

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响	
..... 周敏, 乔利平, 朱书慧, 李莉, 楼晟荣, 王红丽, 陶士康, 黄成, 陈长虹 (1179)	
利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态	黄子龙, 曾立民, 董华斌, 李梅, 朱彤 (1188)
南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究	朱麟, 马嫣, 郑军, 李时政, 王利朋 (1199)
北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究	苏捷, 赵普生, 陈一娜 (1208)
重庆市主城区 PM _{2.5} 时空分布特征	刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利 (1219)
大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比	庞博, 吉东生, 刘子锐, 朱彬, 王跃思 (1230)
深圳市大气中全氟化合物的残留特征	何鹏飞, 张鸿, 李静, 何龙, 罗骥, 刘国卿, 沈金灿, 杨波, 崔晓宇 (1240)
北京上甸子站大气 CO ₂ 及 δ ¹³ C(CO ₂) 本底变化	夏玲君, 周凌晔, 刘立新, 张根 (1248)
梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布	刘婷, 李露, 张家泉, 占长林, 刘红霞, 郑敬茹, 姚瑞珍, 曹军骥 (1256)
城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险	刘建福, 陈敬雄, 辜时有 (1264)
北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估	
..... 曹治国, 余刚, 吕香英, 王梦蕾, 李琦路, 冯精兰, 闫广轩, 余浩, 孙剑辉 (1272)	
西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析	王丽, 王利军, 史兴民, 卢新卫 (1279)
PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究	刘寒冰, 姜鑫, 王新, 杨兵, 薛南冬, 张石磊 (1287)
海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价	张卫坤, 甘华阳, 闭向阳, 王家生 (1295)
曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究	薛勇, 周倩, 李远, 章海波, 胡雪峰, 骆永明 (1306)
滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源	李广, 章新平, 许有鹏, 宋松, 王跃峰, 季晓敏, 项捷, 杨洁 (1313)
江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价	李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 李曹乐, 杨天学, 唐军 (1321)
城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究	刘小红, 司友斌, 郭子薇, 杜成竹, 朱聪聪 (1330)
我国北方温排水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性	
..... 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 王亚平, 史建超, 周石磊, 刘飞 (1337)	
额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征	韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 张伟, 刘世伟, 周嘉欣 (1345)
太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析	冯佳, 郭宇宁, 王飞, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 程革, 张建民 (1353)
铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征	程建华, 窦智勇, 孙庆业 (1362)
基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究	马秋梅, 李玮, 王毅, 刘新亮, 李勇, 吴金水 (1371)
重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算	张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 李勇 (1379)
山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 张文慧, 许秋瑾, 黄天寅 (1389)
伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡河道脱氮机制的影响	韩华杨, 李正魁, 王浩, 朱倩 (1397)
环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征	高永霞, 宋玉芝, 于江华, 朱广伟 (1404)
藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律	陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖 (1413)
扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响	郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见 (1422)
铅改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响	章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (1427)
电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究	王岩, 施钦, 王辉, 卞兆勇 (1437)
水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用	
..... 赖立, 谢强, 方文侃, 邢明超, 吴德意 (1444)	
多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除	乔梦, 齐维晓, 赵旭, 刘会娟, 曲久辉 (1451)
污水处理厂污泥水溶性有机物的光谱特性分析	牛天浩, 周振, 胡大龙, 魏海娟, 李晶, 窦微笑, 葛红花 (1460)
高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析	李祥, 朱亮, 黄勇, 杨朋兵, 崔剑虹, 马航 (1467)
连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制	吴鹏, 张诗颖, 宋吟玲, 徐乐中, 沈耀良 (1472)
反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复	王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳, 张月茹, 刘郭洵 (1478)
低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响	
..... 何势, 顾超超, 魏欣, 黄圣琳, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1485)	
低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究	
..... 杨伟强, 王冬波, 李小明, 杨麒, 徐秋翔, 张志贝, 李志军, 向海弘, 王亚利, 孙剑 (1492)	
短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响	谢燕, 陈曦, 胡正华, 陈书涛, 张寒, 凌慧, 申双和 (1499)
不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子	崔海, 张亚红 (1507)
塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性	贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 张雪妮, 解丽娜 (1516)
小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响	刘江, 江韬, 黄容, 张进忠, 陈宏 (1523)
鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析	王亚男, 程立娟, 周启星 (1531)
水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素	罗瑶, 李珊, 谭文峰, 刘凡, 蔡崇法, 邱国红 (1539)
高温纤维素降解菌筛选及产酶特性	冯红梅, 秦永胜, 李筱帆, 周金星, 彭霞薇 (1546)
基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发	
..... 戴晓虎, 薛勇刚, 刘华杰, 戴翎翎, 严寒, 李宁 (1553)	
养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价	金彩霞, 司晓薇, 王子英, 张琴文 (1562)
4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响	王兰君, 王金花, 朱鲁生, 王军, 赵祥 (1568)
新型污染物卤代吡啉的环境行为及生态毒理效应	林坤德, 陈艳秋, 袁东星 (1576)
水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究	李蕾, 王铁宇, 王晓军, 肖荣波, 李奇峰, 彭驰, 韩存亮 (1584)
《环境科学》征订启事 (1218) 《环境科学》征稿简则 (1370) 信息 (1352, 1412, 1498)	

藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律

陈俊, 李勇, 李大鹏*, 黄勇, 朱培颖

(苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009)

摘要:以太湖梅梁湾的沉积物和上覆水为研究材料,研究了铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)和羊角月牙藻(*Selenastrum capricornutum*)与扰动共存下,水体中不同形态磷的数量分布以及不同藻类对水体中形态磷分布的贡献。结果表明,无论扰动与否,上覆水中总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)、溶解性磷酸盐(DIP)、生物有效磷(BAP)均呈降低趋势。但是,在扰动和无扰动条件下,铜绿微囊藻和羊角月牙藻对DTP和DIP的吸收能力恰好相反。水体中磷的消失主要归于颗粒物质的物理化学吸附和藻类的生物利用作用,但扰动与否两者对磷消失的贡献率明显不同。无扰动状态下,铜绿微囊藻和羊角月牙藻对DTP和DIP的吸收能力均在60%左右;而扰动状态下,两者对DTP和DIP的吸收能力分别下降至40%和25%。磷在沉积物不同形态磷间的数量分布也发生明显变化。无论扰动与否, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 与钙磷(Ca-P)均有所降低,Fe/Al-P则增加,但扰动下 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 与Ca-P下降幅度与Fe/Al-P升高幅度均更大。与铜绿微囊藻相比,羊角月牙藻更有利于Ca-P的释放和Fe/Al-P的形成。

关键词:扰动;藻类;磷;吸收;太湖

中图分类号: X131.2; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)04-1413-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.04.028

Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae

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

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

Abstract: Distribution of different phosphorus (P) forms in the overlying water and the contribution of different algae to the P disappearance were investigated under disturbance with the addition of algae (*Microcystis aeruginosa* and *Selenastrum capricornutum*, respectively). The sediments and overlying water were taken from Meiliang Bay in Taihu Lake. The results showed that the concentrations of total P (TP), dissolved total P (DTP), dissolved inorganic P (DIP) and biavailable P (BAP) decreased with and without disturbance. The uptake of DTP and DIP by *Microcystis aeruginosa* was better than that of *Selenastrum capricornutum* under the disturbance, but it was the opposite without the disturbance. The disappearance of P in the overlying water was attributed completely to the physico-chemical adsorption of the suspended solids and the uptake of algae. But the contribution of suspended solids and algae depended on the disturbance. The contribution of *Microcystis aeruginosa* and *Selenastrum capricornutum* to DTP and DIP absorption was about 60% without disturbance. However, the value was reduced to 40% (*Microcystis aeruginosa*) and 25% (*Selenastrum capricornutum*) under the disturbance. Under the disturbance and the action of algae, the distribution of sedimentary P forms changed. $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ and Ca-P release and Fe/Al-P increase were observed with and without disturbance. The decrease of $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ and Ca-P and the increase of Fe/Al-P were more obvious with disturbance than without disturbance. *Selenastrum capricornutum* was favor of the release of Ca-P and the formation of Fe/Al-P.

Key words: disturbance; algae; phosphorus; absorption; Taihu Lake

在浅水湖泊中,磷是导致水体富营养化的重要因子,水体中各形态磷的转化途径、数量变化严重影响着湖泊富营养化的进程^[1~3]。而存在于湖泊中的不同藻类等浮游植物是影响水体中磷形态转化、数量变化及其分布的关键因素^[4,5]。在不同浅水湖泊中,由于季节性及藻类种类的差异,会使得浅水湖泊中形态磷的分布存在很大的差异性^[6,7]。并且,浅水湖泊中常见的风浪、湖流等导致的沉积物悬浮,从而使得在沉积物悬浮以及藻类双重作用下,水体及沉积物中磷形态转化活跃,但也较为复杂^[8,9]。

通常,沉积物悬浮会导致溶解态磷(溶解性磷酸盐和溶解性总磷)降低。有学者将其归为藻类的

吸收利用,有学者将其归为颗粒物质的物理化学吸附,有学者认为上述作用均存在。毋庸置疑,水体中溶解态磷的消失与藻类密切相关,陈俊等^[10]发现,以铜绿微囊藻在扰动作用下,对水体中溶解性总磷的吸收仅占10%,远低于颗粒物质的物理化学吸附(90%)。但是,不同藻类对磷的吸收效果是否一致尚不得而知。此外,沉积物悬浮会导致水体中颗粒态磷

收稿日期: 2015-10-11; 修订日期: 2015-11-16

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

增加,而藻类可以将其转化成溶解态磷而吸收,如羊角月牙藻对沉积物中 Ca-P 存在专属性吸收作用. 相对于羊角月牙藻而言,铜绿微囊藻则具有更强的光合作用,即铜绿微囊藻对羊角月牙藻具有竞争优势.

根据对太湖的常年监测的资料显示,太湖水体中出现的藻类主要有蓝藻、绿藻、隐藻、硅藻、裸藻及其他门类,所占比例分别为 39.7%、25.3%、16.9%、15.5% 和 2.6%. 而蓝藻中又以微囊藻属中的铜绿微囊藻居多且易导致水华的发生,绿藻门中以月牙藻属中的羊角月牙藻居多^[11,12]. 基于此,本文以铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)和羊角月牙藻(*Selenastrum capricornutum*)作为研究对象,探讨了藻类及扰动双重作用下上覆水中不同形态磷及生物有效磷的变化规律,进一步分析了藻类和扰动对

水体中磷消失的贡献率,并分析了扰动之后,沉积物中形态磷的变化规律,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 110 mm 高 500 mm)于 2015 年 6 月采集梅梁湾(N31°31'33.6", E120°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

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

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	4.15	7.22	0.22	0.084	0.034	— ¹⁾	—	—	7.49
沉积物	—	—	—	—	—	56.5	4.72	0.42	—

1) 表示未检测

1.2 试验方法

试验开始前,首先分别接种培养铜绿微囊藻和羊角月牙藻,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.

选用 6 个玻璃容器作为试验装置,分成 6 组,分别标记为 E1、E2、E3 和 E I、E II、E III. 向 6 组中均放入取自太湖梅梁湾的湿底泥 200 g,并沿器壁缓慢加入采样点上覆水 1 L,尽量避免底泥发生再悬浮. 另外,取处于生长对数期的铜绿微囊藻和羊角月牙藻原液(未饥饿的藻类),离心,稀释,在 E2、E II 中加入铜绿微囊藻,在 E3、E III 中加入羊角月牙藻,使得其中的藻浓度均为 90 μg·L⁻¹. E1、E I 不加入任何藻. 所有试验装置均放在光照培养箱中以保证光照(3 000 lx)和温度(28℃)的恒定.

试验周期为 21 d,每天同一时间采用机械搅拌机(RW20 digital)对 E I、E II、E III 沉积物进行扰动,转速为 120 r·min⁻¹. 每次扰动时间为 10 min,扰动应使得沉积物充分悬浮. 每隔 2 d,在扰动前分别采样,取 65 mL 水样,进行 TP、DTP、DIP、BAP、叶绿素 a 等测定,另外,每天扰动之前监测上覆水中 DO、pH 值的变化. 取样后,向各个玻璃容器中补充

等量的湖水;并且隔 1 d 向玻璃容器中加入一定量的去离子水补充蒸发量. 试验完成后,取各个玻璃容器中的底泥烘干、研成粉末、过筛,再测定底泥中的各种形态磷.

1.3 分析方法

TP 是将水样采用过硫酸钾消解后钼锑抗分光光度法测定;DTP 是将水样经过 0.45 μm 滤膜过滤后的滤液消解后测定;DIP 含量是将水样经过 0.45 μm 滤膜过滤后直接测定;PP 是 TP 与 DTP 差值. DOP(溶解性有机磷)是 DTP 与 DIP 的差值.

BAP 的分析测定选用 Ellison 等^[13]的方法来做藻类分析试验^[14]. 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. 藻类可利用磷(AAP)采用 0.1 mol·L⁻¹ NaOH 溶液提取法进行测定.

上覆水中 DO 和 pH 值分别通过便携式溶解氧测定仪(美国 HACH HQ30d)和数显 pH 计(pHs-3TC,武汉)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.

2 结果与讨论

2.1 上覆水中 DO 及 pH 的变化

扰动通过不断更新水体与大气接触界面而增加

复氧,同时悬浮的沉积物颗粒会加快水体溶解氧的消耗;此外,藻类则通过光合作用和呼吸改变水体溶解氧含量,在两者的共同作用下,水体溶解氧会发生变化[图 1(a)].

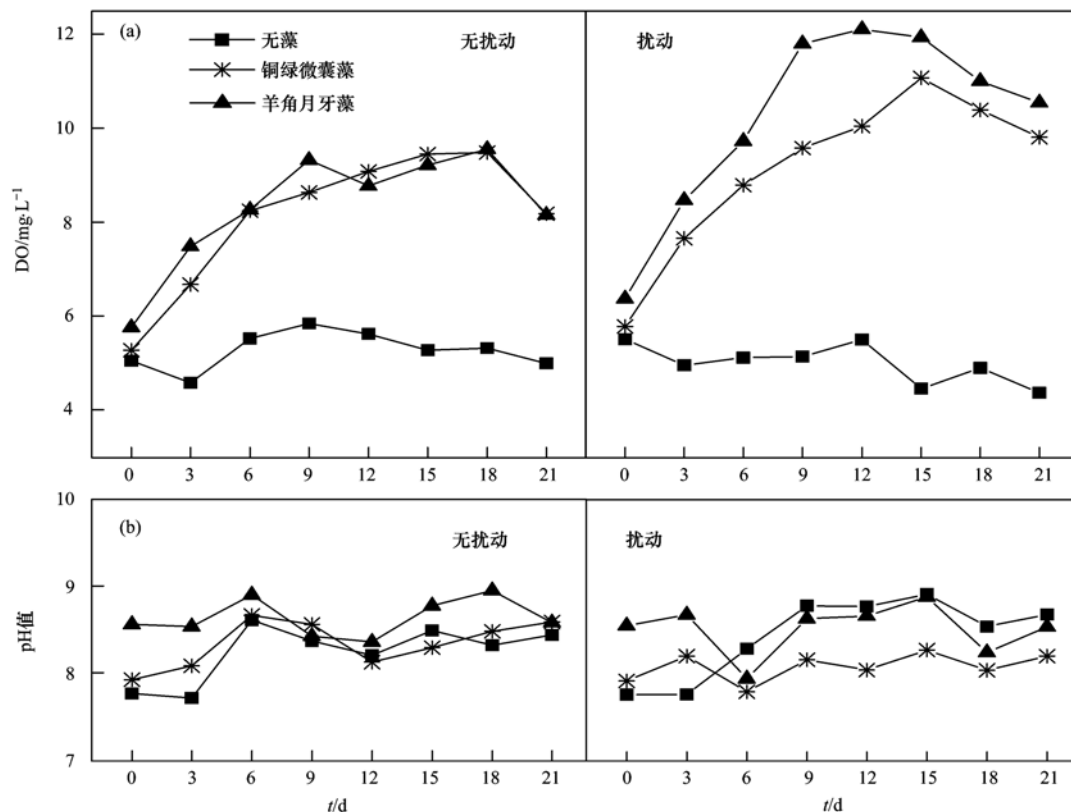


图 1 上覆水中 DO 和 pH 值变化规律

Fig. 1 Variation of DO and pH in the overlying water with and without disturbance

图 1(a) 显示,扰动状态下,加入铜绿微囊藻与羊角月牙藻的试验组上覆水中 DO 含量明显高于无扰动状态.且随着试验的进行,两种状态下上覆水中 DO 含量均升高,试验后期(15 d 开始),DO 含量平缓下降直至趋于平衡.无扰动状态下,在整个试验期间,无藻试验组中 DO 含量一直保持稳定.而扰动状态下则由于扰动后颗粒物质悬浮,使得融入其中的溶解氧被中小分子有机物及某些金属离子消耗,从而使得溶解氧降低^[15].无扰动状态下,铜绿微囊藻与羊角月牙藻试验组上覆水中 DO 均升高,平均值分别为 $8.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (铜绿微囊藻)和 $8.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (羊角月牙藻),试验中两试验组 DO 含量接近.扰动状态下,随着试验的进行试验组 DO 含量也升高,特别是在试验中后期(9 ~ 15 d),DO 达到最大值为 $9.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (铜绿微囊藻)和 $10.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (羊角月牙藻).且高于无扰动状态下的 $9.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (铜绿微囊藻)和 $9.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (羊角月牙藻).显示扰动状态下羊角月牙藻上覆水中 DO 含量明显高于铜

绿微囊藻.其原因是扰动对羊角月牙藻的有效荧光产量和光合作用效率有显著的促进作用^[16],而对铜绿微囊藻则不具有这种显著作用,这导致了在扰动下羊角月牙藻的光合作用强于铜绿微囊藻,相同生存条件下能产生更多的氧气,使上覆水中 DO 含量更高.

图 1(b) 显示,无论扰动与否,各试验组上覆水中 pH 值均保持稳定状态.无扰动状态下,加入羊角月牙藻的试验组上覆水中 pH 值高于铜绿微囊藻和无藻下的 pH 值.这与羊角月牙藻吸收利用上覆水中磷强于铜绿微囊藻有关.扰动状态下,羊角月牙藻试验组 pH 值仍然高于铜绿微囊藻试验组,但是低于无藻试验组.因为扰动下上覆水中颗粒物质增多,使得水体中部分有机分子及还原性物质被分解,导致 pH 值有所升高.

2.2 上覆水中 TP 含量的变化

上覆水中 TP 的变化与扰动密切相关(图 2).图 2 显示,无论扰动与否,TP 均呈总体下降趋势,且扰

动状态下上覆水中 TP 浓度均高于无扰动状态. 这主要归因于扰动导致的沉积物悬浮, 致使颗粒态磷含量增加(数据未给出, 但颗粒态磷变化趋势与总磷相似, 并且, 扰动状态下, 颗粒态磷占总磷的百分比分别为 $50.79\% \pm 18.71\%$ (无藻, $n = 24$)、 $71.43\% \pm 17.64\%$ (铜绿微囊藻, $n = 24$)、 $73.22\% \pm 14.95\%$ (羊角月牙藻, $n = 24$)). 仅从上述平均值数据以及颗粒态磷的变化(0 ~ 21 d)来看, 扰动导致藻类悬浮以及藻类促进颗粒态磷的释放可能是颗粒态磷在总磷中占比较高的主要原因, 与无藻扰动相对比.

无扰动状态下, TP 呈降低趋势, 但较为平缓. 第 9 d, TP 均达到平衡状态, 分别为 $0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (无藻)、 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (铜绿微囊藻)、 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

(羊角月牙藻), 一直持续到试验结束. 而扰动状态下, TP 呈现先降低又升高再降低的趋势. 随着扰动次数的增加, TP 升高幅度逐渐降低. 这暗示了扰动之间对内源磷的释放存在一定的差异, 即先前的扰动有降低后续扰动下内源磷释放的趋势. 此外, 无论扰动还是无扰动状态下, 加入羊角月牙藻的试验组 TP 浓度总是高于铜绿微囊藻试验组. 其原因可能是羊角月牙藻沉降性弱于铜绿微囊藻. 对于月牙藻来说, 扰动强度越大, 沉降性越弱, 由于月牙藻通常由 4、8、16 个细胞以凸面相对排列成一组, 整个群体细胞数在 100 个以上, 而扰动打乱了这种群聚现象, 降低了藻细胞的沉降性能^[16~18]. 而铜绿微囊藻主要靠伪空胞的气囊提供的浮力来调节其在水中的位置^[19,20], 所以扰动对其沉降性影响较小.

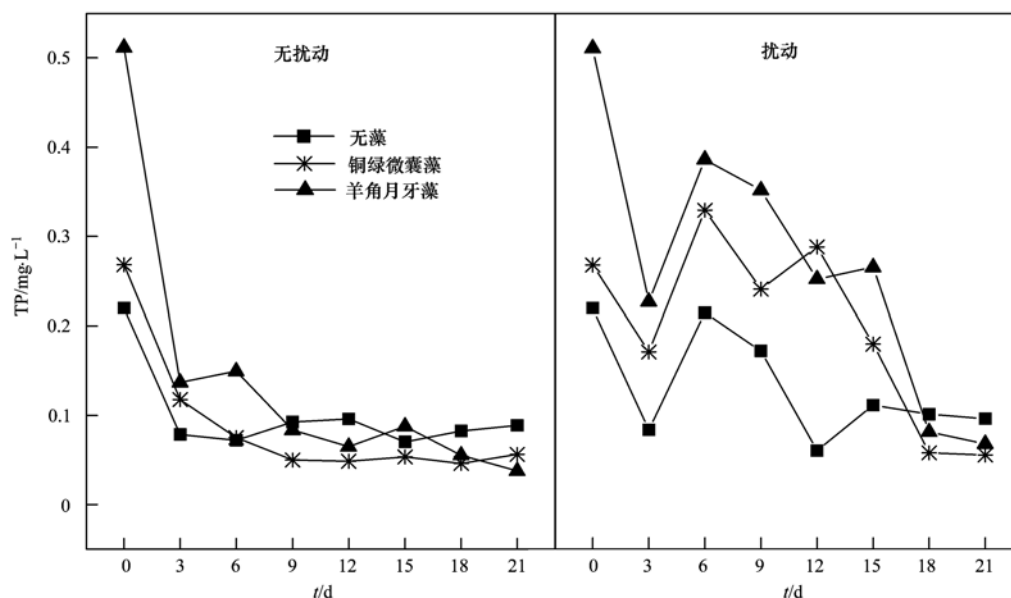


图2 上覆水中 TP 的变化规律

Fig. 2 Variation of TP in the overlying water

2.3 上覆水中 DTP 及 DIP 含量的变化

由于扰动会导致沉积物颗粒进入上覆水中, 从而增加了溶解态磷被吸附并转化成颗粒态磷的可能性, 进而降低了上覆水中 DTP 含量(图 3), 而 DIP 的变化规律与 DTP 基本一致(图 4).

图 3 显示, 无论扰动与否, 上覆水中 DTP 均呈降低趋势, 并分别在第 15 d 达到稳定状态, 无扰动状态下, 分别稳定在 $(0.064 \pm 0.005) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (无藻, $n = 3$); $(0.052 \pm 0.006) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (铜绿微囊藻, $n = 3$); $(0.039 \pm 0.010) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (羊角月牙藻, $n = 3$). 扰动状态下, 则分别稳定在 $(0.048 \pm 0.006) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (无藻, $n = 3$); $(0.024 \pm 0.004) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (铜绿微囊藻, $n = 3$); $(0.041 \pm 0.009) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (羊角月

牙藻, $n = 3$). 从图 3 可以看出, 无扰动状态下, 羊角月牙藻对 DTP 的吸收能力要高于铜绿微囊藻. 然而, 在扰动状态下, 恰好相反. 这可能与扰动致使羊角月牙藻的群聚平衡被打破有关, 导致其生存状态被破坏, 影响了其对水体中磷的吸收. 这从 DOP 的变化可以反映出来. 无扰动状态下, DOP 分别稳定在 $(0.045 \pm 0.007) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (无藻, $n = 7$); $(0.045 \pm 0.014) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (铜绿微囊藻, $n = 7$); $(0.035 \pm 0.014) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (羊角月牙藻, $n = 7$). 扰动状态下, 则分别稳定在 $(0.033 \pm 0.008) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (无藻, $n = 7$); $(0.023 \pm 0.012) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (铜绿微囊藻, $n = 7$); $(0.031 \pm 0.008) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (羊角月牙藻, $n = 7$). 无扰动状态下, DOP 占 DTP 的百分比分别达到 85.36%

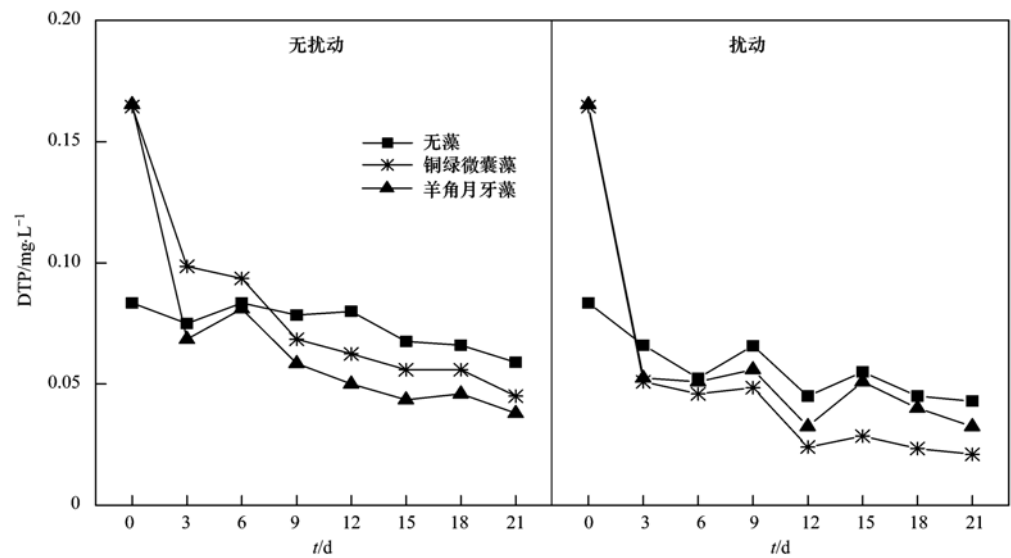


图3 上覆水中 DTP 的变化规律
Fig. 3 Variation of DTP in the overlying water

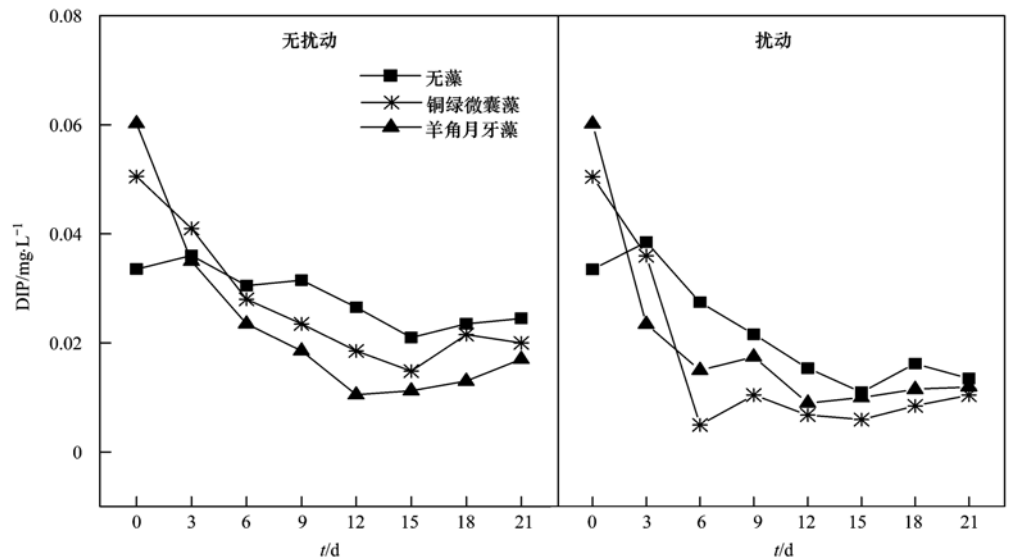


图4 上覆水中 DIP 的变化规律
Fig. 4 Variation of DIP in the overlying water

(铜绿微囊藻)和90.02%(羊角月牙藻),而扰动状态下,该比例则分别为93.46%(铜绿微囊藻)和75.30%(羊角月牙藻).对比铜绿微囊藻在有无扰动状态下对DOP形成发现,扰动似乎有利于铜绿微囊藻的生长,并强化了对磷的吸收利用.这在太湖每年6~9月(风浪扰动频繁)暴发“藻华”以铜绿微囊藻为主相符.

无论扰动与否,DTP均呈降低趋势,但是,扰动状态下,上覆水中DTP明显处于低于无扰动状态的水平,且无论有藻与否.这说明了扰动确实可以加快上覆水中DTP被颗粒物吸附,并导致其从水体中消失.其去向有3种可能:一是被颗粒物吸附,转化成

颗粒态磷,以悬浮物的形式存在于上覆水中;二是随悬浮物沉降进入沉积物,并形成沉积物中的某种形态磷,在后继扰动过程中再次进入水体加入转化行列;三是被藻类吸收转化成有机磷.但是,DTP的消失在上述3种途径中各占多少,仍是个问题.

如果将上述3种途径归结起来,主要是颗粒物对DTP的物理化学吸附和藻类的生物利用作用.陈俊等^[10]在以往研究中发现,无扰动作用下,铜绿微囊藻对DTP的吸收能力大概占40%,颗粒物对DTP的吸收能力占60%.而扰动作用下,铜绿微囊藻对DTP的吸收能力仅在10%左右,颗粒物对DTP的吸收能力高达90%.本研究通过计算DTP

在不同条件下的去除率,分别计算了颗粒物质和藻类对 DTP 消失的贡献率. 在无扰动状态下,铜绿微囊藻对 DTP 的吸收能力占 60%,羊角月牙藻约占 65%,相应地颗粒物质的吸附则分别占 40% 和 35%. 这与陈俊在以往研究中有所不同. 其原因在于,以往研究中,未扣除水体中颗粒物质自然沉降对 DTP 的去除贡献,而颗粒物质沉降也包括了藻类沉降,因此,导致在无扰动条件下,颗粒物质对 DTP 的吸附能力略高于铜绿微囊藻. 本研究中,设置了无扰动无藻条件,发现颗粒物质的单纯沉降也会导致 30% 的 DTP 消失. 因此,将这 30% 认为是颗粒物质沉降所致. 在无扰动有藻条件中,在 DTP 的去除贡献中扣除了这部分,其余认为是藻类所致. 在以往研究中是通过颗粒态磷去除率来计算 DTP 去除率,实际上忽视了吸收 DTP 的藻类也会发生沉降,因此,无意中增加了颗粒物质对 DTP 消失的贡献率. 但是,必须指出的是,由于悬浮物与藻类共存,藻类存在从悬浮物上直接利用磷的可能性,本研究中将这部分认为是 0.

然而,在扰动状态下,藻类对 DTP 的吸收利用低于颗粒物质的物理化学吸附. 铜绿微囊藻和羊角月牙藻对 DTP 的吸收利用分别占 44% 和 40%,而颗粒物质则占 56% 和 60%. 可以看出,尽管有无扰动下,藻类吸收和颗粒物质吸附对 DTP 的贡献率有所不同,但相差并不大,这与笔者在以往研究中所得结果有较大差别,特别是扰动状态下. 分析其原因主要是,在以往研究^[10]中,扰动下藻类对 DTP 的吸收以试验结束时藻类增加量来计算,其中,忽视了试验过程中藻类沉降、死亡以及被悬浮物质吸附等因

素,从而导致藻类吸收和颗粒物质吸附对 DTP 贡献率出现偏差. 但本研究的数据仍然支持了沉积物悬浮确实抑制了藻类生长,这主要是藻类对 DTP 的利用有所降低. 此外,必须指出的是,在藻类与扰动共存条件下,藻类有能力直接将颗粒态磷转化成溶解态磷并利用^[21],这导致很难明确两者对 DTP 消失的贡献率.

从图 4 可以看出,DIP 的变化规律基本与 DTP 一致. 无论扰动与否,上覆水中 DIP 均呈降低趋势,并分别在第 12 d 达到稳定状态,无扰动状态下,分别稳定在 $(0.024 \pm 0.002) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (无藻, $n=4$); $(0.019 \pm 0.003) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (铜绿微囊藻, $n=4$); $(0.013 \pm 0.003) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (羊角月牙藻, $n=4$). 扰动状态下,则分别稳定在 $(0.014 \pm 0.002) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (无藻, $n=4$); $(0.008 \pm 0.002) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (铜绿微囊藻, $n=4$); $(0.041 \pm 0.001) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (羊角月牙藻, $n=4$).

DIP 在沉积物及水系统中的归趋模式与 DTP 类似. 因此,基于藻类吸收利用和颗粒物质吸附对 DTP 贡献率的计算方法,DIP 的去向为:在无扰动状态下,铜绿微囊藻对 DIP 的吸收能力占 56%,羊角月牙藻约占 63%,略低于对 DTP 的吸收. 扰动状态下,铜绿微囊藻和羊角月牙藻对 DIP 的吸收利用均占 25%,明显低于对 DTP 的吸收. 其原因主要是颗粒物质更容易通过物理吸附模式捕获 DIP^[22,23],但这说明了藻类确实能够将颗粒态磷直接转化成溶解态磷而利用.

2.4 上覆水中 BAP 的变化

生物有效磷 (BAP) 由溶解性总磷 (DTP) 和可被生物利用颗粒态磷 (BAPP) 组成^[24,25]. 如图 5 所示,

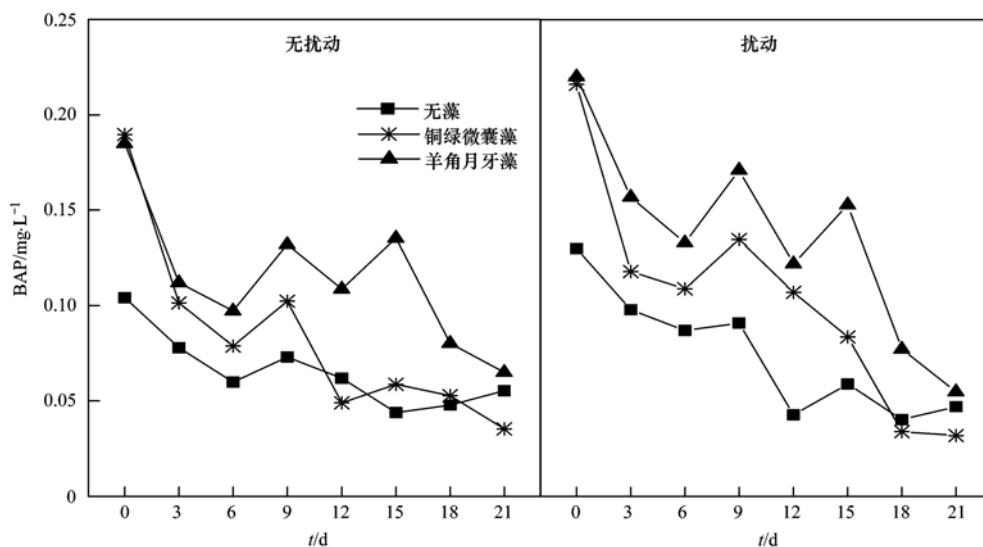


图 5 上覆水中 BAP 的变化规律

Fig. 5 Variation of BAP in the overlying water

无论扰动与否,不同藻类对上覆水中 BAP 有很大的影响.藻类可以通过“泵吸作用”吸收利用悬浮物和沉积物中的磷从而改变上覆水中溶解性磷的组成,进而影响上覆水中 BAP 的构成结构.

图 5 显示,无论扰动与否,上覆水中 BAP 均呈现下降趋势.无扰动状态下,在试验进行的 0 ~ 3d, BAP 发生迅速下降, BAP 分别下降了 $0.088 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (铜绿微囊藻)、 $0.174 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (羊角月牙藻).下降百分比分别为 46.6% (铜绿微囊藻)、60.8% (羊角月牙藻),下降量接近初始值的 50%.这是因为藻类在加入到反应器之处,不能很好地适应新的环境,导致藻类大量沉降和死亡^[26].但随着

藻类对新环境的适应, BAP 不再大量下降,而是缓慢降低并达到稳定状态.扰动状态下, BAP 同样呈现降低趋势,但下降速率稍显缓慢.无论扰动与否,羊角月牙藻试验组上覆水中 BAP 含量均高于铜绿微囊藻.其原因是羊角月牙藻对颗粒态磷上可被生物利用态磷的吸收能力低于铜绿微囊藻^[27,28].尽管无扰动下,羊角月牙藻对 DTP 的吸收能力强于铜绿微囊藻,但上覆水中 TP 含量明显处于较高水平 (图 2).

2.5 沉积物中磷赋存形态的变化规律

在藻类“泵吸作用”和扰动作用下,改变了沉积物中不同形态磷的数量分布规律 (图 6 和图 7).

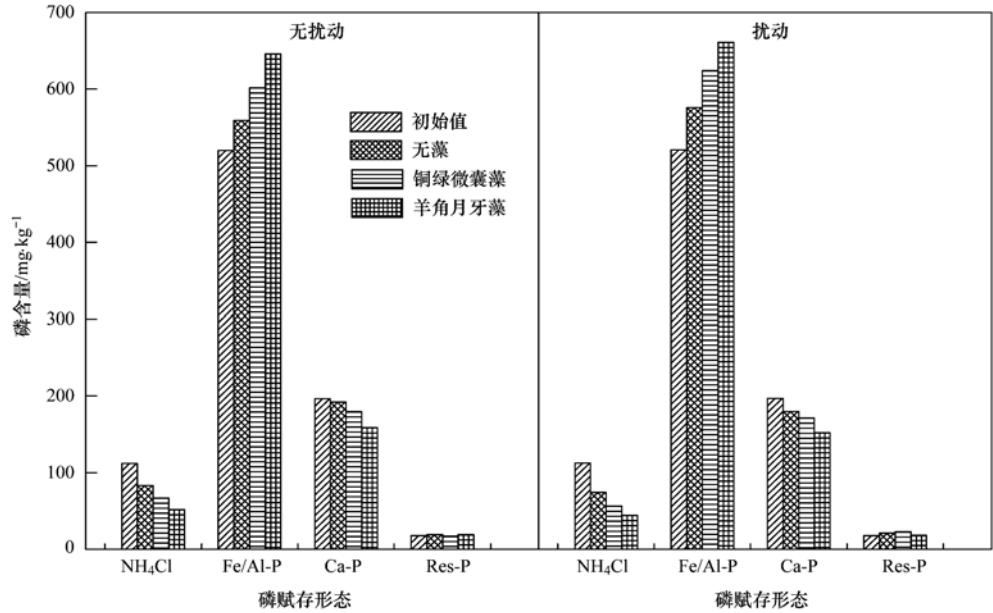


图 6 沉积物磷赋存形态数量分布

Fig. 6 Distributions of phosphorus forms in sediment

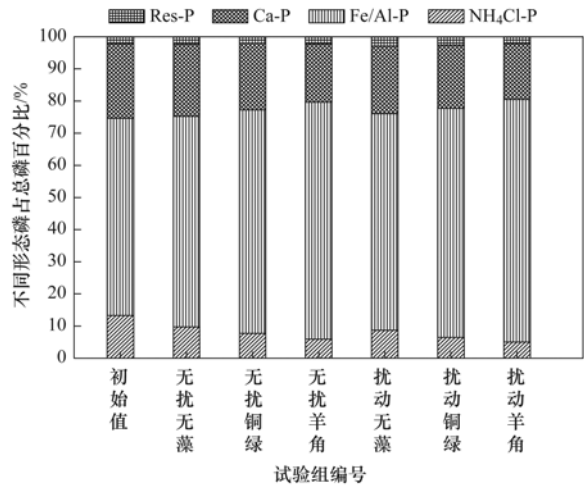


图 7 沉积物不同形态磷占总磷的百分比

Fig. 7 Percentage of different phosphorus forms of TP in the sediment

图 6 和图 7 显示,不同扰动状态下各试验组沉积物中不同形态磷数量分布规律明显不同.无论扰动与否,与初始值相比,各试验组沉积物中总磷 (Tot-P) 含量均增加.无扰动状态下沉积物中 Tot-P 增加量分别为 $7.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (无藻)、 $19.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (铜绿微囊藻) 和 $29.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (羊角月牙藻),高于扰动下的 $3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (无藻)、 $16.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (铜绿微囊藻) 和 $27.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (羊角月牙藻).无扰动下各试验组沉积物 Tot-P 净增加量均高于扰动.原因可能是扰动打破了藻类的聚集状态,藻细胞均匀地分散在上覆水中,使得单位面积里含有的藻细胞大大增加,这些藻细胞与扰动所产生的颗粒物质的接触几率也大大增加.从而促进了藻细胞吸收利用沉积物中所释放的磷,即藻类的“泵吸作用”增强.所以

扰动下沉积物中 Tot-P 净增加量减小. 这与图 2 上覆水中 TP 含量的变化相符合.

对于不同形态磷 ($\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 Fe/Al-P 、 Ca-P 和 Res-P) 而言, 各形态磷数量变化规律有所不同. 图 6 显示, 扰动与无扰动下沉积物中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 均发生降低, 并且按照无藻、铜绿微囊藻、羊角月牙藻的试验组顺序逐渐减小. $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 占总磷百分比的变化也证明了这一点 (图 7). 对比铜绿微囊藻和羊角月牙藻试验组, 发现加入羊角月牙藻试验组沉积物中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量净降低量大于加入铜绿微囊藻试验组. 扰动状态下, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量比无扰动低. 这与扰动产生大量悬浮颗粒物、增加藻类与颗粒物接触几率, 从而使藻类“泵吸作用”增强有关.

Fe/Al-P 变化规律与 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 恰好相反. 无扰动状态下, Fe/Al-P 含量随无藻、铜绿微囊藻、羊角月牙藻逐渐增加. 其占 Tot-P 的百分比也越来越高 (图 7). 究其原因, 一是沉积物中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 部分转化为 Fe/Al-P ; 二是沉积物中处于稳定状态的 Ca-P 由于藻类的“泵吸作用”而发生释放, 在释放到间隙水的过程中有一部分转化为 Fe/Al-P . 扰动状态下, Fe/Al-P 表现出与无扰动状态下相似的变化规律, 但是增加幅度较无扰动状态下更大. 与初始状态相比, Fe/Al-P 含量净增加幅度分别为 19.86% (铜绿微囊藻) 和 26.98% (羊角月牙藻), 高于无扰动下的 15.82% (铜绿微囊藻) 和 24.33% (羊角月牙藻). 而且扰动下 Fe/Al-P 占 Tot-P 的百分比也显示了相似的规律 (图 7). 扰动下 Fe/Al-P 占 Tot-P 的百分比分别为 71.34% (铜绿微囊藻) 和 75.47% (羊角月牙藻), 此值也高于无扰动下的 69.52% (铜绿微囊藻) 和 73.76% (羊角月牙藻). 由此可以推测扰动促进了 Fe/Al-P 的形成, 这与以往研究有相似之处^[29~31]. 除此之外, 在扰动状态下, Fe/Al-P 的形成与藻类的运动密切相关, 扰动后沉积物大量悬浮, 上覆水中颗粒物增多, 导致与藻类的摩擦碰撞几率增大. 虽然会对部分藻细胞有所损伤, 但是更多的是促进了其它形态的磷向 Fe/Al-P 的转化. 无论扰动与否, 加藻后 Fe/Al-P 含量均远高于无藻.

无论扰动与否, 与初始值相比, Ca-P 均有所下降 (图 6). 无扰动状态下, Ca-P 含量逐渐降低 (依次为无藻、铜绿微囊藻、羊角月牙藻). Ca-P 含量占 Tot-P 百分比也逐渐降低 (图 7). 无扰动下, 无藻试验组中 Ca-P 含量几乎不变. 加藻后, 在“泵吸作用”下, 难释放态的 Ca-P 部分转化为易释放态的磷, 比如 Fe/Al-P . Fe/Al-P 含量 (图 6) 及其占 Tot-P 百分

比 (图 7) 显著增加. 扰动下 Ca-P 含量也逐渐降低, 羊角月牙藻导致 Ca-P 的降低幅度大于铜绿微囊藻. 这是因为扰动使得羊角月牙藻细胞聚集状态破散, 藻细胞分散在水体中, 这加强了羊角月牙藻对沉积物中 Ca-P 的吸收利用. 对比两种扰动状态下 Ca-P 的降低幅度, 发现扰动下 Ca-P 含量降低幅度更大, 分别为 12.92% (铜绿微囊藻) 和 22.58% (羊角月牙藻). 大于无扰动下的 8.65% (铜绿微囊藻) 和 19.33% (羊角月牙藻).

至于 Res-P , 无论扰动与否, Res-P 均处于稳定状态. 并且, Res-P 占 Tot-P 的百分比也稳定在 2% 左右 (图 7).

3 结论

(1) 无论扰动与否, 上覆水中 TP、DTP、DIP、BAP 均呈降低趋势. 加藻条件下, 扰动导致 TP 水平明显高于无扰动, 但 DTP 和 DIP 低于无扰动.

(2) 扰动下, 铜绿微囊藻对 DTP 和 DIP 的吸收能力高于羊角月牙藻, 而无扰动下, 恰好相反.

(3) 在无扰动状态下, 铜绿微囊藻和羊角月牙藻对 DTP 和 DIP 的吸收能力均在 60% 左右; 而扰动状态下, 两者对 DTP 和 DIP 的吸收能力分别下降至 40% 和 25%.

(4) 在扰动和藻类双重作用下, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 Ca-P 发生释放; Fe/Al-P 有所升高. 与铜绿微囊藻相比, 羊角月牙藻更有利于 Ca-P 的释放和 Fe/Al-P 的形成.

参考文献:

- [1] 秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲, 等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用[J]. 科学通报, 2006, 51(16): 1857-1866.
- [2] 赵永宏, 邓祥征, 战金艳, 等. 我国湖泊富营养化防治与控制策略研究进展[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(3): 92-98.
- [3] 何淑英, 徐亚同, 胡宗泰, 等. 湖泊富营养化的产生机理及治理技术研究进展[J]. 上海化工, 2008, 32(2): 1-5.
- [4] 周培疆, 郑振华, 余振坤, 等. 普通小球藻生长与武汉东湖水体磷形态的相关研究[J]. 水生生物学报, 2001, 25(6): 571-576.
- [5] 田建茹, 周培疆, 付云, 等. 蛋白核小球藻生长与汉江水体磷形态相关性的研究[J]. 水生生物学报, 2008, 12(2): 276-279.
- [6] 温胜芳, 单保庆, 张洪. 巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究[J]. 环境科学, 2012, 33(7): 2322-2329.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Li D P, Huang Y. Phosphorus uptake by suspended sediments from a heavy eutrophic and standing water system in Suzhou, China[J]. Ecological Engineering, 2013, **60**: 29-36.
- [10] 陈俊, 李大鹏, 李勇, 等. 底泥扰动下藻类对不同形态磷在水体中分布的影响[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(9): 2787-2793.
- [11] 周毅, 石建华, 钱伟, 等. 太湖藻类分布及其对鱼类的毒性试验[J]. 江苏农业科学, 2013, **41**(4): 311-313.
- [12] 陈宇炜, 高锡云, 秦伯强. 西太湖北部夏季藻类种间关系的初步研究[J]. 湖泊科学, 1998, **10**(4): 35-40.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Qin B Q, Hu W P, Gao G, *et al.* Dynamics of sediment resuspension and the conceptual schema of nutrient release in the large shallow Lake Taihu, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, **49**(1): 54-64.
- [16] 周伟, 江成, 何义亮. 物理扰动对水库中铜绿微囊藻和月牙藻生长及竞争的影响[J]. 净水技术, 2013, **32**(5): 16-21.
- [17] Wallace B B, Bailey M C, Hamilton D P. Simulation of vertical position of buoyancy regulating *Microcystis aeruginosa* in a shallow eutrophic lake[J]. Aquatic Sciences, 2000, **62**(4): 320-333.
- [18] Hudnell H K, Jones C, Labisi B, *et al.* Freshwater harmful algal bloom (FHAB) suppression with solar powered circulation (SPQ)[J]. Harmful Algae, 2010, **9**(2): 208-217.
- [19] 江林燕, 江成, 周伟, 等. 水体扰动对铜绿微囊藻生长影响的规律及原因[J]. 环境化学, 2012, **31**(2): 216-220.
- [20] 张永生, 孔繁翔, 于洋, 等. 蓝藻伪空胞的特性及浮力调节机制[J]. 生态学报, 2010, **30**(18): 5077-5090.
- [21] 张强, 刘正文. 附着藻类对太湖沉积物磷释放的影响[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 930-934.
- [22] 李大鹏, 黄勇, 李伟光. 河道底泥再悬浮状态对磷平衡浓度的影响[J]. 中国环境科学, 2008, **28**(5): 476-480.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 陈卫民, 戴树桂, 张清敏. 铜绿微囊藻竞争机制的探讨[J]. 安全与环境学报, 2010, **10**(5): 73-77.
- [27] 吴重华, 王晓蓉, 孙昊. 羊角月芽藻的生长与湖水中几种磷形态关系模型的建立[J]. 环境化学, 1997, **16**(4): 341-347.
- [28] Lambert D, Maher W, Hogg L. Changes in phosphorus fractions during storage of lake water[J]. Water Research, 1992, **26**(5): 645-648.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Boström B, Andersen J M, Fleischer S, *et al.* Exchange of phosphorus across the sediment-water interface [J]. Hydrobiologia, 1988, **170**(1): 229-244.

CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013	ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, <i>et al.</i> (1179)
Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer	HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (1188)
Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing	ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1199)
Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing	SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} in Chongqing Urban Areas	LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, <i>et al.</i> (1219)
Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles	PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, <i>et al.</i> (1230)
Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen	HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, <i>et al.</i> (1240)
Monitoring Atmospheric CO ₂ and δ ¹³ C(CO ₂) Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China	XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, <i>et al.</i> (1248)
Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period	LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, <i>et al.</i> (1256)
Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water	LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)
Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing	CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-ying, <i>et al.</i> (1272)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China	WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, <i>et al.</i> (1279)
Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS	LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, <i>et al.</i> (1287)
Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island	ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, <i>et al.</i> (1295)
Heavy Metals Accumulation in the Caoheidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility	XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, <i>et al.</i> (1306)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan	LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, <i>et al.</i> (1313)
GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province	LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, <i>et al.</i> (1321)
Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City	LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, <i>et al.</i> (1330)
Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China	ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (1337)
Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang	WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, <i>et al.</i> (1345)
Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan	FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, <i>et al.</i> (1353)
Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City	CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)
Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments	MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, <i>et al.</i> (1371)
Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing	ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, <i>et al.</i> (1379)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China	QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, <i>et al.</i> (1389)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay	HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, <i>et al.</i> (1397)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu	GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (1404)
Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae	CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1413)
Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus	GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)
Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water	ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1427)
Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process	WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, <i>et al.</i> (1437)
Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide	LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, <i>et al.</i> (1444)
Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing	QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (1451)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants	NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, <i>et al.</i> (1460)
Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (1467)
Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (1472)
Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron	WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1478)
Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter	HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, <i>et al.</i> (1485)
Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source	YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (1492)
Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System	XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1499)
Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppes	CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)
Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin	GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, <i>et al.</i> (1516)
Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution	LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, <i>et al.</i> (1523)
Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with <i>Iris pseudacorus</i> L. and the Metabolic Analysis in Roots	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)
Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors	LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, <i>et al.</i> (1539)
Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains	FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, <i>et al.</i> (1546)
Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis	DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, <i>et al.</i> (1553)
Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, <i>et al.</i> (1562)
Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of <i>Vicia-faba</i> and Garlic	WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, <i>et al.</i> (1568)
Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles	LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)
Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources; Method Proposed and Case Demonstration	LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (1584)

《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)

2016年4月15日 第37卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 4 Apr. 15, 2016

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