、地积累指数法^[10]、生态危害指数法^[11],另外,还有引入富集因子的标准化方法^[12]、结合模糊数学理论产生的模糊综合评价法^[13-14]和改性灰色聚类法^[15-17]等。这些评价方法各具特色,目前尚未对这些评价方法进行分类系统化。作为多元统计数学方法之一的因子分析,根据多个实测变量之间的相互关系,运用数学变换,将多个变量转变为少数几个线性不相关的综合指标,从而简化数据处理,其目的在于对大量观测数据,用

较少的有代表性的因子来说明众多变量所提取的主要信息,提示出多个变量间的因果关系。因子分析在成因、来源问题研究上是一种非常有效的数学方法,可以用它解决很多环境问题^[18-23]。

本文就近几年中国土壤重金属评价中使用最为广泛的地积累指数评价法和生态危害指数评价法进行比较探讨;利用因子分析对黄山市土壤重金属污染来源进行评价。评价和研究黄山市土壤重金属污染程度、污染来源,对黄山市的重金属污染治理和进一步的城市规划具有参考价值和一定的现实意义。

1 研究区概况

研究区分为 3 个区域,即屯溪区、徽州区、经济开发区。其中前两者主要为沿着新安江和丰乐河展布的第四系松散沉积物,成土母质为河流冲积物;地貌为冲积平原,农田分布较广,城镇和人口也相对密集。而黄山市经济开发区主要为白垩系湖相沉积物,成土母质为红色碎屑岩;地貌为低山丘陵,林地占据

收稿日期:2012-08-14;改回日期:2013-10-15

基金项目:安徽省公益性地质项目“黄山市城市地质调查”(2009-18)资助。

作者简介:管后春,男,1979 年生,博士生,工程师,主要从事区域地质环境调查与研究工作;E-mail:guanhouchun@163.com。

了近半面积,人口也相对稀少。

2 土壤样品采集与测试

2.1 样品采集

土壤表层样品取样深度 0~20 cm,1 km² 采集 1 个单样,4 km² 组合成 1 个分析样,共采集表层土壤样点 204 个、分析测试本区表层土壤样品 51 件(含重复样 2 件)(图 1); 深层样品按照采样深度 150~

180 cm、4 km² 采集 1 个单样、16 km² 分析 1 个组合样(局部加密,1 km² 采集 1 个单样,4 km² 组合成 1 个组合样),共采集深层土壤样点 56 个、分析测试深层土壤样品 14 件。

2.2 样品分析

样品分析测试由国土资源部合肥矿产资源监督检查中心承担。Cu、Pb、Zn、Ni、Cr 用 X 荧光光谱法(XRF);Cd 用 KI-MIBK 萃取-火焰原子吸收法

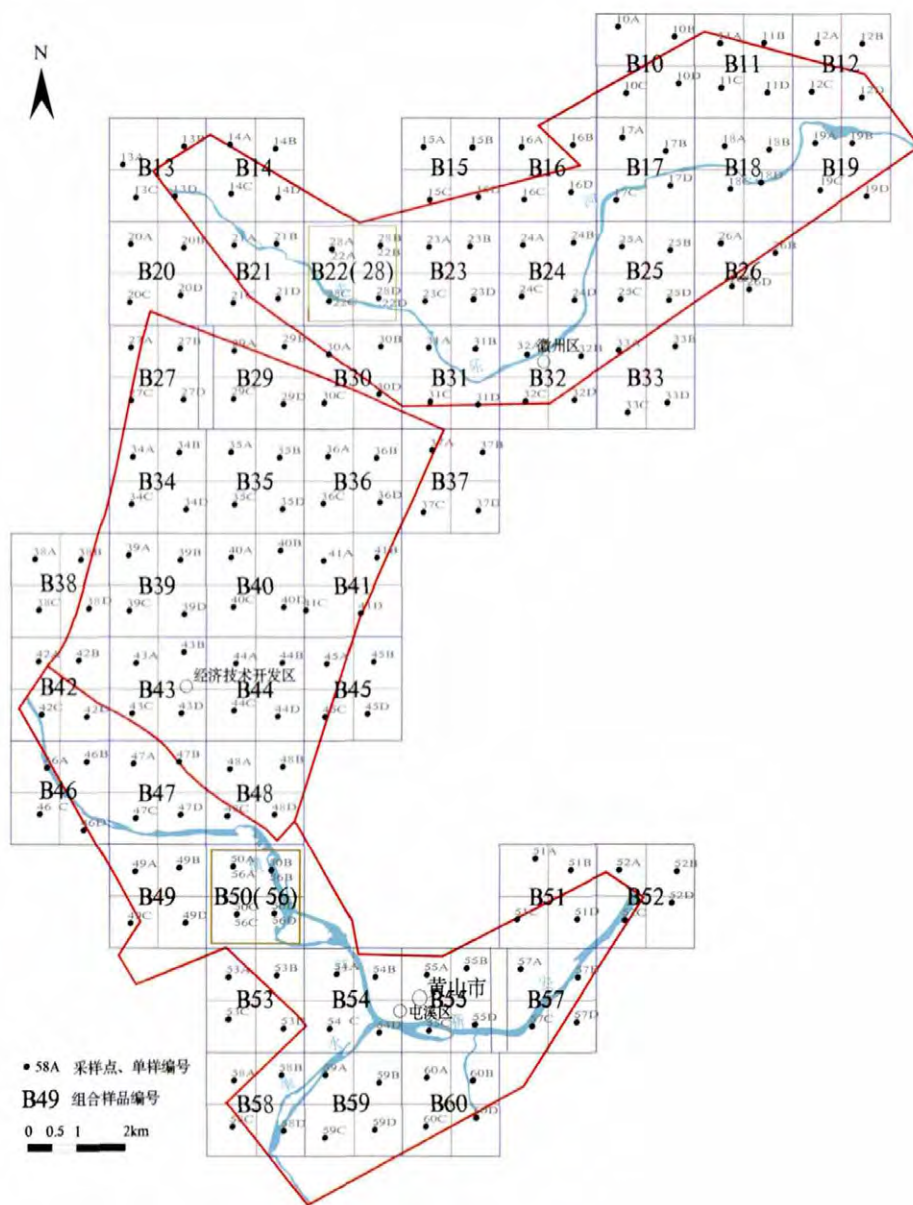


图 1 屯溪区、徽州区、经济开发区表层土壤采样点

Fig.1 Sampling location of topsoil in Tunxi District, Huizhou District and the Economic and Technological Development Zone

(AAS);Hg、As 用氢化物发生-原子荧光法(AFS)。以国家一级土壤标准物质(GBW 系列)进行准确度和精密度监控,按比例随机检查和异常点抽查进行样品分析质量监控,以重复采样、重复分析评定采样和分析误差是否对区域地球化学变化有显著影响。

3 评价方法

3.1 污染程度评价方法

地积累指数(Index of Geo-accumulation, I_{geo})是利用某一种重金属的含量与其地球化学背景值的关系来确定重金属污染程度的定量指标,由德国学者 Müller 于 1969 年提出,并被广泛应用于对沉积物中重金属污染的评价^[24-25]。评价重金属的污染,除必须考虑到人为污染因素、环境地球化学背景值外,还应考虑到由于自然成岩作用可能会引起背景值变动的因素。地累积指数法注意到了此因素,弥补了其他评价方法的不足^[26]。其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (k \times B_i)] \quad (1)$$

式中, C_i 为沉积物中某一重金属的实测含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);常数 k 是修正指数,考虑到造岩运动可能引起的背景值变动,通常用来表征沉积特征、岩石地质等其他影响,此处取 1.5^[26-28]。 B_i 为参比值,即当地母质母岩中该元素的地球化学背景值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。参比值的选择是计算 I_{geo} 值的关键,不同的参比体系会对计算结果造成较大的差异,本次研究采用调查测得的深层土壤重金属元素背景值参比值(表 1)。根据 I_{geo} 值的计算结果,重金属的污染程度共分为 7 级(0~6 级)^[29],具体如表 2 所示。

3.2 潜在生态风险评价方法

瑞典学者 Hakanson 于 1980 年提出了潜在生态

危害指数法(Risk Index, RI),该方法利用沉积物中重金属相对于工业化以前沉积物的最高背景值的比值及重金属的生物毒性系数进行加权求和得到生态危害指数,是目前较多学者采用的方法^[30-31]。潜在生态危害指数 RI 的计算方法如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n [T_i \times C_i \times C_n^i] \quad (2)$$

式中, C_i 为沉积物中重金属 i 的实测含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); C_n^i 为重金属 i 的参比值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),本文采用本次调查深层土壤重金属元素背景值作为参比值(表 1); T_i 为重金属 i 的毒性系数,此值反映了该种重金属的毒性水平; E_i 为重金属 i 的潜在生态危害系数。Hakanson(1980)根据大量数据分析,提出了上述 8 种重金属元素的生物毒性系数 T_i ($\text{Hg}=40>\text{Cd}=30>\text{As}=10>\text{Cu}=\text{Pb}=\text{Ni}=5>\text{Cr}=2>\text{Zn}=1$)和评价标准(表 3)^[32]。

3.3 因子分析研究方法

因子分析从变量的相关矩阵出发将一个 m 维的随机向量 X 分解成低于 m 个且有代表性的公因子和一个特殊的 m 维向量,使其公因子数取得最佳的个数,从而使对 m 维随机向量的研究转化成对较少个数的公因子的研究。

表 2 地积累指数与污染程度分级

Table 2 Index of geoaccumulation and classification of pollution degree

I_{geo}	级数	污染程度
≤ 0	0	无
0~1	1	无—中度
1~2	2	中度
2~3	3	中—强度
3~4	4	强度
4~5	5	强—极强
> 5	6	极强

表 1 研究区不同母质土壤重金属元素背景值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 1 Background values of soil heavy metal elements in the study area

重金属	河流冲积物			红色碎屑岩		
	背景值	标准差	变异系数	背景值	标准差	变异系数
As	9.8	4.98	0.51	6.1	0.7	0.12
Cd	0.099	0.0363	0.37	0.137	0.0208	0.15
Cr	50	11.2	0.22	53	3.6	0.07
Cu	23	6.2	0.27	22	2.8	0.13
Hg	0.0678	0.05393	0.8	0.075	0.02559	0.34
Ni	22	6.0	0.27	24	2.0	0.08
Pb	29	6.2	0.22	24	1.0	0.04
Zn	80	12.1	0.15	62	4.8	0.08

表 3 生态危害系数、指数与危害程度分级

Table 3 Ecological risk coefficient, risk index and classification of risk intensity

E_r	RI	生态危害程度
< 40	< 150	轻微
40~80	150~300	中等
80~160	300~600	强
160~320	600~1200	很强
> 320	> 1200	极强

设有 n 个样本, m 个指标构成样本空间 X :

$$X=(x_{ij})_{n \times m} \quad i=1,2,\cdots,n; j=1,2,\cdots,m$$

因子分析过程一般经过以下步骤:

(1)原始数据的标准化,标准化的公式为 $X'_{ij}=(X_{ij}-\bar{X}_j)/\delta_j$,其中 X_{ij} 为第 i 个样本的第 j 个指标值,而 \bar{X}_j 和 δ_j 分别为 j 指标的均值和标准差。标准化的目的在于消除不同变量的量纲的影响,而且标准化转化不会改变变量的相关系数;

(2)计算标准化数据的相关系数阵,求出相关系数矩阵的特征值和特征向量;

(3)进行正交变换,使用方差最大法,其目的是使因子载荷两极分化,而且旋转后的因子仍然正交;

(4)确定因子个数,计算因子得分,进行统计分析。

4 结果与讨论

4.1 土壤重金属污染程度评价

由表 4 污染地积累指数计算结果及图 2 可知,As、Cd 和 Hg 元素在部分样点受到中度污染,Hg 在个别样点受到中—强度污染。从各重金属元素平均地积累指数可以看出,黄山市土壤各种重金属的污染程度由强至弱依次为: $Hg>Cd>Cu>As>Zn>Cr>Pb>Ni$,土壤重金属污染总体处于 0~2 级。

4.2 土壤重金属污染的潜在生态风险评价

黄山市土壤 8 种重金属的潜在生态危害系数 (E_r)如表 5 所示。Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 元素在所有样点均处于轻微危害;As 元素有个别样点处于中度危害,大部分样点处于轻微危害;Cd 元素主要处于中度危害和强度危害,少部分处于轻微危害;Hg 元素也主要处于中度危害和强度危害,少部分处于轻微危害和很强危害,个别样点处于极强危害。

从各元素平均 E_r 来看,Hg 元素处于强度危害,Cd 元素处于中等危害,其他元素均处于轻微危害。黄山市土壤 8 种重金属的潜在生态危害由强至弱依次为: $Hg>Cd>As>Cu>Pb>Ni>Cr>Zn$ 。

黄山市土壤重金属污染的地积累指数和 Hakanson 生态危害系数存在差异,从 8 种重金属的污染程度排序和潜在生态危害顺序可见,主要区别在 As、Cr 和 Zn,其原因主要是重金属毒性系数的影响。As 较 Cu 具有较高的生物毒性效应 ($As=10>Cu=5$),因此,其生态风险也随之上升,而大于 Cu;Cr 和 Zn 由于毒性系数低,分别为 2 和 1,因此,其生态风险也降至最低。地积累指数法侧重于重金属含量与背景值的对比评价,主要反映外源重金属的富集程度,而 Hakanson 生态风险指数法除考虑重金属含量之外,更考虑了不同重金属的生物毒性影响,相比较而言,后者的评价结果更具实际意义^[33]。

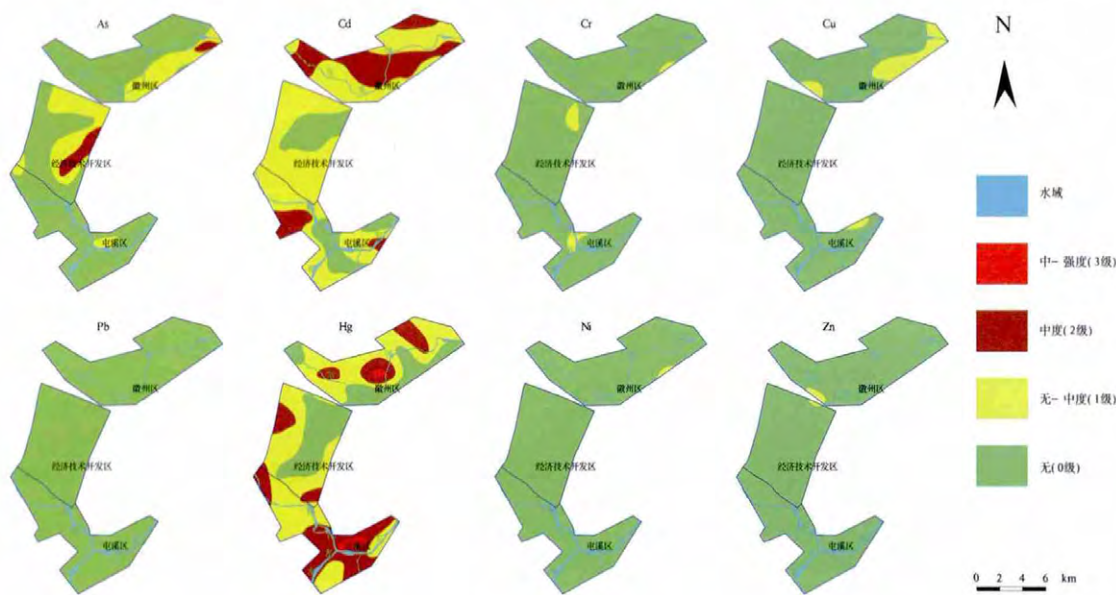


图 2 屯溪区、徽州区、经济开发区表层土壤重金属污染地积累指数的空间分布

Fig. 2 Spatial variation of heavy metal pollution based on the index of geoaccumulation of topsoil in Tunxi District, Huizhou District and the Economic and Technological Development Zone

表 4 黄山市土壤重金属污染地积累指数分级
Table 4 The classification of heavy metal pollution based on the index of geoaccumulation in the soil of Huangshan City

重金属	I_{geo}	各级样品数比例/%						
		0 级	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级	6 级
As	-0.45	79.59	14.29	6.12	0	0	0	0
Cd	0.56	20.41	51.02	28.57	0	0	0	0
Cr	-0.57	93.88	6.12	0	0	0	0	0
Cu	-0.33	87.76	12.24	0	0	0	0	0
Hg	0.57	26.53	42.86	24.49	6.12	0	0	0
Ni	-0.64	97.96	2.04	0	0	0	0	0
Pb	-0.61	100.00	0	0	0	0	0	0
Zn	-0.52	97.96	2.04	0	0	0	0	0

表 5 黄山市土壤重金属生态危害评价指数
Table 5 Ecological risk index of heavy metals in the soil of Huangshan City

重金属	E_r	各级样品数比例/%				
		轻微	中度	强	很强	极强
As	12.77	93.88	6.12	0	0	0
Cd	72.96	10.20	51.02	38.78	0	0
Cr	2.06	100	0	0	0	0
Cu	6.1	100	0	0	0	0
Hg	106.94	12.24	30.61	36.73	18.37	2.04
Ni	4.92	100	0	0	0	0
Pb	4.98	100	0	0	0	0
Zn	1.07	100	0	0	0	0

如表 6 所示,基于各元素平均含量计算的黄山市土壤的 RI 平均值为 211.80,表明黄山市土壤总体处于中等危害程度,其中 Hg 对 RI 值的贡献最突出,图 3 的形态与图 2Hg 相似度最好;其次是 Cd。计算各样点及各行政区平均 RI 值表明,屯溪区土壤 RI 值为 243.01,其中有 85.71%的样点总体处于中度危害,

14.29%的样点总体处于强度危害;徽州土壤 RI 值为 223.67,其中有 14.29%的样点总体处于轻微危害,76.19%的样点总体处于中度危害,9.52%的样点总体处于强度危害;黄山市经济技术开发区土壤 RI 值为 162.78,其中有 35.71%的样点总体处于轻微危害,64.29%的样点总体处于中度危害(图 3)。

4.3 土壤重金属污染的可能来源

黄山市土壤中 8 种重金属的空间分布和相关系数如图 2 和表 7 所示。相关性分析表明,Cu 和 Zn、Ni 及 Pb,Pb 与 Zn,Hg 与 Pb,Cr 与 Ni,Cd 与 Zn 之间都具有极显著正相关关系 ($P<0.01$);As 与 Cr、Cu、Ni、Zn,Cd 与 Cu,Cr 与 Cu,Ni 与 Zn 之间都具有显著正相关关系 ($P<0.05$)。

因子分析的关键就是利用相关系数矩阵求出相应的因子的特征值和累计贡献率,用 SPSS13.0 统计软件计算可得出,见表 8。

在累积方差为 87.766%的前提下,分析得到 3 个主因子,可以看到 3 个主因子提供了源资料的绝大部分信息,满足因子分析的原则,而且从表 8 可以看出旋转前后总的累计贡献率没有发生变化,即总

表 6 黄山市土壤重金属综合生态危害评价指数和危害程度分级
Table 6 Synthetic ecological risk index of heavy metals and classification of risk intensity in the soil of Huangshan City

黄山市城区	RI	各级样品数及比例				
		轻微	中度	强	很强	极强
屯溪区	243.01	0	12(85.71%)	2(14.29%)	0	0
徽州区	223.67	3(14.29%)	16(76.19%)	2(9.52%)	0	0
经济开发区	162.78	5(35.71%)	9(64.29%)	0	0	0

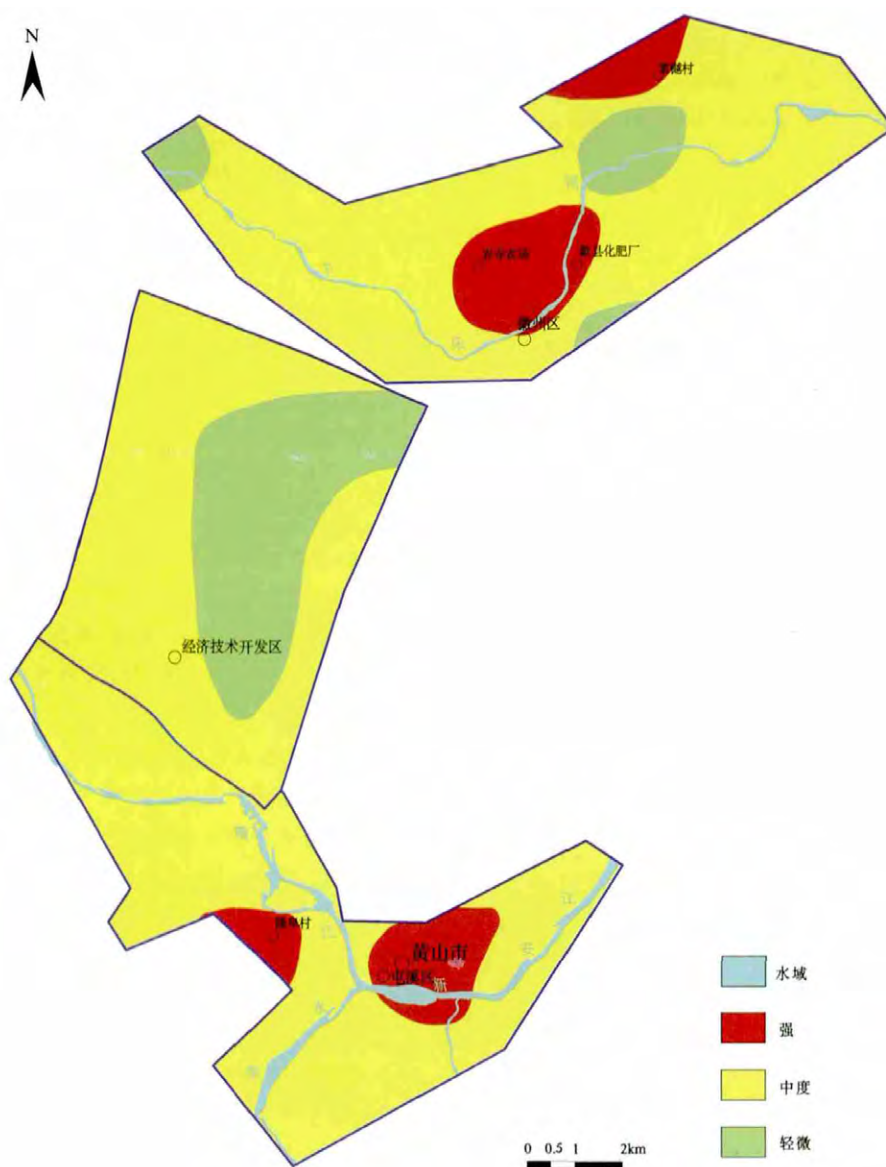


图 3 屯溪区、徽州区、经济开发区表层土壤综合生态危害等级

Fig.3 Synthetic ecological risk intensity of topsoil in Tunxi District, Huizhou District and The Economic and Technological Development Zone

的信息量没有损失。从表 7 还可得出,旋转之后,三个主因子方差贡献率均为 20%以上,这可以解释为三个因子可能为黄山市土壤重金属污染的最重要的污染源。

因子分析的主要目的是将具有相近的因子载荷的各个变量置于一个公因子之下,正交方差最大旋转使每一个主因子只与最少个数的变量有相关关系,而使足够多的因子负荷均很小,以便对因子的意

义作出更合理的解释。输出结果见表 9~10。

变量与某一个因子的联系系数绝对值(荷载)越大,则该因子与变量关系越近。由表 10 可见,正交因子解说明:因子 F1 为 Cr、Hg、Ni 和 Pb 的组合;因子 F2 为 Cu、Pb 和 Zn 的组合,与前面重金属之间的相关分析结果相一致;因子 F3 为 As 和 Cd 的组合。

上述表明,研究区土壤重金属元素可能存在共同来源,Cu、Zn 及 Pb 常被作为交通污染源的标识

表 7 土壤重金属含量的相关系数
Table 7 Correlation coefficients of heavy metal concentrations in soil

指标	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
As	1							
Cd	-0.142	1						
Cr	0.286(*)	-0.114	1					
Cu	0.285(*)	0.342(*)	0.361(*)	1				
Hg	-0.029	0.058	-0.024	0.222	1			
Ni	0.320(*)	0.143	0.893(**)	0.532(**)	0.030	1		
Pb	0.210	0.242	-0.062	0.536(**)	0.448(**)	0.082	1	
Zn	0.291(*)	0.464(**)	0.096	0.821(**)	0.236	0.311(*)	0.740(**)	1

表 8 特征值和累计贡献率
Table 8 Characteristic values and accumulative contributions

因子	初始特征值			抽去后特征值			旋转后特征值		
	总特征值	占总变量的百分率/%	累计贡献率/%	总特征值	占总变量的百分率/%	累计贡献率/%	总特征值	占总变量的百分率/%	累计贡献率/%
F1	3.783	47.283	47.283	3.783	47.283	47.283	2.932	36.644	36.644
F2	1.969	24.617	71.899	1.969	24.617	71.899	2.385	29.817	66.461
F3	1.269	15.866	87.766	1.269	15.866	87.766	1.704	21.305	87.766
F4	0.817	10.215	97.980						
F5	0.125	1.563	99.544						
F6	0.025	0.309	99.852						
F7	0.012	0.148	100.000						
F8	0.000	0.000	100.000						

表 9 旋转前因子载荷矩阵
Table 9 Factor loading matrix before rotation

指标	F1	F2	F3
As	-0.480	0.246	0.715
Cd	0.608	0.191	-0.711
Cr	-0.902	0.283	-0.071
Cu	0.311	0.896	0.044
Hg	0.570	-0.552	0.232
Ni	-0.823	0.444	-0.190
Pb	0.862	0.199	0.378
Zn	0.727	0.670	0.115

表 10 方差极大正交旋转后因子载荷矩阵
Table 10 Factor loading matrix after orthogonal rotation of maximum variance

指标	F1	F2	F3
As	0.226	0.102	0.861
Cd	-0.098	0.334	-0.889
Cr	0.864	-0.215	0.323
Cu	0.212	0.924	-0.045
Hg	-0.811	-0.148	-0.053
Ni	0.933	-0.060	0.191
Pb	-0.699	0.661	-0.005
Zn	-0.251	0.949	-0.165

元素^[34],而从图 2 可见,Cu、Zn 及 Pb 近于无污染,表明交通对当地土壤未产生明显重金属污染。农业施用的磷肥、含磷复合肥及城市垃圾、污泥为原料的肥料中均混杂有 Pb、Cu、Cd、Zn、Ni、As、Cr 等重金属^[35],因此,土壤中 As 和 Cd 的超标部分可能主要来

源于城镇区域和耕地区域内的日常生活和生产活动。从图 3 可见,强度危害区主要分布于屯溪城区、隆阜村、徽州区岩寺农场、歙县化肥厂及棠樾村。调查中发现屯溪城区有局部城市建筑垃圾和生活垃圾

乱堆现象;隆阜村和棠樾村主要为生活垃圾有乱堆放现象;徽州区岩寺农场以往为农牧业区,污染源主要为农业施肥和污水灌溉;歙县化肥厂周围强度危害主要来源于化肥厂排污和周边生活垃圾局部泛滥。此外,从图 2 可见,Hg 含量的变化基本呈现沿城乡变化方向递减的规律,这与燃煤排放可能是其重要来源及易于空间扩散的特征相符^[7],这与城区以往企业锅炉和居民生活燃煤密切相关。总之,黄山土壤重金属的潜在生态危害主要是由城镇区域和耕地区域内的日常生活和生产活动所致,如农业施肥、污水灌溉、工厂排污、生活垃圾局部泛滥等。

5 结 论

(1)黄山市土壤重金属污染总体处于 0~2 级,污染因子主要为 Hg 与 Cd;相对而言,8 种重金属的污染程度由强至弱依次为: $Hg > Cd > Cu > As > Zn > Cr > Pb > Ni$ 。

(2)黄山市土壤 8 种重金属的潜在生态危害由强至弱依次为: $Hg > Cd > As > Cu > Pb > Ni > Cr > Zn$,其中, Hg 元素处于强度危害, Cd 元素处于中等危害。

(3)黄山市土壤的潜在生态危害综合指数平均值为 211.80,表明黄山市土壤总体处于中等危害程度,其中 Hg 对 RI 值的贡献最突出,其次是 Cd。在大部分城镇区域和局部耕地区域相对偏高,表明黄山土壤重金属的潜在生态危害主要是由城镇区域和耕地区域内的日常生活和生产活动所致,如农业施肥、污水灌溉、工厂排污、生活垃圾局部泛滥、燃煤排放等。

参考文献 (References):

- [1] Li Xiangdong. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong[J]. Applied Geochemistry, 2001, 16: 1361-1368.
- [2] Imperato M, Adamo P. Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy)[J]. Environmental Pollution, 2003, 124: 247-256.
- [3] 刘应平, 喻成燕. 成都平原土壤中 Cd 的空间分布与第四纪单元响应分析[J]. 中国地质, 2012, 39(3): 804-810.
Liu Yingping, Yu Chengyan. A study of the spatial distribution and genesis of Cd in soil of Chengdu plain [J]. Geology in China, 2012, 39(3): 804-810 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王学松. 徐州城市表层土壤中重金属环境风险测度与源解析[J]. 地球化学, 2006, 35(1): 88-94.
Wang Xuesong. Environmental risk and sources of heavy metals in Xuzhou urban topsoil [J]. Geochimica, 2006, 35 (1): 88-94 (in Chinese).
- [5] 王存龙, 夏学齐, 赵西强, 等. 山东省小清河沿岸土壤重金属污染分布及迁移规律[J]. 中国地质, 2012, 39(2): 530-538.
Wang Cunlong, Xia Xueqi, Zhao Xiqiang, et al. Distribution and migration regularity of soil heavy metal pollution along the Xiaoqing watershed, Shandong Province [J]. Geology in China, 2012, 39(2): 530-538 (in Chinese with English abstract).
- [6] 陈兴仁, 陈富荣, 贾十军, 等. 安徽省江淮流域土壤地球化学基准值与背景值研究[J]. 中国地质, 2012, 39(2): 302-310.
Chen Xingren, Chen Furong, Jia Shijun, et al. Soil geochemical baseline and background in Yangtze River-Huaihe River basin of Anhui Province [J]. Geology in China, 2012, 39 (2): 302-310 (in Chinese with English abstract).
- [7] 吴绍华, 周生路, 杨得志, 等. 宜兴市近郊土壤重金属来源与空间分布研究[J]. 科学通报, 2008, 53(增刊): 162-170.
Wu Shaohua, Zhou Shenglu, Yang Dezhi, et al. Source and spatial distribution of heavy metal in soil of suburbs of Yixing [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(supp.): 162-170 (in Chinese).
- [8] 陈国光, 梁晓红, 周国华, 等. 土壤元素污染等级划分方法及其应用[J]. 中国地质, 2011, 38(6): 1631-1639.
Chen Guoguang, Liang Xiaohong, Zhou Guohua, et al. Grade division method for soil geochemical contamination and its application [J]. Geology in China, 2011, 38 (6): 1631-1639 (in Chinese with English abstract).
- [9] 王存龙, 庞绪贵, 胡圣虹, 等. 山东省烟台地区土壤重金属的生态效应——以砷为例[J]. 中国地质, 2011, 38(6): 1620-1630.
Wang Cunlong, Pang Xugui, Hu Shenghong, et al. The ecological effects of soil heavy metals in Yantai, Shandong Province: a case study of As [J]. Geology in China, 2011, 38 (6): 1620-1630 (in Chinese with English abstract).
- [10] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geochemical Journal, 1969, 2: 108-118.
- [11] Hakanson L. An ecology risk index for aquatic pollution control a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [12] 滕彦国, 倪师军, 虞先国, 等. 应用标准化方法评价攀枝花地区表层土壤的重金属污染[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 374-379.
Teng Yanguo, Ni Shijun, Tu Xianguo, et al. Application of a normalization procedure in assessing heavy metal pollution in topsoil, Panzhihua region [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(3): 374-379 (in Chinese with English abstract).
- [13] 徐华君. 土壤重金属污染评价中的模糊综合决策问题[J]. 新疆大学学报: 自然科学版, 1994, 11(4): 88-92.
Xu Huajun. The method of Fuzzy comprehensive decision-making in soil environmental quality evaluation [J]. Journal of Xinjiang University (Science & Engineering), 1994, 11(4): 88-92 (in Chinese with English abstract).
- [14] 朱青, 周生路, 孙兆全, 等. 两种模糊数学模型在土壤重金属综合污染评价中的应用与比较 [J]. 环境保护科学, 2004, 123(30): 53-57.

- Zhu Qing, Zhou Shenglu, Sun Zhaoquan, et al. Application and comparison of two Fuzzy mathematical models used in the evaluation of soil heavy metal's comprehensive pollution [J]. Environmental Protection Science, 2004, 123 (30): 53–57 (in Chinese with English abstract).
- [15] 罗厚枚, 王宏康. 用灰色聚类法综合评价土壤中重金属污染程度[J]. 北京农业大学学报, 1994, 20(2): 197–203.
- Luo Houmei, Wang Hongkang. Application of grey cluster method in comprehensive evaluation of heavy metal pollution in soil [J]. Acta Agriculture Universitatis Pekinensis, 1994, 20 (2): 197–203(in Chinese with English abstract).
- [16] 孟宪林, 沈晋, 周定. 改性灰色聚类法在土壤重金属污染评价中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1994, 26(6): 134–139.
- Meng Xianlin, Shen Jin, Zhou Ding. The application of reformed grey gathering classification method to the assessment of heavy metal pollution in the soil [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1994, 26(6): 134–139(in Chinese with English abstract).
- [17] 谢贤平, 赵玉. 用改性灰色聚类法综合评价土壤重金属污染[J]. 矿冶, 1996, 5(3): 100–104.
- Xie Xianping, Zhao Yu. Evaluation on pollution of heavy metals in soil with improved grey clustering method [J]. Mining & Metallurgy, 1996, 5(3): 100–104(in Chinese with English abstract).
- [18] 邓朝生, 尚金城, 陈鹏. 我国环境污染的因子分析 [J]. 内蒙古环境保护, 2003, 15(3): 5–8.
- Deng Chaosheng, Shang Jincheng, Chen Peng. Factor analysis of environmental pollution in China [J]. Inner Mongolia Environmental Protection, 2003, 15 (3): 5–8 (in Chinese with English abstract).
- [19] 滕彦国, 庾先国, 倪师军, 等. 攀枝花工矿区土壤重金属人为污染的富集因子分析[J]. 土壤与环境, 2002, 11(1): 13–16.
- Teng Yanguo, Tuo Xianguo, Ni Shijun, et al. Application of an enrichment factor in determining anthropogenic pollution of heavy metal in top soil [J]. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(1): 13–16(in Chinese with English abstract).
- [20] 李连科. 因子分析法用于近岸海域大气污染来源的判别[J]. 海洋环境科学, 1998, 17(1): 30–34.
- Li Lianke. Discrimination of atmosphere pollution source in sea shore by a factor analysis method [J]. Marine Environmental Science, 1998, 17(1): 30–34(in Chinese with English abstract).
- [21] 吴新民, 潘根兴. 影响城市土壤重金属污染因子的关联度分析[J]. 土壤学报, 2003, 40(6): 921–927.
- Wu Xinmin, Pan Genxing. The correlation analysis between the content of heavy metals and the factors influencing the pollution of heavy metals in urban soils in Nanjing city [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(6): 921–927(in Chinese with English abstract).
- [22] 朱万森, 陈红光, 刘志荣, 等. 应用因子分析法对地面水质污染状况的研究[J]. 复旦学报: 自然科学版, 2003, 42(3): 501–505.
- Zhu Wansen, Chen Hongguang, Liu Zhirong, et al. Study on pollutional condition of surface water by factor analysis [J]. Journal of Fudan University: Natural Science, 2003, 42 (3): 501–505(in Chinese with English abstract).
- [23] 沈家芬, 冯建军, 谢利, 等. 广州市大气能见度的特征及其影响因素分析[J]. 生态环境, 2007, 16(4): 1199–1204.
- Shen Jiafen, Feng Jianjun, Xie Li, et al. Characterization of visibility and its effect factors in Guangzhou [J]. Ecology and Environment, 2007, 16(4): 1199–1204(in Chinese with English abstract).
- [24] 弓晓峰, 陈春丽, 周文斌, 等. 鄱阳湖底泥中重金属污染现状评价[J]. 环境科学, 2006, 27(4): 732–736.
- Gong Xiaofeng, Chen Chunli, Zhou Wenbing, et al. Assessment on heavy metal pollution in the sediment of Poyang lake [J]. Environmental Science, 2006, 27 (4): 732–736 (in Chinese with English abstract).
- [25] 王金保, 王建永, 吴丹. 乐安河沉积物重金属污染现状评价[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(11): 130–133.
- Wan Jinbao, Wang Jianyong, Wu Dan. Current assessment on heavy metal pollution in the sediment of Le'an river [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31 (11): 130–133(in Chinese with English abstract).
- [26] 周秀艳, 王恩德. 辽东湾潮间带底质重金属污染地累积指数评价[J]. 安全与环境学报, 2004, 4 (2): 22–24.
- Zhou Xiuyan, Wang Ende. Method on how to apply index of geocumulation to evaluate heavy metal pollution as result of intertidal sediments in Liaodong bay [J]. Journal of Safety and Environment, 2004, 4(2): 22–24(in Chinese with English abstract).
- [27] 涂剑成, 赵庆良, 杨倩倩. 东北地区城市污水处理厂污泥中重金属的形态分布及其潜在生态风险评价 [J]. 环境科学学报, 2012, 32(3): 689–695.
- Tu Jiancheng, Zhao Qingliang, Yang Qianqian. Fractional distribution and assessment of potential ecological risk of heavy metals in municipal sludges from wastewater treatment plants in Northeast China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(3): 689–695(in Chinese with English abstract).
- [28] 张江华, 赵阿宁, 王仲复, 等. 内梅罗指数和地质累积指数在土壤重金属评价中的差异探讨——以小秦岭金矿带为例[J]. 黄金, 2010, 8(8): 43–46.
- Zhang Jianghua, Zhao Alin, Wang Zhongfu, et al. Discussion on the differences of heavy metals contamination in soil assessment with Nemerou index and geoaccumulation index with Xiaolinling gold belt as example[J]. Gold, 2010, 8(8): 43–46(in Chinese with English abstract).
- [29] Förstner U, Ahlf W, Calmano W. Sediment quality objectives and criteria development in Germany [J]. Water Science and Technology, 1993, 28(8): 307–314 (in Chinese).
- [30] 贺志鹏, 宋金明, 张乃星, 等. 南黄海表层海水重金属的变化特征及影响因素[J]. 环境科学, 2008, 29(5): 1153–1162.
- He Zhipeng, Song Jinming, Zhang Naixing, et al. Variation characteristics and controlling factors of heavy metals in the south Yellow Sea surface seawaters [J]. Environmental Science, 2008, 29 (5): 1153–1162(in Chinese with English abstract).
- [31] 孙超, 陈振楼, 毕春娟, 等. 上海市崇明岛农田土壤重金属的环

- 境质量评价[J]. 地理学报, 2009, 64(5): 619–628.
- Sun Chao, Chen Zhenlou, Bi Chunjuan, et al. Evaluation on environmental quality of heavy metals in agricultural soils of Chongming island, Shanghai[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64 (5): 619–628(in Chinese with English abstract).
- [32] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 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.
- Xu Zhengqi, Ni Shijun, Tu Xianguo, et al. Calculation of heavy metals's toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(2): 112–115(in Chinese with English abstract).
- [33] 许振成, 杨晓云, 温勇, 等. 北江中上游底泥重金属污染及其潜在生态危害评价[J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3262–3268.
- Xu Zhencheng, Yang Xiaoyun, Wen Yong, et al. Evaluation of the heavy metals contamination and its potential ecological risk of the sediments in Beijing river's upper and middle reaches [J]. Environmental Science, 2009, 30(11): 3262–3268(in Chinese with English abstract).
- [34] 肖鹏飞, 李法云, 付宝荣, 等. 土壤重金属污染及其植物修复研究[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2004, 31(3): 279–283.
- Xiao Pengfei, Li Fayun, Fu Baorong, et al. Soil contaminated by heavy metal and its phytoremediation [J]. Journal of Liaoning University (Natural Sciences Edition), 2004, 31 (3): 279–283(in Chinese with English abstract).
- [35] 王军, 陈振楼, 王初, 等. 上海崇明岛蔬菜地土壤重金属含量与生态风险预警评估[J]. 环境科学, 2007, 28(3): 647–653.
- Wang Jun, Chen Zhenlou, Wang Chu, et al. Heavy metal content and ecological risk warning assessment of vegetable soils in Chongming Island, Shanghai city [J]. Environmental Science, 2007, 28(3): 647–653(in Chinese with English abstract).

The evaluation of heavy metal pollution and its potential ecological risk of urban topsoil in Huangshan City

GUAN Hou-chun^{1,2}, LI Yun-huai², PENG Miao-zhi², LIU Dao-bin²

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China; 2. Geological Survey of Anhui Province, Hefei 230001, Anhui, China)

Abstract: In the urban and suburb areas of Huangshan City (Tunxi District, Huizhou District and the Economic and Technological Development Zone), heavy metal pollution of the topsoil and its potential ecological risk were separately analyzed and evaluated by using the index of geoaccumulation and the potential ecological risk index. With SPSS software, factor analysis of heavy metal content data in topsoil was conducted. It is indicated that heavy metal pollution of the topsoils in the study area is characterized by 0–2 degree, and the relative degree of pollution is in the order of Hg > Cd > Cu > As > Zn > Cr > Pb > Ni. Likewise, the potential ecological risk is characterized by the order of Hg > Cd > As > Cu > Pb > Ni > Cr > Zn. The average value of the synthetic potential ecological risk index is 211.80, indicating that the topsoil is in a middle potential ecological risk, with the predominant and the second risk factor being separately Hg and Cd. Comparatively speaking, heavy metal pollution of these eight elements in soils topsoil and its potential ecological risk within the areas primarily result from common life and production in urban and rural areas, such as fertilization, and irrigation with sewage, factory pollution, local flowage of life garbage and coal combustion.

Key words: heavy metal pollution; topsoil; index of geoaccumulation; potential ecological risk index; factor analysis

About the first author: GUAN Hou-chun, male, born in 1979, doctor candidate, engineer, mainly engages in investigation and study of regional geoenvironment; E-mail: guanhouchun@163.com.