

文章编号:1672-3031(2019)02-0152-08

## 三峡库区消落带土壤金属污染特征的研究进展

李艳艳<sup>1,2</sup>, 徐东显<sup>2</sup>, 高丽<sup>2</sup>, 高博<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电大学 地球科学与工程学院, 河南 郑州 450046;

2. 中国水利水电科学研究院 水环境研究所, 北京 100038)

**摘要:** 三峡库区蓄水后的生态环境问题受到人们和政府的高度重视, 库区消落带是水库生态环境的重要组成部分。近年来, 针对库区消落带土壤金属环境问题, 国内外相关学者开展了大量的研究工作。基于近十年相关研究成果, 本文对三峡库区消落带土壤金属含量、时空分布特征及生态环境风险进行了梳理、归纳和分析。结果表明, 三峡库区消落带土壤金属含量总体呈现库区上游及下游较高, 库区中游较低的空间格局, 不同水位高程不同土壤层中各金属元素的分布特征存在一定差异。与蓄水前期相比, 库区消落带土壤金属含量随干湿交替周期的增加呈现动态变化, 且存在向江水中迁移的环境风险。由土壤环境质量评价结果可知, 研究区域土壤总体上为二类土, 处于轻度污染等级, 存在轻微生态风险, 主要风险元素为Cd, 其次为As和Hg, 但目前其含量并未影响人体生命健康。针对库区消落带的研究现状, 本文提出今后相关研究的着眼方向, 以期对三峡库区消落带土壤重金属污染防控及库区水生态环境保护提供参考。

**关键词:** 三峡库区; 消落带; 土壤; 金属污染; 环境风险; 综述

**中图分类号:** X53

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.2019.02.010

### 1 研究背景

截止目前, 长江三峡工程是世界上最大的水利枢纽工程, 于2009年全部竣工, 工程建成后形成总面积达1084 km<sup>2</sup>的特大型水库<sup>[1]</sup>, 为中国重要的战略性水资源之一。库区位于北纬28°32′—31°44′, 东经105°44′—111°39′, 范围涉及湖北省及重庆市的21个县市, 淹没陆地面积达632 km<sup>2</sup>。三峡水库初期蓄水位为156 m, 于2010年10月, 首次实现175 m正常蓄水位目标, 总库容达393亿m<sup>3</sup>。作为特大型年调节水库, 三峡水库采用“蓄清排洪”的调度方式, 在丰水期(6月—9月)以145 m防洪限制水位运行, 而于枯水期保持正常蓄水水位运行<sup>[2-3]</sup>。正是由于三峡水库独特的反季节水位调度运行方式, 在145~175 m水位高程涨落间, 形成垂直距离30 m, 绵延662 km, 面积达350 km<sup>2</sup>的库区消落带<sup>[4-5]</sup>, 三峡库区及消落带范围如图1所示。

作为库区陆地生态系统与水环境生态系统的重要交错地带, 三峡库区消落带在维持水库的正常运行寿命中肩负着举足轻重的作用, 同时也是人类活动影响最为频繁的区域, 遭受到多重外界影响因素的干扰, Bao等<sup>[6]</sup>2015年的研究中将其定义为“三峡库区扰动带”。前期研究表明, 工业排放、船只航运、污水排放、农药化肥的施用等人类活动已引起三峡库区生态环境中金属含量的变化<sup>[7-8]</sup>。作为一类重要污染物, 重金属因极难被生物降解的特性, 可经食物链富集作用进入生物及人体体内, 从而对其生命健康产生不同程度的影响<sup>[9-10]</sup>, 因此, 三峡库区重金属生态环境问题近年来广受关注<sup>[11-12]</sup>。对于消落带来说, 由于周期性的蓄水淹没、冲刷及沉积作用, 消落区土壤将成为水库金属污染物的汇或源<sup>[13]</sup>。汛期水库低水位运行, 因水力冲刷、土壤侵蚀、水土流失等途径所携带泥沙中赋存的金属, 以及面源污染、生产生活污水、季节性降雨沉降等方式带来的金属污染物, 将通过吸附、沉积等作用在消落区土壤中淤积<sup>[14]</sup>, 可进而被农作物吸收, 这将直接关系到长江

收稿日期: 2018-11-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41773143); 中国水科院基本科研业务费项目(WE0145B662017)

作者简介: 李艳艳(1994-), 硕士生, 主要从事流域水环境监测与评价研究。E-mail: lyy2018\_ts@163.com

通讯作者: 高博(1978-), 博士, 高级工程师, 主要从事湖库污染物水环境过程及效应研究。E-mail: gaobo@iwhr.com

沿岸居民的粮食安全。此外,水库枯水期高水位运行时,消落带土壤中蓄积的污染物将经浸泡、水力作用,通过溶解、交换、扩散等途径迁移到水环境当中<sup>[13-14]</sup>,给库区水资源带来安全隐患,同时也会影响供水市县居民的用水安全及其水库沿岸的生态环境,因此库区消落带土壤金属环境风险研究具有重大现实意义。

自三峡工程筹建兴修之日起,随之而带来的生态环境问题始终倍受争议。近年来,三峡水库生态环境已引起国家和当地政府的高度重视,而库区消落带作为人类活动影响较为频繁的区域,已成为当下相关学者开展研究的热点领域,诸多学者相继对该区域内土壤金属环境问题展开探索性研究工作。本文通过检索、收集、整理相关文献,总结了近十年来相关研究成果,针对库区消落带土壤中金属元素的含量、时空分布特征、生态环境风险,对三峡库区消落带土壤金属污染特征及研究现状进行梳理和总结,最后对目前研究存在的欠缺与不足进行分析,并提出今后库区消落带土壤金属研究需要关注的科学问题。本文旨在明晰三峡库区消落带土壤金属污染特征,对其有更加深入的剖析,以期今后三峡水库消落区金属污染物研究提供科学依据,并为消落带土壤金属污染防控和库区水生态环境保护提供参考。

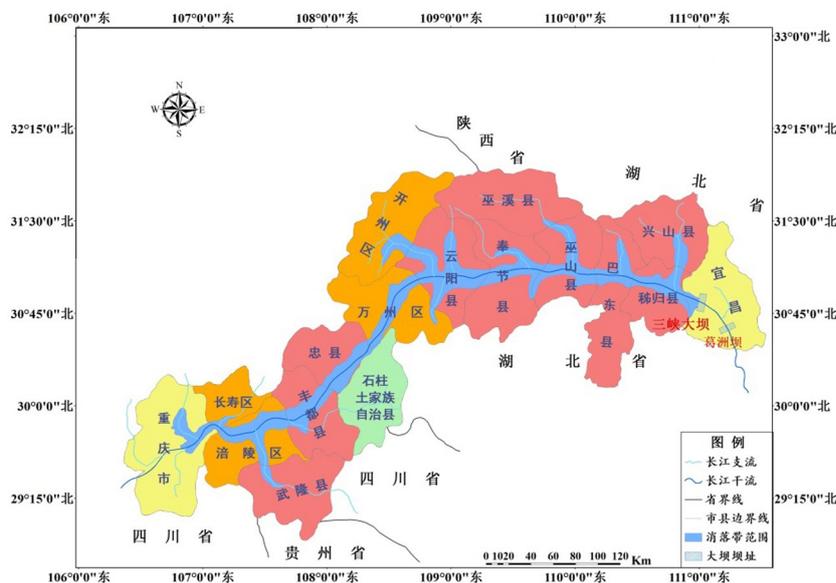


图1 三峡库区及消落带淹没范围

## 2 三峡库区消落带土壤重金属污染分布特征研究

近年来,诸多学者在库区消落带金属污染领域展开逐步深入研究,通过对2008—2018年近十年来相关研究成果的梳理发现,研究范围包括巴南至丰都段(库区上游),忠县至云阳段(库区中游)及奉节至秭归段(库区下游),研究多以重庆段消落带为主,锌(Zn)、铜(Cu)、铅(Pb)、铬(Cr)、砷(As)、镉(Cd)、汞(Hg)成为倍受国内外学者关注的金属及类金属污染物。基于相关研究结论,对三峡库区消落带土壤中的金属含量及时空分布特征进行梳理总结。

### 2.1 土壤中重金属含量的空间分布特征

2.1.1 土壤中金属含量沿江分布特征 通过研究分析发现,7种重金属元素(Zn、Cu、Pb、Cr、As、Cd、Hg)在库区消落带土壤中的含量在空间分布上存在一定差异性,总体上呈现库区上游及下游较高,中游较低的空间格局<sup>[4, 13-15]</sup>(如表1所示),这一结论与水库试验性满载蓄水前期,消落带土壤金属含量调查研究<sup>[16-17]</sup>所得结果基本一致。由统计结果可知,各金属元素的平均含量依次为: Zn ( $77.69 \pm 22.94 \text{ mg/kg}$ ) > Cr ( $42.92 \pm 7.05 \text{ mg/kg}$ ) > Pb ( $35.46 \pm 8.23 \text{ mg/kg}$ ) > Cu ( $30.71 \pm 17.13 \text{ mg/kg}$ ) > As ( $21.96 \pm 6.72 \text{ mg/kg}$ ) > Cd ( $0.41 \pm 0.14 \text{ mg/kg}$ ) > Hg ( $0.08 \pm 0.02 \text{ mg/kg}$ )。此外, Cr、Hg、Pb、Zn四种元素的变异系数

均小于30%，说明这些元素的离散程度较低，而Cu的变异系数接近60%，说明其在库区消落带土壤中的空间分布相对不均匀。

进一步分析研究发现，三峡库区金属元素的空间分布特征主要是由于库区上游区域经济相对发达，受工业、农业、航运、居民生活等人类活动所排放污染物的影响较大<sup>[18-19]</sup>。大量金属污染物进入江水后，在干湿交替过程中，通过沉积、扩散、吸附等作用进入消落带土壤中<sup>[15]</sup>。云阳、奉节等地农业、畜牧业较发达<sup>[14]</sup>，而约7%的化肥及9%的农药可经地表径流、地下潜流、排水管道及渗流作用迁移至消落带区域<sup>[18]</sup>。对于库区下游而言，巫山、巴东等地区土壤的成土母质多为石灰岩，其金属自然背景值较高，消落带土壤金属含量较高可能与地质因素等自然条件有关<sup>[16]</sup>。

表1 三峡库区消落带土壤中金属含量分布

采样地点	金属含量/(mg/kg)							参考文献		
	Zn	Cu	Pb	Cr	As	Cd	Hg			
上游	巴南	128.00	75.60	53.50	/	25.80	0.62	0.08	[14]	
		130.28	75.75	53.31	40.99	25.87	0.62	0.08	[15]	
	渝北	112.19	55.79	48.86	42.48	23.05	0.48	0.08	[15]	
		121.50	51.71	49.42	56.55	22.31	0.54	0.09	[4]	
	长寿	112.00	48.60	48.50	/	20.25	0.52	0.08	[14]	
		111.07	48.76	48.65	60.20	20.20	0.52	0.08	[15]	
	涪陵	73.74	26.59	30.45	40.91	18.36	0.45	0.07	[4]	
		80.00	27.60	33.00	/	20.25	0.41	0.08	[14]	
		78.70	27.84	32.83	42.49	17.68	0.41	0.08	[15]	
	丰都	62.20	16.05	30.83	43.51	23.72	0.31	0.07	[4]	
		64.00	16.80	30.00	/	18.75	0.27	0.07	[14]	
		61.58	16.92	29.81	36.31	18.73	0.27	0.07	[15]	
中游	忠县	81.82	28.59	38.48	53.62	19.74	0.37	0.09	[4]	
		72.00	21.00	31.00	/	17.10	0.26	0.07	[14]	
		68.06	21.01	31.00	43.68	17.17	0.26	0.07	[15]	
	万州	72.72	29.46	30.52	41.76	18.62	0.23	0.12	[4]	
		72.00	19.20	26.50	/	13.65	0.22	0.09	[14]	
		69.55	19.04	26.74	38.73	13.60	0.21	0.09	[15]	
	云阳	54.84	10.98	27.67	39.23	14.74	0.30	0.04	[4]	
		56.00	11.40	28.50	/	14.40	0.33	0.08	[14]	
		58.80	11.72	29.53	40.38	15.11	0.34	0.08	[15]	
	下游	奉节	57.84	23.05	33.39	34.15	23.14	0.57	0.08	[4]
			56.00	22.20	34.50	/	23.40	0.60	0.07	[14]
			59.34	22.24	34.73	33.52	23.35	0.59	0.07	[15]
巫山		70.48	30.66	33.36	36.11	25.63	0.55	0.04	[4]	
		64.00	33.00	34.50	/	39.00	0.59	0.05	[14]	
		67.11	32.93	34.64	39.87	39.06	0.59	0.05	[15]	
巴东		68.13	35.89	30.54	47.47	31.13	0.28	0.09	[4]	
		68.99	30.25	33.65	46.35	33.13	0.32	0.08	[15]	
		59.99	18.14	30.14	38.34	21.78	0.29	0.06	[15]	
秭归		77.69	30.71	35.46	42.92	21.96	0.41	0.08	本研究	
		22.94	17.13	8.23	7.05	6.72	0.14	0.02	本研究	
		29.53%	55.79%	23.21%	16.42%	30.59%	34.28%	21.41%	本研究	

2.1.2 不同高程及土壤层中金属含量特征 三峡水库于2008年开始首次175 m试验性蓄水，此时，库区消落带并未完全形成。研究发现，在此期间库区沿江消落带土壤内的Zn、Cu、Pb、As、Cd含量

在 145 m 水位高程相对较高<sup>[14,20]</sup>，而 Hg 呈现随高程增加含量逐渐降低的分布特征<sup>[21]</sup>。然而，针对人为扰动影响较大的地区，其金属含量分布特征有所差异<sup>[4]</sup>。此外，针对库区消落带典型区域，不同地区不同水位高程土壤中金属元素的分布特征有所不同。储立民等<sup>[22]</sup>研究发现忠县一带消落区土壤中金属含量在 145m 水位高程处最高；而 2010 年<sup>[23]</sup>非参数检验结果表明，水位高程对金属在土壤中的含量并无显著影响。此外，王晓阳等<sup>[24]</sup>于 2009 年通过检验分析发现，小江流域消落带不同海拔高程土壤中，Zn、Cu、Pb、Cr、Cd、Ni 的含量不存在显著差异。而后，2010 年<sup>[25]</sup>的研究结果显示，大部分金属含量随高程升高总体呈现升高趋势。

针对不同土壤层，土壤中赋存的金属含量一般随土壤层的加深呈现递减趋势，研究发现<sup>[21]</sup>库区消落带土壤中 Hg 在不同土壤层中的含量分布遵循这一规律。然而，王业春<sup>[23]</sup>，朱妮妮<sup>[26]</sup>等对忠县、巫山、秭归消落带不同土壤层的金属含量研究结果表明，在 2008—2009 年水库蓄水初期，仅个别金属元素在巫山、秭归消落带不同土壤层间存在显著差异，而至 2012 年时，巫山、秭归、忠县消落带不同土壤层中金属元素分布特征均无明显差异。

综上所述，基于不同水位高程及不同土壤层中各金属元素分布特征研究结果不尽相同，可能主要与以下 3 个因素有关：(1) 采样点位有所差别，因环境背景值的差异可能引起金属元素分布特征的不同，此外，不同的土壤性质也会对金属污染物的分布规律产生影响；(2) 淹没的时间不同，水库蓄水初期与成库后，江水涨落对消落带水位高程土壤产生的作用不同，土壤被淹没时间有所差异；(3) 研究时间尺度较短，库区消落带受干湿交替作用影响的时间有限，土壤中金属污染物分布未呈现显著规律。因此，在三峡水库消落带金属防控工作中，需探明水位高程各土壤层不同金属的分布特性，可针对不同水位高程土壤因地制宜，分别采取防控措施<sup>[24]</sup>。与此同时，上述研究结果也表明，随干湿交替循环周期的增加，金属元素的分布特征将发生改变，故应当进一步对研究区域土壤金属环境质量展开持续跟踪监测研究。

**2.2 土壤中金属含量时间变化特征** 三峡库区消落带土壤金属含量年际变化如图 2 所示。由图可知，研究区域消落带土壤在干湿交替作用下，金属含量存在动态变化。总的来讲，土壤中金属污染物总量在一定时间内呈增长趋势<sup>[15]</sup>。然而，对于 Cd 和 As 而言，在经历多次周期性水位变化后该趋势可能无法维持，而出现含量有所降低的现象<sup>[27]</sup>。2008 年以前 Cd 含量为 0.21 mg/kg<sup>[16]</sup>，2008 年至 2011 年分别为 0.40 mg/kg、0.49 mg/kg、0.35 mg/kg、0.24 mg/kg，2012 年 Cd 含量变化为 0.17 mg/kg<sup>[5,12]</sup>；对 As 而言，2008 年以前库区消落带土壤内的含量为 7.40 mg/kg<sup>[16]</sup>，2008 年增至 22.24 mg/kg<sup>[12]</sup>，而 2009 至 2012 年的含量分别为 6.59 mg/kg、7.59 mg/kg、9.49 mg/kg 及 8.61 mg/kg<sup>[5,12]</sup>。与 2008 年前相比，2012 年时 Zn、Cu、Pb、Hg 的含量均有所增加，变化程度分别为<sup>[5,12,16]</sup>：Zn(71.60 ~ 93.86 mg/kg)、Cu(23.50 ~ 46.69 mg/kg)、Pb(25.30 ~ 49.50 mg/kg)、Hg(0.06 ~ 0.15 mg/kg)(变化趋势如图 2 所示)。进一步分析发现，Zn、Cu、Pb、Hg 经周期性的干湿交替作用后，含量呈现先增加后降低再逐渐增加的趋势；而 Cd、As 在土壤中的含量先增加后逐渐降低。与之不同的是，对 Cr 而言，其 2008 年以前的含量为 79.40 mg/kg<sup>[16]</sup>，2008 年至 2012 年的含量分别为 41.99 mg/kg、44.72 mg/kg、39.85 mg/kg、45.54 mg/kg、55.02 mg/kg<sup>[5,12]</sup>，总体上则呈现先降低后逐渐增加的变化趋势。此外，Pei 等<sup>[27]</sup>在对三峡库区消落带巫山、秭归段土壤金属含量研究结果表明，2008—2015 年期间 Cd、Cu、Pb、Cr 的含量变化特征，总体上呈现出先增加后逐渐降低的变化趋势。

经文献梳理及分析结果发现，三峡库区消落带土壤中金属含量年际变化主要有以下几个原因：(1) 在消落带形成初期，河岸带植被破坏严重，受到径流冲刷及降水作用的影响造成水土流失、土壤侵蚀，可能导致金属污染物在消落带累积；(2) 库区上游工业点源和农业面源产生的金属污染物，经水位的涨落，使土壤经历周期性的干湿交替循环，污染物可能经迁移、吸附、转化等作用进入土壤孔隙中；(3) 在长期的水位涨落周期后，受土壤性质、金属元素形态转化等因素的影响，土壤中的金属污染物也可能释放到江水中，使土壤内金属含量下降，而引起水体重金属含量的波动。因此，三峡库区消落带土壤中金属含量的短期和长期监测结果会有所差别，故开展连续长序列时间尺度的跟踪监测研究更加具有科学意义。

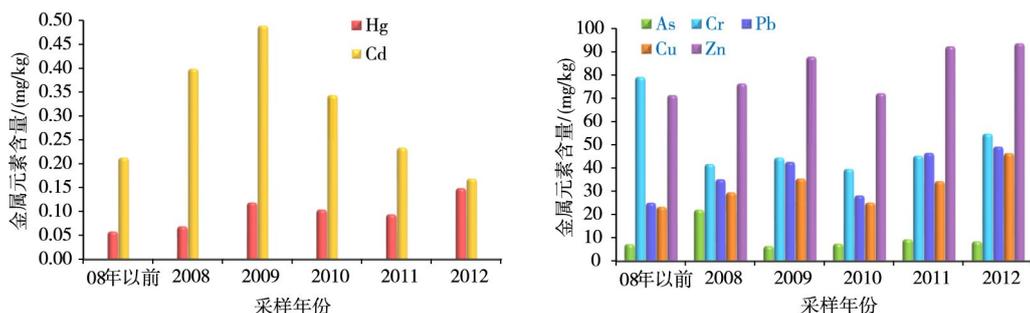


图2 三峡库区消落带土壤金属含量年际变化(2010年前数据为全库区消落带土壤金属含量监测结果<sup>[12, 16]</sup>, 2010—2012年为三峡库区忠县-万州-秭归段消落带土壤金属含量监测数据<sup>[5]</sup>)

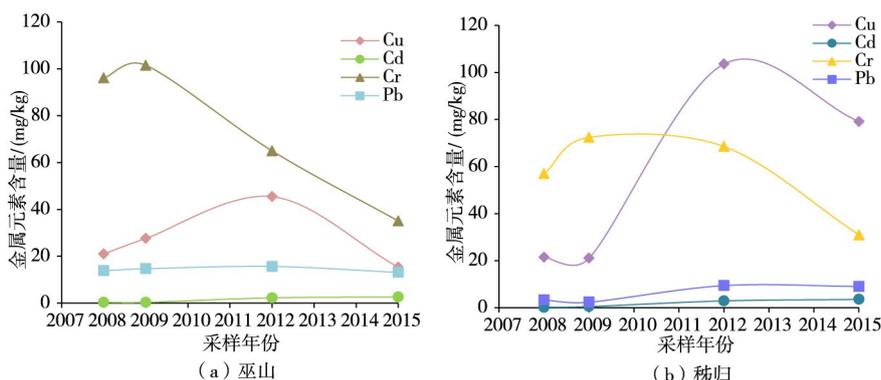


图3 库区消落带典型区域土壤金属含量年际变化

### 3 三峡库区消落带土壤金属环境风险研究

目前常用的金属污染等级评价方法主要有地积累指数法( $I_{geo}$ )、富集因子法(EF), 以及单因子指数法、内梅罗指数法等综合评价法。用于评价金属生态环境风险的主要方法有: 潜在生态风险评价法(RI)、健康风险评价法(HRA)、风险评价准则(RAC)。常用的标准主要包括土壤背景值(全国、省市、三峡库区等)和《土壤环境质量标准》标准值。基于目前的研究结果, 本文对三峡库区消落带土壤金属的环境质量及生态风险进行梳理和归纳。

**3.1 土壤金属环境质量** 由表2可以看出, 依据《土壤环境质量标准》(GB15618-1995), 库区消落带土壤中Ni、Cr为一类土标准, Cu、Pb、Zn多符合一级土壤标准, 但在上游江津、巴南、长寿等地含量较高, Hg在三峡库区消落带大部分地区土壤中符合二级标准, 可达到保障农业生产、维护人体健康的基本要求; As在消落带土壤中含量有所增加, 且在上游巴南、下游奉节至秭归段达到三类土标准, 因此As在库区消落带土壤中存在一定的富集趋势, 且已达到保障农林业生产和植物正常生长的土壤临界值, 需在今后研究中给予更多重视。

此外, 分别以国家土壤环境质量标准(GB15618-1995)规定的二级标准值、当地土壤金属背景值及页岩内金属地球化学背景值为基准值, 基于地积累指数法、富集因子评价法、单因子污染指数法及内梅罗综合指数法的评价结果可知<sup>[4, 13, 23]</sup>, 三峡库区消落带土壤金属总体上为轻度污染等级, 但存在一定的金属富集趋势, 消落带江北区、涪陵区、奉节及巫山等地区消落带土壤受到轻度或中等程度的污染, 其他地区土壤相对来说较为清洁。其中, Cd、As为该区域内的主要污染元素, Hg在消落带土壤中存在一定的富集趋势, 而Cr、Ni、Cu、Zn总体上处于无污染等级。

**3.2 土壤金属生态风险** 通过对各金属元素间进行相关性分析发现, 消落带土壤重金属间存在一定的相关性, 存在复合型污染的风险<sup>[15, 23]</sup>, 其中渝北、长寿、巴南、奉节、巫山主要为Hg、Cd、As复合污染, 而涪陵、丰都、忠县、万州、云阳、巴东、秭归地区主要受到Hg和Cd的复合污染。以三峡库区土壤金属背景值为基准值, 运用潜在生态风险评价法及风险评价准则对土壤金属的生态风险进

表2 三峡库区消落带土壤金属质量评价结果

采样时间	研究区域	金属元素	等级评定	参考文献
2008年以前	库区消落带重庆段 江津-巫山	Cu	二级,江津为三级	[17]
		Pb	二级,局部为一级	
		Zn	一级,局部为二级	
		As	一级,局部为二级	
		Ni	一级,局部为二级	
		Hg	二级,局部为三级	
		Cd	二级,奉节、巫山为三级	
2008年	库区消落带重庆段 巴南-巫山	Cu	各地区金属含量均在二级标准以内	[4]
		Pb		
		Zn		
		As		
		Cr		
		Hg		
		Cd		
2008年8—9月	库区消落带 巴南-秭归	Cu	涪陵至秭归为一级,巴南至长寿为二级	[15]
		Pb	涪陵至秭归为一级,巴南至长寿为二级	
		Zn	涪陵至秭归为一级,巴南至长寿为二级	
		As	万州为一级,中段为二级,巴南、奉节至秭归为三级	
		Cr	一级	
		Hg	一级	
		Cd	库区中下游为二级,巴南至涪陵为三级	
2008年8月及11月	库区消落带 涪陵-巴东	Cu	一级,局部为二级	[20]
		Pb	二级,局部为一级	
		Cr	一级	
		Cd	二级,局部为一级	
2009年7月	长江支流小江流域消落带	Cu	一级,局部为二级	[25]
		Pb	一级,局部为二级	
		Zn	二级	
		Ni	一级	
		Cr	一级,局部为二级	
		Cd	二级,局部为一级	
2015年5月	库区彭溪河流域消落带	Cu	二级	[28]
		Pb	二级	
		Zn	二级	
		Ni	一级	
		Cr	一级	
		Cd	三级	

行评价<sup>[15, 20, 29]</sup>。结果表明,三峡库区消落带土壤金属总体处于中等生态风险水平,其多种元素(Zn、Cu、Pb、Cr、As、Cd、Hg)的综合潜在生态风险指数(potential ecological risk index, RI)值均小于300,其中库区上游巴南(285.0)、渝北(240.3)、长寿(247.0)、涪陵(207.3)及下游奉节(245.2)、巫山(254.5)、巴东(214.2)地区的RI值较高,而库区中游地区的RI值相对较低(忠县:161.9,万州:161.1)<sup>[15]</sup>。研究区域土壤金属潜在生态风险的空间分布特征与金属含量空间分布格局基本一致。此外,各金属元素的潜在生态风险指数依次为: Cd(91.72) > Hg(64.55) > As(38.35) > Pb(7.57) > Cu

(6.34) > Zn(1.13) > Cr(1.08)<sup>[15]</sup>。由评价结果可知, 三峡库区消落带土壤的主要生态风险元素为Cd, 其次为As和Hg<sup>[15, 20, 29]</sup>。针对主要生态风险元素Cd和Hg, 通过非致癌模型进行健康风险评价, 结果表明, 三峡库区消落带土壤中Cd的摄食途径健康危害的成人和儿童平均年风险( $a^{-1}$ )分别为 $6.70 \times 10^{-7}$ 及 $19.57 \times 10^{-7}$ , 其中儿童因土壤摄入引起的致癌风险为成人的2.82倍<sup>[30]</sup>; Hg的摄食途径健康危害的成人和儿童平均年风险( $a^{-1}$ )分别为 $6.24 \times 10^{-10}$ 及 $54.43 \times 10^{-10}$ , 儿童因土壤摄入引起的致癌风险为成人的8.72倍<sup>[21]</sup>。但总体来说, 无论是儿童还是成人, Cd和Hg经摄食途径进入人体产生的健康风险均低于可接受水平( $10^{-4}$ ), 其含量对人体健康基本不会产生危害。

## 4 结论与展望

### 4.1 主要结论

(1) 三峡库区消落带土壤中各金属元素的平均含量依次为: Zn( $77.69 \pm 22.94 \text{ mg/kg}$ ) > Cr( $42.92 \pm 7.05 \text{ mg/kg}$ ) > Pb( $35.46 \pm 8.23 \text{ mg/kg}$ ) > Cu( $30.71 \pm 17.13 \text{ mg/kg}$ ) > As( $21.96 \pm 6.73 \text{ mg/kg}$ ) > Cd( $0.41 \pm 0.14 \text{ mg/kg}$ ) > Hg( $0.08 \pm 0.02 \text{ mg/kg}$ )。

(2) 受人类活动及地质条件的影响, 三峡库区消落带土壤金属含量总体呈现上游及下游较高, 库区中游较低的空间分布格局, 不同水位高程不同土壤层中各金属元素的分布特征存在一定差异。此外, Cr、Hg、Pb、Zn四种元素的离散程度较低, 其变异系数均小于30%, 而Cu的变异系数接近60%, 说明其在库区消落带土壤中的空间分布相对不均匀。

(3) 与三峡水库蓄水前期相比, 库区消落带土壤金属含量随干湿交替周期的增加呈现动态变化, 一定时间内金属污染物在土壤中呈现富集趋势, 但随淹没周期的增加, 金属元素含量的增加趋势无法维持, 存在向江水中迁移的环境风险。

(4) 研究区域土壤总体上为二类土, 除Cr、Ni外, Cu、Zn、Pb、As、Cd、Hg均超出国家一级标准。库区消落带土壤处于轻度污染等级, 存在中等生态风险, 库区各市区县Zn、Cu、Pb、Cr、As、Cd、Hg的综合潜在生态危害指数RI值均小于300, 其中库区上游巴南(285.0)、渝北(240.3)、长寿(247.0)、涪陵(207.3)及下游奉节(245.2)、巫山(254.5)、巴东(214.2)地区的RI值较高, 而库区中游地区的RI值相对较低(忠县: 161.9, 万州: 161.1)。其潜在生态风险的空间分布特征与金属含量空间分布格局基本吻合。

(5) 库区上游重庆主城区、长寿、涪陵及奉节、巫山等地的金属污染防控需给予更多的关注与重视。此外, 研究区域内的主要生态风险元素为Cd, 其次为As和Hg, 但目前Cd和Hg的健康风险均低于可接受水平( $10^{-4}$ ), 故其通过土壤摄入途径并不会对人体生命健康造成负面影响。

### 4.2 现存问题

(1) 现有研究多针对常规监测金属元素展开, 而某些非常规痕量金属元素对生态环境的影响也不容小觑, 多种金属元素的复合污染研究相对缺乏;

(2) 针对三峡库区消落带土壤金属环境质量评价研究, 各金属元素的浓度背景基准值不尽相同, 统一参考背景值的缺乏将会使现状调查的评价结果有失科学性;

(3) 对三峡消落带土壤金属含量动态变化特征缺乏系统性研究, 短时间的监测分析无法真实反映江水涨落对消落带土壤赋存金属的影响模式。

### 4.3 研究展望

(1) 针对库区含量较高、危害较大的非常规监测金属及类金属污染物开展相关研究工作, 同时进一步开展金属元素复合污染机理及影响效应研究, 洞悉库区消落带金属污染物的生态环境风险;

(2) 明确统一参考背景值的确立方法, 建立适宜的金属环境质量评价标准, 考虑增加金属的生物有效性等环境和生态指标;

(3) 通过持续跟踪监测研究, 探明江水交替性涨落对消落土壤内金属污染物的动态影响机理, 识

别主要防控污染物及污染治理典型区域。

#### 参 考 文 献:

- [ 1 ] HUANG C, AO L, ZHANG Z. Heavy metals sedimentation risk assessment and sources analysis accompanied by typical rural water level fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(12): 418-425.
- [ 2 ] BING H, ZHOU J, WU Y, et al. Current state, sources, and potential risk of heavy metals in sediments of Three Gorges Reservoir, China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 214: 485-496.
- [ 3 ] WANG Y Y, WEN A B, GUO J, et al. Spatial distribution, sources and ecological risk assessment of heavy metals in Shenjia River watershed of the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(2): 325-335.
- [ 4 ] 张艳敏, 刘海, 魏世强, 等. 三峡库区消落带不同垂直高程土壤重金属污染调查与评价[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(8): 317-322.
- [ 5 ] YE C, CHENG X, ZHANG Q. Recovery approach affects soil quality in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China: implications for revegetation[J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2014, 21(3): 2018-2031.
- [ 6 ] BAO Y, GAO P, HE X. The water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir — A unique geomorphological unit[J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 150: 14-24.
- [ 7 ] 王娅, 赵铮, 木志坚, 等. 三峡库区典型农田小流域土壤汞的空间分布特征[J]. *环境科学*, 2015(1): 130-135.
- [ 8 ] ZHAO Z, WANG D, WANG Y, et al. Wet deposition flux and runoff output flux of mercury in a typical small agricultural watershed in Three Gorges Reservoir areas[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2015, 22(7): 5538-5551.
- [ 9 ] BOZKURT S, MORENO L, NERETNIEKS I. Long-term processes in waste deposits[J]. *Science of the Total Environment*, 2000, 250(1): 101-121.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] ZHAO X, BO G, XU D, et al. Heavy metal pollution in sediments of the largest reservoir (Three Gorges Reservoir) in China: a review[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2017, 24(26): 20844-20858.
- [ 12 ] LIU J, BI X, LI F, et al. Source discrimination of atmospheric metal deposition by multi-metal isotopes in the Three Gorges Reservoir region, China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 240: 582-589.
- [ 13 ] YE C, LI S, ZHANG Y, 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.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] 叶琛, 李思悦, 卜红梅, 等. 三峡水库消落区蓄水前土壤重金属含量及生态危害评价[J]. *土壤学报*, 2010, 47(6): 1264-1269.
- [ 16 ] 唐将, 王世杰, 付绍红, 等. 三峡库区土壤环境质量评价[J]. *土壤学报*, 2008, 45(4): 601-607.
- [ 17 ] 裴廷权, 王里奥, 韩勇, 等. 三峡库区消落带土壤剖面中重金属分布特征[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(5): 72-78.
- [ 18 ] BAI J, JIA J, ZHANG G, et al. Spatial and temporal dynamics of heavy metal pollution and source identification in sediment cores from the short-term flooding riparian wetlands in a Chinese delta[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 219: 379-388.
- [ 19 ] GAO Q, LI Y, CHENG Q, et al. Analysis and assessment of the nutrients, biochemical indexes and heavy metals in the Three Gorges Reservoir, China, from 2008 to 2013[J]. *Water Research*, 2016, 92: 262-274.
- [ 20 ] 王图锦. 三峡库区消落带重金属迁移转化特征研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [ 21 ] 陈宏. 三峡库区消落带土壤汞库及其风险评价[D]. 重庆: 西南大学, 2009.

- [ 22 ] 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.
- [ 23 ] 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): 612-617.
- [ 24 ] 王晓阳. 三峡库区小江流域消落带土壤重金属环境质量评价[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- [ 25 ] 邹曦, 郑志伟, 张志永, 等. 三峡水库小江流域消落区土壤重金属时空分布与来源分析[J]. 水生态学杂志, 2012, 33(4): 33-39.
- [ 26 ] 朱妮妮. 三峡库区秭归一巫山段消落带植被和土壤性状时空动态研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [ 27 ] Pei S, Jian Z, Guo Q, et al. Temporal and spatial variation and risk assessment of soil heavy metal concentrations for water-level-fluctuating zones of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Soils & Sediments, 2018, 18(9): 2924-2934.
- [ 28 ] 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.
- [ 29 ] 叶琛, 李思悦, 张全发. 三峡库区消落区表层土壤重金属污染评价及源解析[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1): 146-149.
- [ 30 ] 罗毅, 敖亮, 罗财红, 等. 三峡库区消落带土壤镉环境风险研究[J]. 环境科学与管理, 2014, 39(5): 180-183.

## Reviews on soil metal pollution in water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir area

LI Yanyan<sup>1,2</sup>, XU Dongyu<sup>2</sup>, GAO Li<sup>2</sup>, GAO Bo<sup>2</sup>

(1. College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;

2. Department of Water Environment, IWHR, Beijing 100038, China)

**Abstract:** At present, the eco-environmental problem in the Three Gorges Reservoir (TGR) area is highly concerned by government and people. The water-level fluctuation zone (WLFZ) is a significant component of ecological environment in the TGR. In recent decades, the heavy metal pollution in soils in WLFZ has attracted much attention from researchers all over the world. However, the comprehensive analysis on heavy metal pollution in soils in WLFZ remains scarce. Through literature review (the last ten years), this study summarizes the content, spatial and temporal distribution characteristics and ecological environmental risks of heavy metal in soils in WLFZ in TGR. The results show that in general, the concentrations of heavy metal in soils in WLFZ are higher in the upper and lower reaches than those in the middle reaches in the TGR. Meanwhile, the distribution characteristics of heavy metal vary with soil layer and elevation. Compared with soils before submergence, the metals concentration in soils in WLFZ exhibit dynamic change with the increase of dry/wet alternation cycle, and heavy metal in soils has the potential to transform into river water. The environmental risk assessment suggested that the studied soil generally belongs to the second-class soil, which is slightly polluted and shows slow ecological risk. The main heavy metals with ecological risks are Cd, followed by As and Hg. However, these metals do not influence human health at present. Finally, this review summarizes future research perspectives on the basis of current research status, which will provide a basis for the development of strategies to prevent soil heavy metal pollution in WLFZ and conserve water ecological environment in the TGR.

**Keywords:** Three Gorges Reservoir; water-level fluctuation zone; soil; heavy metal pollution; environmental risk; review

(责任编辑: 耿庆斋)