

太湖流域土壤重金属污染评价与来源分析

李 想¹ 江雪昕² 高红菊¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 北京大学软件与微电子学院, 北京 102600)

摘要: 选取太湖流域为研究区,利用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对其土壤重金属污染情况进行了评价,并采用描述性统计分析、Pearson 相关分析和因子分析方法对其土壤重金属的来源进行了分析。研究表明,太湖流域土壤重金属综合污染等级均处于安全至中度污染之间,Hg、Cu 和 Zn 对其土壤环境质量造成的危害较大,其中 Hg 的影响最为深刻,起到决定作用,Cr 是唯一未对其土壤环境质量造成危害的元素;由重金属元素来源分析结果发现,太湖流域土壤中的 Hg、Cu 和 Zn 主要源自于工业源,As、Pb 和 Cd 主要源于农业上施用的化肥农药,其中 Pb 和 Cd 也同时受到自然因素的影响,Cr 的来源相对天然,未受到明显的人为因素的影响。

关键词: 太湖流域; 土壤重金属; 环境质量评价; 因子分析

中图分类号: S159.2; S151.9⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)S0-0247-07

Pollution Assessment and Source Analysis of Soil Heavy Metals in Taihu Lake Basin

LI Xiang¹ JIANG Xuexin² GAO Hongju¹

(1. College of Information and Electronic Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Software and Microelectronics, Peking University, Beijing 102600, China)

Abstract: Taihu Lake Basin was selected as the study area. The single factor pollution index and Nemerow comprehensive pollution index were used to evaluate pollution level of soil heavy metals. Descriptive statistical analysis, Pearson correlation analysis and factor analysis were used to analyze the sources of heavy metals in Taihu Lake Basin. The main conclusions were as follows: the comprehensive pollution level of soil heavy metals in Taihu Lake Basin was between safety to moderate pollution. Hg, Cu and Zn had great harm to Taihu Lake Basin's soil environmental quality and the effect of Hg was the most profound and decisive. Cr was the only element that did not pose a hazard to its soil environmental quality. The source analysis results showed that Hg, Cu and Zn in the soil of Taihu Lake Basin were mainly derived from industrial sources. As, Pb and Cd were mainly derived from agricultural fertilizer and pesticide, among which Pb and Cd were also affected by natural factors. The source of Cr was relatively natural and was not affected by obvious human factors.

Key words: Taihu Lake Basin; soil heavy metals; environmental quality assessment; factor analysis

引言

随着我国工业化和城市化的快速发展,一些污染物通过污水灌溉、大气烟尘沉降、垃圾填埋处理等各种途径进入土壤,引起土壤的污染,重金属便是土壤重要污染物之一。当土壤重金属离子含量达到一定程度,这些重金属离子将通过被植物吸收而进入

食物链,最终威胁人类身体健康。农业部曾对全国土壤调查发现,重金属超标农产品占污染物超标农产品总面积 80% 以上^[1],土壤重金属超标率更是达到了 12.1%^[2],可见,我国的总体土壤重金属污染状况十分严重。

土壤环境质量评价是土壤环境保护中的重要工作之一,国内外众多学者对土壤重金属污染评价进

收稿日期: 2017-07-13 修回日期: 2017-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(31371531)

作者简介: 李想(1983—),男,讲师,主要从事农业大数据挖掘和实时复杂事件处理研究,E-mail: cqlxiang@cau.edu.cn

通信作者: 高红菊(1972—),女,副教授,主要从事农业大数据挖掘算法研究,E-mail: hjgao@cau.edu.cn

行了研究,目前大多数研究多集中在定量评价方面,多采用单因子污染指数和内梅罗综合污染指数方法对研究区土壤重金属污染状况进行评价^[3-17]。

土壤重金属污染主要有自然影响和人为活动作用两种来源。多元描述性统计分析作为经典统计学中的一个主要分支,能够分析相互关联的多个对象和指标间的统计规律,主要有多元方差分析、直线回归、多元线性回归、因子分析、聚类分析、Shannon 信息量等。多元分析方法研究土壤重金属污染源,有助于确定元素的组合特征、解释异常成因^[18-23]。

太湖流域位于长江三角洲的南缘,自然条件优越,水陆交通便利,工农业发达,经济基础雄厚,是我国重要的产业密集区,GDP 全国贡献率超过 10%,财政贡献率更是达到 1/4 左右,是我国沿海主要对外开放地区。因此,太湖流域存在很高的土壤重金属污染潜在危险。本文选择太湖流域为研究区,对其土壤重金属污染状况进行评价并对其土壤重金属来源进行分析,为减轻和消除太湖流域的土壤重金属污染提供技术支撑。

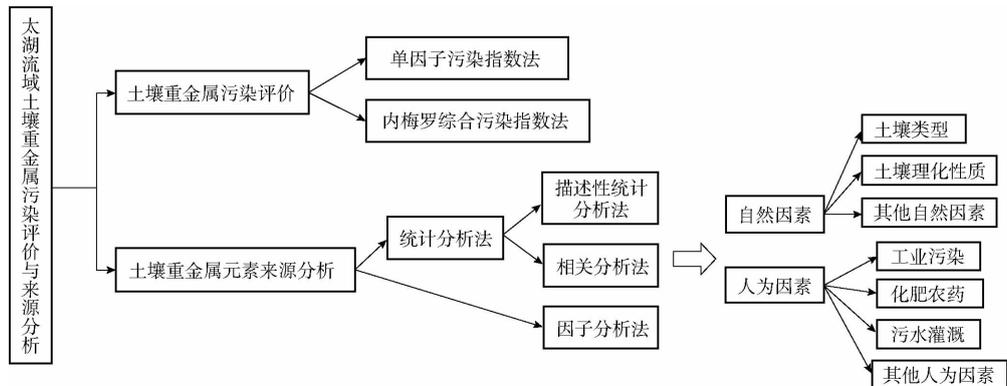


图1 研究流程图

Fig. 1 Research flowchart

的基础上从自然因素和人为因素两个方面对研究区土壤重金属元素来源进行解析。

1.3 土壤重金属污染评价方法

单因子指数法是国内进行土壤重金属污染评价普遍采用的方法,也是中国绿色食品发展中心推荐的评价方法之一。其计算公式为

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

式中 P_i ——土壤中污染物 i 的环境质量指数

C_i ——污染物 i 的实测浓度,mg/kg

S_i ——污染物 i 的评价标准,mg/kg

土壤环境质量标准为 GB15618—1995,本研究中采用二级标准。

单因子评价法需要和综合评价方法共同用于土壤重金属元素污染评价。综合评价法很多,如污染

1 材料与方法

1.1 数据集

本研究共 1 477 个采样点,分别来自太湖流域 1 477 个村落。数据分两部分,一是太湖流域土壤肥力数据,其收集了 2000 年太湖流域 1 477 个采样点的土壤肥力数据(N 含量、P 含量、K 含量、pH 值、土壤有机质含量 OM、阳离子交换容量 CEC 等);二是太湖流域土壤重金属数据,其记录了 2000 年太湖流域 1 477 个采样点土壤中 Cd、Hg、As、Cu、Pb、Zn、Cr 7 种重金属元素的含量。以上所有数据均来源于南京土壤研究所。

1.2 研究方法

研究流程如图 1 所示。土壤重金属污染评价采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法,通过将计算结果与国家规定的土壤环境质量评价标准作比较,评判太湖流域重金属元素污染等级。土壤重金属元素来源分析采用描述性统计分析法、相关分析法和因子分析法,在重金属元素来源组合分析

指数叠加法、内梅罗、权重法、最大值法等,其中内梅罗法最常用。内梅罗综合评价法同时兼顾了单因子指数平均值和最高值,具有突出污染物的作用。其计算公式为

$$P_n = \sqrt{\frac{P_{max}^2 + P_{ave}^2}{2}} \quad (2)$$

式中 P_{max} ——土壤污染物中环境质量指数最大值

P_{ave} ——土壤污染物中环境质量指数平均值

根据计算结果,对比《食用农产品产地环境质量评价标准》中规定的土壤污染分级标准,评估太湖流域 7 种土壤重金属元素的污染状况。

1.4 土壤重金属元素来源分析方法

1.4.1 统计分析法

统计分析法包括描述性统计分析和相关分析。描述性统计分析主要通过将大量数据简缩成有代表

性的指标来定量、客观地反映整体数据的特性。常用的指标有平均值、最大值、最小值、标准差、变异系数等。描述性统计分析是复杂统计分析的基础。本文使用 Pearson 相关分析方法通过计算各元素间相关系数来分析其相关性。

1.4.2 因子分析法

因子分析是从多个变量指标中选出少数几个综合变量指标的一种降维的多元统计方法。因子分析的基本步骤为:

(1)确定待分析的原有若干变量是否适于因子分析。在进行因子分析之前,需要对数据进行 KMO 和 Bartlett's 球形检验。其中 KMO 统计量用于探索变量间的偏相关性,它比较各变量间的简单相关和偏相关的大小,一般认为当 KMO 大于 0.90,进行因子分析效果最佳,0.70 以上效果尚可,0.60 时效果很差,0.50 以下不适宜进行因子分析;Bartlett's 球形检验用于检验相关阵是否是单位阵,即各变量是否各自独立。

(2)因子提取和因子载荷矩阵的求解。本次研究运用基于主成分模型的主成分分析法,主成分分析法能够为因子分析提供初始解,因子分析是主成分分析结果的延伸和拓展。

(3)利用旋转使得因子变量更具有可解释性。本次研究运用的旋转方法是最大方差法。

(4)计算因子变量得分。因子得分为因子分析的最终体现,计算各因子在每个样本上的具体数值,即为因子得分,形成的变量称为因子变量,在接下来的分析中因子变量可代替原有的变量进行数据建模,对问题降维或简化处理。

2 结果与讨论

2.1 太湖流域土壤重金属污染评价

2.1.1 单因子污染指数评价

太湖流域 7 种重金属元素单因子污染指数计算结果如表 1 所示。研究发现:太湖流域 Cr 含量的单因子污染指数均处于安全级别,As、Pb 和 Cd 含量的单因子污染指数均处于安全至警戒级之间,Cu、Zn 含量的单因子污染指数处于安全至轻度污染等级之间,Hg 含量的单因子污染指数在各个等级中均有分布。可见,Hg 元素对太湖流域土壤环境质量造成的危害最为严重,Cu、Zn 元素造成的危害较为严重,As、Pb 和 Cd 元素造成的影响较小,Cr 元素未对太湖流域土壤环境质量造成危害。

表 1 太湖流域土壤重金属单因子指数评价结果

Tab. 1 Evaluation of single factor index of soil heavy metals in Taihu Lake Basin

项目	安全(I)		警戒级(II)		轻度污染(III)		中度污染(IV)		重度污染(V)	
	样点数	比例/%	样点数	比例/%	样点数	比例/%	样点数	比例/%	样点数	比例/%
Cd 单项指数	1 475	99.86	2	0.14	0	0	0	0	0	0
Cr 单项指数	1 477	100	0	0	0	0	0	0	0	0
Cu 单项指数	1 425	96.48	49	3.32	3	0.20	0	0	0	0
Pb 单项指数	1 476	99.93	1	0.07	0	0	0	0	0	0
Zn 单项指数	1 447	97.97	29	1.96	1	0.07	0	0	0	0
Hg 单项指数	1 040	70.41	260	17.60	145	9.82	26	1.76	6	0.41
As 单项指数	1 473	99.73	4	0.27	0	0	0	0	0	0

2.1.2 内梅罗综合污染指数评价

由内梅罗综合污染指数的计算结果中发现太湖流域 15.3% 的地区遭遇了土壤重金属综合污染,其中中度污染 15 处,轻度污染 81 处,警戒级 131 处。运用 Python 将对太湖流域土壤环境质量造成较大影响的 3 个元素 Cu、Zn、Hg 的单因子污染指数评价结果及综合污染指数评价结果反映到地理坐标图上(图 2)。由图 2 可明显看出,太湖流域土壤重金属综合污染的地理分布与 Hg 污染地理分布基本相似,说明 Hg 含量对太湖流域土壤环境质量的影响较为深刻,起到决定作用。

2.2 太湖流域土壤重金属元素来源分析

众多研究表明,土壤重金属的来源有自然和人为

干扰两种。自然来源是指土壤重金属含量受成土母质和成土过程的影响,主要体现在土壤理化性质、土壤类型、土壤母质等对土壤重金属富集的影响。人为干扰来源可分为工业、交通、农业和生活污染源等^[24]。

2.2.1 描述性统计分析结果

太湖流域土壤中 7 种重金属元素含量统计属性见表 2。分析得出:研究区土壤中,7 种重金属的平均含量为:As 8.88 mg/kg, Cd 0.10 mg/kg, Cu 26.31 mg/kg, Cr 64.03 mg/kg, Pb 19.71 mg/kg, Zn 102.99 mg/kg, Hg 0.32 mg/kg。其中 As、Cd、Cu、Cr 和 Pb 元素均小于国家土壤环境质量标准(一级), Zn 略高于国家土壤环境质量标准(一级), Hg 超出国家土壤环境质量标准(一级)的 40%,表明太湖流

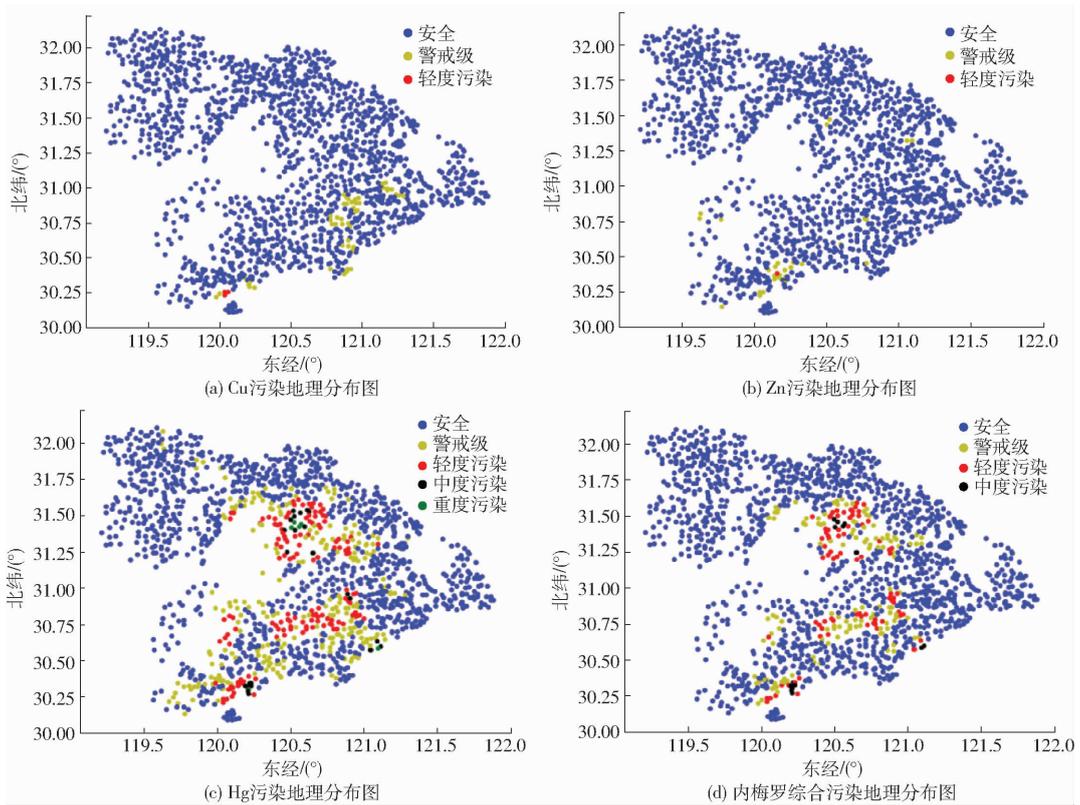


图2 太湖流域土壤重金属单因子污染及内梅罗综合污染地理分布图

Fig.2 Geographic distribution of soil heavy metals single factor pollution and Nemerow comprehensive pollution in Taihu Lake Basin

域土壤环境中存在较大程度的 Hg 污染。

变异系数是衡量一组数据中各个检验值相对离散程度的指标,可以反映总样本值的平均变异程度。由表中可以看出,研究区土壤中 7 种重金属平均变异程度由大到小为:Hg、Pb、Cd、As、Cu、Zn、Cr,其中 Hg 的变异系数最大(66.7%),属于较强程度的变异,这表明太湖流域土壤中 Hg 的分布是存在异常的,说明其土壤环境受较强外源 Hg 的影响。Cr 的变异系数小于 20%,属于弱变异,表明 Cr 的含量变化可能受到土壤母质等自然因素的影响。Cd、Cu、Pb、Zn 和 As 的变异系数处于 20%~40% 之间,属于中等变异强度,说明其在区域内受到各类因素不同程度的影响,表现出一定的不均匀性分布。

表2 太湖流域土壤重金属描述性统计分析

Tab.2 Descriptive statistical analysis of soil heavy metals in Taihu Lake Basin

重金属	最小值/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	最大值/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	平均值/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	标准差/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	变异 系数/%
Cd	0.04	0.28	0.10	0.03	30.0
Cr	29.59	113.13	64.03	10.58	16.5
Cu	16.35	93.99	26.31	5.89	22.4
Pb	3.98	33.45	19.71	7.59	38.5
Zn	51.26	200.09	102.99	21.51	20.9
Hg	0.05	1.20	0.21	0.14	66.7
As	3.19	22.58	8.88	2.09	23.5

2.2.2 相关分析结果

本文共做了 2 个 Pearson 相关分析,一是太湖流域土壤重金属数据的 Pearson 相关分析,比较重金属元素之间是否存在相互依存关系,以推断重金属来源是否相似,若元素间具有强相关性,则其极有可能出自同一来源;二是太湖流域土壤肥力数据与土壤重金属数据之间的 Pearson 相关分析,比较太湖流域 7 种重金属元素的含量是否与土壤 N、P、K 含量等肥力数据有相关性,作为推断重金属来源的论据之一。

对太湖流域土壤 7 种重金属之间的相关分析见表 3。结果表明:除 Pb 与 As、Pb 与 Cd 中等相关外,其他重金属元素间的相关系数均比较小,说明 Pb、As、Cd 的来源可能相同或相似,但其他元素具有相同来源的可能性较小。

对太湖流域土壤肥力数据与土壤重金属数据之间的相关分析见表 4。结果表明:Cd 与 pH 值呈中等相关,Cd 与 P 的含量呈中等相关,As 与阳离子交换量 CEC 呈中等相关,Pb 与 N 的含量呈中等相关。通过查询资料得知,目前我国施用的化肥中,磷肥约占 20%,磷肥的生产原料为磷矿石,它含有大量有害元素 F 和 As,同时磷矿石的加工过程还会带进其他重金属 Cd、Hg、As、F,特别是 Cd,这解释了 Cd 含量与 P 含量呈中等相关的原因。而氮肥虽然整体

表 3 太湖流域土壤重金属元素间相关性分析
Tab. 3 Correlative analysis of soil heavy metals in Taihu Lake Basin

	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Hg	As
Cd	1						
Cr	-0.221 **	1					
Cu	-0.215 **	0.350 **	1				
Pb	0.567 **	-0.387 **	-0.262 **	1			
Zn	0.082 **	0.282 **	0.368 **	-0.096 **	1		
Hg	-0.097 **	0.075 **	0.340 **	-0.069 **	0.351 **	1	
As	0.216 **	-0.194 **	-0.042	0.456 **	-0.071 **	0.016	1

注: **在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

表 4 太湖流域土壤肥力数据与重金属数据相关性分析
Tab. 4 Correlative analysis of soil fertility data and heavy metal data in Taihu Lake Basin

	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Hg	As
pH 值	0.502 **	-0.031	-0.136 **	0.316 **	0.109 **	-0.276 **	-0.142 **
OM	-0.094 **	0.072 **	0.250 **	-0.327 **	0.232 **	0.328 **	-0.028
CEC	-0.022	0.069 **	0.177 **	0.294 **	0.027	0.231 **	0.555 **
N	-0.152 **	0.039	0.235 **	0.450 **	0.181 **	0.199 **	-0.160 **
P	0.454 **	0.088 **	0.030	0.108 **	0.339 **	-0.018	-0.142 **
K	-0.168 **	0.296 **	0.212 **	-0.321 **	0.263 **	0.138 **	-0.278 **

注: **在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

产生重金属元素的量较少,但其 Pb 含量较高,这解释了 Pb 含量与 N 含量呈中等相关的原因。

2.2.3 因子分析结果

本次研究的土壤重金属数据集的 KMO 和 Bartlett's 球形检验结果中,KMO 值大于 0.70,表明各重金属元素之间有相关性,适宜做因子分析,同时球形检验结果为 2 061.846,表明各重金属元素之间

并非独立,取值是有关系的,认定元素之间的共同因素较多,适宜主成分分析。

因子分析主要是将具有相近的因子载荷的多个变量置于一个公因子之下,变量在某因子上的载荷越大,则该因子与变量关系越近。对土壤重金属含量进行因子分析的结果见表 5。表中提取了特征根较大的前 3 个因子,累计贡献率大于 75%,表明这

表 5 土壤重金属含量因子分析
Tab. 5 Factor analysis of soil heavy metals

成分	初始特征值			提取平方和载荷			旋转平方和载荷		
	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%
1	2.911	41.590	41.590	2.911	41.590	41.590	2.416	34.517	34.517
2	1.671	23.870	65.460	1.671	23.870	65.460	1.477	21.103	55.620
3	0.719	10.276	75.736	0.719	10.276	75.736	1.408	20.116	75.736
4	0.651	9.295	85.032						
5	0.434	6.197	91.229						
6	0.342	4.880	96.109						
7	0.272	3.891	100						

元素	成分矩阵			元素	旋转成分矩阵		
	1	2	3		1	2	3
Pb	-0.767	0.432	0.039	Hg	0.767	0.201	-0.136
Cr	0.658	0.042	0.343	Cu	0.741	-0.170	-0.198
Cu	0.639	0.425	-0.167	Zn	0.692	-0.359	0.373
Cd	-0.600	0.450	0.525	As	0.160	0.755	0.179
As	-0.481	0.442	-0.449	Cr	0.345	-0.154	0.874
Zn	0.448	0.644	0.362	Cd	-0.106	0.642	0.598
Hg	0.385	0.585	-0.395	Pb	-0.116	0.590	0.644

注:提取方法:主成分分析;最大方差法旋转。

3个主成分可解释重金属元素的绝大多数信息。矩阵经过正交旋转后,占有率没有变化。第一主成分占了方差的34.517%,主要由Hg、Cu、Zn组成。第二主成分占了方差的21.103%,主要由As、Cd、Pb组成。第三主成分占了方差的20.116%,主要由Cr、Pb、Cd组成。

第一主成分,包括Hg、Cu和Zn,恰好是太湖流域重金属污染最严重的3个元素。由前文分析可知,太湖流域的Cu元素污染并非源于农业,可以推断太湖流域Hg、Cu和Zn元素污染均源于工业污染,因此可将此第一主成分定义为人为工业成分。在研究区域内,高含量的Cu可能主要来自电镀工业废水。Zn可能主要来自电镀、电子、塑料、电池工业排放的废水。Hg含量可能主要与冶炼、加工工业排放的废气、废水和废渣相关。

第二主成分,主要由As、Cd、Pb组成,由前文分析可知,此3种元素受化肥农药的影响很大,因此可将此第二主成分定义为人为农业成分。

第三主成分,包括Cr、Pb和Cd,此3种重金属元素的含量均较低,其中占比最大的元素Cr在前文的研究中发现是唯一未对太湖流域土壤环境质量造成危害的元素,且在描述性统计分析中被发现属于弱变异,在相关分析中亦未表现出与其他因素的较强相关性。所以由此判断,此第三主成分很可能是自然成分,Cr、Pb和Cd在区域内的分布可能与该地

区土壤背景值、土壤母质相关。

可以看到,在PCA的成分矩阵中,Pb和Cd对于后2个主成分均有贡献,由此说明这2种元素有双重成分的特性,具有人为和自然2种主要来源。

3 结论

(1)由单因子污染指数和内梅罗综合污染指数的计算结果发现:太湖流域土壤重金属综合污染等级均处于安全至中度污染之间,遭遇污染的地区占比15.3%;对太湖流域土壤环境质量造成较大危害的3种重金属元素为Hg、Cu和Zn,其中Hg的影响最为深刻,起到决定作用;Cr是唯一未对太湖流域土壤环境质量造成危害的元素。

(2)通过传统的描述性统计分析方法,结合相关分析、因子分析可以推断:对太湖流域土壤环境质量造成较大危害的3种重金属元素Hg、Cu和Zn主要源自于工业源,高含量的Cu可能主要来自电镀工业废水,Zn可能主要来自电镀、电子、塑料、电池工业排放的废水,Hg含量可能主要与冶炼、加工工业排放的废气、废水和废渣相关;对太湖流域土壤环境质量造成较小危害的As、Pb和Cd源于农业上施用的化肥农药,其中Pb和Cd也同时受到自然因素的影响;Cr的来源相对天然,未受到明显的人为因素的影响。

参 考 文 献

- 张继舟,王宏韬,倪红伟,等. 我国农田土壤重金属污染现状、成因与诊断方法分析[J]. 土壤与作物,2012,1(4):212-218. ZHANG Jizhou, WANG Hongtao, NI Hongwei, et al. Current situation, sources and diagnosis method analysis of heavy metal contamination in agricultural soils[J]. Soil and Crop,2012,1(4):212-218. (in Chinese)
- 傅国伟. 中国水土重金属污染的防治对策[J]. 中国环境科学,2012,32(2):373-376. FU Guowei. Countermeasures for water and soil heavy metal pollution in China[J]. China Environmental Science,2012,32(2):373-376. (in Chinese)
- BRUS D J, DE GRUIJTER J J, ROMKENS P F A M. Probabilistic quality standards for heavy metals in soil derived from quality standards in crops[J]. Geoderma, 2005, 128(3): 301-311.
- 孙丽,濮励杰,朱明,等. 太湖西山碧螺春茶园重金属含量分布与评价[J]. 生态与农村环境学报,2008,24(2):88-91. SUN Li, PU Lijie, ZHU Ming, et al. Distribution and evaluation of heavy metal contents in the soil of Biluochun Tea Plantations in Xishan, Taihu Lake[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2008,24(2):88-91. (in Chinese)
- 白玲玉,曾希柏,李莲芳,等. 不同农业利用方式对土壤重金属累积的影响及原因分析[J]. 中国农业科学,2010,43(1):96-104. BAI Lingyu, ZENG Xibai, LI Lianfang, et al. Effects of land use on heavy metal accumulation in soils and source analysis[J]. Scientia Agricultura Sinica,2010,43(1):96-104. (in Chinese)
- 谢婧,吴健生,郑茂坤,等. 基于不同土地利用方式的深圳市农用地土壤重金属污染评价[J]. 生态毒理学报,2010,5(2):202-207. XIE Jing, WU Jiansheng, ZHENG Maokun, et al. Evaluation of the heavy metal pollution in different agricultural soils of Shenzhen city[J]. Asian Journal of Ecotoxicology,2010,5(2):202-207. (in Chinese)
- ODEWANDE A A, ABIMBOLA A F. Contamination indices and heavy metal concentrations in urban soil of Ibadan metropolis, southwestern Nigeria[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2008, 30(3): 243-254.
- 钟晓兰,周生路,李江涛,等. 经济快速发展区土壤重金属累积评价[J]. 环境科学,2010,31(6):1608-1616. ZHONG Xiaolan, ZHOU Shenglu, LI Jiangtao, et al. Evaluation of soil heavy metals accumulation in the fast economy development

- region[J]. *Environmental Science*,2010,31(6):1608-1616. (in Chinese)
- 9 刘衍君,汤庆新,白振华,等. 基于地质累积与内梅罗指数的耕地重金属污染研究[J]. *中国农学通报*,2009,25(20):174-178.
LIU Yanjun, TANG Qingxin, BAI Zhenhua, et al. The research of heavy metals pollution in soil based on the connection of Geoaccumulation index and Nemer index[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*,2009,25(20):174-178. (in Chinese)
- 10 陈红亮,龙黔,柯杨. 遵义县农业土壤重金属镉分布特征及地质累积污染分析[J]. *核农学报*,2011,25(6):1244-1248.
CHEN Hongliang, LONG Qian, KE Yang. Distribution and geology accumulation contamination analysis of heavy metal cadmium in agricultural soil of Zunyi country[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*,2011,25(6):1244-1248. (in Chinese)
- 11 马建华,李灿,陈云增. 土地利用与经济增长对城市土壤重金属污染的影响——以开封市为例[J]. *土壤学报*,2011,48(4):743-750.
MA Jianhua, LI Can, CHEN Yunzeng. Impacts of land use and economic growth of heavy metal pollution of urban soils: a case study of Kaifeng City[J]. *Acta Pedologica Sinica*,2011,48(4):743-750. (in Chinese)
- 12 周脚根,赵春江,王纪华,等. 基于局部离群指数的土壤重金属污染评价方法[J]. *农业工程学报*,2010,26(增刊1):279-284.
ZHOU Jiaogen, ZHAO Chunjiang, WANG Jihua, et al. Local outlier index-based method to evaluate soil metal contamination [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2010,26(Supp.1):279-284. (in Chinese)
- 13 李飞,黄瑾辉,曾光明,等. 基于三角模糊数和重金属化学形态的土壤重金属污染综合评价模型[J]. *环境科学学报*,2012,32(2):432-439.
LI Fei, HUANG Jinhui, ZENG Guangming, et al. An integrated assessment model for heavy metal pollution in soil based on triangular fuzzy numbers and chemical speciation of heavy metal[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*,2012,32(2):432-439. (in Chinese)
- 14 葛康,汪明武,陈光怡. 基于集对分析与三角模糊数耦合的土壤重金属污染评价模型[J]. *土壤*,2011,43(2):216-220.
GE Kang, WANG Mingwu, CHEN Guangyi. A coupling model of set pair analysis and triangular fuzzy numbers for evaluation of soil heavy metal pollution[J]. *Soils*,2011,43(2):216-220. (in Chinese)
- 15 刘勇,岳玲玲,李晋昌. 太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. *环境科学学报*,2011,31(6):1285-1293.
LIU Yong, YUE Lingling, LI Jinchang. Evaluation of heavy metal contamination and its potential ecological risk to the soil in Taiyuan, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*,2011,31(6):1285-1293. (in Chinese)
- 16 黄治平,张克强,徐斌,等. 猪场废水灌溉农田土壤重金属污染及风险评价[J]. *环境科学与技术*,2008,31(9):132-137.
HUANG Zhiping, ZHANG Keqiang, XU Bin, et al. Heavy metal pollution and risk assessment of swine wastewater irrigation[J]. *Environmental Science & Technology*,2008,31(9):132-137. (in Chinese)
- 17 姜菲菲,孙丹峰,李红,等. 北京市农业土壤重金属污染环境风险等级评价[J]. *农业工程学报*,2011,27(8):330-337.
JIANG Feifei, SUN Danfeng, LI Hong, et al. Risk grade assessment for farmland pollution of heavy metals in Beijing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2011,27(8):330-337. (in Chinese)
- 18 王学松,秦勇. 徐州城市表层土壤中重金属元素的富集特征与来源识别[J]. *中国矿业大学学报*,2006,35(1):84-88.
WANG Xuesong, QIN Yong. Accumulation and identification of heavy metals in Xuzhou urban topsoil[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*,2006,35(1):84-88. (in Chinese)
- 19 葛敏霞,袁旭音,叶宏萌,等. 长江三角洲农灌区沉积物中重金属的污染特征及生态评价[J]. *农业环境科学学报*,2010,29(12):2398-2405.
GE Minxia, YUAN Xuyin, YE Hongmeng, et al. Pollution characteristics of heavy metals and their ecological evaluations in sediments from agricultural irrigation area of the Yangtze River Delta Region, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*,2010,29(12):2398-2405. (in Chinese)
- 20 乔胜英,李望成,何方,等. 漳州市城市土壤重金属含量特征及控制因素[J]. *地球化学*,2005,34(6):97-104.
QIAO Shengying, LI Wangcheng, HE Fang, et al. Characteristics and controlling factors of heavy metal contents in urban soils in Zhangzhou City, Fujian Province[J]. *Geochimica*,2005,34(6):97-104. (in Chinese)
- 21 王雄军,赖健清,鲁艳红,等. 基于因子分析法研究太原市土壤重金属污染的主要来源[J]. *生态环境*,2008,17(2):671-676.
WANG Xiongjun, LAI Jianqing, LU Yanhong, et al. Main source of soil heavy metal pollution based on factor analysis in Taiyuan [J]. *Ecology and Environmental Sciences*,2008,17(2):671-676. (in Chinese)
- 22 肖思思,黄贤金,彭补拙,等. 经济发达县域耕地土壤重金属污染评价及其影响因素分析——以江苏省昆山市为例[J]. *长江流域资源与环境*,2007,16(5):674-679.
XIAO Sisi, HUANG Xianjin, PENG Buzhuo, et al. Analysis of heavy metal pollution and assessment of its environmental effect in developed areas: a case study in Kunshan of Suzhou City, Jiangsu Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*,2007,16(5):674-679. (in Chinese)
- 23 廖启林,华明,金洋,等. 江苏省土壤重金属分布特征与污染源初步研究[J]. *中国地质*,2009,36(5):1163-1174.
LIAO Qilin, HUA Ming, JIN Yang, et al. A preliminary study of the distribution and pollution source of heavy metals in soils of Jiangsu Province[J]. *Geology in China*,2009,36(5):1163-1174. (in Chinese)
- 24 陈怀满. 土壤植物系统中的重金属污染[M]. 北京:科学出版社,1996.