ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 35 卷 第 4 期
2014 年 4 月 15 日

目 次

三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析

胥焘[1,2],王飞[2],郭强[2],聂小倩[2],黄应平[2],陈俊[1*]
(1. 西北农林科技大学动物科技学院,杨凌 712100; 2. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心(三峡大学),宜昌 443002)

摘要:在测定香溪河消落带(海拔145~175 m)和库岸(海拔175~185 m)土壤重金属含量的基础上,分析重金属的迁移特征,运用地累积指数进行污染评价,同时采用因子分析-多元线性回归(FA-MLR)分析重金属的来源和各来源的贡献比率.结果表明,2012年落干时段内(6~9月),香溪河库岸上层和下层土壤重金属含量都在减少,消落带重金属含量上层土壤减少,下层土壤增多;库岸重金属向消落带迁移,消落带重金属向下层积累.重金属污染级别是Cd > Pb > Cu > Cr,主要风险元素为Cd,各重金属污染程度评价等级都在中等以下.FA-MLR分析表明,消落带75.60%的Pb来源于交通运输,62.03%的Cd来源于农业,64.71%的Cu和75.36%的Cr来源于天然矿石.在库岸,82.26%的Pb来源于交通运输,68.63%的Cd来源于农业,65.72%的Cu和69.33%的Cr来源于天然矿石.FA-MLR成功地模拟了香溪河消落带和库岸土壤重金属的来源,并给出各来源的贡献率;同时揭示了重金属的迁移特征,能为香溪河流域重金属污染防治提供有益参考.

关键词:三峡库区;消落带;重金属;迁移特征;因子分析-多元线性回归
中图分类号:X131.3 **文献标识码**:A **文章编号**:0250-3301(2014)04-1502-07 **DOI**:10.13227/j.hjkx.2014.04.044

Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area

XU Tao[1,2], WANG Fei[2], GUO Qiang[2], NIE Xiao-qian[2], HUANG Ying-ping[2], CHEN Jun[1]
(1. College of Animal Science, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Transfer characteristics of heavy metals and their evaluation of potential risk were studied based on determining concentration of heavy metal in soils from water-level-fluctuating zone (altitude: 145-175 m) and bank (altitude: 175-185 m) along Xiangxi River, Three Gorges Reservoir area. Factor analysis-multiple linear regression (FA-MLR) was employed for heavy metal source identification and source apportionment. Results demonstrate that, during exposing season, the concentration of soil heavy metals in water-level-fluctuation zone and bank showed the variation, and the concentration of soil heavy metals reduced in shallow soil, but increased in deep soil at water-level-fluctuation zone. However, the concentration of soil heavy metals reduced in both shallow and deep soil at bank during the same period. According to the geoaccumulation index, the pollution extent of heavy metals followed the order: Cd > Pb > Cu > Cr, Cd is the primary pollutant. FA and FA-MLR reveal that in soils from water-level-fluctuation zone, 75.60% of Pb originates from traffic, 62.03% of Cd is from agriculture, 64.71% of Cu and 75.36% of Cr are from natural rock. In soils from bank, 82.26% of Pb originates from traffic, 68.63% of Cd is from agriculture, 65.72% of Cu and 69.33% of Cr are from natural rock. In conclusion, FA-MLR can successfully identify source of heavy metal and compute source apportionment of heavy metals, meanwhile the transfer characteristic is revealed. All these information can be a reference for heavy metal pollution control.

Key words: Three Gorges Reservoir area; water-level-fluctuating zone; heavy metal; transfer characteristic; FA-MLR

三峡水库水位规律性涨落时被淹没土地周期性地露出水面形成消落带,水位的反季节性涨落使得消落带成为特殊的生态环境区域[1~3].消落带土壤中的重金属等污染物通过溶解、交换、扩散等方式进入水体而引起水质变化,库区水体中的重金属等污染物通过吸附沉淀等形式迁移至消落带引起土壤环境改变[4~7].因此,研究库区消落带土壤重金属迁移及其污染程度,辨别其污染来源,对水库的土壤环境和水环境保护具有十分重要的意义.

目前,对三峡库区消落带重金属的研究主要集中在重金属的空间分布和污染评价[8~10],土壤-水体间的转移[11],淹水前后的含量变化[12,13];而对重金属的迁移及来源分析相对缺乏.香溪河流域分布着大量

收稿日期:2013-08-06;**修订日期**:2013-11-06
基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07104-002-04);湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T200703)
作者简介:胥焘(1980~),男,博士研究生,主要研究方向为污染生态学,E-mail:xutaoxinong@126.com
* 通讯联系人,E-mail:chen_jun2008@nwsuaf.edu.cn

磷矿，河道是磷矿运输的主要通道，在河流两岸分布多个磷矿码头，同时香溪河流域也分布着大量农田，这些成为重金属污染的潜在来源. 多元统计已成功地运用于污染物的来源分析[14,15]，但运用于三峡库区消落带的较少，其方法包括因子分析（factor analysis，FA）和多元线性回归分析（multiple linear regression，MLR）. 重金属来源的辨别和贡献分析以及迁移机制的研究对其污染防治有着重要意义. 本实验选择了三峡库区香溪河自然状态消落带（海拔 145 ~ 175 m）和库岸（海拔 175 ~ 185 m）为研究区域，以不同分层土壤（0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm）为研究对象，并考虑土壤经历的不同落干时间（落干初期 2012 年 6 月和落干后期 2012 年 9 月），从时空两个角度对重金属（Pb、Cd、Cu、Cr）的变化进行分析和比较，旨在研究消落带和库岸重金属的变化过程，以探讨其迁移机制. 并采用地累积指数对土壤重金属的污染的现状进行评价. 同时采用 FA 对香溪河消落带和库岸土壤进行重金属来源辨别，在 FA 基础上使用 MLR 对各来源进行定量模拟，并对模拟效果进行检验，旨在研究香溪河消落带及库岸的重金属来源和各来源的贡献比率，为重金属污染防治提供有利参考.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

香溪河位于东经 110°25′ ~ 110°06′，北纬30°57′ ~ 31°34′之间，地处湖北西南，发源于湖北省西北部神农架林区，全长 94 km，流域总面 3099 km^2，拥有 3 条主要支流. 香溪河消落带植被稀少，多为喀什特地貌，土层薄，有机质含量少，坡度在 25°左右，水土流失严重.

1.2　样品采集与分析

采样河段由峡口镇至长江干流，全长约 12 km，采样区域为香溪河两岸自然消落带和库岸，沿线共设置 9 个样点；每个样点分海拔 145 ~ 175 m（消落带）和海拔 175 ~ 185 m（库岸）2 个采样小区，并用 GPS 定位；在每个小区内随机设置 3 个样方，土样采集深度分为上层（0 ~ 20 cm）和下层（20 ~ 40 cm），蛇形采样法取样并分层混合均匀，采样分落干初期（2012 年 6 月）和落干后期（2012 年 9 月）两次进行，确保两次采样点保持一致，共采集样品 72 个. 土样风干，拣出根须、虫体、石子，研磨，过 200 目筛，自封袋密封保存，两次采样样品收集齐全后，同时进行盐酸-硝酸-氢氟酸消解，采用原子吸收分光光度法（Spectr AA-600 原子吸收光谱仪，美国 Varian 公司）测定重金属 Pb、Cd、Cu、Cr 的含量. 同时采用碱熔-钼锑抗分光光度法测定土壤总磷（TP）[16]，采用重铬酸钾容量法测定总有机碳（TOC）[16]，采用半微量凯式定氮法测定土壤全氮（TN）[16].

1.3　数据统计与分析

不同高程（消落带海拔 145 ~ 175 m 和库岸海拔 175 ~ 185 m）、土壤层（0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm）和时间（落干初期和落干后期）之间的重金属含量差异分析采用非参数的两两比较. 运用因子分析（FA）辨别重金属的来源，结合多元线性回归（MLR）模拟重金属各来源的贡献率[14,15]. 所有统计均采用 SPSS 15（IBM，USA）完成.

1.4　重金属污染评价方法

重金属污染现状采用地累积指数法[17]分析，分析方法如下：

$$I_{geo}^{n} = \log_2(C_n/kB_n)$$

式中，I_{geo}^{n}为重金属 n 的地积累指数，C_n 为重金属 n 的含量；B_n 为沉积岩中所测该重金属的地球化学背景值，本研究重金属地球化学背景值采用三峡库区土壤重金属背景值（表 1）[18]；k 为常数，一般 k = 1.5. 根据 I_{geo}^{n}数值的大小，将沉积物中重金属的污染程度分为 7 级，即 0 ~ 6 级，如表 2 所示.

表 1　重金属的背景值/$mg \cdot kg^{-1}$

Table 1　Consulted value of heavy metals/$mg \cdot kg^{-1}$

项目	Pb	Cd	Cu	Cr
背景值	23.88	0.13	25.0	78.03

表 2　重金属污染程度与 I_{geo}^{n}

Table 2　The I_{geo}^{n} and contamination grades of heavy metals

I_{geo}^{n}	≤0	0 ~ 1	1 ~ 2	2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 5	>5
等级	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无	无-中	中	中-强	强	强-极强	极强

2　结果与讨论

2.1　土壤重金属迁移特征

落干期间消落带各样点重金属含量变化见图 1，其上层土壤 P 在 1、3、4、5、9 样点含量降低，2、6、7、8 样点升高；下层土壤 Pb 在 3、7、9 样点含

量降低,1、2、4、5、6、8 样点升高. 上层土壤 Cd 在 1、3、5、6、7 样点降低,2、4、8、9 样点升高; 下层土壤各样点都升高. 上层土壤 Cu,在 1、2、3、4、5、6、7 样点含量降低,8、9 样点升高; 下层土壤除样点 4 外都升高. 上、下层土壤中的 Cr,除 6 号样点降低外,其它样点含量在升高. 结果表明,在香溪河消落带,各个重金属的时空变化特征不同. 如表 3 所示,在落干初期(2012 年 6 月)消落带上、下层土壤重金属的含量差异不显著; 而落干后期(2012 年 9 月)上、下层土壤重金属的含量差异显著(Pb、Cd、Cr)或极显著(Cu),说明在经过落干过程时重金属含量在土壤中的垂直分布特征发生改变. 消落带上层土壤,落干初期与落干后期相比 Pb、Cd 降低,但差异不显著,Cu 显著降低,Cr 含量显著升高,消落带下层土壤,经历落干之后各重金属含量都在升高,其中 Pb 差异不显著,Cd、Cu 差异显著,Cr 差异极显著. 由此可以看出,香溪河消落带重金属在经过落干期时向下层土壤积累.

2012 年 6 ~9 月,库岸各样点上层土壤 Pb、Cd 和 Cu 含量降低,下层土壤 Pb、Cd 和 Cu 含量也降低; 上层土壤 Cr 含量除 6 号样点降低外其它样点都在升高,下层土壤 Cr 含量除 6、7、8 号样点降低外其它都升高. 这些变化说明,在香溪河库岸,各个重金属的时空变化变化特征较一致. 总的看来(见表 3),在 2012 年 6 月,库岸上、下层土壤重金属含量 Pb 差异极显著,其它金属差异不显著; 到了 2012 年 9 月库岸上、下层土壤重金属含量 Pb 差异极显著,其它金属差异不显著,说明在经过重金属含量在土壤中的垂直分布特征未发生改变. 2012 年 6 ~9 月在库岸上层土壤中,Pb、Cd 和 Cu 含量极显著降低(见表 3),Cr 含量升高,但差异不显著; 库岸下层土壤中 Pd(差异不显著)、Cu(极显著)、Cd(显著)降低,Cr 含量升高但差异不显著(见表 3). 香溪河库岸上、下层土壤重金属在迁出. 由此可见,消落带和库岸重金属分布变化特征不同; 迁移方式也不同,消落带重金属向下层积累,库岸重金属平行于土层迁出.

虽然重金属自身移动性较差[19],但季节性的气候变化会引起土壤重金属含量的变化[20]. 6 ~9 月正值香溪河流域的暴雨季节,香溪河消落带多为喀什特地貌,土层薄,有机质含量少,植被稀少,坡度在 25°以上,水土流失严重; 干湿交替导致植物根系腐烂形成大孔隙; 加之降雨对土壤淋溶作用,使得重金属元素发生迁移[21]. 吉芳英等[22]研究表明重金属(Pb、Cd、Cu、Cr)在消落带出露时迁移率较高,重金属具有迁移趋势. 与本研究组熊俊等[23]在 2010 年测定的数据相比,虽然采样点和季节不同,但总的看来库岸的重金属含量在减少,消落带的重金属含量在增加,说明重金属的迁移确实存在. 土壤中,重金属以不同的形态(交换态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态)存在,并具有不同迁移能力. 有研究表明[24~26],土壤重金属各形态含量受土壤 pH 值、有机质、黏粒、粉粒、砂粒及 CEC、FeO_x 含量和 MnO_x 含量等因素的共同影响. 交换态和碳酸盐结合态重金属与土壤结合较弱, 最易被释放,有较大的可移动性[27]. 铁锰氧化态重金属在还原条件下易溶解释放,有机结合态重金属在氧化状态下易分解释放[25]. 在本研究中,可能是由于不同水文条件下(消落带:反复淹水; 库岸:无淹水)土壤的理化性质存在差异,导致不同土壤(消落带/库岸)中重金属含量迁移方式不同,同时造成落干期内重金属空间分布特征的变化.

表 3 消落带和库岸土壤重金属含量比较1) /mg·kg^{-1}

Table 3 Comparison of heavy metal contents in the water-level-fluctuating zone of Xiangxi River/mg·kg^{-1}

类型	月份	土层	重金属含量			
			Pb	Cd	Cu	Cr
消落带	6	上层	45.73 ±16.00	0.82 ±0.30	44.59 ±9.55	104.53 ±24.77
		下层	47.76 ±18.59^{ns}	0.70 ±0.17^{ns}	41.39 ±5.60^{ns}	105.73 ±7.32^{ns}
	9	上层	38.90 ±11.03^{ns}	0.76 ±0.19^{ns}	32.59 ±9.55*	131.19 ±23.97*
		下层	50.40 ±13.44$^{\#ns}$	1.10 ±0.41$^{\#*}$	46.33 ±8.40$^{\#ns}$	154.20 ±30.23$^{\#**}$
库岸	6	上层	73.41 ±15.18	1.10 ±0.25	37.47 ±4.92	101.09 ±30.58
		下层	14.48 ±3.37$^{\#\#}$	0.84 ±0.27^{ns}	22.64 ±4.93^{ns}	152.68 ±47.95^{ns}
	9	上层	36.50 ±16.83**	0.97 ±0.31**	36.48 ±6.70**	110.70 ±49.15^{ns}
		下层	7.46 ±2.82$^{\#\#**}$	0.62 ±0.16^{ns*}	24.69 ±4.29^{ns**}	125.93 ±25.28^{nsns}

1)数据表示为,平均值 ± 标准误,分别对消落带和库岸同时期内上下层土壤重金属含量进行比较(ns 表示 $P>0.05$,#表示 $P<0.05$,##表示 $P<0.01$,标记做于下层值上),分别对消落带和库岸同土层不同时期土壤重金属含量进行比较(ns 表示 $P>0.05$,* 表示 $P<0.05$,* * 表示 $P<0.01$,标记做于 9 月值上)

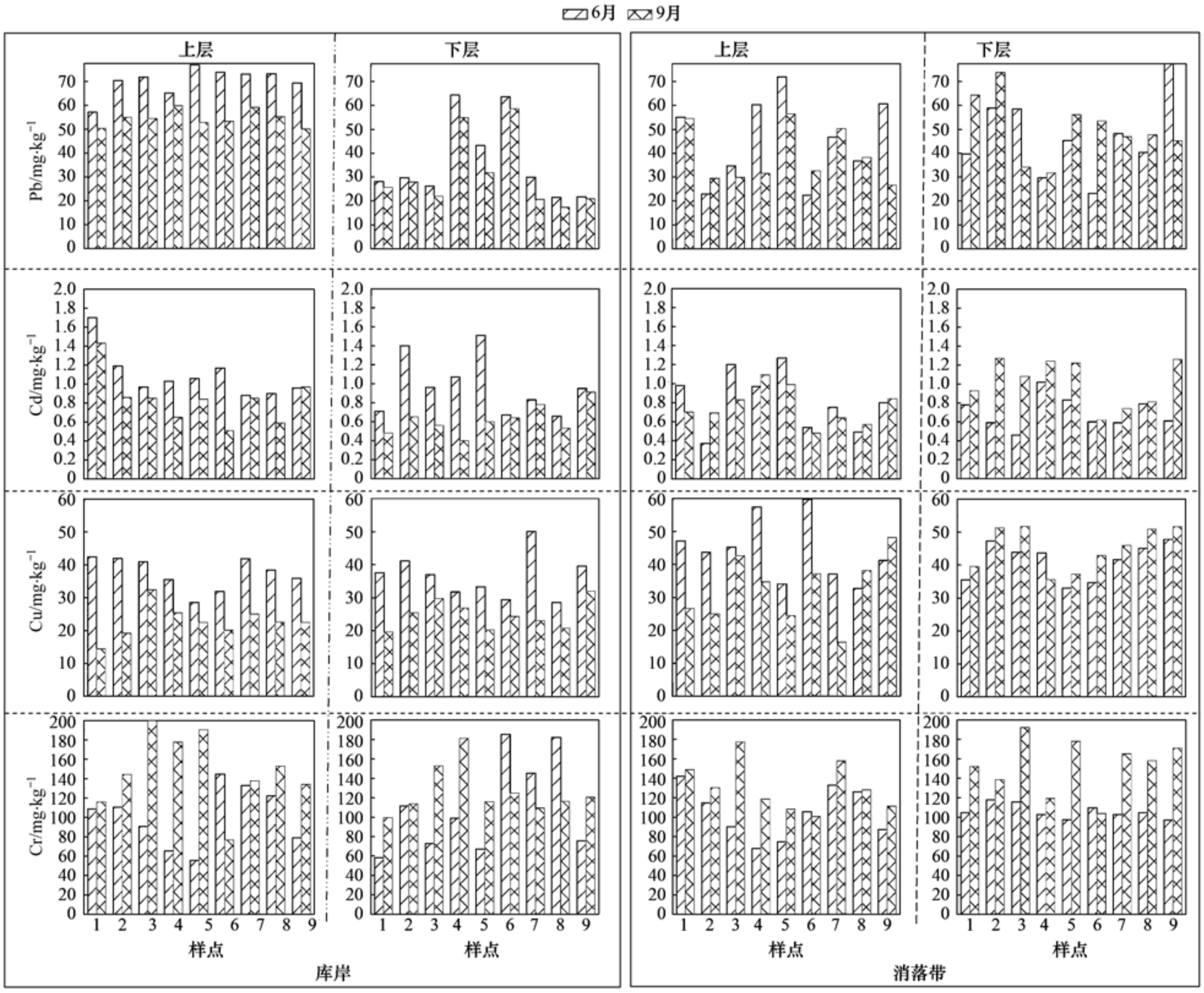

图 1　不同落干时期各样点重金属含量分布

Fig. 1　Distribution of soil heavy metals at different elevations, soil depths and periods

2.2　重金属污染评价

地累积指数(I_{geo}^n)是当前评价污染程度使用较广泛的方法，对香溪河土壤重金属污染评价结果见表 4.

表 4　重金属地质累积指数及重金属污染程度评价

Table 4　The I_{geo}^n and contamination grades of soil heavy metals

海拔	落干时期	土层	地质累积指数 I_{geo}/污染等级			
			Pb	Cd	Cu	Cr
消落带	初期	上层	0.36/1	2.07/3	0.25/1	−0.16/0
		下层	0.41/1	1.84/2	0.14/1	−0.15/0
	后期	上层	0.12/1	1.96/2	−0.20/0	0.16/1
		下层	0.49/1	2.52/3	0.31/1	0.40/1
库岸	初期	上层	1.04/2	2.49/3	0.00/0	−0.21/0
		下层	0.03/1	2.32/3	−0.04/0	−0.08/0
	后期	上层	−1.31/0	2.10/3	−0.73/0	0.38/1
		下层	−2.26/0	1.66/2	−0.60/0	0.11/1

在消落带样品中，Cd 的污染等级为 2 ~ 3 级，在所评价的 4 种重金属中污染程度最高，属“中-强”污染等级. Pb 在落干初期库岸上层土壤中的污染等级为 2 级，属“中等”污染；落干后期降为 1 级，属“无-中”等污染，落干后期库岸上下层都为 0 级，无污染；在消落带都为 1 级，属“无-中”等污染. 库岸土

壤中 Cu 的污染等级都为 0 级,无污染; 在消落带,仅落干后期下层土壤 Cu 污染等级为 0 级,其它都为 1 级. Cr 在消落带和库岸的落干后期都为 1 级,落干前期都为 0 级,落干期间污染等级增加. 香溪河消落带和库岸土壤各金属的污染级别是 Cd > Pb > Cr > Cu. 评价结果表明,在香溪河消落带和库岸,除了 Cd 的污染等级达到了"中-强"等级,其它重金属的污染等级都为"无-中"等污染,该区域的主要重金属污染风险为 Cd. 所以,对该区域镉的来源分析和污染防治有进一步的研究必要.

2.3 重金属来源辨别

利用因子分析,通过对各因子中变量的负载及相互联系可以推测各重金属的可能来源[4,6,14,15]. 本研究选择 6 月消落带和库岸上层土壤 Pb、Cd、Cu、Cr 含量和 TN、TP、TOC 含量(具体数据未列出)进行因子分析-多元线性回归. 6 月是消落带出露初期,且在雨季来临之前,土壤受降雨径流的影响较小; 另外上层土壤是污染物的主要受纳者,其数据能够更好地保持土壤重金属来源的特征.

采用主成分分析及方差极大化旋转方法,选取特征值大于 1 的因子,分析结果见表 5. 对于消落带和库岸土壤样品,分别提取了 3 个主要因子 Factor1、Factor2 和 Factor3. 消落带各因子特征值分别为 3.20、1.75 和 1.13,方差贡献率分别为 32.50%、29.79% 和 24.59%,累计方差贡献率达 86.88%. 库岸各因子特征值分别为 2.21、1.88 和 1.43,方差贡献率分别为 30.60%、26.12% 和 22.01%,累计方差贡献率达 78.77%. 因此,以上 3 个主成分可以解释原始数据的绝大多数信息.

对于消落带和库岸样品,Factor1 中 Cd、TOC 和 TN 有着最高的负载,同时 Cu、TP 也有一定载荷,TOC、TN 是农业生产的主要标志性污染物,同时化肥和农药的使用会带来一定量的 Cd、Cu 和 TP,在香溪河消落带上缘分布着大面积果园,农药化肥使用量较大,所以 Factor1 代表着农业面源. Factor2 在消落带和库岸载荷分布不一致,消落带 Factor2 中 Cr、Cu 和 TP 有最高的载荷,香溪河流域为富磷地区,矿石的自然风化能带来大量的 TP. 同时具有最大负载的 Cr 和 Cu 重金属地质累积指数为 0 ~ 1,属"无污染"级别,不具有外来污染源的特征,主要来源应为矿石风化[12],所以该因子可以推断为自然矿石风化来源. 但对于库岸,Factor2 中 Pb 具有最高负载,同时 Cd 和 Cu 都有一定负载,香溪河两岸公路交通运输繁忙,Pb 是交通运输主要的标志性污染物,同时汽车也会带来一定量 Cd 和 Cu 污染[28],所以该因子可以代表交通运输来源. 同样,消落带和库岸的 Factor3 分别可以解释为交通和矿石分化来源. 经过以上分析,因子分析所得到的 3 个主要因子与重金属来源建立了合理的联系.

表 5 重金属因子分析载荷及来源分析

Table 5 Varimax rotated factor loading (PCA) and identified sources of heavy metals in soils

变量	消落带			库岸		
	Factor1	Factor2	Factor3	Factor1	Factor2	Factor3
Pb	0.07		0.83		0.92	
Cd	0.74		0.30	0.91	0.13	0.09
Cu	0.19	0.71		0.13	0.81	
Cr		0.80				0.67
TP	0.12	0.94	0.12	0.12		0.91
TOC	0.98		0.08	0.84		
TN	0.91		0.15	0.93		
特征值	3.20	1.75	1.13	2.21	1.88	1.43
方差比例/%	32.50	29.79	24.59	30.60	26.16	22.01
累积贡献率/%	32.50	62.29	86.88	30.60	56.76	78.77
可能来源	农业	矿石风化	交通	农业	交通	矿石风化

2.4 重金属各来源比率模拟分析

利用因子分析辨别重金属的可能来源后,因子分析-多元线性回归被用来模拟各来源的贡献比率,具体模拟过程参见文献[15]. 表 6 中分别列出了农业、交通、矿石风化对各种重金属贡献的比率,E/O 表示因子分析-多元线性回归所模拟的重金属含量与实测含量间的比值,这一比值都接近 1,而模拟值和实际值之间的相关系数(R^2)都达到了极显著水平($P < 0.01$). 因此,因子分析-多元线性回归可以很好地模拟重金属的来源.

如表 6 中所示,在香溪河消落带,交通运输提供了 Pb 75.60% 的来源,因此交通运输是 Pb 的主要来

源,同时矿石风化和农业分别提供了 Pb 12.69% 和 6.32% 的来源. Cd 的主要来源为农业,62.03% 的 Cd 来源于农业,22.35% 和 8.70% 的 Cd 分别来源于交通和天然矿石风化. Cu 的主要来源为天然矿石,其贡献了 64.71%,农业和交通分别贡献了 15.21% 和 11.20%. 75.36% 的 Cr 来源于矿石,交通和农业分别贡献了 12.09% 和 3.05%.

在香溪河库岸,Pb 的主要来源是交通运输(82.26%);Cd 的主要来源是农业(68.63%),同时交通也提供了比较多的 Cd 来源(23.51%). Cu 和 Cr 的主要来源为天然矿石,贡献率分别是 65.72% 和 69.33%. 如表 6 中所示,农业、交通运输和矿产不能完全解释重金属的全部来源,在以上 3 个因子来源所解释的剩下比率为其它来源,其它来源对各重金属来源的贡献在 10% 以下(0.91% ~8.88%).

多元线性回归的结果表明,香溪河消落带和库岸重金属有共同的来源,主要污染物贡献大小依次是农业、交通和天然矿石,各个重金属主要来源相同,不同的是消落带和库岸重金属各来源的贡献率不一样. 香溪河流域的重金属物质经过库岸迁移至消落带,而消落带由于周期性淹水,重金属发生水体交换和水流运输,使的各种来源比率发生重新分配[29]. 所以在香溪河流域重金属污染防治中要重点加强农业面源污染的防治.

表 6　重金属来源贡献率、模拟值与实际值比率(E/O)及相关系数(R^2)

Table 6　Source contribution and the estimation to observation ratios (E/O) of heavy metals using factor analysis-multiple linear regression (R^2)

消落带	农业/%	矿石风化/%	交通/%	其他	E/O	R^2
Pb	6.32	12.69	75.60	5. 39	1.00	0.83
Cd	62.03	8.70	22.35	6.92	1.01	0.95
Cu	15.21	64.71	11.20	8.88	1.00	0.73
Cr	9.50	75.36	12.09	3.05	0.99	0.94
库岸	农业/%	交通/%	矿石风化/%	其他	E/O	R^2
Pb	3.17	82.26	10.43	4.14	1.00	0.85
Cd	68.63	23.51	6. 95	0.91	1.02	0.89
Cu	9.19	65.72	21.34	3.75	1.00	0.94
Cr	6.79	19.81	69.33	4.07	0.99	0.94

3　结论

在香溪河流域,重金属从库岸向消落带迁移,消落带重金属向下层土壤汇集,消落带淹水后可能会成为水体的潜在污染源. 香溪河土壤重金属污染主要生态风险元素为 Cd,其主要来源为农业面源. 因子分析-多元线性模型回归可以很好地辨别各重金属来源,并能模拟出各来源的贡献比率. 香溪河消落带及库岸土壤重金属主要来源于农业面源、交通和自然矿石的风化,本研究结果将给香溪河流域土壤重金属污染防治提供有利的参考.

参考文献:

[1] 冯大兰, 刘芸, 钟章成. 三峡库区消落带现状与对策研究[J]. 生态农业科学, 2006, **22**(4): 378-381.

[2] 冯大兰, 刘芸, 黄建国. 三峡库区消落带土壤不同含水量条件下芦苇的氮素与生物量动态变化[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(9): 2003-2009.

[3] 苏维词. 三峡库区消落带的生态环境问题及其调控[J]. 长江科学学院院报, 2004, **21**(2): 33-34.

[4] Micó C, Recatalá L, Peris M, *et al*. Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis[J]. Chemosphere, 2006, **65**(5): 863-872.

[5] Fernandes H M. Heavy metal distribution in sediments and ecological risk assessment: the role of diagenetic processes in reducing metal toxicity in bottom sediments[J]. Environmental Pollution, 1997, **97**(3): 317-325.

[6] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils[J]. Environmental Pollution, 2001, **114**(3): 313-324.

[7] Zhou F, Guo H C, Liu L. Quantitative identification and source apportionment of anthropogenic heavy metals in marine sediment of Hong Kong[J]. Environmental Geology, 2007, **53**(2): 295-305.

[8] 王业春, 雷波, 杨三明, 等. 三峡库区消落带不同水位高程土壤重金属含量及污染评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 612-616.

[9] 刘丽琼, 魏世强, 江韬. 三峡库区消落带土壤重金属分布特征及潜在风险评价[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(7): 1204-1211.

[10] 张雷, 秦延文, 赵艳明, 等. 三峡澎溪河回水区消落带岸边土壤重金属污染分布特征[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(12): 3021-3029.

[11] 傅杨武, 陈明君, 潘杰, 等. 三峡水库消落带土壤-水体系统中重金属模拟研究[J]. 安徽农业科学, 2010, **38**(20): 10783-10784.

[12] Ye C, Li S Y, Zhang Y L, *et al*. Assessing soil heavy metal pollution in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges

Reservoir, China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **191**(1-3): 366-372.

[13] 储立民, 常超, 谢宗强, 等. 三峡水库蓄水对消落带土壤重金属的影响[J]. 土壤学报, 2011, **48**(1): 192-196.

[14] Zhang W G, Feng H, Chang J N, *et al*. Heavy metal contamination in surface sediments of Yangtze River intertidal zone: an assessment from different indexes [J]. Environmental Pollution, 2009, **157**(5): 1533-1543.

[15] 童芳. 合肥城区地表灰尘重金属污染特征及健康风险评价研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012. 46-56.

[16] 劳家柽. 土壤农化分析手册[M]. 北京: 农业出版社, 1988. 204-213, 229-275.

[17] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal, 1969, **2**(3): 108-118.

[18] 唐将, 钟远平, 王力. 三峡库区土壤重金属背景值研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, **16**(4): 848 -852.

[19] 程瑞梅, 王晓蓉, 肖文发, 等. 三峡库区消落带水淹初期土壤物理性质及金属含量初探[J]. 水土保持学报, 2009, **23**(5): 156-161.

[20] Wiseman C L S, Zereini F, Püttmann W. Traffic-related trace element fate and uptake by plants cultivated in roadside soils in Toronto, Canada[J]. Science of the Total Environment, 2013, **442**: 86-95.

[21] 王宁涛, 史婷婷, 陈植华. 香溪河流域土壤侵蚀风险评价[J]. 人民长江, 2012, **43**(23): 57-61.

[22] 吉芳英, 王图锦, 胡学斌, 等. 三峡库区消落区水体沉积物重金属迁移转化特征[J]. 环境科学, 2009, **30**(12): 3482-3486.

[23] 熊俊, 王飞, 梅朋森, 等. 三峡库区香溪河消落区土壤重金属生态风险评价[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(11): 1318-1324.

[24] 王晓阳, 傅瓦利, 谢芳, 等. 三峡库区消落带完整淹水后土壤重金属分布特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2010, **17**(6): 267-271.

[25] 钟晓兰, 周生路, 黄明丽, 等. 土壤重金属的形态分布特征及其影响因素[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(4): 1266-1273.

[26] 范小华, 谢德体, 魏朝富. 三峡水库消落区生态环境保护与利用对策研究[J]. 水土保持学报, 2006, **20**(2): 165-169.

[27] 杨元根, Paterson E, Campbell C. 城市土壤中重金属元素的积累及其微生物效应[J]. 环境科学, 2001, **22**(3): 44- 48.

[28] 李晓燕, 陈同斌, 雷梅, 等. 北京城市广场及校园表土(灰尘)中重金属水平与健康风险[J]. 地理研究, 2010, **29**(6): 989-996.

[29] Tam N F Y, Wong Y S. Spatial variation of heavy metals in surface sediments of Hong Kong mangrove swamps [J]. Environmental Pollution, 2000, **110**(2): 195-205.

HUANJING KEXUE
Environmental Science (monthly)
Vol. 35 No. 4
Apr. 15, 2014

CONTENTS

《环境科学》第6届编辑委员会

主　编：欧阳自远

副主编：赵景柱　郝吉明　田　刚

编　委：(按姓氏笔画排序)

万国江　王华聪　王凯军　王绪绪　田　刚　田　静　史培军
朱永官　刘志培　汤鸿霄　陈吉宁　孟　伟　周宗灿　林金明
欧阳自远　赵景柱　姜　林　郝郑平　郝吉明　聂永丰　黄　霞
黄　耀　鲍　强　潘　纲　潘　涛　魏复盛

环境科学
(HUANJING KEXUE)
(月刊　1976年8月创刊)
2014年4月15日　35卷　第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE
(Monthly　Started in 1976)
Vol. 35　No. 4　Apr. 15, 2014

主　　管	中国科学院
主　　办	中国科学院生态环境研究中心
协　　办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院
主　　编	欧阳自远
编　　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路18号,邮政编码:100085) 电话:010-62941102,010-62849343 传真:010-62849343 E-mail:hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn
出　　版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717
印刷装订	北京北林印刷厂
发　　行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail:journal@mail.sciencep.com
订　购　处	全国各地邮电局
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)

Superintended by	Chinese Academy of Sciences
Sponsored by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
Co-Sponsored by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
Editor-in -Chief	OUYANG Zi-yuan
Edited by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102,010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail:hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn
Published by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing　100717, China
Printed by	Beijing Bei Lin Printing House
Distributed by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail:journal@mail.sciencep.com
Domestic	All Local Post Offices in China
Foreign	China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN　0250-3301 / CN　11-1895/X　　国内邮发代号：2-821

国内定价：90.00元　　国外发行代号：M 205

国内外公开发行