

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 10 期 Vol.32 No.10 **2012**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 10 期

2012 年 5 月 (半月刊)

## 目次

|                                     |                           |
|-------------------------------------|---------------------------|
| 基于系统动力学的城市住区形态变迁对城市代谢效率的影响.....     | 李旋旗,花利忠 (2965)            |
| 居住-就业距离对交通碳排放的影响 .....              | 童抗抗,马克明 (2975)            |
| 经济学视角下的流域生态补偿制度——基于一个污染赔偿的算例 .....  | 刘涛,吴钢,付晓 (2985)           |
| 旅游开发对上海滨海湿地植被的影响.....               | 刘世栋,高峻 (2992)             |
| 汶川地震对大熊猫主食竹——拐棍竹竹笋生长发育的影响.....      | 廖丽欢,徐雨,冉江洪,等 (3001)       |
| 江西省森林碳蓄积过程及碳源/汇的时空格局.....           | 黄麟,邵全琴,刘纪远 (3010)         |
| 伊洛河流域草本植物群落物种多样性.....               | 陈杰,郭屹立,卢训令,等 (3021)       |
| 新疆绿洲农田不同连作年限棉花根际土壤微生物群落多样性.....     | 顾美英,徐万里,茆军,等 (3031)       |
| 荒漠柠条锦鸡儿 AM 真菌多样性.....               | 贺学礼,陈杰,郭辉娟,等 (3041)       |
| 彰武松、樟子松光合生产与蒸腾耗水特性 .....            | 孟鹏,李玉灵,尤国春,等 (3050)       |
| 中亚热带常绿阔叶林粗木质残体呼吸季节动态及影响因素.....      | 刘强,杨智杰,贺旭东,等 (3061)       |
| 盐土和沙土对新疆常见一年生盐生植物生长和体内矿质组成的影响 ..... | 张科,田长彦,李春俭 (3069)         |
| 长白山北坡林线灌木草本植物与岳桦的动态关系.....          | 王晓东,刘惠清 (3077)            |
| 不同生态条件对烤烟形态及相关生理指标的影响.....          | 颜侃,陈宗瑜 (3087)             |
| 基于因子分析的首蓿叶片叶绿素高光谱反演研究 .....         | 肖艳芳,官辉力,周德民 (3098)        |
| 三峡库区消落带水淹初期土壤种子库月份动态.....           | 王晓荣,程瑞梅,唐万鹏,等 (3107)      |
| 三种利用方式对羊草草原土壤氨氧化细菌群落结构的影响.....      | 邹雨坤,张静妮,陈秀蓉,等 (3118)      |
| 西洋参根残体对自身生长的双重作用 .....              | 焦晓林,杜静,高微微 (3128)         |
| 不同程度南方菟丝子寄生对入侵植物三叶鬼针草生长的影响 .....    | 张静,闫明,李钧敏 (3136)          |
| 山东省部分水岸带土壤重金属含量及污染评价.....           | 张菊,陈诗越,邓焕广,等 (3144)       |
| 太湖蓝藻死亡腐烂产物对狐尾藻和水质的影响.....           | 刘丽贞,秦伯强,朱广伟,等 (3154)      |
| 不同生态恢复阶段无瓣海桑人工林湿地中大型底栖动物群落的演替.....  | 唐以杰,方展强,钟燕婷,等 (3160)      |
| 江西鄱阳湖流域中华秋沙鸭越冬期间的集群特征.....          | 邵明勤,曾宾宾,尚小龙,等 (3170)      |
| 秦岭森林鼠类对华山松种子捕食及其扩散的影响 .....         | 常罡,王开锋,王智 (3177)          |
| 内蒙古草原小毛足鼠的活动性、代谢特征和体温的昼夜节律 .....    | 王鲁平,周顺,孙国强 (3182)         |
| 温度和紫外辐射胁迫对西藏飞蝗抗氧化系统的影响.....         | 李庆,吴蕾,杨刚,等 (3189)         |
| “双季稻-鸭”共生生态系统 C 循环 .....            | 张帆,高旺盛,隋鹏,等 (3198)        |
| 水稻籽粒灌浆过程中蛋白质表达特性及其对氮肥运筹的响应.....     | 张志兴,陈军,李忠,等 (3209)        |
| <b>专论与综述</b>                        |                           |
| 海水富营养化对海洋细菌影响的研究进展 .....            | 张瑜斌,章洁香,孙省利 (3225)        |
| 海洋酸化效应对海水鱼类的综合影响评述.....             | 刘洪军,张振东,官曙光,等 (3233)      |
| 入侵种薇甘菊防治措施及策略评估.....                | 李鸣光,鲁尔贝,郭强,等 (3240)       |
| <b>研究简报</b>                         |                           |
| 渭干河-库车河三角洲绿洲土地利用/覆被时空变化遥感研究 .....   | 孙倩,塔西甫拉提·特依拜,张飞,等 (3252)  |
| 2009 年冬季东海浮游植物群集 .....              | 郭术津,孙军,戴民汉,等 (3266)       |
| 新疆野生多伞阿魏生境土壤理化性质和土壤微生物.....         | 付勇,庄丽,王仲科,等 (3279)        |
| 塔里木盆地塔里木沙拐枣群落特征 .....               | 古丽努尔·沙比尔哈孜,潘伯荣,段士民 (3288) |
| 矿区生态产业共生系统的稳定性.....                 | 孙博,王广成 (3296)             |

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 338 \* zh \* P \* ¥70.00 \* 1510 \* 36 \* 2012-05



**封面图说:** 哈巴雪山和金沙江——“三江并流”自然景观位于青藏高原南延部分的横断山脉纵谷地区,由怒江、澜沧江、金沙江及其流域内的山脉组成。它地处东亚、南亚和青藏高原三大地理区域的交汇处,是世界上罕见的高山地貌及其演化的代表地区,也是世界上生物物种最丰富的地区之一。哈巴雪山在金沙江左岸,与玉龙雪山隔江相望。图片反映的是金沙江的云南香格里拉段,远处为哈巴雪山。哈巴雪山主峰海拔 5396 m,而最低江面海拔仅为 1550 m,山脚与山顶的气温差达 22.8℃,巨大的海拔差异形成了明显的高山垂直性气候。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201104060443

张菊, 陈诗越, 邓焕广, 吴爱琴, 孙卫波, 陈影影. 山东省部分水岸带土壤重金属含量及污染评价. 生态学报, 2012, 32(10): 3144-3153.

Zhang J, Chen S Y, Deng H G, Wu A Q, Sun W B, Chen Y Y. Heavy metal concentrations and pollution assessment of riparian soils in Shandong Province. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(10): 3144-3153.

## 山东省部分水岸带土壤重金属含量及污染评价

张 菊<sup>1</sup>, 陈诗越<sup>1,\*</sup>, 邓焕广<sup>1,2</sup>, 吴爱琴<sup>1</sup>, 孙卫波<sup>1</sup>, 陈影影<sup>1</sup>

(1. 聊城大学 环境与规划学院, 聊城 252000; 2. 华东师范大学资源与环境科学学院, 上海 200062)

**摘要:** 为了解山东省水岸带土壤重金属的含量特征和污染状况, 于 2010 年 9 月—10 月采集了 39 个水岸带土壤样品, 分析了土壤中 Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 和 Hg 的含量以及土壤的 pH 值、粒度和有机质, 采用单因子指数法、综合指数法和潜在生态危害指数法对水岸带土壤重金属污染进行了评价, 并利用相关分析和聚类分析对其来源进行了初步的解析。结果表明: 水岸带土壤的 pH 值为 5.67—8.66, 主要呈碱性; 有机质的平均含量为 9.39 g/kg, 土壤粒度主要以砂粒和粉粒为主, 其平均体积百分比分别为 50.33% 和 38.48%, 平均粒径为 89.69  $\mu\text{m}$ ; Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 和 Hg 的平均含量为 53.03 mg/kg、10.33 mg/kg、24.96 mg/kg、18.38 mg/kg、56.13 mg/kg、0.142 mg/kg、22.48 mg/kg 和 0.020 mg/kg。各水岸带土壤重金属的含量均符合《土壤环境质量标准》(GB15618—1995) 二级标准。以山东省土壤元素背景值为评价标准, 水岸带土壤重金属总体表现为轻度污染和轻微生态风险, 其中 Cd 和 Hg 是主要的污染因子, 其对潜在生态危害指数的平均贡献率分别为 46.8% 和 33.6%。洮赵新河、廖河、门楼水库和东平湖水岸带土壤重金属污染及潜在生态危害明显高于其他水源地。源解析的结果表明: 水岸带土壤重金属的含量受自然源和人为源的双重影响, 人为源主要包括地表径流、工业废气、垃圾和交通运输等。

**关键词:** 重金属; 土壤; 污染评价; 水岸带; 水源地

## Heavy metal concentrations and pollution assessment of riparian soils in Shandong Province

ZHANG Ju<sup>1</sup>, CHEN Shiyue<sup>1,\*</sup>, DENG Huanguang<sup>1,2</sup>, WU Aiqin<sup>1</sup>, SUN Weibo<sup>1</sup>, CHEN Yingying<sup>1</sup>

1 School of Environment and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China

2 College of Resources and Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China

**Abstract:** A total of 39 riparian soil samples were collected in 24 rivers, five reservoirs and Dongping Lake in Shandong province from September to October 2010. Concentrations of heavy metals, such as Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb and Hg, as well as some basic physiochemical properties, including pH, particle size and organic matter content, were measured. Using the soil background concentrations of heavy metals in Shandong Province as standards, single factor indices and comprehensive indices of heavy metals were calculated to assess the degree of heavy metal contamination. The potential ecological risk index method was applied to evaluate the ecological risk of heavy metal contamination in riparian soil. The results showed that the riparian soil was mainly alkaline with a pH range of 5.67—8.66. The organic matter content was 2.60—33.74 g/kg with an average of 9.39 g/kg. The riparian soil had coarse granularity with an average particle size of 89.69  $\mu\text{m}$ . Silt and sand grains were the main particles in riparian soil with average volume fractions of 50.33% and 38.48%. The average concentrations of Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb and Hg were 53.03 mg/kg, 10.33 mg/kg, 24.96 mg/kg, 18.38 mg/kg, 56.13 mg/kg, 0.142 mg/kg, 22.48 mg/kg and 0.020 mg/kg, respectively. Heavy metal concentrations in the riparian soil samples were all lower than the heavy metal limit values of the class II environmental

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (40772209, 41072258, 40901276); 山东省自然科学基金 (ZR2010DL007)

**收稿日期:** 2011-04-06; **修订日期:** 2011-07-11

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenshiyue@lccu.edu.cn

quality standard for soils in China (GB15618—1995). Heavy metal pollution in riparian soil was generally low and posed low ecological risk. The degree of contamination of the different heavy metals decreased as follows:  $\text{Cd} > \text{Hg} > \text{Ni} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Co}$  and the potential ecological risk were in the order of  $\text{Cd} > \text{Hg} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Co} > \text{Cr} > \text{Zn}$ . Thus, Cd and Hg most contributed to the ecological risk with average ratios of 46.8% and 33.6%. A higher degree of heavy metal pollution was found in riparian soil from Zhu Zhaoxin River, Liaohe River, Menlou Reservoir and Dongping Lake than riparian soil from other water source areas. Correlation analysis revealed that heavy metal concentrations were significantly and positively correlated with each other, and also with organic matter; in contrast, they were negatively correlated with average particle size. Hierarchical cluster analysis, based on Pearson correlation coefficients, was used to identify the sources of heavy metals in the riparian soils. The results suggested that the heavy metal concentrations in riparian soils were determined by both the soil parent materials and external sources related to human activities. Specifically, Cr, Co, Ni and Cu largely originated from soil parent materials; Zn and Cd were associated with contaminated surface runoff, Hg might be related to industry and domestic solid waste, and Pb probably derived from vehicle emissions.

**Key Words:** heavy metal; soil; pollution assessment; riparian zone; water source area

水岸带是水陆生态系统的过渡与缓冲区域,是非常重要的典型生态交错区<sup>[1]</sup>,按水体类型的不同可划分为河岸带、湖滨带<sup>[2]</sup>、水库消落带<sup>[3]</sup>等。水岸带具有重要的生态、社会、经济和旅游价值,但同时也强烈的受到人类活动的影响,水岸带生态系统的退化和修复已引起国内外学者的广泛关注和研究<sup>[4-6]</sup>。研究表明<sup>[7-8]</sup>:水岸带可通过物理、化学和生物作用滞留阻控多种污染物质,尤其是对地表径流中的 N、P 营养物质具有较好的截留转化作用,但不能降解的污染物质则将长期滞留于水岸带环境中,对水生态系统造成持久性的影响。重金属是典型的持久性毒物(PTS),具有生物富集性、持久性、毒性和来源的广泛性等特点。地表径流以及农业耕作、垃圾堆放、旅游等人类活动均可向水岸带环境中输入大量重金属,造成水岸带土壤重金属的污染<sup>[9]</sup>。水岸带土壤中重金属不仅对水岸带生态系统的生物具有毒性,同时在一定条件下又可进入水体导致“二次污染”,因此开展水岸带土壤重金属研究对于水岸带生态系统的保护、恢复和重建具有重要的科学意义和实践意义。

山东省是北方严重缺水的省份之一,年人均水资源占有量  $334 \text{ m}^3$ ,约为全国人均占有量的  $1/6$ ,世界人均占有量的  $1/25$ <sup>[10]</sup>。因此,水源地的生态安全对于山东省社会经济的可持续发展具有重大意义。同时,南四湖与东平湖还是我国南水北调东线的重要调蓄湖,其水质及流域生态安全状况将直接影响输水水质安全。然而,近年来随着经济社会的快速发展,山东省的河流、湖泊、水库等地表水源正日益受到水质恶化和水源生态系统破坏等的威胁。根据本课题组的调查结果发现,水源地河岸生态系统出现不同程度的退化,主要表现在水岸带垃圾堆积、土壤遭受污染、护岸植被消失、生物多样性降低,生态系统的功能几乎丧失等方面。土壤重金属是反映水岸带环境质量变化的重要指标之一<sup>[9,11]</sup>,但目前关于山东省水岸带土壤重金属的研究较少<sup>[12-13]</sup>。因此,本文拟对山东省部分水岸带土壤的重金属含量进行分析和评价,以了解水岸带土壤重金属污染的状况及其来源,为山东省水岸带生态系统的保护和生态重建提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 样品采集和预处理

样品采集时间为 2010 年 9 月—10 月,样点主要设置在山东省东平湖、水库(5 个)和河流(24 条)的近岸带(距离水体 0—3 m)(图 1)<sup>[9]</sup>,每一样点均用 GPS 进行定位,并记录采样点周围的环境信息。采样时采用多点(5—12 点)混合取样法,用有机玻璃铲各取 0—20 cm 表层土壤样品,用四分法组成 1 个混合样品,共采集样品 39 个。所有样品均装入聚乙烯密封塑料袋中,放入便携式冷藏箱带回实验室冷冻保存。

土壤样品经自然风干,剔除样品中植物根系,用木棍碾碎并用玛瑙研钵研磨成粉末,取出一部分样品用以测定 pH 值和粒度,剩余部分过 100 目尼龙网筛测定重金属和有机质的含量。

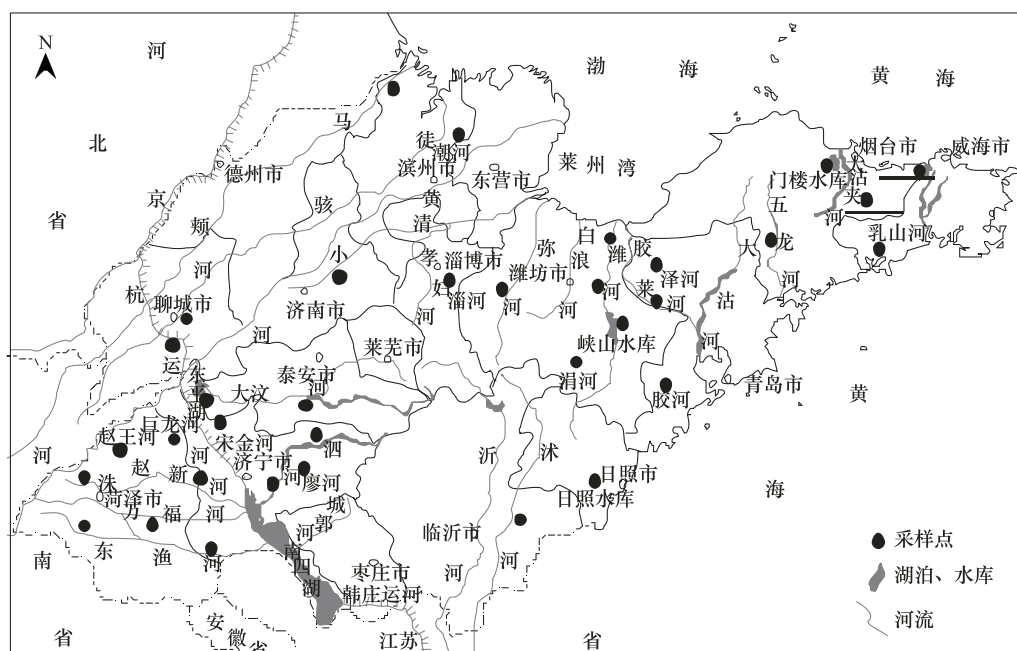


图1 采样点示意图

Fig. 1 Sketch map showing the sampling sites

东平湖环湖共设有6个采样点

## 1.2 分析方法

样品 pH 值的测定采用 pH 计法(水土比为 2.5:1)<sup>[14]</sup>,粒度采用 LS 13 320 型激光粒度仪测定<sup>[15]</sup>,有机质的测定采用重铬酸钾-外加热法<sup>[16]</sup>。样品重金属的测定在中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室完成。土壤样品经过密闭微波消解后,用 ICP-AES 测定重金属 Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 的含量<sup>[17]</sup>,Hg 采用直接汞分析仪测定。在分析过程中均做相应的试剂空白,并采用国家土壤标准物质 GBW 07406(GSS-6)进行 3 个平行分析,各重金属元素分析结果最大误差均小于 5%。随机抽取了 4 个样品做 5 次重复试验,各重金属元素的相对标准偏差均可以控制在 10% 以内。

## 1.3 评价方法

以山东省土壤背景值作为土壤重金属的评价标准<sup>[18]</sup>,分别采用单因子指数法、综合指数法和潜在生态危害指数法对水岸带土壤重金属的污染水平及其潜在生态危害进行评价。单因子指数法的计算公式为<sup>[19]</sup>: $P_i = C_i/S_i$ , $P_i \leq 1$  表示未污染, $1 < P_i \leq 2$  表示轻污染, $2 < P_i \leq 3$  表示中污染, $P_i > 3$  表示重污染。综合指数法即内梅罗指数法,计算公式为<sup>[19-20]</sup>: $P = [(avg(P_i))^2 + (\max(P_i))^2]^{1/2}$ , $P \leq 1$  表示未污染, $1 < P \leq 2$  表示轻度污染, $2 < P \leq 3$  表示中度污染, $P_i > 3$  表示重度污染。

潜在生态危害指数法的计算公式为<sup>[19,21]</sup>: $RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot C_f^i = \sum_{i=1}^m T_r^i \cdot \frac{C_n^i}{C_0^i}$ ,式中, $T_r^i$  为单一重金属的毒性系数,具体为  $Zn=1 < Cr=2 < Cu=Ni=Pb=Co=5 < Cd=30 < Hg=40$ <sup>[22]</sup>。重金属潜在生态危害系数  $E_r^i$ 、潜在生态危害指数  $RI$  与污染程度的关系如表 1 所示。

## 1.4 数据分析方法

运用 Excel2003 软件和 SPSS13.0 软件对数据进行了处理和统计分析,绘图采用 Origin 8.0 和 CorelDRAW 9 完成。

表 1 潜在生态危害指数评价标准

Table 1 Assessment standard of potential ecological risk index

| $E_r^i$ | 单一重金属的生态风险程度<br>Ecological risk level of single heavy metal | $RI$    | 生态风险程度<br>Ecological risk level of the environment |
|---------|-------------------------------------------------------------|---------|----------------------------------------------------|
| <40     | 生态危害轻微                                                      | <150    | 生态危害轻微                                             |
| 40—80   | 生态危害中等                                                      | 150—300 | 生态危害中等                                             |
| 80—160  | 生态危害较高                                                      | 300—600 | 生态危害较高                                             |
| 160—320 | 生态危害高                                                       | ≥600    | 生态危害高                                              |
| ≥320    | 生态危害极高                                                      |         |                                                    |

2 结果与讨论

2.1 水岸带土壤的基本理化性质

水岸带土壤的基本理化参数如表 2,土壤 pH 值的范围为 5.67—8.66,其中,日照水库、米山水库、高陵水库、门楼水库、沭河和乳山河点位土壤的 pH 值小于 7,略显酸性,其他点位土壤均呈碱性。水岸带土壤的酸碱度主要是受成土母质和土壤类型的影响<sup>[23-24]</sup>。有机质的平均含量低于背景值,其中,51.3% 的点位有机质含量小于 10 g/kg。从土壤的粒度来看,水岸带土壤主要以粉粒和砂粒为主,5 个点位土壤样品中石砾含量大于 0,其中高陵水库的石砾含量最高,为 10.90%。由平均粒径可见,水岸带土壤的粒径较粗,25.6% 的点位土壤平均粒径大于 100 μm。水岸带土壤粒度和有机质的含量除受到成土母质的影响外,水岸带对地表径流中泥沙的选择性截留以及汛期水体淹没水岸带冲刷带走土壤中的细颗粒物并沉淀下泥沙也可能是导致水岸带土壤粒径较粗和有机质含量偏低的原因<sup>[11,25]</sup>。从各理化参数的变异系数来看,水岸带土壤有机质含量和粒度的空间分布差异较大,反映了土壤质地和物质来源构成的差异性。

表 2 水岸带土壤理化参数统计

Table 2 Physicochemical characterization of riparian soil samples

| 统计参数<br>Statistic<br>parameter                             | pH 值<br>pH value | 有机质<br>Organic matter<br>content<br>/(g/kg) | 粘粒含量<br>Clay volume<br>fraction<br>(<0.002mm)<br>/% | 粉粒含量<br>Silt volume<br>fraction<br>(0.002—0.05mm)<br>/% | 砂粒含量<br>Sand volume<br>fraction<br>(0.05—1 mm)<br>/% | 石砾含量<br>Gravel volume<br>fraction<br>(1—3 mm)<br>/% | 平均粒径<br>Average<br>particle<br>size<br>/μm |
|------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 平均值 Average                                                | 7.84             | 9.39                                        | 10.72                                               | 50.33                                                   | 38.48                                                | 0.47                                                | 89.69                                      |
| 最小值 Minimum                                                | 5.67             | 2.60                                        | 3.51                                                | 18.32                                                   | 5.30                                                 | 0.00                                                | 13.42                                      |
| 最大值 Maximum                                                | 8.66             | 33.74                                       | 27.00                                               | 74.40                                                   | 77.60                                                | 10.90                                               | 455.21                                     |
| 标准偏差 Standard deviation                                    | 0.76             | 6.08                                        | 5.53                                                | 17.84                                                   | 21.80                                                | 1.92                                                | 95.98                                      |
| 变异系数<br>Coefficient of variance/%                          | 9.7              | 64.7                                        | 51.58                                               | 35.45                                                   | 56.66                                                | 408.61                                              | 107.0                                      |
| 偏度系数 Skewness                                              | -1.45            | 1.78                                        | 0.88                                                | -0.60                                                   | 0.40                                                 | 4.86                                                | 2.16                                       |
| 峰度系数 Kurtosis                                              | 1.34             | 5.60                                        | 0.82                                                | -1.16                                                   | -1.26                                                | 24.96                                               | 5.06                                       |
| 山东省土壤背景值<br>Soil Background values of<br>Shandong province | 7.7              | 11.6                                        | —                                                   | —                                                       | —                                                    | —                                                   | —                                          |

2.2 水岸带土壤重金属的含量水平

图 2 为水岸带土壤重金属含量的频数分布。应用 Shapiro-Wilk 法对数据进行正态检验,Cr、Co、Ni、Cu 和 Zn 的偏度系数近似为 0,属于正态分布,Cd、Pb 和 Hg 的偏度系数大于 0,数据呈正偏态分布。

表 3 为水岸带土壤重金属含量的参数统计,与土壤环境质量标准(GB15618—1995)一级标准值相比,除 Cd 外其他 7 种重金属含量均较好的符合一级标准,而 Cd 有 7 个点位超标,超标率为 17.9%;与二级标准值相比,则全部达标。与山东省土壤背景值相比,Cd 的平均含量约为背景值的 1.7 倍,Hg 的含量略高于背景值,而其他 6 种重金属的平均含量均小于背景值。各水源地 Hg 和 Cd 含量的空间分布差异较大,其最大值分别

为背景值的 3.6 倍和 4.5 倍。

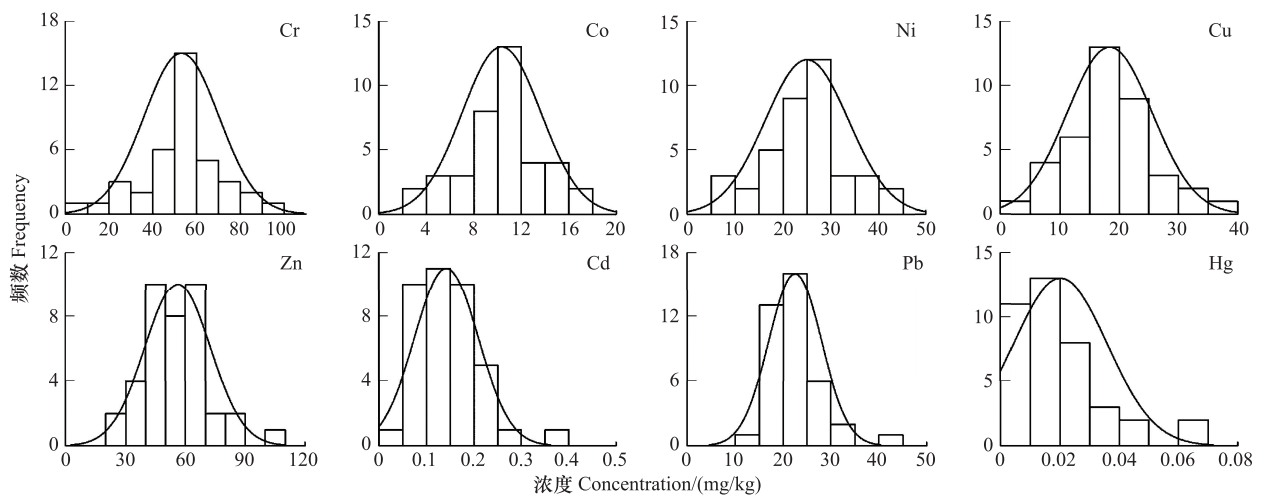


图 2 水岸带土壤重金属含量的频数分布

Fig. 2 Histograms of frequency of heavy metal concentrations in riparian soil samples

表 3 水岸带土壤重金属浓度参数统计/(mg/kg)

Table 3 Statistic values of heavy metal concentrations in riparian soil samples

| 统计参数 Statistic parameters                               | Cr    | Co    | Ni    | Cu    | Zn     | Cd    | Pb    | Hg    |
|---------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 平均值 Average                                             | 53.03 | 10.33 | 24.96 | 18.38 | 56.13  | 0.142 | 22.48 | 0.020 |
| 最小值 Minimum                                             | 6.42  | 2.25  | 5.72  | 3.94  | 25.91  | 0.037 | 14.74 | 0.003 |
| 最大值 Maximum                                             | 90.53 | 17.50 | 44.64 | 35.01 | 107.60 | 0.382 | 42.97 | 0.069 |
| 标准偏差 Standard deviation                                 | 17.16 | 3.33  | 8.71  | 7.19  | 16.49  | 0.067 | 5.52  | 0.016 |
| 变异系数 Coefficient of variance/%                          | 32.4  | 32.2  | 34.9  | 39.1  | 29.4   | 47.5  | 24.6  | 78.3  |
| 偏度系数 Skewness                                           | -0.47 | -0.12 | -0.09 | 0.22  | 0.65   | 1.23  | 1.52  | 1.51  |
| 峰度系数 Kurtosis                                           | 0.98  | 0.46  | 0.31  | 0.39  | 1.28   | 2.91  | 3.78  | 2.59  |
| 山东省土壤背景值<br>Soil background values of Shandong Province | 66.0  | 13.6  | 25.8  | 24.0  | 63.5   | 0.084 | 25.8  | 0.019 |
| 土壤一级标准 (GB15618—1995)<br>National standard-Class I      | 90    | —     | 40    | 35    | 100    | 0.20  | 35    | 0.15  |
| 超标率 Over-limit ratio/%                                  | 2.6   | —     | 5.1   | 2.6   | 2.6    | 17.9  | 2.6   | 0.0   |

### 2.3 水岸带土壤重金属的污染评价

水岸带土壤各重金属的平均单因子指数表现为: Cd(1.69) > Hg(1.06) > Ni(0.97) > Zn(0.88) > Pb(0.87) > Cr(0.80) > Cu(0.77) > Co(0.76), Cd 和 Hg 表现为轻污染, 其他重金属表现为未污染。从各重金属单因子指数的分布情况来看(图 3): Cr、Co、Ni、Cu、Zn 和 Pb 的污染指数均小于 2, 主要表现为未污染, 其次为轻污染。其中 Ni 未污染和轻污染的比例较为接近。Hg 也主要表现为未污染, 其次为轻污染, 污染指数大于 2 表现为中污染和重污染的样品所占比例为 12.8%。与其他重金属不同, Cd 主要表现为轻污染, 其次为中污染, 未污染样品仅占 15.4%, 并且还有 5.1% 表现为重污染。而从综合指数来看, 其范围为 0.56—3.53, 平均值为 1.45, 整体表现为轻度污染。水岸带土壤重金属综合指数值的分布如下: 轻度污染(66.7%) > 未污染(20.5%) > 中度污染(10.3%) > 重度污染(2.6%)。

水岸带土壤各重金属的潜在生态危害系数的范围为 0.19—144.82, 因此各重金属的生态危害均在较高水平以下( $E_i^p < 160$ )。各重金属的平均潜在生态危害系数表现为: Cd(50.67) > Hg(42.40) > Ni(4.84) > Pb(4.36) > Cu(3.83) > Co(3.80) > Cr(1.61) > Zn(0.88), Cd 和 Hg 具有中等的生态危害, 而其他 6 种重金属的

生态危害则为轻微。从各重金属潜在生态危害系数分布情况来看(图4):Cr、Co、Ni、Cu、Zn 和 Pb 的潜在生态系数的范围为0.19—8.65,均小于40,表现为较低的生态危害;仅Cd和Hg表现出中等以上水平的生态危害,并且Cd表现为中等生态危害的比例最高。8种重金属的潜在生态危害指数(RI)的范围为30.42—309.61,平均值为112.38,总体表现为轻微的生态危害,其中,Cd和Hg对潜在生态危害的较大,其平均贡献率分别为46.8%和33.6%。水岸带土壤重金属潜在生态危害指数的分布如下:生态危害轻微(79.5%)>生态危害中等(17.9%)>生态危害较高(2.6%)。

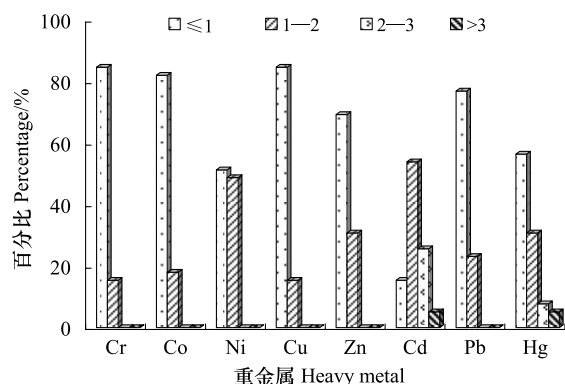


图3 水岸带土壤各重金属单因子指数的分布

Fig. 3 Percentage of riparian soil samples in varied single factor index classes

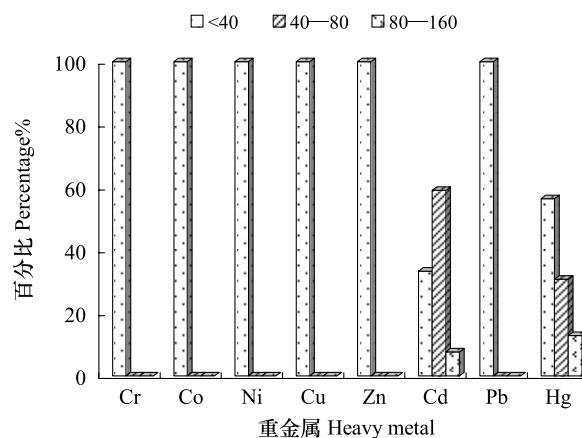


图4 水岸带土壤样品各重金属潜在生态危害指数的分布

Fig. 4 Percentage of riparian soil samples in varied potential ecological risk index classes

从以上分析可以看出,单因子指数法、综合指数法和潜在生态危害指数法的评价结果具有较好的一致性。Hg和Cd的污染程度虽然较轻,但是由于其毒性系数较大,因此表现为中等的生态危害。Ni虽然总体上表现为未污染,但其表现为轻污染的比例较高,仅次于Cd,其污染发展趋势应引起关注。总的来说,各水岸带土壤重金属处于轻度污染的水平,生态危害较低。进一步分析重金属污染评价指数的空间分布特征发现:综合污染水平表现为中度污染以上( $P>2.0$ )同时具有中等水平以上潜在生态危害的点位( $RI\geq 150$ )包括洙赵新河、廖河、门楼水库和东平湖。Co、Ni、Cu、Zn、Cd和Hg含量的极大值均出现在上述点位的样品中,同时还发现洙赵新河1个点位和东平湖2个点位中的8种重金属含量均超过背景值,其中,洙赵新河的综合污染指数和潜在生态危害指数均最高,分别为3.53和309.61,是所有样点中唯一表现为重污染和较高生态风险的点位。根据对采样点周围环境的初步调查分析发现,上述点位重金属污染可能与农业面源污染、农村生活污水、生活垃圾以及水源污染有关。潮河、马颊河和徒骇河岸带土壤重金属的综合污染虽然轻微,却具有中等的潜在生态危害,这主要是由于Hg的潜在生态危害较高( $E_i^p>80$ )导致的。

## 2.4 水岸带土壤重金属的判源分析

元素间的相关分析、聚类分析和因子分析等统计学方法被广泛应用于土壤重金属污染的来源解析<sup>[26-27]</sup>。本研究采用相关分析和聚类分析对水岸带土壤重金属的来源进行初步的分析。水岸带土壤重金属元素和理化指标的Pearson相关系数如表4,Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Hg之间存在显著的相关性,其中,Cr-Ni、Co-Ni、Co-Cu、Ni-Cu、Cu-Zn和Zn-Cd的相关系数均在0.90以上,而Pb仅与Cu、Zn和Cd显著相关。各重金属均与有机质极显著相关,说明土壤有机质是重金属重要的载体。除Pb和Hg外,其他重金属均与土壤的平均粒径呈极显著的负相关。各重金属与pH值的相关性较弱,仅Cd和Pb与pH值分别呈显著正相关和负相关。从各理化指标的相关性来看,有机质和pH值均与平均粒径呈显著负相关。

根据重金属之间的Pearson相关系数进行聚类分析,结果如图5所示:8种重金属元素可以聚为4类:(1)Cr-Ni-Co-Cu;(2)Zn-Cd;(3)Hg;(4)Pb。Cr、Ni、Co、Cu之间存在极显著相关性,说明其具有较好的自然伴生

表4 水岸带土壤重金属和理化性质的 Pearson 相关系数

| 元素<br>Element                    | Co    | Ni     | Cu     | Zn     | Cd     | Pb     | Hg     | 有机质<br>Organic<br>matter | 平均粒径<br>Average<br>particle size | pH      |
|----------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------------|----------------------------------|---------|
| Cr                               | 0.88a | 0.96 a | 0.86 a | 0.73 a | 0.70 a | 0.16   | 0.39b  | 0.56 a                   | -0.55 a                          | 0.29    |
| Co                               |       | 0.94 a | 0.94 a | 0.82 a | 0.77 a | 0.26   | 0.48 a | 0.60 a                   | -0.61 a                          | 0.26    |
| Ni                               |       |        | 0.94 a | 0.84 a | 0.80 a | 0.28   | 0.43 a | 0.61 a                   | -0.60 a                          | 0.28    |
| Cu                               |       |        |        | 0.93 a | 0.86 a | 0.36 b | 0.56 a | 0.71 a                   | -0.65 a                          | 0.32    |
| Zn                               |       |        |        |        | 0.91 a | 0.54 a | 0.60 a | 0.79 a                   | -0.54 a                          | 0.28    |
| Cd                               |       |        |        |        |        | 0.37 b | 0.66 a | 0.80 a                   | -0.60 a                          | 0.34 b  |
| Pb                               |       |        |        |        |        |        | 0.24   | 0.52 a                   | 0.16                             | -0.36 b |
| Hg                               |       |        |        |        |        |        |        | 0.63 a                   | -0.28                            | 0.07    |
| 有机质<br>Organic<br>matter         |       |        |        |        |        |        |        |                          | -0.36 b                          | 0.03    |
| 平均粒径<br>Average<br>particle size |       |        |        |        |        |        |        |                          |                                  | -0.61 a |

a: 99% 置信区间显著; b: 95% 置信区间显著

关系,且其含量均接近背景值,主要表现为未污染,因此可认为其代表自然来源即土壤母质。Zn 和 Cd 均是较易受到人类活动影响的元素,降雨径流、生活污水以及工业废水中含有大量的 Zn 和 Cd<sup>[28-29]</sup>,因此水岸带的土壤极易受到来自于地表径流的“二次污染”<sup>[9]</sup>。水岸带土壤样品中 84.6% 的 Cd 表现为轻度以上污染水平,Zn 也有 30.8% 表现为轻度污染,因此可认为 Zn-Cd 代表的是地表径流污染。同时由图 5 可见,(1)和(2)又可合并为 1 个大类,反映了水岸带土壤重金属的含量同时受到自然源和地表径流外源性输入的影响。Hg 的污染程度和潜在生态危害仅次于 Cd,但并没有与 Cd、Zn 聚为一类,说明其具有不同的来源。水岸带土壤中 Hg 含量具有较大的空间变异性,而 Hg 又是一种具有高挥发性的元素<sup>[30]</sup>,其来源可能是水岸带周边工业污染源如火力发电、水泥制造、燃煤锅炉等排放的废气<sup>[31]</sup>以及水岸带垃圾的堆积和焚烧。由于样点均靠近交通干线,交通流量大,尾气中含有大量的重金属特别是 Pb,可经大气沉降进入土壤<sup>[32]</sup>,因此 Pb 可能主要是代表交通运输污染源。

2.5 讨论

与萧月芳 1992 年对山东棕壤区(包括烟台、昌潍、青岛、临沂、泰安、枣庄等)土壤重金属的调查结果相比(表 5),水岸带土壤中 Cd、Pb、Ni、Cu、Zn 含量明显较高,其中 Cd 的平均含量为棕壤区土壤的 3.46 倍,Hg 的含量则显著低于棕壤区土壤,Cr 的含量相差不大。水岸带土壤中 Ni、Cu、Zn、Pb 与南水北调东线工程山东境内农田土壤和鲁北小清河流域土壤的含量范围较为一致,Cr 的含量明显高于上述区域,而 Cd 的含量则显著高于南水北调东线工程山东境内农田土壤值,Hg 的含量低于鲁北小清河流域。由于南水北调东线工程目前还没有实施引水,因此其土壤重金属的含量可以作为没有受到引水水质影响的“背景值”。水岸带土壤重金属 Cd 含量显著高于该“背景值”,并与鲁北小清河流域土壤 Cd 的含量可比,一定程度上反映了由于河流、湖泊、水库等水源污染对水岸带土壤造成的“二次污染”。而 Hg 的含量与该“背景值”相当,并显著低于棕壤区

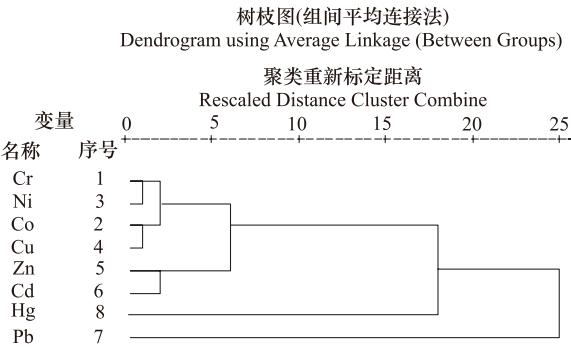


图5 水岸带土壤重金属分层聚类树枝图  
Fig. 5 Hierarchical cluster analysis dendrogram of heavy metals in riparian soil samples

土壤 Hg 的含量(表 5),这可能与近些年来山东省加大大气污染控制导致 Hg 大气沉降减少有关<sup>[33]</sup>。

表 5 水岸带土壤重金属含量与其他研究结果的比较  
Table 5 Comparison of heavy metal concentrations in riparian soils of different areas

|                                                                                                 |             | Cr         | Co         | Ni         | Cu         | Zn           | Cd           | Pb          | Hg           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------|------------|------------|------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| 本研究                                                                                             | 平均值 Average | 53.03      | 10.33      | 24.96      | 18.38      | 56.13        | 0.142        | 22.48       | 0.020        |
| This research                                                                                   | 范围 Range    | 6.42—90.53 | 2.25—17.50 | 5.72—44.64 | 3.94—35.01 | 25.91—107.60 | 0.037—0.382  | 14.74—42.97 | 0.003—0.069  |
| 山东棕壤区 <sup>[24]</sup>                                                                           | 平均值 Average | 50.80      | —          | 16.60      | 12.50      | 38.1         | 0.041        | 11.5        | 0.048        |
| Brown earth areas of Shandong Province                                                          | 范围 Range    | 17.2—102.9 | —          | 4.84—33.0  | 4.04—28.8  | 15.1—76.1    | 0.0093—0.102 | 4.00—26.1   | 0.007—0.11   |
| 南水北调东线工程<br>山东境内 <sup>[12]</sup>                                                                | 平均值 Average | 24.3       | —          | 24.8       | 18.8       | 54.3         | 0.0546       | 17.0        | 0.020        |
| Field soil in Shandong Province of eastern line project of water allocating from south to north | 范围 Range    | 13.9—49.4  | —          | 15.6—44.2  | 9.70—46.0  | 30.8—96.6    | 0.0156—0.129 | 5.80—32.8   | 0.007—0.046  |
| 鲁北小清河流域 <sup>[34]</sup>                                                                         | 平均值 Average | 13.1       | 13.9       | —          | 21.7       | 58.5         | 0.131        | 20.0        | 0.0357       |
| Soil in the Xiaoqing River valley, northern Shandong                                            | 范围 Range    | 51—307     | 5.80—24.0  | —          | 6.00—84.0  | 19.0—109     | 0.051—0.307  | 6.20—58.0   | 0.0047—0.700 |

本研究在一定程度上揭示了山东省部分水岸带土壤重金属污染的状况和来源,但由于受条件限制,在各水源地的采样点位数量较少,分析的指标尤其是反映土壤基本理化性质的指标还不够全面。

### 3 结论

(1)山东省部分水岸带土壤重金属 Cr、Co、Ni、Cu、Zn 和 Pb 的平均含量均小于背景值,Hg 略高于背景值,仅 Cd 的平均含量显著高于背景值,约为背景值的 1.7 倍。各水岸带土壤重金属的含量均符合土壤环境质量二级标准。

(2)单因子指数法、综合指数法和潜在生态危害指数法的评价结果表明:水岸带土壤重金属主要表现为轻度污染,生态危害较低,其中 Cd 和 Hg 是主要的污染因子和生态危害因子。从重金属污染的空间分布特征来看,洙赵新河、廖河、门楼水库和东平湖水岸带土壤重金属的污染程度和潜在生态危害显著高于其他水源地。

(3)相关分析和聚类分析的结果表明:水岸带土壤重金属含量之间具有显著的相关性,且与土壤的有机质和粒度密切相关。水岸带土壤重金属的含量受到自然源(成土母质)和人为源的双重影响,人为源主要包括地表径流、工业废气、垃圾和交通运输等污染源。

### References:

- [ 1 ] McClain M E, Boyer E W, Dent C L, Gergel S E, Grimm N B, Groffman P M, Hart S C, Harvey J W, Johnston C A, Mayorga E, McDowell W H, Pinay G. Biogeochemical hot spots and hot moments at the interface of terrestrial and aquatic ecosystems. *Ecosystems*, 2003, 6(4): 301-312.
- [ 2 ] Lu S Y, Cai M M, Jin X C, Guo J N, Xing Y, Zhou B H. Spatial distribution of nitrogen species in sediment of lakeside zone of Lake Dianchi. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(4): 1351-1357.
- [ 3 ] Pei T Q, Wang L A, Han Y, Huang C, Gong X. Distribution characteristics form soil profile heavy metal of water-level-fluctuating zone in Three Gorges Reservoir area. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(5): 72-78.
- [ 4 ] Feng Y Q, Wang Y, Ruan H H. A review of the researches on riparian zones. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition*, 2009, 33(6): 127-131.
- [ 5 ] Huang K, Guo H C, Liu Y, Yu Y J, Zhou F. Research progress on the degradation mechanisms and restoration of riparian ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(6): 1373-1382.
- [ 6 ] Yan C Z, Jin X C, Zhao J Z, Ye C, Wang Z Q. Ecological restoration and reconstruction of degraded lakeside zone ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(2): 360-364.
- [ 7 ] Zhang F F, Li T S, Lu J B. Purification, ecological and restoration functions of riparian zone. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26

- (Suppl 2): 459-464.
- [ 8 ] Li R H, Guan Y T, He M, Hu H Y, Jiang Z P. Pilot-scale study on riparian scirpus yagara ohw zone improving water quality of river. *Environmental Science*, 2007, 28(6): 1198-1203.
- [ 9 ] Li D L, Jin Y Q, Zhang J L, Ruan H H. Heavy metal soil pollution in the Qinhuai River riparian zone. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2008, 25(2): 228-234.
- [10] Sun Y F, Liu C J, Zhang J. Scientific water resources allocation in Shandong Province. *China Water Resources*, 2008, (19): 40-42.
- [11] Li D L, Han L, Ruan H H, Zhang J L. Analysis of soil physical and chemical properties of riparian zone along Qinhuai River. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2008, 32(4): 17-22.
- [12] Wang J, Miao L, Li S H, Li H S. The heavy metal elements present evaluate of field soil for Shandong Province of eastern line project of water allocating from south to north. *Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science*, 2004, 35(1): 59-64.
- [13] Sun B B, Zhou G H, Liu Z Y, Pang X G, Dai J R. Origin of heavy metal anomalies in soils along the Shandong reach of the lower Yellow River, China. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(2): 265-270.
- [14] Forest Soil Laboratory of Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry. LY/T 1239—1999, Determination of pH value in forest soil. Beijing: Chinese Standard Press, 1999.
- [15] Zhang J. Study on the Heavy Metal Pollution in Urban Street Dust of Shanghai [D]. Shanghai: East China Normal University, 2005.
- [16] Forest Soil Laboratory of Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry. LY/T 1237—1999, Determination of organic matter in forest soil and calculation carbon-nitrogen ratio. Beijing: Chinese Standard Press, 1999.
- [17] Liu E F, Shen J, Yang L Y, Zhu Y X, Sun Q Y, Wang J J. Chemical fractionation and pollution characteristics of heavy metals in the sediment of Nansihu Lake and its main inflow rivers, China. *Environmental Science*, 2007, 28(6): 1377-1383.
- [18] Chinese Environmental Monitoring Station. Soil Background Values of China. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1990: 329-493.
- [19] Ning X B, Xiang W H, Fang X, Yan W D, Deng X W. Heavy metal concentrations and pollution assessment of limestone forests in Huaxi district, Guiyang City. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 2169-2177.
- [20] Yi Z W, Wang L, Qian Y, Sun J, Zhu J W. Heavy metal contents and evaluation of farmland soil in Urumqi. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23(2): 150-154.
- [21] Shao X X, Huang B, Zhao Y C, Sun W X, Yan L X, Gu Z Q, Qian W F. Pollution assessment of soil heavy metals in a representative area of the Yangtze River delta region. *Environmental Chemistry*, 2008, 27(2): 218-221.
- [22] Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, Zhang C J. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index. *Environmental Science and Technology*, 2008, 31(2): 112-115.
- [23] You W C, Zhang X G, Hu Q H. Preliminary analysis on the agro-geological background conditions of Shandong Province. *Shandong Geological Information*, 1991, (3): 27-30.
- [24] Xiao Y F. Study on the heavy metal contents and their relation in the soil, wheat and maize from brown earth of Shandong Province. *Agro-Environmental Protection*, 1992, 11(4): 147-151.
- [25] Li S F. Study on sediments and nutrients removal efficiency of riparian zone. *Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation*, 2003, (6): 41-43.
- [26] Xie X J, Kang J C, Li W J, Wang G D, Yan G D, Zhang J P. Analysis on heavy metal concentrations in agricultural soils of Baoshan, Shanghai. *Environmental Science*, 2010, 31(3): 768-774.
- [27] Li X P, Wang X. Contamination assessment and distributions of heavy metals from Weinan typical industrial urban soil, P. R. China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2010, 24(10): 100-104.
- [28] Zhang N, Zhao L J, Li T L, Jin Z H. Characteristics of pollution and monitoring of water quality in Tianjin. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6): 2127-2131.
- [29] Dai J R, Pang X G, Wang H J, Zeng X D, Hu X P, Li X P. The causes of the soil heavy metal anomalies in Pingyin County, Shandong Province. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2010, 34(5): 659-663.
- [30] Jin Y D, Zhao S P, He Z L. A review on the studies on mercury adsorption-desorption behavior in the soil. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(5): 1270-1274.
- [31] Liu J S, Wang R Q, Dai J L, Zhang Y L, Wang Q. Soil environmental background concentrations in old course of the Yellow River in Shandong Province. *Environmental Science*, 2008, 29(6): 1699-1704.
- [32] Ren H L, Cui B S, Bai J H, Dong S K, Hu B, Zhao H. Distribution of heavy metal in paddy soil of Hani Terrace core zone and assessment on its potential ecological risk. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1625-1634.
- [33] Liu X L. Analysis on Variation Characteristics of Air Pollution in Shandong Province during 2000—2005 [D]. Jinan: Shandong University, 2008.

- [34] Pang X G, Chen C F, Li X Z, Cao X H, Zhang Y M, Dai J R. Distribution characteristics of elements in soils and environment quality evaluation in the Xiaoqing River valley, northern Shandong. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(2): 160-164.

#### 参考文献:

- [2] 卢少勇, 蔡珉敏, 金相灿, 郭建宁, 邢奕, 周北海. 滇池湖滨带沉积物氮形态的空间分布. *生态环境学报*, 2009, 18(4): 1351-1357.
- [3] 裴廷权, 王里奥, 韩勇, 黄川, 龚勋. 三峡库区消落带土壤剖面中重金属分布特征. *环境科学研究*, 2008, 21(5): 72-78.
- [4] 冯育青, 王莹, 阮宏华. 水岸带研究综述. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2009, 33(6): 127-131.
- [5] 黄凯, 郭怀成, 刘永, 郁亚娟, 周丰. 河岸带生态系统退化机制及其恢复研究进展. *应用生态学报*, 2007, 18(6): 1373-1382.
- [6] 颜昌宙, 金相灿, 赵景柱, 叶春, 王中琼. 湖滨带退化生态系统的恢复与重建. *应用生态学报*, 2005, 16(2): 360-364.
- [7] 张凤凤, 李土生, 卢剑波. 河岸带净化水质及其生态功能与恢复研究进展. *农业环境科学学报*, 2007, 26(增刊2): 459-464.
- [8] 李睿华, 管运涛, 何苗, 胡洪营, 蒋展鹏. 河岸荆三棱带改善河水水质的中试研究. *环境科学*, 2007, 28(6): 1198-1203.
- [9] 李冬林, 金雅琴, 张纪林, 阮宏华. 秦淮河河岸带典型区域土壤重金属污染分析与评价. *浙江林学院学报*, 2008, 25(2): 228-234.
- [10] 孙义福, 刘长军, 张军. 科学配置山东水资源问题的探讨. *中国水利*, 2008, (19): 40-42.
- [11] 李冬林, 韩丽, 阮宏华, 张纪林. 秦淮河河岸带土壤理化性质分析. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2008, 32(4): 17-22.
- [12] 汪军, 苗良, 李书海, 李红双. 南水北调东线引水工程山东境内农田土壤重金属元素现状评价. *山东农业大学学报: 自然科学版*, 2004, 35(1): 59-64.
- [13] 孙彬彬, 周国华, 刘占元, 庞绪贵, 代杰瑞. 黄河下游山东段沿岸土壤中重金属元素异常的成因. *地质通报*, 2008, 27(2): 265-270.
- [14] 中国林业科学研究院林业研究所森林土壤研究室. LY/T 1239—1999 森林土壤 pH 值的测定. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [15] 张菊. 上海城市街道灰尘重金属污染研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2005.
- [16] 中国林业科学研究院林业研究所森林土壤研究室. LY/T 1237—1999 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [17] 刘恩峰, 沈吉, 杨丽原, 朱育新, 孙庆义, 王建军. 南四湖及主要入湖河流表层沉积物重金属形态组成及污染研究. *环境科学*, 2007, 28(6): 1377-1383.
- [18] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 329-493.
- [19] 宁晓波, 项文化, 方晰, 闫文德, 邓湘雯. 贵阳花溪区石灰土地土壤重金属含量特征及其污染评价. *生态学报*, 2009, 29(4): 2169-2177.
- [20] 易治伍, 王灵, 钱翌, 孙静, 朱建雯. 乌鲁木齐市农田土壤重金属含量及评价. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(2): 150-154.
- [21] 邵学新, 黄标, 赵永存, 孙维侠, 严连香, 顾志权, 钱卫飞. 长江三角洲典型地区土壤中重金属的污染评价. *环境化学*, 2008, 27(2): 218-221.
- [22] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 张成江. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算. *环境科学与技术*, 2008, 31(2): 112-115.
- [23] 游文澄, 张新光, 胡秋华. 山东省农业地质背景条件浅析. *山东地质情报*, 1991, (3): 27-30.
- [24] 萧月芳. 山东棕壤区土壤和小麦玉米中重金属元素含量及其相互关系. *农业环境保护*, 1992, 11(4): 147-151.
- [25] 李世锋. 关于河岸缓冲带拦截泥沙和养分效果的研究. *水土保持科技情报*, 2003, (6): 41-43.
- [26] 谢小进, 康建成, 李卫江, 王国栋, 闫国东, 张建平. 上海宝山区农用土壤重金属分布与来源分析. *环境科学*, 2010, 31(3): 768-774.
- [27] 李小平, 王昕. 城市典型工业区土壤重金属分布与污染评价. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(10): 100-104.
- [28] 张娜, 赵乐军, 李铁龙, 金朝晖. 天津城区道路雨水径流水质监测及污染特征分析. *生态环境学报*, 2009, 18(6): 2127-2131.
- [29] 代杰瑞, 庞绪贵, 王红晋, 曾宪东, 胡雪平, 李肖鹏. 山东省平阴县土壤中重金属元素异常成因. *物探与化探*, 2010, 34(5): 659-663.
- [30] 荆延德, 赵石萍, 何振立. 土壤中汞的吸附-解吸行为研究进展. *土壤通报*, 2010, 41(5): 1270-1274.
- [31] 刘江生, 王仁卿, 戴九兰, 张永利, 王强. 山东省黄河故道区域土壤环境背景值研究. *环境科学*, 2008, 29(6): 1699-1704.
- [32] 任华丽, 崔保山, 白军红, 董世魁, 胡波, 赵慧. 哈尼梯田湿地核心区水稻土重金属分布与潜在的生态风险. *生态学报*, 2008, 28(4): 1625-1634.
- [33] 刘新玲. 2000—2005 年山东省大气污染变化特征分析 [D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [34] 庞绪贵, 陈长峰, 李秀章, 曹秀华, 张英明, 代杰瑞. 鲁北小清河流域土壤中元素分布特征及环境质量评价. *地质通报*, 2005, 24(2): 160-164.

CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                    |                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Landscape aesthetic assessment based on experiential paradigm assessment technology .....                                                                                                          | LI Xuanqi, HUA Lizhong (2965)                            |
| Significant impact of job-housing distance on carbon emissions from transport: a scenario analysis .....                                                                                           | TONG Kangkang, MA Keming (2975)                          |
| The watershed eco-compensation system from the perspective of economics: the cases of pollution compensation .....                                                                                 | LIU Tao, WU Gang, FU Xiao (2985)                         |
| The tourism development impact on Shanghai coastal wetland vegetation .....                                                                                                                        | LIU Shidong, GAO Jun (2992)                              |
| Effects of the Wenchuan Earthquake on shoot growth and development of the umbrella bamboo ( <i>Fargesia robusta</i> ), one of the giant panda's staple bamboos .....                               | LIAO Lihuan, XU Yu, RAN Jianghong, et al (3001)          |
| Forest carbon sequestration and carbon sink/source in Jiangxi Province .....                                                                                                                       | HUANG Lin, SHAO Quanqin, LIU Jiyan (3010)                |
| Species diversity of herbaceous communities in the Yiluo River Basin .....                                                                                                                         | CHEN Jie, GUO Yili, LU Xunling, et al (3021)             |
| Microbial community diversity of rhizosphere soil in continuous cotton cropping system in Xinjiang .....                                                                                           | GU Meiying, XU Wanli, MAO Jun, et al (3031)              |
| Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the rhizosphere of <i>Caragana korshinskii</i> Kom. in desert zone .....                                                                              | HE Xueli, CHEN Zheng, GUO Huijuan, et al (3041)          |
| Characteristics of photosynthetic productivity and water-consumption for transpiration in <i>Pinus densiflora</i> var. <i>zhangwuensis</i> and <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> ..... | MENG Peng, LI Yuling, YOU Guochun, et al (3050)          |
| Seasonal dynamic and influencing factors of coarse woody debris respiration in mid-subtropical evergreen broad-leaved forest .....                                                                 | LIU Qiang, YANG Zhijie, HE Xudong, et al (3061)          |
| Influence of saline soil and sandy soil on growth and mineral constituents of common annual halophytes in Xinjiang .....                                                                           | ZHANG Ke, TIAN Changyan, LI Chunjian (3069)              |
| Dynamics change of <i>Betula ermanii</i> population related to shrub and grass on treeline of northern slope of Changbai Mountains .....                                                           | WANG Xiaodong, LIU Huiqing (3077)                        |
| Effects of ecological conditions on morphological and physiological characters of tobacco .....                                                                                                    | YAN Kan, CHEN Zongyu (3087)                              |
| A study on the hyperspectral inversion for estimating leaf chlorophyll content of clover based on factor analysis .....                                                                            | XIAO Yanfang, GONG Huili, ZHOU Demin (3098)              |
| Monthly dynamic variation of soil seed bank in water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir at the beginning after charging water .....                                                  | WANG Xiaorong, CHENG Ruimei, TANG Wanpeng, et al (3107)  |
| Effects of three land use patterns on diversity and community structure of soil ammonia-oxidizing bacteria in <i>Leymus chinensis</i> steppe .....                                                 | ZOU Yukun, ZHANG Jingni, CHEN Xiurong, et al (3118)      |
| Autotoxicity and promoting: dual effects of root litter on American ginseng growth .....                                                                                                           | JIAO Xiaolin, DU Jing, GAO Weiwei (3128)                 |
| Effect of differing levels parasitism from native <i>Cuscuta australis</i> on invasive <i>Bidens pilosa</i> growth .....                                                                           | ZHANG Jing, YAN Ming, LI Junmin (3136)                   |
| Heavy metal concentrations and pollution assessment of riparian soils in Shandong Province .....                                                                                                   | ZHANG Ju, CHEN Shiyue, DENG Huanguang, et al (3144)      |
| Effect of decomposition products of cyanobacteria on <i>Myriophyllum spicatum</i> and water quality in Lake Taihu, China .....                                                                     | LIU Lizhen, QIN Boqiang, ZHU Guangwei, et al (3154)      |
| Succession of macrofauna communities in wetlands of <i>Sonneratia apetala</i> artificial mangroves during different ecological restoration stages .....                                            | TANG Yijie, FANG Zhanqiang, ZHONG Yanting, et al (3160)  |
| Group characteristics of Chinese Merganser ( <i>Mergus squamatus</i> ) during the wintering period in Poyang Lake watershed, Jiangxi Province .....                                                | SHAO Mingqin, ZENG Binbin, SHANG Xiaolong, et al (3170)  |
| Effect of forest rodents on predation and dispersal of <i>Pinus armandii</i> seeds in Qinling Mountains .....                                                                                      | CHANG Gang, WANG Kaifeng, WANG Zhi (3177)                |
| Circadian rhythms of activity, metabolic rate and body temperature in desert hamsters ( <i>Phodopus roborovskii</i> ) .....                                                                        | WANG Luping, ZHOU Shun, SUN Guoqiang (3182)              |
| Effects of temperature stress and ultraviolet radiation stress on antioxidant systems of <i>Locusta migratoria tibetensis</i> Chen .....                                                           | LI Qing, WU Lei, YANG Gang, et al (3189)                 |
| Carbon cycling from rice-duck mutual ecosystem during double cropping rice growth season .....                                                                                                     | ZHANG Fan, GAO Wangsheng, SUI Peng, et al (3198)         |
| Protein expression characteristics and their response to nitrogen application during grain-filling stage of rice ( <i>Oryza Sativa</i> L.) .....                                                   | ZHANG Zhixing, CHENG Jun, LI Zhong, et al (3209)         |
| <b>Review and Monograph</b>                                                                                                                                                                        |                                                          |
| Advances in influence of seawater eutrophication on marine bacteria .....                                                                                                                          | ZHANG Yubin, ZHANG Jiexiang, SUN Xingli (3225)           |
| A review of comprehensive effect of ocean acidification on marine fishes .....                                                                                                                     | LIU Hongjun, ZHANG Zhendong, GUAN Shuguang, et al (3233) |
| Evaluation of the controlling methods and strategies for <i>Mikania micrantha</i> H. B. K. ....                                                                                                    | LI Mingguang, LU Erbei, GUO Qiang, et al (3240)          |
| <b>Scientific Note</b>                                                                                                                                                                             |                                                          |
| Dynamics of land use/cover changes in the Weigan and Kuqa rivers delta oasis based on Remote Sensing .....                                                                                         | SUN Qian, TASHPOLAT. Tiyp, ZHANG Fei, et al (3252)       |
| Phytoplankton assemblages in East China Sea in winter 2009 .....                                                                                                                                   | GUO Shujin, SUN Jun, DAI Minhan, et al (3266)            |
| On the physical chemical and soil microbial properties of soils in the habitat of wild Ferula in Xinjiang .....                                                                                    | FU Yong, ZHUANG Li, WANG Zhongke, et al (3279)           |
| The community characteristics of <i>Calligonum roborowskii</i> A. Los in Tarim Basin .....                                                                                                         | Gulnur Sabirhazi, PAN Borong, DAUN Shimin (3288)         |
| Stability analysis of mine ecological industrial symbiotic system .....                                                                                                                            | SUN Bo, WANG Guangcheng (3296)                           |

# 《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 10 期 (2012 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 10 (May, 2012)

|               |                                                                                                                    |                 |                                                                                                                                                                                   |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 编 辑           | 《生态学报》编辑部<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085<br>电话:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>shengtaixuebao@rcees.ac.cn | Edited by       | Editorial board of<br>ACTA ECOLOGICA SINICA<br>Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China<br>Tel: (010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>Shengtaixuebao@rcees.ac.cn |
| 主 编           | 冯宗炜                                                                                                                | Editor-in-chief | FENG Zong-Wei                                                                                                                                                                     |
| 主 管           | 中国科学技术协会                                                                                                           | Supervised by   | China Association for Science and Technology                                                                                                                                      |
| 主 办           | 中国生态学学会<br>中国科学院生态环境研究中心<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085                                                        | Sponsored by    | Ecological Society of China<br>Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS<br>Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China                                  |
| 出 版           | 科 学 出 版 社<br>地址:北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100071                                                                       | Published by    | Science Press<br>Add: 16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                 |
| 印 刷           | 北京北林印刷厂                                                                                                            | Printed by      | Beijing Bei Lin Printing House,<br>Beijing 100083, China                                                                                                                          |
| 发 行           | 科 学 出 版 社<br>地址:东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717<br>电话:(010)64034563<br>E-mail: journal@csbg.net                         | Distributed by  | Science Press<br>Add: 16 Donghuangchenggen North<br>Street, Beijing 100717, China<br>Tel: (010)64034563<br>E-mail: journal@csbg.net                                               |
| 订 购           | 全国各地邮局                                                                                                             | Domestic        | All Local Post Offices in China                                                                                                                                                   |
| 国外发行          | 中国国际图书贸易总公司<br>地址:北京 399 信箱<br>邮政编码:100044                                                                         | Foreign         | China International Book Trading<br>Corporation<br>Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China                                                                                       |
| 广告经营<br>许 可 证 | 京海工商广字第 8013 号                                                                                                     |                 |                                                                                                                                                                                   |



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元