

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.12.003

三峡库区澎溪河流域不同高程消落带土壤磷形态特征

方 博¹, 王 超¹, 王 翀¹, 周小明¹, 方 芳¹, 郭劲松¹, 李 哲²

(1. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045;

2. 中国科学院 15025420401 重庆绿色智能技术研究院, 重庆 401122)

摘 要:研究了三峡库区澎溪河流域落干期不同高程消落带土壤不同磷形态分布特征,并分析了各形态磷与土壤理化性质之间的相关性。结果表明,澎溪河流域消落带土壤 TP 含量均值为 599.00 mg/kg,消落带土壤 TP、IP 含量均沿高程逐渐下降。消落带土壤活性磷(Ac-P)含量明显低于 180 m 的岸边土壤,155,145 m 消落带土壤 Ac-P 含量低于 165 m 消落带土壤,与 140 m 沉积物中 Ac-P 含量相近,表明频繁的干湿交替会加剧消落带 Ac-P 的流失。消落带土壤 TP、IP 和 Ca-P 均与 pH 值表现出显著的负相关关系,表明 pH 对土壤磷形态的含量有着重要影响;OM 与 Or-P 表现出极显著的正相关性,表明有机质的输入在一定程度上会影响 Or-P 的含量。

关键词:三峡库区;消落带;高程;磷形态

中图分类号:X131.1

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2018)12-020-10

Characterizations of phosphorus fractions in the soil at different altitudes of water-level-fluctuation zone, Three Gorges Reservoir

FANG Bo¹, WANG Chao¹, WANG Chong¹, ZHOU Xiaoming¹,

FANG Fang¹, GUO Jinsong¹, LI Zhe²

(1. College of Urban Construction & Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P.R.China; 2. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 401122, P.R.China)

Abstract: The concentrations of different phosphorus fractions in the soils obtained in the Water-Level-Fluctuation Zone (WLFZ) of the Pengxi River Basin, Three Gorges Reservoir were analyzed. In addition, correlations between these concentrations and different physical-chemical characteristics of the soil samples were also analyzed. The results indicate that the average concentration of total phosphorus (TP) is 599.00 mg/kg. And both the TP and inorganic phosphorus(IP) concentrations gradually decrease with the decrease of altitude. The concentrations of active phosphorous(Ac-P) in the soils of the WLFZ significantly less than those of the riverside at the altitude of 180 m, Ac-P concentrations at the elevation of 155 m, 145 m are close to those of the sediment at the elevation of 140 m but lower than the concentration detected in the samples obtained at the altitude of 165 m. The distribution of Ac-P concentrations at different altitudes indicate that the frequent dry-wet alternations result in the loss of Ac-P in the soils. There is a

收稿日期:2018-07-03

基金项目:国家自然科学基金项目(41430750,51679226)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China(41430750,51679226).

作者简介:方博(1994—),男,重庆大学硕士研究生,主要研究方向为水体富营养化和水处理,(E-mail)fangbo_cq@cqu.edu.cn.

通讯作者:方芳,女,重庆大学教授,(E-mail)fangfangcq@cqu.edu.cn.

significant negative correlation between the pH and the TP, IP and Ca-P, meaning the increase in pH result in the decrease in TP, IP and Ca-P, and the organic matter concentration is positively correlated with the organic phosphate concentration, indicating that the input of organic matter affected the concentration of organic phosphate.

Keywords: Three Gorges Reservoir; water-level-fluctuating zone; altitudes; phosphorus forms

磷素是水体富营养化的主要限制性因子,也是三峡库区支流发生水华的重要营养元素。三峡库区消落带经历了周期性的淹水和落干,磷可从消落带土壤中释放出来,加重支流水体富营养化程度^[1-3]。Wu 等^[4]调查了三峡库区消落带土壤的磷形态分布,估算出三峡库区消落带中可被生物直接利用的生物磷(Bio-P)沉积速率可达到 2.14×10^4 t/a,而其释放速率可达到 0.16~2.75 t/a。

随着三峡库区水位周期性涨落,频繁的干湿交替会引起消落带土壤理化性质和环境条件的改变,从而影响到消落带土壤磷素赋存形态转化和迁移^[5-6]。三峡库区消落带土壤磷的形态分布特征长期受到国内外的关注^[7-9],曹琳等^[10]研究了经历完整反季节干湿交替周期后消落带土壤磷形态的变化,揭示了消落带土壤磷的源/汇转化趋势;刘娜等^[11]对三峡水库腹心地带消落带土壤及土壤上层新生的沉积物磷形态进行分析,发现新生沉积物吸附磷的能力高于土壤;张彬等^[12]研究发现,消落带土壤的活性磷(BAP)组分含量占比较高,对水体富营养化的潜在影响不容忽视。这些研究一定程度上分析了三峡库区消落带土壤磷形态分布特征,对了解三峡库区消落带土壤磷素转化和迁移具有重要意义。但是三峡库区水位在 145~175 m 之间涨落,库区消落带高差达到 30 m,在水库低水位运行期,库区水位主要在 145~155 m 内频繁波动,偶尔也会在 155 m 以上水位运行,使得 145,155 m 消落带会在短时间内经历多频次干湿交替过程。因此,不同高程消落带在落干期干湿交替频次不同,可能会呈现出不同的磷形态分布特征,但目前尚未有对消落带不同高程土壤磷形态的研究。

笔者以三峡水库一级支流——澎溪河流域消落带土壤为研究对象,探讨不同高程消落带土壤的磷形态分布特征、土壤理化性质及两者之间的关系,以期揭示不同频次干湿交替对不同高程消落带土壤磷迁移和转化的影响,这对深入了解三峡库区水位涨落下消落带土壤磷释放风险有着重要意义。

1 材料与方法

1.1 区域概况

澎溪河是三峡库区腹心第一大支流,流域面积约 5 200 km²,消落带总面积 55.50 km²,是三峡库区消落带面积最大的支流消落带,消落带土壤以水稻土、紫色土为主,缓坡消落带占 60%。高程 145~155 m 之间的消落带面积为 75.38 km²,占消落带总面积的 21.60%;155~165 m 之间的消落带面积为 139.23 km²,占消落带总面积的 39.90%;165~175 m 之间的消落带面积为 134.33 km²,占消落带总面积的 38.49%^[13]。

1.2 样品采集与处理

沿澎溪河回水区末端至入河口共设置 7 个采样点位,依次为开县、渠口、养鹿、渠马、高阳、黄石和双江,记为 S1、S2、S3、S4、S5、S6 和 S7,点位分布如图 1 所示,具体点位位置如表 1 所示。

表 1 采样点位置

Table 1 The location of sampling sites

点位	地名	位置坐标
S1	开县	E108°27.536', N31°10.834'
S2	渠口	E108°40.826', N30°59.998'
S3	养鹿	E108°33.907', N31°05.006'
S4	渠马	E108°37.226', N31°07.962'
S5	高阳	E108°40.451', N31°06.184'
S6	黄石	E108°40.826', N30°59.996'
S7	双江	E108°40.562', N30°56.898'

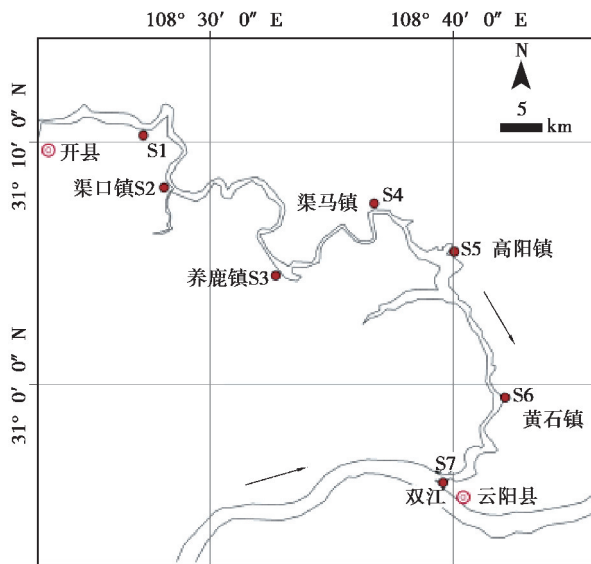


图 1 采样点示意图

Fig.1 Sampling sites in the Pengxi River

于 2016 年 8 月在 S1~S7 点位分别采集 180,165,155,145 和 140 m 高程土壤,共计 31 个土壤样本,其中由于条件限制,未能采集 S1~S3 的 140 m 高程土壤以及 S1 的 145 m 高程土壤。不同高程消落带土壤所经历的淹水情况见表 2。使用洛阳铲采集 145~180 m 高程表层(0~20 cm)混合土样,使用蚌式采泥器采集 140 m 高程土壤,均置于塑料袋中,于当天运回实验室进行冷冻干燥、研磨过 100 目筛后,保存在封口袋中,置于冰箱冷冻存放。

表 2 不同高程消落带土壤淹水情况

Table 2 Flooding situation in the soil at different altitudes of WLFZ

高程/m	淹水情况	类别
180	长期出露	岸边土壤
165	经历周期性淹水和出露,但出露时间较长,且受到农业活动影响较大	消落带土壤
155	经历周期性淹水和出露,且在汛期内由于洪水位变化,淹没与出露会交替出现	
145		
140	长期淹没	沉积物

1.3 分析测定方法

土壤总磷(TP)、无机磷(IP)、有机磷(Or-P)采用 Ruban 等^[14]欧洲标准测试委员会框架下发展的 SMT 分析方法。无机磷形态分级方法采用 Chang 等^[15]提出的 C-J 化学连续提取法,将土壤无机磷分为可交换态磷(Ex-P)、铝结合磷(Al-P)、铁结合磷(Fe-P)、闭蓄态磷(O-P)以及钙结合磷(Ca-P),具体提取步骤如图 2 所示。

土壤有机质(OM)采用 550℃ 烧失量法测定^[16],即在马弗炉 550℃ 下烘烤 4 h,损失量即为有机质含量,土壤 pH 采用电极法测定,水土比为 1:2.5。

1.4 数据处理

对 7 个点位 31 个土壤样本进行磷形态和理化性质的测定,数据分析采用 Excel 2010、SPSS 19.0 及 Origin 8.51 软件。

本文中各种磷组分之间的关系如下所示,其中因 Ex-P、Al-P、Fe-P 容易释放到水体中,故被称为活性磷(Ac-P)^[10]。

$$\begin{aligned}
 & \text{TP(土壤总磷)} = \text{IP(无机磷)} + \text{Or-P(有机磷)}; \\
 & \text{IP(无机磷)} = \text{Ex-P(可交换态磷)} + \text{Al-P(铝结合态磷)} + \text{Fe-P(铁结合态磷)} + \\
 & \quad \text{O-P(闭蓄态磷)} + \text{Ca-P(钙结合态磷)}; \\
 & \text{Ac-P(活性磷)} = \text{Ex-P(可交换态磷)} + \text{Al-P(铝结合态磷)} + \text{Fe-P(铁结合态磷)}; \\
 & \text{非活性磷} = \text{O-P(闭蓄态磷)} + \text{Ca-P(钙结合态磷)}; \\
 & \text{TP(土壤总磷)} = \text{Ac-P(活性磷)} + \text{非活性磷} + \text{Or-P(有机磷)}.
 \end{aligned}$$

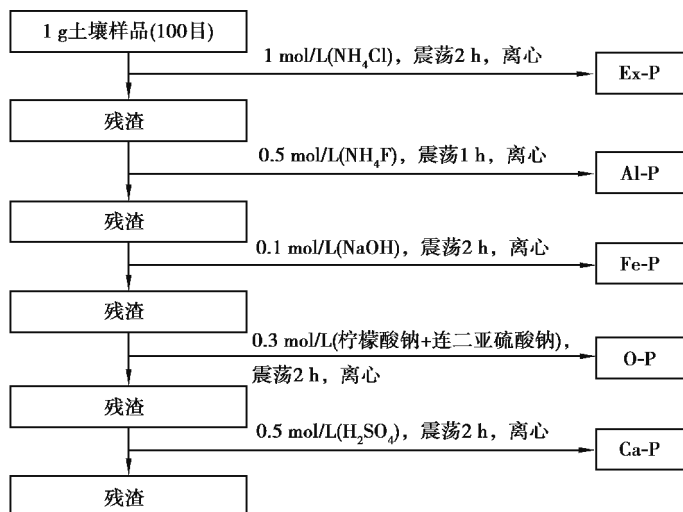


图 2 C-J 连续分级提取法

Fig.2 C-J sequential extraction procedure for phosphorus fractions in soils

2 结果与讨论

2.1 消落带土壤的理化性质

表 3 为消落带土壤理化性质与磷含量测定结果。

表 3 消落带土壤理化性质与磷含量

Table 3 Basic characteristics and phosphorus content of the soils in the WLFZ

点位	土壤类型	pH	OM/(mg · g ⁻¹)	TP/(mg · kg ⁻¹)	IP/(mg · kg ⁻¹)	Or-P/(mg · kg ⁻¹)
S1	180 m 土壤	7.41	37.50	986.8	964.6	44.40
	165 m 土壤	7.42	35.70	478.6	370.0	93.70
	155 m 土壤	7.56	43.80	449.0	338.0	74.00
S2	180 m 土壤	7.01	37.10	305.9	130.8	120.90
	165 m 土壤	7.30	56.10	562.5	370.0	162.80
	155 m 土壤	7.51	41.40	481.1	357.7	106.10
	145 m 土壤	7.54	52.00	587.1	402.1	182.60
S3	180 m 土壤	3.83 [*]	36.50	715.4	638.9	106.10
	165 m 土壤	7.42	50.80	495.9	392.2	130.80
	155 m 土壤	7.49	47.80	601.9	537.8	120.90
	145 m 土壤	7.52	37.50	606.9	611.8	76.50

续表 3

点位	土壤类型	pH	OM/(mg · g ⁻¹)	TP/(mg · kg ⁻¹)	IP/(mg · kg ⁻¹)	Or-P/(mg · kg ⁻¹)
S4	180 m 土壤	6.47	41.20	594.5	439.1	111.00
	165 m 土壤	7.37	54.10	695.7	560.0	96.20
	155 m 土壤	7.42	47.80	567.4	409.5	81.40
	145 m 土壤	7.41	43.40	611.8	451.5	108.60
	140 m 土壤	7.56	27.40	446.5	394.7	61.70
S5	180 m 土壤	3.85*	31.50	515.60	429.3	83.90
	165 m 土壤	6.86	36.70	873.3	794.4	96.20
	155 m 土壤	7.27	52.40	616.7	481.1	140.60
	145 m 土壤	7.25	48.20	601.9	481.1	140.60
	140 m 土壤	7.53	51.50	601.9	456.4	160.40
S6	180 m 土壤	7.25	40.90	745.0	638.9	135.70
	165 m 土壤	7.14	59.50	557.5	382.4	199.80
	155 m 土壤	7.20	51.40	532.9	352.8	167.80
	145 m 土壤	7.35	44.00	508.2	357.7	148.00
	140 m 土壤	7.25	41.90	557.5	404.6	138.20
S7	180 m 土壤	7.16	39.20	725.3	641.4	69.10
	165 m 土壤	6.73	50.60	675.9	564.9	108.60
	155 m 土壤	7.26	54.80	725.3	616.7	123.40
	145 m 土壤	7.33	57.80	740.1	599.5	153.00
	140 m 土壤	7.27	64.00	789.4	550.1	190.00

*.S3 和 S5 点位 180 m 土壤 pH 明显偏低,可能是样品的个体差异所致,该点位未纳入 180 m 土壤数据的分析。

研究区域内土壤 pH 值为 6.73~7.56,整体上消落带土壤 pH 呈弱碱性,且岸边土壤 pH 值小于不同高程消落带土壤和沉积物的 pH 值,这可能与澎溪河流域水体呈弱碱性有关^[17]。

研究区域内土壤有机质 OM 含量为 27.4~64.0 mg/g,均值为 45.7 mg/g。岸边土壤、消落带 165,155,145 m 土壤和沉积物土壤 OM 平均值分别为 39.2,49.1,48.5,47.2,46.2 mg/g,可以看出岸边土壤 OM 含量低于消落带土壤 OM。其原因可能是消落带淹水以后,消落带内生长的植物逐渐腐败,在微生物的作用下植物残体成为新的有机质来源,使得消落带土壤有机质增加^[18]。值得注意的是,不同高程消落带土壤 OM 含量表现为 165 m>155 m>145 m,这可能是由于高程大的消落带土壤出露时间相对较长,且消落带出露期日照强,气温高,植物生长更茂盛,从而淹水以后植物腐败而形成的有机质更多,同时高程大的消落带受到外源污染的程度相对更高,因而其土壤 OM 含量也越高。

2.2 消落带土壤磷含量

研究区域内不同高程土壤的总磷(TP)、无机磷(IP)和有机磷(Or-P)含量分布如图 3 所示。

由表 3 和图 3 可知,代表岸边土壤的 180 m 高程土壤总磷(TP)含量为 305.90~986.78 mg/kg,均值为 671.50 mg/kg。不同高程(145~165 m)消落带土壤总磷(TP)含量为 448.98~873.30 mg/kg,均值为 599.00 mg/kg。代表沉积物的 140 m 高程土壤 TP 含量为 446.52~789.42 mg/kg,均值为 598.85 mg/kg。从高程上看,土壤 TP 含量沿高程逐渐下降,岸边土壤 TP 含量高于消落带土壤和沉积物 TP 含量,但后两者的差别不大。

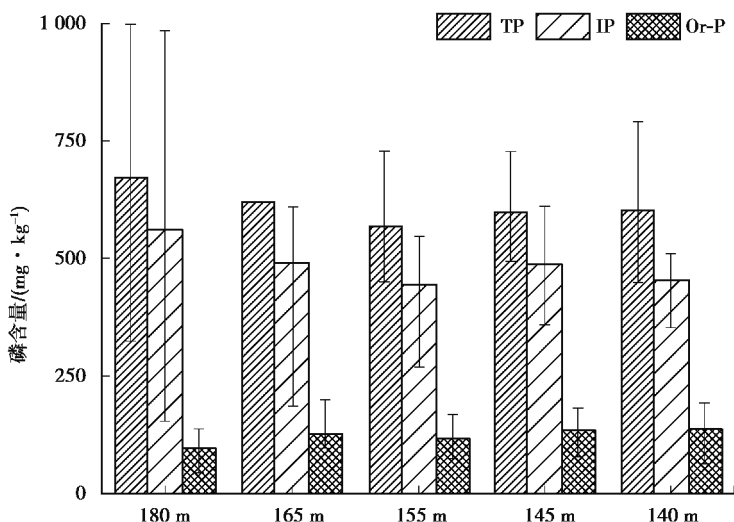


图 3 流域内不同高程土壤磷含量均值

Fig.3 The average concentration of phosphorus in the soils at different altitudes of WLFZ

土壤无机磷(IP)主要是吸附在土壤颗粒上的正磷酸盐(H_2PO_4^- 或 HPO_4^{2-})或与某些金属离子结合的磷^[19]。不同高程消落带土壤 IP 含量为 337.97~794.36 mg/kg,均值为 472.15 mg/kg;岸边土壤无机磷(IP)含量为 130.75~964.58 mg/kg,均值为 562.96 mg/kg;沉积物土壤 IP 含量为 394.71~550.13 mg/kg,均值为 451.45 mg/kg。岸边土壤、不同高程消落带土壤以及沉积物中 IP 含量沿高程逐渐下降,在 155 m 高程以下土壤 TP 与 IP 含量达到相对稳定的状态。岸边土壤、消落带和沉积物土壤中 IP 占 TP 百分比均值分别为 77.77%,78.25%和 76.62%,说明流域内土壤 TP 主要以 IP 为主。

土壤有机磷(Or-P)主要是以磷脂、磷蛋白、核酸、磷酸糖磷酸盐等形式存在^[20]。岸边土壤 Or-P 含量为 44.41~135.68 mg/kg,均值为 96.21 mg/kg,不同高程消落带土壤 Or-P 含量为 74.01~199.82 mg/kg,均值为 126.01 mg/kg,沉积物土壤 Or-P 含量为 69.68~88.40 mg/kg,均值为 76.62 mg/kg。岸边土壤、消落带和沉积物土壤中 Or-P 占 TP 百分比均值分别为 20.05%,21.62%和 22.32%,可以看到消落带土壤 Or-P 的绝对含量和相对含量均高于岸边土壤 Or-P,其变化趋势与 OM 含量分布相似。有研究表明,土壤干燥再湿润过程会增加磷的释放,其中 Or-P 可占到释放磷素的 56%~100%^[21]。因此,较高的 Or-P 含量和占比增加了消落带土壤再次覆水时磷释放的风险。

2.3 消落带土壤无机磷形态分布特征

笔者采用 C-J 法将无机磷形态分为可交换态磷(Ex-P)、铝结合磷(Al-P)、铁结合磷(Fe-P)、闭蓄态磷(O-P)以及钙结合磷(Ca-P),测定结果如图 4 所示。

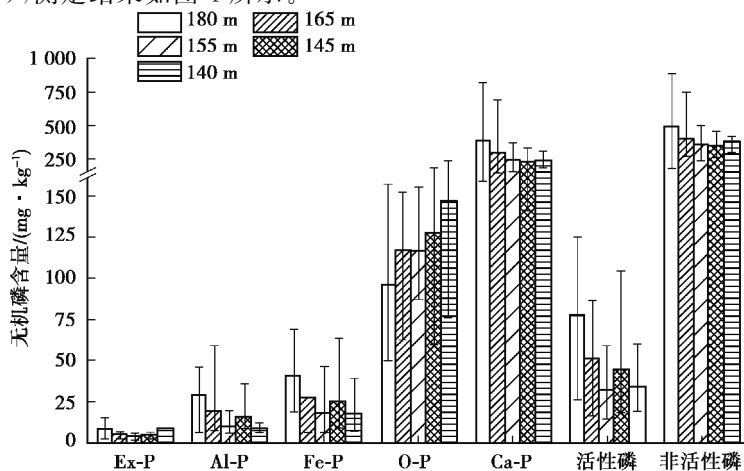


图 4 消落带土壤无机磷形态分布与含量

Fig.4 The concentrations and distribution of different phosphorus fractions in the soils at different altitudes of WLFZ

可交换态磷(又称不稳定态磷, Ex-P)是一种极易溶解于水中的磷^[22]。铝结合态磷(Al-P)是与 Al 的氧化物或氢氧化物结合的磷^[23], 铁结合态磷(Fe-P)是与 Fe 的氧化物或氢氧化物结合的磷^[24], 这两种形态磷在氧化还原电位、pH 等环境条件改变时能转化成溶解性磷, 释放到上覆水中。由于 Ex-P、Al-P、Fe-P 活性较强, 容易释放到水体中, 故又被称为活性磷 Ac-P^[10]。闭蓄态磷(O-P)是外层包裹着铁氧化物的还原性磷酸铁以及磷酸铝, O-P 的形成与土壤物理风化和化学强度呈显著相关, 具有明显的地质学意义^[25], 在较强还原性条件下, 外层的氧化铁可被还原成二价铁, 从而溶解到水中被生物所利用。钙结合态磷(Ca-P)是难以被生物利用的磷形态, 主要来源于自生磷灰石、沉积碳酸钙以及生物骨骼等磷矿物^[26]。

由图 4 可知, 消落带土壤各无机磷形态含量表现为 $\text{Ca-P} > \text{O-P} > \text{Fe-P} > \text{Al-P} > \text{Ex-P}$ 。其中 165, 155, 145 m 消落带土壤 Ex-P 的含量均值分别为 4.68, 3.92 以及 4.58 mg/kg, 低于岸边土壤的 8.05 mg/kg。165, 155, 145 m 消落带土壤 Al-P 的含量均值分别为 19.32, 9.94 以及 14.85 mg/kg, 明显低于岸边土壤的 28.66 mg/kg, 其中沉积物 Al-P 的含量均值为 8.44 mg/kg, 与 155, 145 m 消落带土壤 Al 含量接近。165, 155, 145 m 消落带土壤 Fe-P 的含量均值分别为 26.85, 17.96 以及 24.87 mg/kg, 均小于岸边土壤的 40.24 mg/kg, 略大于沉积物土壤的 17.39 mg/kg。消落带土壤 Ac-P 均值含量为 42.33 mg/kg, 远低于岸边土壤的 76.95 mg/kg。不同高程消落带土壤中, 165 m 消落带土壤 Ac-P 含量为 50.85 mg/kg, 155 和 145 m 消落带土壤 Ac-P 含量分别为 31.82 和 44.30 mg/kg, 可以看出, 相比于岸边土壤, 各高程消落带土壤 Ac-P 含量显著下降。值得注意的是, 155 m 消落带和 145 m 消落带土壤 Ac-P 含量均低于 165 m 消落带土壤的 Ac-P 含量。

相比于岸边土壤, 消落带土壤淹水以后, 土壤由好氧环境转为厌氧环境, 氧化还原电位、DO 降低, 此时与三价铁结合的难溶解磷酸盐转化成易溶解二价铁磷酸盐, 同时生成无定形 Al 胶体^[23], 一部分 Fe-P 和 Al-P 释放到水体中, 使得消落带土壤中 Fe-P/Al-P 的含量降低。而在夏季出露期, 由于汛期雨水充沛, 库区水位在 145~155 m 内波动, 导致 145 和 155 m 消落带土壤在较短的时期内经历了相对频繁的干湿交替过程, 145 和 155 m 消落带土壤氧化还原电位、DO 等环境条件会反复发生变化, 从而导致 Fe-P/Al-P 的释放进一步加剧。同时, 消落带土壤淹水以后, 大量植物在微生物的作用下分解有机质产生大量低分子有机酸, 有机酸会与 Ca、Fe、Al 等金属离子发生络合反应, 使得 Fe-P/Al-P 溶解到上覆水中, 促进土壤磷的释放^[27]。相比于 165 消落带, 145, 155 m 消落带在出露期会反复经历淹水过程, 植物淹水后产生的有机酸增强了 145, 155 m 消落带土壤磷的活性, 使得 145, 155 m 消落带土壤 Ac-P 的含量进一步降低。此外, 消落带土壤在出露期由于蒸发作用失去水分, 土壤间隙水中磷酸盐会向上迁移, 集聚在土壤表层; 再次覆水时, 由于水分溶解氧充足, 磷的释放量会成倍增加^[28], 这也可能会导致 145, 155 m 消落带土壤 Ac-P 含量低于 165 m 消落带。这些因素共同促进了消落带土壤中活性磷的释放, 使得不同高程消落带上的磷形态呈现出不同的分布特征。

沉积物土壤中的 Ac-P 含量与 145 和 155 m 消落带土壤中的含量差异不大, 原因可能是消落带土壤受到坡面侵蚀和波浪侵蚀, 这种侵蚀带来的大量土粒进入水体形成泥沙, 在上覆水的作用下, 细颗粒逐渐向下迁移^[29], 泥沙逐渐迁移到 145 m 最低水位以下, 导致沉积物土壤中的活性磷含量与消落带土壤中的含量无明显差异。

闭蓄态磷(O-P)和钙结合态磷(Ca-P)性质较稳定, 统称为非活性磷。不同高程消落带土壤 O-P 含量为 59.22~184.93 mg/kg, O-P 占 TP 比值为 7.15%~26.96%, 均值为 20.60%, 岸边土壤和沉积物土壤 O-P 占 TP 比值分别为 20.98% 和 23.8%。不同高程消落带土壤 Ca-P 含量为 140.60~741.13 mg/kg, 均值为 307.90 mg/kg, 其中 Ca-P 占 TP 百分比均值为 50.15%, 岸边土壤和沉积物土壤 Ca-P 占 TP 百分比均值分别为 58.64% 和 50.15%。研究区域内 Ca-P 是土壤中主要的磷形态, 这与徐德星等^[19]和曹琳等^[10]的研究结果一致。相比于 Ex-P、Al-P 和 Fe-P, O-P 和 Ca-P 各高程土壤之间含量差别不大, 主要原因在于 O-P 和 Ca-P 性质较为稳定, 外界环境很难达到其释放条件, 故其含量分布差别不大。

2.4 消落带土壤磷形态与理化性质的相关性

分析土壤磷形态与理化性质的相关性有利于深入了解土壤磷形态的分布特征, 并且能反映出相关环境因素对土壤磷形态的影响, 由于消落带土壤受到的环境影响较为显著, 且对水体的磷素水平有直接的贡献, 故对消落带土壤磷形态与理化性质进行相关性分析, 结果如表 4 所示。

表 4 消落带土壤理化性质与磷形态相关性分析

Table 4 Correlation analysis between concentrations and physical-chemical characteristics in WLFZ soil

项目	TP	IP	Or-P	Ex-P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca-P	pH	OM
TP	1									
IP	0.928**	1								
Or-P	-0.059	-0.292	1							
Ex-P	0.294	0.201	0.198	1						
Al-P	0.269	0.131	0.046	0.251	1					
Fe-P	0.329	0.230	0.189	-0.136	0.560*	1				
O-P	-0.149	-0.193	0.485*	0.374	0.030	0.013	1			
Ca-P	0.827**	0.795**	-0.282	0.029	0.009	0.149	-0.608**	1		
pH	-0.577**	-0.472*	-0.141	-0.217	0.027	0.014	0.407	-0.736**	1	
OM	0.130	-0.105	0.678**	0.491*	0.293	-0.008	0.416	-0.144	-0.149	1

说明: $n=20$; * 表示显著相关($P<0.05$), ** 表示极显著相关($P<0.01$)。

消落带土壤 TP 与 IP 和 Ca-P 均呈极显著相关,且消落带土壤 Ca-P 占 TP 比值为 50.15%,IP 占 TP 比值为 78.25%,说明 Ca-P 是 IP 的优势组分,IP 是 TP 的优势组分,TP 和 IP 含量的增加主要是来自 Ca-P。Fe-P 与 Al-P 呈显著相关,说明 Fe-P 与 Al-P 的来源可能相同。Ca-P 与 O-P 呈极显著负相关,且 Ca-P 的含量大于 O-P 含量,说明 Ca-P 与 O-P 可能存在相互转化的关系。此外,Fe-P/Al-P 与 Ex-P、Ca-P 不具有显著相关性,表明其含量相互独立,可能是不同形态磷来源不同所致。

消落带土壤 TP、IP 和 Ca-P 都与 pH 值表现出显著的负相关关系。当 pH 增加时,TP、IP 和 Ca-P 均表现出减小的趋势,说明 pH 在一定程度上会影响土壤磷形态的含量。当 pH 升高,体系中 OH^{-1} 可与磷酸盐阴离子发生交换,导致磷释放量增加^[30]。消落带土壤 OM 与 Or-P 表现出极显著的相关性($r=0.678$, $P<0.01$, $n=20$),张彬等^[12]在研究三峡水库腹心地带,徐德星等^[19]在研究三峡库区支流大宁河流域沉积物时均发现土壤 OM 与 Or-P 之间具有显著的相关性,这与本研究结果一致。原因在于有机质是 Or-P 的重要来源,有机质的含量以及分解速率在一定程度上会影响 Or-P 的分布。

3 结 论

1) 澎溪河流域内,165~145 m 消落带土壤总磷(TP)含量为 448.98~873.30 mg/kg,均值为 599.00 mg/kg,消落带土壤 TP 含量沿高程逐渐下降,其中 155,145 m 消落带土壤 TP 含量与沉积物相近;消落带土壤磷形态以 IP 为主,占 TP 百分比均值为 78.25%,IP 含量沿高程上变化趋势与 TP 基本一致。

2) 消落带土壤各无机磷形态含量大小为 Ca-P>O-P>Fe-P>Al-P>Ex-P;消落带土壤活性磷(Ac-P)含量明显低于岸边土壤,且 155,145 m 消落带土壤 Ac-P 含量低于 165 m 消落带土壤,与沉积物中 Ac-P 含量相近。干湿交替会显著降低消落带土壤中 Ac-P 的含量,而频繁地干湿交替则会进一步加剧 Ac-P 的流失。

3) 消落带土壤 TP、IP 和 Ca-P 均与 pH 值表现出显著的负相关关系,表明 pH 值对土壤磷形态的含量有着重要影响;OM 与 Or-P 表现出极显著的相关性,表明有机质的输入在一定程度上会影响 Or-P 的含量。

参考文献:

[1] 何立平,付川,谢昆,等. 三峡库区万州段不同类型消落带土壤磷形态贮存特征[J]. 长江流域资源与环境, 2014,23(4): 534-541.

HE Liping, FU Chuan, XIE Kun, et al. Soil phosphorus species and storage characteristics of different types in water

- fluctuation zone of the Wanzhou section of the Three Gorges Reservoir[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014,23(4):534-541. (in Chinese)
- [2] Ni Z K, Wang S R, Zhang L, et al. Role of hydrological conditions on organic phosphorus forms and their availability in sediments from Poyang Lake, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015,22(13):10116-10129.
- [3] Steinman A D, Ogdahl M E, Weinert M, et al. Water level fluctuation and sediment-water nutrient exchange in Great Lakes coastal wetlands[J]. Journal of Great Lakes Research, 2012,38(4):766-775.
- [4] Wu Y H, Wang X X, Zhou J, et al. The fate of phosphorus in sediments after the full operation of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Environmental Pollution, 2016,214:282-289.
- [5] 何宗健, 吴志强, 倪兆奎, 等. 江湖关系变化对鄱阳湖沉积物氨氮释放风险的影响[J]. 中国环境科学, 2014,34(5):1277-1284.
- HE Zongjian, WU Zhiqiang, NI Zhaokui, et al. The influence of the River-Lake relation changed on the sediments ammonia nitrogen release risk of Poyang Lake[J]. China Environmental Science, 2014,34(5):1277-1284. (in Chinese)
- [6] López P, López-Tarazón J A, Casas-Ruiz J P, et al. Sediment size distribution and composition in a reservoir affected by severe water level fluctuations[J]. Science of the Total Environment, 2016,540:158-167.
- [7] 潘婷婷, 赵雪, 袁轶君, 等. 三峡水库沉积物不同赋存形态磷的时空分布[J]. 环境科学学报, 2016,36(8):2968-2973.
- PAN Tingting, ZHAO Xue, YUAN Yijun, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of different phosphorus forms in sediments from the Three Gorges Reservoir[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016,36(8):2968-2973. (in Chinese)
- [8] Wang Y, Shen Z Y, Niu J F, et al. Adsorption of phosphorus on sediments from the Three-Gorges Reservoir (China) and the relation with sediment compositions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009,162(1):92-98.
- [9] Wang Y C, Niu F X, Xiao S B, et al. Phosphorus Fractions and its summer's release flux from sediment in the China's Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Environmental Informatics, 2015,25(1):36-45.
- [10] 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 Lin, JI Fangying. Phosphorus distribution characteristics in dry-wet alteration sediment of fluctuation zone in the Three Gorges Reservoir area[J]. Earth and Environment, 2013,41(2):126-131. (in Chinese)
- [11] 刘娜, 李璐璐, 魏世强. 三峡库区消落带沉积物与土壤磷形态及分配特征研究[J]. 水土保持学报, 2016,30(4):261-267,287.
- LIU Na, LI Lulu, WEI Shiqiang, et al. Phosphorus forms and distribution characteristics in sediments and soils of water-level-fluctuating zones of Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016,30(4):261-267, 287. (in Chinese)
- [12] 张彬, 方芳, 陈猷鹏, 等. 三峡水库消落区土壤理化特征及磷赋存形态研究[J]. 环境科学学报, 2012,32(3):713-720.
- ZHANG Bin, FANG Fang, CHEN Youpeng, et al. Phosphorus speciation and physical-chemical characteristics in the soils of water-level-fluctuating zone in the central district of Three Gorges Reservoir area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012,32(3):713-720. (in Chinese)
- [13] 张彬. 三峡水库消落带土壤有机质、氮、磷分布特征及通量研究[D].重庆: 重庆大学, 2013.
- ZHANG Bin. Study on distribution characteristics and flux of organic matter, nitrogen and phosphorus in the soil of WLFZ of Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.(in Chinese).
- [14] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, et al. Selection and evaluation of sequential extraction procedures for the determination of phosphorus forms in lake sediment[J]. Journal of Environmental Monitoring, 1999,1(1):51-56.
- [15] Chang S C, Jackson M L. Fractionation of Soil Phosphorus[J].Soil Science,1957,84(2):133-144.
- [16] 钱宝, 刘凌, 肖潇. 土壤有机质测定方法对比分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011,39(1):34-38.
- QIAN Bao, LIU Ling, XIAO Xiao. Comparative tests on different methods for content of soil organic matter[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2011,39(1):34-38. (in Chinese)
- [17] 王图锦, 杨清伟, 刘雪莲. 三峡库区172m蓄水位实现后干流水体溶解态重金属含量变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2013,22(9):1195-1200.
- WANG Tujing, YANG Qingwei, LIU Xuelian. Distribution of soluble heavy metal concentration in the water body in three gorges reservoir after its 172m impoundment[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013,22(9):1195-1200. (in Chinese)

- [18] 周健,李春辉,张志永,等. 淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征[J]. 环境科学, 2018,39(1):130-136.
ZHOU Jian, LI Chunhui, ZHANG Zhiyong, et al. Effects of flooding and drying on transformation of soil inorganic phosphorus in water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. Environmental Science, 2018,39(1): 130-136. (in Chinese)
- [19] 徐德星,秦延文,张雷,等. 三峡入库河流大宁河回水区沉积物和消落带土壤磷形态及其分布特征研究[J]. 环境科学, 2009,30(5):1337-1344.
XU Dexing, QIN Yanwen, ZHANG Lei, et al. Phosphorus forms and its distribution characteristics in sediments and soils of water-level-fluctuating zone of the backwater reach from input river of Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2009,30(5):1337-1344. (in Chinese)
- [20] Zhu Y R, Wu F C, He Z Q, et al. Characterization of organic phosphorus in lake sediments by sequential fractionation and enzymatic hydrolysis[J]. Environmental Science & Technology, 2013,47(14):7679-7687.
- [21] Turner B L, Haygarth P M. Phosphorus solubilization in rewetted soils[J]. Nature, 2001,411(6835):258.
- [22] Sun S, Huang S, Sun X, et al. Phosphorus fractions and its release in the sediments of Haihe River, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009,21(3):291-295.
- [23] 刘凯,倪兆奎,王圣瑞,等. 鄱阳湖不同高程沉积物中磷形态特征研究[J]. 中国环境科学, 2015,35(3):856-861.
LIU Kai, NI Zhaokui, WANG Shengrui, et al. Distribution characteristics of phosphorus in sediments at different altitudes of Poyang Lake[J]. China Environmental Science, 2015,35(3):856-861. (in Chinese)
- [24] Kraal P, Burton E D, Rose A L, et al. Sedimentary iron-phosphorus cycling under contrasting redox conditions in a eutrophic estuary[J]. Chemical Geology, 2015,392:19-31.
- [25] 冉小萌,蒋珍茂,何明靖,等. 外源磷在三峡库区典型土壤中的活性演变及形态转化[J]. 土壤学报, 2016,53(5): 1249-1261.
RAN Xiaomeng, JIANG Zhenmao, HE Mingjing, et al. Variation of extraneous phosphorus in activity and morphology in soils typical of the Three Gorges Reservoir Area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016,53(5):1249-1261. (in Chinese)
- [26] Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. Phosphorus fractionation in lake sediments-Lakes Volvi and Koronia, N. Greece [J]. Chemosphere, 2002,46(8):1147-1155.
- [27] 周驰,李阳,曹秀云,等. 风干和淹水过程对巢湖流域土壤和沉积物磷吸附行为的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(s2):10-17.
ZHOU Chi, LI Yang, CAO Xiuyun, et al. Effect of air-drying and flooding on phosphorus sorption behavior of soils and sediments along the aquatic-terrestrial ecotone of lake chaohu[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012,21(s2):10-17. (in Chinese)
- [28] 刘敏,侯立军,许世远,等. 潮滩“干湿过程”模式下营养盐的迁移、转化微观实验模拟[J]. 海洋学报(中文版), 2006,28 (1):169-175.
LIU Min, HOU Lijun, XU Shiyuan, et al. Simulation study on the transfer and transformation processes of nutrient under the exposure-immersion pattern of intertidal flat sediments[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006,28(1):169-175. (in Chinese)
- [29] 阎丹丹,鲍玉海,贺秀斌,等. 三峡水库蓄水后长江干支流及消落带泥沙颗粒特征分析[J]. 水土保持学报, 2014,28(4): 289-292.
YAN Dandan, BAO Yuhai, HE Xiubin, et al. Particle size characteristics of sediment in draw down area of upper Yangtze river and its major tributaries of Three Gorges Reservoir Area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,28(4): 289-292. (in Chinese)
- [30] 何力为,周学进,吉磊,等. 洱海表层沉积物中磷形态分布及 pH、DO 影响的分析[J]. 环境保护科学, 2017,53(3): 106-111.
HE Liwei, ZHOU Xuejin, JI Lei, et al. Analysis of phosphorus form distribution and influence by pH and DO in the surface sediment of Erhai Lake[J]. Environmental Protection Science, 2017,53(3):106-111. (in Chinese)