

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第1期

Vol.39 No.1

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2006~2015年北京市不同地区 O ₃ 浓度变化	王占山, 李云婷, 安欣欣, 李倩, 孙乃迪, 王步英, 潘锦秀 (1)
南京北郊黑碳气溶胶的来源解析	肖思略, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺, 吕睿, 沙丹丹 (9)
电镀厂周边大气 PM ₁₀ 中重金属季节性分布特征及生态风险评价	赵珍丽, 赵委托, 黄庭, 程胜高, 余葱葱, 尹伊梦 (18)
广西玉林市大气 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中有机碳和元素碳污染特征分析	黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 李宏姣, 杨俊超, 刘慧琳, 毛敬英, 梁桂云, 张达标, 吴熊平, 郝爽 (27)
青岛近海及黄渤海大气气溶胶中不同形态氮磷质量浓度及组成特征	张瑞峰, 祁建华, 丁雪, 谢丹丹 (38)
大气环境分区管理: 以广东省为例	杨柳林, 李敏辉, 廖程浩, 曾武涛, 张晖, 张永波 (49)
基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例	温爽, 王桥, 李云梅, 朱利, 吕恒, 雷少华, 丁萧蕾, 苗松 (57)
基于 SWAT 模型的流域河道硝酸盐 δ ¹⁵ N 和 δ ¹⁸ O 模拟	王康, 冉宁, 林忠兵, 周祖昊 (68)
程海流域非点源污染负荷估算及其控制对策	陈学凯, 刘晓波, 彭文启, 董飞, 黄智华, 冯顺新, 王若男 (77)
陆浑水库饮用水源地水体中金属元素分布特征及健康风险评价	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 谢地, 马鹏途 (89)
天津供水系统中抗生素分布变化特征与健康风险评价	张新波, 宋姿, 张丹, 刘楠楠, 李楠, 温海涛 (99)
西南丘陵区村镇典型供水水源有机物分布特征及对饮水水质的影响	王琼, 李乃稳, 李磊, 李龙国, 苟思, 杨凌肖 (109)
北京市地下水有机氯和有机磷农药健康风险评价	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (117)
黄河岸边土壤中类二噁英类多氯联苯污染现状及风险	姚宏, 卢双, 张旭, 裴晋, 鲁垠涛 (123)
淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征	周健, 李春辉, 张志永, 胡红青, 万成炎, 胡莲, 潘晓洁 (130)
磷酸盐对铁锰复合氧化膜去除地表水中氨氮的影响	卓瑞双, 黄廷林, 张瑞峰, 文刚 (137)
K ₂ S ₂ O ₈ 强化 g-C ₃ N ₄ 薄膜电极光电催化降解 Cu(CN) ₂ ⁻ 并同步回收 Cu	党聪哲, 李一兵, 王彦斌, 赵旭 (145)
以 HKUST-1 为模板制备铜氧化物活化过一硫酸氢钾降解罗丹明 B	蒲嘉懿, 万金泉, 王艳, 马邕文, 武书彬 (152)
氨化松香基交联聚合树脂对水中诺氟沙星的吸附性能	马亚红, 黄婉婷, 刁开盛, 李鹏飞, 谭学才, 董慧岭, 覃方夸, 雷福厚, 刘绍刚 (161)
铁锰泥除砷颗粒吸附剂对 As(V) 的吸附去除	曾辉平, 吕赛赛, 杨航, 尹灿, 曹瑞华, 王艳菊, 李冬, 张杰 (170)
水铁矿及其胶体对砷的吸附与吸附形态	马玉玲, 马杰, 陈雅丽, 雷梅, 郭华明, 翁莉萍, 李永涛 (179)
阳(阴)离子复配修饰两性磁性膨润土的表面特征差异及对苯酚吸附的影响	任爽, 孟昭福, 王腾, 张洋, 田凯, 刘伟, 闫东旭 (187)
典型城市污水中对羟基苯甲酸酯的污染特征	赵雪, 张子峰, 祝富杰, 李一凡, 马万里 (195)
水力停留时间对活性炭生物转盘处理污水的影响	许雯佳, 成小英 (202)
环丙沙星对膜生物反应器运行效能的影响及其去除特性	戴琦, 刘锐, 舒小铭, 张永明, 陈吕军 (212)
AAO 工艺低氧条件下的运行及其模拟	曹特特, 王林, 李咏梅 (219)
磷酸盐对亚硝化系统的抑制及恢复	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 张程锦 (227)
碳源对污水处理厂 SAD 工艺小试的影响	李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (232)
容积负荷对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷性能的影响	吕亮, 尤雯, 韦佳敏, 吴鹏, 沈耀良 (239)
DNBF-O ₃ -GAC 组合工艺深度脱除氮磷及代谢产物	钟丽燕, 郝瑞霞, 王卫东, 万京京, 朱晓霞 (247)
交替好氧/缺氧运行模式对生物脱氮效能及活性污泥胞外聚合物的影响	孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (256)
纳米零价铁对升流式颗粒污泥床反硝化性能的影响	周丰, 王翻翻, 钱飞跃, 黄慧敏, 沈耀良, 周建民 (263)
高含固污泥厌氧消化中 Fe/S 及 pH 对原位抑硫效率影响及其交互作用	韩芸, 曹玉芹, 卓杨, 王晓飞, 韩雅婷, 彭党聪 (269)
浑河流域贮存污泥成分特征及演变规律分析	刘甜甜, 崔崇威, 赫俊国, 唐建 (276)
去除城市生活污泥中有机络合态金属强化其厌氧生物制气	卢怡清, 许颖, 董滨, 戴晓虎 (284)
污泥飞灰中重金属不同浸出方法比较及综合毒性评价	王丰, 李润东, 李彦龙, 赵云斌, 杨天华 (292)
初冬时期闽江河口区养殖塘排水后的 CH ₄ 和 N ₂ O 通量日变化特征	杨平, 谭立山, 黄佳芳, 何清华, 全川 (300)
3 种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响	武岩, 红梅, 林立龙, 刘梅, 刘宇杰 (310)
有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N ₂ O 排放的影响	侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 周应田, 路国艳, Ayaz Muhammad, 黎青慧, 杨学云, 张树兰 (321)
拔节期水稻光合碳输入的动态变化及其对施氮的响应: ¹³ C-CO ₂ 脉冲标记	陈珊, 祝贞科, 袁红朝, 王久荣, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (331)
陕北黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤碳剖面分布特征	兰志龙, 赵英, 张建国, 李会杰, 司炳成, 焦瑞, Muhammad Numan Khan, Tanveer Ali Sial (339)
不同地表条件下生物炭对土壤氮挥发的影响	邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 陈窈君, 王向前, 刘扬 (348)
秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响	徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成 (355)
县域尺度土壤铜的有效性及相关影响因素评估	李锦芬, 瞿明凯, 刘刚, 黄标 (363)
基于改进 LUR 模型的区域土壤重金属空间分布预测	曾菁菁, 沈春竹, 周生路, 陆春峰, 金志丰, 朱雁 (371)
沈北新区土壤中多环芳烃污染特征及源解析	李嘉康, 宋雪英, 魏建兵, 王颖怡, 李玉双, 郑学昊 (379)
磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤	赵庆圆, 李小明, 杨麒, 陈灿, 钟振宇, 钟宇, 陈飞, 陈寻峰, 王祥 (389)
控源及改良措施对稻田土壤和水稻镉累积的影响	封文利, 郭朝晖, 史磊, 肖细元, 韩晓晴, 冉洪珍, 薛清华 (399)
典型土壤双季稻对 Cd 吸收累积差异	李欣阳, 龙坚, 王树兵, 陈齐, 董霞, 蒋凯, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (406)
松花江上游夹皮沟金矿开采区芦苇叶片汞分布特征	张曼胤, 李梦洁, 崔丽娟, 王贺年, 郭子良, 徐卫刚, 魏圆云, 杨思, 肖红叶 (415)
硝酸盐对土壤反硝化活性及厌氧降解的影响	代军帅, 左小虎, 王明霞, 姚炎红, 周志峰 (422)
长期施肥对稻田土壤微生物量、群落结构和活性的影响	王伟华, 刘毅, 唐海明, 孙志龙, 李宝珍, 葛体达, 吴金水 (430)
海洋沉积物中硫酸盐还原菌和硫酸化菌群落分析方法的比较	张玉, 米铁柱, 甄毓, 陈烨, 付璐璐, 王勋功 (438)
鄱阳湖微囊藻毒素时空分布格局及其与理化及生物因子的关系	袁丽娟, 廖旦根, 张莉, 张大文, 罗林广, 刘聚涛 (450)
畜禽粪便中多重耐药细菌及耐药基因分布特征	张昊, 王盼亮, 杨清香, 俞宁 (460)
烟气净化工艺和焚烧炉类型对生活垃圾焚烧灰性质的影响	章骅, 于思源, 邵立明, 何品晶 (467)

淹水落干下三峡水库消落带土壤无机磷形态转化特征

周健¹, 李春辉¹, 张志永^{1,2}, 胡红青^{1*}, 万成炎², 胡莲², 潘晓洁²

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070; 2. 水利部中国科学院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 武汉 430079)

摘要: 为探讨三峡水库消落带土壤无机磷的转化规律, 通过布置原位浮台, 将装有土壤的塑料盆悬挂在不同水深(0、2、5、15 m)处, 分别淹没 30、60、180 d, 落干 180 d, 研究淹没水深和时长对消落带土壤的理化性质及无机磷形态的影响。结果表明, 淹水-落干循环中, 土壤 pH、有机质、全磷和有效磷含量均呈现先降低后升高的趋势。落干 180 d 后, 土壤 pH、有机质和全磷含量降低, 有效磷含量升高。土壤淹水后, 各形态无机磷占全磷的比例大小为 Fe-P > Al-P > Ca₈-P > Ca₂-P。淹水 0 m、2 m 时 Ca₂-P、Ca₈-P 随淹水时间持续下降, 淹水 5 m、15 m 时随淹水时间先降低后升高。落干 180 d 后无机磷含量显著增加, 随淹水深度的增加无机磷含量呈降低趋势; Al-P 含量随淹水时间先降低后持续升高, 随淹水深度变化趋势不明显; Fe-P 含量随淹水时间和淹水深度变化无明显规律。

关键词: 三峡水库; 消落区土壤; 淹水; 落干; 无机磷形态

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)01-0130-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201705105

Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China

ZHOU Jian¹, LI Chun-hui¹, ZHANG Zhi-yong^{1,2}, HU Hong-qing^{1*}, WAN Cheng-yan², HU Lian², PAN Xiao-jie²

(1. College of Resource and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources, Wuhan 430079, China)

Abstract: The implementation of the Three Gorges Project formed a water-level-fluctuating zone, and flooding and drying affects the soil properties and water quality of the Water-Level-Fluctuating Zone. The laboratory simulation or field sampling were conducted; however, the results cannot reflect the real conditions in practice. The effects of flooding and drying on the physical and chemical properties of soil and the transformation characteristics of inorganic phosphorus were studied in order to provide a theoretical reference for soil phosphorus loss and water eutrophication in water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir. To investigate the conversion of soil phosphorus, plastic pots with soil were suspended at different depths (0, 2, 5, and 15 m) and submerged for 30, 60, and 180 d, and exposed for 180 d. The effects of submerged depth and time on the soil physical and chemical properties and inorganic phosphorus forms were studied. The results showed that soil pH, organic matter, total phosphorus, and available phosphorus decreased and then increased subsequently during the flooding period. After exposure for 180 d, soil pH, organic matter, and total phosphorus content decreased, while available phosphorus content increased. After flooding, the ratio of various forms of inorganic phosphorus to total phosphorus was Fe-P > Al-P > Ca₈-P > Ca₂-P. The content of Ca₂-P and Ca₈-P decreased at 0 m and 2 m and decreased at 5 m and 15 m and then increased with increased flooding time. After exposure for 180 days, the content of inorganic phosphorus increased significantly, and the content of inorganic phosphorus decreased as flooding depth increased. Al-P content increased with the flooding time, but there was no obvious change with flooding depth. The content of Fe-P did not change with the time and the depth of flooding.

Key words: Three Gorges Reservoir Area; water-level-fluctuating zone; flooding; drying; inorganic phosphorus forms

三峡工程运行后, 坝前水位在 145 ~ 175 m 之间变化, 形成 221.5 亿 m³ 防洪库容的同时, 水库周边形成面积达 300 余 km² 的消落带, 涉及湖北省和重庆市的 19 区县及重庆主城区。因受到交替淹没与暴露的影响, 三峡水库消落带土壤在时空上具有较高的变异性^[1], 如土壤养分会发生变化^[2]。磷是淡水生态系统中的关键元素^[3], 也是大多数水体富营养化的主要限制因子^[4], 它通过地表径流、土壤侵蚀、渗漏及淋溶等形式从土壤转移到河流或湖泊等

地表水体^[5]。土壤磷素释放过程受多因子控制, 同旱地土壤相比, 淹水时土壤磷更容易扩散迁移^[6]。干湿交替会引起氧化还原状态、植物及微生物生长环境的改变, 而这可能会影响到消落区土壤磷的释

收稿日期: 2017-05-11; 修订日期: 2017-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679154); 国家重点研发计划项目(2016YFC0502208)

作者简介: 周健(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤化学与生态环境, E-mail: zhoujian0209@webmail.hzau.edu.cn

* 通信作者, E-mail: hqhu@mail.hzau.edu.cn

放、转移和转化。

针对消落区土壤环境安全^[7-9]及室内模拟消落区土壤磷的释放^[10-12]、消落区土壤氮、磷赋存形态^[5,13]、消落区土壤可转化态氮含量及分布特征^[14]、氮与磷的吸附与解吸特征^[15,16]、干湿交替下三峡支流消落区沉积物粒径组成及氮分布特征^[17]及三峡库区小流域氮磷排放特征^[18]等内容已有广泛研究。目前,对于淹水-落干条件下消落区无机磷形态及含量变化的研究多为模拟水淹试验,而模拟不能完全还原自然状况,由于水压、光照、溶解氧等条件引起的差异,导致模拟结果无法真实反映自然环境中综合因素共同作用下植物的功能特点^[19]。对于原位试验消落区土壤无机磷形态含量随淹水水深及时长的动态变化的研究较为缺乏。本文采用原位试验,运用蒋柏藩等^[20]的无机磷分级法,研究淹没水深与时长对土壤理化性质及无机磷形态转化特征的影响,以期为三峡水库消落区土壤中磷素流失及水体富营养化的防治提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点与土样

淹水试验于重庆市开县渠口镇消落带进行(108°30'25.90"E, 31°8'43.56"N)。供试土壤在该处消落带采集(坡度35°),为风化程度较低的紫色土,受人为活动干扰较轻。供试土壤基本理化性质为:pH 7.1,有机质(OM)19.1 g·kg⁻¹,全磷(TP)0.5 g·kg⁻¹,有效磷(Olsen-P)6.8 mg·kg⁻¹,全氮(TN)2.2 g·kg⁻¹,晶型铁10.3 g·kg⁻¹,非晶形铁3.3 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计

原位浮台试验采用20 cm×30 cm×30 cm的塑料容器(图1),去除供试土壤中较大的石块后将其混匀,在保持土壤原容重的情况下,每盆装5 kg混匀的土壤。于淹水期将装土的塑料容器悬挂在不同水深(0、2、5和15 m)下培养,每个水深处理7次重复,栽植牛鞭草和狗牙根各10株,分别经过淹水30、60、180 d(为防试验装置漂流或旋转,故于水中放置3个锚定装置)后,取出塑料盆,再落干180 d,从中取土风干,研磨过筛待测。

1.3 测定方法

土壤基本性质按常规方法测定^[21]。土壤pH值按水土比2.5:1,采用梅特勒FiveEasy pH计测定;有机质采用重铬酸钾容量法测定;全氮(TN)采用凯氏蒸馏法测定;全磷(TP)经HClO₄-H₂SO₄消煮,钼锑抗比色法测定;速效磷(Olsen-P)用0.5

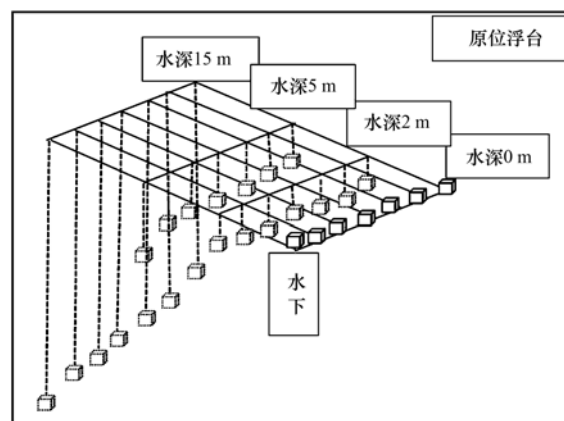


图1 原位浮台试验示意

Fig. 1 In situ floating platform test

mol·L⁻¹ NaHCO₃浸提,钼锑抗比色法测定。采用顾益初等^[20]的方法提取各形态无机磷的含量,先用0.25 mol·L⁻¹ NaHCO₃溶液(pH 7.5)浸提土壤Ca₂-P,然后用0.5 mol·L⁻¹ NH₄Ac溶液(pH 4.2)浸提土壤Ca₈-P,再用0.5 mol·L⁻¹ NH₄F溶液(pH 8.2)浸提土壤铝磷(Al-P),最后用0.1 mol·L⁻¹ NaOH和0.1 mol·L⁻¹ 1/2 Na₂CO₃混合溶液浸提土壤铁磷(Fe-P),钼锑抗比色法测定各形态磷含量。

1.4 数据统计

数据统计采用SPSS 18.0、Excel 2013进行。

2 结果与分析

2.1 淹水-落干对消落区土壤pH和有机质含量的影响

由图2可见,淹水-落干过程可导致供试土壤pH发生变化。土壤出露期间,淹水处理的土壤pH下降,而落干土壤pH上升。pH范围为6.4~7.5,最大值为落干180 d后未淹水的土壤样品,最小值为淹水-落干结束深度为15 m处的土壤。淹水0 m(地面)土样pH在试验期(淹水0~淹水180 d)内呈下降趋势,范围在6.8~7.5;淹水2、5和15 m的土壤淹水前期(淹水0~60 d)土壤pH降低,在淹水后期(60~180 d),相对于前期,土壤pH呈升高的趋势。淹水180 d后,不同淹水深度土样pH都接近7.0,土壤呈中性。落干180 d后,随淹水深度增加,土壤pH降低,且降低幅度随淹水深度而增大。

淹水0~60 d期间,土壤有机质含量无明显变化,但在淹水180 d及落干180 d,土壤有机质含量较前者均有所增加。而水深处理显著影响土壤有机质的含量,与其他淹水深度相比,水深2 m处的土壤有机质含量最高(图3)。有机质变化范围为11.3~

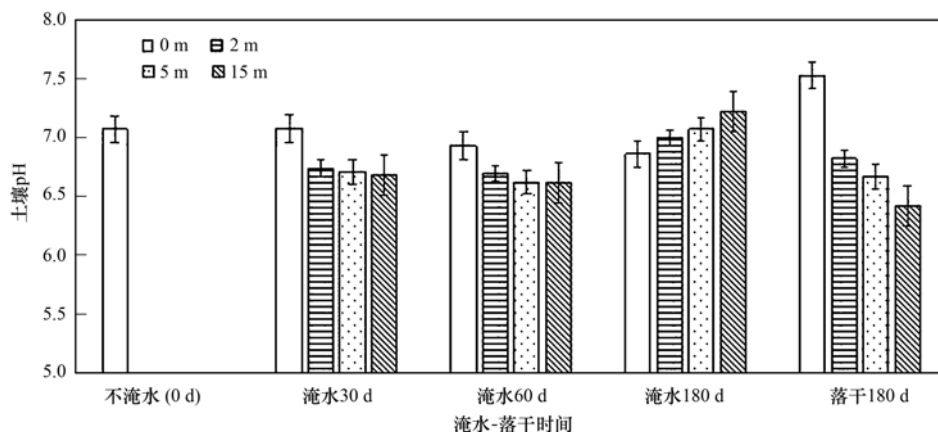


图2 淹水-落干条件下供试土壤 pH 值

Fig. 2 The pH of soil under the flooding-drying condition

22.7 g·kg⁻¹,最大值为淹水 2 m,淹水 180 d 时的土样;最小值为淹水 5 m,淹水 60 d 时的土样.淹水期间除 2 m 及 15 m 深度于淹水第 180 d 对应的土壤有机质含量高于淹水前土壤的有机质 (19.1 g·kg⁻¹) 外,其他淹水时间的土壤有机质含量均低于不淹水土壤.落干 180 d 后,土样有机质含量在 12.2 ~ 20.3 g·kg⁻¹ 之间,除水深 2 m,淹水 180 d 与落干 180 d 外,其余处理下的土壤有机质含量均低于不淹水土壤.从图 3 可看出,淹水 30 d、60 d 时,有机质含量在 11.3 ~ 18.7 g·kg⁻¹ 之间.

2.2 淹水-落干对消落区土壤全磷和有效磷含量的影响

淹水-落干后消落区土壤全磷含量随淹水深度及时长的变化见图 4.全磷含量为 0.4 ~ 0.5 g·kg⁻¹,最大值为淹水深度 0 m,时间 30 d 时的土样,最小值为淹水深度 5 m,时间 60 d 时的土样.未淹水土壤在 30 d 时最大,然后逐渐下降.落干 180 d

时,淹水 2 m 处的土壤全磷含量最高.

淹水-落干期间,消落带土壤有效磷含量总体呈增加趋势.淹水 30 ~ 180 d,消落带土壤有效磷含量增幅高于未淹土壤,而落干后土壤有效磷的增幅低于未淹没土壤 (图 5).有效磷含量变化范围为 3.4 ~ 23.0 mg·kg⁻¹,最大值为淹水深度 0 m,时间 180 d 时的土壤 (此条件下 pH 亦最大),最小值为淹水 0 m,时间 60 d 的土样.由图 5 可见,淹水 30 d、60 d 时,各深度土样有效磷含量为 3.4 ~ 7.7 mg·kg⁻¹;淹水 180 d 时,各深度土样有效磷含量为 4.5 ~ 13.6 mg·kg⁻¹,除 0 m 外,各深度的有效磷含量均高于空白 (6.8 mg·kg⁻¹);落干 180 d 后,未淹土壤、各淹没水深处土壤有效磷含量增加,含量在 15.4 ~ 23.0 mg·kg⁻¹.

2.3 淹水-落干对消落区土壤无机磷各形态变化的影响

由表 1 可见,相同淹水深度不同时间或者相同淹水时间不同深度下,Fe-P 含量在 157.4 ~ 251.6

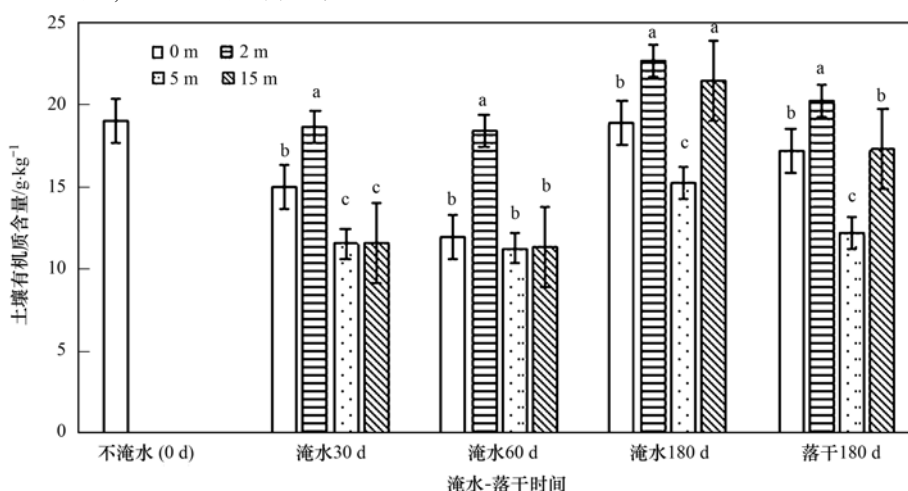
图中不同字母表示 $P < 0.05$ 上差异显著,下同

图3 淹水-落干条件下供试土壤有机质含量

Fig. 3 Organic material in the test soil under the flooding-drying condition

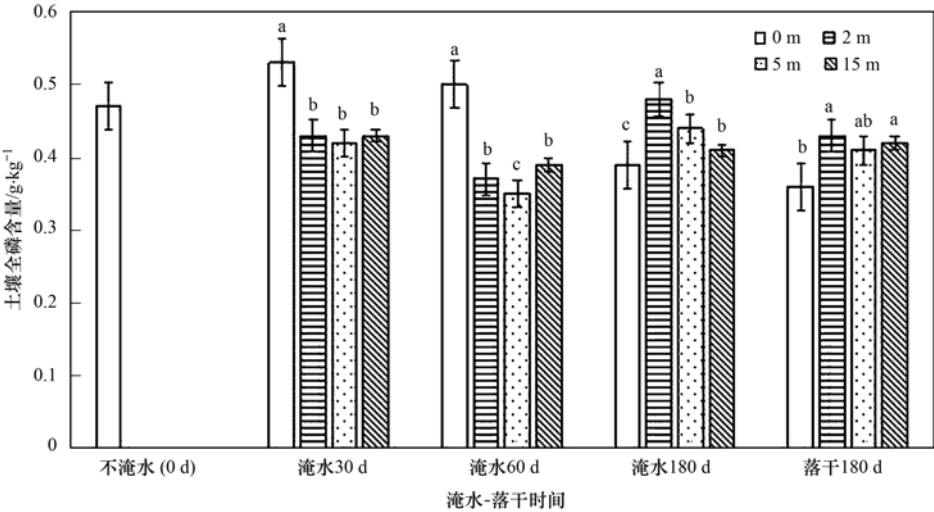


图4 淹水-落干条件下供试土壤全磷含量

Fig. 4 Total phosphorus in test soil under the flooding-drying condition

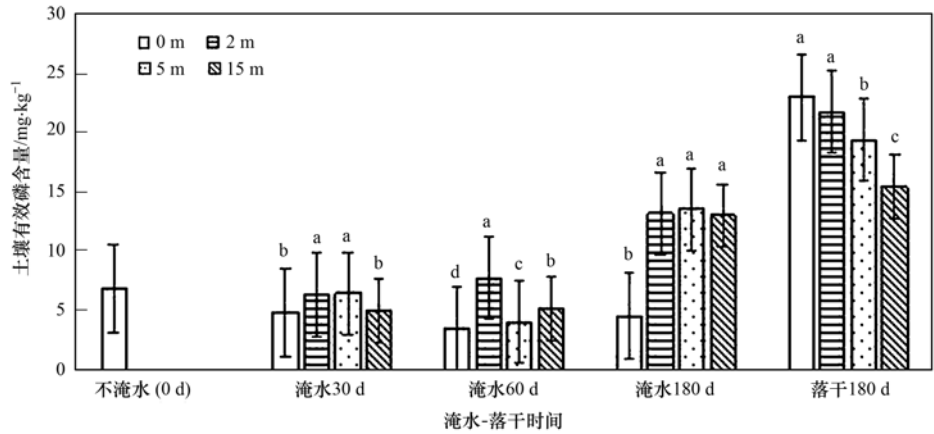


图5 淹水-落干条件下供试土壤有效磷含量

Fig. 5 Available phosphorus in the tested soil under the flooding-drying condition

表1 各淹水时刻和淹水深度无机磷形态分布特征¹⁾/%

Table 1 Distribution of inorganic phosphorus with different flooding time and depth/%

无机磷形态	淹水深度/m	淹水 0 d	淹水 30 d	淹水 60 d	淹水 180 d	落干 180 d
Ca ₂ -P	0	2.92	1.45 d	1.45 d	2.77 c	6.32 a
	2	2.92	3.17 a	3.28 a	2.34 d	5.98 b
	5	2.92	2.70 b	2.51 b	3.02 b	5.77 b
	15	2.92	2.28 c	2.11 c	3.62 a	4.79 c
Ca ₈ -P	0	5.83	4.63 b	4.71 b	5.08 a	8.62 a
	2	5.83	5.95 a	6.59 a	3.08 c	6.85 b
	5	5.83	3.23 c	3.54 c	4.07 b	6.27 bc
	15	5.83	2.02 d	2.21 d	4.11 b	5.50 d
Al-P	0	10.06	6.25 c	8.47 d	11.48 bc	14.23 c
	2	10.06	8.92 b	10.64 b	11.15 c	14.41 bc
	5	10.06	6.91 c	9.95 c	11.84 b	14.65 b
	15	10.06	10.25 a	12.13 a	13.02 a	15.48 a
Fe-P	0	38.91	36.33 b	44.08 b	64.32 a	69.41 a
	2	38.91	46.04 a	50.46 a	51.09 b	51.30 b
	5	38.91	46.45 a	53.23 a	54.40 b	52.93 b
	15	38.91	44.52 a	45.62 b	47.57 bc	37.17 c

1) 数值后不同字母表示 $P < 0.05$ 上差异显著

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占全磷的比例(质量分数) 36.3% ~ 69.4%; Al-P 含量 29.1 ~ 65.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占全磷的比例 6.3% ~ 15.5%; $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量 8.6 ~ 31.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占全磷的比例 2.0% ~ 8.6%; $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量 7.2 ~ 25.9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占全磷的比例 1.5% ~ 6.3%。4 种无机磷含量占全磷含量的比例大小顺序均为 $\text{Fe-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Ca}_2\text{-P}$ 。由表 1 还可以看出, 土壤的 Fe-P、Al-P 与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的最大含量均出现在淹水深度为 0 m, 时间落干 180 d, 而当淹水深度为 15 m 时 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的含量最大。

淹水期间(淹水 30 ~ 180 d), 土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 占全磷的比例高于未淹没土壤, 而落干 180 d 时低于未淹没土壤。落干 180 d 后 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Al-P 和 Fe-P (除深度 15 m, 落干 180 d 的 Fe-P 含量) 的含量占比均升高。淹没水深也影响无机磷的形态, 水深 2 m 处消落带土壤的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 比例高于水深 5 m 和 15 m 处的土壤, 而水深 15 m 处消落带土壤的 Al-P 比例高于水深 2 m 和 5 m 处的土壤。

3 讨论

3.1 原位淹水条件下土壤理化性质变化及原因

本试验中, 淹水后土壤 pH 在前期小幅降低接着升高最后趋于中性。张金洋等^[22]模拟三峡库区消落带淹水研究发现, 淹水后酸性土壤的 pH 值升高, 而碱性土壤的 pH 值降低, 最终土壤 pH 趋于中性, 本试验结果与之一致。淹水前期 pH 降低可能是由于植物根系产生较多的生物酸以及有机质分解产生 CO_2 所致, 与前期有机质含量降低相符(图 3); 持续淹水后 pH 逐渐升高, 可能是由于盆内植物的活动减弱或者死亡, 酸性物质分泌量减少甚至不产生, 以及土壤中高价态金属离子发生还原反应而消耗 H^+ 所致。

土壤有机质不仅是各种营养物质的重要来源, 也是反映营养程度的重要指标。有机质除增加土壤储存与供应养分的能力外, 也增加土壤的缓冲性能, 提高土壤保水性能^[23]。试验淹水前期, 有机质含量因矿化而降低, 后期有机质含量升高, 可能是由于持续淹水导致盆中植物缺氧死亡, 植物残体成为新有机质来源, 形成新的有机质速度大于有机质的矿化速度。落干期间, 土壤含氧量充足, 有机质持续矿化, 导致有机质含量减少。

整个淹水-落干过程, 全磷含量变化大致分 3 个时期, 前期(0 ~ 60 d) 含量降低, 可能是流水冲走部分吸附磷的土壤颗粒及前期盆内植物吸收磷较多;

中期(60 ~ 180 d) 全磷含量增加, 可能是此阶段外源磷流入淹水土壤内, 且持续淹水植物的活性降低, 导致吸磷量下降; 落干后, 盆内植株生长活力增强, 吸磷量增加, 因此土壤全磷含量降低。

综上, 本试验淹水-落干结束, 消落区土壤有机质和全磷含量降低, 这与其他研究结果相似。王晓荣等^[24]发现在一些坡度较陡的河岸带上, 土壤养分的流失大于养分的沉积, 水位消涨导致土壤养分含量降低。

本试验中, 土壤有效磷含量随淹水时间先降低后逐渐升高, 与全磷的变化规律基本一致。而在淹水 180 d ~ 落干 180 d 期间, 土壤有效磷含量大幅度增加, 可能是由于落干后土壤氧化铁吸附态磷向游离态 FePO_4 转化, 导致有效磷含量升高; 同时, 落干后盆栽植物吸收磷增加, 促进缓效态磷和闭蓄态磷向有效磷转化。朱强等^[25]的研究发现, 消落区淹水土壤中 Olsen-P 主要是游离的 FePO_4 和 AlPO_4 , 在淹水过程中 Olsen-P 含量的变化可能是由于部分游离态的 FePO_4 、 AlPO_4 与有效性较低的 Fe-P 和 Al-P 相互转化, 或是非晶形铁铝对磷吸附、解吸所致, 也可能与植株吸收利用及转化有关。马利民等^[10]的研究表明, 当消落区土壤在持续淹水时, 消落区土壤中磷释放的主要动力为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的溶解和还原状态下 Fe-P 的释放; 而干湿交替条件下, 磷释放的主要来源是氧化-还原条件下 Fe-P 形态的转换。本试验中, 淹水期间(0 ~ 180 d), 土壤中有效磷含量先减小后增加。持续淹水 180 d 时, 土壤中有效磷含量增加, 可能是土壤中氧化物的还原性溶解向土壤中释放出更多的有效磷, 最终提高了土壤中有效磷的含量。

3.2 原位淹水-落干条件下土壤无机磷形态的变化

蒋柏藩等^[20]对石灰性土壤无机磷有效性的研究表明, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 是作物的有效磷源, Al-P、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 Fe-P 是缓效磷源, 而 O-P 是无效磷源。本试验进行磷分级时未考虑 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 和 O-P, 而只探讨了 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Al-P 和 Fe-P 的变化。

Ca-P 主要来源于碎屑岩石或生物成因的磷灰石磷及难溶性的磷酸钙矿物^[26]。在持续淹水过程中, 土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 随淹水时间和深度的变化趋势大体一致, 在淹水 0 m (水面) 和 2 m 时, 随淹水时间增长, 其含量持续降低, 在淹水 5 m、15 m 时则先降低后升高; 淹水 60 d 时随淹水深度增加, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量均有所降低, 但淹水 180 d 后, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量随淹水深度的增加而升高, 原因可能是淹水提高了 CO_2 的释放, 导致土壤中 Ca-P 溶解,

落干 180 d 后两者含量升高; $\text{Ca}_2\text{-P}$ 占全磷 1.5% ~ 6.3%, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 占全磷的 2.0% ~ 8.6%。

本试验土壤 Ca-P 占全磷比例相对最低, Al-P 稍高, Fe-P 是主要的存在形态, 这与金相灿等^[27]研究太湖沉积物磷形态的结果一致, 可能是试验区生活污水含磷以及农业活动施磷。pH 和氧化还原电位等环境条件变化时, Fe/Al-P 可转化成可溶态, 具有较高的生物活性。因此, 这两种形态的磷常被称为活性磷或生物可利用性磷。该区域的 Fe/Al-P 含量较高, 特别是 Fe-P , 研究该形态磷的变化对库区水体磷污染防控有重要意义。

4 结论

(1) 三峡库区消落带土壤原位淹水-落干期间, 土壤 pH、有机质含量随淹水时间先降低后升高。 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 在淹水 0 m、2 m 处随淹水时间持续下降, 淹水 5 m、15 m 处随淹水时间先降低后升高, 落干 180 d 后含量显著增加, 随淹水深度的增加, 含量有降低的趋势。

(2) 持续淹水土壤中, Al-P 含量随时间先降低后持续升高, 落干 180 d 后继续升高, 随淹水深度的变化趋势不明显; Fe-P 含量随淹水时间先升高后降低。

(3) 总体而言, 经淹水-落干处理之后土壤的 Fe-P (除了深度 15 m, 落干 180 d 的处理外)、 Al-P 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 及 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的含量均高于淹水-落干前, 4 种形态的无机磷占全磷的比例大小顺序为 $\text{Fe-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Ca}_2\text{-P}$, Fe/Al-P 含量高易引发水污染。

参考文献:

- [1] Graf W L. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers[J]. *Geomorphology*, 2006, **79**(3-4): 336-360.
- [2] Battle-Aguilar J, Brovelli A, Luster J, *et al.* Analysis of carbon and nitrogen dynamics in riparian soils: model validation and sensitivity to environmental controls[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **429**: 246-256.
- [3] Cade-Menun B J, Navaratnam J A, Walbridge M R. Characterizing dissolved and particulate phosphorus in water with ^{31}P nuclear magnetic resonance spectroscopy [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(24): 7874 - 7880.
- [4] 李楠, 单保庆, 张洪, 等. 北运河下游典型灌渠沉积物有机磷形态分布特征[J]. *环境科学*, 2010, **31**(12): 2911-2916. Li N, Shan B Q, Zhang H, *et al.* Organic phosphorus forms in the sediments in the downstream channel of North Canal River Watershed[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(12): 2911-2916.
- [5] 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.
- [6] He L P, Fu C, Xie K, *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.
- [7] 石孝洪. 三峡水库消落区土壤磷素释放与富营养化[J]. *土壤肥料*, 2004, (1): 40-42, 44.
- [8] Shi X H. Eutropication and phosphorus release of soil in drawdown area of Three Gorges reservoir [J]. *Soils and Fertilizer*, 2004, (1): 40-42, 44.
- [9] Gao L, Zhang L H, Shao H B. Phosphorus bioavailability and release potential risk of the sediments in the coastal wetland: a case study of Rongcheng Swan Lake, Shandong, China [J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2014, **42**(7): 963-972.
- [10] 高兆平, 胡俊, 朱磊. 三峡水库新政小流域土壤无机磷的有效性 & 流失风险研究[J]. *环境影响评价*, 2013, **35**(S1): 7-10, 30.
- [11] Gao Z P, Hu J, Zhu L. Assessment for soil inorganic phosphorus effectiveness and phosphorus loss risks in Xinzhen watershed in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Environment and Ecology in the Three Gorges*, 2013, **35**(S1): 7-10, 30.
- [12] 曹琳, 吉芳英, 林茂, 等. 三峡库区干湿交替消落区土壤磷形态[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, **20**(1): 101-106.
- [13] Cao L, Ji F Y, Lin M, *et al.* Soil phosphorus form analysis in fluctuating (dry wet cycling) zone of Three Gorges Reservoir Area [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, **20**(1): 101-106.
- [14] 马利民, 张明, 滕衍行, 等. 三峡库区消落区周期性干湿交替环境对土壤磷释放的影响[J]. *环境科学*, 2008, **29**(4): 1035-1039.
- [15] Ma L M, Zhang M, Teng Y X, *et al.* Characteristics of phosphorus release from soil in periodic alternately waterlogged and drained environments at WFZ of the Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(4): 1035-1039.
- [16] 曾祉祥, 雷沛, 张洪, 等. 丹江口水库典型消落区土壤氮磷赋存形态及释放特征研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(5): 1383-1392.
- [17] Zeng Z X, Lei P, Zhang H, *et al.* Nitrogen and phosphorus fractions and releasing characteristics of the soils from the representative water-level-fluctuating zone of Danjiangkou Reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(5): 1383-1392.
- [18] 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.
- [19] Ran X M, Jiang Z M, He M J, *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.
- [20] 何立平, 刘丹, 于志国, 等. 三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 950-954.
- [21] He L P, Liu D, Yu Z G, *et al.* Distribution and content of transferable nitrogen in the soil of water level fluctuating zones of mainstream and its tributary of Three Gorges Reservoir Areas during the dry period [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**

- (3): 950-954.
- [14] 张彬, 陈猷鹏, 方芳, 等. 三峡库区淹没消落区土壤氮素形态及分布特征[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(5): 1126-1133.
- Zhang B, Chen Y P, Fang F, *et al.* Nitrogen forms and their distribution characteristics in the soils of water-level-fluctuating zone in the central Three Gorges Reservoir[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(5): 1126-1133.
- [15] 郭劲松, 贺阳, 付川, 等. 三峡库区腹心地带消落区土壤氮磷含量调查[J]. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(3): 311-317.
- Guo J S, He Y, Fu C, *et al.* Investigation of soil nitrogen and phosphorus in water fluctuation zone in central district of Three Gorges Reservoir Area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, **19**(3): 311-317.
- [16] Zhang B, Fang F, Guo J S, *et al.* Phosphorus fractions and phosphate sorption-release characteristics relevant to the soil composition of water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir[J]. *Ecological Engineering*, 2012, **40**: 153-159.
- [17] 林俊杰, 杨振宇, 刘丹, 等. 干湿交替下三峡支流消落带沉积物粒径组成及氮分布特征[J]. 土壤学报, 2016, **53**(3): 602-611.
- Lin J J, Yang Z Y, Liu D, *et al.* Particle size composition of sediment and nitrogen distribution in the water level fluctuating zone of tributaries of the Three Gorges Reservoir as affected by dry-wet alternation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, **53**(3): 602-611.
- [18] 华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 等. 三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(1): 138-146.
- Hua L L, Li W C, Zhai L M, *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus emissions in the Gufu River small watershed of the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 138-146.
- [19] 张志永, 程丽, 李春辉, 等. 三峡水库淹没水深对消落带植物牛鞭草和狗牙根生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 水生态学杂志, 2016, **37**(3): 49-55.
- Zhang Z Y, Cheng L, Li C H, *et al.* Growth and antioxidant enzyme activity in *Hemarthria altissima* and *Cynodon dactylon* in response to water depth in the water level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Hydroecology*, 2016, **37**(3): 49-55.
- [20] 蒋柏藩, 顾益初. 石灰性土壤无机磷分级体系的研究[J]. 中国农业科学, 1989, **22**(3): 58-66.
- Jiang B F, Gu Y C. A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soils [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1989, **22**(3): 58-66.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (3rd ed.) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [22] 张金洋, 王定勇, 石孝洪. 三峡水库消落区淹水后土壤性质变化的模拟研究[J]. 水土保持学报, 2004, **18**(6): 120-123.
- Zhang J Y, Wang D Y, Shi X H. Change of soil character after flooding in drawdown area of Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, **18**(6): 120-123.
- [23] 王永华, 钱少猛, 徐南妮, 等. 巢湖东区底泥污染物分布特征及评价[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(6): 22-26.
- Wang Y H, Qian S M, Xu N N, *et al.* Characteristics of distribution of pollutants and evaluation in sediment in the East area of Chaohu Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, **17**(6): 22-26.
- [24] 王晓荣, 程瑞梅, 肖文发, 等. 三峡库区消落带初期土壤养分特征[J]. 生态学杂志, 2010, **29**(2): 281-289.
- Wang X R, Cheng R M, Xiao W F, *et al.* Soil nutrient characteristics in juvenile water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, **29**(2): 281-289.
- [25] 朱强, 安然, 胡红青, 等. 三峡库区消落带土壤对磷的吸附和淹水下磷的形态变化[J]. 土壤学报, 2012, **49**(6): 1128-1135.
- Zhu Q, An R, Hu H Q, *et al.* Adsorption and transformation of phosphorus in soils of the tidal zone of the Three Gorges Reservoir region [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, **49**(6): 1128-1135.
- [26] 王超, 邹丽敏, 王沛芳, 等. 典型城市浅水湖泊沉积物中磷与铁的形态分布及相关关系[J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3400-3404.
- Wang C, Zou L M, Wang P F, *et al.* Distribution and correlation of P and Fe fractions in sediments of typical urban shallow lakes [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(12): 3400-3404.
- [27] 金相灿, 庞燕, 王圣瑞, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物磷形态及其分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(1): 279-285.
- Jin X C, Pang Y, Wang S R, *et al.* Phosphorus forms and its distribution character in sediment of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, **27**(1): 279-285.

CONTENTS

Variation of O ₃ Concentration in Different Regions of Beijing from 2006-2015	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, AN Xin-xin, <i>et al.</i> (1)
Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in the North Suburb of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i> (9)
Seasonal Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM ₁₀ Around Electroplating Plants	ZHAO Zhen-li, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i> (18)
Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} in Yulin City, Guangxi	HUANG Jiong-li, CHEN Zhi-ming, MO Zhao-yu, <i>et al.</i> (27)
Concentrations and Compositions of Different Forms of Nitrogen and Phosphorus in Atmospheric Aerosols in the Qingdao Coastal Region and over the Yellow and Bohai Sea	ZHANG Rui-feng, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i> (38)
Air Quality Subarea Management: A case study of Guangdong Province	YANG Liu-lin, LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, <i>et al.</i> (49)
Remote Sensing Identification of Urban Black-Odor Water Bodies Based on High-Resolution Images; A Case Study in Nanjing	WEN Shuang, WANG Qiao, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (57)
Simulation of Nitrate Isotopic ($\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$) by Coupling the Hydrology and Transport Processes Described by the SWAT Model	WANG Kang, RAN Ning, LIN Zhong-bing, <i>et al.</i> (68)
Estimation of and Control Strategies for Pollution Loads from Non-point Sources in the Chenghai Watershed	CHEN Xue-kai, LIU Xiao-bo, PENG Wen-qi, <i>et al.</i> (77)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metals in Drinking Water Sources from the Luhun Reservoir	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (89)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Antibiotics in the Water Supply System in Tianjin	ZHANG Xin-bo, SONG Zi, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (99)
Organic Distribution Characteristics and Influence on Drinking Water Quality in the Typical Water Sources for Towns in the Southwest Hilly Area of China	WANG Qiong, LI Nai-wen, LI Lei, <i>et al.</i> (109)
Health Risk Evaluation of Organochlorine and Organophosphorous Pesticides in Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (117)
Pollution Status and Risks of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in the Soil of the Yellow River	YAO Hong, LU Shuang, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (123)
Effects of Flooding and Drying on the Transformation of Soil Inorganic Phosphorus in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir, China	ZHOU Jian, LI Chun-hui, ZHANG Zhi-yong, <i>et al.</i> (130)
Effect of Phosphate on the Ammonium Removal Performance of Iron-Manganese Co-oxide Film in Surface Water Treatment	ZHUO Rui-shuang, HUANG Ting-lin, ZHANG Rui-feng, <i>et al.</i> (137)
Enhanced Photoelectrocatalytic Oxidation of Cu(CN) ₃ ²⁻ and Synchronous Cathodic Deposition of Cu by Peroxydisulfate	DANG Cong-zhe, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (145)
Using HKUST-1 as a Template for Copper Oxides Preparation to Activate Peroxymonosulfate for RhB Degradation	PU Jia-yi, WAN Jin-quan, WANG Yan, <i>et al.</i> (152)
Evaluation of Performance of an Aminated Rosin-based Resin for Adsorption of Norfloxacin from Aqueous Solutions	MA Ya-hong, HUANG Wan-ting, DIAO Kai-sheng, <i>et al.</i> (161)
Arsenic(V) Removal by Granular Adsorbents Made from Backwashing Residuals from Biofilters for Iron and Manganese Removal	ZENG Hui-ping, LÜ Sai-sai, YANG Hang, <i>et al.</i> (170)
Arsenic Adsorption and Its Species on Ferrihydrite and Ferrihydrite Colloid	MA Yu-ling, MA Jie, CHEN Ya-li, <i>et al.</i> (179)
Comparison of Amphoteric-Cationic and Amphoteric-Anionic Modified Magnetic Bentonites: Characterization and Sorption Capacity of Phenol	REN Shuang, MENG Zhao-fu, WANG Teng, <i>et al.</i> (187)
Pollution Characteristics of Parabens in Typical Sewage Wastewater	ZHAO Xue, ZHANG Zi-feng, ZHU Fu-jie, <i>et al.</i> (195)
Influence of Hydraulic Retention Time on the Treatment of Polluted River Water by an Activated Carbon Rotating Biological Contactor	XU Wen-jia, CHENG Xiao-ying, <i>et al.</i> (202)
Removal and Influence of Ciprofloxacin in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, SHU Xiao-ming, <i>et al.</i> (212)
Operation of the AAO Process Under Low Dissolved Oxygen Conditions and Its Simulation	CAO Te-te, WANG Lin, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (219)
Inhibitory Effects of Phosphate and Recovery on a Nitrification System	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i> (227)
Effect of Carbon Source on Lab-scale SAD Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (232)
Effect of Volume Loading Rate (VLR) on Denitrifying Phosphorus Removal by the ABR-MBR Process	LÜ Liang, YOU Wen, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (239)
Combined Process of DNB-F-O ₃ -GAC for Nitrogen and Phosphorus and Metabolite Advanced Removal	ZHONG Li-yan, HAO Rui-xia, WANG Wei-dong, <i>et al.</i> (247)
Influence of Operating Modes for the Alternating Anoxic/Oxic Process on Biological Nitrogen Removal and Extracellular Polymeric Substances of Activated Sludge	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (256)
Effects of Nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) on Denitrifying Performance of an Upflow Granular Sludge Bed Reactor	ZHOU Feng, WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (263)
Influence on Desulfurization Efficiency and Interactions of Fe/S and pH During H ₂ S in situ Depression of High Solid Anaerobic Digestion	HAN Yun, CAO Yu-qin, ZHUO Yang, <i>et al.</i> (269)
Analysis of Storage Sludge Composition Characteristics and Evolutionary Regularity in the Hunhe River Basin	LIU Tian-tian, CUI Chong-wei, HE Jun-guo, <i>et al.</i> (276)
Enhancement of Anaerobic Methane Production by Removal of Organic-bonding Metals from Sewage Sludge	LU Yi-qing, XU Ying, DONG Bin, <i>et al.</i> (284)
Comparison of Different Leaching Methods for Heavy Metals in Sludge Fly Ash and Comprehensive Toxicity Evaluation	WANG Feng, LI Run-dong, LI Yan-long, <i>et al.</i> (292)
Diurnal Variations of CH ₄ and N ₂ O Fluxes from the Drained Aquaculture Pond in the Minjiang River Estuary During Early Winter	YANG Ping, TAN Li-shan, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i> (300)
Effects of Three Soil Amendments on Greenhouse Gas Emissions From Corn Fields in the Hetao Irrigation District	WU Yan, HONG Mei, LIN Li-long, <i>et al.</i> (310)
Effect of Organic Manure Substitution of Synthetic Nitrogen on Crop Yield and N ₂ O Emission in the Winter Wheat-Summer Maize Rotation System	HOU Miao-miao, LÜ Feng-lian, ZHANG Hong-tao, <i>et al.</i> (321)
Dynamics of Rice Photosynthesized Carbon Input and Its Response to Nitrogen Fertilization at the Jointing Stage: ¹³ C-CO ₂ Pulse-labeling	CHEN Shan, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (331)
Profile Distribution of Soil Organic and Inorganic Carbon Under Different Land Use Types in the Loess Plateau of Northern Shaanxi	LAN Zhi-long, ZHAO Ying, ZHANG Jian-guo, <i>et al.</i> (339)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (348)
Effects of Straw and Biochar Return in Soil on Soil Aggregate and Carbon Sequestration	XU Guo-xin, WANG Zi-fang, GAO Ming, <i>et al.</i> (355)
Assessment of the Availability of Soil Copper and Related Influencing Factors at a County Scale	LI Jin-fen, QU Ming-kai, LIU Gang, <i>et al.</i> (363)
Application of the LUR Model in the Prediction of Spatial Distributions of Soil Heavy Metals	ZENG Jing-jing, SHEN Chun-zhu, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (371)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils of Shenyang North New Area	LI Jia-kang, SONG Xue-ying, WEI Jian-bing, <i>et al.</i> (379)
Passivation of Simulated Pb- and Cd-Contaminated Soil by Applying Combined Treatment of Phosphate, Humic Acid, and Fly Ash	ZHAO Qing-yuan, LI Xiao-ming, YANG Qi, <i>et al.</i> (389)
Distribution and Accumulation of Cadmium in Paddy Soil and Rice Affected by Pollutant Sources Control and Improvement Measures	FENG Wen-li, GUO Zhao-hui, SHI Lei, <i>et al.</i> (399)
Differences in Cd Accumulation in Typical Soils Under the Double Rice System	LI Xin-yang, LONG Jian, WANG Shu-bing, <i>et al.</i> (406)
Distribution Characteristics of Mercury in Reed Leaves from the Jiapiougou Gold Mine in the Songhua River Upstream	ZHANG Man-yin, LI Meng-jie, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (415)
Effect of Nitrate Amendment on Soil Denitrification Activity and Anthracene Anaerobic Degradation	DAI Jun-shuai, ZUO Xiao-hu, WANG Ming-xia, <i>et al.</i> (422)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on Microbial Biomass, Community Structure and Activity in a Paddy Soil	WANG Wei-hua, LIU Yi, TANG Hai-ming, <i>et al.</i> (430)
Analysis of Sulfate-Reducing and Sulfur-Oxidizing Prokaryote Community Structures in Marine Sediments with Different Sequencing Technologies	ZHANG Yu, MI Tie-zhu, ZHEN Yu, <i>et al.</i> (438)
Seasonal and Spatial Variations of Microcystins and Their Relationships with Physicochemical and Biological Factors in Poyang Lake	YUAN Li-juan, LIAO Qie-gen, ZHANG Li, <i>et al.</i> (450)
Distribution of Multidrug-Resistant Bacteria and Antibiotic-Resistant Genes in Livestock Manures	ZHANG Hao, WANG Pan-liang, YANG Qing-xiang, <i>et al.</i> (460)
Influence of Air Pollution Control (APC) Systems and Furnace Type on the Characteristics of APC Residues from Municipal Solid Waste Incinerators	ZHANG Hua, YU Si-yuan, SHAO Li-ming, <i>et al.</i> (467)