
城市不同交通圈（带）土壤 重金属多元统计分析及空间分布研究 — 以武汉市为例^{*1}

党丽娜，梅杨，廖祥森，刘颖颖

（华中农业大学资源与环境学院，

农业部长江中下游耕地保育重点实验室，湖北武汉 430070）

摘要：土壤重金属污染是近年来备受重视的环境问题，其不仅直接破坏环境质量，还间接危害人体健康，因此研究城市土壤中重金属的累积和分布状况具有一定的意义。选取武汉市不同交通圈为研究区域，分析了表土中 Ni、Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 6 种重金属元素的累积状况和污染来源，评价了重金属的污染程度及生态危害等级，并运用 ArcGIS 空间插值得到元素的空间分布图。得出以下结论：（1）就平均值而言，Ni、Cr、Cu 3 种元素均在省背景值以内，Cd 平均值约是国家二级标准的 10 倍，累积最为严重；（2）多元统计分析结果显示 6 种元素可聚类为两类，Ni、Cr 和 Cd、Cu、Pb、Zn，前者主要污染源为气候、母质、年代等成土因素，后者主要受到交通、工业等人为活动及成土母质的影响；（3）不同研究区累积情况不同，内环最严重，三环带次之，二环带最小；（4）研究区重金属污染评价及潜在生态风险评价结果为重度污染或强度生态危害，且程度上都是内环>三环带>二环带

关键词：城市土壤；表层土壤；重金属污染；多元统计分析；评价；空间插值

中图分类号：X825 **文献标识码：**A **文章编号：**1004—8227（2016）06—0925—07

DOI：10.11870 / cjlyzyyhj201606008

¹收稿日期：2015—10—15；修回日期：2016—02—26

基金项目：国家自然科学基金项目（Grant No. 41101193）；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目（2662014PY062，2662015PY156）

作者简介：党丽娜（1980—），女，工程师，主要研究方向为地理信息系统在农业资源与环境中的应用 E-mail：danglina@mail.hzau.edu.cn

城市土壤作为城市生态系统的重要组成部分，不仅是城市绿色植物的根基和保障，同时也是城市重金属污染的主要汇集地^[1]，其污染源主要以各种形式的人为活动为主^[2]，如交通废气排放、工业废物、煤和燃料燃烧以及住宅活动^[3, 4]等。进入土壤中的重金属污染物不仅影响环境质量，引起土壤功能受损，而且还通过多种形式危害公众健康^[5, 6]。此外，土壤中的重金属可以转移到其它生态系统，如地下水或作物，通过食物链富集影响食品安全，进而影响人类健康。所以土壤重金属污染已成为国内外函待研究的重要问题^[7-9]。

武汉市作为华中地区最大的城市，土地面积 8494.41km²，自古以来便是华中区重要的经济文化中心和产业城市。近年来城市化进程加快，到 2013 年常住人口数达到 1 022 万人，民用机动车总量超过 154 万辆，工业总产值 10 394 亿元^[10]。这些快速的发展是否对武汉市造成重金属污染尚不明确，而以往关于武汉市重金属污染的研究大都围绕湖泊沉积物或者某一局部区域进行^[11-13]，对于整个武汉市大范围的研究仍不多见。因此，本文拟以交通环线（武汉市内环长 28 km、二环 52 km、三环 91 km）来划分出城市内环、二环带、三环带不同范围，以此来探讨不同交通圈（带）的表土重金属污染情况，以期为武汉市的发展规划及环境治理提供数据资料和决策参考。

1 研究区域概况

武汉市地处东经 113° 41′ — 115° 05′，北纬 29° 58′ — 31° 22′，位于长江中下游江汉平原东部，年均气温 15.8℃ — 17.5℃，年降水量 1 150 — 1 450mm，主要土壤类型为黄棕壤、潮土、红壤、石灰土和零星的水稻土^[14, 15]。

2 材料与方法

2.1 样品采集及处理

样点布设以 1KM 网格法和随机法相结合，采集 0 — 20 cm 表层土壤约 1 kg 带回实验室，并用 GPS 记录样点的经纬度及周边景观，经自然风干，研磨过 100 目筛。接着用 HCl — HNO₃ — HClO₄ 消解然后采用电感耦合等离子体发射光谱仪（ICP — AES），对每个样品测试了 Ni、Cr、Cd、Cu、Pb 和 Zn 6 种元素含量并取两次平均值。共采集样品 86 个（分布见图 1）。

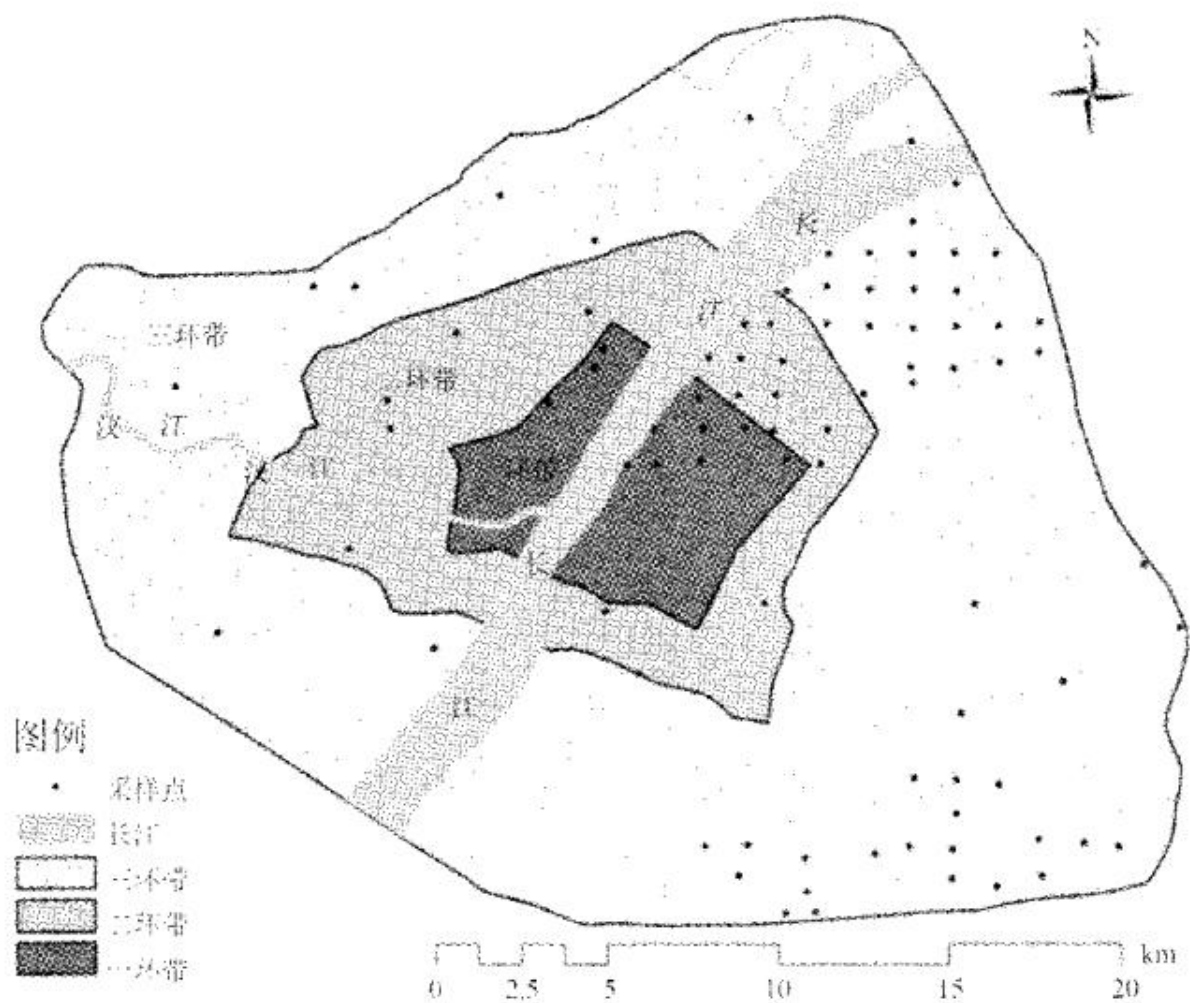


图 1 研究区及样点分布

2.2 数据分析评价方法

2.2.1 污染指数法

单因子污染指数 $P_i = C_i/S_i$, (1) , 式中背景值凡采用《国家土壤环境质量标准》 (GB 1 5618 — 1995) 中 II 级标准^[16]。内梅罗综合污染指数

$$P_N = \left[\frac{\text{avr} (P_i)^2 + \max (P_i)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (2)$$

根据 P_i 和 P_k 将土壤重金属污染状况分为 5 个等级, I 级 (0.0—0.7) 安全, II 级 (0.7—1.0) 警戒线, III 级 (1.0—2.0) 轻度污染, W 级 (2.0—3.0) 中度污染, V 级 (>3.0) 重度污染。

2.2.2 潜在生态危害指数法

该方法既考虑了单个污染物的污染水平, 又兼顾了多种污染元素的联合效应。其评价公式为:

$RI = \sum E_r^i$ (3), $E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i$ (4), $C_f^i = C^i / C_n^i$ (5); 式中参比值 C_n^i 使用湖北省土壤重金属背景值 [17]。毒性响应系数分别为 Ni = Pb = Cu = 5, Zn = 1, Cr = 2, Cd = 30 [18]。重金属污染潜在生态危害单项指数和综合指数分级标准列于表 1。

表 1 生态风险指数的分级

Tab.1 Classification of Potential Ecological Risk Indexes

生态危害指数	生态危害程度				
	轻度	中度	强度	很强	极强
E_r	<40	40~80	80~160	160~320	>320
RI	<150	150~300	300~600	>600	

3 结果与讨论

3.1 研究区土壤重金属含量分析

研究区 86 个土壤样品的 Ni、Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 6 种重金属含量见表 2。经分析可知, Ni、Cr 和 Cu 的平均值在省背景值以内, Pb 和 Zn 均值超过国家一级标准, Cd 均值是国家二级标准的 10 倍以上, 说明研究区 Cd 积累最为严重, Pb 和 Zn 有一定的积累, 这与王凯等 [19] 的研究结果一致。变异系数表示各样点的离散程度 [20], 值越大, 说明样点在空间上的分布不均匀, 存在点源污染 [21]。Pb 和 Zn 变异系数分别为 6.08 和 2.79 属强变异, Cu 为 0.85 属中等变异, Cd 为 0.39 接近中等变异, Cr 和 Ni 属于低等变异, 可见整个研究区 Pb、Zn、Cu、Cd 受到不同程度的外来污染。就内环、二环带、三环带不同研究区分析 (见表 2), 内环 6 种元素的均值均达到最高 (尤其是 Pb 和 Zn) 因此内环重金属累积情况最为严重, 而 Pb、Zn 作为交通污染的标志性元素 [22], 因此得知内环受到了交通污染 [23]。结合最大最小值对应区域来看, 4 种元素 (Cd、Cu、Pb 和 Zn) 的最大值出现在内环, 研究发现这 4 值均为同一个采样点, 位于过江隧道的武昌出入口, 原因可能是汽车尾气排放、燃油及润滑油泄露、轮胎和机械部件的摩擦等造成的重金属集聚地。二环带和三环带差异不大, 但除 Ni 元素外的 5 种元素二环带均值略小, 可见二环带污染状况略低于三环带。

表 2 土壤重金属含量(mg/kg)统计及在不同区域分布情况(n=86)
Tab.2 Statistics of Soil Heavy Metal Concentrations in Different Region

元素	范围 (mg/kg)	分布类型	背景值 ¹⁾	二级标准 ²⁾	内环(12)		二环带(16)		三环带(58)		最小值区	最大值区
					$\bar{x}$	m%	$\bar{x}$	m%	$\bar{x}$	m%	域	域
Ni	16.3~40.7	正态	37.3	50.0	28.4	8.3	28.1	0.0	27.8	5.2	三环带	三环带
Cd	1.0~13.3	对数正态	0.17	0.30	4.3	100.0	2.9	100.0	3.5	100.0	三环带	内环
Cr	21.5~75.1	正态	86.0	200.0	45.9	0.0	41.1	0.0	44.6	0.0	三环带	二环带
Cu	0.5~128.8	对数正态	30.7	100.0	33.7	33.3	19.3	6.3	20.6	19.0	三环带	内环
Pb	11.2~4995.0	对数正态	26.7	300.0	444.7	58.3	29.0	50.0	30.5	44.8	三环带	内环
Zn	44.1~3944.6	对数正态	83.6	250.0	433.5	75.0	103.0	81.3	104.9	48.3	三环带	内环

注: n为所有样品数; 1) 湖北省土壤背景值; 2) 国家土壤环境质量二级标准; 内环(12)、二环带(16)、三环带(58)分别为研究区内样点数, 为各元素在不同研究区内的平均值; m%为各元素在不同区域的超标样品率(以湖北省背景值为标准).

3.2 重金属元素的复合污染分析

由于地球化学条件的相似性, 导致重金属元素在总量上存在相关性。使用 spss18.0 对 6 种重金属元素进行相关性分析(结果见表 3)。从中可知, Cd 与 Cu、Pb、Zn 显著正相关, Cu 与 Pb、Zn 显著正相关; Pb 与 Zn 显著正相关, 因此可以推断 Cd、Cu、Pb 和 Zn 来源比较广^[25, 26], Ni 和 Cr 有独特的来源。尤其是 Pb 和 Zn 的相关系数达到 0.99, Cd 和 Cu、Pb、Zn 的相关系数达到 0.79、0.78、0.81, 说明这几种元素具有同源关系^[27]。因此研究区土壤存在 Cd、Cu、Pb、Zn 4 种元素的复合污染^[28]。

表 3 重金属元素的相关性分析

Tab.3 Correlation Analysis of Heavy Metals

元素	Ni	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn
Ni	1					
Cd	0.387**	1				
Cr	0.451**	0.536**	1			
Cu	0.290**	0.794**	0.466**	1		
Pb	0.086	0.789**	0.13	0.634**	1	
Zn	0.112	0.811**	0.17	0.707**	0.990**	1

注: *表示在0.05水平上显著, **表示在0.01水平上显著。

另外因子分析可通过降维的方式将多个变量归结为相互独立的因子, 被广泛地用于多源环境污染的来源判别[26—28]。本因子分析在解释的总方差表中, 前两个因子提取后累积解释了 83.63% 的信息, 第三个因子提取后总的方差贡献率没有改变, 所以提取两个因子。从因子提取结果(表 4)来看, 因子 1 上 Cd、Cu、Pb 和 Zn 有较高的载荷, 因子 2 上 Ni 和 Cr 有较高的载荷, 表明元素 Cd、Cu、Pb、Zn 同源, Ni 和 Cr 同源。结合上述分析, 推测因子 1 中各元素的累积主要受到交通、商业活动、生活垃圾等的影响。Cd 除了交通等污染源以外, 还与武汉特殊的成土条件与工业活动有关^[29]。因子 2 (Ni 和

Cr) 主要受到成土年代、母质、气候等的影响。同时聚类分析 (结果见图 2) 也表明, Ni 和 Cr 聚为一类, Pb 、 Zn 、 Cd 、 Cu 聚为一类。

表 4 重金属元素的因子分析

Tab.4 Factor Analysis of Heavy Metals

重金属	旋转前成分		旋转后成分	
	1	2	1	2
Ni	0.389	0.726	0.045	0.822
Cd	0.956	0.061	0.840	0.460
Cr	0.514	0.696	0.170	0.848
Cu	0.869	0.053	0.764	0.416
Pb	0.868	-0.440	0.973	-0.031
Zn	0.899	-0.402	0.985	0.017

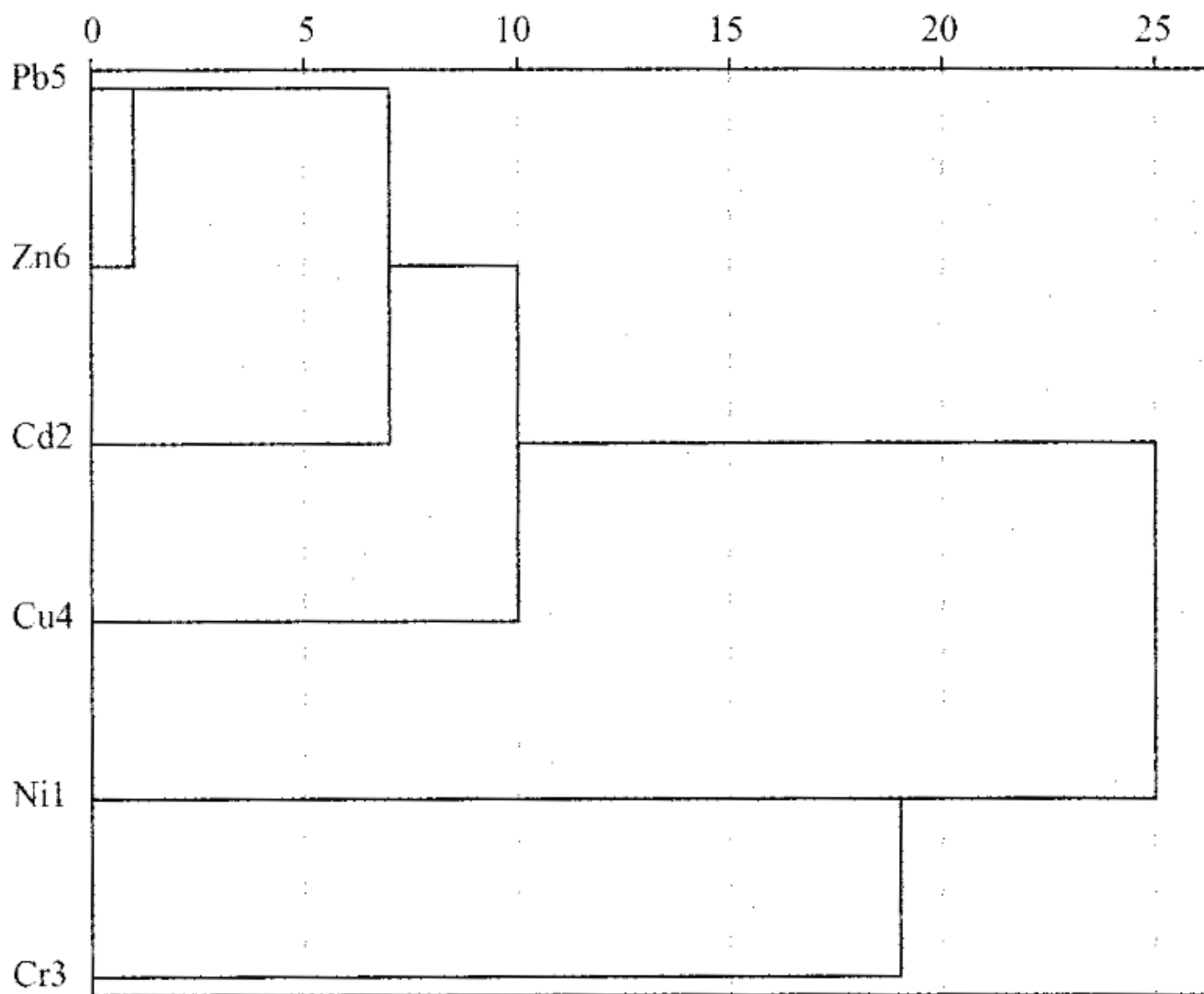


图 2 重金属聚类分析

3.3 研究区重金属元素的空间分布状况

空间内插可以通过离散点上的特征数据得到连续的空间数据集，本文在 Arcgis10.0 软件中对非正态分布的 Cd、Cu、Pb、zn 元素采用反距离加权法插值，对正态分布的 Ni、cr 采用克里格插值^[30]，然后按照省背景值、国家一级标准、国家二级标准 3 个值进行重分类，并分级着色得到各元素的空间分布图（图 3）。

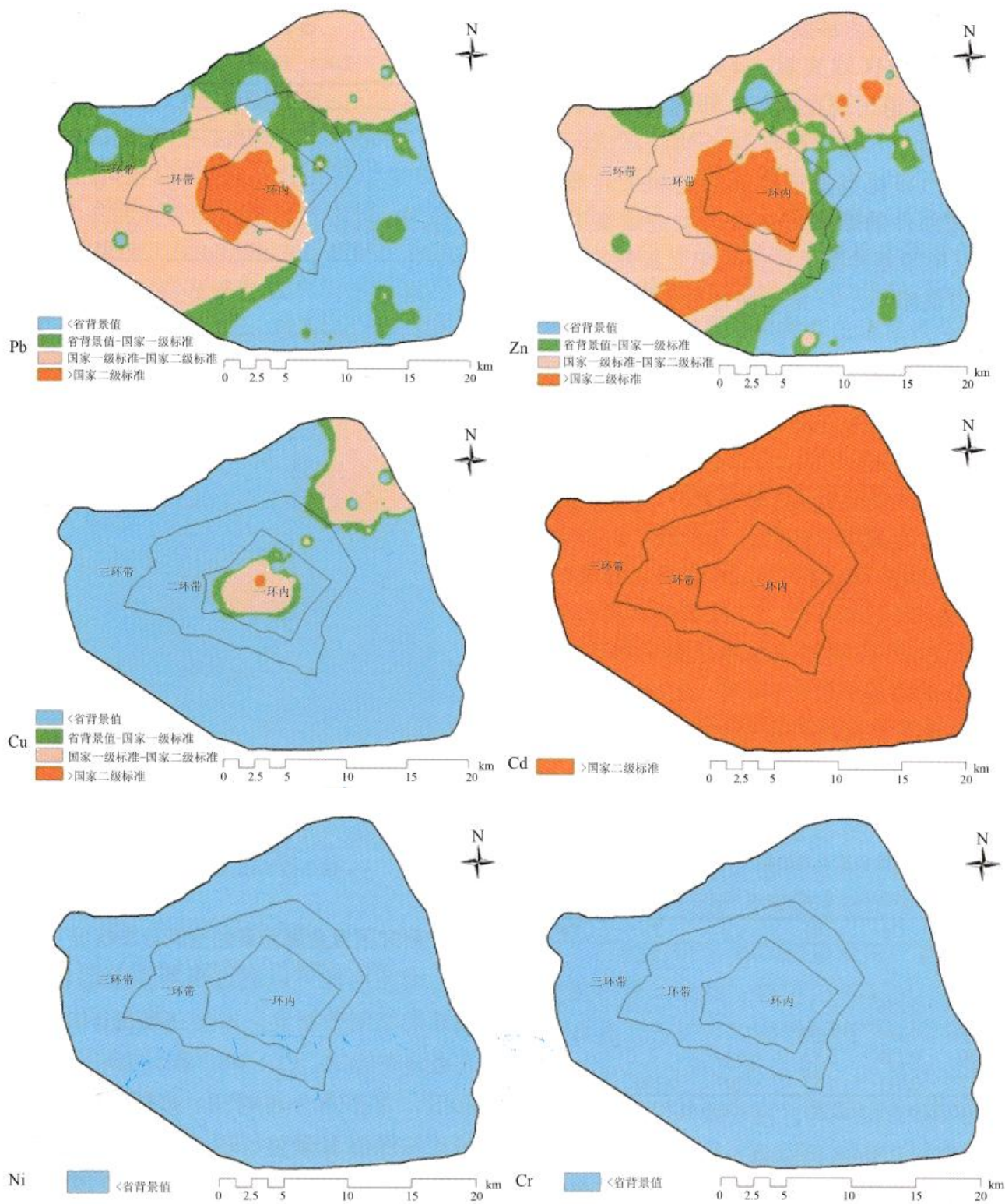


图3 研究区各金属元素的含量空间分布图

Fig.3 Spatial Distribution of Different Heavy Metals in Study Area

3.4 重金属元素的污染评价

使用单因子污染指数（ P_i ）对研究区土壤质量进行评价（结果见表 5），Ni、Cr、Cu、Pb、Zn 为清洁水平，Cd 为重度污染。

对内环、二环带、三环带通过综合评价（结果见表 6），可知内环 Pb 为轻度污染，Cd 为重度污染，其余元素均为清洁；二环带和三环带 Cd 为重度污染，其余元素均为清洁。但因 Cd 重度污染导致了各区综合污染指数大于 3，顺序为：内环>三环带>二环带。潜在生态风险指数的评价结果（见表 6）与综合污染指数评价法得出的结果完全相同。

表 5 土壤重金属的单因子污染指数比例状况($n=86$)

Tab.5 Proportion of Single Factor Pollution of Soil Heavy Metals

元素	P_i 范围	P_i	I (清洁)	II (尚清洁)	III(轻度)	IV(中度)	V(重度)
Ni	0.33~0.81	0.49	88.4%	11.6%	0.0	0.0	0.0
Cd	3.40~44.40	10.50	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0%
Cr	0.11~0.38	0.19	100%	0.0	0.0	0.0	0.0
Cu	0.01~1.29	0.13	97.7%	0.0	2.3%	0.0	0.0
Pb	0.04~16.70	0.07	98.8%	0.0	0.0	0.0	1.2%
Zn	0.18~15.80	0.60	90.4%	2.4%	4.8%	1.2%	1.2%

表 6 不同研究区的土壤重金属的综合污染情况&潜在生态风险评价状况

Tab.6 Nemerows Pollution Index & Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metal in Different Region

研究区	P_i						P_N	污染程度	E_i						R_I	风险分级
	Ni	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn			Ni	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn		
内环	0.6	14.3	0.2	0.3	1.5	1.7	10.4	重度	3.8	757.3	1.1	5.5	83.3	5.2	856.1	很强
	清洁	重度	清洁	清洁	轻度	轻度			轻度	极强	轻度	轻度	中度	轻度		
二环带	0.6	9.8	0.2	0.2	0.1	0.4	7.1	重度	3.8	520.5	1.0	3.2	5.4	1.2	535.0	强度
	清洁	重度	清洁	清洁	清洁	清洁			轻度	极强	轻度	轻度	轻度	轻度		
三环带	0.6	11.8	0.2	0.2	0.1	0.4	8.5	重度	3.7	625.5	1.0	3.3	5.7	1.3	640.6	很强
	清洁	重度	清洁	清洁	清洁	清洁			轻度	极强	轻度	轻度	轻度	轻度		

4 结论

（1）研究区表层土壤中 Ni、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn6 种重金属元素的平均含量依次为：28.0、3.5、44.1、22.2、58.0、150.4 mg / kg，其中 Cd 重度累积，Ni 和 Cr 无累积。

（2）多元统计分析结果显示，Cd 与 Cu、Pb、Zn 的相关系数较高且聚为一类，主要受交通、工业等人为活动影响；Ni 和 Cr 显著正相关并聚为一类，主要受气候、年代、母质等成土条件影响。

（3）不同研究区污染状况不同，内环污染最为严重，以交通、工商业等人类活动为主；三环带次之，以交通影响为主，工业污染次之；二环带略低，以工业影响为主，交通影响次之。

（4）研究区污染指数评价结果 Cd 为重度污染， R_I 为强度或很强生态风险。两种评价方法得出的污染（风险）指数大小依次为：内环>三环带>二环带，可见内环确实应该采取如交通管制、工业外迁等措施。

参考文献:

[1] DE KMPE CR , MOREL J L . Urban 5011 management : a growing concern [J] . 5011 Science , 2000 , 1 65 (1) : 31 — 0 .

-
- [2] SHENG JJ , WANG XP , GONGP , et al . Heavy metals of the Tibetan top 50115 [J] . Environmental Science and Pollution Research , 2012 , 19 (8) : 3362 — 3370 ,
- [3] LEE C SL , LI XD , SHI WZ , et al . Metal contamination in urban , suburban , and country park 50115 of Hong Kong : a study based on GIS and multivariate statistical [J] . Science of the Total Environment , 2006 , 356 (1 — 3) : 45 — 61 .
- [4] RASHED MN , Monitoring of contaminated toxic and heavy metals , from mine tailings through age accumulation , in 5011 and some wild plants at Southeast Egypt [J] . Journal of Hazardous Materials , 2010 , 178 (1 — 3) : 739 — 746 .
- [5] ABRAHAMS P W . 50115 : their implications to human health [J] . Science of the Total Environment , 2002 , 291 (1 / 3) : 1 — 32 .
- [6] POGGIO L , VRSCAJ B , SCHULINR , et al . Metals pollution and human bioaccessibility of topsoils in Grugliasco (Italy) [J] . Environmental Pollution , 2009 , 157 (2) : 680 — 689 ,
- [7] AKTAS YK , KOCABAS A . Heavy metal content of roadside 5011 in edirne , Turkey [J] . Analytical Letters , 2010 , 43 (12) : 1869 — 1878 .
- [8] 刘永伟 , 毛小荃 , 孙莉英 , 等 . 深圳市工业污染源重金属排放特征分析 [J] . 北京大学学报 (自然科学版) , 2010 , 46 (2) : 279 — 285 .
- [9] 王圣伟 , 冯娟 , 刘刚 , 等 . 多嵌套空间尺度农田土壤重金属空间变异研究 [J] . 农业机械学报 , 2013 , 44 (6) : 128 — 135 .
- [10] 湖北省统计局 . 2014 年武汉统计年鉴 [EB / OL] . (2015 — 03 — 05) • .
- [11] 吴桂萍 , 黄慧 , 唐太平 . 武汉市某工业用地土壤重金属污染状况分析与评价 [J] . 中南民族大学学报 (自然科学版) , 2012 , 31 (3) : 23 — 25 , 55 .
- [12] 唐阵武 , 岳勇 , 程家丽 . 武汉市中小河流沉积物重金属污染特征及其生态风险 [J] . 水土保持学报 , 2009 , 23 (1) : 132 — 136 .
- [13] 张贝 , 李卫东 , 张传荣 . 武汉东湖高新技术开发区土壤重金属污染状况及影响因素 [J] . 环境化学 , 2013 , 32 (9) : 1714 — 1722 .
- [14] 黄敏 , 杨海舟 , 余萃 , 等 . 武汉市土壤重金属积累特征及其污染评价 [J] . 水土保持学报 , 2010 , 24 (4) : 135 — 139 .
- [15] 湖北省土壤肥料工作站 , 湖北省土壤普查办公室 . 湖北省土种志 [M] . 武汉 : 湖北科学技术出版社 , 2010 .
- [16] 国家环境保护局 . GB 15618 — 1995 土壤环境质量标准 [S] . 北京 : 中国标准出版社 , 2006 .

-
- [17] 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 .
- [18] 徐争启, 倪师军, 度先国, 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) : 1 12 — 1 1 5 .
- [19] 王凯, 凌其聪. 武汉市城市土壤重金属粒径分布特征[J]. 环境化学, 20 13 , 32 (12) : 2329 — 2335 .
- [20] 谢小进, 康建成, 闰国东, 等. 黄浦江中上游地区农用土壤重金属含量特征分析 [J] . 中国环境科学, 20 10 , 30 (8) : 1 1 10 — 1 1 1 7 .
- [21] 雷国建, 陈志良, 刘千钧, 等. 广州郊区土壤重金属污染程度及潜在生态危害评价 [J]. 中国环境科学, 2013 , 33 (51) : 49 — 53 .
- [22] 蔡立梅, 马瑾, 周永章, 等. 东莞市农业土壤重金属的空间分布特征及来源解析 [J] . 环境科学, 2008 , 29 (12) : 3496 — 3502 .
- [23] 郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 等. 呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 [J]. 环境科学, 2013 , 34 (4) : 1 561 — 1567 .
- [24] 许书军, 魏世强, 谢德体. 三峡库区耕地重金属分布特征初步研究[J]. 水土保持学报, 2003 , 17 (4) : 64 — 66 , 89 .
- [25] 叶深, 李思悦, 张全发. 三峡库区消落区表层土壤重金属污染评价及源解析 [J]. 中国生态农业学报, 20 11 , 19 (1) : 146 — 149 .
- [26] 喻菲, 张成, 张晨, 等. 三峡水库消落区土壤重金属含量及分布特征 [J]. 西南农业大学学报 (自然科学版), 2006 , 28 (1) : 1 65 — 1 68 .
- [27] 柴世伟, 温淡茂, 张云霓, 等. 广州市郊区农业土壤重金属含量特征 [J]. 中国环境科学, 2003 , 23 (6) : 592 — 596 .
- [28] 黎莉莉, 张晨, 刘景红, 等. 三峡库区消落区土壤重金属潜在生态危害评价[J]. 西南农业大学学报 (自然科学版), 2005 , 27 (4) : 470 — 473 .
- [29] 马振东, 张德存, 闭向阳, 等. 武汉沿长江、汉江 Cd 高值带成因初探[J]. 地质通报, 2005 , 24 (8) : 740 — 743 .
- [30] 夏敏, 赵炳梓, 张佳宝. 基于 GLS 的黄淮海平原典型潮土区土壤重金属积累研究 [J] . 土壤学报, 2013 , 50 (4) : 684 — 692 .