

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

2015

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)

2014年APEC前后北京城区PM _{2.5} 中水溶性离子特征分析	杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明	(4325)
2013年北京市不同方位PM _{2.5} 背景浓度研究	李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨	(4331)
APEC期间北京空气质量改善对比分析	李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达	(4340)
嘉兴市春季PM ₁₀ 、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应	沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王翥	(4348)
烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响	赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁	(4358)
典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡	张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤	(4366)
上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应	刘飞,褚慧敏,郑祥民	(4374)
重庆金佛山降雪中飞灰单颗粒特征及来源解析	于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立	(4381)
利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究	梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤	(4389)
低浓度CO ₂ 在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附	刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真	(4396)
红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制	郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞	(4403)
中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征	安思危,孙涛,马明,王定勇	(4414)
基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射衰减系数	张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮	(4420)
白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征	郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明	(4430)
小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应	李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰	(4436)
湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响	余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治	(4444)
贵州纳朵洞洞穴水水文地球化学变化特征及其环境意义	沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖	(4455)
碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析	邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国	(4464)
钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征	张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳	(4471)
长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价	田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣	(4479)
城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例	齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁	(4486)
柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响	覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇	(4494)
微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响	左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩	(4501)
扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律	陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍	(4509)
生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应	张树楠,肖润林,刘锋,吴金水	(4516)
开放系统下方解石对磷的去除	李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文	(4523)
铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系	李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生	(4531)
基于优质碳源提供的CAMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究	程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良	(4539)
ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验	周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵	(4546)
基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价	符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春	(4553)
北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析	张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平	(4561)
广州市小学生多环芳烃内暴露水平	苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞	(4567)
构建三元混合污染物的三维等效图	刘雪,刘树深,刘海玲	(4574)
化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征	张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新	(4582)
不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性	严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑	(4591)
基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图	施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩	(4600)
土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究	谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰	(4609)
纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响	李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳	(4615)
蜈蚣草中砷与磷的赋存特征及其相互作用	张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚	(4623)
纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响	熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟苏琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体	(4630)
黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响	陈永勤,江玲,徐卫红,迟苏琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭	(4642)
耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化	马聪,秦丹,孙倩,于昌平	(4651)
浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征	李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎	(4659)
缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化	曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源	(4667)
华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响	张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊	(4676)
再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估	田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙	(4682)
《环境科学》第36卷(2015年)总目录		(4690)
《环境科学》征订启事(4347)	《环境科学》征稿简则(4454)	信息(4463,4530,4573,4581)

扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律

陈俊, 李大鹏*, 朱培颖, 黄勇, 王忍

(苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215009)

摘要: 为了阐明反复扰动下, 不同初始浓度藻对沉积物中各形态磷释放的影响. 以太湖梅梁湾沉积物和上覆水作为研究材料, 探讨了扰动和藻类共同作用下沉积物中各形态磷的变化规律. 结果表明, 无扰动状态下, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 Res-P 均有所降低, 而 Fe/Al-P 和 Ca-P 则有所增加. 其中, Ca-P 随藻类初始浓度增加而增加, 分别增加 48%、66%、74%. 但是, 扰动状态下, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 Res-P 也明显降低. Fe/Al-P 明显增加, 其占总磷的百分比为 66.2% (3 组试验的平均值) 高于不扰动状态 (53.4%, 3 组试验的平均值); 此外, Ca-P 占总磷的百分比为 24.1% (3 组扰动试验的平均值) 明显低于不扰动状态 (33.0%, 3 组试验的平均值). 这暗示了扰动和藻类共同作用下促进了 Fe/Al-P 的形成, 而无扰动下藻类却促进了 Ca-P 的形成.

关键词: 扰动; 藻; 磷; 沉积物; 迁移转化; 太湖

中图分类号: X131.2; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4509-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.12.024

Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake

CHEN Jun, LI Da-peng*, ZHU Pei-ying, HUANG Yong, WANG Ren

(School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: Sedimentary phosphorus forms were investigated to clarify the release of sedimentary phosphorus forms under the repeated disturbance with the addition of algae at different initial concentrations. The sediments and overlying water were taken from the Meiliang Bay in Taihu Lake. The results showed that the concentrations of $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ and Res-P decreased, while the content of Fe/Al-P and Ca-P increased without disturbance. In addition, the Ca-P increased with the increase of the initial concentration of algae and the net increase of Ca-P increased by 48% ($30 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 66% ($60 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 74% ($120 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), respectively. However, under the disturbance, the $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ and Res-P were significantly reduced, the Fe/Al-P increased significantly. The percentage of Fe/Al-P to Tot-P was up to 66.2% (average of the 3 experiments with the addition of algae of $30 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $60 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $120 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), it was higher than the value (53.4%, average of the 3 experiments) without the disturbance. Moreover, under the disturbance, the percentage of Ca-P to Tot-P was 24.1% (average of the 3 experiments with the addition of algae of $30 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $60 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $120 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) and it was slightly lower than that (33.0%, average of the 3 experiments) without the disturbance. It is suggested that the coexistence of disturbance and algae facilitated the formation of Fe/Al-P , but the algae accelerated the formation of Ca-P without disturbance.

Key words: disturbance; algae; phosphorus; sediment; migration and transformation; Taihu Lake

当水体外源磷得到控制, 上覆水磷的波动变化严重影响着内源磷的再生和形态转化, 从而间接影响湖泊水质状况^[1~3]. 沉积物中不同形态磷稳定性显著不同, 对水体富营养化的作用也不尽相同, 而影响沉积物内源磷变化的环境因子也显著不同, 尤其以风浪扰动与藻类为最^[4,5].

已有研究表明^[6~8], 扰动会显著改变沉积物中不同形态磷的数量分布规律. 因为扰动增加水体中悬浮物质含量, 加快上覆水中磷向底泥迁移而在沉积物中形成某种形态磷, 同时扰动也会促使沉积物中活性磷释放, 从而导致沉积物中内源磷形态分布发生改变. 研究表明, 这种改变更多的是降低了内源磷的释放活性, 这将会显著削弱再次扰动时内源磷的释放. 此外, 不可忽视的是藻类对磷的生物利用而形成的诱导释放, 即藻类通过繁殖导致水体中磷浓度降低, 进而在“泵吸”作用下, 促进内源磷释

放^[9]. 迄今为止, 研究发现, 藻类作用下, 不仅易释放态磷会发生释放, 而且难释放态磷也会发生释放^[9~11]. 但是, 在扰动和藻类共同作用下, 不同形态内源磷会发生怎样的变化却不得而知. 因此, 本研究采用反复扰动模式, 探讨了在加藻条件下, 内源磷形态变化规律, 以期丰富和完善浅水湖泊磷迁移转化理论体系提供数据支持和理论依据.

1 材料与方法

1.1 沉积物与上覆水的采集

利用进口大口径柱状采样器 (Rigo Co. 直径

收稿日期: 2015-05-10; 修订日期: 2015-07-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51178284, 51278523); 江苏省第四期“333”工程项目; 江苏省“六大人才高峰”项目 (2013-JNHB-022); 江苏省特色优势学科二期立项项目

作者简介: 陈俊 (1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水体修复, E-mail: luotuo_cjz@126.com

* 通讯联系人, E-mail: ustslp@163.com

110 mm 高 500 mm) 于 2014 年 10 月采集梅梁湾 (N 31°31'33.6", E 120°12'32.4") 沉积物, 并现场切得表层 3 cm 的沉积物样品, 装袋, 立即用冰盒保存(4℃)送至实验室, 同时采集采样点

上覆水 50 L. 将采集的沉积物过孔径为 1 mm 的铁筛, 对沉积物进行搅拌使其充分混匀, 对上覆水和沉积物进行分析. 沉积物和上覆水理化性质见表 1.

表 1 梅梁湾沉积物和上覆水的理化性质¹⁾

Table 1 Physico-chemical properties of sediments and overlying water from Meiliang Bay

项目	DO /mg·L ⁻¹	pH	TP /mg·L ⁻¹	DTP /mg·L ⁻¹	DIP /mg·L ⁻¹	含水率 /%	烧失量 /%	Tot-P /mg·g ⁻¹	叶绿素 a /μg·L ⁻¹
上覆水	4.22	7.72	0.340	0.11	0.013	—	—	—	4.39
沉积物	—	—	—	—	—	54.76	5.48	0.235	—

1) “—”表示未检测

1.2 试验方法

试验开始前, 首先接种培养铜绿微囊藻, 接种后保持每天振荡培养基使藻类正常生长. 培养两周后, 从培养基取出部分培养好的藻进行饥饿培养, 培养周期为一周.

根据太湖全年藻浓度变化范围, 模拟太湖藻浓度设置 3 个浓度梯度的铜绿微囊藻. 选择 6 个 1 L 玻璃容器($d = 10$ cm, $h = 18$ cm)作为试验装置, 分别标记为 E1 组和 E2 组, 每组各 3 个玻璃容器. 其中 E1 组为不扰动组, E2 组扰动组. 称取 200 g 梅梁湾湿沉积物放入玻璃容器中, 并取适量培养基中藻液以采集的上覆水稀释配成 3 个浓度梯度的铜绿微囊藻的溶液, 并小心沿容器壁加入该上覆水配置的藻溶液 1 L, 使得 E1 和 E2 上覆水藻浓度分别均为 30、60 和 120 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 试验过程中尽量小心避免沉积物悬浮.

试验周期为 12 h. 采用机械搅拌机 (RW20 digital) 对 E1 沉积物进行反复扰动 ($60\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$). 每间隔 3 h 扰动 15 min. 早上 08:00 开始扰动, 至晚上 20:00 试验结束. E1 组对上覆水和沉积物均不扰动. E2 组则均扰动. 在每次扰动之前, 均采集 E1 和 E2 上覆水 10 mL (液面下 10 cm 处), 测定溶解氧 (DO)、叶绿素 a、溶解性正磷酸盐 (DIP)、生物有效磷 (BAP). 每次采集水样后, 立即补充等量湖水. 试验开始与试验结束时取沉积物测定底泥中各形态磷.

1.3 分析方法

DIP 含量是将水样经过 0.45 μm 滤膜过滤后直接测定; 叶绿素 a 的测定采用荧光测定仪; BAP 的分析测定选用 Ellison 等^[12]的方法来做藻类分析试验^[13]. 具体过程为: 经过饥饿培养后的藻加入含有样品的培养基中, 14 d 后, 测定水中藻类的生长量, 计算获得被藻类利用的 DIP 含量.

上覆水中溶解氧 (DO) 使用便携式溶解氧仪 (美国 HACH HQ30 d) 测定.

沉积物含水率的定义为 105℃ 条件下烘干 12 h 的质量损失. 沉积物烧失量为 550℃ 灼烧 5.5 h 的质量损失.

沉积物中各形态磷 ($\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 Fe/Al-P 、 Ca-P 、 Res-P) 分析方法参考 H&L4 步连续提取法^[14].

本研究中每个样品均有 3 个平行样, 相对误差 <5%.

2 结果与讨论

2.1 上覆水中 DO 的变化规律

藻类存在条件下, 无论扰动与否, 均会对水体中 DO 产生一定的影响 (图 1).

图 1 显示, 两种状态变化相差很大. 不扰动状态下, 水体中 DO 浓度呈现先下降后上升, 最后又下降的趋势, 并且随着初始藻浓度越大, DO 浓度也越大 [图 1(a)]. 其原因可能是, 在藻加入水体后, 由于藻未适应新的水体环境, 开始有一段时间的 DO 浓度下降阶段, 随后藻细胞进行光合作用产生大量氧气, 使得 DO 浓度增加到最大值 6.92 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 之后因为藻细胞生长代谢产物增多, 使得光合作用下降, DO 浓度也随之下降. 扰动下, 水体中 DO 浓度一直呈下降趋势. 试验期间, DO 浓度的平均值分别为 5.04 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (30 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、4.65 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (60 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、4.88 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (120 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 明显低于无扰动状态 (6.96、7.02、7.17 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 究其原因可能是搅拌桨的破坏、颗粒物质的摩擦以及悬浮导致的高浊度水对入射光强的降低^[15~16]. 而且扰动导致水体中颗粒物含量增加, 融入的溶解氧也会被中小分子有机物以及某些金属离子消耗, 从而使得溶解氧浓度降低, 这也与水体的自净有关^[17].

2.2 对上覆水中 DIP 含量的影响

反复扰动下, 不仅对水体中 DO、pH 产生一定的

变化, 也会使得沉积物中磷通过泥水界面与上覆水发生交换, 从而影响上覆水中 DIP 的变化(图 2).

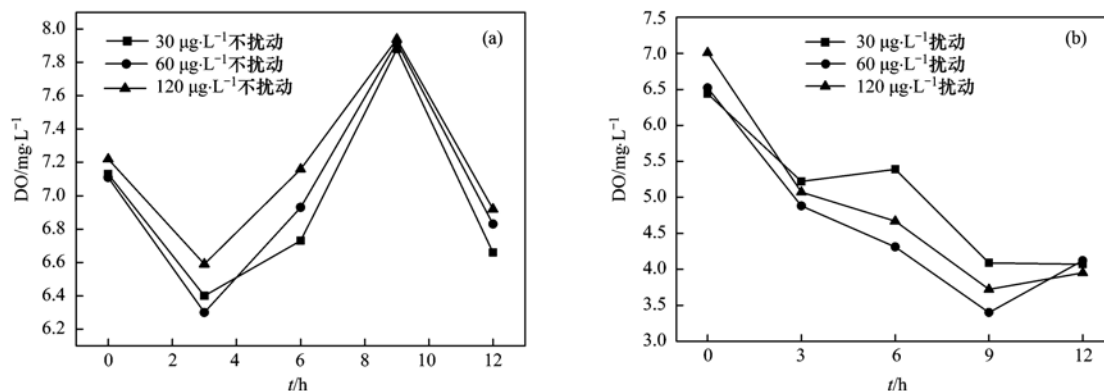


图 1 上覆水中 DO 变化规律

Fig. 1 Variations of DO in the overlying water

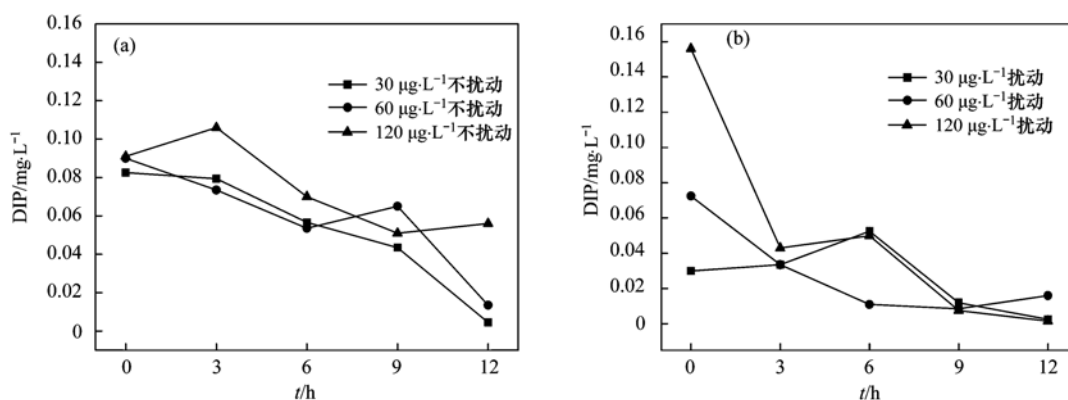


图 2 上覆水中不同形态磷的变化规律

Fig. 2 Variations of different phosphorus forms in the overlying water

图 2 显示, 无论是扰动还是不扰动状态下, 藻浓度等级越高, DIP 含量越高. 并且在试验期间, 随着时间的推移, 水体中 DIP 逐渐降低. 其原因可能是藻加入水体中, 经过一定时间, 开始吸收利用水体中 DIP 用来自身藻细胞的繁殖, 从而使得水体中 DIP 含量下降. 由试验测得无扰动下水体中叶绿素 a 的增长量分别为 26.39 µg·L⁻¹ (初始浓度为 30 µg·L⁻¹)、20.62 µg·L⁻¹ (初始浓度为 60 µg·L⁻¹)、13.08 µg·L⁻¹ (初始浓度为 120 µg·L⁻¹), 而扰动下叶绿素 a 浓度水平保持稳定的状态, 几乎不增长, 这说明扰动抑制了藻类的生长. 扰动使得底泥悬浮, 造成环境紊乱, 影响了藻光合作用的光反应与暗反应, 并且底泥的悬浮更使得水体浊度增大, 光反射加强, 不利于光穿透水体, 从而间接影响藻光合作用^[18,19]. 藻细胞生长到一定阶段将会产生一些次级代谢产物并排放到外环境中, 这些物质聚集在细胞周围将会对藻细胞生长产生抑制作用. 这些都

是造成藻类生长受抑制的原因. 同时藻细胞的繁殖吸收磷使得在不扰动下 DIP 含量的降低量约为 0.06 mg·L⁻¹, 而扰动下 DIP 由 0.08 mg·L⁻¹ 降低到 0.007 mg·L⁻¹. 其降低量为不扰动下的 1.3 倍. 这与反复扰动下, 水体中悬浮颗粒物增多, 对 DIP 的物理、化学吸附及捕捉加强, 使得部分磷形态转化为 PP 有关^[20~22].

2.3 水体中生物有效磷数量变化规律

生物有效磷 (BAP) 由溶解性磷总磷 (DTP) 和可被生物利用颗粒态磷 (BAPP) 组成的^[23,24]. 扰动与不同等级藻浓度共存条件下, 对水体中溶解性磷 (DIP) 会有所改变, 从而也会影响 PP 的组成. 进而使得水体中 BAP 分布规律发生变化(图 3).

图 3(a) 显示, 不扰动下, BAP 呈现先降低后升高趋势, 在 6h 时, BAP 达到最小值 0.118 mg·L⁻¹. 并且初始藻浓度越大, 整个试验过程中 BAP 含量也越高. 这是由于藻进入水体后, 吸收水中的溶解

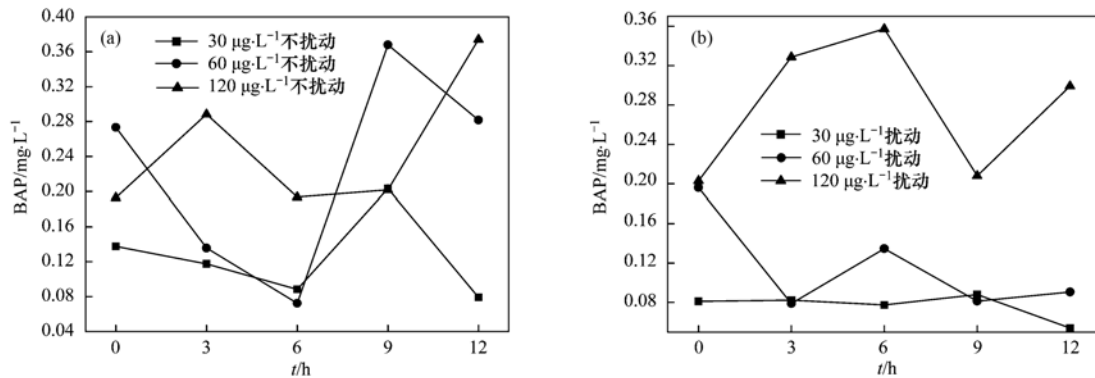


图3 上覆水中 BAP 的变化规律

Fig. 3 Variations of BAP in the overlying water

性磷促进藻细胞生长繁殖,使得 BAP 下降,当藻类生长繁殖到一定阶段时,将会产生一些次级代谢产物并排放到外环境中,这些物质聚集在细胞周围将会对藻细胞生长产生抑制作用.而初始藻浓度越大,藻细胞生长时在细胞周围产生的代谢产物越多,对藻细胞的生长抑制作用越大^[18].再加上藻类生长繁殖时对沉积物的“泵吸”作用^[9],使得内源磷发生释放,导致沉积物中部分形态磷转化为水体中的生物可利用磷,使得水体中 BAP 含量增多^[25].并且在这种“泵吸”作用下,藻初始浓度越大,该作用越强,从沉积物中转化的形态磷越多.这与不同藻浓度下沉积物中 Tot-P 含量变化一致.由于藻类生长需要一个较为稳定的环境,而扰动使得底泥悬浮,造成环境紊乱,而且上覆水中颗粒物增多,所以扰动状态下水体中 BAP 含量分布相对增多.其中,在高浓度等级藻中,沉积物中不稳定态的形态磷,如 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 向上覆水中释放量增多,这其中大部分转化为 DIP;而在低浓度等级藻中,由于泵吸作用较小,水体中的溶解性磷较小,从而使得水体中 BAP 数量分布较小.

2.4 沉积物中各形态磷数量变化规律

扰动和藻类共存条件下,与初始状态相比(图4),总磷发生了明显释放.其中,扰动状态下总磷的释放量平均值达到 $108 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,高于无扰动状态($57.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).扰动状态下,不同初始浓度藻含量下,总磷释放量分别为 $146 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($30 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), $108 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($60 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), $70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($120 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$).相反,无扰动状态下,总磷释放量依次为 $40.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($30 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), $62 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($60 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), $69.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($120 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$).对比扰动和无扰动状态,发现总磷的释放规律恰好相反,即扰动状态下,随藻类初始浓度增加,总磷释放量

逐渐降低;而无扰动则相反.毫无疑问,无扰动下,总磷的释放规律符合常识,即藻类含量越高,则“泵吸作用”越强,内源磷释放越强烈.而扰动状态下,总磷释放规律却与常识不符.推测其原因,主要有二:一是在高藻浓度下,藻类更易于受到扰动引起的环境胁迫效应的干扰,如颗粒物间摩擦作用以及藻类生长空间效应降低等,致使其生长状态受到抑制,因而使得其对内源磷的吸收能力受到限制,可能转而利用自身贮存的磷;二是高藻浓度下,藻类受到扰动等环境胁迫效应而死亡或者沉淀进入沉积物的可能性明显增加,致使试验结束后测得的总磷含量中包括了部分藻类.

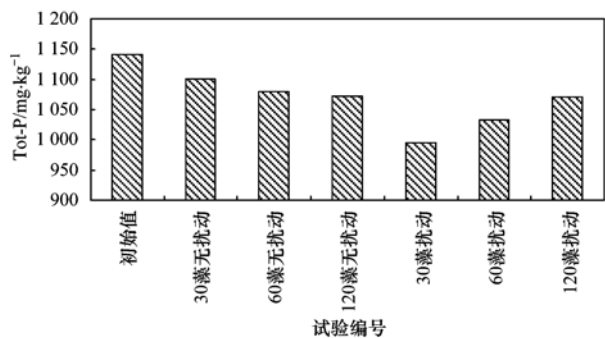


图4 各试验组沉积物中总磷数量分布

Fig. 4 Tot-P distributions in sediment of each experimental group

扰动与藻类共存条件下沉积物中不同形态磷分布规律明显不同(图5和图6).对比图5,无扰动状态和扰动状态下,与初始状态相比, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 均发生了释放, Fe/Al-P 均有所增加, Ca-P 也有所增加, Res-P 均有所释放.由于 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 Res-P 的释放幅度大于 Fe/Al-P 和 Ca-P 的增加幅度,使得总磷出现降低(图4).

图5显示,无扰动状态下和扰动状态下,沉积物中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量降低.但是,在无扰动高藻浓度下($120 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 的降低幅度却最小,明

显低于低藻浓度 ($30 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 和中藻浓度 ($60 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)。 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 占 Tot-P 的百分比也证明了这一点[图 6(a)]。究其原因,可能源于藻类对 Fe/Al-P 的利用[图 5(a)], Fe/Al-P 占 Tot-P 的百分比(质量分数) (48.4%) 也低于初始状态 (53.4%) [图 6(a)]。而藻类残体或者代谢产物形成了 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$, 因其属于弱吸附态磷, 极易形成。相反, 在扰动高藻浓度下, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 却发生了明显释放。这主要是由于叠加了扰动效应, 因为扰动易于促使 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 释放或者转化成其余形态磷如 Fe/Al-P 和 Ca-P。即与无扰动相比, 加快了磷从 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 向其它形态磷的转化。

Fe/Al-P 的变化规律与 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 恰好相反。无扰动状态下, Fe/Al-P 含量略有增加, 但在高藻浓度下明显降低[图 5(a)], 并且, 与初始状态相比, 其占 Tot-P 的百分比也明显较低[图 6(a)]。然而, 在扰动状态下, Fe/Al-P 含量随藻类浓度增加而逐渐增加[图 5(b)], 但不同藻浓度下 Fe/Al-P 占 Tot-P 的百分比几乎相同[图 6(b)], 其平均值为 66.2% (3 组扰动试验的平均值), 但仍高于初始状态的 53.4%, 也高于无扰动状态的平均值 (55.0%)。这说明, 扰动似乎更促进了 Fe/Al-P 的形成, 这与以往研究有相似之处^[26~28]。扰动状态下, Fe/Al-P 的形成与藻类含量密切相关, 暗示了叠加扰动效应后, 藻类含量在 Fe/Al-P 的形成中起了决定性作用, 而这并不适合无扰动状态, 因为 Fe/Al-P 的净增量与藻类含量无关, 而在高藻浓度下反而大幅度降低。这表明, 高藻诱发了 Fe/Al-P 的释放或者转化。那么扰动效应在 Fe/Al-P 的形成过程中究竟起了什么作用? 对比试验结束后无扰动与扰动状态下的高藻试验组, 前者藻类含量有所增加, 而后者基本没有增加。由于 Fe/Al-P 为易释放态磷, 易于被藻类吸收和利用, 因此, 这解释了在高藻条件下 Fe/Al-P 为何没有增加反而降低, 同时, 在低藻和中藻含量下, 藻类数量较低, 对磷的利用量小, 进而导致内源磷释放量较小(图 4), 而

$\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 的释放可能就满足了藻类生长需要[图 5(a)]。此外, 静止条件下, 水体中颗粒物质沉降等因素可能导致了水体中部分溶解态磷形成了 Fe/Al-P, 所以出现了 Fe/Al-P 未降反升现象[图 5(a)]。扰动状态下, 由于扰动影响了藻类生长, 使得藻类在 Fe/Al-P 的形成过程中起的作用远小于扰动效应, 加快了 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 向 Fe/Al-P 的转化, 由于本试验周期较短 (12 h), 可能导致 Fe/Al-P 还来不及转化成 Ca-P, 因此, 在扰动状态下, Ca-P 的形成量并不明显[图 5(b)]。

无论扰动与否, Ca-P 均有所增加(图 5)。在无扰动状态下, Ca-P 含量随藻类浓度增加而逐渐增加[图 5(a)], 其占 Tot-P 的百分比也随藻浓度增加而逐渐增加[图 6(a)], 其净增加量占 Tot-P 百分比为 13.74% (10.33% ~ 16.36%)。而扰动状态下, 尽管 Ca-P 也有所增加, 但增加量[图 5(b)]和增加幅度[图 6(b)]均低于无扰动状态。Ca-P 的增加主要源于上覆水中溶解态磷被碳酸钙吸附或者被 Ca-P 吸附而再生长而导致^[29]。上覆水中的溶解态磷则主要来源于 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 Res-P 的释放。由于没有扰动, 因此, 内源磷形态间的转化很难发生。然而, 在扰动状态下, Ca-P 则增加幅度很小, 仅为 4.99% (3 组扰动试验的平均值), 明显低于无扰动状态 (13.74%, 3 组扰动试验的平均值)。这表明扰动和藻类共存条件抑制了 Ca-P 的形成或者是两者促进了 Ca-P 向其他形态磷的转化, 如 Fe/Al-P (3 组扰动试验 Fe/Al-P 的百分比增加量高出无扰动试验 13 个百分点)。这也暗示了在扰动和藻类共存条件下, Ca-P 存在被生物利用的可能性, 甚至某些藻类更倾向于利用 Ca-P。

在扰动与无扰动状态下, Res-P 均发生了释放(图 5), 并且, Res-P 占 Tot-P 的百分比也明显低于初始状态。无扰动状态下, Res-P 占 Tot-P 的百分比随藻类含量增加而逐渐降低, 然而, 在扰动状态下, 藻类含量对 Res-P 释放的影响程度较低。

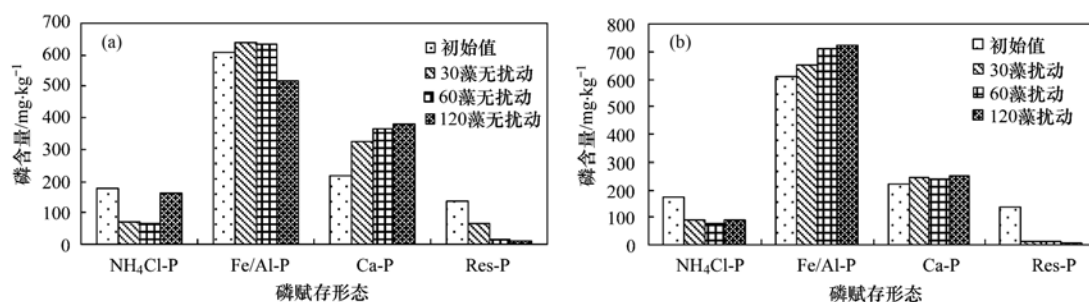


图 5 沉积物磷赋存形态数量分布

Fig. 5 Distributions of phosphorus forms in sediment

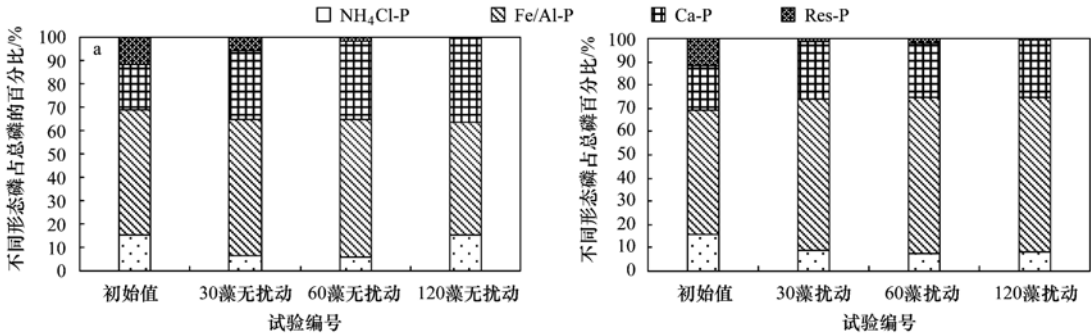


图 6 沉积物不同形态磷占总磷的百分比

Fig. 6 Percentages of different phosphorus forms of TP in the sediment

值得指出的是,本研究通过设置低藻浓度(30 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、中藻浓度(60 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)和高藻浓度(120 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),并对比了扰动与无扰动状态下对内源磷数量分布的影响,模拟太湖一年中不同时期在各种风速条件下的实际情况,从而来分析沉积物中各形态磷数量变化规律.仅是通过上覆水与沉积物中各形态磷的数量变化来描述内源磷的迁移转化,但是没有考虑藻类死亡及其沉降后,藻类残体在沉积物中被细菌分解发生矿化释磷等因素^[30].此外,12 h的试验周期也略短,因此,藻类对沉积物中内源磷的生物吸收能力还并未完全发挥作用.

3 结论

(1)在扰动与藻类共存条件下,上覆水中溶解态磷的降低幅度要高于不扰动状态.

(2)在扰动与藻类共存条件下,沉积物中 Fe/Al-P 和 Ca-P 有所增加,而 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 Res-P 有所释放.并且,扰动对内源磷形态转化的作用,与藻类相比要更大一些.

参考文献:

[1] Lennox L J. Sediment-water exchange in Lough Ennell with particular Reference to phosphorus[J]. Water Research, 1984, 18(12): 1483-1485.

[2] 赵建刚, 乔永民. 汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 1823-1831.

[3] 金晓丹, 吴昊, 陈志明, 等. 长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性[J]. 环境科学, 2015, 36(2): 448-456.

[4] Neal C, Neal M, Leeks G J L, et al. Suspended sediment and particulate phosphorus in surface waters of the upper Thames Basin, UK[J]. Journal of Hydrology, 2006, 330(1-2): 142-154.

[5] 尤本胜, 王同成, 范成新, 等. 太湖草型湖区沉积物再悬浮对水体营养盐的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 26-31.

[6] 李大鹏, 黄勇, 李伟光. 再悬浮条件下底泥中磷赋存形态的转化研究[J]. 环境科学, 2008, 29(5): 1289-1294.

[7] 李大鹏, 王晶, 黄勇. 反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及

上覆水间的交换[J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2191-2197.

[8] 熊强, 焦立新, 王圣瑞, 等. 滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性[J]. 环境科学, 2014, 35(11): 4118-4126.

[9] Cyr H, MaCabe S K, Nürnberg G K. Phosphorus sorption experiments and the potential for internal phosphorus loading in littoral areas of a stratified lake[J]. Water Research, 2009, 43(6): 1654-1666.

[10] 汪明, 武晓飞, 李大鹏, 等. 太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究[J]. 环境科学, 2015, 36(1): 80-86.

[11] Yuan H Z, Shen J, Liu E F, et al. Characteristic of phosphorus release with the control of pH of sediments from Meiliang Bay, Lake Taihu[J]. Lake Sciences, 2009, 21(5): 663-668.

[12] Ellison M E, Brett M T. Particulate phosphorus bioavailability as a function of stream flow and land cover[J]. Water Research, 2006, 40(6): 1258-1268.

[13] Zhu M Y, Zhu G W, Li W, et al. Estimation of the algal-available phosphorus pool in sediments of a large, shallow eutrophic lake (Taihu, China) using profiled SMT fractional analysis[J]. Environmental Pollution, 2013, 173: 216-223.

[14] Hietjes A H M, Lijklema L. Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments[J]. Journal of Environmental Quality, 1980, 9(3): 405-407.

[15] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民, 等. 太湖梅梁湾水动力及相关过程的研究[J]. 湖泊科学, 2000, 12(4): 327-334.

[16] 丁玲, 逢勇, 李凌, 等. 水动力条件下藻类动态模拟[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 1863-1868.

[17] Hu W P, Jørgensen S E, Zhang F B, et al. A model on the carbon cycling in Lake Taihu, China[J]. Ecological Modelling, 2011, 222(16): 2973-2991.

[18] 颜润润, 逢勇, 陈晓峰, 等. 不同风等级扰动对贫营养下铜绿微囊藻生长的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(10): 2749-2753.

[19] Pannard A, Bormans M, Lagadeuc Y. Short-term variability in physical forcing in temperate reservoirs: effects on phytoplankton dynamics and sedimentary fluxes[J]. Freshwater Biology, 2007, 52(1): 12-27.

[20] 李大鹏, 黄勇. 底泥扰动状态下内源磷释放过程模拟研究

- [J]. 环境工程学报, 2010, **4**(5): 993-997.
- [21] Lake B A, Coolidge K M, Norton S A, *et al.* Factors contributing to the internal loading of phosphorus from anoxic sediments in six Maine, USA, lakes[J]. Science of the Total Environment, 2007, **373**(2-3): 534-541.
- [22] Wang S R, Jin X C, Zhao H C, *et al.* Effect of organic matter on the sorption of dissolved organic and inorganic phosphorus in lake sediments[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2007, **297**(1-3): 154-162.
- [23] 李大鹏, 黄勇. 太湖梅梁湾和月亮湾春夏两季沉积物扰动下 BAPP 的转化规律[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(10): 2766-2773.
- [24] 黄清辉, 王子健, 王东红, 等. 夏季梅梁湾水体中生物有效磷的分布及来源[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, **35**(22): 131-137.
- [25] 李大鹏, 王晶, 黄勇. 沉积物扰动下太湖月亮湾中生物有效磷的变化规律[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(4): 792-797.
- [26] 史晓丹, 李大鹏, 王忍, 等. 物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 955-962.
- [27] 李大鹏, 黄勇. 扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2614-2620.
- [28] Boström B, Andersen J M, Fleischer S, *et al.* Exchange of phosphorus across the sediment-water interface [J]. Hydrobiologia, 1988, **170**(1): 229-244.
- [29] 武晓飞, 李大鹏, 汪明. 沉积物短期扰动下 BAPP 再生和转化机制[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 171-178.
- [30] 张胜花, 常军军, 孙珮石. 水体藻类磷代谢及藻体磷矿化研究进展[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(7): 1250-1254.

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaxing	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinfo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zelite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行