

文章编号: 0254-5357(2016)04-0425-08

DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.2016.04.015

推荐文章

三峡库区澎溪河消落带土壤中重金属形态分布与迁移特征研究

王图锦, 潘 瑾, 刘雪莲
(重庆交通大学河海学院, 重庆 400074)

摘要: 消落带是水域与陆地的过渡地带, 对水环境有着至关重要的影响。本文以三峡库区消落带面积最大的澎溪河流域作为研究区域, 采集消落带土壤及其沿岸土壤样品, 分析重金属形态分布特征, 并使用地质累积指数法和风险评价准则(RAC)对重金属污染程度及生态风险进行评价。研究表明, 消落带土壤中 Pb、Cu、Cr、Cd、Zn 和 Ni 平均含量分别为 68.70、36.96、55.10、0.68、108.26、31.68 mg/kg, 污染程度依次为 Cd > Pb > Zn > Cu > Ni > Cr, 以 Cd 和 Pb 污染较为突出, 普遍高于长江干流土壤, 远高于重庆地区土壤。Cd 的 RAC 值为 20.62%, 呈中等环境风险; 其形态稳定性最差, 以可还原态和酸提取态为主。Pb、Cu、Cr、Zn、Ni 的 RAC 值为 5.45% ~ 10.0%, 环境风险较低; 且均以残渣态为主, 占总量的 54.69% ~ 83.05%。以消落带沿岸土壤为对照, 消落带形成后土壤中各重金属总量均有不同程度升高, 且不同重金属在其增量部分的形态存在差异, Cr 和 Ni 的增量部分以残渣态为主, Cd、Pb、Zn 的增量以非残渣态为主。研究发现, 由于受到水域与陆地污染源的双重影响, 澎溪河流域重金属具有由沿岸向消落带沉积富集的趋势。

关键词: 消落带; 土壤; 重金属; 地质累积指数; 生态风险评价

中图分类号: X825; X821 **文献标识码:** A

由于受到工农业生产、交通排放、大气沉降、土壤淋溶等来源影响, 重金属大量进入土壤环境中。重金属作为典型的土壤污染物, 具有非生物降解性、隐蔽性、易于富集等特点, 重金属在土壤中的蓄积及其对土壤环境的危害一直备受关注, 国内外学者对土壤重金属污染及其治理开展了较多研究^[1-3]。消落带是水域与陆地生态系统过渡地带, 是特殊的生态环境区域, 消落带土壤中的物质、能量输移和转化活跃, 具有人类活动的频繁性和生态的脆弱性特征^[4]。消落带土壤中的重金属既可能来自农业耕作、交通运输、固废堆放等陆源污染源, 也可能来自水体。由于受到 pH 值、温度、氧化还原电位、溶解氧(DO)等因素影响, 消落带土壤既可能成为污染物的源, 也可能成为污染物的汇, 其环境意义重大^[5-6]。

2008 年三峡大坝完全建成运行以后, 三峡水库受周期性水位调节影响, 水位在 145 m(5 月 ~ 9 月)和 172 m(10 月 ~ 4 月)之间波动, 从而在水库周围

形成垂直落差 30 m、面积约 350 km² 的消落带^[7]。由于消落带对于库区水生态环境安全具有重要意义, 对消落带重金属污染物的研究一直备受重视, 但以往对于三峡库区消落带土壤重金属的研究多集中于分析重金属的空间分布、污染物的来源、污染程度评价等^[8-10], 而对于 2008 年直至现今, 消落带土壤中重金属的迁移富集及形态变化特征还缺乏研究, 尤其是对于三峡库区典型次级河流土壤中的重金属污染知之甚少。相比于干流, 次级河流的湖泊化特征更为明显, 水体自净能力较弱, 其生态环境问题近些年尤为突出^[11-12], 因此对库区次级河流消落带重金属开展迁移转化与形态特征研究对于保护库区生态环境安全具有重要意义。

本文以三峡库区消落带面积最大、生态环境问题突出的澎溪河流域作为研究对象, 以澎溪河渠马镇到河口之间的永久回水区作为研究区域, 采集消落带土壤和消落带沿岸土壤样品, 以消落带沿岸土壤作为参照, 分析从 2008 年三峡大坝完全运行至

收稿日期: 2015-09-22; 修回日期: 2016-05-30; 接受日期: 2016-07-15
基金项目: 重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2014jcyjA20011)
作者简介: 王图锦, 博士, 讲师, 主要从事环境地球化学研究。E-mail: wangtujin@163.com。

今,消落带土壤中生态环境风险较高的 6 种重金属 (Pb、Cu、Cr、Cd、Zn 和 Ni) 含量及其形态的变化特征,揭示澎溪河流域重金属的迁移特征和生态环境风险,为进一步研究三峡库区消落带重金属污染及防治提供科学依据。

1 实验部分

1.1 采样点设置及样品采集

根据三峡库区澎溪河流域回水情况及水文地质等特征,以澎溪河流域永久回水区作为研究区域,2015 年 5 月进行分段采样,总共布置 8 个采样点。采样点分别位于渠马、猫爪子、高阳、张王庙、康家沟、黄石、澎桥、河口。

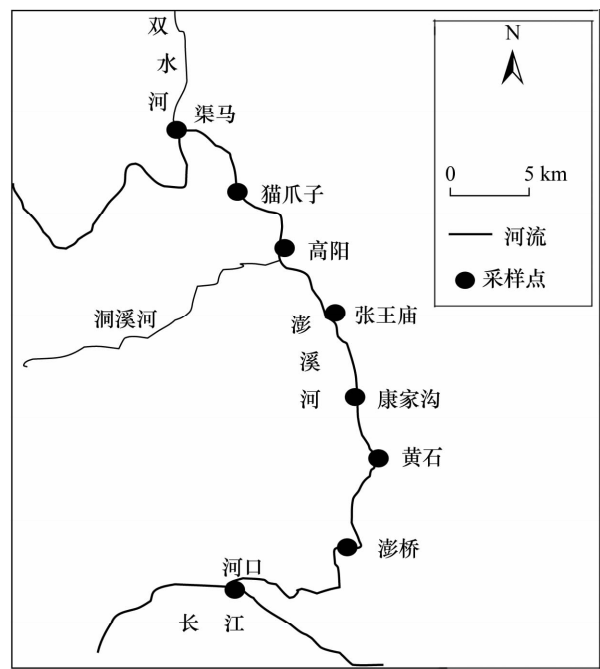


图 1 澎溪河采样点
Fig. 1 Sampling sites of Pengxi River

1.2 土壤中重金属总量测定和形态分析

土壤中重金属总量采用氢氟酸-高氯酸-硝酸消解提取。原子吸收光谱法测定 Pb、Cu、Cr、Cd、Zn 和 Ni 的含量。土壤中重金属分级提取采用欧共体参比司 (European Community Bureau of Reference, BCR) 的三步连续提取程序^[13],具体步骤如下。

(1)酸提取态(可交换态和碳酸盐结合态):称取土壤样品 1.00 g 于离心管中,加入 40 mL 0.11 mol/L 醋酸,20℃振荡 16 h,在 3000 r/min 条件下离心 10 min,过滤。

(2)可还原态(铁锰氧化物结合态):向步骤

(1)的残渣中加入 40 mL 0.50 mol/L 盐酸羟胺 + 0.05 mol/L 硝酸,20℃下振荡 16 h,在 3000 r/min 条件下离心 10 min,过滤。

(3)可氧化态(有机物及硫化物结合态):向步骤(2)的残渣中加入 10 mL 过氧化氢,在 20℃放置 1 h 后,加热至 85℃(1 h),再加入 10 mL 过氧化氢,继续在 85℃下加热 1 h,之后加入 50 mL 的 1 mol/L 醋酸铵(pH=2)振荡 16 h,在 3000 r/min 条件下离心 10 min,过滤。

(4)残渣态:以总量与以上三种可提取态总和的差值计算。

质量控制:在分析土壤样品时,采用相同的分析程序分析空白样品、平行样品以及标准物质 GBW07406 控制样品分析的准确度,测定结果在标准物质的参考值范围之内,样品的回收率在 90% ~ 105% 之间。

1.3 重金属污染评价方法

使用地质累积指数 (Index of Geoaccumulation, 简称 I_{geo}) 评价澎溪河土壤重金属污染程度。地质累积指数是评价重金属污染程度使用较广泛的方法,它不仅考虑了人为污染因素,而且充分考虑了自然地质过程造成的背景值的影响。 I_{geo} 的计算公式为^[14]:

$$I_{geo} = \log_2 (C_i / 1.5 B_i)$$

式中: C_i 为重金属 i 在土壤中的实测浓度; B_i 为重金属 i 的环境背景值。

地质累积指数法将重金属污染程度分为 7 级: $I_{geo} < 0$,污染级别为 0 级,表示无污染; $0 \leq I_{geo} < 1$,污染级别为 1 级,表示无污染到中度污染; $1 \leq I_{geo} < 2$,污染级别为 2 级,表示中度污染; $2 \leq I_{geo} < 3$,污染级别为 3 级,表示中度污染到强污染; $3 \leq I_{geo} < 4$,污染级别为 4 级,表示强污染; $4 \leq I_{geo} < 5$,污染级别为 5 级,表示强污染到极强度污染; $I_{geo} \geq 5$,污染级别为 6 级,表示极强污染。根据重金属检测结果计算 I_{geo} 值及其等级,本文所采用的背景值为三峡库区土壤重金属的背景值(2008)^[15]:Pb 为 23.88 mg/kg, Cu 为 25.0 mg/kg, Cr 为 78.03 mg/kg, Cd 为 0.134 mg/kg, Zn 为 69.88 mg/kg, Ni 为 29.47 mg/kg。

土壤中重金属的形态风险评价方法采用风险评价准则(RAC)^[16]。由于可交换态和碳酸盐结合态重金属与土壤结合力较弱,其生态风险较大,该评价准则将可交换态和碳酸盐结合态重金属视为有效部分,通过计算这两部分重金属在总量中的比例来评价重金属的有效性,进而评价其生态环境风险。有

效性越高,重金属环境风险性越大,反之亦然。风险评价准则根据可交换态和碳酸盐结合态所占百分数,将土壤中的重金属分为 5 个等级:无风险, $RAC < 1$;低风险, $1 \leq RAC \leq 10$;中等风险, $10 < RAC \leq 30$;高风险, $30 < RAC \leq 50$;非常高风险, $50 < RAC$ 。

2 结果与讨论

2.1 澎溪河土壤中重金属含量特征

澎溪河流域消落带土壤和沿岸土壤中重金属测试结果列于表 1,同时采用 GB15618—1995《土壤环境质量标准》以及文献报道的三峡库区长江干流消落带土壤中重金属含量、重庆地区土壤中重金属含量进行对比分析。

从表 1 可看出,澎溪河消落带土壤中 Pb、Cu、Cr、Cd、Zn 和 Ni 平均值分别为 68.70、36.96、55.10、0.68、108.26 和 31.68 mg/kg。对比消落带沿岸土壤,消落带土壤中的重金属含量有不同程度升高,表现出由沿岸向消落带沉积富集的趋势。Pb、Cu、Cr、Cd、Zn 和 Ni 平均增长 6.61%、36.00%、28.05%、34.01%、25.00% 和 22.76%,其中 Cu 和 Cd 增长最为明显。消落带是水域与陆地的过渡地带,受到来自水体和陆地污染源的双重影响。在汛期,消落带土壤大面积出露,在澎溪河消落带土壤上农业耕作频繁,农药、化肥使用量较大,农业面源污染带来重金属污染物,同时由于澎溪河消落带土层较薄,坡度较大,水土流失、土壤侵蚀也会导致重金属由库岸向消落带迁移^[9]。汛期过后澎溪河水位大幅抬升,消落带土壤再次被淹没,此时消落带土壤又会受到水域污染源的影响,水

体中污染物的吸附、悬浮微粒进入土壤孔隙均会带来淹没土壤中重金属含量的增高。

对比土壤环境质量标准,澎溪河沿岸土壤和消落带土壤中 Cd 污染较大,达到了 GB15618—1995《土壤环境质量标准》Ⅲ级标准值,Pb、Cu、Zn 均达到Ⅱ级标准值,Cr 和 Ni 达到Ⅰ级标准值。对比长江干流消落带土壤重金属含量分布,澎溪河消落带土壤和沿岸土壤中 Cd 和 Pb 含量普遍高于长江干流土壤,远高于重庆地区土壤中 Cd 和 Pb 含量^[17]。可见,澎溪河流域 Cd 和 Pb 污染较为突出,特别是 Cd 显著高于《土壤环境质量标准》Ⅱ级标准值,其潜在生态风险需引起足够重视。

2.2 澎溪河土壤中重金属污染程度

根据澎溪河土壤重金属检测结果(表 1)计算各重金属的 I_{geo} 值及等级,计算结果列于表 2。

消落带土壤中 Pb、Cu、Cr、Cd、Zn、Ni 的 I_{geo} 值分别为 0.53 ~ 1.22、-0.61 ~ 0.45、-1.65 ~ -0.68、1.44 ~ 2.21、-0.22 ~ 0.28、-0.61 ~ -0.34,它们的 I_{geo} 平均值分别为 0.92、-0.05、-1.11、1.74、0.04、-0.48。对比沿岸土壤中 Pb、Cu、Cr、Cd、Zn、Ni 的 I_{geo} 平均值 0.82、-0.52、-1.48、1.33、-0.28、-0.78,可见,澎溪河消落带土壤的重金属污染程度有所增长。其中 Cd 的污染最为严重,总体呈现中度污染等级,其次是 Pb,为无污染到中度污染;Cu 和 Zn 除部分采样点为无污染到中度污染外,其余为无污染;所有采样点的 Cr 和 Ni 为无污染等级。总体来看,重金属污染程度大小依次为: Cd > Pb > Zn > Cu > Ni > Cr。

表 1 澎溪河流域土壤中重金属的平均含量

Table 1 Average content of heavy metals in soils of Pengxi river

采样区域	项目	Pb	Cu	Cr	Cd	Zn	Ni
消落带沿岸土壤	含量范围(mg/kg)	45.00 ~ 82.51	16.74 ~ 37.57	30.57 ~ 55.01	0.42 ~ 0.57	73.85 ~ 101.11	21.93 ~ 29.69
	含量均值(mg/kg)	64.44	27.18	43.03	0.51	86.61	25.81
	标准差(mg/kg)	13.20	7.84	9.60	0.05	8.64	2.24
	变异系数	20.48	28.83	22.30	10.33	9.97	8.70
消落带土壤	含量范围(mg/kg)	51.61 ~ 83.16	24.49 ~ 51.12	37.19 ~ 72.82	0.55 ~ 0.93	89.81 ~ 127.51	28.79 ~ 35.02
	含量均值(mg/kg)	68.70	36.96	55.10	0.68	108.26	31.68
	标准差(mg/kg)	11.76	8.19	10.63	0.13	12.10	2.58
	变异系数	17.12	22.16	19.30	19.66	11.18	8.14
土壤环境质量标准	Ⅰ级(mg/kg)	35	35	90	0.2	100	40
	Ⅱ级(mg/kg)	300	100	200	0.3	250	50
	Ⅲ级(mg/kg)	500	400	300	1	500	200
重庆地区土壤 ^[17]	背景值(mg/kg)	28.2	24.5	76.7	0.269	90.7	34.8
三峡库区消落带土壤 ^[8]	背景值(mg/kg)	42.89	35.70	44.72	0.49	88.09	—

表2 土壤中重金属地质累积指数(I_{geo})评价特征值
Table 2 Geo-accumulation index (I_{geo}) of heavy metals in soils

采样点	Pb		Cu		Cr		Cd		Zn		Ni	
	沿岸	消落带	沿岸	消落带	沿岸	消落带	沿岸	消落带	沿岸	消落带	沿岸	消落带
渠马	0.88	0.98	-0.10	0.45	-1.56	-1.22	1.16	1.65	-0.33	0.13	-0.57	-0.34
猫爪子	1.18	1.22	-0.06	0.23	-1.13	-0.93	1.50	2.21	-0.43	0.21	-0.74	-0.35
高阳	0.33	0.53	-1.16	-0.61	-1.94	-0.68	1.30	2.07	-0.51	0.28	-0.82	-0.51
张王庙	1.20	1.21	-0.72	0.03	-1.44	-1.65	1.31	1.54	-0.30	-0.22	-1.01	-0.61
康家沟	0.66	0.74	0.00	0.01	-1.80	-1.00	1.40	1.44	-0.05	0.05	-0.80	-0.52
黄石	0.60	0.68	-0.79	-0.32	-1.70	-1.26	1.07	1.59	-0.10	-0.01	-0.84	-0.57
彭桥	0.99	1.10	-0.60	-0.19	-1.16	-1.20	1.47	1.80	-0.23	0.02	-0.69	-0.37
河口	0.71	0.91	-0.71	-0.02	-1.09	-0.95	1.45	1.65	-0.30	-0.17	-0.78	-0.62
I_{geo} 平均值	0.82	0.92	-0.52	-0.05	-1.48	-1.11	1.33	1.74	-0.28	0.04	-0.78	-0.48

2.3 澎溪河土壤中重金属形态分布特征

重金属在土壤中的含量虽然能反映其污染状况,但重金属在土壤中的生物可利用性和生态毒性主要取决于其赋存形态^[18],如 BCR 分级提取法中残渣态重金属存在于矿物晶格中,性质最为稳定,一般认为不具有生物可利用性,生态风险最小,而非残渣态重金属与土壤结合较弱,最易释放,其生态风险大^[9],对土壤中重金属的形态研究具有重要意义。

澎溪河土壤中重金属形态分布特征如图 2 所示。可见,消落带土壤中 Pb 的形态主要以残渣态为主,其平均含量达 55.29%,其次为可还原态,平均含量为 28.99%。Cu 主要以残渣态存在,其平均含量达到 63.44%,其次为可氧化态,平均含量为 17.61%。土壤中 Cr 和 Ni 形态较为稳定,Cr 残渣态平均含量达到 83.05%,Ni 残渣态平均含量为 82.71%。Zn 以残渣态和可还原态为主,平均含量分别达到 54.69% 和 23.44%。Cd 主要以可还原态为主,其平均含量为 44.99%,此外生态风险最高的酸提取态平均含量达到 28.08%,残渣态含量较低,处于 9.57%~16.24% 之间,平均值为 12.85%。

非残渣态重金属对环境条件较为敏感,生态风险性较大。其中酸提取态金属主要以可交换态和碳酸盐结合态为主,碳酸盐结合态重金属对 pH 值较为敏感,在较低 pH 值条件下容易释放^[19]。而可还原态金属主要结合于铁锰氧化物,对氧化还原电位条件敏感,在还原条件下不稳定^[20],可氧化态金属主要结合于有机物和硫化物,有机物受氧化分解容易释放出重金属^[21]。总体来看,土壤中 Cd 主要以非残渣态存在,形态最不稳定,呈现出较大的生物可利用性,而 Cr 和 Ni 形态最为稳定。

2.4 澎溪河消落带土壤中重金属形态变化特征

如前文所述,相比于沿岸对照土壤,消落带形成

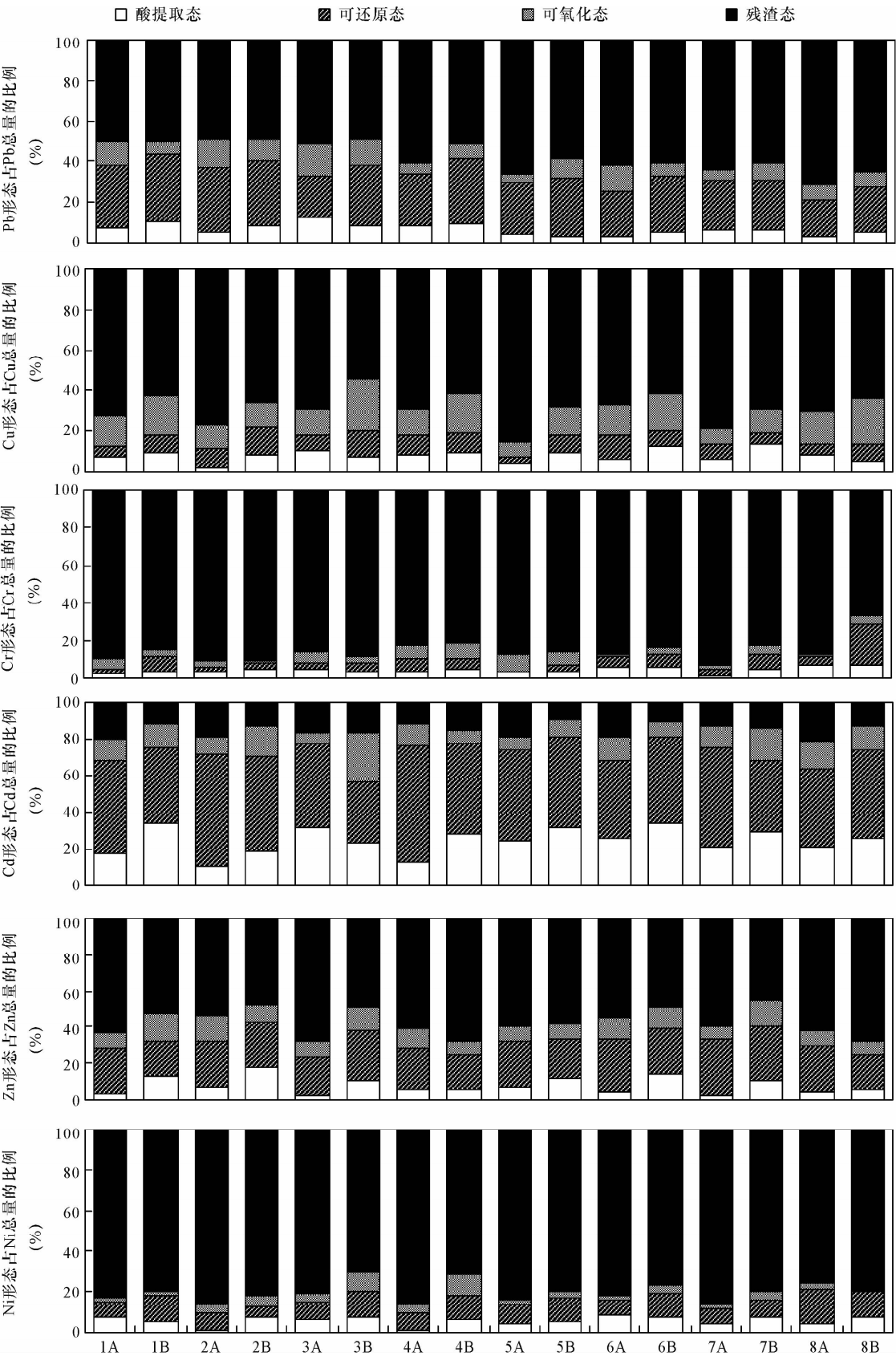
后,消落带土壤中重金属含量有不同程度的升高。为进一步分析重金属增量部分的形态组成及其来源,以消落带沿岸土壤为对照,计算消落带土壤各形态金属的变化值及总量增加值,并分析各形态金属变化值在总量增加值中的占比,即为消落带土壤中重金属各形态成分对总量增量的贡献值,见表 3。

表3 消落带土壤中重金属各形态对其总量增量的贡献值
Table 3 The contribution of different fractions to the increased amount of heavy metals in WFLZ soils

形态	重金属各形态对其总量增量的贡献值(%)					
	Pb	Cu	Cr	Cd	Zn	Ni
酸提取态	23.07	18.17	7.15	47.53	34.75	15.12
可还原态	82.06	16.19	22.00	24.42	16.78	22.56
可氧化态	-3.52	31.95	5.60	27.98	16.00	10.33
残渣态	-1.62	33.69	65.25	0.08	32.48	51.99

注:表中的负值表示此形态金属相对对照是减少的。

由表 3 可知,对 Pb 而言,可还原态增长最为显著,对总量增长贡献值为 82.06%。对 Cu 而言,残渣态和可氧化态 Cu 含量增长幅度最大,对总量增长的贡献分别达到 33.69% 和 31.95%。Cr 和 Ni 残渣态增量贡献最大,分别达到 62.25% 和 51.99%。Cd 和 Zn 酸提取态增量较大,对总量变化贡献值分别达到 47.53% 和 34.75%。由此可见,各形态对不同金属元素总量增长的贡献值各异。通常人类活动带来的重金属主要赋存于非残渣态,结合力弱,而自然来源的重金属主要存在于残渣态^[16]。可见,尽管消落带土壤中的 Pb、Cu、Cr、Cd、Zn 和 Ni 总量均呈增高趋势,但是其增量来源却存在差异。由于 Cr 和 Ni 的增量部分主要为残渣态,结合地质累积指数分析的结论,Cr 和 Ni 属无污染级别,不具有人为污染源来源特征,推测消落带形成后土壤中的 Cr 和 Ni



1~8 分别代表渠马至河口 8 个采样点;A 代表消落带沿岸土壤;B 代表消落带土壤。

图 2 土壤中重金属形态特征

Fig. 2 Chemical forms of heavy metals in soils

含量的升高其来源主要为矿石风化、水土流失等自然源,而 Cd、Pb、Zn 的增量部分主要是非残渣态,表明其来源主要是人为污染源。三峡库区腹地澎溪河、大宁河、梅溪河等流域非点源污染较重,污染负荷产出量在库区全流域中占比最高^[22-23]。澎溪河流域非点源污染与土地资源利用密切相关,消落带面积广阔,为了加强对土地资源的利用,通常在消落带土壤出露后用于农业耕作,而澎溪河流域土壤主要为砂质土壤,土壤较为贫瘠,农业生产中化肥、农药使用量较大,由此造成过多的重金属输入,加大了澎溪河流域土壤的重金属污染。

2.5 澎溪河土壤中重金属生态风险评价

可交换态和碳酸盐结合态重金属属于弱吸附态成分,其生物可利用性高,受环境因素的影响易于释放到环境中,导致潜在的生态风险。根据风险评价准则(RAC)评估可交换态和碳酸盐结合态含量,计算土壤中重金属的 RAC 值。对比于消落带沿岸土壤,消落带土壤中重金属的形态稳定性有下降趋势,其中 Pb、Cu 和 Zn 的 RAC 平均值分别为 6.20%、6.80% 和 5.45%,大多数处于低风险,部分处于中等风险。Cr 和 Ni 的 RAC 值均在 10% 以下,所有采样点的 Cr 和 Ni 处于低风险级别,形态稳定性最好。Cd 的 RAC 值处于 11.00% ~ 31.61% 之间,平均值为 20.62%,部分处于高风险级别,大多数采样点的 Cd 处于中等风险级别,这表明消落带土壤中 Cd 的形态稳定性较差。同时可交换态和碳酸盐结合态 Cd 的平均含量为 0.19 mg/kg,绝对含量虽低于 GB15618—1995《土壤环境质量标准》的 I 级标准值,但由于 Cd 总量较高,且金属形态在环境因素影响下可发生转化,因此 Cd 的潜在环境风险较大。

3 结论

通过对三峡库区消落带面积最大的澎溪河流域开展土壤的重金属分布及变化趋势研究,结果表明干湿交替运行对消落带土壤中重金属的迁移转化具有显著影响,消落带中污染物的沉积富集导致消落带中土壤重金属含量呈增长趋势。消落带土壤中的 Cd 污染较重,显著超过《土壤环境质量标准》II 级标准值,总体上呈现中度污染等级;Pb 为无污染到中度污染等级;Cu、Cr、Zn 和 Ni 多为无污染等级。且 Cd 形态稳定性较差,非残渣态含量较高,表明人为输入较大,受环境条件变化释放溶出风险也较大。因此,消落带土壤中重金属 Cd 污染需引起足够重视。

当前澎溪河流域消落带坡耕地开垦幅度大,农业生产频繁,农业非点源污染成为土壤中重金属的重要来源。为有效控制流域内重金属污染状况,应趋利避害,合理开发和利用消落带土地资源,加大澎溪河流域污染的防控,以逐步实现澎溪河流域生态环境的改善。

4 参考文献

- [1] Soodana R K, Pakadeb Y B, Nagpala A, et al. Analytical Techniques for Estimation of Heavy Metals in Soil Ecosystem: A Tabulated Review[J]. Talanta, 2014, 125: 405 - 410.
- [2] Shao X X, Huang B, Zhao Y C, et al. Impacts of Human Activities and Sampling Strategies on Soil Heavy Metal Distribution in a Rapidly Developing Region of China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 104: 1 - 8.
- [3] Yao Z, Li J H, Xie H H, et al. Review on Remediation Technologies of Soil Contaminated by Heavy Metals[J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, 16: 722 - 729.
- [4] Bao Y H, Gao P, He X B. The Water-Level Fluctuation Zone of Three Gorges Reservoir—A Unique Geomorphological Unit[J]. Earth-Science Reviews, 2015, 150: 14 - 24.
- [5] 王图锦, 胡学斌, 吉芳英, 等. 三峡库区淹没区土壤重金属形态分布及其对水质影响[J]. 环境科学研究, 2010, 23(2): 158 - 164.
Wang T J, Hu X B, Ji F Y, et al. Chemical Fraction Composition Characteristics of Heavy Metals in Submerged Soil of Three Gorges Reservoir Area and Effect on Water Quality[J]. Research of Environmental Sciences, 2010, 23(2): 158 - 164.
- [6] 曹琳, 吉芳英. 三峡库区消落带干湿交替表层沉积物磷分布特征[J]. 地球与环境, 2013, 41(2): 126 - 131.
Cao L, Ji F Y. Phosphorus Distribution Characteristics in Dry-Wet Alteration Sediment of Fluctuation Zone in Three Gorges Reservoir Area[J]. Earth and Environment, 2013, 41(2): 126 - 131.
- [7] 朱宏伟, 贺秀斌, 胡云华, 等. 三峡库区消落带土壤磁性变化规律及成因探讨[J]. 现代地质, 2014, 28(4): 859 - 866.
Zhu H W, He X B, Hu Y H, et al. Discussion of Characteristics and Origin of Soil Magnetism Changes in the Three-Gorge Reservoir Riparian Zone [J]. Geoscience, 2014, 28(4): 859 - 866.
- [8] Chen Y, 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: 366 - 372.

- [9] 胥焘,王飞,郭强,等. 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[J]. 环境科学, 2014,305(4):1502–1508.
- Xu T, Wang F, Guo Q, et al. Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area [J]. Environmental Science, 2014,305(4):1502–1508.
- [10] 张成,陈宏,孙荣国,等. 三峡水库消落带不同水位高程土壤汞风险评价[J]. 水土保持学报,2014,28(1):242–252.
- Zhang C, Chen H, Sun R G, et al. Risk Assessment of Mercury in Soil at Different Water-Level Altitudes in Drawdown Areas of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,28(1):242–252.
- [11] 余杨,王雨春,周怀东,等. 三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究[J]. 环境科学,2013,34(10):3847–3853.
- Yu Y, Wang Y C, Zhou H D, et al. Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir during Initial Impoundment [J]. Environmental Science, 2013, 34(10):3847–3853.
- [12] 张晨光,徐德星,张乃明,等. 大宁河回水区消落带土壤磷释放动力学研究[J]. 土壤通报,2011,42(5):1159–1164.
- Zhang C G, Xu D X, Zhang N M, et al. Phosphorus Release Kinetics of the Soils from the Backwater-Fluctuating Zones of Daning River[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011,42(5):1159–1164.
- [13] 许超,夏北成,吴海宁,等. 酸性矿山废水污灌区水稻土重金属的形态分布及生物有效性[J]. 环境科学, 2009,30(3):900–906.
- Xu C, Xia B C, Wu H N, et al. Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Paddy Soil Irrigated by Acid Mine Drainage[J]. Environmental Science, 2009, 30(3):900–906.
- [14] Forstner U. Sediments and Environmental Geochemistry: Selected Aspects and Case Histories [M]. Berlin Heidelberg:Springer-Verlag, 1990:311–338.
- [15] 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.
- Tang J, Zhong Y P, Wang L. Background Value of Soil Heavy Metal in the Three Gorges Reservoir District[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(4):848–852.
- [16] Saleem M, Iqbal J, Shah M H. Geochemical Speciation, Anthropogenic Contamination, Risk Assessment and Source Identification of Selected Metals in Freshwater Sediments—A Case Study from Mangla Lake, Pakistan [J]. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 2015,4:27–36.
- [17] Chen H Y, Teng Y G, Lu S J, et al. Contamination Features and Health Risk of Soil Heavy Metals in China [J]. Science of the Total Environment, 2015,512–513:143–153.
- [18] Zhao S, Feng C H, Wang D X, et al. Salinity Increases the Mobility of Cd, Cu, Mn, and Pb in the Sediments of Yangtze Estuary: Relative Role of Sediments' Properties and Metal Speciation[J]. Chemosphere, 2013,91:977–984.
- [19] Yang Z F, Wang Y, Shen Z Y, et al. Distribution and Speciation of Heavy Metals in Sediments from the Mainstream, Tributaries, and Lakes of the Yangtze River Catchment of Wuhan, China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009,166:1186–1194.
- [20] Wei X, Han L F, Gao B, et al. Distribution, Bioavailability, and Potential Risk Assessment of the Metals in Tributary Sediments of Three Gorges Reservoir: The Impact of Water Impoundment [J]. Ecological Indicators, 2016,61:667–675.
- [21] 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.
- Zhong X L, Zhou S L, Huang M L, et al. Chemical Form Distribution Characteristics of Soil Heavy Metals and Its Influencing Factors [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009,18(4):1266–1273.
- [22] 陈媛,郭秀锐,程水源,等. 基于 SWAT 模型的三峡库区流域污染物来源分析及重点控制区域识别[J]. 北京工业大学学报,2013,39(5):761–768.
- Chen Y, Guo X R, Cheng S Y, et al. Pollutant Source Analysis and Identification of Prior Control Areas in Three Gorges Reservoir Based on SWAT Model [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(5):761–768.
- [23] 高银超,鲍玉海,唐强,等. 基于 AnnAGNPS 模型的三峡库区小江流域非点源污染负荷评价[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(1):119–126.
- Gao Y C, Bao Y H, Tang Q, et al. Applying AnnAGNPS to Estimate Non-point Pollution Loading from Xiao Jiang Basin in the Three Gorges Reservoir Region [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(1):119–126.

Speciation and Translocation Characteristics of Soil Heavy Metals in the Water Level Fluctuating Zone of Pengxi River in Three Gorges Reservoir Area

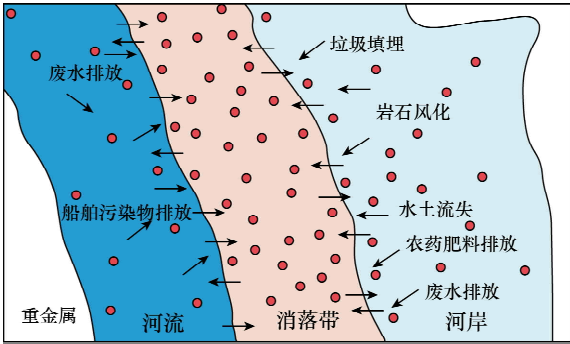
WANG Tu-jin, PAN Jin, LIU Xue-lian
(School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Highlights

- Heavy metals gradually transferred to the soils of the water level fluctuating zone and accumulated in the Three Gorge Reservoir area.
- The soil was mainly contaminated with Cd and Pb.
- Cd has the poorest morphological stability and was mainly found in the reducible and acid extractable fraction, demonstrating potential environmental pollution.

Abstract: The water level fluctuating zone (WLFZ) is a transition belt between the water area and the terrestrial habitat that plays an indispensable role in the water environment. Pengxi River basin with the largest WLFZ area was chosen as the study area. The soils in the WLFZ and the coastal soil samples were collected to analyze the speciation characteristics of heavy metals. Besides, we have evaluated the pollution degree of such metal contaminants as well as the levels of the potential ecological risks with the methods of geo-accumulation index and the risk assessment code (RAC). The average contents of Pb, Cu, Cr, Cd, Zn and Ni in the soils of WLFZ were 68.70, 36.96, 55.10, 0.68, 108.26 and 31.68 mg/kg, respectively. The pollution degree is in the order of Cd > Pb > Zn > Cu > Ni > Cr, among which Cd and Pb pollution were prominent, generally higher than that in soils of mainstream of the Yangtze River and much higher than that in soils of Chongqing area. The RAC value of Cd was 20.62%, showed moderate pollution, and was mainly found in exchangeable and carbonates fraction. The RAC value of Pb, Cu, Cr, Zn and Ni were 5.45% – 10.0%, showed low pollution, and were mainly found in residual fraction, accounting for 54.69% – 83.05% in the total amount. Compared with the coastal soils, the content of heavy metals was increased in WLFZ soil, but the increased amount of each heavy metal was different. According to fractionation studies, residual fraction was the main part of the increased Cr and Ni. Nevertheless, the main part of the increased Cd, Pb and Zn were found in non-residual fractions. The results of our investigation indicated that under the effect of the terrestrial and aquatic pollution sources, the heavy metals contaminants in the Pengxi River basin were translocated from the coastal soil to the WLFZ, then deposited and enriched.

Key words: water-level-fluctuating zone; soils; heavy metals; geo-accumulation index; ecological risk assessment



本文引用格式: 王图锦, 潘瑾, 刘雪莲. 三峡库区澎溪河消落带土壤中重金属形态分布与迁移特征研究 [J]. 岩矿测试, 2016, 35(4): 425 – 432.
WANG Tu-jin, PAN Jin, LIU Xue-lian. Speciation and Translocation Characteristics of Soil Heavy Metals in the Water Level Fluctuating Zone of Pengxi River in Three Gorges Reservoir Area [J]. Rock and Mineral Analysis, 2016, 35(4): 425 – 432. DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.2016.04.015.