

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.018

巢湖流域典型农田土壤重金属污染评价与地理探测分析

肖武^{1,2} 隋涛¹ 王鑫¹ 朱琦¹ 刘瑞³ 陈翔宇³

(1. 中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所, 北京 100083; 2. 浙江大学公共管理学院, 杭州 310058;
3. 安徽省土地开发复垦整理中心, 合肥 230093)

摘要: 为了分析巢湖流域农田土壤重金属污染特点,选择位于巢湖西部的 A 村进行了实地土壤样品采集,利用 X-Ray 荧光光谱仪对 Zn、Cr、Cd、Hg、Pb、As、Cu、Ni 8 种重金属元素进行测定,利用污染指数法和潜在生态风险指数法,对土壤重金属污染程度、空间分布和潜在生态风险进行评价。为了进一步分析土壤重金属污染的来源,采用主成分分析和聚类分析对重金属来源进行分类;利用地理探测器,选择高程、距铁路距离、距村庄距离、距公路距离、距水库距离和农用地分类作为变量因子,分析其与重金属污染分布的空间相关关系。研究结果表明,A 村主要受到 Hg($P_i > 17.2$)、Cd($P_i > 10.3$) 污染;Pb、Cu、Zn、Ni 主要来自成土母质源,Hg、Cr、Cd、As 主要来自人为污染源;农用地类型($P_{D,H} = 0.405$)和铁路分布($P_{D,H} = 0.362$)对污染分布的解释力最强,Hg、Cd 污染可能来自耕地、畜禽饲养和铁路运输污染,污水灌溉也会一定程度影响重金属污染空间分布。

关键词: 土壤重金属; 空间分布; 污染指数; 地理探测器; 巢湖流域

中图分类号: X825 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)07-0144-09

Assessment and Geographical Detection of Heavy Metal Pollution
in Typical Farmland Soil in Chaohu Lake Basin

XIAO Wu^{1,2} SUI Tao¹ WANG Xin¹ ZHU Qi¹ LIU Rui³ CHEN Xiangyu³

(1. Institute of Land Reclamation and Ecological Restoration, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China
2. The Institute of Public Administration, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China
3. Anhui Provincial Land Development and Reclamation Center, Hefei 230093, China)

Abstract: In order to analyze the characteristics of heavy metal pollution in farmland soil of Chaohu Lake Basin, a village located in the west of Chaohu Lake was selected to collect soil samples in the field. The contents of heavy metals of Zn, Cr, Cd, Hg, Pb, As, Cu and Ni were determined by X-Ray fluorescence spectrometer. The pollution index method and potential ecological risk index method were used to evaluate the degree, spatial distribution and potential ecological risk of heavy metal pollution in soil. In order to further analyze the sources of soil heavy metal pollution, the sources of heavy metals were classified by principal component analysis and cluster analysis. Village DEM, railway buffer zone, village buffer zone, highway buffer zone, reservoir buffer zone and agricultural land classification were selected as variable factors to analyze their spatial correlation with the distribution of heavy metal pollution by using geographical detector. The results showed that a village was mainly polluted by Hg ($P_i > 17.2$) and Cd ($P_i > 10.3$). The main source of Pb, Cu, Zn and Ni was from the parent material of soil-forming material. The source of Hg, Cr, Cd and As was mainly from the anthropogenic source of pollution. The type of agricultural land ($P_{D,H} = 0.405$) and railway distribution ($P_{D,H} = 0.362$) had the strongest explanatory power to the distribution of pollution. The pollution of Hg and Cd may come from cultivated land, livestock and poultry breeding land and railway. Sewage irrigation would also affect the spatial distribution of heavy metal pollution to some extent.

Key words: soil heavy metals; spatial distribution; pollution index; geographic detector; Chaohu Lake

收稿日期: 2018-05-06 修回日期: 2018-05-31
基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项(201411006-05)
作者简介: 肖武(1983—),男,研究员,博士,主要从事土地复垦与生态修复、3S 技术研究,E-mail: xiaowu@zju.edu.cn

0 引言

土壤是人类赖以生存的物质基础,农用地土壤直接影响到动物、人体的健康。农业区土壤中重金属的含量、特征、来源、空间分布和净化处理等已成为相关领域专家学者的重要关注内容^[1-7]。在测得土壤重金属含量后,首先要进行污染评价,目前的评价方法主要有单因子指数法、内梅罗综合指数法、地积累指数法、污染负荷指数法、潜在生态风险指数法等^[8-10],这些方法都综合考虑多种重金属成分,然后通过不同的加权方法得出某一指数进行评价。其中内梅罗污染指数法强调区域中污染因子的极值、突出最大值,克服了平均分担各种污染物的缺陷;潜在生态风险指数法则考虑了不同元素的毒性差别以及不同区域背景值的差别,综合反映重金属的潜在危害程度,且两种方法适用普遍、简单易行,因此广泛应用于土壤重金属污染评价^[11-12]。在得到污染程度后,还要明确污染来源,污染来源主要分为自然来源和人为来源,常用的方法包括主成分分析和聚类分析^[13]等多元统计方法,进一步可用正定矩阵因子分析模型、绝对主成分得分-多元线性回归模型和化学质量平衡模型等^[14-15]对来源进行定量分析。但以上研究主要集中于数据间的数学关系,忽视了数据的空间属性,缺乏对污染来源的空间特征分析^[16-17]。

土壤重金属污染涉及到污染源、传播(扩散)路径、污染受体等多个方面,具有多元性、空间性和复杂性的特征,综合统筹分析土壤重金属含量、污染组分、污染等级和空间分布特征以及形成机理,对揭示污染的形成机理、传播与扩散路径,并提出针对性的污染防控与治理具有重要意义。为了更加全面分析土壤重金属空间分布特征与地形、土地利用、高程等自然地理影响因子之间的相关性及其交互作用,揭示农田土壤重金属空间分布的成因与机理,本文尝试引入地理探测器进行分析^[18]。

巢湖作为安徽省的重要水源地,其水体和沉积物的重金属污染来源和特征分析等方面受到广泛关注^[12,19-20]。本文选择巢湖西部典型村为研究区域,通过实地测定农用地土壤的重金属含量,并用内梅罗指数法和潜在生态风险指数法进行重金属污染评价,在评价结果的基础上,利用主成分分析和聚类分析对重金属来源进行分类,并运用地理探测器,对污染来源的空间分布进行探讨,以期为农田重金属空间分布特征与来源分析,农村用地规划提供借鉴,为农田环境治理提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

采样点位于安徽省巢湖西部某典型村落 A,距离巢湖大约 12 km。现有村民组 22 个,总人口 3 642 人,共有土地 2.44 km²,中部水库面积约 1.04 km²,西部一条货运铁路贯通南北,南部一条主干公路横穿东西。该村以传统农林业为主,土质多样,土壤肥沃,主要生产葱、黄椒、南瓜、大芋头、辣椒、茼蒿、洋菇等农产品,并拥有全县最大的苗木基地。但近年来,随着人口的增加,土地相对缺乏,人均耕地压力变大,农药、粪肥、化肥和除草剂的过量使用导致农用地土壤重金属含量急剧增加,有可能引起严重的环境问题。

1.2 样品采集及分析

采样时间为 2017 年 5 月,借助手持 GNSS 在村庄内均匀布设采样点,采样点总数 63 个,位置分布如图 1 所示。使用小木铲进行采集,采样深度 0~20 cm,采样平均步长 300 m,分样点 8 个,四分法混合均匀后剩余约 1 kg 装入聚乙烯自封袋中,低温封装带回。

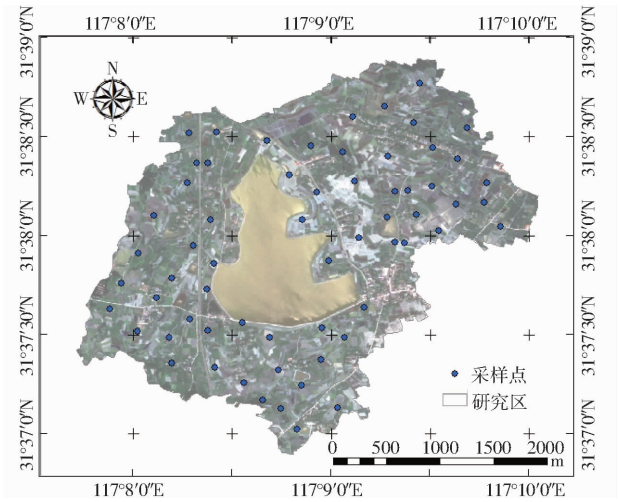


图 1 采样点分布图

Fig. 1 Distribution map of sampling point

土壤样品经干燥、除杂后,使用球磨机研磨过 100 目筛,每份土样称量 20 g 放入样品盒,使用 X-RAY 荧光光谱仪(型号 xSPOT,德国 SPECTRO 公司)测定重金属含量,且每测 5 个样品使用国家标准样(GBW07307)进行校准。

1.3 数据处理

土壤重金属值的记录、统计分析、主成分分析和聚类分析采用 Excel 2010 和 SPSS 20.0,污染评价采用单因子指数法、内梅罗综合指数法和潜在生态风险指数法,来源分析采用主成分分析和聚类分析并结合地理探测器的方法,采样点的布设采用 Google

Earth Pro,采样点分布图、重金属插值图、缓冲区分析、渔网分析、数字高程模型和农用地类型图使用 ArcGIS 10.3 制作。

1.4 评价方法

1.4.1 单因子指数法及内梅罗综合指数法

用单因子污染指数法对土壤环境质量进行评价,指数小则表明污染物累计或污染程度较轻,指数大则表明污染物累计或污染程度较重。单因子污染指数评价法公式为

$$P_i = C_i / S_i \tag{1}$$

式中 P_i ——样品中污染物 i 单因子污染指数
 C_i ——样品中污染物 i 实测浓度
 S_i ——污染物 i 的评价标准(本研究采用的评价标准是巢湖流域土壤背景值^[10-12])

表 1 单因子及内梅罗综合污染指数分级

Tab.1 Classification of single factor and Nemero integrated pollution index

土壤综合污染等级	单因子污染指数	土壤综合污染指数	污染程度	污染水平
1	$P_i \leq 0.7$	$P_N \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P_i \leq 1.0$	$0.7 < P_N \leq 1.0$	警戒限	尚清洁
3	$1.0 < P_i \leq 2.0$	$1.0 < P_N \leq 2.0$	轻污染	土壤开始受到污染
4	$2.0 < P_i \leq 3.0$	$2.0 < P_N \leq 3.0$	中污染	土壤污染明显
5	$P_i > 3.0$	$P_N > 3.0$	重污染	土壤污染严重

1.4.2 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法是由 HAKANSON^[22] 提出的定量分析污染物中特定重金属潜在生态危害的常用指标,其根据重金属危害等级的不同设置相应的毒性系数,反映出多种重金属元素的协同效应。计算公式为

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i = \sum_{i=1}^m T_r^i \frac{C_D^i}{C_R^i} \tag{3}$$

式中 RI ——综合潜在生态风险指数
 E_r^i ——第 i 种重金属的潜在生态风险系数
 T_r^i ——第 i 种重金属的毒性系数
 C_D^i ——第 i 种重金属的实测值
 C_R^i ——第 i 种重金属的背景值
 E_r^i 和 RI 与潜在生态危害等级标准见表 2^[11]。

表 2 潜在生态风险评价指标分级

Tab.2 Classification of potential ecological risk norm

潜在生态风险 系数	潜在生态风险 指数	潜在生态风险 程度
$E_r^i \leq 40$	$RI \leq 150$	轻微
$40 < E_r^i \leq 80$	$150 < RI \leq 300$	中等
$80 < E_r^i \leq 160$	$300 < RI \leq 600$	强
$160 < E_r^i \leq 320$	$600 < RI \leq 1\ 200$	很强
$E_r^i > 320$	$RI > 1\ 200$	极强

先将土壤样品的重金属含量按照克里格法进行插值,再计算整个研究区的 P_i 值,当 $P_i \leq 1$ 时,表示样品重金属含量在土壤背景含量之内,土壤环境未受污染; $P_i > 1$ 时,表示样品已超过土壤背景值,土壤环境被污染。这样不仅可以得到研究区每个点的 P_i 值,还可以获得每种元素各个污染等级的污染面积。

在单因子指数评价基础上,计算内梅罗综合污染指数,评价土壤重金属综合污染程度。内梅罗指数强调了污染最严重的重金属因子。计算公式为

$$P_N = [(P_{\max}^2 + P_{\text{avg}}^2) / 2]^{1/2} \tag{2}$$

式中 P_N ——内梅罗综合指数
 P_{avg} ——某样点样品单因子污染指数的平均值
 $P_{\max}$ ——某样点样品单因子污染指数的最大值
内梅罗综合污染指数分级见表 1^[21]。

1.4.3 地理探测器

地理探测器是一种基于变量间的空间分异性探测其内在关联的空间分析模型^[23]。农田重金属污染主要来自畜禽粪肥、化肥农药、生活垃圾堆积、地势迁移和污水灌溉等,土壤中的重金属很难得到净化,大部分都由植物吸收,然后在根、茎、叶及果实中富集,这不仅影响植物自身的生长发育,还会经由食物链累积于动物和人体,农田重金属污染对人类的影响尤为显著。为了分析农田重金属综合污染的主要来源,结合当地实际情况,以内梅罗综合污染指数作为表征指标。

土壤重金属的来源主要有两方面,一是来源于成土母质,不同的母质、成土过程所形成的土壤,其重金属含量差异明显。二是来源于人类活动,当前人类活动是土壤重金属的最主要来源。农田重金属污染的来源主要包括:工矿区与工厂场地的固体废弃物,工业“三废”排放及大气和酸雨沉降,长期不合理污灌,交通污染,汽车轮胎磨损及排放的尾气,有机肥、化肥和农药的大量施用等。综合而言,农田土壤重金属含量与人类的生产生活休戚相关,通过分析 A 村自然地理条件发现,该村土地利用主要以村庄与农用地、水域为主,研究区西部有铁路通过,区域内主要的人类活动包括村庄的生产生活垃圾、

铁路与公路的运营车辆排放,农业生产扰动等。因此,选择村庄 DEM、铁路缓冲因子、村庄缓冲因子、公路缓冲因子、水库缓冲因子和土地利用类型作为变量因子,使用其中的因子探测器和交互作用探测器,考察重金属污染与各种因素间的空间一致性,因子探测器的计算公式^[24]为

$$P_{D,H}=1-\frac{\sum_{i=1}^m n_{D,i}\sigma_{D,i}^2}{n\sigma^2}$$

(4)

式中 $P_{D,H}$ —— D 因子对内梅罗综合污染指标空间分布 H 的解释力,值越大表示 D 因子对重金属污染空间分布的影响越显著

- n ——研究区的总单元数
- $n_{D,i}$ —— D 因子中 i 分区的单元数
- σ ——研究区污染指标的总标准差
- $\sigma_{D,i}$ —— D 因子中 i 分区的标准差

交互作用探测器则用来评价两个因子叠加形成的新图层对污染指标的解释力,值越大说明两个因子的交互作用越明显,分为 5 种情况^[23]:非线性减弱: $P_{D,H}(x\cap y)<\text{Min}(P_{D,H}(x),P_{D,H}(y))$;单因子减弱: $\text{Min}(P_{D,H}(x),P_{D,H}(y))<P_{D,H}(x\cap y)<\text{Max}(P_{D,H}(x),P_{D,H}(y))$;相互独立: $P_{D,H}(x\cap y)=P_{D,H}(x)+P_{D,H}(y)$;双因子增强: $P_{D,H}(x\cap y)>$

$\text{Max}(P_{D,H}(x),P_{D,H}(y))$;非线性增强: $P_{D,H}(x\cap y)>P_{D,H}(x)+P_{D,H}(y)$ 。根据因子探测器和交互作用探测器的结果,可得出影响重金属污染分布的主导因素。

2 结果与评价

2.1 土壤重金属含量

A 村表层重金属元素含量测定结果见表 3。从样品土壤重金属元素含量的平均值和其对应的巢湖流域土壤背景值相比可以发现,Hg、Cd 元素的平均含量均明显高于其对应的背景值,比值分别为 23.00 和 15.25;Cu、Zn、Pb、Cr、Ni 元素的平均含量与背景值的比值介于 0.14~1.07 之间,与成土母质基本相同;As 元素含量略高,比值为 1.44。Hg、Cr、Pb 的变异系数均小于 0.25,说明这 3 种元素在研究区的含量变化极小;Cu、Zn、Ni 的变异系数在 0.25~0.4 之间,呈现较均匀分布;Cd 和 As 的变异系数分别为 0.44 和 0.41,略大于其他元素,说明空间分布差异较大,其污染分布可能与人类活动有关^[25]。从空间分布图(图 2)也可以看出,Cd 和 As 的空间分布不均,Cd 元素在西北部浓度最高,东部和南部也可能存在污染源;As 元素在南部浓度较高,同时中部也可能存在污染源;Hg 污染源则主要来自西南部。

表 3 土壤重金属含量测定结果

Tab.3 Determination result of heavy metals in soil

指标	Hg	Cd	Cr	Pb	Cu	As	Zn	Ni
最小值/(mg·kg ⁻¹)	1.72	2.88	7.83	18.18	4.20	2.12	27.20	7.93
最大值/(mg·kg ⁻¹)	3.68	9.59	14.60	44.40	34.94	11.98	84.26	49.07
平均值/(mg·kg ⁻¹)	2.30	4.27	10.02	26.71	15.31	5.83	42.60	21.33
标准差/(mg·kg ⁻¹)	0.37	1.87	1.66	4.34	5.29	2.38	11.06	7.13
变异系数	0.16	0.44	0.17	0.16	0.35	0.41	0.26	0.33
背景值/(mg·kg ⁻¹)	0.10	0.28	74.24	25.00	20.40	4.04	63.00	25.86
平均值与背景值比值	23.00	15.25	0.14	1.07	0.75	1.44	0.68	0.82

2.2 单因子评价及内梅罗综合污染评价结果

从单因子污染指数分布情况(图 3)可以看出,Hg($P_i>17.2$)、Cd($P_i>10.3$)在整个研究区都处于严重污染水平,其中 Hg 污染最严重区域集中于西南部,Cd 污染最严重区域集中于西北部;Cu、Zn、Pb、As、Ni 的单因子指数均介于 0~2.0 之间,仅在局部区域受到轻微污染,其中 Cu、Ni 的轻污染区位于北部,Pb、Zn 的轻污染区位于东部,As 的轻污染区则主要位于南部;Cr 的含量相对较低,未形成污染。

因此,研究区主要受 Hg、Cd 污染,从内梅罗综合污染指数的分布情况也可看出,污染最严重区域

集中在西部,同时东部也存在集中污染区,这些区域可能存在污染源,应引起有关部门重视。并且由于 Hg、Cd 的重污染影响,整个研究区的内梅罗污染指数介于 12.63~15.63 之间,均处于重污染级别。

2.3 潜在生态风险评价

A 村土壤潜在生态风险指数(RI)为 1 405.08(表 4),整个区域都处于很强或极强的潜在生态风险程度。重金属按潜在生态风险系数(E_i^r)由大到小为 Hg、Cd、As、Pb、Ni、Cu、Zn、Cr,其中 Hg(918.94)、Cd(457.54)为极强生态风险,对 RI 的平均贡献率分别为 65.40% 和 32.56%,而其余的重金属 E_i^r 均小于 40,属于微弱的潜在生态风险程度,且

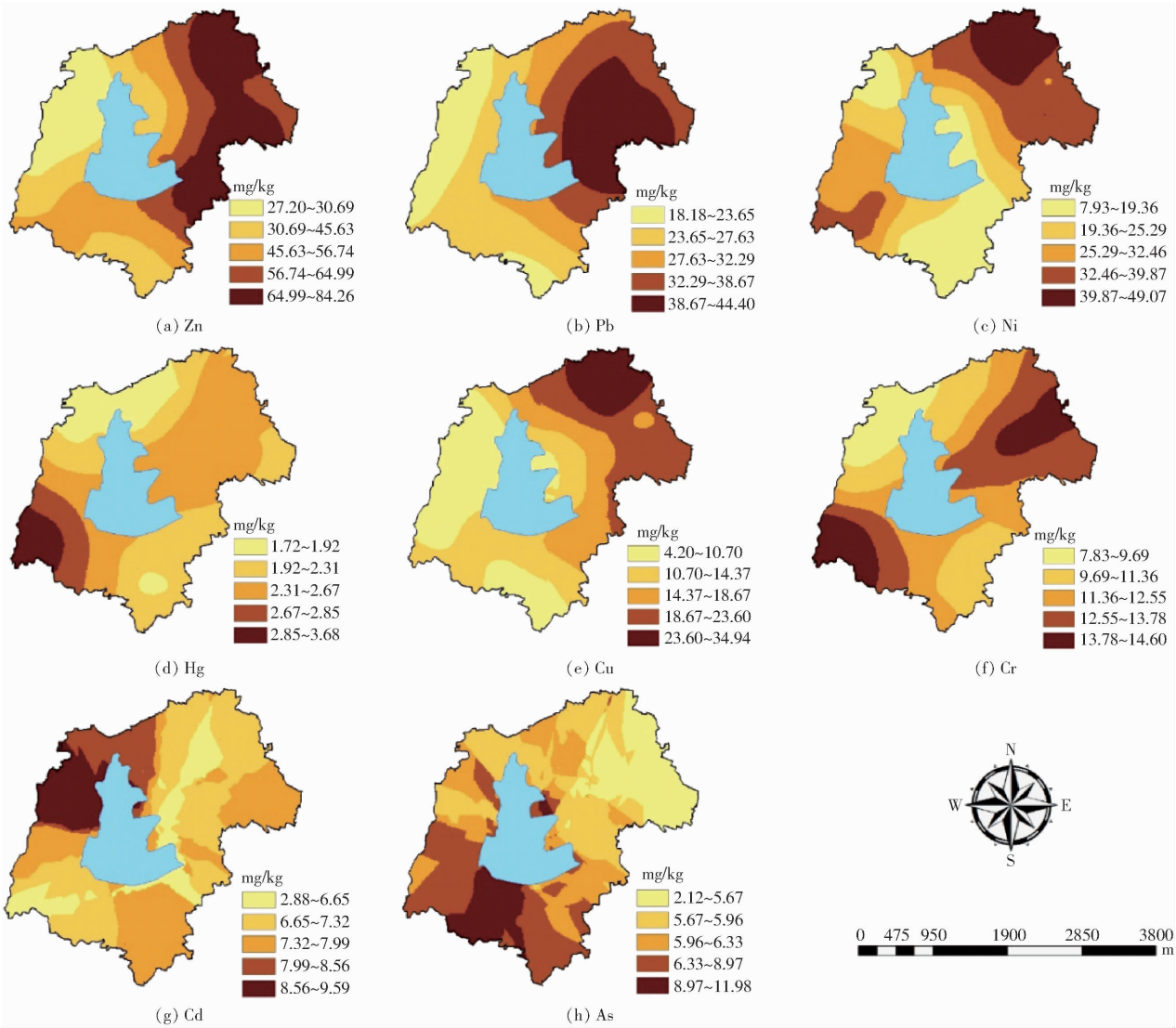


图 2 重金属含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution maps of heavy metal content

累计平均贡献率不到 3%, 同样说明 A 村极强的潜在生态风险很大程度上是由 Hg、Cd 的含量超标引起的。

2.4 主成分及聚类分析

对 8 种重金属元素含量进行主成分分析和聚类分析, 以便进一步对重金属来源进行分类。主成分分析结果(表 5 和表 6)表明, 大于 1 的特征值有 3 个, 分别为 3.106、1.845 和 1.385, 累计贡献率达 79.188%, 可提取 3 个主成分, 成分 f_1 中 Pb、Cu、Zn、Ni 的载荷较高, 其方差贡献率为 38.82%, 研究表明 Zn、Ni 主要为自然来源^[2], 因此成分 f_1 中的重金属主要来自成土母质。Hg、Cr 在成分 f_2 中的载荷较高, 贡献率为 23.06%; Cd、As 在成分 f_3 中载荷较高, 贡献率为 17.307%, 说明 f_2 和 f_3 为人为污染来源, 但具体污染物有所差别。借助主成分得分对 8 种重金属来源进行聚类分析(图 4), 主要可分为 3 类: ①Pb、Cu、Zn、Ni。②Hg、Cr。③Cd、As。其中 Pb 可

以进一步细分为一类, 同时又与 Cu、Zn、Ni 关系密切, 说明 Pb 存在多种来源。综上, 主成分分析和聚类分析在重金属来源的分类结果方面具有一致性。

2.5 地理探测器分析

环境因子包括高程、距铁路距离、距村庄距离、距公路距离、距水库距离和农用地类型, 数据来自安徽省土地勘测规划院地形图, 辅以 2016 年 4 月的 GF-2 卫星遥感数据和前期实地调查数据。高程数据和农用地类型从地形图提取, 距铁路、村庄、公路和水库距离使用 ArcGIS 10.3 中的缓冲区分析完成, 然后将所有数据投影到 Xian_1980_3_Degree_GK_Zone_39 坐标系, 并处理成 50 m × 50 m 的渔网数据(图 5), 以便地理探测器的分析。

2.5.1 因子探测器

因子探测器揭示了各个环境因子对内梅罗污染指数空间分布的解释力, 各环境因子按 $P_{D,H}$ 由大到小为: 农用地类型(0.405)、距铁路距离(0.362)、距

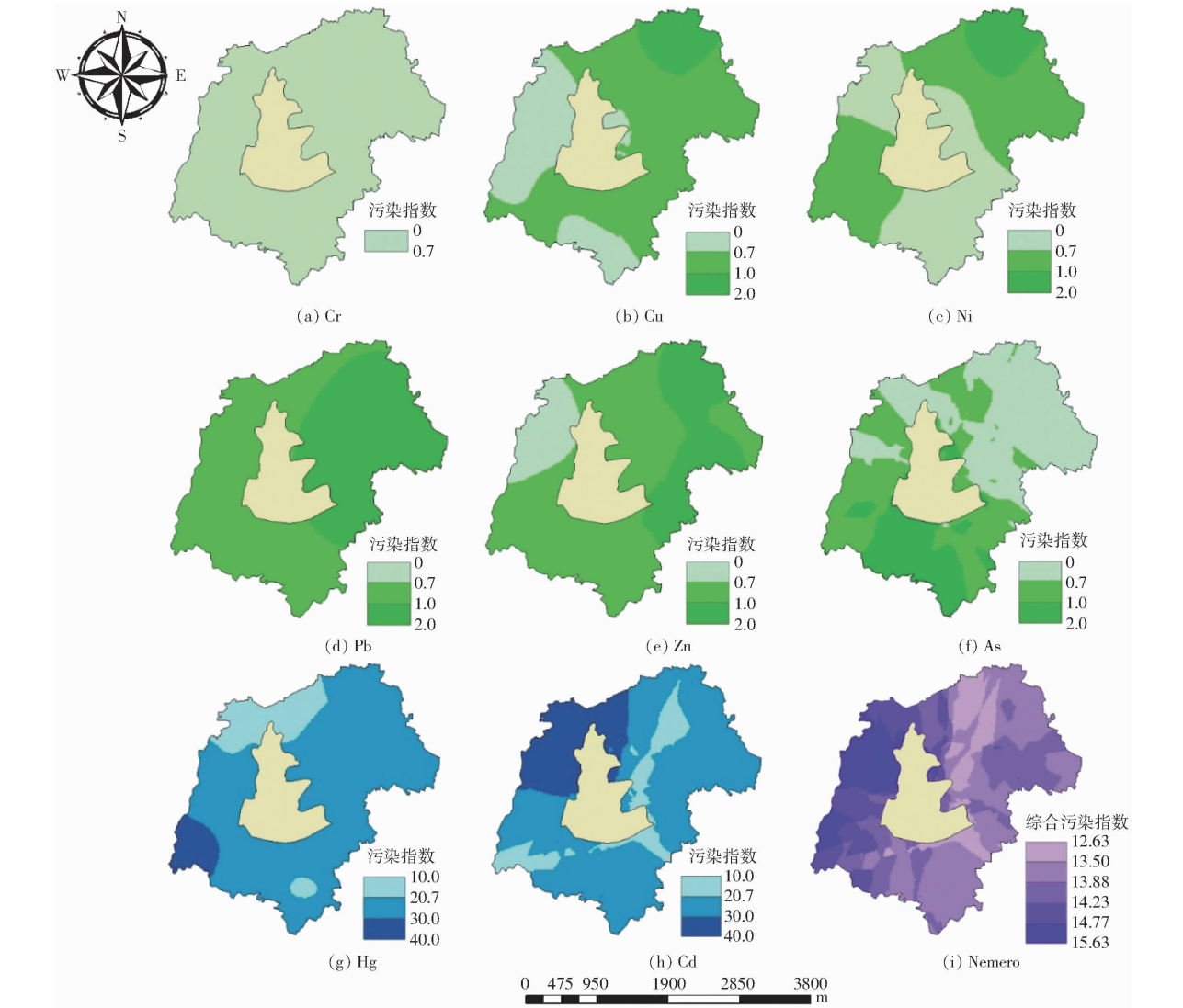


图 3 污染指数分布

Fig. 3 Distribution maps of pollution index

表 4 土壤重金属潜在生态风险系数 (E_r^i) 与风险指数 (RI)

指标	Hg	Cd	Cr	Pb	Cu	As	Zn	Ni	综合
毒性系数	40	30	2	5	5	10	1	5	
E_r^i 或 RI 范围	686.52 ~ 1 472.25	308.61 ~ 1 027.40	0.21 ~ 0.39	3.63 ~ 8.88	1.03 ~ 8.56	5.25 ~ 29.65	0.43 ~ 1.33	1.53 ~ 9.48	1 007.22 ~ 2 557.97
E_r^i 或 RI 均值	918.94	457.54	0.27	5.34	3.75	14.43	0.68	4.12	1 405.08
平均贡献率/%	65.40	32.56	0.02	0.38	0.27	1.03	0.05	0.29	100

注:平均贡献率为 E_r^i 均值与 RI 均值比值的百分数。

表 5 特征值及累计贡献率

成分	初始特征值			提取特征值			旋转特征值		
	特征值	方差贡献	累计贡献	特征值	方差贡献	累计贡献	特征值	方差贡献	累计贡献
		率/%	率/%		率/%	率/%		率/%	率/%
1	3.133	39.160	39.160	3.133	39.160	39.160	3.106	38.820	38.820
2	1.898	23.725	62.885	1.898	23.725	62.885	1.845	23.060	61.881
3	1.304	16.303	79.188	1.304	16.303	79.188	1.385	17.307	79.188
4	0.778	9.725	88.913						
5	0.438	5.476	94.390						
6	0.196	2.444	96.834						
7	0.171	2.133	98.967						
8	0.083	1.033	100						

表 6 旋转前后因子载荷矩阵

Tab.6 Factor load matrix before and after rotation						
重金属	旋转前			旋转后		
	f_1	f_2	f_3	f_1	f_2	f_3
Hg	0.215	0.868	-0.262	0.180	0.914	0.037
Cd	0.072	0.051	0.743	-0.012	-0.174	0.728
Cr	-0.183	0.873	-0.267	-0.215	0.906	-0.016
Pb	0.567	-0.283	-0.518	0.638	-0.093	-0.505
Cu	0.925	-0.221	0.038	0.929	-0.189	0.085
As	0.386	0.482	0.571	0.288	0.299	0.731
Zn	0.915	0.026	-0.098	0.916	0.087	0.028
Ni	0.941	0.132	0.087	0.914	0.133	0.238

水库距离 (0.057)、高程 (0.036)、距公路距离 (0.017)、距村庄距离 (0.010),说明农用地类型和距铁路距离对重金属污染分布的影响是比较显著的,污染最严重的西部区域对应的耕地、畜禽饲养地和铁路是 Hg、Cd 污染的重要来源。调查发现,耕地周边散落许多丢弃的除草剂、农药瓶和化肥袋,水田中普遍存在油状污染现象,从而引起 Cd 浓度的上升;畜禽粪的堆积也会造成 Cd 污染^[2];铁路为货运铁路,主要运输煤炭和金属矿物,遭遇雨雪天气可能

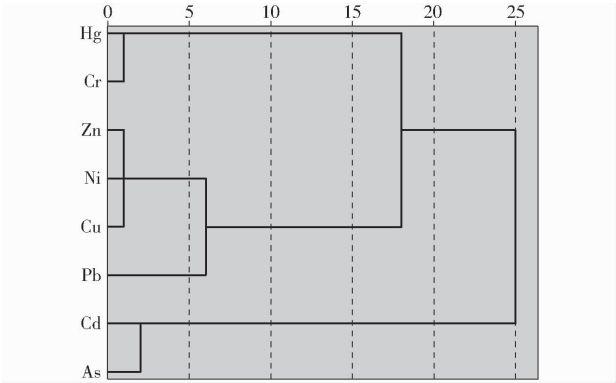


图 4 土壤重金属聚类分析结果

Fig.4 Cluster analysis result of heavy metals in soil

会造成 Cd 的溶出^[26],同时铁路的高程低于周围环境 5~6 m,燃煤列车产生的大量废气会沉降到周围环境中,从而造成 Hg 污染^[27]。

2.5.2 交互作用探测器

交互作用探测器可用来检验环境因子是独立作用还是相互作用,若是相互作用,是相互增强还是相互减弱^[28]。表 7 显示了两种环境因子叠加后的 $P_{D,H}$,值越大表明交互作用越强。模型结果表明,除

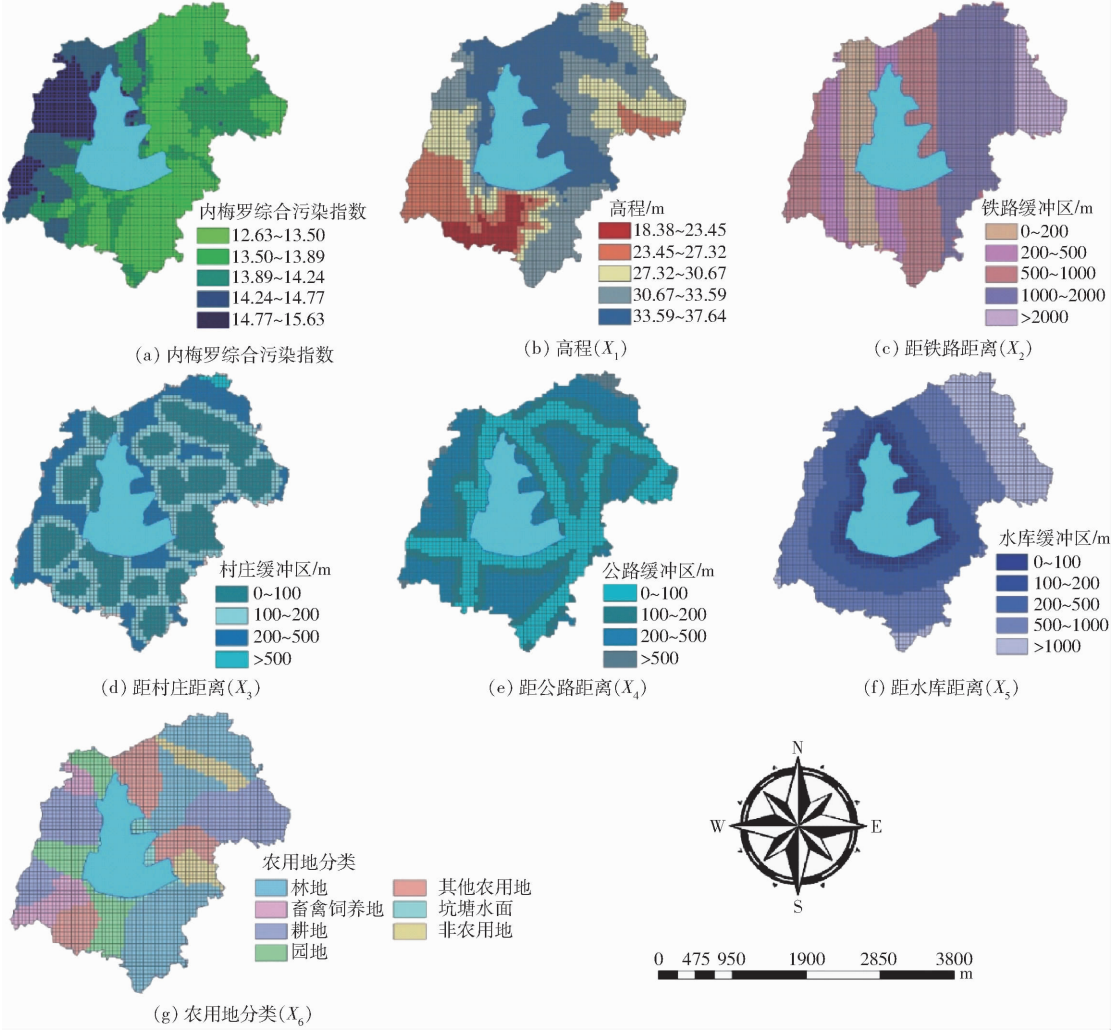


图 5 综合污染指数及环境因子分布图

Fig.5 Distribution maps of Nemero integrated pollution index and environmental factors

表 7 环境因子对污染分布的交互作用

Tab. 7 Interaction of environmental factors on pollution distribution

	高程	距铁路 距离	距村庄 距离	距公路 距离	距水库 距离	农用地 分类
高程	0.036					
距铁路距离	0.521	0.362				
距村庄距离	0.065	0.387	0.010			
距公路距离	0.074	0.382	0.037	0.017		
距水库距离	0.181	0.408	0.164	0.105	0.057	
农用地分类	0.504	0.676	0.467	0.425	0.554	0.405

距铁路距离和农用地类型是双因子增强外,其他均为非线性增强,表明各环境因子的交互作用大于单独作用,虽农用地类型和距铁路距离对重金属污染分布起主导作用(交互解释力达 0.676),但高程、村庄、水库和公路的分布也会增强农用地类型和距铁路距离对污染分布的影响程度^[29],其中高程和距水库距离对各环境因子的解释力都有显著的增强作用,说明污染来源可能与灌溉污水存在一定关联。

3 结论

(1)研究区农用地土壤重金属污染以 Hg、Cd 污

染为主,平均含量超过背景值 23.00、15.25 倍,其余 6 种重金属含量小于或接近背景值(比值小于等于 1.44),潜在生态风险程度由大到小为: Hg、Cd、As、Pb、Ni、Cu、Zn、Cr, Hg、Cd 为极强潜在生态风险程度,其余重金属为微弱的潜在生态风险程度, Hg、Cd 污染是导致整个研究区处于极强潜在生态风险的主要原因。

(2)Pb、Cu、Zn、Ni 主要来源于成土母质, Hg、Cr 和 Cd、As 两类污染均来源于人为因素,但具体污染源存在差别, Pb 有多重来源。

(3)Cd 最严重污染区 ($P_i > 30$) 位于西北部, Hg 最严重污染区 ($P_i > 30$) 位于西南部, 导致研究区西部成为最严重的综合污染区 ($P_N > 14.77$)。经地理探测器分析可知,农用地类型和距铁路距离对污染分布的解释力最强, $P_{D,H}$ 分别为 0.405 和 0.362,交互作用解释力可达 0.676,说明 Hg、Cd 污染可能来自耕地、畜禽饲养地和铁路,同时高程、水库对各环境因子有显著的增强作用,说明污水灌溉会对重金属污染空间分布产生一定的影响。

(4)Cu、Zn、Pb、As、Ni 由于重金属之间的协同作用,在局部区域土壤开始产生污染,应注意防范。

参 考 文 献

1 尹国庆,江宏,王强,等.安徽省典型区农用地土壤重金属污染成因及特征分析[J]. 农业环境科学学报,2018,37(1):96-104.
YIN Guoqing, JIANG Hong, WANG Qiang, et al. Analysis of the sources and characteristics of heavy metals in farmland soil from a typical district in Anhui Province[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(1): 96-104. (in Chinese)

2 石宁宁,丁艳锋,赵秀峰,等.某农药工业园区周边土壤重金属含量与风险评价[J]. 应用生态学报,2010,21(7):1835-1843.
SHI Ningning, DING Yanfeng, ZHAO Xiufeng, et al. Evaluation on the content and risk of heavy metals in soils around a pesticide industrial park[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(7): 1835-1843. (in Chinese)

3 杨奇勇,谢运球,罗为群,等.基于地统计学的土壤重金属分布与污染风险评价[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(12):248-254. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171229&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.029.
YANG Qiyong, XIE Yunqiu, LUO Weiqun, et al. Spatial distribution and soil pollution risk evaluation of soil heavy metals content based on geostatistics[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 248-254. (in Chinese)

4 陈志凡,赵焯,郭廷忠,等.污灌条件下重金属在耕作土壤中的积累与形态分布特征——以北京市通州区凤港减河污灌区农用地为例[J]. 地理科学,2013,33(8):1014-1021.
CHEN Zhifan, ZHAO Ye, GUO Tingzhong, et al. Accumulation and speciation distribution of heavy metals in cultivated soil under sewage irrigation—take the agricultural land of the Feng Gang Jian river sewage irrigation area in Tongzhou District, Beijing as an example[J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(8): 1014-1021. (in Chinese)

5 肖武,李素萃,梁苏妍,等.土地整治生态景观效应评价方法及应用[J]. 中国农业大学学报,2017,22(7):152-162.
XIAO Wu, LI Sucui, LIANG Suyan, et al. Evaluation and application of landscape ecological effect before and after land consolidation[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(7): 152-162. (in Chinese)

6 刘庆,王静,史衍玺,等.基于 GIS 的农田土壤重金属空间分布研究[J]. 安全与环境学报,2007,7(2):109-113.
LIU Qing, WANG Jing, SHI Yanxi, et al. Spatial distribution of heavy metals in farmland soil based on GIS[J]. Journal of Safety and Environment, 2007, 7(2): 109-113. (in Chinese)

7 朱琦,肖武,张瑞娅,等.淮南潘集矿区土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 煤炭技术,2018,37(3):76-79.
ZHU Qi, XIAO Wu, ZHANG Ruiya, et al. Pollution and potential ecological risk assessment of soil heavy metals in Huainan Panji mining area[J]. Coal Technology, 2018, 37(3): 76-79. (in Chinese)

8 王莉君,吴思麟.南京黑臭河道底泥污染特征及评价[J]. 科学技术与工程,2018,18(3):117-122.
WANG Lijun, WU Silin. Pollution characteristics and contamination assessment of sediment from black-odor rivers in Nanjing city[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(3): 117-122. (in Chinese)

9 李保杰,王思宇,周生路,等.田块尺度下农田重金属污染特征及其源汇关系响应解析[J]. 农业工程学报,2018,34(6):204-209.
LI Baojie, WANG Siyu, ZHOU Shenglu, et al. Heavy metal pollution characteristics and its response of source-sink relationship in

- agricultural soil at field scale[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(6):204–209. (in Chinese)
- 10 丁之勇,蒲佳,吉力力·阿不都外力. 中国主要湖泊表层沉积物重金属污染特征与评价分析[J]. 环境工程,2017,35(6):136–141,102.
DING Zhiyong, PU Jia, JILILI Abuduwalli. Heavy metal contamination characteristics and its assessment in surface sediments of major lakes in China[J]. Environmental Engineering, 2017,35(6):136–141,102. (in Chinese)
- 11 秦先燕,彭苗枝,胡波,等. 巢湖北部土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 中国科学技术大学学报,2017,47(5):426–434.
QIN Xianyan, PENG Miaozhi, HU Bo, et al. Heavy metal pollution characteristics and ecological risk assessment for soil in northern Chaohu Lake[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2017,47(5):426–434. (in Chinese)
- 12 孔明,董增林,晁建颖,等. 巢湖表层沉积物重金属生物有效性及生态风险评价[J]. 中国环境科学,2015,35(4):1223–1229.
KONG Ming, DONG Zenglin, CHAO Jianying, et al. Bioavailability and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Lake Chaohu[J]. China Environmental Science, 2015,35(4):1223–1229. (in Chinese)
- 13 吕雪娇,肖武,李素萃,等. 基于 GIS 与灰色星座聚类的巢湖流域土地整治分区[J]. 农业工程学报,2018,34(6):253–262.
LÜ Xuejiao, XIAO Wu, LI Sucui, et al. Land reclamation zoning of Chaohu Lake Basin based on GIS and grey constellation clustering[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(6):253–262. (in Chinese)
- 14 李娇,陈海洋,滕彦国,等. 拉林河流域土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 农业工程学报,2016,32(19):226–233.
LI Jiao, CHEN Haiyang, TENG Yanguo, et al. Contamination characteristics and source apportionment of soil heavy metals in Lalin River basin[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(19):226–233. (in Chinese)
- 15 LUO X S, XUE Y, WANG Y L, et al. Source identification and apportionment of heavy metals in urban soil profiles[J]. Chemosphere, 2015, 127:152–157.
- 16 TODOROVA Y, LINCHEVA S, YOTINOV I, et al. Contamination and ecological risk assessment of long-term polluted sediments with heavy metals in small hydropower cascade[J]. Water Resources Management, 2016, 30(12):1–14.
- 17 张世文,周妍,罗明,等. 废弃地复垦土壤重金属空间格局及其与复垦措施的关系[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(12):237–247. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171228&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.028.
ZHANG Shiwen, ZHOU Yan, LUO Ming, et al. Spatial pattern of heavy metal in reclaimed soil of wasteland and its relationship to reclamation measures[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(12):237–247. (in Chinese)
- 18 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报,2017,72(1):116–134.
WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geographic detector: principles and prospects[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1):116–134. (in Chinese)
- 19 孔明,彭福全,张毅敏,等. 环巢湖流域表层沉积物重金属赋存特征及潜在生态风险评价[J]. 中国环境科学,2015,35(6):1863–1871.
KONG Ming, PENG Fuquan, ZHANG Yimin, et al. Occurrence characteristic and potential risk assessment of heavy metals in surface sediments of Circum-Chaohu Basin[J]. China Environmental Science, 2015,35(6):1863–1871. (in Chinese)
- 20 杜臣昌,刘恩峰,羊向东,等. 巢湖沉积物重金属富集特征与人为污染评价[J]. 湖泊科学,2012,24(1):59–66.
DU Chenchang, LIU Enfeng, YANG Xiangdong, et al. Characteristics of enrichment and evaluation of anthropogenic pollution of heavy metals in the sediments of Lake Chaohu[J]. Journal of Lake Sciences, 2012,24(1):59–66. (in Chinese)
- 21 郭伟,赵仁鑫,张君,等. 内蒙古包头铁矿区土壤重金属污染特征及其评价[J]. 环境科学,2011,32(10):3099–3105.
GUO Wei, ZHAO Renxin, ZHANG Jun, et al. Distribution characteristics and assessment of soil heavy metal pollution in the iron mining of Baotou in Inner Mongolia[J]. Environmental Science, 2011,32(10):3099–3105. (in Chinese)
- 22 HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control—a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8):975–1001.
- 23 通拉嘎,徐新良,付颖,等. 地理环境因子对螺情影响的探测分析[J]. 地理科学进展,2014,33(5):625–635.
TONG Laga, XU Xinliang, FU Ying, et al. Detection and analysis of the influence of geo-environmental factors on spiral condition[J]. Progress in Geography, 2014,33(5):625–635. (in Chinese)
- 24 LIANG P, YANG X. Landscape spatial patterns in the Maowusu (Mu Us) Sandy Land, northern China and their impact factors [J]. CATENA, 2016, 145:321–333.
- 25 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. Study on soil geochemical reference value and background value in Jianghuai River basin of Anhui Province[J]. Geology in China, 2012,39(2):302–310. (in Chinese)
- 26 陈晨. 安徽省典型区域重金属污染现状与评价[D]. 合肥:合肥工业大学,2013.
CHEN Chen. Heavy metal pollution state and evaluation of typical area of Anhui Province [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013. (in Chinese)
- 27 林艳. 基于地统计学与 GIS 的土壤重金属污染评价与预测[D]. 长沙:中南大学,2009.
LIN Yan. Pollution assesement and predietion of heavy metals in soil based on geostatistics and GIS [D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese)
- 28 廖颖,王心源,周俊明. 基于地理探测器的大熊猫生境适宜度评价模型及验证[J]. 地球信息科学学报,2016,18(6):767–778.
LIAO Ying, WANG Xinyuan, ZHOU Junming. Suitability assessment and validation of giant panda habitat based on geographical detector[J]. Journal of Geoinformation Science, 2016,18(6):767–778. (in Chinese)
- 29 李雨,韩平,任东,等. 基于地理探测器的农田土壤重金属影响因子分析[J]. 中国农业科学,2017,50(21):4138–4148.
LI Yu, HAN Ping, REN Dong, et al. Influence factor analysis of farmland soil heavy metal based on the geographical detector [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017,50(21):4138–4148. (in Chinese)