

城郊流域河岸带土壤与河流沉积物的重金属污染及分布特征

——以温榆河昌平段为例

王志英^{1,2}, 刘云^{1,2*}, 王建立¹, 赵建庄¹, 孙荣凯², 姜美怡¹

(1.北京农学院农业应用新技术北京市重点实验室, 北京 102206; 2.北京农学院园林学院, 北京 102206)

摘要:位于京郊的温榆河流域河岸带及河流受周边人类活动影响污染严重, 为了解该流域的重金属污染和分布特征, 采集了温榆河昌平段河流岸边溪水中表层沉积物及河岸带不同土壤层样品, 测定了样品中 Cu、Zn、Pb、Cr 4 种重金属的含量, 并利用相关性分析及回归分析, 分析不同深度河岸带土壤与沉积物中重金属的相互关系。结果表明, 沉积物中 Zn、Pb 含量显著高于河岸带土壤中的含量, 而 Cu 含量显著低于河岸带土壤中的含量; 与北京市土壤重金属背景值相比, 河岸带土壤与河流沉积物中 4 种重金属均存在一定程度的累积, 其中以 Cr 元素累积指数和超过背景值的样本概率最高。河岸带表层土壤(0~20 cm)与河流沉积物重金属空间分布具有显著的规律性, 在工厂废水、生活污水排污口及人类活动干扰频繁的取样点污染严重。河岸带土壤中 Cu 与 Zn、Cr 含量、沉积物中 Zn 与 Cu、Pb 含量以及河岸带土壤中 Pb、Cr 与沉积物中对应元素存在显著正相关($P<0.01$)关系, 同时河岸带土壤中 Pb、Cr 含量分别与其在沉积物中含量存在显著的回归关系。研究结果表明河流岸边带土壤与河流沉积物的重金属污染存在着依存关系, 加强岸边带的土壤污染治理将一定程度缓解河流水环境的重金属污染。

关键词:沉积物; 土壤; 重金属; 分布; 温榆河; 城郊

中图分类号: X833 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)04-0783-09 doi:10.11654/jaes.2013.04.019

Heavy Metal Pollution and Distribution in Riparian Zone Soil and River Sediment in Beijing Suburbs, China: A Case Study in Changping Section of Wenyu River

WANG Zhi-ying^{1,2}, LIU Yun^{1,2*}, WANG Jian-li¹, ZHAO Jian-zhuang¹, SUN Rong-kai², JIANG Mei-yi¹

(1. Beijing Key Laboratory for Agricultural Application and New Technique, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China; 2. College of Landscape Architecture, Beijing University of Agriculture, Beijing 102206, China)

Abstract: To explore the heavy metal concentration and distribution in the Wenyu River in Beijing Suburb, a survey was conducted by collecting and analyzing the surface sediment and riparian zone soil there. Such heavy metals as Cu, Zn, Pb and Cr were examined and the correlation of the content of heavy metals in sediment and riparian zone soil in different layers were also determined. The results indicated that the content of Zn and Pb in the sediment was significantly higher than that in the soil while the content of Cu was significantly lower than that in the soil. Compared with the background value in Beijing soil, Cu, Zn, Pb and Cr were all enriched to certain degree, especially Cr. The spatial distribution of heavy metals in surface soil and sediment had the remarkable regularity, and the sampling point pollution was serious due to factory sewage, waste water drainage outlet and human frequent disturbance. The correlation analysis showed that the content of Cu with Zn, Cr in riparian zone soil and the content of Zn with Cu and Pb in sediment had a significant positive correlation ($P<0.01$). In addition, there was significant correlation ($P<0.01$) between Pb and Cr in soil and those in sediment. The content of Pb and Cr in riparian soil and that in sediment had strong regression relationship. The results revealed that heavy metal pollution in riparian zone soil and pollution in sediment were closely related, and therefore to strengthen the soil pollution control might help to alleviate the heavy metal pollution in water environment.

Keywords: sediment; soil; heavy metal; distribution; Wenyu River; suburb

收稿日期: 2012-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(40871232, 40501029); 2011 年度北京市属高等学校人才强教深化计划“青年骨干教师项目”; 2010 年度北京市属高等学校人才强教深化计划“学术创新人才(PHR201006124)”; 2011 大学生创业项目

作者简介: 王志英(1987—), 女, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要从事景观生态与环境效应方面的研究。E-mail: Wangying0924@163.com

* 通信作者: 刘云 E-mail: liuyun_bj@tom.com

河岸带作为水陆生态系统的过渡带,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。其具有独特的空间结构和生境条件,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。河岸带的特殊地理位置,使其受放牧、休闲娱乐等人类活动干扰及河流水体季节性涨落的影响较大,这些因素均有可能造成河岸带土壤重金属污染,同时河岸带土壤又会随着地表径流源源不断地流入河流,成为河流沉积物的主要物质源。因此,研究河岸带土壤与河流沉积物中重金属含量、分布及相互关系,对于水环境质量评价及流域生态系统保护和管理具有重要意义。

与许多污染物不同,重金属的威胁在于它不能被微生物分解,相反可在生物体内富集并通过食物链转化为毒性更大的金属-有机化合物,是主要的环境污染物。近年来,由于工业化进程加快、废水的大量排放以及农业施肥、交通运输、废物燃烧等人类活动的干扰,水生生态系统重金属污染已越来越严重^[1]。目前,国内外关于水环境重金属污染方面的研究多集中于沉积物^[2-3]、水-沉积物^[4-5]、水生动植物^[6-7],而对河岸带土壤重金属的关注较少,尤其是河流沉积物与河岸带土壤中重金属污染的相互关系。

温榆河发源于北京境内,流经北京核心区域,是北京市的“母亲河”,由于人口的高度密集,加上沿线工业的快速发展,大量工业废水、生活污水排入河道,面临严峻的重金属污染问题。李莲芳等^[8]采用富集系数法发现,温榆河沉积物 80% 以上采样点出现重金属富集累积,且生态风险达到强至极强,杜晓丽等^[9]的研究也表明温榆河水体中重金属含量多数高于《地表水环境质量标准》的 I 类水标准。本文以温榆河昌平段为研究区,探讨了河岸带土壤与河流沉积物中 Cu、Zn、Pb、Cr 4 种重金属的含量水平及分布状况,并采用相关分析法与回归分析法分析它们的内部关系。研究结果可为该流域水环境保护及管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

温榆河位于北京市东北部,是北运河的重要支流之一,全长 47.5 km,流域面积 4293 km²。温榆河上游由东沙河、南沙河和北沙河 3 条支流汇集于昌平区沙河镇形成沙河水库。从沙河水库以下始称温榆河,河道流经昌平、顺义、朝阳、通州四个区(图 1),汇集于北关闸,沿途主要有蔺沟河、清河、坝河、小中河汇入。

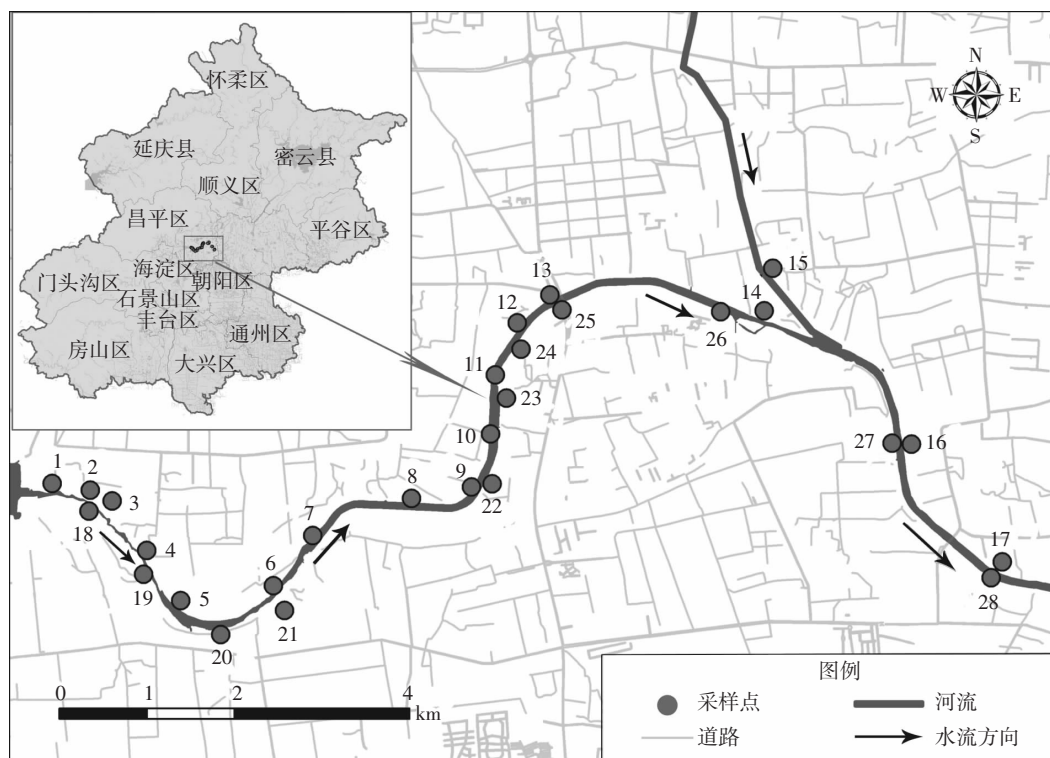


图1 采样点分布图

Figure 1 The distribution of sampling sites

在昌平段内,温榆河起自沙河闸、止于鲁疃闸,主河道长约 19.2 km,流域面积达 1237 km²。近年来,随着人类活动的增加和经济的快速发展,温榆河作为北京市最主要的排污河道,每年有大量未经处理的农村生活污水、养殖废水和农田地表径流排入温榆河中,温榆河水体受到严重的威胁。研究区河岸带地形呈斜坡坡角 0~30°,河岸带植被多为半自然分布。

1.2 样品采集与分析

通过采样前期对温榆河周边村庄内供水和排水系统进行调查,并综合考虑河流排污口、沿岸村庄、企业等分布状况,2011 年 8 月(雨季),在两岸沿线重要闸坝、排污口上下游附近设置采样点 28 个,同步采集沉积物和土壤样品,具体采样点设置见图 1,其中 1 至 17 号采样点位于河流北岸,18 至 28 号采样点位于河流南岸,采样点周边环境特征及主要污染源见表

1。沉积物样品采集时,在每个固定取样点近岸沿平行河流方向 10 m 长度范围内,随机采取 0~10 cm 深度沉积物 5 次进行混合记为一个样品,共采集 28 个样品。土壤样品采集时,在每个固定取样点沿距离河边 10 m 范围内的河岸带(河水的涨落会影响此范围)上按照 S 型布点分别采取 0~20、20~40、40~60 cm 3 个土层深度土样,共采集 84 个样品。将采集的样品剔除植物残体和石块,分别装入聚乙烯封口袋中登记编号,带回实验室。

样品自然风干后,压碎碾磨,过 100 目尼龙筛备用。测定样品中 Cu、Zn 含量时,样品消解方法参照国家标准(GB/T 17138—1997);测定样品中 Pb、Cr 含量时,样品消解方法分别参照国家标准(GB/T 17141—1997)和国家环境保护标准(HJ 491—2009);样品经消解后采用火焰原子吸收光谱仪测定

表 1 采样点位置及周边环境
Table 1 The location of sampling sites and the surroundings

编号	采样点	主要污染源
1	沙河水库闸坝下游	靠近半壁街村,居民生活的燃料燃烧、垃圾焚烧
2	半壁街村	居民生活的燃料燃烧、垃圾焚烧
3	半壁街村外排污口	附近大型垃圾处理厂(苏卫垃圾处理厂)、建筑材料厂、胶衣厂、造纸厂、鞋厂、羊绒加工厂等工业废水及生活污水排放
4	吕各庄村	无明显污染源
5	北京龙葵园交叉口	无明显污染源
6	北运河管理处	无明显污染源
7	尚信村外(进村)	无明显污染源
8	尚信村外(进村)	人类活动废弃物,例如烧烤
9	尚信村	频繁放牧,畜禽粪便污染严重
10	尚信村外(出村)	岸边生活垃圾堆放严重
11	讲礼村外闸坝上游	闸坝拦截的悬浮物,岸边生活垃圾堆放严重
12	马坊村进口	无明显污染源
13	马坊桥下排污口	马坊村内造纸厂、温泉旅游度假区、金属加工厂等企业工业废水和生活污水排放
14	小汤山农业科技示范园外	无明显污染源
15	高尔夫球场	草坪管理养护中农药、化肥、杀虫剂、杀菌剂的施用
16	土沟村	道路交叉口,车流量较大
17	土沟村外	道路交叉口,车流量较大
18	沙河闸公园	无明显污染源
19	红枫湖	无明显污染源
20	橡胶坝	无明显污染源
21	西沙各庄村	无明显污染源
22	东沙各庄村西口	居民生活的燃料燃烧、垃圾焚烧严重
23	依水庄园	生活垃圾堆放严重
24	长河玉墅	无明显污染源
25	马坊桥下(河流南岸)	无明显污染源
26	高尔夫球场	草坪管理养护中农药、化肥、杀虫剂、杀菌剂的施用
27	拉菲特城堡	无明显污染源
28	上成国际花园	无明显污染源

(日立 Z-5000)Cu、Zn、Pb、Cr 4 种重金属含量。分析所用试剂均为优级纯,所用水均为超纯水,分析过程中均加入国家土壤标准物质(GSS-1)进行质量控制,重金属回收率均在 90%以上,所有样品均设置 3 个平行样,平行样的相对误差小于 10%,同时进行空白实验。

1.3 数据分析与处理

本文中的数据分析在 SPSS17.0 及 Origin8.0 中完成。其中重金属含量与背景值的差异性分析采用 t 检验;各土层重金属含量差异性采用方差分析;数据正态分布检验采用 K-S 检验($P_{K-S}>0.05$,样本呈正态分布),对符合正态分布的数据进行相关分析。

2 结果与讨论

2.1 河岸带土壤与河流沉积物重金属含量

2.1.1 河岸带土壤与河流沉积物重金属统计特征

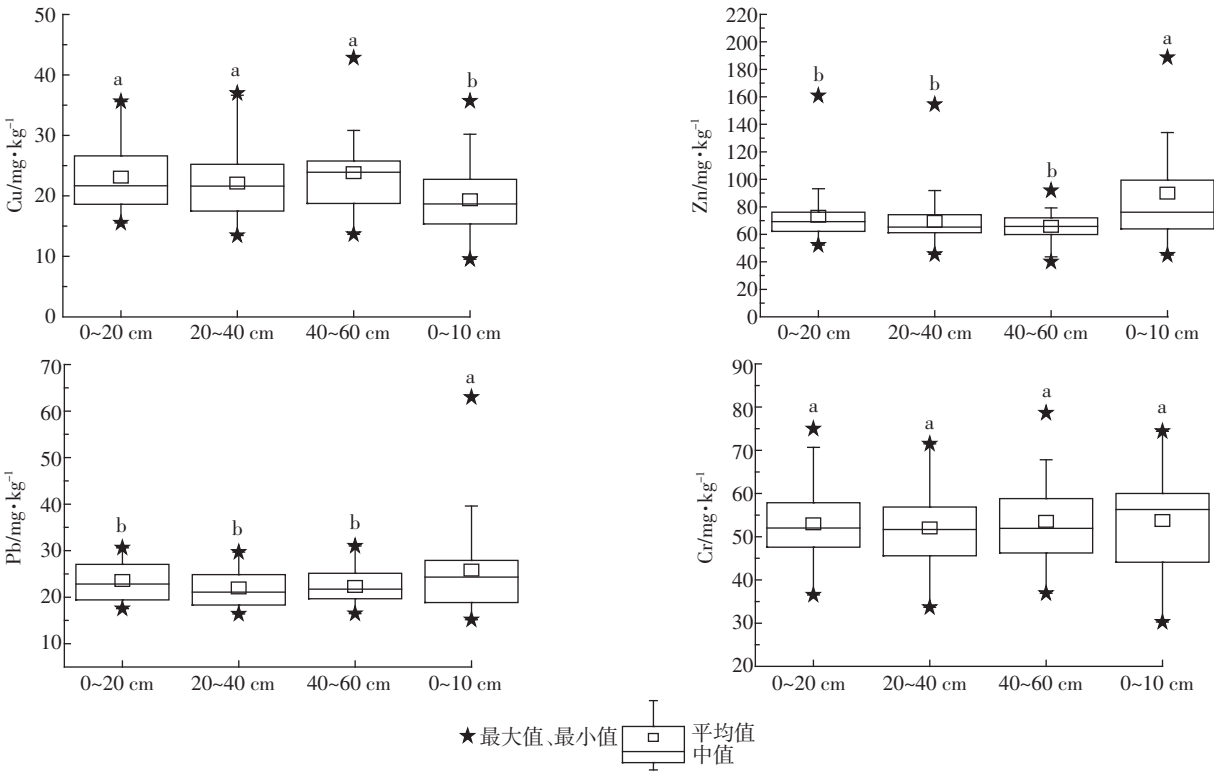
如图 2 所示,河岸带 0~20、20~40、40~60 cm 土层土壤中 Cu 累积量分别为 23.09、22.09、23.82 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于北京市土壤重金属背景值^[10](表 2),且显著高于沉积物中 Cu 含量($P<0.01$),但河岸带各土层土

表 2 北京市土壤重金属背景值

Table 2 Background values of heavy metals in Beijing

参照标准	标准值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$			
	Cu	Zn	Pb	Cr
北京市土壤重金属背景值	18.7	57.5	24.6	29.8

壤中 Cu 含量差异不显著。河岸带各土层土壤及沉积物中 Zn、Cr 含量均显著高于相应土壤重金属背景值($P<0.01$),河岸带各土层土壤 Zn 含量差异不显著,但显著低于沉积物中的含量,Cr 含量在土壤及沉积物中差异不显著。河岸带 0~20 cm 土层土壤和沉积物中 Pb 含量与背景值差异不显著($P=0.200$; $P=0.516$),20~40、40~60 cm 土层 Pb 含量显著低于背景值。通过对取样点周边环境调查分析得知,部分取样点周边存在工业废水、生活污水排泄口,大量废水直接排入河道造成了沉积物中重金属 Zn、Pb 含量显著高于其在河岸带土壤中的含量;而 Cu 含量显著低于河岸带土壤中的含量,可能的原因是被水体微生物吸收或被水体藻类吸附,因为 Cu 是微生物生长发育的必需营养元素^[11],藻类的特殊细胞结构对重金属 Cu 具有较强的亲和性,能够吸附重金属 Cu^[12]。



同一坐标轴上不同小写字母表示差异性显著,相同字母表示差异性不显著($P=0.05$)。

Same letters on the same axes means no significant difference, and different letters means significant difference($P=0.05$).

图 2 河岸带土壤(0~20、20~40、40~60 cm)及河流沉积物(0~10 cm)重金属累积量

Figure 2 The concentration of heavy metals in riparian zone soil(0~20, 20~40, 40~60 cm) and river sediment(0~10 cm)

2.1.2 河岸带土壤与河流沉积物重金属含量水平

与北京市土壤重金属背景值(表 2)相比较,重金属含量水平见图 3。由图 3 可知,Cu、Zn、Cr 3 种重金属累积量超过背景值的样本占总样本数最低为 50%,累积指数均大于 1,说明其在土壤和沉积物均存在一定累积,其中 Cr 含量超过背景值的样本数占总样本数 100%,污染程度最重;Pb 累积量超过背景值的样本数占总样本数最高达到 50%,且累积指数大于 1,存在一定的累积。

2.2 河岸带表层土壤与河流沉积物重金属空间分布

由图 4 可知,表层土壤中 Cu 含量在北岸 1、9、15、16、17 号采样点及南岸 22、23 号采样点较高,其中 17 号采样点最高,13 号采样点最低,变异系数达到 22.47%(表 3)。表层土壤中 Zn 含量在北岸 10、15 号采样点及南岸 22 号采样点较高,其中 10 号点达到最高,7 号点最低,变异系数达到 27.23%(表 3)。Pb 含量沿河流方向变化不大,在 11、15、23 号采样点均有升高,变异系数为 17.55%(表 3)。Cr 含量在北岸 1~4 号采样点逐渐降低,5 号采样点突然升高,5~17 号采样点含量变化不大,18~28 号采样点变化趋势与北岸相似,且在 22、23、26 号采样点含量较高,变异系数为 17.42%(表 3)。沉积物中重金属 Cu、Zn、Pb、Cr 含量极大值主要出现在 3、11、13、23 号采样点,变异系

数分别达到 29.76%、43.39%、37.54%和 20.90%(表 3)。此外,表层土壤和沉积物中 Pb、Cr 变化趋势基本一致,说明表层土壤和沉积物中 Pb、Cr 可能具有相同的污染源。

以上结果表明该研究区内河岸带表层土壤与河流沉积物重金属分布空间差异相对较大,我们认为这主要是由采样点周边环境特征造成。由表 1 可知,河岸带表层土壤重金属污染较严重的采样点周边受人类活动干扰强烈,如村庄附近、人类生活垃圾堆放及焚烧、农药和化肥的施用以及放牧活动等。研究表明,燃料燃烧、垃圾堆放和农药化肥的施用是土壤重金属的主要来源^[13-14]。如人类日常生活所需的燃煤中含有大量的重金属和类金属,燃烧会造成土壤 Cu、Zn、Pb、Cr 等重金属的污染^[15];而垃圾在焚烧时其中的重金属(如 Cu、Zn、Pb、Cr、Hg 等)不会被破坏,而是以几乎相同的数量排入环境,并伴随降雨、大气沉降进入土壤

表 3 河岸带表层土壤(0~20 cm)及河流沉积物(0~10 cm)重金属变异系数

Table 3 The coefficient of variation of heavy metals in surface soil of riparian zone(0~20 cm) and river sediment(0~10 cm)

项目	CV(Cu)	CV(Zn)	CV(Pb)	CV(Cr)
表层土壤	22.47%	27.23%	17.55%	17.42%
沉积物	29.76%	43.39%	37.54%	20.90%

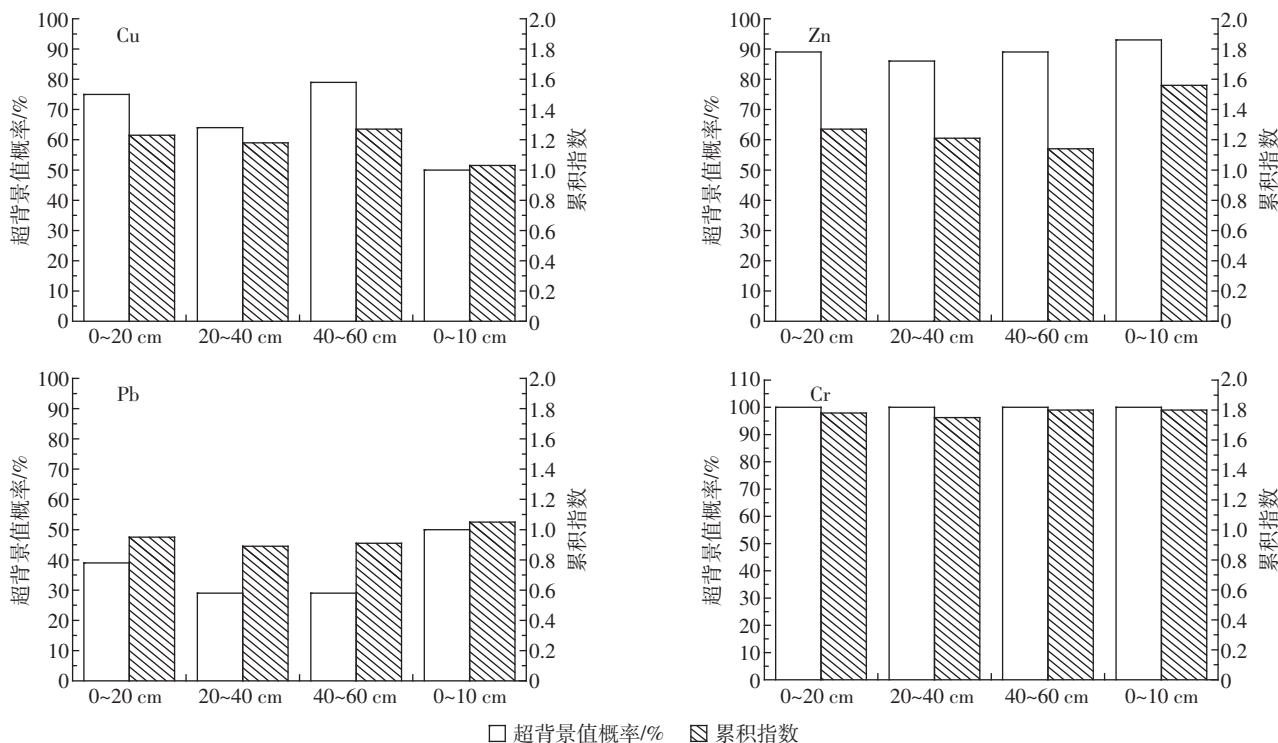


图 3 河岸带土壤(0~20、20~40、40~60 cm)及河流沉积物(0~10 cm)重金属含量水平

Figure 3 The level of heavy metals in riparian zone soil(0~20, 20~40, 40~60 cm) and river sediment(0~10 cm)

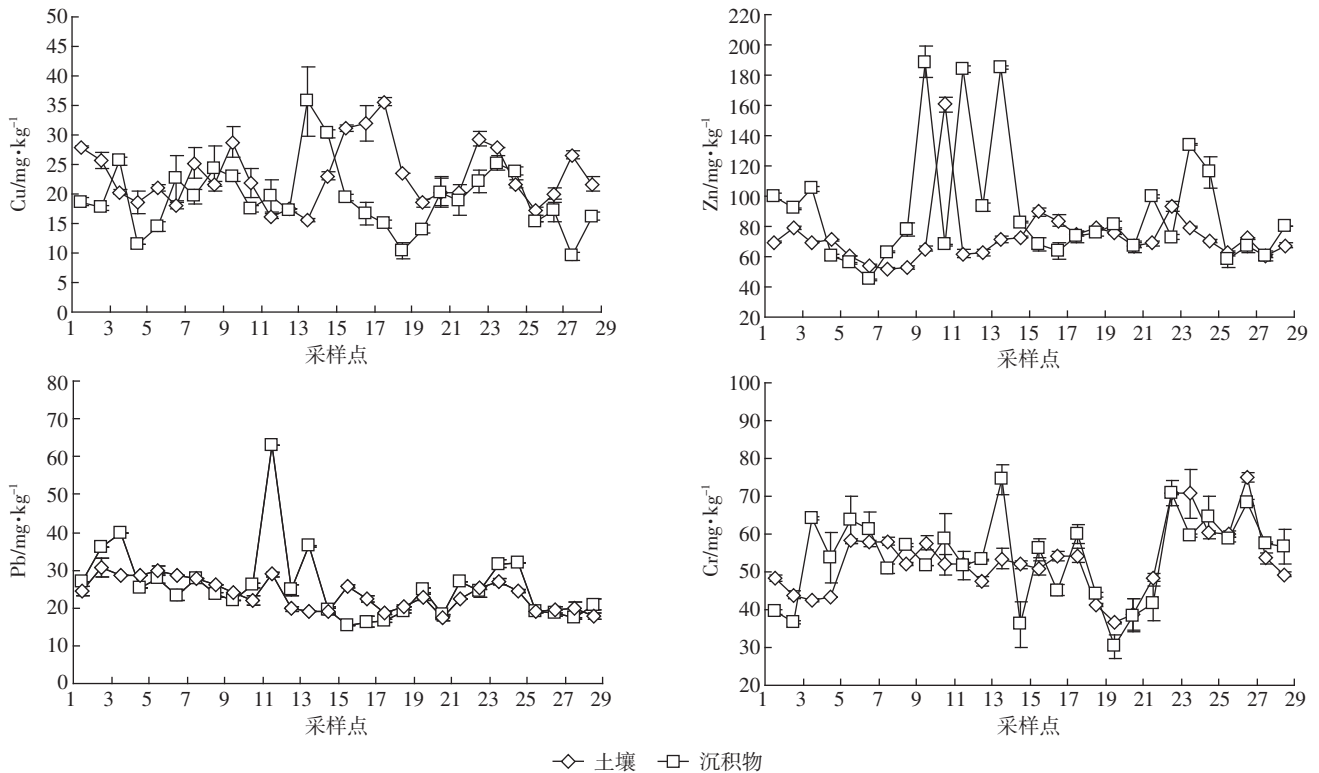


图4 河岸带表层土壤(0~20 cm)及河流沉积物(0~10 cm)重金属含量空间变化

Figure 4 Spatial variation of heavy metals concentration in surface soil of riparian zone(0~20 cm) and river sediment(0~10 cm)

造成环境污染^[16];堆放的垃圾随雨水淋溶,含有大量重金属的垃圾渗滤液进入土壤,会造成土壤 Cu、Zn、Hg、As、Pb、Cr 等重金属的污染^[17]。此外,农药、磷肥及含磷复合肥中混杂有 Cu、Zn、Pb、Cr 等重金属,施用会增加土壤中重金属的含量^[18],卢树昌等^[19]的研究表明含 Cu 杀菌剂、畜禽粪便等外源 Cu 的输入增加了土壤中 Cu 的含量。

沉积物中重金属 Cu、Zn、Pb、Cr 污染相对严重的采样点主要集中在生活污水、工厂废水排污口以及闸坝上游等地方(表1)。居民生活污水以及垃圾处理厂、胶衣厂、造纸厂、金属加工厂等企业的工业废水排放均会增加沉积物中重金属含量^[1],如马秀平等^[20]研究表明污水排放是水系沉积物重金属的主要来源。此外,闸坝容易造成排入河道的工业废水和生活污水在闸坝前大量集聚,从而使水体自净能力降低,水体污染加剧,进入水环境中的重金属很少存在于水相中,而是通过一系列平衡反应,最终在沉积物中积累成为持久性污染物,进而造成沉积物中重金属含量升高^[21]。Zn 含量在 9 号采样点出现最大值,我们推测可能是因该采样点周边河岸带放牧现象严重,畜禽粪便中的重金属随地表径流进入河流造成。研究表明放牧会造成植被覆盖度下降,地表土壤层破坏,土壤渗透率降

低,地表径流和水土流失加剧^[22],同时畜禽粪便中含有 Cu、Zn 等重金属,其中以 Zn 含量最高^[23],污染物随地表径流被大量带入河流造成重金属含量升高。

2.3 河岸带土壤与河流沉积物重金属关联分析

2.3.1 河岸带土壤与河流沉积物重金属相关性分析

同一来源的重金属之间存在着相关性,根据相关性可以判断重金属的来源是否相同^[24]。河岸带土壤与河流沉积物重金属 Pearson 相关系数矩阵见表4。由表4可知,河岸带土壤中 Cu 与 Zn、Cr 含量显著正相关($R=0.416, R=0.332; P<0.01$),表明 Cu 与 Zn、Cr 可能具有相同的污染来源。研究表明,工业污染、生活垃圾堆放及交通污染等是土壤重金属 Cu、Zn、Cr 污染的主要来源途径^[25]。本实验中对取样点周边环境调查分析得知,重金属 Cu、Zn、Cr 污染严重的取样点主要集中在人类活动干扰强烈的地方,如生活垃圾堆放、焚烧、农药和化肥的施用等地点,因此推测 Cu、Zn、Cr 的污染主要受居民生活及农业活动的影响。河流沉积物中 Zn 与 Cu、Pb 含量显著正相关($R=0.537, R=0.634; P<0.01$),且沉积物中重金属空间分布特征也显示了 Zn 与 Cu、Pb 具有相似的沿程变化趋势,与相关分析结果相符。

河流沉积物重金属含量与河岸带土壤对应元素

表 4 河岸带土壤及沉积物重金属元素相关系数矩阵

Table 4 Correlation matrix of heavy metals in riparian zone soil and river sediment

元素	土壤				沉积物			
	Cu	Zn	Pb	Cr	Cu	Zn	Pb	Cr
Cu	1				1			
Zn	0.416**	1			0.537**	1		
Pb	0.041	0.034	1		0.313	0.634**	1	
Cr	0.332**	0.112	0.123	1	0.259	0.096	0.097	1

注:* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著相关(土壤样本数 $n=84$;沉积物样本数 $n=28$)。

Note:* and ** mean significant correlation at levels of 0.05 and 0.01 respectively(soil; $n=84$;sediment; $n=28$).

相关性分析见表 5。由表 5 可知,沉积物中重金属 Pb、Cr 含量分别与其在河岸带土壤中的含量显著正相关($R=0.526,0.597,0.631$; $R=0.643,0.648,0.504$; $P<0.01$),说明沉积物中 Pb、Cr 与河岸带土壤中 Pb、Cr 具有一定的同源性。河岸带作为水陆生态系统的过渡带,有着特殊的地理位置,工业废水排放、放牧、人类休闲娱乐、垃圾堆放等造成的河岸带土壤重金属污染,随着地表径流将会源源不断地进入河流,成为河流沉积物重金属污染的主要物质源^[11];同时河流沉积物随河水季节性涨落迁移至岸边带土壤,也会造成土壤重金属污染^[26]。

2.3.2 河岸带土壤与河流沉积物重金属回归分析

为进一步揭示河岸带土壤重金属含量对沉积物中重金属含量的影响大小,对 Pb、Cr 进行了回归分析,结果见图 5。由图 5 可知,沉积物中 Pb、Cr 含量分别随河岸带土壤 Pb、Cr 含量的增加而增加,且达到极

显著相关($P<0.01$),说明河岸带土壤 Pb、Cr 含量对沉积物中 Pb、Cr 含量有着显著的影响,同时进一步说明了河岸带土壤 Pb、Cr 含量与沉积物中 Pb、Cr 含量的相互关系。

3 结论

- (1)温榆河昌平段河岸带土壤与河流沉积物中 Cu、Zn、Pb、Cr 4 种重金属均存在一定程度的污染,其中以 Cr 污染最严重。
- (2)温榆河昌平段流域 Cu、Zn、Pb、Cr 4 种重金属的污染主要由工厂废水、生活污水排放及人类活动造成,应加强对废水排放前的处理及周边环境的管理。
- (3)河岸带土壤重金属的增加会影响沉积物中重金属的含量,尤其是 Pb、Cr,应加大力度保护河岸带,科学管理河岸带,控制河岸带重金属污染。

表 5 沉积物重金属含量与河岸带土壤对应元素相关系数矩阵

Table 5 Correlation matrix of heavy metals in river sediment and corresponding elements in riparian zone soil

土壤	土层/cm	沉积物 0~10 cm			
		Cu	Zn	Pb	Cr
Cu	0~20	-0.142			
	20~40	0.140			
	40~60	0.045			
Zn	0~20		-0.092		
	20~40		-0.091		
	40~60		0.181		
Pb	0~20			0.526**	
	20~40			0.597**	
	40~60			0.631**	
Cr	0~20				0.643**
	20~40				0.648**
	40~60				0.504**

注:* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平显著相关(样本数 $n=28$)。下同。

Note:* and ** mean significant correlation at levels of 0.05 and 0.01 respectively($n=28$).The same below.

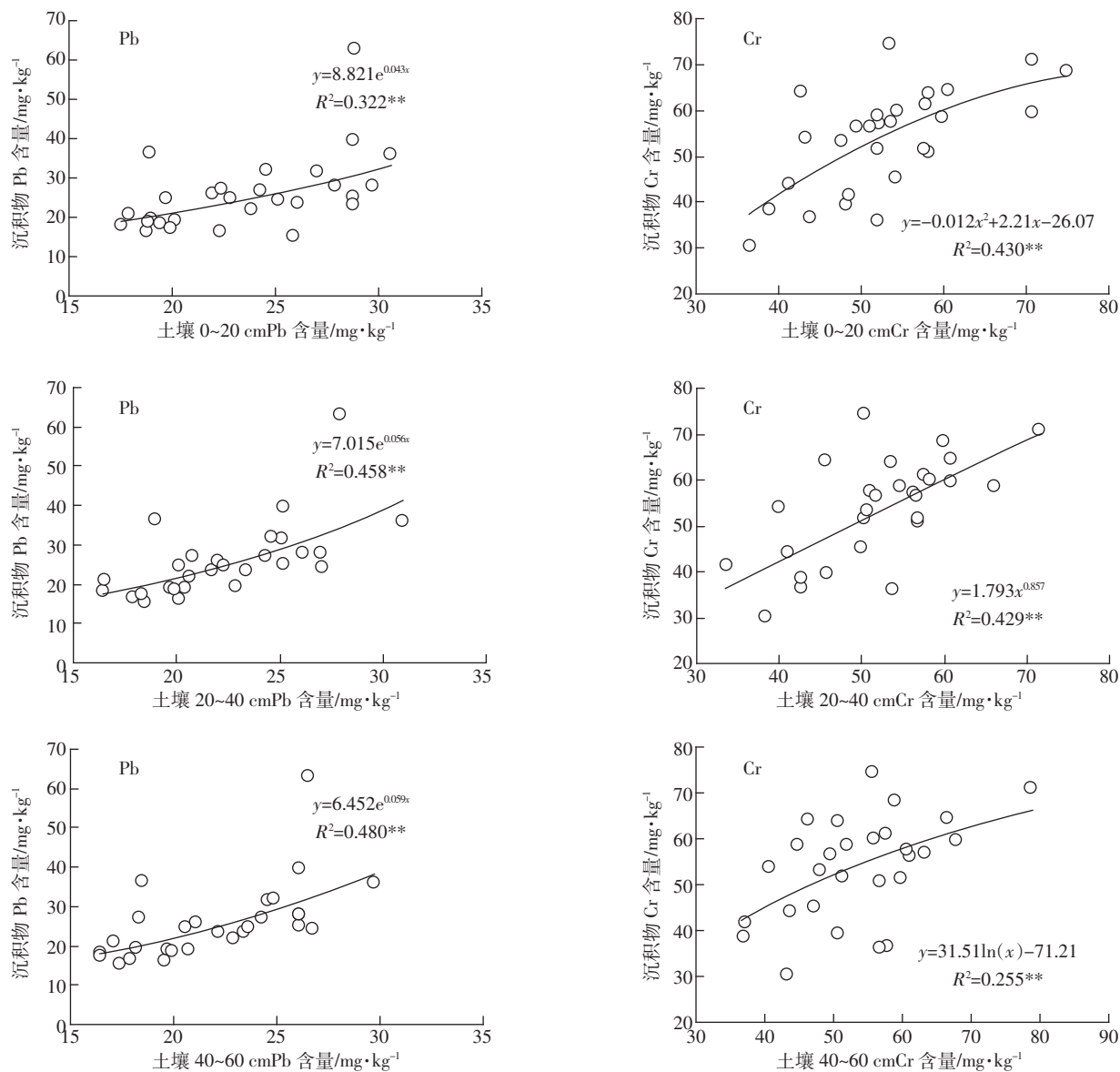


图5 河岸带土壤重金属含量及沉积物重金属含量回归分析

Figure 5 Regression analysis between heavy metal concentration in riparian zone soil and river sediment

参考文献:

- [1] Cevik F, Goksu M Z L, Derici O B, et al. An assessment of metal pollution in surface sediments of Seyhan dam by using enrichment factor, geoaccumulation index and statistical analyses[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 152(1-4): 309-317.
- [2] Selvam A P, Priya S L, Banerjee K, et al. Heavy metal assessment using geochemical and statistical tools in the surface sediments of Vembanad Lake, Southwest Coast of India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184(10): 5899-5915.
- [3] 尚林源, 孙然好, 王赵明, 等. 海河流域北部地区河流沉积物重金属的生态风险评价[J]. *环境科学*, 2012, 33(2): 606-611.
SHANG Lin-yuan, SUN Ran-hao, WANG Zhao-ming, et al. Assessment of heavy metal pollution in surface sediments of rivers in northern area of Haihe River Basin, China[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(2): 606-611.
- [4] 何江, 王新伟, 李朝生, 等. 黄河包头段水-沉积物系统中重金属的污染特征[J]. *环境科学学报*, 2003, 23(1): 53-57.
HE Jiang, WANG Xin-wei, LI Chao-sheng, et al. Pollution character of heavy metals in the water-sediment system from Baotou section of the Yellow River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(1): 53-57.
- [5] 彭德海, 吴攀, 曹振兴, 等. 赫章土法炼锌区水-沉积物重金属污染的时空变化特征[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(5): 979-985.
PENG De-hai, WU Pan, CAO Zhen-xing, et al. Spatial and temporal variation characteristics of heavy metal pollution of water-sediments in stream of zinc smelting area, Hezhang of Guizhou, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(5): 979-985.
- [6] Gumgum B, Unlu E, Tez Z, et al. Heavy metal pollution in water, sedi-

- ment and fish from the Tigris River in Turkey[J]. *Chemosphere*, 1994, 29(1):111-116.
- [7] Kucuksezgin F, Kontas A, Uluturhan E. Evaluations of heavy metal pollution in sediment and *Mullus barbatus* from the Izmir Bay (Eastern Aegean) during 1997—2009[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(7):1562-1571.
- [8] 李莲芳, 曾希柏, 李国学, 等. 北京市温榆河沉积物的重金属污染风险评价[J]. 环境科学学报, 2007, 27(2):289-297.
- LI Lian-fang, ZENG Xi-bai, LI Guo-xue, et al. Heavy metal pollution of Wenyu River sediment and its risk assessment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(2):289-297.
- [9] 杜晓丽, 曲久辉, 刘会娟, 等. 温榆河水体中重金属含量分布及赋存状态解析[J]. 环境科学学报, 2012, 32(1):37-42.
- DU Xiao-li, QU Jiu-hui, LIU Hui-juan, et al. Distributions of trace metals in the surface water in Wenyu River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(1):37-42.
- [10] 陈同斌, 郑袁明, 陈煌, 等. 北京市土壤重金属含量背景值的系统研究[J]. 环境科学, 2004, 25(1):117-122.
- CHEN Tong-bin, ZHENG Yuan-ming, CHEN Huang, et al. Background concentrations of soil heavy metals in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(1):117-122.
- [11] 袁旭音, 陈骏, 季峻峰, 等. 太湖沉积物和湖岸土壤的污染元素特征及环境变化效应[J]. 沉积学报, 2002, 20(3):427-434.
- YUAN Xu-yin, CHEN Jun, JI Jun-feng, et al. Characteristics and environmental changes of pollution elements in Taihu sediments and soils near the lake[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(3):427-434.
- [12] 陈勇生, 孙启俊, 陈钧, 等. 重金属的生物吸附技术研究[J]. 环境科学进展, 1997, 5(6):34-43.
- CHEN Yong-sheng, SUN Qi-jun, CHEN Jun, et al. Research on technology of biosorption of heavy metals[J]. *Advances in Environmental Science*, 1997, 5(6):34-43.
- [13] 刘勇, 岳玲玲, 李晋昌. 太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2011, 31(6):1285-1293.
- LIU Yong, YUE Ling-ling, LI Jin-chang. Evaluation of heavy metal contamination and its potential ecological risk to the soil in Taiyuan, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(6):1285-1293.
- [14] 胡克林, 张凤荣, 吕贻忠, 等. 北京市大兴区土壤重金属含量的空间分布特征[J]. 环境科学学报, 2004, 24(3):463-468.
- HU Ke-lin, ZHANG Feng-rong, LÜ Yi-zhong, et al. Spatial distribution of concentrations of soil heavy metals in Daxing county, Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(3):463-468.
- [15] 彭秀红, 倪师军, 张成江, 等. 城市工业用煤 X 荧光分析及重金属元素污染研究[J]. 生态环境, 2007, 16(3):883-886.
- PENG Xiu-hong, NI Shi-jun, ZHANG Cheng-jiang, et al. X-ray fluorescence analysis of industrial coal and study on its heavy metals pollution[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(3):883-886.
- [16] Buchholz B A, Landsberger S. Trace metal analysis of size-fractionated municipal solid waste incinerator fly ash and its leachates[J]. *Journal of Environmental Science and Health*, 1993, 28(2):423-441.
- [17] 马琨, 王兆骞, 杜茜, 等. 城市生活垃圾堆肥对春小麦生长和土壤的影响[J]. 农业环境保护, 2000, 19(5):312-314.
- MA Kun, WANG Zhao-qian, DU Qian, et al. Effect of municipal refuse compost to the growth of spring-wheat and the soil[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2000, 19(5):312-314.
- [18] 王军, 陈振楼, 王初, 等. 上海崇明岛蔬菜地土壤重金属含量与生态风险预警评估[J]. 环境科学, 2007, 28(3):647-653.
- WANG Jun, CHEN Zhen-lou, WANG Chu, et al. Heavy metal content and ecological risk warning assessment of vegetable soils in Chongming Island, Shanghai City[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(3):647-653.
- [19] 卢树昌, 高悦. 天津市郊区果园土壤重金属铜积累状况调查分析[J]. 天津农业科学, 2009, 15(1):41-44.
- LU Shu-chang, GAO Yue. Investigation and analyses on metal copper accumulation of orchard soil in Tianjin suburb[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2009, 15(1):41-44.
- [20] 马秀平, 井维鑫, 王茜, 等. 丹河水系表层沉积物重金属污染及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6):1180-1186.
- MA Xiu-ping, JING Wei-xin, WANG Qian, et al. Heavy metal pollution in the surface sediment of Dan River and its ecological risk assessment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(6):1180-1186.
- [21] Singh K P, Malik A, Sinha S, et al. Estimation of source of heavy metal contamination in sediments of Gomti River (India) using principal component analysis[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2005, 166(1-4):321-341.
- [22] 陈忠东. 放牧干扰对林地及林木生长影响分析与评价[J]. 林业科学研究, 2003, 16(3):312-318.
- CHEN Zhong-dong. Analysis and evaluation of the effect of grazing on forest land and tree growth[J]. *Forest Research*, 2003, 16(3):312-318.
- [23] 谢忠雷, 朱洪双, 李文艳, 等. 吉林省畜禽粪便自然堆放条件下粪便/土壤体系中 Cu、Zn 的分布规律[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11):2279-2284.
- XIE Zhong-lei, ZHU Hong-shuang, LI Wen-yan, et al. Distribution of Cu and Zn in system of animal manures/excrement-subsoil under natural stacking of animal manures in Jilin, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11):2279-2284.
- [24] 刘文新, 李向东. 深圳湾水域中重金属在不同相间的分布特征[J]. 环境科学学报, 2002, 22(3):305-309.
- LIU Wen-xin, LI Xiang-dong. Distribution of heavy metals among various phases in Shenzhen Bay[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(3):305-309.
- [25] 陈秀端, 卢新卫, 赵彩凤, 等. 西安市二环内表层土壤重金属空间分布特征[J]. 地理学报, 2011, 66(9):1281-1288.
- CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, ZHAO Cai-feng, et al. The spatial distribution of heavy metals in the urban topsoil collected from the interior area of the second ring road, Xi'an[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9):1281-1288.
- [26] 施婉君, 靳治国, 周培. 上海市土壤重金属污染研究进展[J]. 上海环境科学, 2009, 28(2):72-75.
- SHI Wan-jun, JIN Zhi-guo, ZHOU Pei. Progress in the study on heavy metal contamination of soil in Shanghai[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2009, 28(2):72-75.