

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

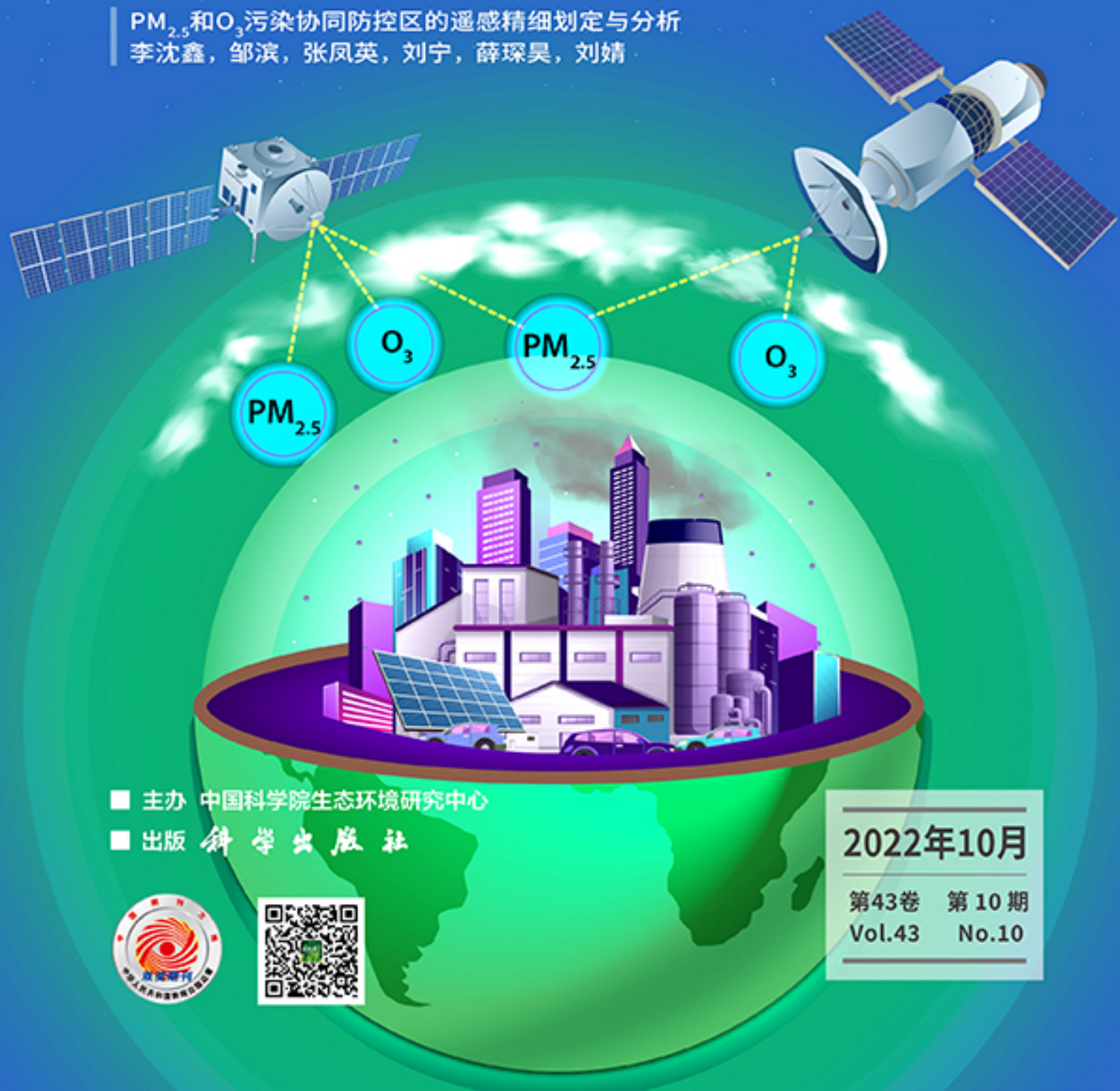
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析
李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年10月

第43卷 第10期
Vol.43 No.10

目次

PM _{2.5} 和O ₃ 污染协同防控区的遥感精细划定与分析	李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧 (4293)
广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析	裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 张涛, 邱晓暖, 王瑜, 王在华, 李梅 (4305)
佛山臭氧浓度预报方程的建立与应用	陈辰, 洪莹莹, 谭浩波, 司徒淑婷, 程银琳, 步巧利, 吴蒙, 潘巧英 (4316)
乌海市高分辨率大气污染源排放清单构建及其在臭氧污染成因探究中的应用	张瑞欣, 楚波, 尚春林, 曹喜萍, 李光耀, 朱玉凡, 刘晓, 夏佳琦, 陈强 (4327)
结合在线监测和自动识别系统分析东海沿岸船舶排放特征	邱浩, 刘丹彤, 吴杨周, 李思远, 丁朔, 胡康, 张家乐, 陈梅汀 (4338)
机动车制动磨损颗粒物及挥发性有机物的组分特征	门正宇, 刘笃优, 郭全有, 张静, 彭剑飞, 吴琳, 毛洪钧 (4348)
笼养鸡舍冬季挥发性有机物排放特征	曹甜甜, 郑云昊, 张羽, 王悦, 丛群欣, 王源昊, 董红敏 (4357)
上海市生活垃圾房气溶胶中可培养细菌污染状况及种群特征	卢冰洁, 张翔, 王川, 邱俊, 李丹 (4367)
浙江省2008~2018年人为源氨排放清单及分布特征	方利江, 杨一群, 叶观琼 (4380)
“双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图	薛英岚, 张静, 刘宇, 陈瑜, 孙健, 蒋洪强, 张伟, 曹东 (4392)
空间关联网络结构特征的减排效应: 基于城市群视角	郑航, 叶阿忠 (4401)
中国对外直接投资的减污降碳效应及其实现机制	白梓函, 吕连宏, 赵明轩, 张楠, 罗宏 (4408)
近年全国地表水水质变化特征	嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 杨凯 (4419)
湟水河流域地表水体微塑料分布、风险及影响因素	范梦苑, 黄懿梅, 张海鑫, 李好好, 黄倩 (4430)
汾河流域地表水化学同位素特征及其影响因素	赵春红, 申豪勇, 王志恒, 梁永平, 赵一, 谢浩, 唐春雷 (4440)
城镇化进程中珠江三角洲高锰地下水赋存特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 李海军 (4449)
喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析	鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 孙英 (4459)
重庆市老龙洞地下河流域硝酸盐来源和生物地球化学过程的识别	王雨畅, 杨平恒, 张洁茹 (4470)
蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析	欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李佳欣, 李玉鑫, 施军琼, 吴忠兴 (4480)
珠海市磨刀门水道输水水源水库群浮游植物群落特征及其环境驱动因子	张茉莉, 王思瑞, 昌盛, 王山军, 金德才, 樊月婷, 张坤峰, 谢琼, 付青 (4489)
营养物质对铜绿微囊藻生长和藻际细菌的影响	吕萍, 李慧莉, 徐勇, 郑效旭, 黄振华, 王聪, 徐圣君, 庄绪亮 (4502)
老化作用对微塑料吸附四环素的影响及其机制	王林, 王姝歆, 曾祥英, 何杨, 黄雯, 郑世界, 张建强 (4511)
沉积物和土壤中胶体对氯霉素吸附行为的影响	晏彩霞, 罗燕清, 聂明华, 周旋, 丁明军 (4522)
历史抗生素胁迫改变磺胺甲噁唑和甲氧苄啶对活性污泥的影响: ARGs及其潜在宿主	张忠兴, 樊晓燕, 李星, 高玉玺, 赵君如 (4536)
阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析	陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 王耀耀, 张睿东 (4545)
白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估	郑飞, 郭欣, 汤名扬, 朱冬, 董四君, 康乐, 陈兵 (4556)
基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析	龚仓, 王亮, 王顺祥, 张志翔, 董航, 刘玖芬, 王德伟, 严步青, 陈映 (4566)
燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险	车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 范辉, 魏明磊, 罗蓬, 郁金星 (4578)
海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别	杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 高健翁, 杨建坤, 胡树起, 唐世新 (4590)
九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价	张华兰, 于瑞莲, 王瑞安, 胡恭任, 黄华斌, 吴雅清 (4601)
我国茶叶主产区有机肥重金属含量现状	伊晓云, 方丽, 杨向德, 马立峰, 刘美雅, 张群峰, 倪康, 石元值 (4613)
甘肃省农业土壤邻苯二甲酸酯累积特征及来源分析	陈玉玉, 张光全, 张杨, 李明凯, 郝佳欣, 熊有才, 李崇霄, 曹靖 (4622)
三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征	高艺伦, 方芳, 唐子超, 张蕊, 蒋艳雪, 郭劲松 (4630)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性	李昕竹, 贡璐, 唐军虎, 罗艳, 丁肇龙, 朱海强, 张涵, 李蕊希 (4639)
黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤湿度的响应	孙亚荣, 王亚娟, 赵敏, 薛文艳, 梁思琦, 刘乐, 刘超, 陈云明 (4648)
基于Meta-analysis的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响	姜志翔, 崔爽, 张鑫, 郝敏, 孙德茂 (4658)
低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制	方治国, 谢俊婷, 杨青, 卢烨桢, 黄海, 朱芸娟, 尹思敏, 吴鑫涛, 都韶婷 (4669)
无机钝化剂对镉污染酸性水稻土的修复效果及其机制	张剑, 孔繁艺, 卢升高 (4679)
改良铅锌矿渣对栎树幼苗铅锌富集与耐性机制	谢天志, 陈永华, 苏荣葵, 刘慧, 姚海松 (4687)
CaO ₂ /FA复合材料富集磷效能及其回收物对土壤改良作用	岳薇, 李大鹏, 吴玲予, 王璐, 汤尧禹, 朱企, 黄勇 (4697)
早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响	黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 吴永沛, 李苹, 付弘婷, 唐拴虎, 刘一峰, 徐培智 (4706)
秸秆连续还田配施化肥对稻-油轮作土壤碳库及作物产量的影响	蔡影, 付思伟, 张博睿, 胡宏祥, 刘文雯, 俞金涛, 贾临东, 刘运峰 (4716)
化肥减量配施秸秆对双季稻田固氮微生物群落的影响	陈凯鹏, 韦菊娟, 陈丹, 王聪, 沈健林, 李勇, 吴金水 (4725)
化肥减量与有机物料添加对华北潮土微生物氮循环功能基因丰度和氮转化遗传潜力的影响	李胜君, 胡荷, 李刚, 王蕊, 赵建宁, 张贵龙, 修伟明 (4735)
长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征	胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 李剑虹, 陈剑平, 葛体达, 鲁顺保 (4745)
长期秸秆还田对潮土真菌群落、酶活性和小麦产量的影响	马垒, 李燕, 魏建林, 李子双, 周晓琳, 郑福丽, 吴小宾, 王利, 刘兆辉, 谭德水 (4755)
土壤改良剂对再生水滴灌根际土壤菌群多样性及病原菌和抗生素抗性基因丰度的影响	崔丙健, 崔二革, 刘春成, 胡超, 樊向阳, 李中阳, 高峰 (4765)
氮素对苜蓿植物修复垃圾堆场镉-多环芳烃复合污染土壤及土壤细菌群落结构的影响	李怡佳, 马俊伟, 李玉倩, 肖琛, 沈心怡, 牛云, 陈家军 (4779)
抗生素降解剂对猪粪堆肥腐熟和细菌群落演替的影响	李琳琳, 张昕, 马军伟, 孙万春, 成琪璐, 林辉 (4789)
《环境科学》征订启事 (4337) 《环境科学》征稿简则 (4407) 信息 (4521, 4705, 4800)	

三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征

高艺伦, 方芳, 唐子超, 张蕊, 蒋艳雪*, 郭劲松

(重庆大学环境与生态学院, 重庆 400044)

摘要: 磷酸酶可将有机磷矿化为无机磷, 对土壤有机磷转化具有重要作用, 然而目前鲜见关于三峡库区消落带土壤磷酸酶及其与磷形态转化的相关报道. 研究澎溪河流域落干期不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性的分布特征, 分析了磷酸酶活性与磷形态之间的相关性及其对磷形态的影响. 结果表明, 不同高程消落带土壤的 $\text{H}_2\text{O-P}_i$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 和 NaOH-P_i 含量均高于岸边土壤, 生物可酶解磷含量和 NaOH-P_o 含量随高程增加而升高. 冗余分析显示有机质和无定形铁锰含量是影响不同高程土壤有机磷形态的主要原因. 消落带土壤酸性磷酸酶、碱性磷酸酶、磷酸二酯酶(以 $p\text{-NP}$ 计)和植酸酶(以 P 计)活性均值分别为 1.40、2.60、0.44 和 11.43 $\mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 且消落带土壤各磷酸酶活性随高程增加而增大, 植物量和微生物量差异是导致消落带磷酸酶活性空间分布差异的重要原因. 整体上消落带土壤磷酸酶活性与各有机磷形态含量呈显著正相关, 而与生物可利用磷含量呈负相关. 较高高程消落带土壤磷酸酶活性较高而生物可利用磷含量较低, 在淹水初期磷酸酶介导的矿化有机磷为无机磷速率相对较高, 向上覆水体释放磷的风险也较大. 研究成果有助于全面理解三峡库区消落带土壤磷的地球化学循环.

关键词: 三峡库区; 消落带土壤; 高程; 磷形态; 磷酸酶活性

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)10-4630-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202111002

Distribution Characteristics of Soil Phosphorus Forms and Phosphatase Activity at Different Altitudes in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir

GAO Yi-lun, FANG Fang, TANG Zi-chao, ZHANG Rui, JIANG Yan-xue*, GUO Jin-song

(College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Phosphatases play important roles in converting organic phosphorus into inorganic phosphorus in soil. However, studies from this perspective on the water-level-fluctuation zone (WLFZ) of the Three Gorges Reservoir are limited. In this study, phosphatase activity and the forms of phosphorus were analyzed. Soil samples were collected in the river basin of the Pengxi River in the WLFZ during a drying period. The correlation between phosphatase activity and phosphorus forms and the impacts of phosphatase activity on the phosphorus forms were analyzed. The results showed that the contents of $\text{H}_2\text{O-P}_i$, $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$, and NaOH-P_i in the soils of the WLFZ were higher than those in the soils by the river. In addition, a higher altitude resulted in higher contents of bio-enzymatically hydrolysable phosphorus and NaOH-P_o . Furthermore, redundancy analysis (RDA) showed that the contents of organic matter and amorphous Fe and Mn were the main factors affecting soil organic phosphorus forms. The average activities of acid phosphomonoesterase (ACP), alkaline phosphomonoesterase (ALP), phosphodiesterase (PDE) (all in $p\text{-NP}$), and phytase (PAE) (in P) in the soils of the WLFZ were 1.40, 2.60, 0.44, and 11.43 $\mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, respectively. Moreover, the activities of different phosphatases increased with altitude. Soil plant biomass and microbial biomass were important reasons for the difference in spatial distribution of phosphatase activity in the soil of the WLFZ. Phosphatase activities were significantly positively correlated with the contents of organic phosphorus forms but negatively correlated with the content of bioavailable phosphorus. A higher soil phosphatase activity and a lower content of bioavailable phosphorus were usually detected in soil samples taken at a higher altitude. In the early stage of flooding, phosphatase converted organic phosphorus into inorganic phosphorus at a relatively high rate, and the risk of phosphorus release to the overlying water body was also high. This study contributed to a comprehensive understanding of the geochemical cycle of soil phosphorus in the soil of the WLFZ.

Key words: Three Gorges Reservoir; soils of water-level-fluctuation zone(WLFZ); altitude; phosphorus form; phosphatase activity

水库消落带(water-level-fluctuation zone, WLFZ)位于水陆交错带, 与水体存在着大量的物质交换, 是库区水体磷的重要来源^[1,2], 也是水库磷沉积的重要区域^[3]. 磷素是三峡库区水体富营养化的限制性因素之一, 其在消落带土壤与库区水体之间的转化对于控制水体的富营养化具有重要意义^[4].

土壤磷酸酶存在于细胞碎片、土壤和腐殖质中, 是植物和微生物分泌的可水解土壤有机磷的胞外酶. 一般认为植物和微生物可利用的磷主要是无机磷, 当环境中生物可利用磷含量较低时, 植物和微

生物会响应该环境变化而分泌各类磷酸酶^[5], 主要包括酸性磷酸单酯酶、碱性磷酸单酯酶、植酸酶和核苷酸酶等, 驱动有机磷矿化为无机磷, 提高了生物可利用磷的含量, 进而促进植物和微生物的生长. 可见, 磷酸酶可将有机磷矿化为无机磷的能力, 对土壤

收稿日期: 2021-11-01; 修订日期: 2022-02-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(32001195); 国家重点研发计划项目(2019YFD1100501); 中央高校基本科研业务费(2019CDQYCH011)

作者简介: 高艺伦(1996~), 男, 硕士, 主要研究方向为土壤污染物形态及土壤面源污染, E-mail: gaoyilun2463@163.com

* 通信作者, E-mail: jiangyanxue@cqu.edu.cn

中有机磷循环具有重要作用,同时磷酸酶活性也能反映土壤磷素的有效性,因此土壤磷酸酶活性与土壤磷形态具有相关性^[6],将磷酸酶活性与磷形态联合分析有助于更好地理解土壤磷素循环。

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 频繁波动,使得较低高程消落带在短时间内经历频繁的干湿交替过程^[7],因此不同高程的消落带淹水/出露的时长不同. 这样的水位变化改变了消落带土壤理化性质,也改变了消落带土壤动植物量和微生物量,导致土壤磷酸酶含量和活性也发生变化,进而影响消落带土壤磷形态的转化. 此外,不同高程消落带土壤的无机磷含量不同^[7,8],而无机磷含量也会影响土壤磷酸酶的含量和活性. 目前,针对三峡库区消落带土壤磷的赋存形态、时空分布特征、吸附释放规律等,学者们已开展了相关研究^[9~13],但是鲜见对三峡库区消落带磷酸酶及其在不同高程上分布特征的探讨,缺乏基于磷酸酶介导的有机磷形态分布及转化的相关研究。

本文通过研究澎溪河流域回水区不同高程消落带土壤理化性质、磷形态和磷酸酶活性的分布特征,探究磷酸酶活性与磷形态之间的相关性,及其对磷形态的影响,结果有助于深刻理解三峡库区消落带土壤磷的地球化学循环。

1 材料与方法

1.1 区域概况

澎溪河是三峡库区第一大支流,位于三峡库区

中部,介于 N31°00′ ~ 31°42′、E107°56′ ~ 108°54′之间,干流全长 182.4 km,流域面积5 172.5 km². 澎溪河流域属四川盆地东部的低山丘陵区,土壤主要为紫色土和黄壤土^[14]. 由于三峡水库周期性的水位变化,澎溪河流域形成了面积广泛的消落带。

1.2 消落带土壤样品采集与处理

从澎溪河回水区末端至入江口,布置了 7 个消落带采样点,依次为开县(KX)、渠口(QK)、养鹿(YL)、渠马(QM)、高阳(GY)、黄石(HS)和双江(SJ). 研究区域内采样点位分布如图 1 所示,采样点位置坐标及高程如表 1 所示。



图 1 澎溪河消落带采样点示意
Fig. 1 Sampling sites in Pengxi River WLFZ

表 1 消落带采样点位置坐标及高程
Table 1 Coordinate and altitudes of sampling sites

点位	采样点	经纬度坐标	采样高程/m
S1	开县 (KX)	E108°27'32.16", N31°08'20.88"	155
S2	渠口 (QK)	E108°29'2.58", N31°07'20.88"	145、155 和 165
S3	养鹿 (YL)	E108°33'54.42", N31°05'0.36"	145、155、165 和 175
S4	渠马 (QM)	E108°33'13.56", N31°07'57.72"	145、155、165 和 175
S5	高阳 (GY)	E108°40'27.06", N31°06'11.04"	145、155、165 和 175
S6	黄石 (HS)	E108°40'49.56", N30°59'59.76"	145、155、165 和 175
S7	双江 (SJ)	E108°40'33.72", N30°56'53.88"	145、155、165 和 175

于 2019 年 6 月在澎溪河流域采样点分别采集 145、155、165 和 175 m 高程消落带土壤,共 24 个样本,其中 KX 和 QK 点位由于地形条件限制,只有部分高程可采集土壤. 所选取的采样点消落带土壤坡度均为缓坡,土壤类型主要为紫色土,植被覆盖型主要为草本植物,沿程不同点位消落带土壤的地理环境差异较小. 不同高程消落带土壤所经历的淹水

和落干情况不同,145 m 高程土壤淹水时间较长,155 m 高程土壤频繁经历淹没与出露,165 m 高程土壤出露时间相对较长,175 m 高程土壤为岸边土壤,长期出露,用于对照分析。

使用洛阳铲采集消落带表层 5 cm 土壤,置于密封袋后保存于装有冰袋的保温箱中,于当天运回实验室. 仔细去掉土壤中植物残体和石砾后分为两份,

一份自然风干后,研磨过 10 目筛,贮藏于 -20°C 冰箱,用于土壤理化性质和磷形态测定;一份作为新鲜土壤样品研磨过 10 目筛后,贮藏于 4°C 冰箱,用于土壤磷酸酶活性测定。

1.3 分析测定方法

1.3.1 消落带土壤理化性质测定

消落带土壤 pH 值采用电极法测定^[15],含水率采用质量法^[15],有机质(OM)含量采用烧失量法^[16],无定形铁(Fe_{ox})和无定形锰(Mn_{ox})含量采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪测定^[15]。

1.3.2 土壤磷含量与磷形态测定

消落带土壤总磷(TP)、无机磷(IP)、有机磷(OP)含量采用欧洲标准测试委员会框架下发展的 SMT 法提取^[17],提取液中磷含量通过磷钼蓝比色法测定。

采用 Hedley 分级连续提取法对土壤中的磷进行分级连续提取^[18],具体步骤如图 2 所示。直接通过磷钼蓝比色法测定各提取液中磷含量,可获得各提取态无机磷 P_i ; 将各提取液用 5% 过硫酸钾溶液于 120°C 条件下消解 30 min 后,通过磷钼蓝比色法测定,获得各提取态总磷 P_t ; 各提取态有机磷 P_o 为 P_t 和 P_i 的差值^[19]。

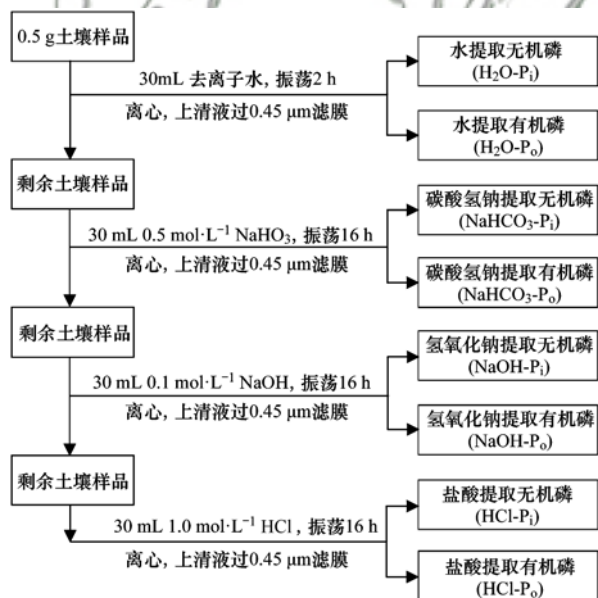


图 2 土壤磷形态 Hedley 连续分级提取法步骤

Fig. 2 Hedley sequential extraction procedure for phosphorus forms in soils

Hedley 分级连续提取法将无机磷形态分为 $\text{H}_2\text{O}-\text{P}_i$ (水提取无机磷)、 $\text{NaHCO}_3-\text{P}_i$ (碳酸氢钠提取无机磷)、 $\text{NaOH}-\text{P}_i$ (氢氧化钠提取无机磷) 和 $\text{HCl}-\text{P}_i$ (盐酸提取无机磷); 将有机磷分为 $\text{H}_2\text{O}-\text{P}_o$ (水提取有机磷)、 $\text{NaHCO}_3-\text{P}_o$ (碳酸氢钠提取有机磷)、 $\text{NaOH}-\text{P}_o$ (氢氧化钠提取有机磷) 和 $\text{HCl}-\text{P}_o$ (盐酸提

取有机磷)。

一般情况下, $\text{H}_2\text{O}-\text{P}_i$ 、 $\text{NaHCO}_3-\text{P}_i$ 和 $\text{NaOH}-\text{P}_i$ 被认为是土壤无机磷中可被生物利用且易释放到水里的部分^[20],可用三者加和 $\text{Bio}-\text{P}_i$ 表示为生物可利用磷。 $\text{H}_2\text{O}-\text{P}_o$ 、 $\text{NaHCO}_3-\text{P}_o$ 和 $\text{NaOH}-\text{P}_o$ 为土壤中被酶解的有机磷^[19],可用三者加和 $\text{Bio}-\text{P}_o$ 表示为生物可酶解磷。计算公式如下。

生物可利用磷:

$$\text{Bio}-\text{P}_i = \text{H}_2\text{O}-\text{P}_i + \text{NaHCO}_3-\text{P}_i + \text{NaOH}-\text{P}_i \quad (1)$$

生物可酶解磷:

$$\text{Bio}-\text{P}_o = \text{H}_2\text{O}-\text{P}_o + \text{NaHCO}_3-\text{P}_o + \text{NaOH}-\text{P}_o \quad (2)$$

1.3.3 消落带土壤磷酸酶活性测定

消落带土壤磷酸酶活性主要包括酸性磷酸酶(acid phosphomonoesterase, ACP)、碱性磷酸酶(alkaline phosphomonoesterase, ALP)、磷酸二酯酶(phosphodiesterase, PDE)和植酸酶(phytase, PAE)等。ACP、ALP 和 PDE 活性测定参考 Tabatabai 等^[21]提出的测定土壤磷酸酶活性的方法,以每 g 干土在 1 h 内水解对-硝基苯磷酸二钠或双(对-硝基苯基)磷酸酯后生成的对硝基苯酚(*p*-Nitrophenol, *p*-NP)的量表示,单位为 $\mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ (以 *p*-NP 计,下同)。PAE 活性采用偏钒酸铵钼黄法测定^[22],并参考 Zhu 等^[23]的方法进行改进,以每 g 干土在 1 h 内水解植酸钠后生成的无机磷含量表示,单位为 $\mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ (以 P 计,下同)。

1.4 数据处理

文中显著性分析及相关性分析采用 SPSS 22 软件($P < 0.05$ 为显著, $P < 0.01$ 为极显著),冗余分析(RDA)和绘图采用 Origin 2021 软件。

2 结果与分析

对澎溪河流域回水区消落带土壤沿程各点位的理化性质、磷形态和磷酸酶活性进行单因素方差分析,发现除 S6 点位 $\text{NaHCO}_3-\text{P}_o$ 与各点位差异较大外,整体上磷形态无显著差异,且磷酸酶活性也无显著差异。而高程上消落带土壤各点位的磷形态和磷酸酶活性差异显著,故后文主要针对不同高程展开研究。

2.1 消落带土壤理化性质

表 2 为消落带土壤理化性质。

由表 2 可知,澎溪河流域回水区消落带土壤沿程各点位土壤 OM、 Fe_{ox} 和 Mn_{ox} 不具有显著差异性($P > 0.05$),pH 整体呈中性,沿程不同点位消落带土壤的理化性质差异较小,对沿程消落带土壤的磷形态影响较小。

高程上, 145 ~ 165 m 消落带土壤 pH 整体上呈

表 2 消落带土壤理化性质¹⁾
Table 2 Physicochemical characteristics of soil in WLFZ

点位	pH 均值	OM 均值 /mg·g ⁻¹	Fe _{ox} 均值 /g·kg ⁻¹	Mn _{ox} 均值 /g·kg ⁻¹
S1	6.89b	41.79a	2.47a	0.14a
S2	7.02 ± 0.14a	56.00 ± 16.22a	2.17 ± 0.73a	0.28 ± 0.16a
S3	7.06 ± 0.16a	54.72 ± 11.71a	2.10 ± 0.30a	0.25 ± 0.13a
S4	6.72 ± 0.06b	61.48 ± 18.12a	1.96 ± 0.85a	0.22 ± 0.14a
S5	6.66 ± 0.14b	71.70 ± 7.75a	2.73 ± 0.23a	0.24 ± 0.09a
S6	7.24 ± 0.16a	71.23 ± 27.03a	2.66 ± 0.81a	0.31 ± 0.09a
S7	7.09 ± 0.10a	59.18 ± 15.78a	2.55 ± 1.22a	0.26 ± 0.12a
145 m	7.06 ± 0.26a	44.53 ± 11.24c	2.04 ± 0.37b	0.26 ± 0.07b
155 m	7.04 ± 0.23a	63.34 ± 8.78b	2.70 ± 1.04ab	0.31 ± 0.12ab
165 m	6.92 ± 0.24b	78.12 ± 13.79a	2.77 ± 0.47a	0.32 ± 0.06a
175 m	6.79 ± 0.22c	65.05 ± 13.20ab	1.89 ± 0.62b	0.13 ± 0.10b

1) 除 S1 外(由于 S1 只有一个高程),其余数值以均值 ± 标准差表示,同一列内不同小写字母表示的值有显著性差异($P < 0.05$)

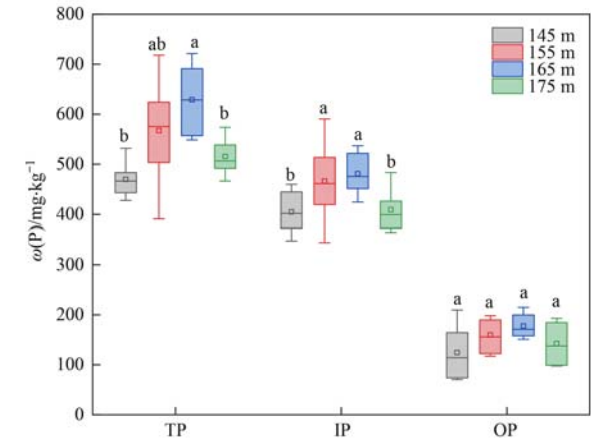
中性且变化范围较小,但均显著高于 175 m 岸边土壤($P < 0.05$). 由于库区水体呈微碱性^[24],因此不同高程消落带土壤在经历不同时长淹水后 pH 值有所不同,且淹水时间长的 145 m 消落带土壤 pH 值最高.

145 ~ 165 m 消落带土壤 OM 含量均值随高程增加而显著增加($P < 0.05$), 145 m 消落带土壤 OM 含量显著低于 175 m 岸边土壤($P < 0.05$).

145 ~ 165 m 消落带土壤无定形铁(Fe_{ox})和无定形锰(Mn_{ox})含量均值均高于 175 m 岸边土壤,这主要是由于消落带土壤 Fe_{ox} 和 Mn_{ox} 含量随土壤氧化还原状态不同而变化,在淹水时的无氧条件下无定形铁锰难以转化为晶体态^[25].

2.2 不同高程消落带土壤磷含量

研究区域内不同高程消落带土壤 TP、IP 和 OP 含量如图 3 所示.



不同小写字母表示不同高程差异显著($P < 0.05$)

图 3 不同高程消落带土壤磷含量

Fig. 3 Contents of phosphorus at different altitudes in the soil of WLFZ

由图 3 可知, 145 ~ 165 m 消落带土壤 TP、IP 和 OP 含量均随高程增加而增大,其中 145 m 消落

带土壤磷含量均小于 155 m 和 165 m 消落带土壤磷含量,而 155 m 和 165 m 消落带土壤磷含量均大于 175 m 岸边土壤. 145 m 和 165 m 消落带土壤 TP 和 IP 含量存在显著差异($P < 0.05$),OP 含量无显著差异($P > 0.05$).

145 ~ 165 m 消落带土壤 IP 与 TP 含量沿各高程变化一致,这主要是由于 IP 是消落带磷素的主要赋存形态,占比达到 TP 的 82.32%. 尽管 OP 占比较低,但有研究表明,干燥的消落带土壤在再湿润过程中,会出现磷的释放,且释放的磷中高达 56% ~ 100% 的含量来自于有机磷的矿化^[26]. 因此,占比较小的 OP 可能向水体释放的磷含量也是不容忽视的.

2.3 不同高程消落带土壤磷形态

研究区域内不同高程消落带土壤各形态磷含量如图 4 所示.

$\text{H}_2\text{O-P}_i$ 为弱吸附态无机磷,是存在于土壤间隙水溶液和物理吸附于土壤中黏土等反应性颗粒上的易迁移磷形态^[27]. 各高程消落带土壤 $\text{H}_2\text{O-P}_i$ 含量不具有显著性差异,但均高于岸边土壤. $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 为潜在活性无机磷,主要由部分具有活性的铁磷、铝磷和一部分活性较高的钙磷组成^[28]. NaOH-P_i 主要包括与金属氧化物结合的磷,淹水时容易被转化为可溶性磷释放到水体^[29]. 各高程消落带土壤 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 和 NaOH-P_i 含量均显著高于岸边土壤($P < 0.05$),且 155 m 消落带土壤 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 和 NaOH-P_i 含量均显著高于其他高程土壤($P < 0.05$),主要与 155 m 消落带土壤频繁经历淹水和出露有关,其淹水时间短,向水体释放的无机磷较少,且出露时间短,植物利用的无机磷也较少. 与 $\text{H}_2\text{O-P}_i$ 类似,各高程消落带土壤 Bio-P_i 含量不具有显著性差异,但均显著大于岸边土壤($P < 0.05$).

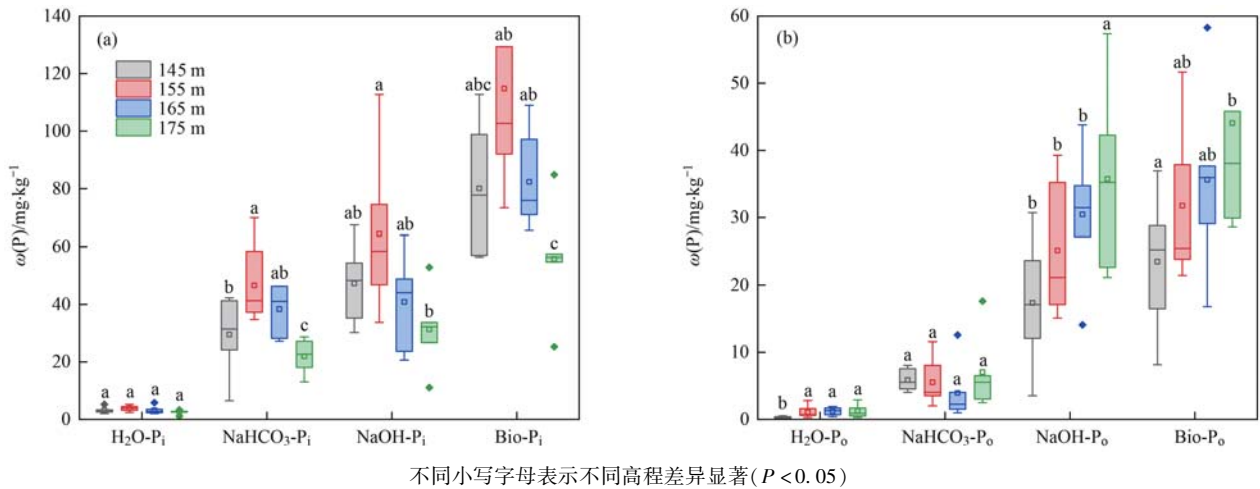


图4 不同高程消落带土壤磷形态

Fig. 4 Contents of different phosphorus form at different altitudes in the soil of WLFZ

$\text{H}_2\text{O-P}_i$ 为弱吸附态活性有机磷,是易于迁移的有机磷形态^[27]. 145 m 消落带土壤 $\text{H}_2\text{O-P}_i$ 含量显著低于 155 m 和 165 m 消落带土壤和 175 m 岸边土壤 ($P < 0.05$). $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 是潜在活性有机磷,容易被分解释放^[30,31],各高程消落带土壤 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 含量随高程增加而降低,但与岸边土壤不具有显著性差异. NaOH-P_i 是活性相对较低的有机磷,主要包括中活性的富里酸结合态有机磷和非活性的胡敏酸结合态有机磷^[31],消落带土壤 NaOH-P_i 含量随高程增加而增大,且均显著小于 175 m 岸边土壤 ($P < 0.05$). 沿高程从低到高, Bio-P_i 含量整体上呈升高趋势, 145 m 消落带土壤 Bio-P_i 含量显著低于 175 m 岸边土壤 ($P < 0.05$).

2.4 不同高程消落带土壤磷酸酶活性

研究区域内不同高程消落带土壤磷酸酶活性如图 5 所示.

ALP 和 ACP 可水解除植酸外的正磷酸单酯的磷酸酯键^[32]. PDE 可以水解磷脂和核酸,且磷脂和核酸水解的产物可以增加土壤中有机磷的含量^[33]. PAE 是磷酸单酯酶中的一类酶,可将植酸(肌醇六磷酸)及其盐类水解为肌醇和磷酸或磷酸盐^[34].

不同高程消落带土壤的磷酸酶活性变化相似. 145、155 和 165 m 消落带土壤 ACP 活性均值分别为 0.53 、 1.21 和 $2.62 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$; ALP 活性均值分别为 1.05 、 2.60 和 $4.42 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$; PDE 活性均值分别为 0.17 、 0.48 和 $0.70 \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 沿高程从低到高,消落带土壤 ACP、ALP 和 PDE 活性均显著增加 ($P < 0.05$).

消落带土壤 ACP 活性均值为 $(1.40 \pm 1.07) \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, ALP 活性均值为 $(2.60 \pm 1.62) \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, PDE 活性均值为 $(0.44 \pm 0.25) \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 消落带土壤和岸边土壤磷酸酶活性

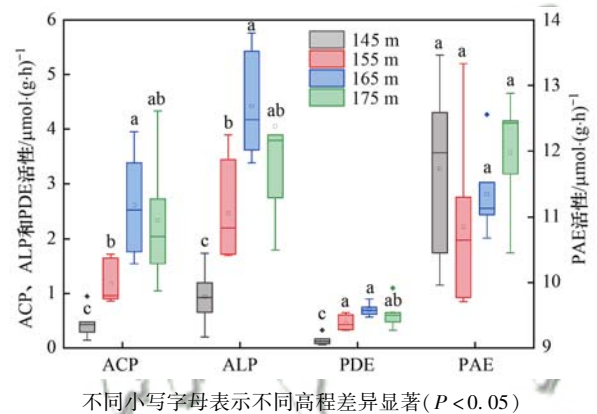


图5 不同高程消落带土壤磷酸酶活性

Fig. 5 Phosphatase activity at different altitudes in the soil of WLFZ

水平均为碱性磷酸酶 > 酸性磷酸酶 > 磷酸二酯酶. 消落带土壤中不同磷酸酶活性水平不同,显示其矿化有机磷的能力也不同,以碱性磷酸酶矿化有机磷占优势,可能与库区水体呈微碱性相关.

3 讨论

3.1 不同高程消落带土壤磷形态的分布

消落带土壤 $\text{H}_2\text{O-P}_i$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 和 NaOH-P_i 含量均高于岸边土壤. 由于岸边土壤长期出露,植物量和微生物量很丰富^[35],其对无机磷的吸收利用,使得无机磷可能为消落带土壤限制性营养元素,因此表现为岸边土壤的可被生物利用的各无机磷含量小于各消落带土壤.

消落带土壤 $\text{H}_2\text{O-P}_o$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$ 和 NaOH-P_o 含量均低于岸边土壤,这可能与周期性淹水导致土壤的理化性质变化有关. 冗余分析(RDA)可以通过环境变量与响应变量之间的相关性,分析引起响应变量变异的原因. 不同高程消落带土壤 RDA 分析结果如图 6 所示. 由图 6(a)可知,有机磷含量与 OM、 Fe_{ox} 和 Mn_{ox} 均呈正相关. OM 是土壤有机磷的重要来

源^[36], 消落带土壤有机磷形态一定程度上受 OM 分布控制. 土壤中 Fe_{ox} 和 Mn_{ox} 是比表面积大, 活性较高的氧化物, 对土壤磷吸附具有重要作用^[15], 淹水造成的厌氧还原条件使消落带土壤中无定形铁锰对有机磷吸附减弱, 从而促进土壤有机磷的释放^[37]. 以上分析结果与 Wang 等^[38] 在研究干湿交替对三峡库区水位消落带土壤磷素的影响的结果一致. 因此, 土壤理化性质的变化是导致不同高程上土壤有机磷形态含量产生差异的主要原因.

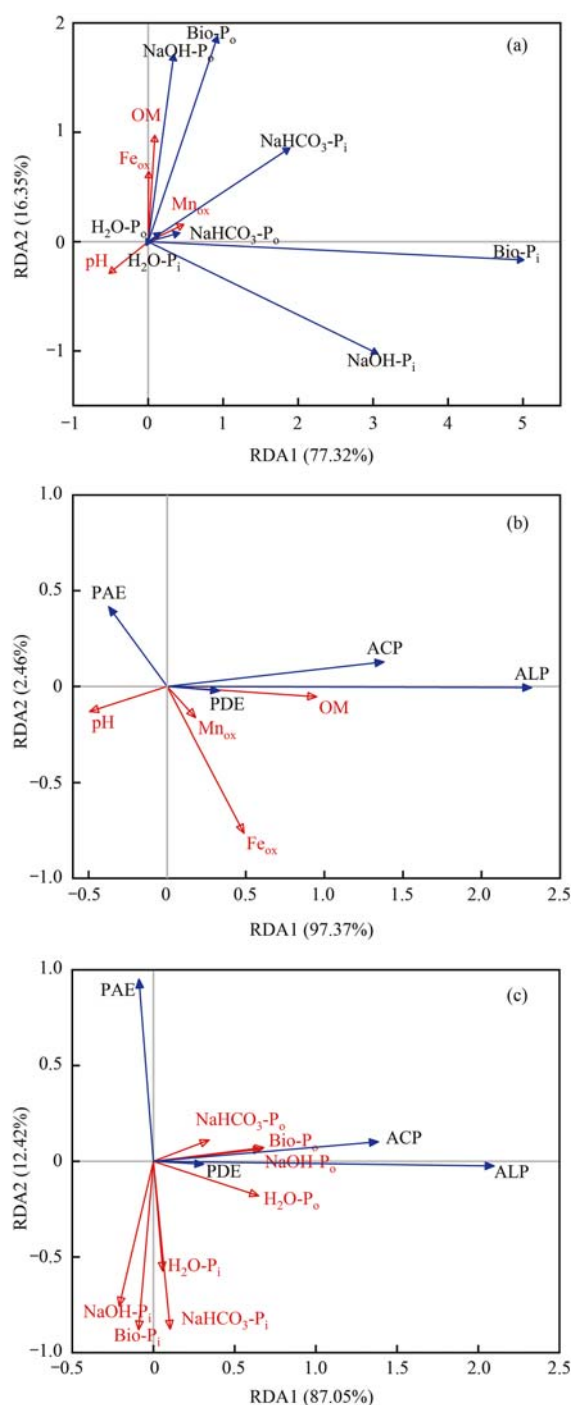
3.2 不同高程消落带土壤磷酸酶活性的特征

沿高程从低到高, 消落带土壤 ACP、ALP 和 PDE 活性均显著增加 ($P < 0.05$), 表明消落带土壤出露时间的不同会影响其磷酸酶活性. 如图 6(b) 消落带土壤磷形态与磷酸酶的 RDA 分析结果所示, 不同高程消落带土壤 OM 含量与 ACP、ALP 和 PDE 活性呈正相关. 前文分析可知, 消落带土壤出露时间的不同会导致消落带土壤理化性质发生变化, 其主要以 OM 的变化显著, 与土壤中的 OM 来源于土壤中的微生物和植物残体有关^[39]. 土壤磷酸酶主要由植物和微生物分泌, 相比于较低高程消落带, 较高高程消落带较先出露且出露时间长, 植物首先进行恢复生长, 植物量更多^[35], 且较高高程消落带土壤微生物量也较大^[40], 所以较高高程的土壤磷酸酶活性较高. 正因为两者均受植物量和微生物量在不同高程上变化的影响, 所以 RDA 分析中土壤 OM 含量与 ACP、ALP 和 PDE 活性呈现出较好的相关性. 因此, 由消落带土壤出露时间不同所引起的植物量和微生物量不同是消落带土壤磷酸酶活性在不同高程上变化的重要原因.

3.3 消落带土壤磷酸酶活性对磷形态的影响

磷酸酶可将有机磷分解为易于释放的无机磷, 与磷形态转化密切相关.

有研究表明磷酸单酯酶活性和活性有机磷之间具有正相关性^[33]. 如图 6(c) 磷形态与磷酸酶的冗余分析所示, 各活性有机磷含量均与 ACP、ALP 和 PDE 活性呈正相关, 且相关性分析显示均显著 ($n = 24$, $P < 0.05$), 这与活性有机磷多为磷酸单酯和磷酸二酯, 是 ACP、ALP 和 PDE 水解的底物有关. 此外, 图 6(c) 表明, 消落带土壤 Bio-P_i 含量与土壤 ACP、ALP 和 PDE 活性呈负相关, 这表明消落带土壤 Bio-P_i 含量较低, 促使植物和微生物分泌各类型磷酸酶, 增强土壤磷酸酶活性以促进有机磷矿化过程. Wasaki 等^[41] 对分泌型酸性磷酸酶在羽扇豆丛生根中表达的研究中发现, 生物可利用磷含量较低时可诱导土壤微生物和植物分泌磷酸酶, 而磷酸酶通过水解有机磷提高了土壤中无机磷含量.



红蓝线分别表示解释和响应变量

图 6 彭溪河消落带土壤理化性质与磷形态及磷酸酶活性冗余分析 (RDA) 分析

Fig. 6 RDA of the physicochemical characteristics and phosphorus form, physicochemical characteristics and phosphatase, phosphorus form and phosphatase at different altitudes in Pengxi River

生物可利用磷 Bio-P_i , 生物可酶解磷 Bio-P_o 和磷酸酶活性在不同高程消落带上呈现出有规律的变化趋势. 消落带土壤 Bio-P_i 含量整体上随高程增加而减少, 但均高于 175 m 岸边土壤; 消落带土壤 Bio-P_o 含量随高程增加而增大, 但均低于 175 m 岸边土壤; 而消落带土壤 ACP、ALP 和 PDE 活性随高

程增加而增大. 这表明不同高程消落带的植被和微生物状况, 会影响各种磷形态及含量.

Waldrip 等^[42]通过试验证实磷酸酶活性增加, 使得土壤中可利用磷含量增加. Zhu 等^[23]对富营养化湿地土壤研究发现, 磷酸酶可调节有机磷周转率, 显著提高有效磷含量. Wei 等^[43]在对落叶松人工林土壤磷酸酶与磷转化关系的研究中也发现了类似现象, 即增加磷酸酶活性会加速磷的转化. 此外, 有学者在对森林土壤磷形态和磷酸酶活性研究中, 发现在低有效磷土壤中, 磷酸单酯酶和磷酸二酯酶的活性较高^[44]. 因此, 本文中较高高程消落带土壤在磷酸酶活性较高, 且生物可利用磷较低的情况下, 会加快土壤磷酸酶矿化有机磷的速率, 以增加土壤无机磷的含量. 有研究发现, 磷酸酶活性随淹水时长增加而降低^[45], 因此消落带土壤淹水初期对有机磷的矿化能力强, 向水体释放磷的风险较大, 可能会对上覆水体产生影响. Wang 等^[20]对三峡库区消落带土壤磷释放的风险进行了研究, 也发现较高高程 165 m 消落带土壤磷释放的潜在风险较高.

4 结论

(1) 沿程上不同地点的消落带土壤的各磷形态无显著差异. 高程上消落带土壤的 $\text{H}_2\text{O-P}_i$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 和 NaOH-P_i 含量均高于岸边土壤. Bio-P_i 含量和有机磷占比最大的 NaOH-P_i 含量随高程增加而升高, OM 和无定形铁锰含量变化是不同高程消落带土壤有机磷形态含量变化的主要原因.

(2) 沿程上不同地点的消落带土壤的磷酸酶活性无显著差异. 高程上消落带土壤 ACP、ALP、PDE 和 PAE 活性均值分别为 (1.40 ± 1.07) 、 (2.60 ± 1.62) 、 (0.44 ± 0.25) 和 (11.43 ± 1.14) $\mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 且均随高程增加而增大. 不同高程消落带土壤的植物量和微生物量差异是导致消落带磷酸酶活性空间分布差异的重要原因.

(3) 消落带土壤 ACP、ALP 和 PDE 活性与土壤 $\text{H}_2\text{O-P}_i$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-P}_i$ 和 NaOH-P_i 含量呈显著正相关, 而与 Bio-P_i 含量呈负相关, 磷酸酶活性与不同磷形态含量关系密切. 不同高程消落带土壤的出露时间的不同, 使得较高高程消落带土壤上植物和微生物量较多, 其分泌的土壤磷酸酶更多, 且低无机磷含量促进消落带土壤磷酸酶活性调节有机磷矿化为无机磷的过程. 较高高程消落带土壤磷酸酶活性较高而生物可利用磷含量较低, 在淹水初期磷酸酶介导的矿化有机磷为无机磷速率相对较高, 向上覆水体释放磷的风险也较大.

参考文献:

- [1] Zhou J, Wu Y H, Wang X X, *et al.* Divergent patterns of soil phosphorus discharge from water-level fluctuation zone after full impoundment of Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(3): 2559-2568.
- [2] Ma L M, Rena D, Zhang M, *et al.* Phosphorus fractions and soil release in alternately waterlogged and drained environments at the water-fluctuation-zone of the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 2010, **8**(3): 1329-1335.
- [3] 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.
- [4] Schindler D W, Carpenter S R, Chapra S C, *et al.* Reducing phosphorus to curb lake eutrophication is a success [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(17): 8923-8929.
- [5] Hammond J P, White P J. Sucrose transport in the phloem: integrating root responses to phosphorus starvation[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2008, **59**(1): 93-109.
- [6] Nakayama Y, Wade J, Margenot A J. Does soil phosphomonoesterase activity reflect phosphorus pools estimated by Hedley phosphorus fractionation? [J]. *Geoderma*, 2021, **401**, doi: 10.1016/j.geoderma.2021.115279.
- [7] 方博, 王超, 王翀, 等. 三峡库区澎溪河流域不同高程消落带土壤磷形态特征[J]. *重庆大学学报*, 2018, **41**(12): 20-29.
Fang B, Wang C, Wang C, *et al.* Characterizations of phosphorus fractions in the soil at different altitudes of water-level-fluctuation zone, Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Chongqing University*, 2018, **41**(12): 20-29.
- [8] 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 J, Li C H, Zhang Z Y, *et al.* Effects of flooding and drying on the transformation of soil inorganic phosphorus in the water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 130-136.
- [9] 李丽娟, 李昌晓, 陈春桦, 等. 三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2898-2907.
Li L J, Li C X, Chen C H, *et al.* Root activities of re-vegetated plant species regulate soil nutrients and bacterial diversity in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2898-2907.
- [10] Yang F, Zhang D D, Wu J J, *et al.* Anti-seasonal submergence dominates the structure and composition of prokaryotic communities in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **663**: 662-672.
- [11] 黄俊杰, 王超, 方博, 等. 三峡澎溪河流域消落区与岸边土壤磷形态特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(9): 3673-3681.
Huang J J, Wang C, Fang B, *et al.* Characterization of phosphorus fractions in the soil of water-level-fluctuation zone and unflooded bankside in Pengxi River, Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(9): 3673-3681.
- [12] 贾国梅, 席颖, 许文年, 等. 三峡库区消落带土壤酶活性特征[J]. *水土保持研究*, 2015, **22**(4): 24-28.
Jia G M, Xi Y, Xu W N, *et al.* Characteristics of the activities of soil enzymes in Riparian Zone of Three Gorges Reservoir Area [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, **22**(4):

- 24-28.
- [13] 张志永, 万成炎, 胡红青, 等. 三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4161-4168.
- Zhang Z Y, Wan C Y, Hu H Q, *et al.* Phosphorus forms and distribution characteristics in the sediment and soil of the water-level-fluctuating zone in the main stream of the Three Gorges Reservoir[J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 4161-4168.
- [14] Bing H J, Zhou J, Wu Y H, *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.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [16] Salehi M H, Beni O H, Harchegani H B, *et al.* Refining soil organic matter determination by loss-on-ignition[J]. Pedosphere, 2011, **21**(4): 473-482.
- [17] 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.
- [18] Hedley M J, Stewart J W B, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, **46**(5): 970-976.
- [19] Gao J M, Chen Z M, Wang C, *et al.* Bioavailability of organic phosphorus in the water level fluctuation zone soil and the effects of ultraviolet irradiation on it in the Three Gorges Reservoir, China[J]. Science of the Total Environment, 2020, **738**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139912.
- [20] Wang C, Fang F, Yuan Z Y, *et al.* Spatial variations of soil phosphorus forms and the risks of phosphorus release in the water-level fluctuation zone in a tributary of the Three Gorges Reservoir [J]. Science of the Total Environment, 2020, **699**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134124.
- [21] Tabatabai M A, Bremner J M. Use of *p*-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1969, **1**(4): 301-307.
- [22] Bünemann E K, Oberson A, Frossard E. Phosphorus in action: biological processes in soil phosphorus cycling [M]. Berlin: Springer, 2011.
- [23] Zhu J, Qu B, Li M. Phosphorus mobilization in the Yeyahu Wetland: phosphatase enzyme activities and organic phosphorus fractions in the rhizosphere soils [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2017, **124**: 304-313.
- [24] Zhao P, Tang X Y, Tang J L, *et al.* Assessing water quality of Three Gorges Reservoir, China, over a Five-Year Period from 2006 to 2011 [J]. Water Resources Management, 2013, **27**(13): 4545-4558.
- [25] 朱强, 张志永, 胡红青, 等. 淹没-出露条件下三峡水库小江消落带土壤性质变化研究[J]. 土壤, 2014, **46**(5): 927-932.
- Zhu Q, Zhang Z Y, Hu H Q, *et al.* Soil property changes under drain-flooding condition in Xiaojiang water-level-fluctuating belt of the Three-Gorge-Reservoir Region[J]. Soils, 2014, **46**(5): 927-932.
- [26] Turner B L, Haygarth P M. Phosphorus solubilization in rewetted soils [J]. Nature, 2001, **411** (6835), doi: 10.1038/35077146.
- [27] Sun S J, Huang S L, Sun X M, *et al.* Phosphorus fractions and its release in the sediments of Haihe River, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(3): 291-295.
- [28] Fabre A, Qotbi A, Dauta A, *et al.* Relation between algal available phosphate in the sediments of the River Garonne and chemically-determined phosphate fractions [J]. Hydrobiologia, 1996, **335**(1): 43-48.
- [29] Ruban V, Brigault S, Demare D, *et al.* An investigation of the origin and mobility of phosphorus in freshwater sediments from Bort-Les-Orgues Reservoir, France[J]. Journal of Environmental Monitoring, 1999, **1**(4): 403-407.
- [30] Liu Q, Liu S L, Zhao H D, *et al.* The phosphorus speciations in the sediments up- and down-stream of cascade dams along the middle Lancang River [J]. Chemosphere, 2015, **120**: 653-659.
- [31] Zhang R Y, Wu F C, Liu C Q, *et al.* Characteristics of organic phosphorus fractions in different trophic sediments of lakes from the middle and lower reaches of Yangtze River region and Southwestern Plateau, China [J]. Environmental Pollution, 2008, **152**(2): 366-372.
- [32] Spohn M, Kuzyakov Y. Distribution of microbial- and root-derived phosphatase activities in the rhizosphere depending on P availability and C allocation - Coupling soil zymography with ¹⁴C imaging[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, **67**: 106-113.
- [33] Turner B L, Haygarth P M. Phosphatase activity in temperate pasture soils: potential regulation of labile organic phosphorus turnover by phosphodiesterase activity[J]. Science of the Total Environment, 2005, **344**(1-3): 27-36.
- [34] 施安辉, 王光玉, 李桂杰, 等. 目前国内外植酸酶研究进展[J]. 中国酿造, 2005, (5): 5-10.
- Shi A H, Wang G Y, Li G J, *et al.* Research development of phytase both at home and abroad [J]. China Brewing, 2005, (5): 5-10.
- [35] 陈忠礼, 刘红, 孙荣, 等. 三峡库区澎溪河消落带湿地土壤种子库特征[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2011, **28**(3): 33-36.
- Chen Z L, Liu H, Sun R, *et al.* Wetland soil seed bank features in the littoral zone of Pengxi River of the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2011, **28**(3): 33-36.
- [36] 周小明, 方芳, 王超, 等. 三峡库区澎溪河流域消落带土壤有机磷生物有效性研究[J]. 地球与环境, 2019, **47**(4): 495-501.
- Zhou X M, Fang F, Wang C, *et al.* Bioavailability of organic phosphorus in soils of the water-level-fluctuating zone of the Pengxi River Watershed, Three Gorges Reservoir[J]. Earth and Environment, 2019, **47**(4): 495-501.
- [37] Ahlgren J, Reitzel K, De Brabandere H, *et al.* Release of organic P forms from lake sediments[J]. Water Research, 2011, **45**(2): 565-572.
- [38] Wang C, Guo J S, Zhang W, *et al.* Drying-rewetting changes soil phosphorus status and enzymatically hydrolysable organic phosphorus fractions in the water-level fluctuation zone of Three Gorges reservoir[J]. CATENA, 2021, **204**, doi: 10.1016/j.catena.2021.105416.
- [39] 窦森, Tardy Y, 张晋京, 等. 土壤胡敏酸与富里酸热力学稳定性及其驱动因素初步研究[J]. 土壤学报, 2010, **47**(1): 71-76.
- Dou S, Tardy Y, Zhang J J, *et al.* Thermodynamic stability of humic acid and fulvic acid in soil and its driving factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, **47**(1): 71-76.

- [40] 李飞, 张文丽, 刘菊, 等. 三峡水库泄水期消落带土壤微生物活性[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(4): 968-974.
Li F, Zhang W L, Liu J, *et al.* Soil microbial activities in the water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir area during discharging period[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, **32**(4): 968-974.
- [41] Wasaki J, Yamamura T, Shinano T, *et al.* Secreted acid phosphatase is expressed in cluster roots of lupin in response to phosphorus deficiency[J]. Plant and Soil, 2003, **248**(1-2): 129-136.
- [42] Waldrup H M, He Z Q, Erich M S. Effects of poultry manure amendment on phosphorus uptake by ryegrass, soil phosphorus fractions and phosphatase activity[J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, **47**(4): 407-418.
- [43] Wei K, Sun T, Tian J H, *et al.* Soil microbial biomass, phosphatase and their relationships with phosphorus turnover under mixed inorganic and organic nitrogen addition in a *Larix gmelinii* plantation[J]. Forest Ecology and Management, 2018, **422**: 313-322.
- [44] Kunito T, Tsunekawa M, Yoshida S, *et al.* Soil properties affecting phosphorus forms and phosphatase activities in Japanese forest soils: soil microorganisms may be limited by phosphorus[J]. Soil Science, 2012, **177**(1): 39-46.
- [45] 陈海生, 梁国钱. 淹水胁迫对水库消落带五节芒 (*Miscanthus floridulus*) 根际土壤酶活性的影响[J]. 生态科学, 2020, **39**(6): 69-74.
Chen H S, Liang G Q. Effect of submergence on rhizospheric soil enzyme activity of *Miscanthus floridulus* growing in water-level-fluctuation zone of reservoir[J]. Ecological Science, 2020, **39**(6): 69-74.

环 境 科 学

CONTENTS

Regionalization and Analysis of PM _{2.5} and O ₃ Synergetic Prevention and Control Areas Based on Remote Sensing Data	LI Shen-xin, ZOU Bin, ZHANG Feng-ying, <i>et al.</i>	(4293)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in Guangzhou in Winter	PEI Cheng-lei, XIE Yu-tong, CHEN Xi, <i>et al.</i>	(4305)
Establishment and Application of Foshan Ozone Concentration Forecast Equation	CHEN Chen, HONG Ying-ying, TAN Hao-bo, <i>et al.</i>	(4316)
Establishment of High-Resolution Emissions Inventory in Wuhai and Its Application in Exploring the Causes of Ozone Pollution	ZHANG Rui-xin, CHU Bo, SHANG Chun-lin, <i>et al.</i>	(4327)
Investigating the Pollutants of Marine Shipping Emissions Along the East China Sea by Combining in-situ Measurements and Automatic Identification System	QIU Hao, LIU Dan-long, WU Yang-zhou, <i>et al.</i>	(4338)
Chemical Component of Particulate Matters and VOCs Characteristics During Vehicle Brake Processes	MEN Zheng-yu, LIU Du-you, GUO Quan-you, <i>et al.</i>	(4348)
Characterization of VOCs Emissions from Caged Broiler House in Winter	CAO Tian-tian, ZHENG Yun-hao, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(4357)
Concentrations and Community Structures of Culturable Bacteria in Aerosols of Household Garbage Stations in Shanghai	LU Bing-jie, ZHANG Xiang, WANG Chuan, <i>et al.</i>	(4367)
Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emissions in Zhejiang Province from 2008 to 2018	FANG Li-jiang, YANG Yi-qun, YE Guan-qiong	(4380)
Roadmap of Coal Control and Carbon Reduction in the Steel Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target	XUE Ying-lan, ZHANG Jing, LIU Yu, <i>et al.</i>	(4392)
Carbon Emission Reduction Effect of Spatial Correlation Network Structure Characteristics: From the Perspective of Urban Agglomeration	ZHENG Hang, YE A-zhong	(4401)
Pollution and Carbon Reduction Effect of OFDI in China and Its Mechanism	BAI Zi-han, LÜ Lian-hong, ZHAO Ming-xuan, <i>et al.</i>	(4408)
Variation Characteristics of Surface Water Quality in China in Recent Years	JI Xiao-yan, HOU Huan-huan, WANG Shan-shan, <i>et al.</i>	(4419)
Distribution, Risk, and Influencing Factors of Microplastics in Surface Water of Huangshui River Basin	FAN Meng-yuan, HUANG Yi-mei, ZHANG Hai-xin, <i>et al.</i>	(4430)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Surface Water of the Fenhe River Basin and Influence Factors	ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, WANG Zhi-heng, <i>et al.</i>	(4440)
Characteristics and Causes of High-manganese Groundwater in Pearl River Delta During Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(4449)
Characteristics and Causes of Groundwater Salinization in the Plain Area of the Lower Kashgar River	LU Han, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(4459)
Sources and Biogeochemical Processes of Nitrate in the Laolongdong Karst Underground River Basin, Chongqing	WANG Yu-yang, YANG Ping-heng, ZHANG Jie-ru	(4470)
Succession Pattern and Consequences of the Dominant Species During Cyanobacterial Bloom and Its Influencing Factors	OUYANG Tian, ZHAO Lu, JI Lu-lu, <i>et al.</i>	(4480)
Structural Characteristics of Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Group of Drinking Water Reservoirs by Water Transmission from Modaomen Waterway in Zhuhai	ZHANG Mo-li, WANG En-rui, CHANG Sheng, <i>et al.</i>	(4489)
Effects of Nutrients on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and Bacteria in the Phycosphere	LÜ Ping, LI Hui-li, XU Yong, <i>et al.</i>	(4502)
Effect of Aging on Adsorption of Tetracycline by Microplastics and the Mechanisms	WANG Lin, WANG Shu-xin, ZENG Xiang-ying, <i>et al.</i>	(4511)
Effect of Colloids in Sediment and Soil on Their Sorption Behavior of Chloramphenicol	YAN Cai-xia, LUO Yan-qing, NIE Ming-hua, <i>et al.</i>	(4522)
Historical Antibiotic Stress Changed the Effects of Sulfamethoxazole and Trimethoprim on Activated Sludge: ARGs and Potential Hosts	ZHANG Zhong-xing, FAN Xiao-yan, LI Xing, <i>et al.</i>	(4536)
Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-Zinc Mining Area, Yangshuo	CHEN Meng, PAN Yong-xing, HUANG Yi-xiang, <i>et al.</i>	(4545)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Baiyangdian Lake	ZHENG Fei, GUO Xin, TANG Ming-yang, <i>et al.</i>	(4556)
Spatial Differentiation and Influencing Factor Analysis of Soil Heavy Metal Content at Town Level Based on Geographic Detector	GONG Cang, WANG Liang, WANG Shun-xiang, <i>et al.</i>	(4566)
Heavy Metal Emissions from Coal-fired Power Plants and Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risks in Surrounding Soils	CHE Kai, CHEN Chong-ming, ZHENG Qing-yu, <i>et al.</i>	(4578)
Enrichment Factors, Health Risk, and Source Identification of Heavy Metals in Agricultural Soils in Semi-arid Region of Hainan Island	YANG Jian-zhou, GONG Jing-jing, WANG Zhen-liang, <i>et al.</i>	(4590)
Speciation and Pollution Assessment of Heavy Metals in Mangrove Surface Sediments in Jiulong River Estuary	ZHANG Hua-lan, YU Rui-lian, WAN Rui-an, <i>et al.</i>	(4601)
Status of Heavy Metal in Organic Fertilizers in Main Tea Growing Regions of China	YI Xiao-yun, FANG Li, YANG Xiang-de, <i>et al.</i>	(4613)
Accumulation Characteristics and Sources of PAEs in Agricultural Soils in Gansu Province	CHEN Yu-yu, ZHANG Guang-quan, ZHANG Yang, <i>et al.</i>	(4622)
Distribution Characteristics of Soil Phosphorus Forms and Phosphatase Activity at Different Altitudes in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	GAO Yi-lun, FANG Fang, TANG Zi-chao, <i>et al.</i>	(4630)
Characteristics of Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Other Soil Physical and Chemical Factors in Cotton Fields with Different Continuous Cropping Years in the Oasis on the Northern Edge of Tarim Basin	LI Xin-zhu, GONG Lu, TANG Jun-hu, <i>et al.</i>	(4639)
Response of Soil Respiration Rates to Soil Temperature and Moisture at Different Soil Depths of <i>Caragana korshinskii</i> Plantation in the Loess-Hilly Region	SUN Ya-rong, WANG Ya-juan, ZHAO Min, <i>et al.</i>	(4648)
Influence of Biochar Application on Soil Nitrate Leaching and Phosphate Retention: A Synthetic Meta-analysis	JIANG Zhi-xiang, CUI Shuang, ZHANG Xin, <i>et al.</i>	(4658)
Role and Mechanism of Low Molecular-Weight-Organic Acids in Enhanced Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil	FANG Zhi-guo, XIE Jun-ting, YANG Qing, <i>et al.</i>	(4669)
Remediation Effect and Mechanism of Inorganic Passivators on Cadmium Contaminated Acidic Paddy Soil	ZHANG Jian, KONG Fan-yi, LU Sheng-gao	(4679)
Mechanism of Lead-zinc Enrichment and Resistance of Spent Mushroom Compost to Lead-Zinc Slag in <i>Koeleria paniculata</i>	XIE Tian-zhi, CHEN Yong-hua, SU Rong-kui, <i>et al.</i>	(4687)
Phosphorus Enrichment Efficiency of CaO ₂ @FA Composites and the Effect of Its Recovered Material on Soil Improvement	YUE Wei, LI Da-peng, WU Ling-yu, <i>et al.</i>	(4697)
Effects of Early Rice Straw Returning with Reducing Potassium Fertilizer on Late Rice Yield and Soil Fertility	HUANG Qiao-yi, HUANG Jian-feng, HUANG Xu, <i>et al.</i>	(4706)
Effects of Continuous Straw Returning with Chemical Fertilizer on the Carbon Pool and Crop Yield of Rice-Rape Rotation Soils	CAI Ying, FU Si-wei, ZHANG Bo-rui, <i>et al.</i>	(4716)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Straw Application on Diazotrophic Communities in a Double Rice Cropping System	CHEN Kai-peng, WEI Ju-xian, CHEN Dan, <i>et al.</i>	(4725)
Impacts of Co-application of Chemical Fertilizer Reduction and Organic Material Amendment on Fluvio-aquic Soil Microbial N-cycling Functional Gene Abundances and N-converting Genetic Potentials in Northern China	LI Sheng-jun, HU He, LI Gang, <i>et al.</i>	(4735)
Response Characteristics of Soil Microbial Community Under Long-term Film Mulching	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, DING Ji-na, <i>et al.</i>	(4745)
Effects of Long-term Straw Returning on Fungal Community, Enzyme Activity and Wheat Yield in Fluvio-aquic Soil	MA Lei, LI Yan, WEI Jian-lin, <i>et al.</i>	(4755)
Effects of Soil Amendments on the Bacterial Diversity and Abundances of Pathogens and Antibiotic Resistance Genes in Rhizosphere Soil Under Drip Irrigation with Reclaimed Water	CUI Bing-jian, CUI Er-ping, LIU Chun-cheng, <i>et al.</i>	(4765)
Effect of Nitrogen on the Phytoremediation of Cd-PAHs Co-contaminated Dumpsite Soil by Alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.) and on the Soil Bacterial Community Structure	LI Yi-jia, MA Jun-wei, LI Yu-qian, <i>et al.</i>	(4779)
Effect of Antibiotic-Degrading Bacteria on Maturity and Bacterial Community Succession During Pig Manure Composting	LI Wei-lin, ZHANG Xin, MA Jun-wei, <i>et al.</i>	(4789)