

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第12期

Vol.35 No.12

**2014**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次(卷终)

北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征 ..... 高敏,仇天雷,贾瑞志,韩梅琳,宋渊,王旭明(4415)

杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征 ..... 徐昶,叶辉,沈建东,孙鸿良,洪盛茂,焦荔,黄侃(4422)

太原市采暖季 PM<sub>2.5</sub> 中元素特征及重金属健康风险评价 ..... 李丽娟,温彦平,彭林,白慧玲,刘凤娴,史美鲜(4431)

成都市城区 PM<sub>2.5</sub> 中二次水溶性无机离子污染特征 ..... 李友平,周洪,张智胜,王启元,罗磊(4439)

北京市臭氧的时空分布特征 ..... 王占山,李云婷,陈添,张大伟,孙峰,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,潘丽波(4446)

南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析 ..... 安俊琳,朱彬,王红磊,杨辉(4454)

祁连山中段降水化学的环境意义研究 ..... 李宗杰,李宗省,田青,宋玲玲,贾冰,郭瑞,宋耀选,苏索南,韩春坛(4465)

中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化 ..... 孙涛,马明,王定勇,黄礼昕(4475)

本底大气 CO<sub>2</sub> 观测分析过程中 QA/QC 方法的建立与评估 ..... 刘立新,周凌晔,夏玲君,王红阳,方双喜(4482)

轻型汽油车 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放因子研究 ..... 何立强,宋敬浩,胡京南,解淑霞,祖雷(4489)

煤燃烧超细微粒粒径谱演变及排放因子的实验研究 ..... 孙在,杨文俊,谢小芳,陈秋方,蔡志良(4495)

春、夏季长江口及其邻近海域溶解 N<sub>2</sub>O 的分布和海-气交换通量 ..... 王岚,张桂玲,孙明爽,任景玲(4502)

珠江口水体组分的吸收特性分析 ..... 王珊珊,王永波,扶卿华,尹斌,李云梅(4511)

河流汇合处水体磷素形态特征及紫外光照的影响:以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江交汇为例 ..... 闫金龙,江韬,魏世强,李玲,郭念,李璐璐,刘江(4522)

基于太湖微囊藻毒素的叶绿素 a 阈值研究 ..... 魏代春,苏婧,纪丹凤,伏小勇,王骥,霍守亮,崔驰飞,唐军,席北斗(4530)

百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征 ..... 冯源嵩,林陶,杨庆媛(4537)

自然光照对淹水条件下三峡库区消落带典型土壤磷释放影响 ..... 郭念,江韬,魏世强,闫金龙,梁俭,卢松,高洁(4544)

垂直流人工湿地 LDHs 覆膜改性沸石基质强化除磷效果及其机制 ..... 张翔凌,陈俊杰,郭露,陈巧珍,王晓晓(4553)

三峡库区消落带 3 种植物淹水后汞的动态变化及其对水体的影响 ..... 张翔,张成,孙荣国,王定勇(4560)

纳米 TiO<sub>2</sub> 对底泥中汞释放及活化的影响 ..... 张金洋,李楚娴,王定勇,周雄,孙荣国,张成,梁丽(4567)

首都水源地——洋河流域人为源多环芳烃(PAHs)排放清单估算及其影响分析 ..... 高佳佳,罗维,奚晓霞(4573)

石化工业园区有毒废水来源识别研究 ..... 杨茜,于茵,周岳溪,陈学民,伏小勇,王淼(4582)

污水处理厂中红霉素抗药性基因的污染特征及选择性因子 ..... 李侃竹,吴立乐,黄圣琳,何势,刘振鸿,薛罡,高品(4589)

2 种填料 BAF 深度处理印染废水沿程污染物变化规律研究 ..... 刘俊峰,范举红,刘锐,陈吕军,张永明(4596)

硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群驯化及其群落特征 ..... 席婧茹,刘素琴,李琳,刘俊新(4602)

MBR 处理腈纶废水的效能及微生物群落结构分析 ..... 魏健,宋永会,赵乐(4610)

制革废水的厌氧氨氧化 ABR 脱氮工艺研究 ..... 曾国驱,贾晓珊(4618)

生物滤池工艺的数值模拟与运行优化 ..... 邹宗森,施汉昌,陈向强,谢小青(4627)

气升装置对厌氧氨氧化污泥形态及性能的影响 ..... 李祥,黄勇,袁怡,周呈,陈宗短,张大林(4636)

给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究 ..... 王建军,李田,张颖(4642)

北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染 ..... 白莉萍,齐洪涛,伏亚萍,李萍(4648)

电子垃圾拆解区污染池塘中鱼类多氯联苯及其代谢产物的组织分配及暴露风险 ..... 唐斌,罗孝俊,曾艳红,麦碧娴(4655)

广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价 ..... 谢文平,朱新平,郑光明,马丽莎(4663)

崇明典型水生生物中雌激素含量和分布特征 ..... 耿婧婧,叶爱丽,杨毅,刘敏,张婧,周俊良(4671)

啮虫脒光催化降解动力学的优化及其降解产物的分析 ..... 周文常,阳海,胡志斌,兰世林(4678)

氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响 ..... 陈高起,傅瓦利,罗亚晨,高文龙,李胜功,杨浩(4686)

土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响 ..... 李鉴霖,江长胜,郝庆菊(4695)

上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析 ..... 唐冬,毛亮,支月娥,张进忠,周培,柴晓彤(4705)

某铅酸蓄电池污染场地表层土壤重金属 Pb 空间分布预测研究 ..... 刘庚,牛俊杰,张朝,赵鑫,郭观林(4712)

海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究 ..... 孙约兵,王朋超,徐应明,孙扬,秦旭,赵立杰,王林,梁学峰(4720)

盐碱区不同开发年限水田温室气体排放规律及影响因素 ..... 汤洁,方天儒,侯克怡,赵仁竹,梁爽(4727)

不同热解温度生物炭对 Cd(II) 的吸附特性 ..... 王震宇,刘国成,Monica Xing,李锋民,郑浩(4735)

碱土金属钙沉积对 Mn-Ce/TiO<sub>2</sub> 低温 SCR 催化剂脱硝性能的影响 ..... 周爱奕,毛华峰,盛重义,谭月,杨柳(4745)

国内外水泥工业大气污染物排放标准比较研究 ..... 江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4752)

我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考 ..... 江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4759)

《环境科学》第35卷(2014年)总目录 ..... (4767)

《环境科学》征订启事(4617) 《环境科学》征稿简则(4654) 信息(4474, 4529, 4536, 4744)

# 自然光照对淹水条件下三峡库区消落带典型土壤磷释放影响

郭念<sup>1</sup>, 江韬<sup>1,2\*</sup>, 魏世强<sup>1,2\*</sup>, 闫金龙<sup>1</sup>, 梁俭<sup>1</sup>, 卢松<sup>1</sup>, 高洁<sup>1</sup>

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716)

**摘要:** 为研究淹水条件下光照对土-水界面磷释放的影响, 以三峡库区消落带典型土壤为对象, 通过室内自然光照试验, 讨论了铁还原及有机质降解对磷释放的影响, 分析光照对淹水土壤磷释放的影响机制. 结果表明, 光照对淹水土壤磷释放存在一定程度的抑制作用, 光照作用下淹水紫色潮土上覆水体中 TP 浓度范围为 0.018 ~ 0.033 mg·L<sup>-1</sup>, 避光处理为 0.02 ~ 0.057 mg·L<sup>-1</sup>, 灰棕紫泥光照下 TP 浓度范围为 0.028 ~ 0.045 mg·L<sup>-1</sup>, 避光处理为 0.04 ~ 0.084 mg·L<sup>-1</sup>. 光照引起淹水土壤中氧化物的变化可能是光照抑制磷释放的重要原因. 光照导致土壤中氧化物饱和程度降低, 铁还原和无定形铁生成受阻进一步加深了光照对磷释放的抑制影响. CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 反映淹水土壤有机质分解情况, 光照降低有机碳的转化效率, 加速土壤中无机电子受体的消耗, 解释了光照作用下氧化物变化的原因. 由此可见, 光照对淹水土壤磷释放的抑制与淹水土壤中铁还原和有机质分解密切相关.

**关键词:** 三峡库区; 消落带; 光照; 铁还原; 磷释放; 淹水土壤; 天然有机质

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)12-4544-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.12.017

## Effects of Light Irradiation on Phosphorous Releases from Typical Submerged Soils of Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoirs Areas

GUO Nian<sup>1</sup>, JIANG Tao<sup>1,2</sup>, WEI Shi-qiang<sup>1,2</sup>, YAN Jin-long<sup>1</sup>, LIANG Jian<sup>1</sup>, LU Song<sup>1</sup>, GAO Jie<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China)

**Abstract:** For understanding the impact of light irradiation on the phosphorus (P) releases from soil-water interface, two types of typical soils sampled from water-level fluctuation zones of Three Gorges Reservoir areas were selected as research objectives, and simulated light irradiation experiment in lab was conducted for unveiling the underlying mechanisms of P releases from submerged soils in the presence of light irradiation. The results showed that light irradiation could inhibit P releases from submerged soils by a certain degree. Under light condition, total P (TP) concentrations in underlying water of submerged purple soil ranged from 0.018 to 0.033 mg·L<sup>-1</sup>, as compared to the range of 0.02-0.057 mg·L<sup>-1</sup> in darkness treatment. Additionally, for gray-brown purple soil, TP was in a range of 0.028-0.045 mg·L<sup>-1</sup> when light irradiated, but in the range of 0.04-0.084 mg·L<sup>-1</sup> under darkness condition. Meanwhile, changes of iron oxides in soils due to light irradiation were possibly to be the important reason to explain the inhibition of light irradiation on P releases. Moreover, light irradiation resulted in decreasing saturation degree of iron oxides in soils, which further inhibited the iron reduction and production of amorphous iron, further enhanced the underlying mechanisms of decreasing P releases in presence of light irradiation. Further, CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> could reflect decomposition of soil organic carbon (SOC) in submerged condition. Light irradiation significantly decreased SOC transformation into carbon gases. Stimulating consumption of inorganic electron acceptors in submerged soils could also be used to explain the changes of iron oxides under light irradiation condition. Thus, inhibition of light irradiation on P releases from submerged soils obviously related with iron minerals reduction and decomposition of organic matter in soils.

**Key words:** Three Gorges Reservoirs areas; water-level fluctuation zones; light irradiation; iron reduction; phosphorus releases; submerged soils; natural organic matter

磷(P)是大多数水体富营养化的主要限制因子<sup>[1]</sup>,其在水-沉积物界面的交换是影响磷从沉积物向上覆水体迁移转化的重要过程<sup>[2]</sup>. 土壤中磷释放与固定过程,和碳(C)、铁(Fe)的循环过程密不可分,尤其在有机质积累程度较高的淹水土壤中<sup>[3,4]</sup>. 三峡库区消落带为水生生态系统和陆地生态系统的衔接过渡地带,存在一个复杂的非季节性淹水环境,

受人为活动干扰明显,因此消落带既可能拦截库区

收稿日期: 2014-01-13; 修订日期: 2014-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171198); 中国博士后科学基金项目(2013M542238); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2013C151); 西南大学博士基金项目(SWU112098)

作者简介: 郭念(1989~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境污染化学, E-mail: 15826161614@qq.com

\* 通讯联系人, E-mail: Jiangtower666@163.com, sqwei@swu.edu.cn

周边径流及水体中磷素成为“汇”,也可能成为水体磷素的重要“源”<sup>[5]</sup>. 目前针对该区域磷释放过程多侧重对磷释放过程的单一描述<sup>[6]</sup>; 在所考察的环境因子影响中<sup>[7-9]</sup>, 对光照的讨论还鲜有报道.

对于淹水土壤而言,特别是浅水区,光照作为一个重要环境因子,可以穿透水体到达淹水土壤. 一方面光辐射诱导的光反应过程<sup>[10]</sup>,产生自由基;另一方面藻类(消耗 CO<sub>2</sub> 产 O<sub>2</sub>)和光合细菌(消耗 CO<sub>2</sub> 不产 O<sub>2</sub>)的光合作用<sup>[11]</sup>,均会对整个水-土界面产生深刻影响. 而光照导致土壤固相铁氧化物和有机质变化<sup>[12]</sup>,可能是解释淹水土壤磷释放特征的关键之一. 光照不易直接作用于沉积物发生物理化学反应,但在光照条件下光合细菌和耐低氧环境的藻类对磷产生吸收和释放的影响<sup>[13]</sup>. 有研究表明<sup>[14-17]</sup>,照度对底栖藻类生长具有显著影响,对磷等营养物质具有同化吸收作用. 同时光合微生物也会对铁的氧化-还原产生影响<sup>[11]</sup>——而铁氧化物与磷的迁移释放密切相关<sup>[18, 19]</sup>. 曲东等<sup>[20]</sup>对水稻土的研究表明光照作用下微生物对有机物的分解作用增强,电子受体消耗增加,最终加快了铁还原;同时 Tsujimura 等<sup>[21]</sup>的研究表明光照使温度上升,微生物活性提高,底泥环境还原程度进一步加剧,从而提高铁还原,进一步引起磷释放. 另外,许伟<sup>[22]</sup>研究发现 DOM 诱导铁还原,进一步导致磷释放. 对于浅水区域,尤其是真光层以上的淹水土壤,光照是整个系统中不可避免的环境因素,因此我们提出如下假设:光照和非光照条件下淹水土壤释放磷的现象是有所差异的.

因此,本研究通过实验室模拟试验,分析了在光照条件下三峡库区消落带两种典型土壤(紫色潮土

和灰棕紫泥)淹水后磷释放的变化情况;并同时结合 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的产生,探讨了在铁还原-磷释放过程中有机物分解(碳循环)所起的作用. 以期丰富三峡库区消落带土壤磷释放机制的研究工作;同时为进一步了解库区消落带水体富营养化特征与温室气体排放的内在联系,提供理论基础和数据支持.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

如图 1 所示,试验所用紫色潮土采集于开县 170 m 高程消落带区域(E108°27'21", N31°11'26");灰棕紫泥土采集于涪陵 160 m 高程的消落带区域(E107°31'37", N29°51'30"). 所有样品均按文献<sup>[23]</sup>规定方法进行采样及分析测定. 土壤的基本性质见表 1.

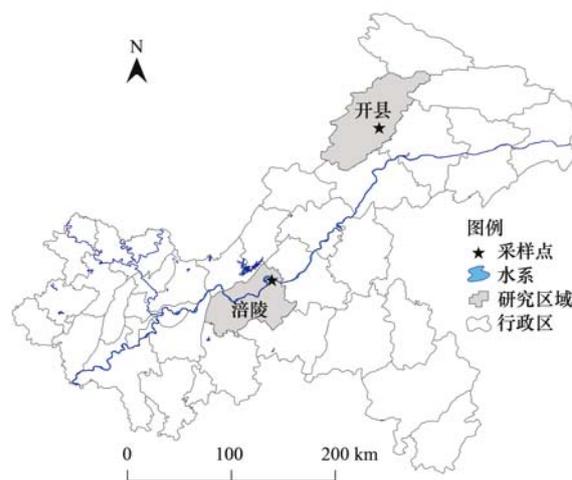


图 1 采样点位置示意

Fig. 1 Sampling locations in the water-level fluctuation zones of Three Gorges reservoir areas

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Physicochemical properties of soil samples

土壤类型	pH	有机质 /g·kg <sup>-1</sup>	总铁 /g·kg <sup>-1</sup>	游离铁 /g·kg <sup>-1</sup>	全磷 /mg·kg <sup>-1</sup>	有效磷 /mg·kg <sup>-1</sup>	采样点
紫色潮土	8.85	8.91	21.65	4.52	315.76	3.49	开县
灰棕紫泥	8.68	13.67	22.74	4.30	267.59	23.50	涪陵

### 1.2 培养试验

风干土壤样本过 2 mm 筛后,称取 30 g 土样若干份,分别置于棕色培养瓶和透明培养瓶内,培养瓶体积 100 mL. 按土-水比 1:1 加入 Millipore 纯水(18.2 mΩ·cm),充高纯 N<sub>2</sub> 除氧后加盖配有三通阀门活塞的瓶盖,便于取样. 于 2013 年 4 月末初夏,自然条件下进行光照和避光试验. 整个试验在 25℃ 恒温条件下进行(室内控温),整个试验在 N<sub>2</sub> 保护

下进行,分别于 0、3、5、7、10、13、17、21、25、30、35、40、50 和 60 d 采集底层土壤(底泥)溶液以及上覆水样,同时收集瓶中 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 气体. 该试验设置 2 个重复. 另分别在装样前后称重,以确定所采集土壤悬液重量,计算干土重.

### 1.3 测定指标及方法

取上覆水体测定总磷(TP)<sup>[24-26]</sup>. 采用文献<sup>[11, 18, 20, 27]</sup>方法采集土壤溶液测定相关指标:

培养瓶摇匀后快速吸取土壤悬液 2 mL 各 4 份备用. 第 1 份置于含 25 mL  $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{NaHCO}_3$  中, 离心后采用钼锑抗比色法<sup>[28]</sup> 测定滤液中有效磷含量; 第 2 份取 2 mL 置于含 20 mL  $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{HCl}$  中, 离心后测定滤液中  $\text{Fe}^{2+}$  含量; 第 3 份置于含 50 mL 草酸-草酸铵溶液中, 离心后测定无定形铁含量; 第 4 份参照文献<sup>[30]</sup> 土壤无机磷分级方法, 置于含 50 mL  $0.25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{NaHCO}_3$  溶液中, 测定土壤磷酸二钙 ( $\text{Ca}_2\text{-P}$ )、磷酸八钙 ( $\text{Ca}_8\text{-P}$ )、磷酸铝 ( $\text{Al-P}$ )、磷酸铁 ( $\text{Fe-P}$ )、闭蓄态磷 ( $\text{O-P}$ )、磷灰石 ( $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ ) 含量.  $\text{Fe}$  测定方法为邻菲罗啉比色法<sup>[29]</sup>. 通过三通阀门迅速抽取气样置于气样瓶中, 以测定  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$ ; 采用 7890A 气相色谱仪 (FID 检测器) 测定<sup>[31]</sup>.

#### 1.4 数据处理

试验数据图采用 Origin 8.0 绘制, 通过 SPSS 17.0 进行方差分析及相关性分析. 采用 MINTEQ 模型计算铁氧化物固相界面的饱和系数 (SI), 模型假设条件: 溶液相与气相中含碳气体处于平衡.  $\text{SI} \geq 0$  为过饱和;  $\text{SI} < 0$  为未饱和.

## 2 结果与讨论

### 2.1 磷释放

图 2 为分别在光照和避光条件下, 淹水土壤上覆水体总磷 (TP) 浓度变化情况. 两种处理下 TP 变化均是先增加后降低最后基本趋于稳定, 和是否光照无关, 这和以往报道基本一致; 淹水环境促进磷释放, 还原条件下底泥磷释放, 并向上覆水体迁移<sup>[32]</sup>. 淹水初期, 底泥铁还原导致磷释放引起上覆水体 TP 量明显增加; 一方面  $\text{Fe}^{2+}$  再次被氧化为  $\text{Fe}^{3+}$  后对磷的吸附<sup>[4]</sup>, 另一方面藻类、微生物等同化作用对磷酸盐的吸收<sup>[33]</sup>, 均会引起磷释放出现波动; 最后趋于稳态释放是生物和非生物因素共同作用的“净”结果.

尽管光照和避光处理中 TP 变化趋势一致, 但 TP 释放存在显著差异 (紫色潮土  $P < 0.05$ ; 灰棕紫泥  $P < 0.01$ ), 光照处理紫色潮土上覆水中 TP 含量变化范围为  $0.018 \sim 0.033 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 均低于避光处理  $0.02 \sim 0.057 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 灰棕紫泥光照下 TP 变化范围为  $0.028 \sim 0.045 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 低于避光处理  $0.04 \sim 0.084 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . 姜霞等<sup>[16]</sup> 也发现光照导致土壤/底泥对上覆水体中外源添加磷酸盐的吸收, 上覆水总磷含量降低. 两种土壤在光照处理中, 磷释放均低于避光处理. 这可能和光照对磷释放机制的影响

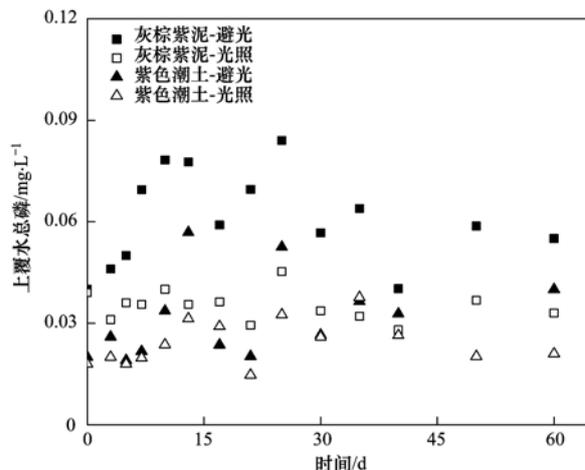


图 2 淹水过程中上覆水体总磷浓度变化

Fig. 2 Changes of total phosphorus concentration in underlying water during submerging under different light irradiation treatments

有关. 一方面土-水界面生成的藻类 (图 3) 对光照吸收, 光合作用能力增加, 磷的生物利用提高, 同时释放的微量  $\text{O}_2$  会再次氧化还原态  $\text{Fe}^{2+}$ , 从而与磷再次结合. 另外, 在  $\text{Fe}^{2+}$  和 DOM 条件下, 光诱导的光 Fenton 反应, 会产生强氧化性的活性自由基 (例如  $\cdot\text{OH}$ )<sup>[34, 35]</sup>, 使已还原的  $\text{Fe}^{2+}$  被氧化; 同时自由基也可能对固相界面上铁氧化物的还原过程 (例如还原性溶解, 释放  $\text{Fe}^{2+}$  和磷) 产生抑制作用, 减少磷释放.



图 3 光照条件下淹水过程中藻类生长

Fig. 3 Algae growth in the soil-water interface during submerging under the natural light condition

为进一步解释磷释放过程, 测定了淹水土壤中有效磷 (Olsen-P) 变化情况. 由图 4 可见, 淹水后土壤有效磷持续增加, 以 30 d 为界大致可分为快速增长期 (I 阶段) 和慢速增长期 (II 阶段). 光照与避光条件下, 两种土壤的有效磷变化不同, 但均表现出避光下有效磷释放高于光照培养. 紫色潮土和灰棕紫泥分别在淹水 17 d 和 7 d 后, 光照和避光处理差异达极显著水平 ( $P < 0.01$ ), 进一步说明光照对土壤有效磷释放存在明显抑制. 60 d 淹水后紫色潮土

和灰棕紫泥土壤悬浮液中有效磷含量光照处理与避光处理分别相差  $3.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $25.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 土壤悬浊液中有效磷是连接土壤固相吸附结合磷与

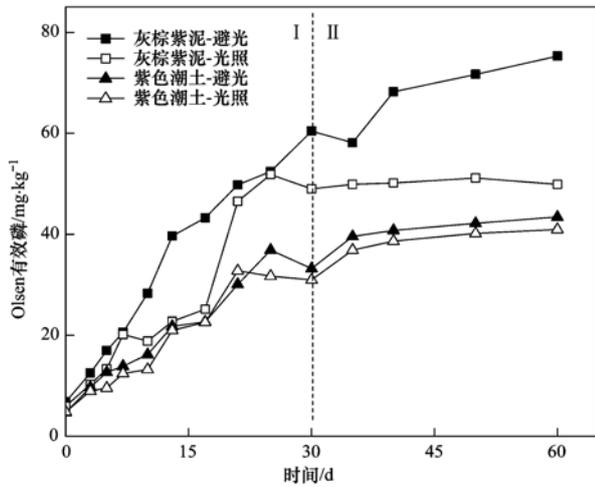


图 4 消落带土壤淹水过程中有效磷浓度变化

Fig. 4 Changes of available phosphorus concentration in soil solution during submerging under different light irradiation treatments

表 2 光照处理下淹水过程中有效磷和上覆水体总磷与无机磷相关性分析<sup>1)</sup>

Table 2 Correlations between Olsen-P of soils, TP of underlying water and inorganic phosphorus in the process of submerging under light irradiation

土壤类型	处理	指标	Ca <sub>2</sub> -P	Ca <sub>8</sub> -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca <sub>10</sub> -P
紫色潮土	避光	TP	-0.015	-0.499	-0.142	-0.039	0.348	0.462
		有效磷	0.319	-0.890 **	-0.353	-0.180	-0.187	0.263
	光照	TP	0.024	-0.227	-0.203	-0.685 **	-0.017	0.563 *
		有效磷	0.579 *	-0.868 **	-0.643 *	-0.612 *	-0.656 *	0.548 *
灰棕紫泥	避光	TP	-0.043	0.180	-0.318	-0.032	-0.082	-0.435
		有效磷	0.051	-0.021	0.388	-0.295	0.507	0.546 *
	光照	TP	-0.289	0.279	-0.104	-0.631 *	0.364	-0.050
		有效磷	-0.093	-0.451	0.243	-0.609 *	-0.353	0.072

1) \*\* 表示  $P < 0.01$ , \* 表示  $P < 0.05$

## 2.2 铁还原

为进一步解释光照抑制磷释放的原因,同时测定了土壤溶液中无定形铁和  $\text{Fe}^{2+}$  变化. 结果表明,淹水过程中无定形铁和  $\text{Fe}^{2+}$  均呈上升趋势(图 5),与是否光照无关. 这与以往研究<sup>[12, 37, 38]</sup>一致,证明淹水土壤的厌氧还原环境会促进铁还原及无定形铁氧化物的活化. 但光照处理中,两种铁的含量明显低于避光处理:紫色潮土和灰棕紫泥分别在淹水第 10 d 和第 30 d 开始,光照和避光之间差异达极显著水平 ( $P < 0.01$ ). 与有效磷的变化一致:淹水后  $\text{Fe}^{2+}$  与无定形铁浓度在淹水 30 d 后基本趋于慢速增长阶段. 光照并没有改变这个“快-慢”阶段的发展,进一步说明光照影响的是体系热力学过程,而非动力学过程.

上覆水体磷之间重要桥梁<sup>[25, 36]</sup>. 因此光照条件下,有效磷浓度的减少,从来源上降低了上覆水体的磷供给,这可能是导致上覆水体中总磷浓度低于避光处理的重要原因之一.

由于土壤中磷赋存形态对磷的迁移及生物可利用性具有重要作用<sup>[26, 36]</sup>,因此也研究了光照和避光处理下,淹水土壤中无机磷形态变化和有效磷、上覆水体总磷相关性,以便进一步了解光照抑制磷释放原因. 光照条件下,上覆水体总磷和有效磷与各形态磷之间的相关性改变并不一致(表 2). 这是因为在整个试验体系中还存在微生物、藻类影响(尤其在光照下),难以观察到理想状态下非生物因素间相关联系. 但是值得注意的是,在两种土壤中,光照使得 Fe-P 和有效磷、水体 TP 相关系数均增大,结合以往研究<sup>[4, 18]</sup>,证明土壤/底泥中铁氧化物的变化情况是控制淹水水体中磷变化关键,进而说明光照引起淹水土壤中结合态磷的变化可能是光照抑制磷释放的重要原因.

比较光照与避光处理下两种土壤铁与磷的相关性(图 6),发现灰棕紫泥中,避光处理相关系数明显高于光照处理(光照:  $r_{\text{无定形铁}} = 0.907$ ,  $r_{\text{Fe}^{2+}} = 0.636$ ; 避光:  $r_{\text{无定形铁}} = 0.957$ ,  $r_{\text{Fe}^{2+}} = 0.887$ ),这可能与土壤有机物大分子的降解有关. 降解形成的小分子有机酸成为土壤微生物的能源和物质来源:一方面微生物可以参与磷的吸收,另一方面微生物和 DOM 在一起,可以加速铁氧化物的还原<sup>[39]</sup>. 但另外与避光相比,光照下  $\text{Fe}^{2+}$  与无定形铁含量低的原因可能和藻类光合作用产生  $\text{O}_2$  导致部分 Fe 被氧化有关;同时光 Fenton 反应产生的活性自由基<sup>[40, 41]</sup>(例如  $\cdot\text{OH}$ )对  $\text{Fe}^{2+}$  的再氧化也有影响,从而改变铁与磷的相关性.

进一步,采用 MINTEQ 模型<sup>[42]</sup>计算了淹水土壤

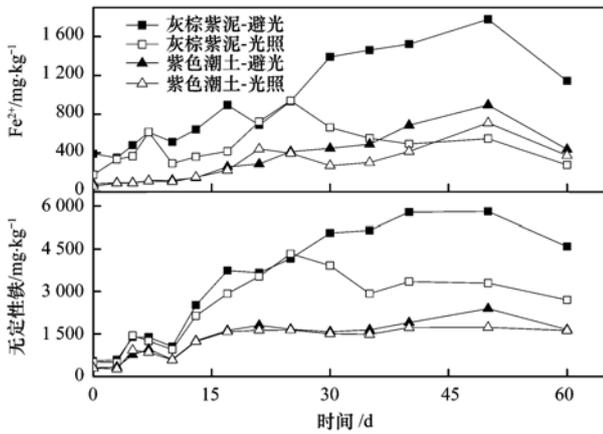


图 5 淹水过程中二价铁与无定形铁浓度变化

Fig. 5 Changes of Fe(II) and amorphous iron in the soil solution during submerging under different light irradiation treatments

中几种主要铁矿物固相界面的饱和系数(表 3)。由饱和系数(SI) = lg(离子活度积 IAP) - lg(结合常数  $K_s$ ), 在温度不变情况下, 磷和铁矿物固相界面的吸附只和界面吸附面积大小有关。本研究中取  $SI \geq 0$  为饱和;  $< 0$  为未饱和。SI 越大饱和程度越高, 可吸附和结合溶质的固相面积越小。

MINTEQ 计算结果表明(表 3),  $Fe(OH)_3$ 、蓝铁

矿 [ $Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$ ] 以及磁铁矿在光照和避光处理中均从开始就已饱和, 因此对磷释放量改变的影响不大。和避光处理相比, 光照处理中几种主要含铁固相界面饱和系数均减小, 唯一只有  $Fe(OH)_2$  胶体 SI 值增加。这可能由于光反应产生的  $\cdot OH$  和藻类光合作用产生的  $O_2$  不断消耗  $Fe(OH)_2$ ; 同时也有可能  $Fe^{2+}$  与铁氧化物表面配位形成铁氧化物- $Fe^{2+}$  体系<sup>[43, 44]</sup>, 从而导致固相界面未饱和程度增加。另外, 土壤中结合磷位点数量增加(例如针铁矿、赤铁矿), 而溶液相中  $Fe(OH)_2$  胶体减少, 从而直接导致磷在液相中的主要结合载体减少, 因此使得磷的释放量受到影响。由此可见磷释放过程并不是一个简单的传质过程, 而是与土-水界面密切相关<sup>[10]</sup>。

另外, 结合 MINTEQ 模拟计算和相关性分析发现, 光照导致 TP 和各含铁固相组分的相关系数降低, P 值增加 ( $P$  均  $< 0.12$ ) (表 4), 进一步说明光照可能是改变整个试验体系的重要外界因素, 通过: ①影响微生物活性和藻类生长(例如光合作用); ②光反应过程, 来改变体系中的热力学平衡。有研究报道了光诱导铁氧化物的还原性溶解会导致固相  $Fe^{3+}$  向  $Fe^{2+}$  转化<sup>[45]</sup>, 特别是在溶解性有机质参与

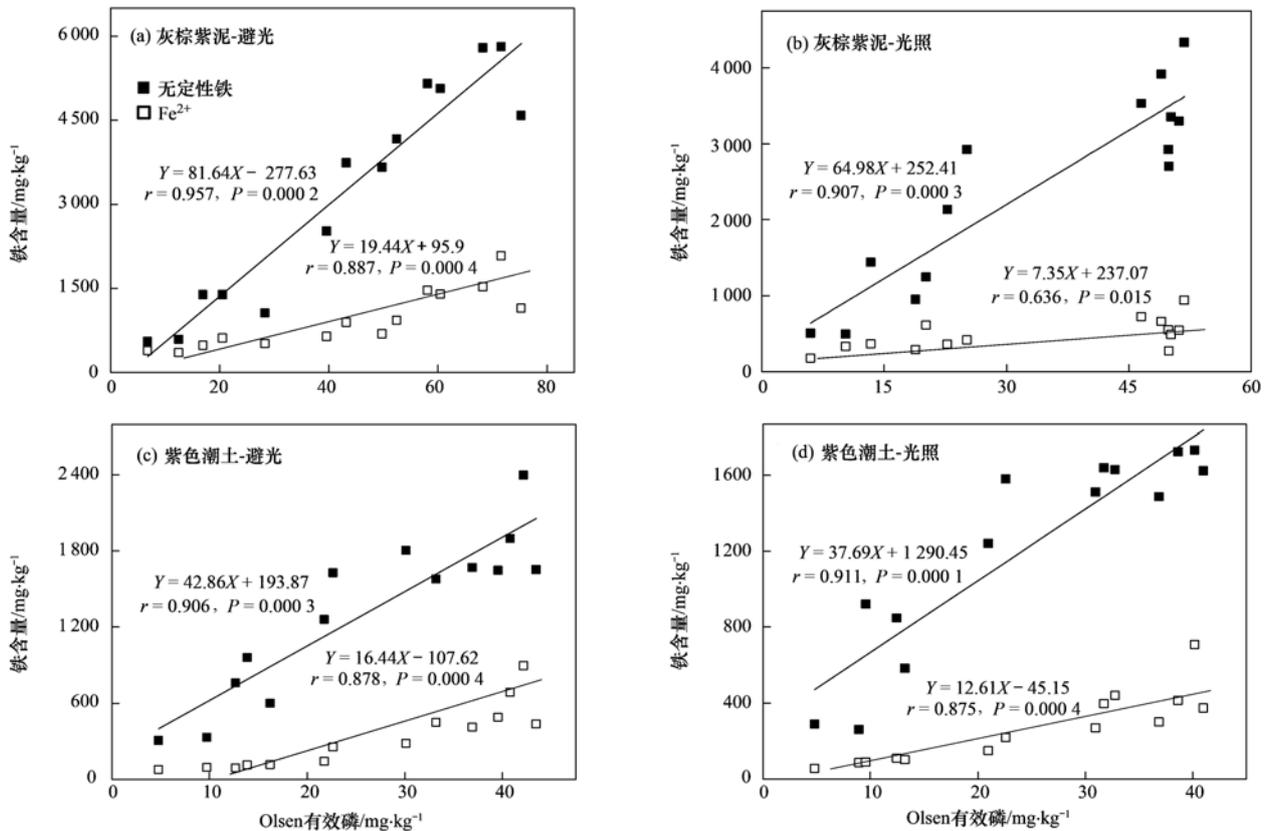


图 6 光照作用下淹水过程中铁含量与有效磷的相关性

Fig. 6 Correlations between Fe and P during submerging under different light irradiation treatments

下,释放结合的无机及重金属元素<sup>[9]</sup>.但在本研究中,光照条件下溶液相中 Fe<sup>2+</sup> 相对减少,而淹水土壤的铁矿物固相吸附界面增大才是磷释放量减小的主导因素.

表 3 光照作用下淹水过程中铁矿物的饱和系数 SI<sup>1)</sup>

Table 3 Saturation index of iron minerals during submerging under different light irradiation treatments

固相铁矿物种类	紫色潮土		ΔSI (光照 - 避光)	灰棕紫泥光照		ΔSI (光照 - 避光)
	光照	避光		光照	避光	
Fe(OH) <sub>2</sub>	-1.526	-1.715	0.189	-1.436	-1.593	0.157
Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	-100.530	-99.515	-1.015	-99.842	-98.599	-1.243
Fe <sub>3</sub> (OH) <sub>8</sub>			已饱和			
水铁矿	-7.481	-7.386	-0.095	-7.525	-7.447	-0.078
针铁矿	-4.772	-4.677	-0.095	-4.816	-4.738	-0.078
赤铁矿	-7.144	-6.954	-0.190	-7.233	-7.076	-0.157
黄钾铁矿	-71.253	-70.419	-0.834	-70.870	-69.911	-0.959
纤铁矿	-5.652	-5.557	-0.095	-5.696	-5.618	-0.078
磁铁矿			已饱和			
红磷铁矿	-14.707	-14.328	-0.379	-14.886	-14.573	-0.313
蓝铁矿			已饱和			

1) SI ≥ 0 为饱和; SI < 0 为未饱和

表 4 不同处理淹水过程中总磷与各铁矿物组分的 Pearson 相关系数<sup>1)</sup>

Table 4 Pearson correlation coefficients between iron minerals and P during submerging under different light irradiation treatments

土壤类型	处理	Fe(OH) <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	Fe <sub>3</sub> (OH) <sub>8</sub>	水铁矿	针铁矿	赤铁矿	黄钾铁矿	纤铁矿	磁铁矿	红磷铁矿	蓝铁矿
紫色潮土	避光	-0.580 (0.030) <sup>2)</sup>	+0.446 (0.110)		+0.580 (0.030)	+0.580 (0.030)	+0.580 (0.030)	+0.477 (0.085)	+0.580 (0.030)		+0.580 (0.030)	
	光照	-0.480 (0.083)	+0.439 (0.116)		+0.481 (0.082)	+0.481 (0.082)	+0.480 (0.082)	+0.465 (0.094)	+0.481 (0.082)		+0.480 (0.082)	
灰棕紫泥	避光	-0.211 (0.047)	+0.188 (0.052)	NC <sup>3)</sup>	+0.211 (0.047)	+0.211 (0.047)	+0.211 (0.047)	+0.194 (0.051)	+0.211 (0.047)	NC	+0.211 (0.047)	NC
	光照	-0.121 (0.068)	+0.107 (0.071)		+0.121 (0.068)	+0.121 (0.068)	+0.121 (0.068)	+0.111 (0.071)	+0.121 (0.068)		+0.121 (0.068)	

1) 相关系数前 - 表示负相关, + 表示正相关; 2) a(b): a = Pearson 相关系数; b = P 值; 3) NC 表示未计算出 (Non-calculated)

2.3 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 产生

CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的变化可以反映淹水土壤中有有机质变化情况,同时提供整个体系中厌氧环境的演化证据;同时有机质转化和铁氧化物的变化密切相关<sup>[3, 18, 39]</sup>,因此有助于进一步了解淹水过程中磷释

放机制. 本试验过程中 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 浓度变化情况如图 7 所示,和以往研究相同,在淹水初期,CH<sub>4</sub> 产量较低,以 CO<sub>2</sub> 生成为主导<sup>[46, 47]</sup>,但光照培养下 CO<sub>2</sub> 产量明显低于避光培养 (P < 0.05). 在整个淹水过程中,光照与避光处理的 CH<sub>4</sub> 产量并没有显著

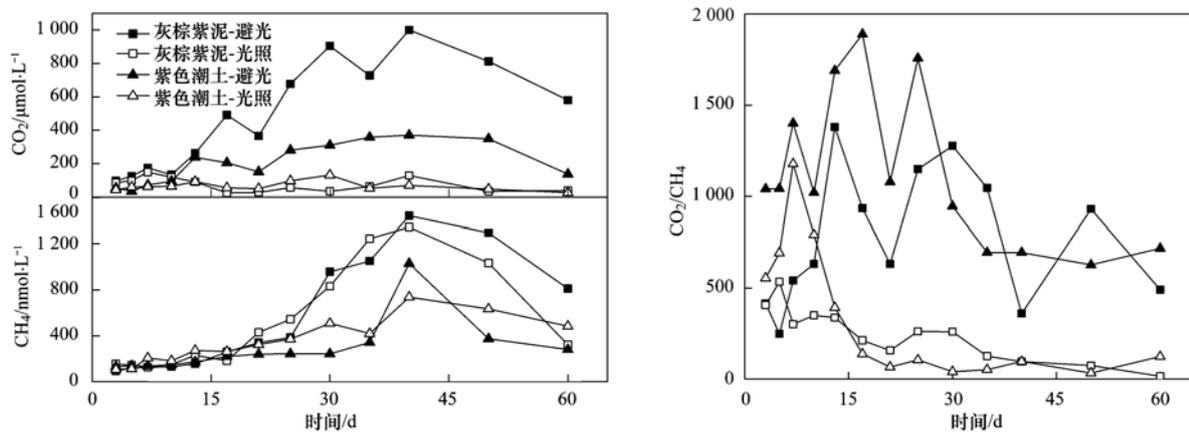


图 7 光照作用下淹水过程中 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 浓度变化

Fig. 7 Changes of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> concentrations during submerging under different light irradiation treatments

差异 ( $P < 0.05$ ).  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  比值用来表征有机质消耗的两个过程,光照使得该比值明显下降的时间由避光处理的第 30 d 提前到第 7 d.

计算有机碳气态转化效率 [ $e(\%) = C_{\text{CO}_2+\text{CH}_4}/\text{SOC}$ ],式中  $C_{\text{CO}_2+\text{CH}_4}$  为整个试验过程中含碳气体累积排放量(以 C 计); SOC 为土壤中有机碳含量. 由图 8 可见,光照条件下有机碳气态转化效率更低. 理论上,光照导致淹水土壤中铁氧化物含量增加(电子受体增加),同时在有机质含量一定情况下,  $\text{CO}_2$  产量应高于避光处理. 但是本研究中结果却恰好相反. 这可能和藻类及光合细菌对  $\text{CO}_2$  的消耗有关. 结合图 7,进一步说明光照作用下  $\text{CO}_2/\text{CH}_4$  比值下降明显提前并非意味着光照加速了淹水土壤中无机电子受体的消耗,使得产  $\text{CH}_4$  过程提前;而是因为  $\text{CO}_2$  的消耗导致该比值下降.

淹水过程中  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  产生主要源于厌氧呼吸下微生物分解有机物<sup>[4, 35]</sup>. 通过相关性分析发现(表 5),铁的还原与  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  显著相关 ( $P < 0.01$ ),且光照使该相关性减小,进一步证明光照对铁还原过程的影响是解释两种气体变化的重要原因. 同时,避光与光照处理下 pH 与  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  产量负相关,而光照处理下相关性不显著,说明淹水

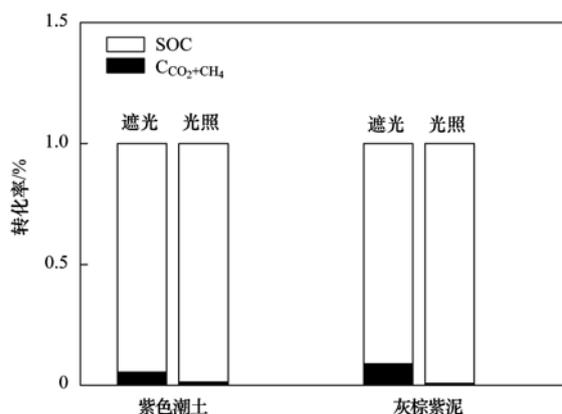


图 8 光照作用下淹水过程中有机碳气态转化效率

Fig. 8 Total gas transformation rate of soil organic matter during the submerging under different light irradiation treatments

过程中光照对 pH 与  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  存在一定影响. 另外,光照下  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  与磷的相关性较避光处理下小,说明光照对淹水土壤中有机质厌氧分解、铁还原的影响会进一步改变磷释放过程. 一方面可能由于光照作用下藻类和光合细菌的生长;另一方面,光照对铁氧化物的影响进一步导致了铁、碳耦合循环的复杂性,使得  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  与磷的相关性减弱.

表 5 光照作用下淹水过程中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  与铁和磷相关性分析<sup>1)</sup>

Table 5 Correlations among  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , Fe and P during submerging under different light irradiation treatments

土壤类型	处理	指标	上覆水体 TP	有效磷	无定形铁	$\text{Fe}^{2+}$	pH
紫色潮土	光照	$\text{CO}_2$	0.518	0.078	0.197	-0.103	-0.122
		$\text{CH}_4$	0.204	0.892 **	0.782 **	0.805 **	-0.688 *
	避光	$\text{CO}_2$	0.295	0.794 **	0.791 **	0.823 **	-0.730 **
		$\text{CH}_4$	0.048	0.654 *	0.592 *	0.734 **	-0.644 *
灰棕紫泥	光照	$\text{CO}_2$	-0.013	-0.508	0.617 *	-0.245	-0.379
		$\text{CH}_4$	-0.326	0.764 **	0.611 *	0.339	-0.354
	避光	$\text{CO}_2$	-0.246	0.881 **	0.958 **	0.935 **	-0.592 *
		$\text{CH}_4$	-0.424	0.848 **	0.895 **	0.959 **	-0.633 *

1) \*\* 表示  $P < 0.01$ , \* 表示  $P < 0.05$

### 3 结论

(1) 库区消落带的两种典型土壤,均呈现出近似规律:即光照对磷释放存在抑制. 光照引起淹水土壤中铁氧化物变化可能是光照抑制磷释放的重要原因.

(2) 光照抑制铁还原及无定形铁的生成,同时使得铁还原与磷释放相关性减弱. 光照条件下溶液相中  $\text{Fe}^{2+}$  相对减少,淹水土壤的铁矿物固相吸附界面增大才是抑制磷释放的主要因素.

(3) 光照加快无机电子受体的消耗、降低有机

碳的转化效率,抑制铁还原,从而使  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  与铁还原及磷释放的相关性减弱. 藻类和光合细菌的光合作用可能导致淹水条件下铁氧化物还原受到影响,同时对  $\text{CO}_2$  吸收也可能是导致光照处理中  $\text{CO}_2$  产量较低的原因.

(4) 值得注意的是,对于库区消落带沿岸水深较浅( $< 2$  m)的浅水区域而言,光照可能会是影响淹水土壤磷释放的重要因素;但对于水深较深的土壤/底泥而言,光照的影响是否存在还值得进一步研究. 而不同光照强度、照射时长、入射波段( $\text{UV}_A$ 、 $\text{UV}_B$ 、 $\text{UV}_C$  及  $\text{UV}_R$ )、量子产率和自由基(例如  $\cdot\text{OH}$

和  $H_2O_2$ ) 在该过程中的具体影响机制, 则是下一步研究工作开展的重点。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 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.
- [ 2 ] 王里奥, 黄川, 詹艳慧, 等. 三峡库区消落带淹水-落干过程土壤磷吸附-解吸及释放研究[J]. 长江流域资源与环境, 2006, **15**(5): 593-597.
- [ 3 ] Chacon N, Silver W L, Dubinsky E A, *et al.* Iron reduction and soil phosphorus solubilization in humid tropical forests soils: the roles of labile carbon pools and an electron shuttle compound [J]. *Biogeochemistry*, 2006, **78**(1): 67-84.
- [ 4 ] Kirk G. *The biogeochemistry of submerged soils*[M]. England: John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [ 5 ] 袁辉, 黄川, 崔志强, 等. 三峡库区消落带与水环境响应关系预测[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, **30**(9): 134-138.
- [ 6 ] 石孝洪, 魏世强, 谢德体, 等. 三峡水库消落区土壤磷吸附特征[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2004, **26**(3): 331-335.
- [ 7 ] 马利民, 唐燕萍, 腾衍行, 等. 三峡库区消落区土壤磷释放的环境影响因子[J]. 地学前缘, 2008, **15**(5): 235-241.
- [ 8 ] 尹大强, 覃秋荣, 阎航. 环境因子对五里湖沉积物磷释放的影响[J]. 湖泊科学, 1994, **6**(3): 240-244.
- [ 9 ] 潘成荣, 张之源, 叶琳琳, 等. 环境条件变化对瓦埠湖沉积物磷释放的影响[J]. 水土保持学报, 2006, **20**(6): 148-152.
- [ 10 ] Stumm W. *Chemistry of the solid-water interface: processes at the mineral-water and particle-water interface in natural systems* [M]. Canada: John Wiley & Sons Ltd, 1992.
- [ 11 ] 孙丽蓉, 曲东, 卫亚红. 光照对水稻土中氧化铁还原的影响[J]. 土壤学报, 2008, **45**(4): 628-634.
- [ 12 ] Borman C J, Sullivan B P, Eggleston C M, *et al.* Is iron redox cycling in a high altitude watershed photochemically or thermally driven? [J]. *Chemical Geology*, 2010, **269**(1-2): 33-39.
- [ 13 ] 于航, 张蕾, 王刚, 等. 光照强度和温度对三峡水库消落区典型土壤磷释放的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(19): 11539-11541, 11546.
- [ 14 ] 姜霞, 王琦, 金相灿, 等. 光照与通气方式对蓝、绿藻竞争生长和磷的水-沉积物界面过程的影响[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(1): 31-36.
- [ 15 ] 刘玉生, 邹兰, 郑丙辉. 光照、温度和藻类对底泥释放磷的影响[J]. 环境科学研究, 1992, **5**(2): 41-44.
- [ 16 ] 姜霞, 金相灿, 姚杨, 等. 光照对水环境变化和沉积物吸收磷酸盐的影响[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(11): 2194-2198.
- [ 17 ] 姚杨, 金相灿, 姜霞, 等. 光照对湖泊沉积物磷释放及磷形态变化的影响研究[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(z1): 30-33.
- [ 18 ] Peretyazhko T, Sposito G. Iron (III) reduction and phosphorous solubilization in humid tropical forest soils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, **69**(14): 3643-3652.
- [ 19 ] 曹宁, 曲东. 水稻土中铁还原与无机磷有效性的关系[J]. 土壤通报, 2007, **38**(3): 504-507.
- [ 20 ] 曲东, 孙丽蓉, 李松, 等. 异化铁还原对水稻土  $CH_4$ ,  $CO_2$  及  $N_2O$  形成的抑制[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, **33**(8): 111-116.
- [ 21 ] Tsujimura S, Tsukada H, Nakahara H, *et al.* Seasonal variations of microcystis populations in sediments of lake Biwa, Japan[J]. *Hydrobiologia*, 2000, **434**(1-3): 183-192.
- [ 22 ] 许伟. 水溶性有机物的电子转移能力及其对微生物异化铁还原影响的研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2009.
- [ 23 ] 鲍士旦. 土壤农化分析手册 [M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [ 24 ] 马利民, 张明, 腾衍行, 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.
- [ 25 ] 吉英芳, 曹琳, 林茂, 等. 三峡库区新生消落区沉积物磷形态分析[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(8): 882-886.
- [ 26 ] 曹琳, 吉英芳, 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.
- [ 27 ] Rakshit S, Uchimiya M, Sposito G. Iron (III) bioreduction in soil in the presence of added humic substances[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, **73**(1): 65-71.
- [ 28 ] de Mello J W V, Barrón V, Torrent J. Phosphorus and iron mobilization in flooded soils from Brazil[J]. *Soil Science*, 1998, **163**(2): 122-132.
- [ 29 ] 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.
- [ 30 ] 蒋柏藩, 沈仁芳. 土壤无机磷分级的研究[J]. 土壤学进展, 1990, **18**(1): 1-8.
- [ 31 ] Furkaw Y, Inubushi K. Feasible suppression technique of methane emission from paddy soil by iron amendment [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, **64**(1-2): 193-201.
- [ 32 ] 王道涵, 何娜, 梁成华. 淹水条件下有机酸(糖)对土壤磷素固定的影响[J]. 土壤通报, 2005, **36**(4): 518-522.
- [ 33 ] Sallade Y E, Sims J T. Phosphorus transformations in the sediments of Delaware's agricultural drainageways: II. Effect of reducing conditions on phosphorus release [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, **26**(6): 1579-1588.
- [ 34 ] White E M, Vaughan P P, Zepp R G. Role of the photo-Fenton reaction in the production of hydroxyl radicals and photobleaching of colored dissolved organic matter in a coastal river of the southeastern United States [J]. *Aquatic Sciences*, 2003, **65**(4): 402-414.
- [ 35 ] Sulzberger B, Durisch-Kaiser E. Chemical characterization of dissolved organic matter (DOM): A prerequisite for understanding UV-induced changes of DOM absorption properties and bioavailability[J]. *Aquatic Sciences*, 2009, **71**(2): 104-126.
- [ 36 ] 马志敏. 三峡库区典型消落带土壤无机磷研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- [ 37 ] Lovley D R. Organic matter mineralization with the reduction of

- ferric iron: A review[J]. *Geomicrobiology Journal*, 1987, **5**(3-4): 375-399.
- [38] Lipson D A, Jha M, Raab T K, *et al.* Reduction of iron ( III ) and humic substances plays a major role in anaerobic respiration in an Arctic peat soil [ J ]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2010, **115** ( G4 ), doi: 10.1029/2009JG001147.
- [39] Lovley D R, Coates J D, Blunt-Harris E L, *et al.* Humic substances as electron acceptors for microbial respiration [ J ]. *Nature*, 1996, **382**(6590): 445-448.
- [40] Schwertmann U. Inhibitory effect of soil organic matter on the crystallization of amorphous ferric hydroxide [ J ]. *Nature*, 1966, **212**(5062): 645-646.
- [41] Moran M A, Zepp R G. Role of photoreactions in the formation of biologically labile compounds from dissolved organic matter [ J ]. *Limnology and Oceanography*, 1997, **42**(6): 1307-1316.
- [42] Hunter K A, Kim J P, Croot P L. Metal-phytoplankton interactions in marine systems [ A ]. In: Macalady D L ( Ed. ). *Perspectives in environmental chemistry* [ M ]. New York: Oxford Press, 1998.
- [43] Pecher K, Haderlein S B, Schwarzenbach R P. Reduction of polyhalogenated methanes by surface-bound Fe( II ) in aqueous suspensions of iron oxides [ J ]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(8): 1734-1741.
- [44] Gorski G A, Scherer M M. Fe<sup>2+</sup> sorption at the Fe oxide-water interface: a revised conceptual framework [ A ]. In: Tratnyek P G, Grundl T J, Haderlein S B ( Eds. ). *Aquatic redox chemistry* [ M ]. Washington DC: American Chemical Society, 2012. 315-343.
- [45] Stumm W, Sulzberger B. The cycling of iron in natural environments: Considerations based on laboratory studies of heterogeneous redox processes [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, **56**(8): 3233-3257.
- [46] 李哲, 张利萍, 王琳, 等. 三峡水库澎溪河消落区土-气界面 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 通量初探 [ J ]. *湖泊科学*, 2013, **25**(5): 674-680.
- [47] 赵小杰, 赵同谦, 郑华, 等. 水库温室气体排放及其影响因素 [ J ]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2377-2384.

## CONTENTS

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols at Non-haze and Haze Days in Beijing .....	GAO Min, QIU Tian-lei, JIA Rui-zhi, <i>et al.</i> (4415)
Light Scattering Extinction Properties of Atmospheric Particle and Pollution Characteristics in Hazy Weather in Hangzhou .....	XU Chang, YE Hui, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (4422)
Characteristic of Elements in PM <sub>2.5</sub> and Health Risk Assessment of Heavy Metals During Heating Season in Taiyuan .....	LI Li-juan, WEN Yan-ping, PENG Lin, <i>et al.</i> (4431)
Pollution Characteristics of Secondary Water-soluble Inorganic Ions of PM <sub>2.5</sub> in Urban Chengdu, China .....	LI You-ping, ZHOU Hong, ZHANG Zhi-sheng, <i>et al.</i> (4439)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Ozone in Beijing .....	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, CHEN Tian, <i>et al.</i> (4446)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Northern Suburb of Nanjing .....	AN Jun-lin, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4454)
Environmental Significance of Wet Deposition Composition in the Central Qilian Mountains, China .....	LI Zong-jie, LI Zong-xing, TIAN Qing, <i>et al.</i> (4465)
Dynamics of Nitrogen and Sulfur Wet Deposition in Typical Forest Stand at Different Spatial Levels in Simian Mountain, Mid-subtropical Region .....	SUN Tao, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4475)
Establishment and Assessment of QA/QC Method for Sampling and Analysis of Atmosphere Background CO <sub>2</sub> .....	LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (4482)
An Investigation of the CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emission Factors of Light-duty Gasoline Vehicles .....	HE Li-qiang, SONG Jing-hao, HU Jing-nan, <i>et al.</i> (4489)
Experimental Study on the Size Spectra and Emission Factor of Ultrafine Particle from Coal Combustion .....	SUN Zai, YANG Wen-jun, XIE Xiao-fang, <i>et al.</i> (4495)
Distributions and Air-Sea Fluxes of Dissolved Nitrous Oxide in the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Marine Area in Spring and Summer .....	WANG Lan, ZHANG Gui-ling, SUN Ming-shuang, <i>et al.</i> (4502)
Spectral Absorption Properties of the Water Constituents in the Estuary of Zhujiang River .....	WANG Shan-shan, WANG Yong-bo, FU Qing-hua, <i>et al.</i> (4511)
Characteristics of Phosphorus Forms and the Effects of UV Light in the Confluences Water of Qujiang-Jialing River and Fujiang-Jialing River .....	YAN Jin-long, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4522)
Research on the Threshold of Chl-a in Lake Taihu Based on Microcystins .....	WEI Dai-chun, SU Jing, JI Dan-feng, <i>et al.</i> (4530)
Temporal and Spatial Characteristic of Nitrogen and Phosphorus Output in the Suburb Watershed Around the Baihua Lake .....	FENG Yuan-song, LIN Tao, YANG Qing-yuan (4537)
Effects of Light Irradiation on Phosphorous Releases from Typical Submerged Soils of Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoirs Areas .....	GUO Nian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4544)
Analysis on the Removal Efficiency and Mechanisms of Phosphorus by Modified Zeolites Substrates Coated with LDHs Reacted by Different Metal Compounds in Laboratory-Scale Vertical-Flow Constructed Wetlands .....	ZHANG Xiang-ling, CHEN Jun-jie, GUO Lu, <i>et al.</i> (4553)
Mercury Dynamics of Several Plants Collected from the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area During Flooding and Its Impact on Water Body .....	ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (4560)
Effect of Nano-TiO <sub>2</sub> on the Release and Activation of Mercury in Sediment .....	ZHANG Jin-yang, LI Chu-xian, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4567)
Estimation Inventory of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Anthropogenic Sources and Its Impacts within the Yanghe Watershed, an Important Water-Source Site of Beijing, China .....	GAO Jia-jia, LUO Wei, XI Xiao-xia (4573)
Source Identification of Toxic Wastewaters in a Petrochemical Industrial Park .....	YANG Qian, YU Yin, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (4582)
Investigation of Pollution Characteristics of Erythromycin Resistance Genes in a Sewage Treatment Plant and the Relevant Selective Factors .....	LI Kan-zhu, WU Li-le, HUANG Sheng-lin, <i>et al.</i> (4589)
Variation of Pollutants Along the Height of Two Media BAF During Advanced Treatment of Dyeing Wastewater .....	LIU Jun-feng, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4596)
Acclimatization and Characteristics of Microbial Community in Sulphate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation .....	XI Jing-ru, LIU Su-qin, LI Lin, <i>et al.</i> (4602)
Capability and Microbial Community Analysis of a Membrane Bioreactor for Acrylic Fiber Wastewater Treatment .....	WEI Jian, SONG Yong-hui, ZHAO Le (4610)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX ABR Process in Tannery Wastewater Treatment .....	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan (4618)
Numerical Simulation and Operation Optimization of Biological Filter .....	ZOU Zong-sen, SHI Han-chang, CHEN Xiang-qiang, <i>et al.</i> (4627)
Effect of Gas-lift Device on the Morphology and Performance of ANAMMOX Sludge .....	LI Xiang, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4636)
Water Treatment Residual as a Bioretention Media Amendment for Phosphorus Removal .....	WANG Jian-jun, LI Tian, ZHANG Ying (4642)
Nutrient Contents and Heavy Metal Pollutions in Composted Sewage Sludge from Different Municipal Wastewater Treatment Plants in Beijing Region .....	BAI Li-ping, QI Hong-tao, FU Ya-ping, <i>et al.</i> (4648)
Polychlorinated Biphenyls and Their Methylsulfonyl Metabolites in Fish from an Electronic Waste Recycling Site in South China: Tissue Distribution and Human Dietary Exposure .....	TANG Bin, LUO Xiao-jun, ZENG Yan-hong, <i>et al.</i> (4655)
Residues and Health Risk Assessment of HCHs, DDTs and Heavy Metals in Water and <i>Tilapia</i> s from Fish Ponds of Guangdong .....	XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, <i>et al.</i> (4663)
Concentration and Distribution Characteristics of Estrogen in Aquatic Organism from Chongming Island .....	GENG Jing-jing, YE Ai-li, YANG Yi, <i>et al.</i> (4671)
Photocatalytic Degradation of Acetamiprid by TiO <sub>2</sub> and Xe Lamp: Kinetics and Degradation Intermediates .....	ZHOU Wen-chang, YANG Hai, HU Zhi-bin, <i>et al.</i> (4678)
Effects of Nitrogen Addition on Available Nitrogen Content and Acidification in Cold-temperate Coniferous Forest Soil in the Growing Season .....	CHEN Gao-qi, FU Wa-li, LUO Ya-chen, <i>et al.</i> (4686)
Impact of Land Use Type on Stability and Organic Carbon of Soil Aggregates in Jinyun Mountain .....	LI Jian-lin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4695)
Investigation and Canonical Correspondence Analysis of Salinity Contents in Secondary Salinization Greenhouse Soils in Shanghai Suburb .....	TANG Dong, MAO Liang, ZHI Yue-e, <i>et al.</i> (4705)
Spatial Distribution Prediction of Surface Soil Pb in a Battery Contaminated Site .....	LIU Geng, NIU Jun-jie, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4712)
Immobilization Remediation of Cd and Pb Contaminated Soil: Remediation Potential and Soil Environmental Quality .....	SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (4720)
Rules and Impact Factors of Greenhouse Gases Emission in the Saline-Alkali Paddy Fields in Different Years .....	TANG Jie, FANG Tian-ru, HOU Ke-yi, <i>et al.</i> (4727)
Adsorption of Cd(II) Varies with Biochars Derived at Different Pyrolysis Temperatures .....	WANG Zhen-yu, LIU Guo-cheng, Monica Xing, <i>et al.</i> (4735)
Poisoning Effect of Ca Depositing Over Mn-Ce/TiO <sub>2</sub> Catalyst for Low-temperature Selective Catalytic Reduction of NO by NH <sub>3</sub> .....	ZHOU Ai-yi, MAO Hua-feng, SHENG Zhong-yi, <i>et al.</i> (4745)
A Comparative Study on Domestic and Foreign Emission Standards of Air Pollutants for Cement Industry .....	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4752)
Revision Process and Thinking of Emission Standard of Air Pollutants for Cement Industry .....	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4759)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年12月15日 第35卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 12 Dec. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行