

秦淮河河岸带典型区域土壤重金属污染分析与评价

李冬林^{1,2}, 金雅琴³, 张纪林², 阮宏华¹

(1. 南京林业大学 森林资源与环境学院, 江苏 南京 210037; 2. 江苏省林业科学研究院, 江苏 南京 211153; 3. 金陵科技学院 园艺学院, 江苏 南京 210038)

摘要: 对南京秦淮河河岸带典型区域土壤重金属质量分数进行了分析。镉、铬、铅、铜、锌等 5 种土壤重金属分布在水平和垂直层次上均表现出一定异质性。近水区土壤重金属质量分数普遍高于远水区; 表层土壤重金属质量分数高于下层。不同区域土壤重金属富集程度有较大差异。上游河岸几乎未受人为干扰, 5 种重金属离子质量分数均明显小于中下游。中游的殷巷土壤中镉和铬质量分数明显超标, 多因子综合污染指数 > 3.0 , 为重度污染。下游的岔路口表层土壤综合污染指数 > 2.0 , 为中度污染。大校场表层土壤综合污染指数 > 1.0 , 为轻度污染。5 种重金属元素污染指数排序为镉 $>$ 锌 $>$ 铜 $>$ 铬 $>$ 铅。重金属元素铜与镉呈显著的正相关 ($P < 0.05$), 与锌有极显著的正相关 ($P < 0.01$); 铅与镉、铜、锌呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。土壤 pH 值与重金属元素有一定的相关性。图 4 表 4 参 13

关键词: 土壤生态学; 秦淮河; 河岸带; 重金属; 污染分析与评价

中图分类号: S714; X825

文献标志码: A

文章编号: 1000-5692(2008)02-0228-07

Heavy metal soil pollution in the Qinhuai River riparian zone

LI Dong-lin^{1,2}, JIN Ya-qin³, ZHANG Ji-lin², RUAN Hong-hua¹

(1. College of Forest Resource and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. Forestry Academy of Jiangsu, Nanjing 211153, Jiangsu, China; 3. Department of Horticulture, Jinling Institute of Technology, Nanjing 210038, Jiangsu, China)

Abstract: Qinhuai River is the main river in Nanjing City, the overall length is more than 100 km, having 16 prongs and 2 630 km² river valley. This objective is to rebuild and protect ecological system of the Qinhuai River riparian zone, pollution levels of five heavy metals (Cd, Zn, Cu, Cr, and Pb) in a riparian zone along the Qinhuai River of Nanjing were analyzed with sample plot method. Five plots were set, including Dongping of Lishui City, Yinxiang and Chalukou of Jiangning District, Dajiaochang of Qinhuai District and Zhongheqiao of Nanjing City, and each plot fell into near-riparian zone (0 – 30 m near river) and far-riparian zone (5 – 10 m near river). Results indicated that soil heavy metals in the riparian zone manifested spatial heterogeneity. Soil heavy metal content of the near-riparian zone was much than the far-riparian zone, and for topsoil (0 – 10 cm in depth) it was much than the subsoil (10 – 20 cm in depth). In different plots soil heavy metal content was distinctive. Also, in the upper reaches, due to less human interaction, soil heavy metal content was less than the middle and lower reaches. Both Cd and Cr content of the soil in Yinxiang were much than the standard level ($P_n > 3.0$); so soil pollution was heavy. Soil from Chalukou had an intermediate degree of pollution ($P_n > 2.0$), and soil came from Daojiaochang was lightly polluted ($P_n > 1.0$). The pollution index ranking for these five heavy metals in the riparian zone was Cd $>$ Zn $>$ Cu $>$ Cr $>$ Pb. There were positive correlations between soil Cu with Cd ($P < 0.05$) and Zn ($P < 0.01$). However, there were significant, positive correlations between Pb and Cd ($P < 0.01$), Cu ($P < 0.01$), and Zn ($P < 0.01$). In addition, there were positive correlations between pH and Cu ($P < 0.05$) and Zn ($P < 0.05$). [Ch, 4 fig. 4 tab. 13 ref.]

收稿日期: 2007-06-28; 修回日期: 2007-09-30

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2006087); 江苏省社会发展基金资助项目(BS2007067)

作者简介: 李冬林, 副研究员, 博士研究生。从事森林生态学研究。E-mail: lidonglin126@126.com

Key words: soil ecology; Qinhuai River; riparian zone; soil heavy metals; pollution analysis and assessment

河岸带是介于陆地与河流之间的过渡地带，是非常重要的典型生态交错区(eco-tone)，是连接水生生态系统和陆地生态系统的枢纽^[1]。河岸带具有特殊的生境条件，在涵养水源、蓄洪防旱、维持生物多样性和生态平衡等方面均有十分重要的作用，是河流天然的保护屏障，是健康河流生态系统的重要组成部分和评价标志^[2]。国内外学者针对河岸带的功能与修复重建开展了实验探讨，并对河岸带土地利用和水岸生态系统碳、氮、磷等的生物地球化学过程和动态特性等方面进行了研究^[3-11]，但对于河岸带不同区域土壤重金属污染的空间异质性规律研究较少。笔者通过对南京秦淮河河岸带土壤重金属成分的纵横分析和评价，了解河岸带土壤污染的空间分布规律，为秦淮河河岸生态系统的保护和生态重建提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地区概况

秦淮河水系位于长江下游，古称龙藏浦，后称淮水。秦淮河是一条自然河流，发源于苏南低山丘陵地区，流域范围界于宁镇山脉之南，横山之北。它有南北两源，北源起于句容宝华山西南，南源出于溧水东庐山北，两源在江宁西北村附近汇合，汇合后秦淮河流至南京市通济门外的九龙桥，又分为内外秦淮河。内秦淮河横贯城内南部，外秦淮河环城垣流至水西门与内秦淮河合流入长江。秦淮河是南京的主要河流，全长超过 100 km，主要支流有 16 条，流域面积为 2 630 km²。

研究区域位于 31°43′~32°00′N，118°49′~119°07′E，属北亚热带湿润气候，四季分明，降水充沛，光照充足。年平均气温为 15.0~15.9℃，极端最高气温 39.0~40.5℃，极端最低气温 -9.5~-13.1℃，年相对湿度 78%~80%，年降水量 1 034~1 276 mm，年日照时数 2 212.8 h，无霜期 220~250 d。

1.2 样品采集

采用典型样地取样法，于 2006 年 9~10 月，自秦淮河源头至下游选择 5 个典型的区域设置样地(分别编号 A、B、C、D、E)。每个样地沿水体至陆地方向设置近河岸(距离水体 0~3 m)和远河岸(距离水体 5~10 m)。采用 GPS(全球定位系统)定位，同时调查记录样地的自然生境(表 1)。在样地内随机选 3~5 个重复取样点，挖取土壤剖面，取 0~10、10~20 cm 深的土壤，每层 500 g。各点分层所取土样混合装入自封袋内，带入室内分析。

表 1 研究区域样地位置及自然状况

Table 1 Sampling sites and its condition along a riparian zone of Qinhuai River

编号	所处区域	地理坐标	海拔/m	生境概况	主要地表植物种类
A	溧水东屏	31°41′43.7″N 119°07′35.7″E	22.10	水质较好，自然缓坡，近水区为草地，远水区为杂木林，岸坡植被丰富，人为干扰轻	草本有狗牙根、狗尾草、一年蓬、水花生等；木本有构树、黄檀、朴树、刺槐、牡荆等
B	江宁殷巷	31°54′47.9″N 118°50′45.6″E	7.64	水体有污染，自然缓坡，岸坡草本植被丰富，人为干扰中等	草本有狗牙根、一年蓬、稗、水花生、水蓼、车前等；无木本植物
C	江宁岔路口	31°51′53.8″N 118°49′15.6″E	5.20	水体有污染，坡度较陡，草本植被较丰富，人为活动频繁	葎草、水花生、婆婆纳等；无木本植物
D	秦淮大校场	32°00′16.6″N 118°49′57.6″E	2.20	水体有污染，坡度较陡，上层为人工构树林，下层为水生草地。岸坡木本草本植被较丰富，人为活动频繁	木本主要有构树，下层草本有水花生、白茅、苎草等
E	南京中和桥	32°00′50.6″N 118°49′20.9″E	2.57	水体有污染，人工硬质驳岸，人工植被	木本有榉树、垂柳、夹竹桃；草本有狗尾草、水花生、牛筋草、苎草等

1.3 测定样品的处理与分析

首先将新鲜土样内的石粒和新生体拣出,平摊于室内通风处,使土样自然风干。土样风干后,压碎碾细,过 100 目土样筛,最后将样品装入三角瓶内,密封后保存于干燥处待测。土壤样本经体积比为 4:1 (盐酸:硝酸)的混合消解液在 2040 型程控消解仪上消解并定容后,采用 ICP-4300DV (美国 PE 公司)等离子发射光谱仪测定。为保证处理和测定的准确性,采用空白标样作为质控标准。每个土样重复测定 3 次。同时用 pH 计测定每个土壤样品的 pH 值。

1.4 土壤污染评价

土壤污染评价分别以《GB 15618-1995 国家土壤环境质量标准》二级标准《HJ/T 166-2004 土壤环境监测技术规范》规定的土壤环境质量分级标准和中国科学院南京土壤研究所标定的南京土壤背景值^[12]为参照标准(表 2)进行评价。评价方法采用单因子污染指数法和多因子综合污染指数法,具体评价方法见文献^[13]。

表 2 南京地区土壤重金属环境背景值

Table 2 Background values of heavy metals in the soil environment of the Nanjing region

重金属	背景值/(mg·kg ⁻¹)	重金属	背景值/(mg·kg ⁻¹)
铜	32.20	镉	0.19
铅	24.80	汞	0.12
锌	76.68	砷	10.60
铬	59.00		

说明:数据引自参考文献^[12]。

2 结果与分析

2.1 秦淮河河岸带土壤重金属分布

2.1.1 近河岸带土壤重金属分布 近河岸带土壤重金属质量分数如图 1 和图 2 所示,可见,秦淮河上游至下游不同区域土壤重金属质量分数差异明显。

A 点溧水东屏湖为秦淮河的源头,水体清澈,自然缓坡。土壤中除下层铬质量分数(51.538 3 mg·kg⁻¹)略高外,其他各种金属离子质量分数均明显小于中下游河岸。尤其是土壤中的镉质量分数极低,表层土壤中仅为 0.001 0 mg·kg⁻¹,下层土壤质量分数为 0.256 9 mg·kg⁻¹。

B 点江宁殷巷和 C 点岔路口位于南京近郊,为近年城市扩张的辐射区,人为干扰加剧。此点靠近城市居民区,部分河岸被开辟成菜地,还分布有城市垃圾和工业污染物,土壤各重金属质量分数普遍走高。B 点土壤中的镉、铬质量分数明显高于其余各点,其表层镉质量分数分别为 C 点和 D 点的 2.55 和 3.10 倍,表层铬质量分数分别为 C 点和 D 点的 1.78 和 3.15 倍,表明土壤中镉、铬存在一定程度的污染。

D 点秦淮大校场位于南京郊区,地表植被为人工构树 *Broussonetia papyrifera* 林,下层有水花生 *Alternanthera philoxeroides*,白茅 *Imperata cylindrical*, 荩草 *Arthraxon hispidus* 等野生草本。由于此点靠近公路,受城市垃圾和交通污染双重影响。但土壤污染程度比 B 点和 C 点轻,这可能与地表植被对污染物的缓解有关。

E 点中和桥位于南京郊区,此点为人工驳岸,人为客土可能对土壤内重金属分配带来一定的影响。土壤剖面受到人为扰动,自然土壤发生层被破坏,导致许多土壤剖面上下土层没有发生学上的联系,土壤中重金属质量分数垂直规律不明显。土壤中镉、铅、铬质量分数较低,但铜质量分数较高。

从土壤中各金属元素质量分数的变动趋势来看,呈现无规律的非同步变化。相对而言,镉的变幅最大。A 点和 E 点表层土壤及 D 点下层土壤中镉的质量分数几乎为 0,但 B 点表层土壤镉的质量分数却高达 4.395 0 mg·kg⁻¹。C 点和 D 点表层土壤镉的质量分数分别为 1.720 4 和 1.416 9 mg·kg⁻¹。铬的变幅也较大。A 点下层质量分数最大(51.538 3 mg·kg⁻¹),但表层容量却很小(7.638 4 mg·kg⁻¹);B 点表层铬的质量分数为 45.914 8 mg·kg⁻¹,显著高于 C 点、D 点和 E 点。铜的变幅相对较小,除了 A 点外,表层土壤中的质量分数变化为 35.000 0 ~ 53.000 0 mg·kg⁻¹,下层土壤变化为 32.000 0 ~ 45.000 0 mg·kg⁻¹。铅质量分数以 B 点和 C 点表层土壤中质量分数最高,高达 52.291 4 mg·kg⁻¹,几乎是 D 点和 E 点的 2 倍。下层土壤中铅的质量分数较表层有所降低。土壤中锌的质量分数以 C 点表层土壤较高,高达 296.870 0 mg·kg⁻¹。A 点表层土壤中锌的质量分数最低(小于 100 mg·kg⁻¹)。其

余各点锌的质量分数变化为 $100 \sim 2100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 2)。

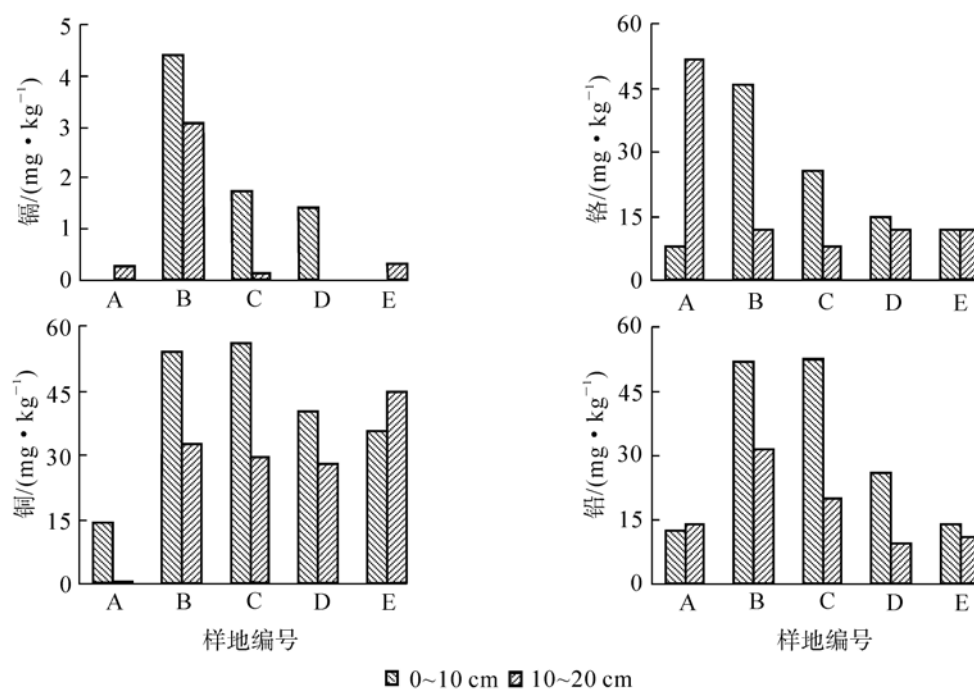


图 1 近河岸土壤镉、铬、铜和铅质量分数

Figure 1 Cd, Cr, Cu, Pb contents of near-riparian zone

目前来看,随着旅游业、渔业和建筑业的发展,秦淮河中下游水体已受到一定程度的污染。由于近水岸土壤靠近水体,所以,水源污染进而造成河岸带土壤污染已成为河岸生态系统退化的重要原因。

2.1.2 远河岸带土壤重金属分布 远河岸带土壤重金属质量分数如图 3 和图 4 所示。远河岸土壤重金属质量分数较近河岸有所减少(除 A 点、E 点外),表明土壤重金属质量分数与距离水体的远近有一定的相关性。这可能是由于远河岸远离水体,受水污染影响较轻,再加上污染物向近水方向的淋溶,重金属元素在近河岸富集造成的。

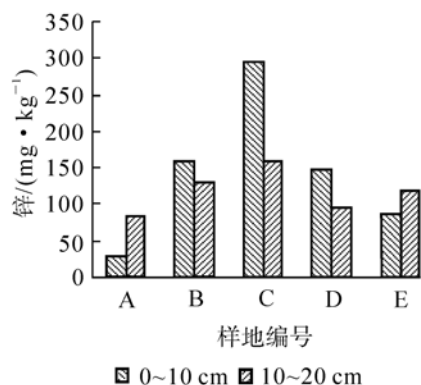


图 2 近河岸土壤锌的质量分数

Figure 2 Zn contents of near-riparian zone

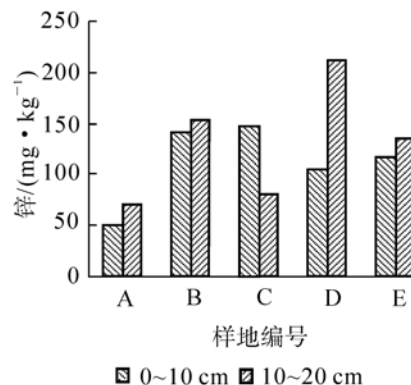


图 3 远河岸土壤锌的质量分数

Figure 3 Zn contents of far-riparian zone

A 点表层土壤中镉质量分数几乎为 0, 下层土壤的质量分数($0.3102 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)明显小于中下游水岸。土壤中镉质量分数以 B 点和 E 点表层最高, 分别为 2.8651 , $1.2971 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于国家

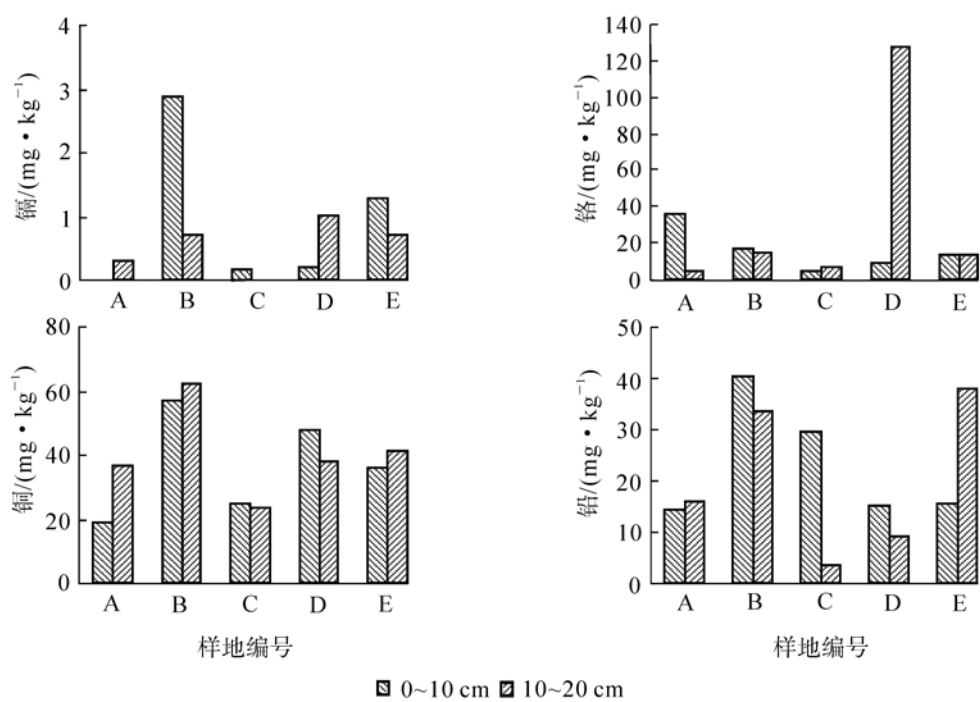


图 4 远河岸土壤镉、铬、铜和铅的质量分数

Figure 4 Cd, Cr, Cu, Pb contents of far-riparian zone

二级质量标准($0.600\ 0\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),土壤镉污染严重。下层土壤镉质量分数较表层有所降低。土壤中铬质量分数除 D 点较高外($127.507\ 1\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),其余各点质量分数均较低。

表层土壤中的铜质量分数多变化为 $19.000\ 0 \sim 57.000\ 0\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,以 A 点和 C 点较低(小于 $25.000\ 0\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),B 点最高($56.792\ 3\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。下层土壤中铜质量分数变化与表层土壤趋势相同。铅、锌质量分数以 B 点和 C 点最高,质量分数分别是 A 点、D 点和 E 点的 2~3 倍。说明两处表层土壤中铅、锌富集较多。

2.2 河岸带土壤重金属质量分数的相关性分析

为了解不同区域土壤重金属元素之间的相关性,在对样品进行基本分析的基础上,对调查土壤重金属元素进行两两相关性分析(表 3)。结果表明,铜与镉、锌有极显著的正相关($P < 0.01$),铅与镉、铜、锌具有极显著正相关($P < 0.01$),其他重金属之间相关性不明显。土壤 pH 值是影响土壤重金属质量分数的一关键因子^[11]。本研究的相关分析结果也表明,pH 值与镉、铅、铜、锌都有一定的相关性,其中与铜、锌呈显著正相关($P < 0.05$)。由此可见,土壤重金属铜和锌受 pH 值影响最大,镉和铅受 pH 值影响较大。

2.3 河岸带土壤重金属污染评价

秦淮河为南京市域内一条著名的自然河、景观河,被南京人誉为“母亲河”。但是,近年来由于城市扩张,河流生态系统,特别是河岸生态系统受到人类活动的严重干扰。在一些地段人们随意填埋河道,堆放废弃物,或将河道渠道化,有的地段还开辟成农田或菜地,使得河流水体污染、河岸受

表 3 土壤重金属元素与 pH 值之间的相关矩阵

Table 3 Correlation matrix between soil heavy metals and pH values

	镉	铬	铜	铅	锌	pH
镉	1.000 0	0.190 8	0.511 1 *	0.734 7 **	0.436 9	0.257 0
铬		1.000 0	-0.034 3	-0.055 9	0.351 1	-0.076 7
铜			1.000 0	0.612 1 **	0.593 8 **	0.545 5 *
铅				1.000 0	0.625 4 **	0.317 2
锌					1.000 0	0.483 6 *
pH						1.000 0

说明: * 为显著相关($P < 0.05$); ** 为极显著相关($P < 0.01$)。

损, 河岸生态系统应有的功能几乎丧失。

参照南京地区土壤重金属环境背景值, 秦淮河河岸带各段几乎都存在不同程度的污染。镉的质量分数已经明显高于镉的背景值($0.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 有的地段还严重超标(B点、C点和D点)。铅污染高于背景值($24.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的有B点、C点和E点; 铬的质量分数均小于背景值($59.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 污染程度较轻; B点、C点、D点和E点各点铜质量分数均高于背景值($32.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); 锌的富集较为明显, 除A点外其余各点均高于其背景值($76.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

根据单因子污染指数, B点污染程度最大($P_i > 1$), 其次是C点(P_i 接近1), 应该引起一定重视。各金属元素污染指数排列顺序镉 > 锌 > 铜 > 铬 > 铅, 其中, 镉污染程度最为严重。根据内梅罗综合污染指数(P_n)可看出, B点土壤上下层重金属多因子综合污染指数为5.330 2, 3.745 8, 均大于3.0, 为重度污染; C点表层土壤综合污染指数大于2.0, 为中度污染; D点表层土壤综合污染指数大于1.0, 为轻度污染; A点和E点表层土壤综合污染指数小于0.7, 表明土壤相对清洁安全(表4)。

表 4 秦淮河河岸带土壤重金属污染指数

Table 4 The population indexes of heavy metal of riparian zone soil in Qinhuai River

采样地点		单因子污染指数 (P_i)						综合污染指数 (P_n)
		镉	铬	铜	铅	锌	均值	
A (溧水东屏)	近河岸	0.001 7	0.038 2	0.142 4	0.042 1	0.114 1	0.067 7	0.111 4
	远河岸	0.428 2	0.257 9	0.002 8	0.046 7	0.331 7	0.2134	0.338 3
B (江宁殷巷)	近河岸	7.325 0	0.229 6	0.537 7	0.173 5	0.631 6	1.779 4	5.330 2
	远河岸	5.152 0	0.059 5	0.327 1	0.104 4	0.519 7	1.232 5	3.745 8
C (江宁岔路口)	近河岸	2.867 3	0.128 6	0.557 8	0.174 3	1.187 5	0.983 1	2.143 3
	远河岸	0.259 8	0.040 5	0.294 1	0.067 2	0.636 5	0.259 6	0.486 0
D (秦淮大校场)	近河岸	2.361 7	0.072 9	0.402 0	0.086 7	0.589 2	0.702 5	1.742 2
	远河岸	0.001 7	0.060 0	0.279 1	0.030 8	0.380 5	0.150 4	0.289 3
E (秦淮中和桥)	近河岸	0.001 7	0.060 0	0.355 2	0.047 0	0.352 0	0.163 1	0.276 4
	远河岸	0.521 3	0.058 9	0.448 9	0.037 6	0.478 4	0.309 0	0.428 5
均值		1.892 0	0.100 6	0.334 7	0.081 0	0.522 1	0.586 1	2.707 5

3 结论

秦淮河河岸带土壤重金属质量分数在水平和垂直层次上均表现一定异质性。表现为近水区土壤重金属质量分数一般要高于远水区, 表层土壤重金属质量分数高于下层。这与水源污染及河岸土壤遭到人为干扰密切相关。由于不同地点生境的变化及外界影响程度不同, 不同重金属元素的污染程度有较大的差异。

不同区域土壤污染物质量分数差异明显。上游河岸(溧水东屏)几乎未受人为干扰, 水质清澈, 土壤重金属离子质量分数均明显小于中下游水岸, 土壤表现为清洁安全; 位于中下游的江宁殷巷由于受城市扩张和渔牧业发展的影响, 土壤中的镉、锌质量分数增加, 多因子综合污染指数 > 3.0, 为重度污染, 应引起政府部门的高度重视; 江宁岔路口表层土壤综合污染指数 > 2.0, 为中度污染。秦淮大校场附近河岸植被茂密, 缓冲作用强, 表层土壤综合污染指数 > 1.0, 为轻度污染。

5种金属元素污染指数排序为镉 > 锌 > 铜 > 铬 > 铅, 镉污染程度最为严重, 其次是锌。所以, 秦淮河河岸带生态修复以镉污染和锌污染治理最为迫切。其污染物的具体来源还有待于进一步研究。

土壤重金属元素富集存在一定的相关性。铜与镉之间表现显著的正相关($P < 0.05$), 与锌之间具有极显著的正相关($P < 0.01$); 铅与镉、铜、锌表现出极显著正相关($P < 0.01$), 但其他重金属之间相关性不明显。土壤 pH 值与铜、锌元素呈显著正相关($P < 0.05$)。

参考文献:

- [1] MCCLAIN M E, BOYER E W, DENT C L, *et al.* Biogeochemical hot spots and hot moments at the interface of terrestrial and aquatic ecosystems [J]. *Ecosystem*, 2003, **6**: 301 – 312.
- [2] FRANKLIN J F. Scientific basis for new perspectives in forests and streams [M]// NAIMAN R J. *Watershed management, Balancing Sustainability and Environmental Change*. New York : SpringerVerlag, 1992: 25 – 72.
- [3] NAIMAN R J. *Forest Ecology: Influence of Forests on Streams* [M]. NewYork: McGraw-Hill, 1990: 151 – 153.
- [4] GROFFMAN P M, RICE C W, TIEDJE J M. Denitrification in a tallgrass prairie landscape [J]. *Ecology*, 1993, **74**: 855 – 862.
- [5] SCHADE J D, FISHER S G, GRIMM N B, *et al.* The influence of a riparian shrub on nitrogen cycling in a Sonoran desert stream [J]. *Ecology*, 2001, **82**: 3 363 – 3 376.
- [6] 张建春, 彭补拙. 河岸带研究及其退化生态系统的恢复与重建[J]. 生态学报, 2003, **23** (1): 56 – 63.
- [7] 封富记, 杨海军, 于智勇. 受损河岸生态系统近自然修复实验的初步研究[J]. 东北师大学报: 自然科学版, 2004, **36** (1): 101 – 106.
- [8] 陈吉泉. 河岸植被特征及其在生态系统和景观中的作用[J]. 应用生态学报, 1996, **7** (4): 439 – 448.
- [9] 王超, 王沛芳, 唐劲松, 等. 河道沿岸芦苇带对氨氮的削减特性的研究[J]. 水科学进展, 2003, **14** (3): 311 – 317.
- [10] 张建春, 彭补拙. 河岸带及其生态重建研究[J]. 地理研究, 2002, **21** (3): 373 – 383.
- [11] 喻菲, 张成, 张晟, 等. 三峡水库消落区土壤重金属质量分数及分布特征[J]. 西南农业大学学报: 自然科学版, 2006, **28** (1): 165 – 168.
- [12] 李建, 郑春江. 环境背景值数据手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [13] 郑海龙, 陈杰, 邓文靖, 等. 城市边缘带土壤重金属空间变异及其污染评价[J]. 土壤学报, 2006, **43** (1): 39 – 45.