

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.005.003

# 三峡库区秭归段消落带重金属 时空分布特征

陈 天<sup>1</sup>, 程瑞梅<sup>1,2\*</sup>, 肖文发<sup>1,2</sup>, 沈雅飞<sup>1,2</sup>,  
曾立雄<sup>1,2</sup>, 王丽君<sup>1</sup>, 孙鹏飞<sup>1</sup>, 张 萌<sup>1</sup>

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091;

2. 南京林业大学 南方现代林业协同创新中心, 南京 210037)

**摘要:** [目的] 分析比较三峡库区消落带土壤重金属含量的时空差异, 研究消落带金属污染现状并提出防治措施。[方法] 以 2008 年、2014 年和 2018 年的秭归段三峡库区的淹水区 (高程 145~175 m) 和未淹水区 (高程 175~185 m) 消落带土壤为研究对象, 使用消解法对样品的理化性质和铜 (Cu)、铁 (Fe)、锰 (Mn)、锌 (Zn) 含量进行检测分析。[结果] 结果表明: (1) 对 2008 年、2014 年和 2018 年的消落带土壤研究发现, 淹水区土壤总氮 (TN)、总磷 (TP)、有机质 (SOM) 含量持续降低, 土壤 pH 值较 2008 年增加, 2018 年已接近 7。(2) 截至 2018 年, 消落带土壤中 Cu、Fe、Mn、Zn 含量不断增加, Zn 在消落带中下部 (高程 145~165 m)、及未淹水区土壤中地质累积指数污染程度均为“强”; 消落带下部 (高程 145~165 m) 的 Cu、消落带中下部及未淹水区土壤的 Zn 已经造成了轻度生态风险。(3) 消落带土壤理化性质和 4 种重金属含量的相关性分析表明, 土壤 pH 的上升可能带来 4 种重金属累积量增加的风险, 土壤 TP 增加可能会减少土壤中 4 种重金属累积, 而土壤 TN 含量的增加可能引起未淹水对照区土壤 Fe、Mn 的增加以及淹水区 Cu 和 Zn 的减少。[结论] 三峡大坝的运行造成土壤氮磷等养分质量的下降, 消落带土壤重金属污染现状不容忽视, 尤以 Cu 和 Zn 的生态风险为重, 因此需要继续长期监测, 必要时可以考虑改变植被构成等人工干预手段。

**关键词:** 消落带; 重金属; 时空变化; 生态风险; 理化性质

**中图分类号:** S718.51+6

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2022)05-0022-11

重金属可以通过多种方式导致环境质量恶化, 此外土壤中的重金属可以通过生物途径进入植物或动物体内, 因此, 土壤重金属的污染问题逐渐成为国内外科学工作者热切关注的环境问题之一<sup>[1-2]</sup>。三峡库区位于长江流域生态屏障的咽喉地带, 是中国最具有全球保护意义的关键生态区域之一, 同时也是长江上游经济带和我国西部中心枢纽, 所以该区域保护资源与保障发展的矛盾日益突出<sup>[3]</sup>。自三峡工程正式投入运行以来, 其在蓄水期时水位可提

至高程 175 m, 淹水区土质成为新的水库底质, 累积在土壤中的重金属在适宜条件下会释放到水体中; 而每年的 3—6 月份水位会重新降至高程 145 m, 淹水区土壤重新暴露出现。消落带土壤经历长期干湿交替的巨大环境变化, 期间不同淹水程度的土壤孔隙度、酸碱度以及矿质元素等理化性质不断发生变异, 从而导致土壤中各类型元素的含量和存在形式不断变化<sup>[4-5]</sup>。消落带作为水域与陆地的过渡地带, 物质转移和能量转化活跃, 是水陆二

收稿日期: 2021-12-21 修回日期: 2022-01-26

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金“长江经济带”生态保护技术集成与应用”(CAFYB2017ZA002); 国家重点研发计划子课题“三峡水库消落带生态恢复技术研究”(2017YFC050530402)

\* 通讯作者: 程瑞梅, 研究员. E-mail: chenrm@caf.ac.cn

相系统污染的交汇点<sup>[6]</sup>,对民用和工业污水滥排滥放等不当人类活动非常敏感。在长时间的周期性干湿交替以及夏季出露期降雨侵蚀的耦合作用下,三峡库区消落带土壤的理化性质、结构及稳定性进一步发生巨大变化,进而影响污染物的形态以及释放迁移等<sup>[7-8]</sup>,在此背景下有学者认为库区蓄水到达高水位后,水体流速会减缓,导致污染物稀释扩散效应降低,加重沿岸消落带土壤金属污染<sup>[9-10]</sup>。有研究报道,三峡库区土壤不仅普遍存在铬和铜累积,而且汞是影响其综合潜在生态风险的主要元素<sup>[11-12]</sup>;周萍等发现镉在三峡库区土壤已造成中度生态危害<sup>[13]</sup>;翟婉盈报道三峡库区蓄水之后,较未建成时土壤中砷、铜、铅等金属含量总体上上升趋势<sup>[14]</sup>;郭燕等的研究表明,经历7次水淹过后,消落带土壤中铜、铁含量增加显著<sup>[15]</sup>。

前人在三峡库区开展了大量的土壤重金属研究工作,主要集中在对土壤金属元素含量的探析以及不同土壤类型下重金属分布,聚焦于长期观测的不同高程消落带土壤金属含量时空变化鲜有报道。本研究以三峡库区秭归段不同高程消落带(淹水区域:高程145~175 m)以及未淹水对照区(高程175~185 m)为对象,研究2008年、2014年、2018年3个节点的铜(Cu)、铁(Fe)、锰(Mn)、锌(Zn)

4种金属含量变化,并对消落带土壤重金属存量进行风险评价,以期掌握三峡库区消落带土壤金属污染状况,为后期污染防治措施提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况及样方设置

研究区位于紧邻三峡库区的湖北省秭归县茅坪镇,地理位置为30°38'14"~31°11'31"N,110°0'04"~110°18'41"E。当地气候为大陆性季风气候,植被季相变化鲜明。年均气温为19.0℃,年均降水量约为1100.0 mm,年均相对湿度为78%,终年湿润温暖。研究区土壤类型为黄壤和棕壤,土壤厚度约为40 cm。根据对水库的运行规律的调查,消落带内海拔高程145~175 m为水淹区域,高程175~185 m为未淹水区域。

秭归县茅坪镇典型消落带样地于2008年建立,于2018年8月在样地中选取代表性消落带区段作为采样区,在每个样地沿消落带的下部(145~155 m)、中部(155~165 m)和上部(165~175 m)及未淹水对照区(175~185 m)各设置1个10 m×30 m样带,每个样带内均匀设置3个8 m×10 m的网格,并在每个网格内设置5个3 m×3 m的样方,研究区基本概况如表1所示。

表1 研究区基本概况

Table 1 Basic information of sample plot

| 样地编号<br>Samples number | 地理位置<br>Geographical position | 坡度<br>Slope/(°) | 坡向<br>Slope aspect | 经度(E)<br>Longitude | 纬度(N)<br>Latitude |
|------------------------|-------------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 1                      | 秭归县松树坳                        | 32~42           | 北偏西                | 110°95'            | 30°52'            |
| 2                      | 秭归县杉木溪                        | 32              | 北偏西                | 110°55'            | 30°53'            |
| 3                      | 秭归县中坝村                        | 27~37           | 北偏东                | 110°55'            | 30°52'            |
| 4                      | 秭归县兰陵溪                        | 30~33           | 北偏东                | 110°54'            | 30°53'            |
| 5                      | 秭归县兰沙湾                        | 22~30           | 北偏东                | 110°55'            | 30°52'            |

### 1.2 土壤样品采集与处理

在样方对角线上设置土壤采样点,每对角线选择12个点,每个点运用土钻法分别均匀取土3次,采集深度为表层土0~30 cm,每个样点采集的土壤分别装袋并标记。

### 1.3 土壤样品检测方法

将土壤带回后放于牛皮纸上阴干,研磨过100目筛待测。土壤pH值采用电位法、全钾采用氢氟酸-高氯酸消煮-火焰光度法、全氮采用半微量

凯氏法、有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法、全磷采用硫酸-高氯酸消煮-比色法(GB 7852-87)。土壤中金属元素(铜、铁、锰、锌)含量采用氢氟酸-高氯酸混酸法微波消解,使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Thermo Fisher Scientific, USA)测定。

### 1.4 污染风险评估指标

1.4.1 地质积累指数法 地质积累指数( $I_{geo}$ )不仅反映了重金属元素分布的自然变化特征,而且可

以判别人为活动对环境的影响,目前被广泛应用于土壤重金属污染评价<sup>[16]</sup>。库区新增淹没区农田存在人为活动(如施肥、灌溉等),会影响土壤重金属含量,可以使用  $I_{geo}$  判别人为活动对土壤重金属污染的影响。 $I_{geo}$  计算公式:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (1.5BE_i)] \quad (1)$$

(1) 式中: $C_i$  为土样中重金属  $i$  的质量分数,单位  $g \cdot kg^{-1}$ ;  $BE_i$  为重金属  $i$  的地球化学背景值,

单位为  $g \cdot kg^{-1}$ ; 1.5 为修正指数,是考虑到由于成岩作用可能会引起背景值的变化根据目前使用较为广泛的 Miller 分级标准分为 6 个级别(表 2)。本研究重金属钙、锌地球环境化学背景值采用三峡库区土壤重金属背景值:铜为  $0.025 g \cdot kg^{-1}$ 、锌为  $0.070 g \cdot kg^{-1}$ <sup>[17]</sup>; 重金属铁、锰地球环境化学背景值采用长江水系河流沉积物重金属背景值:铁为  $29.60 g \cdot kg^{-1}$ , 锰为  $0.59 g \cdot kg^{-1}$ <sup>[18]</sup>。

表 2 重金属  $I_{geo}$  对应污染程度

Table 2  $I_{geo}$  and contamination grades of heavy metals

| $I_{geo}$ | $\leq 0$ | 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 |

1.4.2 内梅罗指数评价生态风险法 采用  $P_i$ (重金属  $i$  单因子指数)和  $P_N$ (内梅罗指数)来反映重金属  $i$  对土壤的污染级别,避免由于平均值化带来的对重金属权值削弱现象的发生<sup>[19]</sup>,计算公式如下:

$$P_i = C_i / S_i \quad (2)$$

$$PN = \sqrt{\frac{P_{imax}^2 + P_{iave}^2}{2}} \quad (3)$$

(2) 式中:  $C_i$  为重金属  $i$  含量的实测值,  $g \cdot kg^{-1}$ ;  $S_i$  为重金属  $i$  含量的标准值(遵照 GB 15618—2018《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》中农用地土壤污染风险筛选值确定)<sup>[20]</sup>; (3) 式中  $P_{imax}$  为重金属  $i$  单因子指数的最大值;  $P_{iave}$  为重金属  $i$  单因子指数的平均值。土壤综合污染程度分级标准见表 3<sup>[19]</sup>。

表 3 土壤综合污染级别与分级标准

Table 3 Criterion for the classification of pollution index of heavy metals in soil

| 等级 | 污染指数 ( $P_N$ ) | 风险级别 | 污染水平               |
|----|----------------|------|--------------------|
| 1  | $\leq 0.7$     | 安全   | 清洁                 |
| 2  | $>0.7 \sim 1$  | 警戒级  | 尚清洁                |
| 3  | $>1 \sim 2$    | 轻度   | 土壤污染物含量高, 作物开始受到污染 |
| 4  | $>2 \sim 3$    | 中度   | 土壤、作物受到中度污染        |
| 5  | $>3$           | 重度   | 土壤、作物受到污染已相当严重     |

## 1.5 统计分析

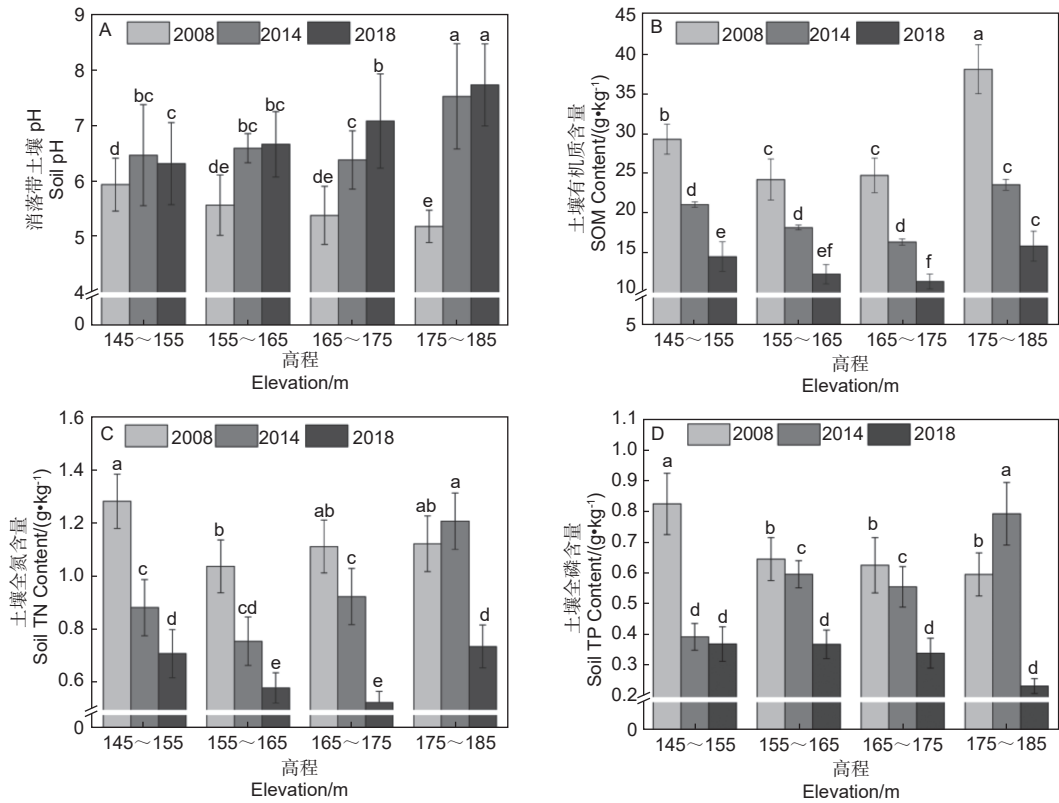
使用 Excel 2016 进行数据整理, SPSS 22.0 进行单因素方差分析和多重比较(LSD,  $\alpha=0.05$ ), 相关性分析使用 R version 3.5.3 完成, 使用 Origin 2018 绘图。图表中数据为平均值 $\pm$ 标准误差。

## 2 结果与分析

### 2.1 消落带土壤理化性质时空变化特征

图 1A~D 为三峡库区淹水区消落带(高程

145~175 m)以及未淹水对照区(175~185 m)土壤在 2008 年、2014 年和 2018 年土壤 TN、TP、pH 以及 SOM 变化情况。由图 1 可得, 较低高程消落带土壤 TN、TP、SOM 整体低于较高高程, 而土壤 pH 随高程变化的趋势与之相反; 在 2014 年和 2018 年, 淹水区土壤 TN、TP、SOM 均较前一次调查取样时有降低, 土壤 pH 则呈现上升的趋势; 未淹水对照区土壤 TN 和 TP 在 2014 年和 2018 年较 2008 年的结果呈现先增加后减少



注: 同一个指标柱上不同小写字母表示在 0.05 检验水平上差异显著, 下同。

Note: different small letters on the same index column indicate significant difference at 0.05 test level, the same below.

图 1 消落带土壤 pH、有机质、全氮和全磷时空变化

Fig. 1 Temporal and spatial changes of soil physical and chemical properties in water level fluctuating zone

的趋势, 而 SOM 和 pH 与淹水区呈现相同变化趋势。

## 2.2 消落带土壤重金属含量时空变化特征

图 2A~D 为三峡库区淹水区消落带以及未淹水区土壤在 2008 年、2014 年和 2018 年土壤中 Cu、Fe、Mn、Zn 含量变化情况。相较于 2008 年, 2014 年的检测结果显示: 消落带下部 (高程 145~155 m) Cu、Fe、Mn、Zn 的含量分别增加了 89.78%、19.11%、25.32% 和 40.00%; 消落带中部 (高程 155~165 m) Cu、Fe、Mn 含量分别增加了 121.58%、30.81%、25.88%, Zn 的含量减少了 6.25%; 消落带上部 (高程 165~175 m) Cu、Fe、Mn、Zn 含量分别增加了 125.85%、15.83%、4.67% 和 62.50%; 未淹水区 (高程 175~185 m) Cu、Zn 含量分别增加了 83.02%、15.38%, Fe 和 Mn 减少了 6.98% 和 27.82%。

相应地, 相较于 2014 年, 2018 年的检测结果显示: 消落带下部 Cu、Fe、Mn、Zn 含量分别增加了 82.27%、7.32%、38.38% 和 309.52%;

消落带中部 Cu、Fe、Mn 含量分别增加了 51.50%、46.68%、6.54%, Zn 含量减少了 64.00%; 消落带上部 Cu、Mn、Zn 含量分别增加了 2.09%、11.61%、150.00%, Fe 含量减少了 27.82%; 未淹水区 Cu、Fe、Mn、Zn 含量分别增加了 38.69%、7.34%、18.75% 和 733.33%。

## 2.3 消落带土壤重金属地质累积指数和内梅罗指数年际变化

图 3A~D 为淹水区高程 145~175 m 消落带土壤以及未淹水对照区土壤经历 6 次、10 次周期性干湿交替之后 4 种金属地质累积指数 ( $I_{geo}$ ) 年际变化。消落带下部 4 种重金属  $I_{geo}$  均呈现不断增加的现象, 说明在此高程土壤中的重金属污染风险均存在升高的趋势。其中 2018 年时 Cu 和 Mn 的污染程度为“中”; 而此时消落带下部  $I_{geo}$ -Zn 为 3.04, 污染风险上升到“强”。相较于 2008 年, 2018 年消落带中部土壤中 4 种重金属含量不断增加, 同时  $I_{geo}$ -Cu、 $I_{geo}$ -Fe、 $I_{geo}$ -Mn 从 <0 (2008 年) 不断上升到 0<~<1 (2018 年), 污染风险从“无”(2008 年) 上升到“中”(2018 年); 2018

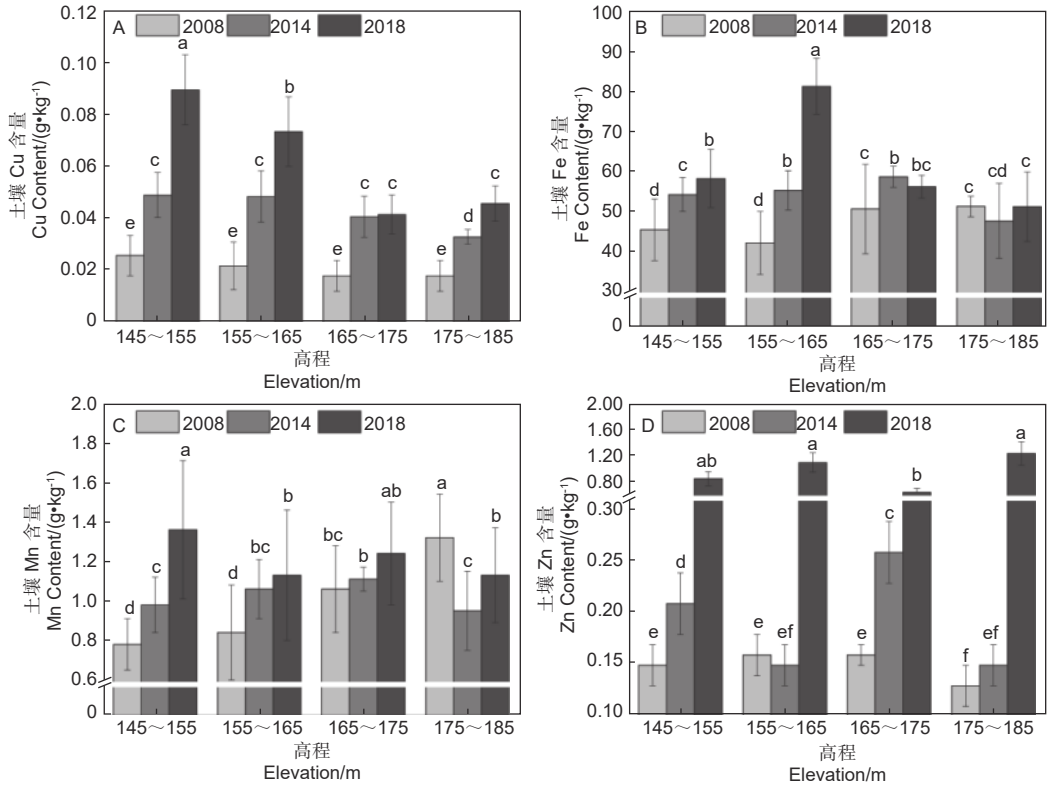


图 2 消落带土壤 Cu、Fe、Mn 和 Zn 含量时空变化

Fig. 2 Temporal and spatial variation of Cu, Fe, Mn and Zn content in water level fluctuating zone

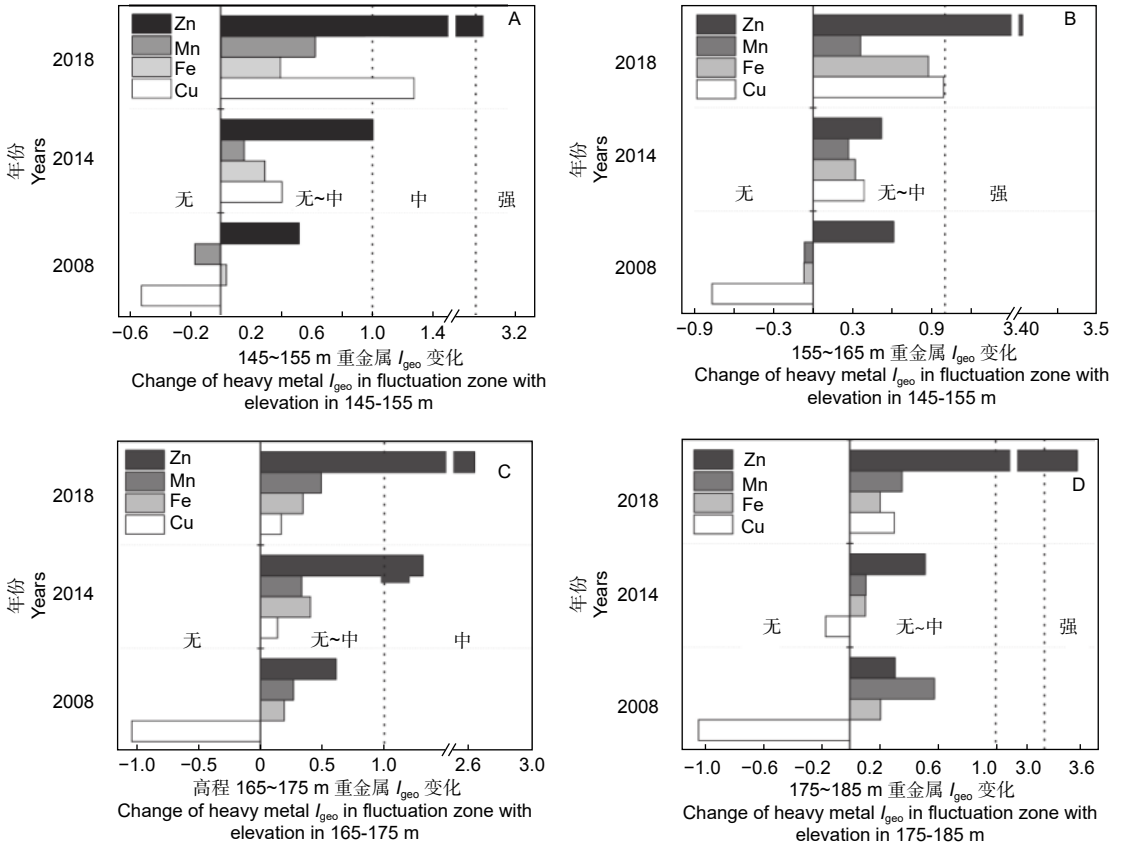


图 3 消落带土壤 Cu、Fe、Mn 和 Zn 地质累积指数

Fig. 3 Geological accumulation index of Cu, Fe, Mn and Zn in soil in water level fluctuating zone

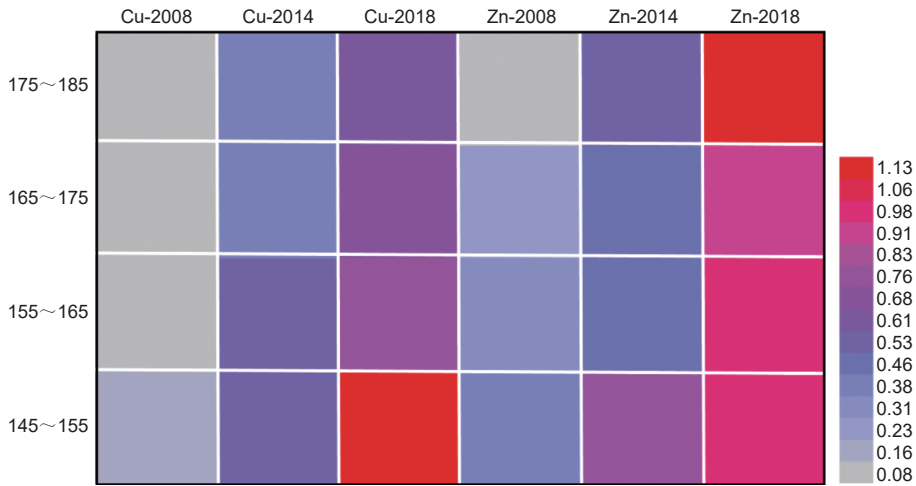


图 4 消落带土壤 Cu、Zn 生态风险年际变化

Fig. 4 Interannual variation of soil Cu and Zn ecological risk in water level fluctuating zone

年时  $I_{geo}$ -Zn 上升为 3.40, 此时污染程度为“强”。高程 165~175 m 消落带土壤重金属  $I_{geo}$  如图 3C 所示, 截至 2018 年,  $I_{geo}$ -Cu 不断上升到 0.17, 上升到“无~中”等级; 2018 年时, 消落带上部土壤  $I_{geo}$ -Zn 增加到 2.63, 污染程度上升到“中~强”(2018 年)。如图 3D 所示, 未淹水区土壤  $I_{geo}$ -Cu 和  $I_{geo}$ -Zn 在经历 6 次、10 次水位周期涨落变化趋势相同。

如图 4 所示, 消落土壤中 Cu、Zn 2 种重金属面临的污染程度较高, 因此对该 2 种重金属进行内梅罗指数法进行生态风险评价。对于同一海拔高程来说, 随历经水位涨落次数增加, Cu、Zn 的内梅罗生态风险指数不断增加。截至 2018 年, 淹水区的消落带土壤 Cu、Zn 含量内梅罗指数均  $\geq 0.7$ , 其中消落部下部的 Cu 和 Zn 含量、消落带中部和未淹水区土壤的 Zn 含量内梅罗指数均达到  $1.0 \leq \sim \leq 2.0$ , 说明这些地点的 Cu 和 Zn 的含量已经对环境造成了轻度生态风险。

#### 2.4 消落带土壤金属含量与环境因子变化相关性分析

图 5A~D 为消落带土壤重金属与土壤 pH、SOM、N 和 P 相关性线性回归分析, 可得土壤 pH、TN、TP 对土壤中金属的含量影响十分显著。消落带土壤 pH 与 4 种重金属的累积量呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ); 消落带土壤 N 与土壤 Cu、Zn 呈显著负相关关系 ( $P < 0.01$ ); 土壤 P 与 4 种重金属在消落带土壤中的含量均存在显著负相关, 其中土壤 P 含量的增加显著抑制了 Mn 和 Zn 的累

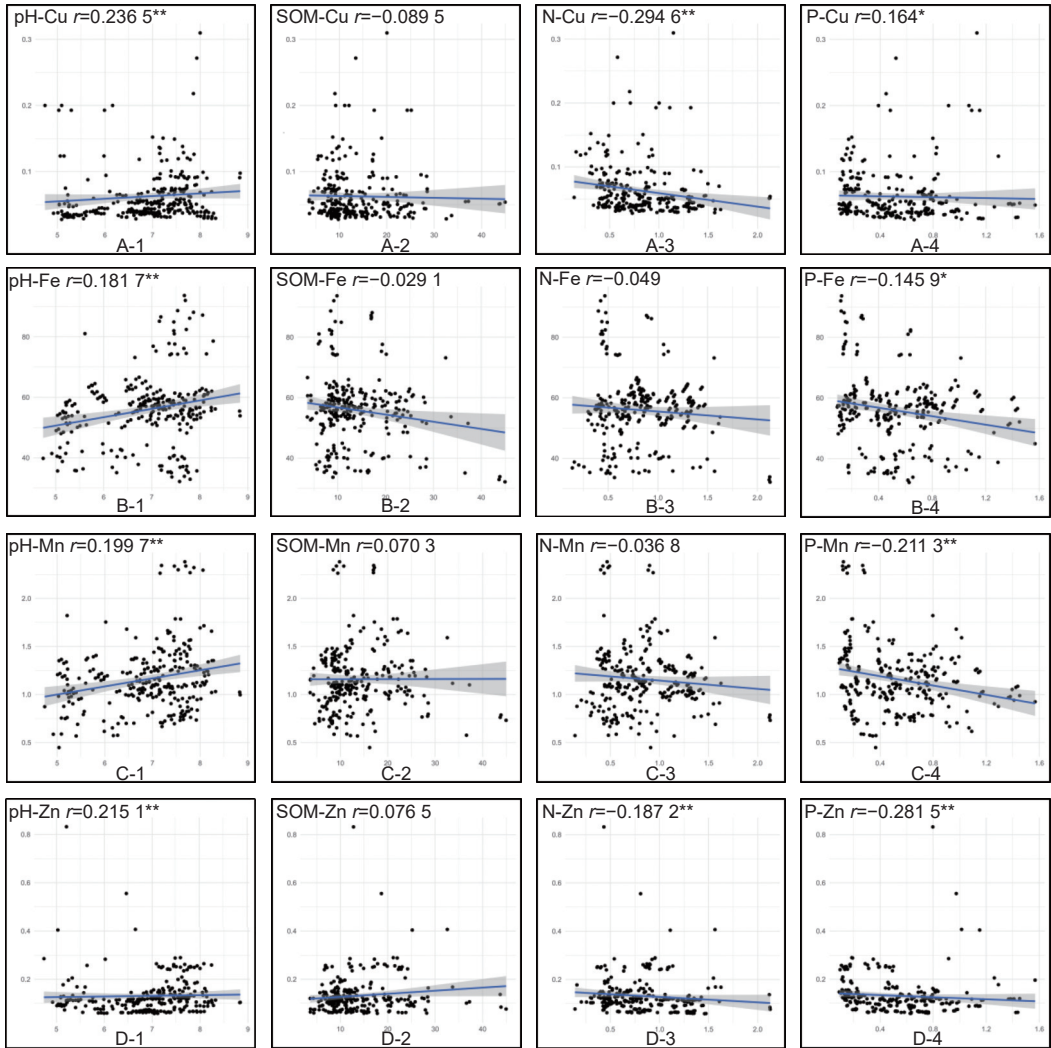
积 ( $P < 0.01$ )。

图 6A~D 为对照区消落带土壤重金属与土壤 pH、SOM、N 和 P 回归分析。土壤 pH 与土壤 Cu 和 Mn 含量呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ); 消落带土壤 N 与土壤 Fe、Mn 呈显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ); 土壤 P 与消落带土壤中 Cu 含量存在显著负相关, 土壤 P 含量的增加极显著抑制 Cu 的累积 ( $P < 0.05$ )。

### 3 讨论

#### 3.1 消落带涨消对土壤理化性质时空特征的影响

以往的研究表明, 长时间的水淹环境下土壤 pH 会发生显著变化逐渐趋于中性<sup>[21]</sup>。实验中, 2008 年消落带土壤 pH 呈现酸性, 淹水区土壤在经历 6 次、10 次水位周期涨落之后, pH 升高至接近中性。这可能是消落带水淹部分在剧烈厌氧条件下, 枯水期留在土壤中的大量还原物质溶解导致了 pH 的增加<sup>[22]</sup>, 此外消落带土壤母岩分解过程中某些碱性阳离子的增加使得 pH 上升<sup>[23]</sup>; 消落带土壤中的有机物质主要来源于土壤原本存在的有机物和动植物残体<sup>[24]</sup>。2014 年后消落带下部土壤经过长期处于淹水状态, 形成了低氧化还原电位, 形成大量还原性物质, 利于有机质积累<sup>[25]</sup>; 之后消落带上部由于淹水期的冲刷和沿岸植被减少, 有机物质来源减少, 导致土壤 SOM 的减少<sup>[26]</sup>。程瑞梅等的研究表明, 库区土壤在经历 4 次水位涨落后 SOM 含量显著下降<sup>[27]</sup>, 秭归段消落带土壤不仅 SOM 含量变化与前人研究结果类似, 土壤 TN、TP



注: 图中,  $r$  值后标注 “\*\*” 表示在 0.05 检验水平上相关性显著,  $r$  值后标注 “\*\*\*” 表示在 0.01 检验水平上相关性显著, 下同。  
 Note: In the figure, mark “\*\*” after  $r$  value indicates significant correlation at 0.05 test level, and mark “\*\*\*” after  $r$  value indicates significant correlation at 0.01 test level, the same below.

图 5 淹水区消落带土壤重金属与土壤 pH、SOM、N 和 P 相关性线性回归

Fig. 5 linear regression of correlation between heavy metals and pH, SOM, N, P in water level fluctuating zone of flooded area

在历经多次干湿交替之后也出现了显著下降。

### 3.2 消落带涨消对土壤金属污染时空特征的影响

对土壤重金属含量的研究多侧重于有污染源或人为影响较重的地区, 而本研究选取的三峡库区消落带沿岸较少有大型重工业重金属污染源的干扰, 因此土壤母质、航运、农业灌溉、施肥、喷洒农药和除草剂以及生活垃圾是消落带土壤重金属的主要来源<sup>[28-29]</sup>。一般来说, 消落带土壤中金属含量年际变化主要有以下几个原因: ①消落带植被破坏严重, 受到径流冲刷及降水作用的影响造成土壤侵蚀, 可能导致金属元素在消落带累积分布不均<sup>[30-31]</sup>; ②库区上游工业和农业产生的金属污染物, 经土壤

经历周期性的干湿交替循环, 可能经迁移、吸附、转化等作用进入土壤<sup>[32]</sup>; 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<sup>[33-34]</sup>。实验所测的 4 种重金属自 2008 年起, 在消落带中的含量呈现逐年增多的态势, 污染程度和生态风险也在进一步升高。此外 Cu、Zn 2 种金属在库区消落带土壤中存在一定的富集趋势, 且已经对环境造成了生态风险, 将会影响农林业生产和植物正常生长, 需在今后研究中给予更多重视。

三峡大坝自建成后一直实行冬蓄夏泄的运行模

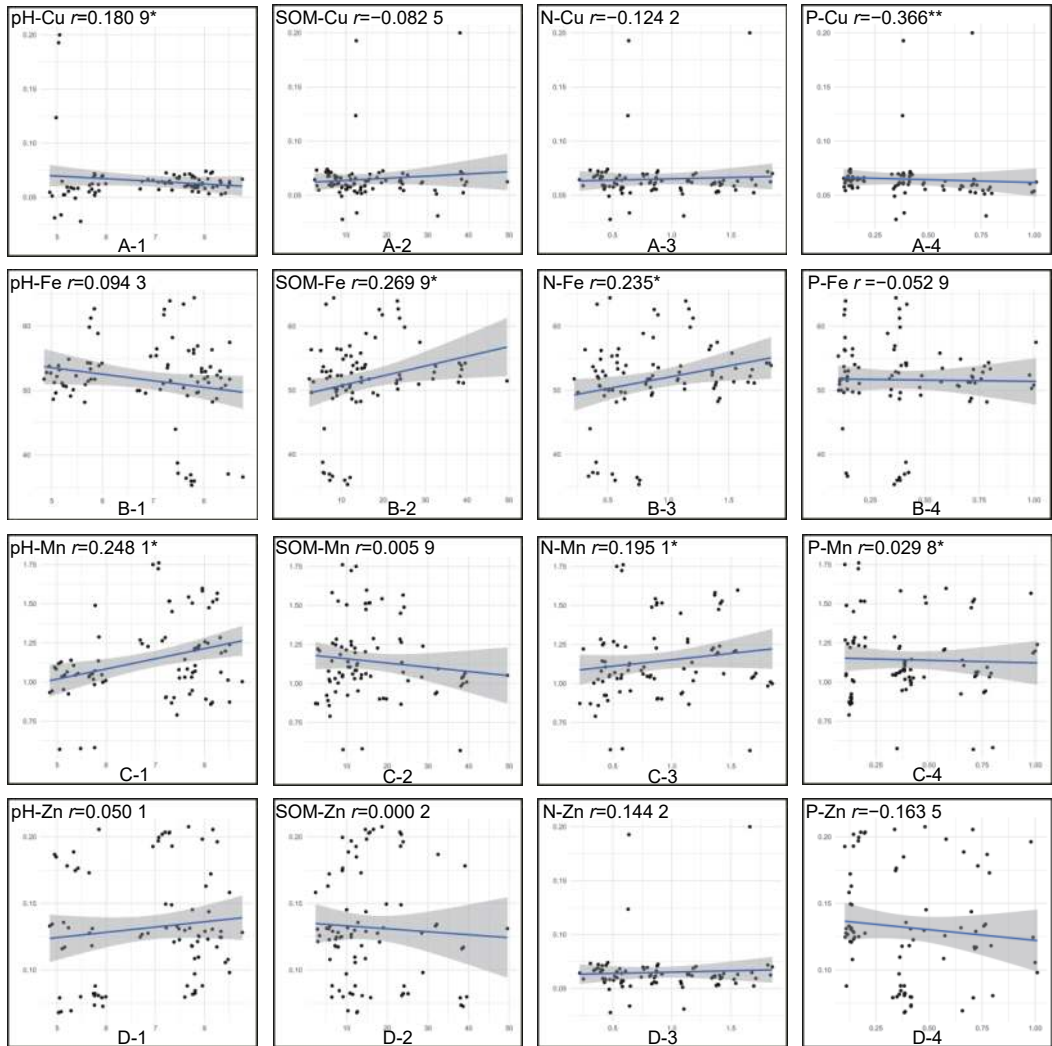


图 6 对照区消落带土壤重金属与土壤 pH、SOM、N 和 P 相关性线性回归

Fig. 6 Linear regression analysis of correlation between heavy metals and pH, SOM, N, P in water level fluctuating zone of control area

式, 而由此带来的“蓄清排浑”水位调度节律会诱发的土壤 pH 和养分含量都将直接或间接影响消落带土壤重金属含量<sup>[35-36]</sup>。淹水状态下土壤在来源于库岸土壤近源侵蚀的同时也广泛来源于汛期干流泥沙沉积, 进而导致长期淹水的土壤断面其泥沙沉积厚度和速率明显高于短期淹水<sup>[37-38]</sup>。淹水土壤较对照区有小而多的有机质结合位点, 易与可交换态重金属形成稳定性更强的有机结合态<sup>[39]</sup>。例如消落带淹水区 pH 较低, 土壤内部  $H^+$ 、 $-COOH$  等官能团使金属离子活性增加, 出现金属离子的滞留<sup>[40]</sup>。因此除去人为扰动的因素之外, 淹水程度极大地影响了土壤重金属的累积。而淹水区 N、P 与重金属累积量之间的负相关, 可能是由于离子结合位点的争夺有关<sup>[41]</sup>, 也说明实验所测 4 种重金属来自相同污

染源的概率很大<sup>[42]</sup>; 夏季消落带水位下降, 重新被植被覆盖, 此时可能部分土壤中的重金属离子被植物富集, 由于植物生长状况与土壤营养元素紧密相关, 因此消落带土壤重金属含量与土壤养分具有一定的线性相关性<sup>[19, 43]</sup>。此外, 与对照区相比, 淹水区土壤因子与土壤中重金属含量之间具有更高的相关性, 也可能是由于淹水过程加快了土壤中活性态重金属的释放<sup>[44-45]</sup>。

## 4 结论

(1) 截至 2018 年, 淹水区土壤 TN、TP、SOM 持续降低, 而土壤 pH 值有所上升, 接近中性; 未淹水区土壤 TN 和 TP 较 2008 年呈减少趋势。

(2) 截至 2018 年, 消落带土壤中 Cu、



Fe、Mn、Zn 含量均不断增加,其中 Zn 的污染程度最为严重,在 4 个高程土壤中污染程度均为“强”;Cu、Zn 的含量生态风险均达到了警戒级以上,其中消落带下部的 Cu、Zn 以及未淹水区的 Zn 已经造成了轻度生态风险。土壤 pH 的上升均可能带来 Cu、Fe、Mn、Zn 累积量增加的风险,土壤 P 增加可能会减少土壤 Cu、Fe、Mn、Zn 的累积,而土壤 N 含量的增加会促进未淹水对照区土壤 Fe、Mn 的累积量增加以及淹水区 Cu 和 Zn 的累积量的减少。

(3) 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。

### 参考文献:

- [1] Wang C, Yang Z, Zhong C, *et al.* Temporal-spatial variation and source apportionment of soil heavy metals in the representative river-alluviation depositional system[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 216(sep.): 18-26.
- [2] Jiang H H, Cai L M, Wen H H, *et al.* An integrated approach to quantifying ecological and human health risks from different sources of soil heavy metals[J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 701(Jan.20): 134466.1-134466.11.
- [3] Sha Y, Wei Y, Li W, *et al.* Artificial tide generation and its effects on the water environment in the backwater of Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 528: 230-237.
- [4] 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.
- [5] 孙虹蕾, 张 维, 崔俊芳, 等. 基于文献计量分析的三峡库区消落带土壤重金属污染特征研究[J]. *土壤*, 2018, 50 (5): 965-974.
- [6] 杨 丹, 樊大勇, 谢宗强, 等. 消落带生态系统氮素截留转化的主要机制及影响因素[J]. *应用生态学报*, 2016, 27 (3): 973-980.
- [7] Chen Y, 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.
- [8] 彭焯键, 王鹏程, 刘 瑛, 等. 三峡库区消落带土壤重金属的分布特征与评价[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43 (5): 187-192.
- [9] 张显强, 谌金吾, 孙 敏. 三峡库区消落带土壤重金属污染及植物富集特征[J]. *环境化学*, 2020, 39 (9): 2490-2497.
- [10] 王金霞, 罗 乐, 陈玉成, 等. 三峡库区库尾典型农用地土壤重金属污染特征及潜在风险[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37 (12): 2711-2717.
- [11] 邓 晗, 张 翔, 张 成, 等. 三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征[J]. *环境科学*, 2017 (3): 987-992.
- [12] 郑 睿, 谌 书, 王 彬, 等. 三峡库区香溪河沉积物重金属含量分布及风险评价[J]. *生态环境学报*, 2020, 29 (1): 192-198.
- [13] 周 萍, 文安邦, 史忠林, 等. 三峡库区不同土地利用土壤重金属分布特征与污染评价[J]. *农业机械学报*, 2017, 48 (7): 207-213.
- [14] 翟婉盈, 欧阳雪皎, 周 伟, 等. 长江干流近岸沉积物重金属的空间分布及风险评估[J]. *环境科学学报*, 2017, 37 (11): 4195-4201.
- [15] 郭 燕, 程瑞梅, 杨 邵, 等. 三峡库区不同植被类型消落带土壤重金属含量的时空变异[J]. *生态学杂志*, 2018 (8): 272-279.
- [16] Akbari F A. The assessment of heavy metal contamination of landfill soil of Meshgin city using index of geoaccumulation and contamination factor[J]. *Bioscience Biotechnology Research Communications*, 2016, 9(2): 304-308.
- [17] 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.
- [18] 张朝生, 章 申. 长江水系河流沉积物重金属元素含量的计算方法研究[J]. *环境科学学报*, 1995, 15 (3): 258-264.
- [19] 陈 天, 包宁颖, 杜崇宣, 等. 重金属污染河流生态修复区挺水植物对重金属的吸收特性[J]. *环境科学研究*, 2020, (9): 2110-2117.
- [20] 李俊凯, 张 丹, 周 培, 等. 南京市铅锌矿采矿场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征[J]. *环境科学*, 2018, 39 (8): 382-390.
- [21] 朱丹妹, 刘 岩, 张 丽, 等. 不同类型土壤淹水对pH、Eh、Fe及有效态Cd含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36 (8): 1508-1517.
- [22] 翟思媛, 王亚娥, 魏志勇, 等. 兼氧/厌氧条件下pH和温度对活性污泥异化还原Fe(III)的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2013, 019 (6): 1040-1045.
- [23] 赵凯丽, 王伯仁, 徐明岗, 等. 我国南方不同母质土壤pH剖面特征及酸化因素分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25 (8): 1308-1315.
- [24] 沈雅飞, 王 娜, 刘泽彬, 等. 三峡库区消落带土壤化学性质变化[J]. *水土保持学报*, 2016 (3): 190-195.
- [25] Jiang L, Jian L, Agb D, *et al.* Anaerobic and aerobic biodegradation of soil-extracted dissolved organic matter from the water-level-fluctuation zone of the three gorges reservoir region, China[J]. *Science of The Total Environment*, 2021: 142857 - 142857.
- [26] 官兆宁, 李 洪, 阿 多, 等. 官厅水库消落带土壤有机质空间分布特征[J]. *生态学报*, 2017, 37 (24): 8336-8347.
- [27] 程瑞梅, 刘泽彬, 肖文发, 等. 三峡库区典型消落带土壤化学性质变化[J]. *林业科学*, 2017, 53 (2): 19-25.
- [28] Song J, Duan X, Han X, *et al.* The accumulation and redistribution of heavy metals in the water-level fluctuation zone of the Nuozhadu Reservoir, Upper Mekong[J]. *Catena*, 2019, 172: 335-344.
- [29] Cui J, Tang X, Zhang W. Soil physical properties changed in-

- duced by dry-wet cycles in the water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir region, China[C]// Egu General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2017.
- [30] Xu W X, Yang L, Bao Y H, *et al.* Soil anti-scourability enhanced by herbaceous species roots in a reservoir water level fluctuation zone[J]. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(2): 392-406.
- [31] Yang F, Wang Y, Chan Z. Review of environmental conditions in the water level fluctuation zone: Perspectives on riparian vegetation engineering in the Three Gorges Reservoir[J]. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 2015, 18(2): 240-249.
- [32] 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.
- [33] Zhang L, Fu K, Yang F, *et al.* Migration and transformation of heavy metals in the soil of the water-level fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir under simulated nitrogen deposition[J]. *Journal of Chemistry*, 2021: 1-10.
- [34] Cheng H, Liang A, Zhi 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.
- [35] Ye C, Cheng X, Liu W, *et al.* Revegetation impacts soil nitrogen dynamics in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Science of The Total Environment*, 2015, 517: 76-85.
- [36] 彭焯键, 王鹏程, 刘瑛, 等. 三峡库区消落带土壤重金属的分布特征与评价[J]. *环境科学与技术*, 2020(5): 187-192.
- [37] 杨丹, 谢宗强, 樊大勇, 等. 三峡水库蓄水对消落带土壤Cu、Zn、Cr、Cd含量的影响[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(7): 1283-1290.
- [38] 唐强, 贺秀斌, 鲍玉海, 等. 三峡水库干流典型消落带泥沙沉积过程[J]. *科技导报*, 2014, 1(24): 73-77.
- [39] 姚桂华, 吴东涛, 胡杨勇, 等. 淹水条件下有机肥对土壤重金属形态转化及迁移的影响[J]. *浙江农业学报*, 2016, 28(1): 127-133.
- [40] Guittonny-Philippe A, Masotti V, Hohener P, *et al.* Constructed wetlands to reduce metal pollution from industrial catchments in aquatic Mediterranean ecosystems: A review to overcome obstacles and suggest potential solutions[J]. *Environment International*, 2014(64): 1-16.
- [41] Kandpal G, Srivastava P C, Ram B. Kinetics of desorption of heavy metals from polluted soils: influence of soil type and metal source[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2005, 161(1): 353-363.
- [42] 张兆永, 姜逢清. 艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究[J]. *环境科学*, 2015, 36(2): 490-496.
- [43] Wang Ziquan, Wang Yan, Lei Hou, *et al.* Metal contamination in a riparian wetland: Distribution, fractionation and plant uptake[J]. *Chemosphere*, 2018, 200: 587-593.
- [44] 田娟, 刘凌, 王桂凤, 等. 变化的淹水条件对土壤磷素释放影响[J]. *辽宁工程技术大学学报:自然科学版*, 2008(5): 766-769.
- [45] Surridge B, H Ea Thwaite A L, Baird A J. The release of phosphorus to porewater and surface water from river riparian sediments[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, 36(5): 1534-1544.

# Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Water Level Fluctuating Zone of Zigui Section in Three Gorges Reservoir Area

CHEN Tian<sup>1</sup>, CHENG Rui-me<sup>1,2</sup>, XIAO Wen-fa<sup>1,2</sup>, SHEN Ya-fei<sup>1,2</sup>,  
ZENG Li-xiong<sup>1,2</sup>, WANG Li-jun<sup>1</sup>, SUN Peng-fei<sup>1</sup>, ZHANG Meng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** [Objective] To analyze and compare the temporal and spatial differences in soil heavy metal content in the water-fluctuation zone of the Three Gorges reservoir area, study the current situation of metal pollution in this area, and put forward prevention and control measures. [Methods] The soils in the flooded area (elevation 145-175 m) and unflooded area (elevation 175-185 m) from the water-fluctuation zone of the Three Gorges reservoir area in the Zigui section in 2008, 2014, and 2018 were used for the study. We examined the physicochemical properties and copper (Cu), iron (Fe), manganese (Mn), and zinc (Zn) contents of these samples through the digestion method. [Results] The results showed that: (1) The contents of soil total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and organic matter (SOM) in the flooded area continued to decrease from 2008 to 2018. The soil pH increased compared with 2008 and it was close to 7 in 2018. (2) As of 2018, the contents of Cu, Fe, Mn and Zn in the soil of water level fluctuating zone have been increasing. The geological accumulation index pollution degree of Zn in the middle and lower part of water level fluctuating zone (elevation 145~165 m) and the soil in the non-flooded area was "strong"; Cu in the lower part of the water level fluctuating zone (elevation 145~165 m) and Zn in the soil in the middle and lower part of water level fluctuating zone and non-flooded area had caused slight ecological risks. (3) The correlation analysis between soil physical and chemical properties and the contents of four heavy metals in water level fluctuating zone showed that the rise of soil pH might bring the risk of increasing the accumulation of four heavy metals. The increase of soil TP might reduce the accumulation of four heavy metals in the soil, while the increase of soil TN content might cause the increase of soil Fe and Mn in the non-flooded area and the decrease of Cu and Zn in the flooded area. [Conclusion] In summary, the operation of the Three Gorges Dam has caused a decline in the quality of soil nutrients such as reducing nitrogen and phosphorus contents. The status of soil heavy metal pollution in water level fluctuating zone cannot be ignored, especially the ecological risks of Cu and Zn. Therefore, long-term monitoring should be continued, and artificial intervention means such as changing vegetation composition can be considered if necessary.

**Keywords:** the water-fluctuation zone; heavy metals; spatiotemporal variation; ecological risk; the physical and chemical properties

(责任编辑: 崔 贝)