

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第1期

Vol.36 No.1

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

2013年夏季典型光化学污染过程中长三角典型城市O ₃ 来源识别	李浩, 李莉, 黄成, 安静宇, 严茹莎, 黄海英, 王杨君, 卢清, 王倩, 楼晟荣, 王红丽, 周敏, 陶士康, 乔利平, 陈明华(1)
厦门冬春季大气VOCs的污染特征及臭氧生成潜势	徐慧, 张晗, 邢振雨, 邓君俊(11)
近10年海南岛大气NO ₂ 的时空变化及污染物来源解析	符传博, 陈有龙, 丹利, 唐家翔(18)
稻草烟尘中有机碳/元素碳及水溶性离子的组成	洪蕾, 刘刚, 杨孟, 徐慧, 李久海, 陈惠雨, 黄柯, 杨伟宗, 吴丹(25)
气相色谱-脉冲氦离子化检测法(GC-PDHD)分析大气中分子氢(H ₂)浓度	栾天, 方双喜, 周凌晔, 王红阳, 张根(34)
小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站pCO ₂ 特征及扩散通量	张永领, 杨小林, 张东(40)
夏季中国东海生源有机硫化物的分布及其影响因素研究	李江萍, 张洪海, 杨桂朋(49)
基于Landsat 8影像估算新安江水库总悬浮物浓度	张毅博, 张运林, 查勇, 施坤, 周永强, 王明珠(56)
温瑞塘河流域水体污染时空分异特征及污染源识别	马小雪, 王腊春, 廖玲玲(64)
人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例	于爽, 孙平安, 杜文越, 何师意, 李瑞(72)
太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究	汪明, 武晓飞, 李大鹏, 李祥, 黄勇(80)
鄱阳湖沉积物可转化态氮分布特征及其对江湖关系变化的响应	沈洪艳, 张绵绵, 倪兆奎, 王圣瑞(87)
影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析	李艳利, 李艳粉, 徐宗学(94)
水华生消过程对巢湖沉积物微生物群落结构的影响	刁晓君, 李一葳, 王曙光(107)
蓝藻水华聚集对水葫芦生理生态的影响	吴婷婷, 刘国锋, 韩士群, 周庆, 唐婉莹(114)
汞在小浪底水库的赋存形态及其时空变化	程柳, 毛宇翔, 麻冰涓, 王梅(121)
三峡库区典型农田小流域土壤汞的空间分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇, 余亚伟(130)
三峡库区农林复合小流域水体汞的时空变化特征	赵铮, 王娅, 木志坚, 王定勇(136)
环境条件对三峡库区消落带土壤中邻苯二甲酸二丁酯向上覆水静态迁移释放的影响	宋娇艳, 木志坚, 王强, 杨志丹, 王法(143)
三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征	高洁, 江韬, 李璐璐, 陈雪霜, 魏世强, 王定勇, 闫金龙, 赵铮(151)
舟山渔场有色溶解有机物(CDOM)的三维荧光-平行因子分析	周倩倩, 苏荣国, 白莹, 张传松, 石晓勇(163)
太原市小店污灌区地下水中多环芳烃与有机氯农药污染特征及分布规律	李佳乐, 张彩香, 王焰新, 廖小平, 姚林林, 刘敏, 徐亮(172)
厦门杏林湾水系表层沉积物中PAHs分析与风险评估	程启明, 黄青, 廖祯妮, 苏丽, 刘兴强, 唐剑锋(179)
两种不同的地下水污染风险评价体系对比分析: 以北京市平原区为例	王红娜, 何江涛, 马文洁, 许真(186)
大冶湖滨岸带重金属水-土迁移特征与风险评价	张家泉, 李秀, 张全发, 李琼, 肖文胜, 王永奎, 张建春, 盖希光(194)
铁盐絮凝法从阳宗海湖水中除砷研究与现场扩大试验	陈景, 张曙, 杨项军, 黄章杰, 王世雄, 王莞, 韦群燕, 张艮林, 肖军(202)
铋银氧化物混合物高效氧化降解四溴双酚A的研究	陈满堂, 宋洲, 王楠, 丁耀彬, 廖海星, 朱丽华(209)
一种纳米级不定形碳对水中四环素的吸附研究	吴亦潇, 李爱民, 汪的华, 张维昊(215)
磁性壳聚糖衍生物对阴离子染料的吸附行为	张聪璐, 胡筱敏, 赵研, 苏雷(221)
腐殖酸-高岭土复合体形成机制及对三氯乙烯的吸附	朱晓婧, 何江涛, 苏思慧(227)
降温过程对ANAMMOX工艺城市污水处理系统中微生物群落的影响	赵志瑞, 苗志加, 李铎, 崔丙健, 万敬敏, 马斌, 白志辉, 张洪勋(237)
FISH-NanoSIMS技术在环境微生物生态学上的应用研究	陈晨, 柏耀辉, 梁金松, 袁林江(244)
微囊藻毒素-LR对恶臭假单胞菌细胞活性和表面特性的影响	邓庭进, 叶锦韶, 彭辉, 刘芷辰, 刘则华, 尹华, 陈烁娜(252)
微生物除臭剂的筛选、复配及其除臭条件的优化	曾苏, 李南华, 盛洪产, 贺琨, 胡子全(259)
舟山青浜岛水体及海产品中有机氯农药的分布和富集特征	张泽洲, 邢新丽, 顾延生, 桂福坤, 祁士华, 黄焕芳, 瞿程凯, 张莉(266)
四川凉山藏彝青少年头发中多氯联苯污染水平的研究	周莹, 孙一鸣, 金军, 雷建容, 秦贵平, 何雪珠, 林允静(274)
铜、毒死蜱单一与复合暴露对蚯蚓的毒性作用	徐冬梅, 王彦华, 王楠, 饶桂维(280)
外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响	熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 谢文文, 陈蓉, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体(286)
厦门市道路灰尘中铂族元素的污染特征	洪振宇, 洪有为, 尹丽倩, 陈进生, 陈衍婷, 徐玲玲(295)
洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素	商靖敏, 罗维, 吴光红, 徐兰, 高佳佳, 孔佩儒, 毕翔, 程志刚(301)
不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究	吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 吕宏虹, 苏翠翠, 孔德超(309)
畜禽粪便有机肥中Cu、Zn在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化	商和平, 李洋, 张涛, 苏德纯(314)
华南某市生活垃圾组成特征分析	张海龙, 李祥平, 齐剑英, 陈永亨, 方建德(325)
生物沥浸耦合类Fenton氧化调理城市污泥	刘昌庚, 张盼月, 蒋娇娇, 曾成华, 黄毅, 徐国印(333)
基于平面波导型荧光免疫传感器的双酚A检测适用性研究	徐玮琦, 张永明, 周小红, 施汉昌(338)
一种新型“Turn-on”荧光探针用于硫化氢可视化检测	刘春霞, 马兴, 魏国华, 杜宇国(343)
典型黄土区油松树干液流变化特征分析	张涵丹, 卫伟, 陈利顶, 于洋, 杨磊, 贾福岩(349)
利用巨藻发酵产氢气与挥发性有机酸的研究	赵晓娟, 范晓蕾, 郭荣波, 薛志欣, 杨智满, 袁宪正, 邱艳玲(357)
人工纳米颗粒在水体中的行为及其对浮游植物的影响	李曼璐, 姜玥璐(365)
《环境科学》征订启事(251) 《环境科学》征稿简则(294) 信息(236, 243, 273, 300)	

太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究

汪明, 武晓飞, 李大鹏*, 李祥, 黄勇

(苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215009)

摘要:以太湖梅梁湾为研究对象, 2013年对水体中不同形态磷和藻类进行了逐月观测, 探讨了风浪扰动和藻类生长双重影响条件下不同形态磷间转化规律以及藻类生长和不同形态磷含量间的内在联系。结果表明, 梅梁湾水体中总磷(TP)、颗粒态磷(PP)、溶解性总磷(DTP)、溶解性磷酸盐(DIP)和生物有效磷(BAP)均呈现出“夏秋高”、“冬春低”的周年变化规律, 藻类生长也呈现了类似规律, 而溶解性有机磷(DOP)和可被生物利用颗粒态磷(BAPP)的变化规律并不规则。颗粒态磷生物有效性(BAPP/PP)在6~10月期间仅为12.75%, 显著低于年度平均值37.14%。这可归因于沉积物频繁扰动下内源磷固定效应以及藻类生物吸收作用加快了颗粒态磷向溶解态磷的转化。在此期间, DTP占BAP的质量分数高达69.33%(平均值), 明显高于BAPP(30.67%, 平均值), 也高于DTP的周年平均值(56.63%), 其也是藻类生长旺盛季节。

关键词:生物有效磷; 可被生物利用颗粒态磷; 内源磷; 叶绿素a; 太湖

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)01-0080-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.01.011

Annual Variation of Different Phosphorus Forms and Response of Algae Growth in Meiliang Bay of Taihu Lake

WANG Ming, WU Xiao-fei, LI Da-peng*, LI Xiang, HUANG Yong

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

Abstract: Based on the monthly investigations of different forms of phosphorus (P) and algae growth from January to December 2013 in Meiliang bay of Taihu Lake, the transformation of different P forms and the relationship between different P forms and algae growth was investigated under the dual conditions of disturbance due to wind and wave and algae growth. Results of the total P (TP), particulate P (PP), dissolved total P (DTP), dissolved inorganic P (DIP) and bioavailable P (BAP) showed that the monthly concentrations reached the maximum in summer and autumn while the minimum in winter and spring. In addition, the algae growth showed the same trends as above. However, no variation was found in the dissolved organic P (DOP) and bioavailable particulate P (BAPP). The bioavailability of PP was only 12.75% from June to October, which was obviously lower than the annual mean (37.14%). It was attributed to the acceleration on the transformation of PP to DTP due to the immobilization of sedimentary P under sediment disturbance and algae adsorption. The percentage of DTP in BAP was up to 69.33% (average), which was obviously higher than the percentage of bioavailable PP (30.66%, average) and the annual mean (56.63%) of DTP during the interval. In addition, the algae bloom appeared in the interval.

Key words: biological available phosphorus; bioavailable particulate phosphorus; sedimentary phosphorus; chlorophyll a; Taihu Lake

梅梁湾系太湖北部的一个湖湾, 位于无锡市中心西南10 km处, 面积129.3 km², 占太湖总面积的5.5%。梅梁湾无水草生长, 属于典型藻类湖区。近些年, 梅梁湾在夏季会暴发蓝藻水华。梅梁湾作为无锡市主要水源地和著名的风景区, 水华的暴发严重影响了当地的经济发展和市民的生活。

磷是水体中藻类生长的限制性因素^[1,2]。但是, 并非所有的磷均可以被藻类利用^[3]。其中, 溶解性总磷(DTP)和可被生物利用颗粒态磷(BAPP)均可以被藻类利用, 且前者要较后者被藻类优先利用^[4]。因此, 水体中DTP和BAPP含量均被视为水体藻类生长的风向标。然而, 研究发现^[4], DTP与BAPP之间会发生相互转化, 但主要取决于颗粒态磷的生物有效性, 即颗粒物上不同赋存形态磷的数量分布规律。对于经常发生沉积物悬浮的水体而

言, 这种转化愈加明显^[5], 即DTP会转化成BAPP。但由于BAPP须转化成DTP后方可被藻类利用, 从而降低了水体中可被生物利用态磷含量, 有望抑制藻类水华的发生。此外, 李大鹏等^[6]研究表明, 沉积物扰动通过改变颗粒物上内源磷分布规律, 将会影响到下一次扰动时内源磷的迁移转化。但也有研究表明^[7~9], 沉积物悬浮会加快内源磷的释放, 使得BAPP向DTP转化, 从而促进水体中藻类生长。目前有关沉积物扰动对水体中不同形态磷含量及其相互转化规律仍存在争议, 进而对藻类的影响也尚无

收稿日期: 2014-06-04; 修订日期: 2014-08-12

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: 汪明(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水体修复, E-mail: andy5147@126.com

* 通讯联系人, E-mail: ustsldp@163.com

定论. 另外,上述研究均以实验室实验为主,而未从实际水体的角度进行研究,可能忽视了部分环境因素对上述规律的综合影响.

因此,本研究选择经常发生沉积物悬浮的太湖梅梁湾为对象,通过按月采样分析水体中不同形态磷数量分布的周年变化规律,拟阐明沉积物扰动之间对内源磷释放的影响,并检测水体中叶绿素 a 含量,进而探讨不同形态磷与叶绿素 a 之间的内在联系,以期经常发生沉积物悬浮的水体富营养化防治提供数据支持和理论依据.

1 材料与方法

1.1 上覆水的采集

实验用的水样于 2013 年的每个月的月底采集. 3 个采样点为 1 (N31°31'33.6", E120°12'32.4"), 2 (N31°31'30.10", E120°10'57.1"), 3 (N31°30'11.10", E120°12'33.30"). 用便携式溶氧仪现场测定水下 0.5 m 处的溶解氧浓度 (DO), 并且用有机玻璃采水器采集 3 个采样点 0.5 m 处的表层水, 每个采样点采集 1 L 的水样, 密封后用冰盒 (4℃) 保存, 随后立即运回实验室, 测定其中的叶绿素 a、pH、TP、DTP、DIP 以及 BAP 等.

1.2 分析方法

上覆水中总磷 (TP) 是将水样用过硫酸钾消解后钼锑抗分光光度法测定 (美国 HACH DR2800 分光光度计); 溶解性总磷 (DTP) 是将水样经过 0.45 μm 滤膜过滤后的滤液消解后测定; 溶解性磷酸盐 (DIP) 是将水样经过 0.45 μm 滤膜过滤后直接测定; 溶解性有机磷 (DOP) 为 DTP 与 DIP 差值; 颗粒态磷 (PP) 为 TP 与 DTP 差值.

BAP 的计算参照 Ellison 等^[4]的研究结果, 实验中所用的藻为铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*), 将藻在无磷 BG11 (Bull-Green Medium) 培养基中“饥饿”培养 9~12 d, 供实验所用. 取 30 mL 水样放

入 125 mL 锥形瓶中, 灭菌 15 min 后加入适量的经“饥饿”培养的藻液, 使得加入藻后水样中藻类数量约为 $1 \times 10^3 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$, 每个水样有 3 个平行样. 在温度为 $24^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, 光照度为 2 000 lx, 亮暗比为 14 h : 10 h 条件下培养, 每天早中晚各摇动一次, 于 14 d 取样测定上覆水中叶绿素 a 含量. 同时分别用不同已知磷浓度来培养饥饿藻类, 14 d 后测定上覆水中叶绿素 a 含量, 通过拟合曲线, 得出水样中 BAP 含量公式. BAPP 为 BAP 与 DTP 的差值.

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. 叶绿素 a 含量的测定采用德国进口的 water Pam s/n edee0225 叶绿素仪.

2 结果与讨论

2.1 水体中 DO 和 pH 的变化规律

由于藻类的生长和死亡以及风浪的频繁扰动, 上覆水的性质 (DO、pH、藻类等) 将会发生显著改变 (图 1). 并且, 藻类代谢可以通过改变环境条件 (如 DO 和 pH 等) 引发沉积物中磷的释放^[10].

图 1(a) 显示, 梅梁湾水体中溶解氧的周年变化呈“U 型”分布. 在 5~7 月, DO 出现了极小值, 随后增加. 水体中 DO 含量与沉积物扰动、藻类繁殖密切相关. 通常水体中藻类大量繁殖时 (夏季), 水体中 DO 浓度也会显著增加, 但本研究却呈现了相反结果. 其原因可能是水体中溶解氧的浓度与水温有关. 另外, 也可能与梅梁湾夏季频繁的沉积物扰动有关. 沉积物扰动导致水体中中小颗粒物含量显著增加, 增加了耗氧量, 致使藻类释放的溶解氧主要用于还原物质的氧化^[11]. 另外, 夏季水体中浮游动物以及微生物数量、活性增加, 其产生的呼吸作用也会导致溶解氧含量的降低^[12]. pH 的变化呈波浪态, 在 7.4~8.6 之间波动 [图 1(b)]. 随着藻类数量增加, pH 值呈增加的趋势. 并且, 有研究表明, pH

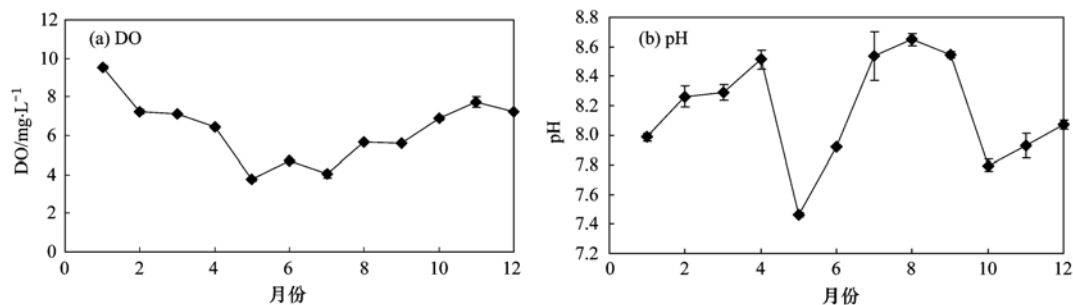


图 1 梅梁湾上覆水中 DO 和 pH 的周年变化规律

Fig. 1 Annual variation of DO and pH in the overlying water of Meiliang Bay

升高有利于内源磷的释放^[12,13],从而为藻类生长提供磷源。

2.2 叶绿素 a 周年动态

叶绿素 a 含量的高低与水体藻的种类、数量、水质有密切关系,所以叶绿素 a 含量的测定在一定程度上能反映水质状况^[14]。水温是影响藻类繁殖的关键因素^[15],夏季也就成为了藻类暴发水华的主要时间^[16](图 2)。图 2 显示,叶绿素 a 呈现先升高后降低的趋势,6~8 月的含量比较高,其中 7 月达到最大值 $36.9 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。叶绿素 a 的变化趋势主要与季节有关。前几个月叶绿素 a 呈现缓慢上升趋势,主要是由于气温渐渐回暖,使得水体温度渐渐适宜藻类的生长。但前几个月叶绿素 a 是波动型上升,这可能与 3 个点的水文动力条件有关^[15](6 月的误差线跨度很大说明了这点),还可能是由于风速风向导致采样点的藻类在风浪的作用下随水流漂移到别处^[17],另外也有可能是风浪造成水体沉积物悬浮导致水体透明度降低^[18],从而藻类光合作用降低,使得藻类生长受到抑制。随后几个月叶绿素含量的下降主要是因为气温下降不适宜藻类生长。另外,风场作用引起梅梁湾和大太湖之间的水量交换^[19],也可能降低藻类的生物量。因此,本研究在一定程度上也可以反映出梅梁湾整体藻类的周年变化情况。

2.3 水体中各形态磷周年动态分析

水体中不同形态磷含量与沉积物扰动密切相关^[20],尤其是总磷与颗粒态磷(图 3)。图 3 显示,TP 与 PP 的变化趋势一致。TP 和 PP 在 4 月出现了极大值($0.330 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.304 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),在 7 月出现了最大值($0.770 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.720 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。最小值则出现在 12 月($0.051 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.025 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),而在其他相邻月份如 11、1、2、3 月,TP 和 PP 含量均处于较低水平。由于梅梁湾处于典型的敞水区,使得风浪扰动对水体中 PP 的影响极为重要。通过

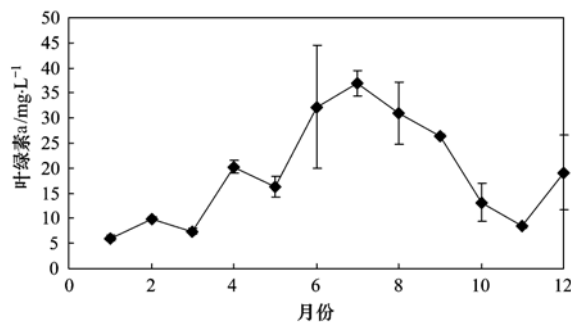


图 2 梅梁湾上覆水中叶绿素 a 的周年变化规律

Fig. 2 Annual variation of chlorophyll a in the overlying water of Meiliang Bay

计算可知,一年内 PP 占 TP 的(质量分数,下同)平均值为 73.27% (50.30% ~ 92.5%)。说明 TP 的主要组成部分为 PP。这与太湖梅梁湾沉积物悬浮频繁的实际情况相符。但是,由于 PP 并不能完全被浮游生物利用,而仅仅易于释放部分(BAPP)能被浮游生物利用。这取决于颗粒态磷生物有效性的变化情况。李大鹏等研究发现^[21],沉积物扰动后,会降低颗粒态磷生物有效性(BAPP/PP)。这在本研究中也得到了证实(图 4)。

图 4 显示,梅梁湾水体中颗粒态磷生物有效性的周年变化近似“U”型分布。在沉积物悬浮频繁的夏季,颗粒态磷生物有效性较低。其原因可能有二:一是水温升高,沉积物扰动频繁,致使水体以及随悬浮物进入水体的中小分子量的有机物被氧化殆尽[图 1(a)中 DO 含量的降低暗示了此过程的发生],从而使得悬浮物中的金属离子以氧化态存在,强化了对所吸附磷的固定作用^[22],进而降低了颗粒态磷生物有效性;二是 BAPP 与 DTP[图 5(a)]间的相互转化的存在。如果将同期的 BAPP/PP 比值与 DTP 相对照可以发现,在 DTP 含量较高的时间,BAPP/PP 均较低。证实了扰动状态下两者间的相互转化。考虑到 DTP 的周年变化,其在沉积物扰动最为强烈的 4、6、7 月时,DTP 均未达到最大值,而是

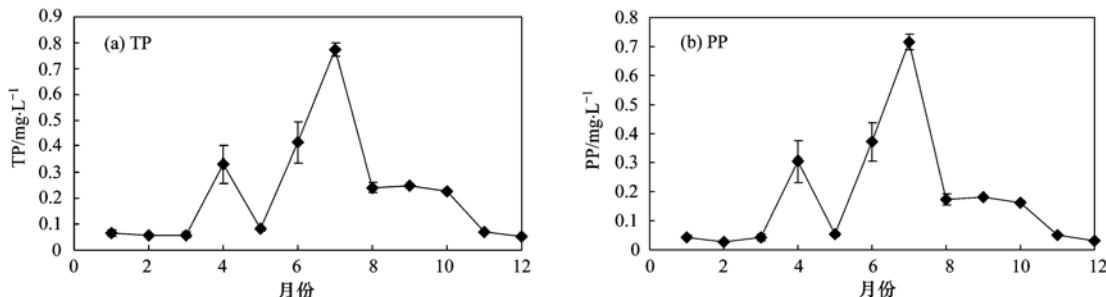


图 3 梅梁湾上覆水中 TP 和 PP 的周年变化规律

Fig. 3 Annual variation of TP and PP in the overlying water of Meiliang Bay

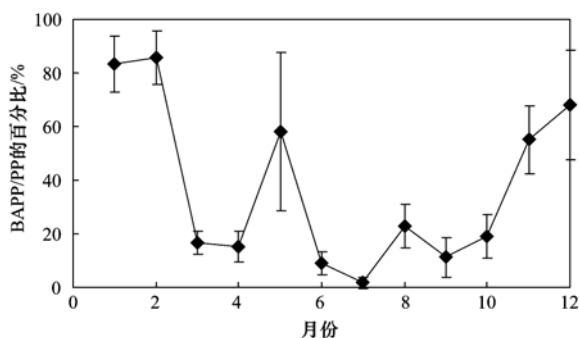


图4 梅梁湾颗粒态磷生物有效性的周年变化规律

Fig. 4 Annual variation of PP bioavailability of Meiliang Bay

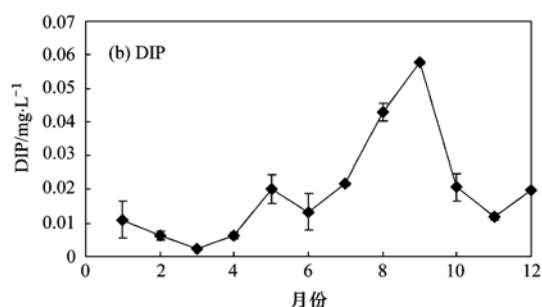
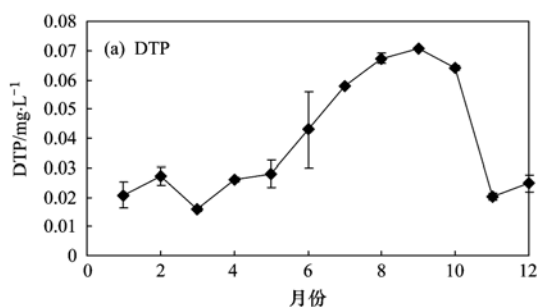


图5 梅梁湾上覆水中DTP和DIP的周年变化规律

Fig. 5 Annual variation of DTP and DIP in the overlying water of Meiliang Bay

研究中也指出了藻类吸附对水体中溶解态磷消失的重要性。另外,即使是在扰动最强烈的那几个月后的静风期,沉积物中的营养盐也存在着靠浓度梯度释放的静态释放,这会在一定程度上造成DTP的持续增加。

图5显示,DTP与DIP的变化规律近似一致,均分别在3月出现最小值($0.016 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.002 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),在9月出现最大值($0.071 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.058 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),即从3~9月呈明显的增加趋势。这与太湖流域藻类大量繁殖的时间相符。本研究中,在藻类繁殖量最大的7月,DIP($0.022 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)接近平均水平($0.019 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。这主要是由于藻类的吸收,致使水体中DIP含量降低。与2~4月相比,水体中出现了极低值($0.005 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。其原因与悬浮颗粒物对DIP的捕捉和吸附^[26,27]以及缺少藻类“泵吸”作用^[11]有关。然而,在同期,水体中DOP含量却并非处于极低水平,而是接近DOP的周年平均值($0.019 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。其可能源于上一年度藻类残体的矿化过程。

计算可知(图6),DIP在DTP中所占比例为45.5%(平均值),略低于DOP所占比例。这与梅梁湾沉积物表层累积的大量藻类残体的实际情况相符。在沉积物扰动、温度升高、溶解氧融

在随后的时间呈逐渐增加的趋势。这可归因于扰动期间悬浮的颗粒物对DTP的捕捉和吸附^[23,24]以及藻类“泵吸”作用^[11]下的相互平衡。笔者推测,在藻类大量繁殖的季节,藻类“泵吸”作用起到决定性作用。当沉积物扰动时,颗粒物质和藻类会对水体中溶解态磷产生竞争吸附,当扰动停止后,颗粒态磷的“滞后性”释放以及藻类“泵吸”作用致使BAPP含量降低,从而加快了颗粒态磷向溶解态磷的转化;相反,由于缺少了藻类的生物吸附,使得水体中DTP以颗粒物质的物理性和化学性吸附为主,致使颗粒态磷生物有效性增加。Cyr等^[25]在有关沉积物扰动

入条件下,藻类残体矿化,部分转化成DOP^[28,29]而被浮游生物再次利用。但是,在周年变化中,DOP来源于沉积物的内源释放和藻类残体的矿化转化各占多少比例还有待进一步研究。但毫无疑问,梅梁湾沉积物悬浮频繁将会加快DOP的形成速率^[6]。这也说明,尽管DOP中仅有部分可以被浮游生物利用,但其对水体富营养化的贡献可能不低于DIP。

图6显示,尽管DIP占DTP的百分比出现了几次波动,但总体趋势为逐渐增加。DIP占DTP的百分比分别在2~4、6、10月出现了极低值。尽管这3次极低值均处于同一水平,但DIP浓度却呈逐渐增加的趋势,且后2次明显高于第1次(2~4月)。这

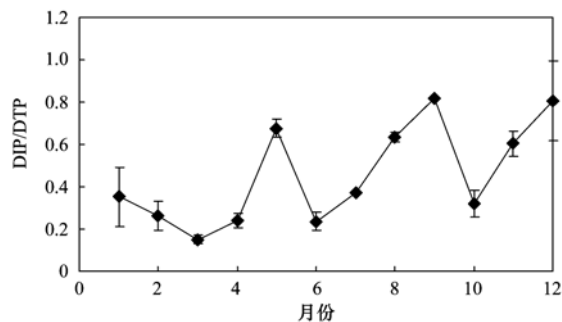


图6 梅梁湾DIP占DTP的百分比的周年变化规律

Fig. 6 Annual variation of percentage of DIP in DTP of Meiliang Bay

暗示了3次极低值产生的原因与DIP和DOP的含量密切相关.在2~4月,由于水温较低,DOP的形成速率受到影响,其主要来源于沉积物的内源释放,而释放的DIP又被颗粒物吸附导致含量较低,从而说明在水温较低季节,颗粒物对DIP的物理性吸附和化学性吸附占主导地位.在6月和10月,随着水温升高,藻类残体矿化加快,导致DOP含量快速增加,且其增加速率要高于DIP.这主要是由于

颗粒物质的捕捉吸附和藻类的生物吸附所致,但生物吸附作用似乎更强一些.

2.4 水体中生物有效磷周年动态分析

藻类的生长与水体中生物有效磷具有较为密切的关系^[30,31].沉积物扰动以及藻类吸收等因素影响着水体中BAP的数量分布规律[图7(a)],而BAP是由DTP[图5(a)]和BAPP[图7(b)]组成的,因此,两者的变化规律对BAP将会产生重要影响.

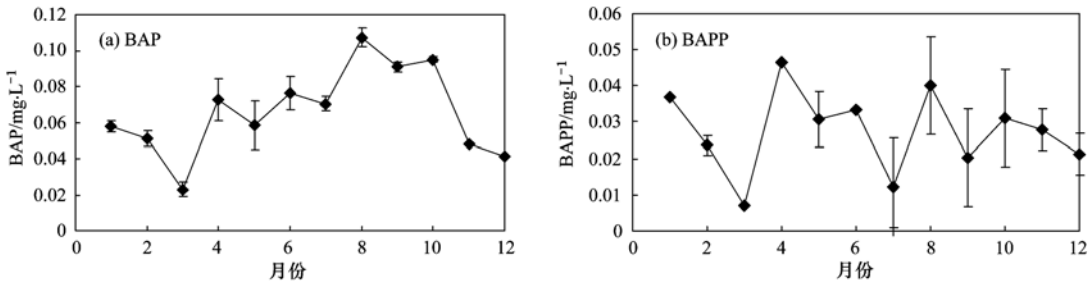


图7 梅梁湾上覆水中BAP和BAPP的周年变化规律

Fig. 7 Annual variation of BAP and BAPP in the overlying water of Meiliang Bay

图7(a)显示,BAP的变化规律与DTP基本一致.在3月出现最低值($0.023\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),随后一直保持增加趋势,直到8月($0.107\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),尽管在9月和10月略有降低,但仍然保持在明显高于其它月份的水平.从图7(b)可以看出,BAPP则在3月出现最低值($0.007\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),并在4月份达到最大值($0.047\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),然后保持较为平缓的降低趋势.对比DTP和BAPP占BAP的百分比可以发现,在周年变化中,前者(56.63%)高于后者(43.37%),说明DTP对BAP的影响起决定作用.如果按月计算则发现,在6~10月期间,DTP占BAP的百分比(69.33%,平均值)明显高于BAPP(30.67%,平均值),这一数值也高于DTP的周年平均值(56.63%).导致出现这一现象的主要原因是在藻类大量繁殖作用下,由于生物吸附作用,促使颗粒态磷向溶解态磷的转化^[9].从图4中也

可以看出,在此期间,颗粒态磷生物有效性明显降低,其平均值仅为12.75%,显著低于周年平均值(37.14%).沉积物悬浮因增加了颗粒物与藻类的接触几率,从而有加快颗粒态磷向溶解态磷转化的趋势.但是,沉积物悬浮导致内源磷固定,可能也是一个降低颗粒态磷生物有效性的原因,两者间是怎样的1个平衡还有待进一步研究.另外,在6~10月期间,因藻类残体的矿化作用而导致DOP增加也不能被忽视.在此期间,DOP平均值($0.029\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)明显高于周年平均值($0.018\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

2.5 藻类生长对不同形态磷的响应分析

磷是藻类生长的限制性因素,但藻类对不同形态磷的利用程度不同,本文采用相关分析研究了太湖梅梁湾藻类与上覆水中不同形态磷周年动态间的内在联系(表1).

表1 叶绿素a与其他各指标间的相关性

Table 1 Correlation between chlorophyll a and other parameters

	chlorophyll a	TP	DTP	DIP	PP	BAP
chlorophyll a	1					
TP	0.817	1				
DTP	0.673	0.561	1			
DIP	0.536	0.176	0.765	1		
PP	0.792	0.996	0.489	0.107	1	
BAP	0.302	0.549	0.036	-0.307	0.575	1

表1显示,在太湖梅梁湾水体中,藻类生长与TP、PP、DTP、DIP含量显著相关.藻类生长与DIP

的相关性低于DTP,也说明了DOP在某些情况下会被藻类利用,但DIP仍然会被优先利用.而PP的相

关性又高于 DTP,则进一步说明 BAPP 对藻类生长也较为重要。尽管 DTP 和 BAPP 对藻类生长都极为重要,但两者之和(BAP)却与藻类生长相关性不大,这令人疑惑。

本研究中检测 BAP 时采用铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)作为目标藻类。而在太湖梅梁湾中,浮游植物群落(藻类)呈现明显的季节性演替规律^[32],该种属仅在 7~9 月为优势种群。在其它季节,优势种群分别是隐藻属、小环藻属和细丝藻属^[33]。其它优势种群的群落特点、生物习性等与铜绿微囊藻有所不同,从而致使对 BAP 利用程度有所不同。另外,梅梁湾是一个开放水体,在风向和湖流作用下,梅梁湾包含了其他水域所交换来的藻类,或者本水域产生的藻类被湖流带走^[34]。并且,在调查的水域中藻类在夏秋季节大量繁殖(图 2),吸收水体中的 BAP,导致水体中 BAP 与叶绿素 a 的相关性较差^[35]。此外,风浪扰动频繁可能也是一个重要原因。由于风浪扰动,致使水体悬浮物浓度升高,透明度降低,光衰性较强^[18]。这均会影响藻类生长,并导致群落演替。沉积物悬浮不仅通过降低光透过率而影响藻类的生长,而且也会通过对溶解性磷的捕捉和吸附与藻类的生物吸附产生竞争。藻类会优先利用水体中的溶解性磷,只有当水体中溶解性磷含量不能满足藻类生长需要时,颗粒态磷才会发生转化来增加水体中溶解性磷含量^[36]。因此,藻类生长对 DTP 和 BAPP 的利用是不同步的,前者可直接促进藻类生长,但后者仅是潜在磷源。

3 结论

(1) 2013 年 1~12 月周年内梅梁湾总磷、颗粒态磷、溶解性总磷、溶解性磷酸盐和生物有效磷均呈现出“夏秋高”、“冬春低”的趋势。藻类生物量也显示了类似的规律,而溶解氧则显示了相反的规律。

(2) 在风浪扰动和藻类生长的双重作用下,溶解性总磷和可被生物利用颗粒态磷间呈现了相互转化的趋势。

参考文献:

- [1] Palomo L, Clavero V, Izquierdo J J, *et al.* Influence of macrophytes on sediment phosphorus accumulation in a eutrophic estuary(Pamones River, Southern Spain) [J]. *Aquatic Botany*, 2004, **80**(2): 103-113.
- [2] Edlund G, Carman R. Distribution and diagenesis of organic and inorganic phosphorus in sediments of the Baltic proper [J]. *Chemosphere*, 2001, **45**(6-7): 1053-1061.
- [3] 黄清辉,王子健. 淡水环境磷的生物有效性评估方法的发展

动态[J]. *安全与环境学报*, 2006, **6**(3): 132-136.

- [4] 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.
- [5] 李大鹏,黄勇,范成新. 沉积物悬浮频率对水体颗粒态磷生物有效性的影响[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(10): 2217-2222.
- [6] 李大鹏,黄勇,范成新. 不同扰动方式对底泥/水系统中生物有效磷的影响[J]. *安全与环境学报*, 2011, **11**(2): 24-27.
- [7] 朱广伟,秦伯强,高光. 风浪扰动引起大型浅水湖泊内源磷暴发性释放的直接证据[J]. *科学通报*, 2005, **50**(1): 66-71.
- [8] 秦伯强,范成新. 大型浅水湖泊内源营养盐释放的概念性模式探讨[J]. *中国环境科学*, 2002, **22**(2): 150-153.
- [9] 范成新,张路,秦伯强,等. 风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, **33**(8): 760-768.
- [10] 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**(增刊): 131-137.
- [11] 范成新,张路,包先明,等. 太湖沉积物-水界面生源要素迁移机制及量化——2. 磷释放的热力学机制及源-汇转换[J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(3): 207-217.
- [12] 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.
- [13] 揣小明,杨柳燕,程书波,等. 太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 951-957.
- [14] 陈永川,汤利,张德刚,等. 滇池叶绿素 a 的时空变化及水体磷对藻类生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2008, **27**(4): 1555-1560.
- [15] 李飞鹏,张海平,陈玲. 小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(10): 3854-3861.
- [16] Chen Y W, Fan C X, Teubner K, *et al.* Changes of nutrients and phytoplankton chlorophyll- α in a large shallow lake, Taihu, China: an 8-year investigation [J]. *Hydrobiologia*, 2003, **506-509**(1-3): 273-279.
- [17] 范成新,陈宇炜,吴庆龙. 夏季盛行风对太湖北部藻类水华分布的影响[J]. *上海环境科学*, 1998, **17**(8): 4-6.
- [18] 秦伯强,胡维平,陈伟民,等. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 389.
- [19] 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.
- [20] Li D P, Huang Y. Sedimentary phosphorus fractions and bioavailability as influenced by repeated sediment resuspension [J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(7): 958-962.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Cao Z J, Zhang X B, Ai N S. Effect of sediment on concentration of dissolved phosphorus in the Three Gorges Reservoir [J]. International Journal of Sediment Research, 2011, **26**(1): 87-95.
- [24] Spears B M, Carvalho L, Perkins R, *et al.* Sediment phosphorus cycling in a large shallow lake: spatio-temporal variation in phosphorus pools and release [J]. Hydrobiologia, 2007, **584**(1): 37-48.
- [25] Cyr H, McCabe 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.
- [26] Kleebreg A, Hupfer M, Gust G. Quantification of phosphorus entrainment in a lowland river by in situ and laboratory resuspension experiments [J]. Aquatic Sciences, 2008, **70**(1): 87-99.
- [27] Sun S J, Huang S L, Sun X M, *et al.* Phosphorus fractions and its release in the sediments of Haihe River, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(3): 291-295.
- [28] 李柯, 关保华, 刘正文. 蓝藻碎屑分解速率及氮磷释放形态的实验分析[J]. 湖泊科学, 2011, **23**(6): 919-925.
- [29] 陈伟民, 蔡后建. 微生物对太湖微囊藻的好氧降解研究[J]. 湖泊科学, 1996, **8**(3): 248-252.
- [30] 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.
- [31] 李珊珊, 郭沛涌, 吴龙永, 等. 厦门市石兜-坂头水库水体生物有效磷与叶绿素 a 分布特征及其相关性[J]. 环境化学, 2011, **30**(2): 483-488.
- [32] 顾苏莉, 陈方, 孙将陵. 太湖蓝藻监测及暴发情况分析[J]. 水资源保护, 2011, **27**(3): 28-32.
- [33] 宋晓兰, 刘正文, 潘宏凯, 等. 太湖梅梁湾与五里湖浮游植物群落的比较[J]. 湖泊科学, 2007, **19**(6): 643-651.
- [34] Chen Y W, Qin B Q, Teubner K, *et al.* Long-term dynamics of phytoplankton assemblages: *Microcystis*-domination in Lake Taihu, a large shallow lake in China [J]. Journal of Plankton Research, 2003, **25**(4): 445-453.
- [35] 张志峰, 宗虎民, 王燕, 等. 大连湾水体中生物有效磷与叶绿素 a 的分布特征及其相关性[J]. 环境化学, 2012, **31**(4): 554-555.
- [36] 李大鹏, 黄勇. 底泥扰动在水体富营养化发展进程中的作用[J]. 中国给水排水, 2009, **25**(14): 10-16.

CONTENTS

Ozone Source Apportionment at Urban Area during a Typical Photochemical Pollution Episode in the Summer of 2013 in the Yangtze River Delta	LI Hao, LI Li, HUANG Cheng, <i>et al.</i>	(1)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Winter and Spring in Xiamen	XU Hui, ZHANG Han, XING Zhen-yu, <i>et al.</i>	(11)
Temporal and Spatial Characteristics of Atmospheric NO ₂ over Hainan Island and the Pollutant Sources in Recent 10 Years	FU Chuan-bo, CHEN You-long, DAN Li, <i>et al.</i>	(18)
Composition of Organic Carbon/Elemental Carbon and Water-soluble Ions in Rice Straw Burning	HONG Lei, LIU Gang, YANG Meng, <i>et al.</i>	(25)
Gas Chromatography with a Pulsed Discharge Helium Ionization Detector for Measurement of Molecular Hydrogen(H ₂) in the Atmosphere	LUAN Tian, FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i>	(34)
Partial Pressure of CO ₂ and CO ₂ Degassing Fluxes of Huayankou and Xiaolangdi Station Affected by Xiaolangdi Reservoir	ZHANG Yong-ling, YANG Xiao-lin, ZHANG Dong	(40)
Distribution of Biogenic Organic Dimethylated Sulfur Compounds and Its Influencing Factors in the East China Sea in Summer	LI Jiang-ping, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng	(49)
Remote Sensing Estimation of Total Suspended Matter Concentration in Xin'anjiang Reservoir Using Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(56)
Spatio-temporal Characteristics and Source Identification of Water Pollutants in Wenritang River Watershed	MA Xiao-xue, WANG La-chun, LIAO Ling-ling	(64)
Effect of Hydrochemistry Characteristics Under Impact of Human Activity: A Case Study in the upper Reaches of the Xijiang River Basin	YU Shi, SUN Ping-an, DU Wen-yue, <i>et al.</i>	(72)
Annual Variation of Different Phosphorus Forms and Response of Algae Growth in Meiliang Bay of Taihu Lake	WANG Ming, WU Xiao-fei, LI Da-peng, <i>et al.</i>	(80)
Distribution of Transferable Nitrogen in Poyang Lake Sediments and Its Response to the Variation of River-Lake Relationship	SHEN Hong-yan, ZHANG Mian-mian, NI Zhao-kui, <i>et al.</i>	(87)
Effect of Environmental Factors on Macroinvertebrate Community Structure in the Huntai River Basin in the Huntai River Basin	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue	(94)
Effects of Outbreak and Extinction of Algal Blooms on the Microbial Community Structure in Sediments of Chaohu Lake	DIAO Xiao-jun, LI Yi-wei, WANG Shu-guang	(107)
Impacts of Algal Blooms Accumulation on Physiological Ecology of Water Hyacinth	WU Ting-ting, LIU Guo-feng, HAN Shi-qun, <i>et al.</i>	(114)
Speciation and Spatial-temporal Variation of Mercury in the Xiaolangdi Reservoir	CHENG Liu, MAO Yu-xiang, MA Bing-juan, <i>et al.</i>	(121)
Spatial Distribution of Mercury in Soils of a Typical Small Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>	(130)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in Water of Agro-forestry and Livestock Compound Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	ZHAO Zheng, WANG Ya, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>	(136)
Effect of External Condition on the Static Migration and Release of Dibutyl-phthalate in the Soil of the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir to the Overlying Water	SONG Jiao-yan, MU Zhi-jian, WANG Qiang, <i>et al.</i>	(143)
Ultraviolet-Visible(UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter(DOM) in Soils of Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Region	GAO Jie, JIANG Tao, LI Lu-lu, <i>et al.</i>	(151)
Characterization of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM) in Zhoushan Fishery Using Excitation-Emission Matrix Spectroscopy(EEMs) and Parallel Factor Analysis(PARAFAC)	ZHOU Qian-qian, SU Rong-guo, BAI Ying, <i>et al.</i>	(163)
Pollution Characteristics and Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Groundwater at Xiaodian Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LI Jia-le, ZHANG Cai-xiang, WANG Yan-xin, <i>et al.</i>	(172)
Risk Assessment and Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments of Xinglin Bay Suburb Rivers of Xiamen	CHENG Qi-ming, HUANG Qing, LIAO Zhen-ni, <i>et al.</i>	(179)
Comparative Analysis of Two Different Methods for Risk Assessment of Groundwater Pollution: A Case Study in Beijing Plain	WANG Hong-na, HE Jiang-tao, MA Wen-jie, <i>et al.</i>	(186)
Transportation and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Water-Soil from the Riparian Zone of Daye Lake, China	ZHANG Jia-quan, LI Xiu, ZHANG Quan-fa, <i>et al.</i>	(194)
Arsenic Removal by Coagulation Process and the Field Expanding Experiments for Yangzonghai Lake	CHEN Jing, ZHANG Shu, YANG Xiang-jun, <i>et al.</i>	(202)
Efficient Oxidative Degradation of Tetrabromobisphenol A by Silver Bismuth Oxide	CHEN Man-tang, SONG Zhou, WANG Nan, <i>et al.</i>	(209)
Removal of Tetracycline by a Kind of Nano-Sized Amorphous Carbon	WU Yi-xiao, LI Ai-min, WANG Di-hua, <i>et al.</i>	(215)
Adsorption Behavior of Anionic Dyes onto Magnetic Chitosan Derivatives	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, ZHAO Yan, <i>et al.</i>	(221)
Forming Mechanism of Humic Acid-Kaolin Complexes and the Adsorption of Trichloroethylene	ZHU Xiao-jing, HE Jiang-tao, SU Si-hui	(227)
Impact on the Microbial Community of Municipal Sewage in the ANAMMOX System During the Cooling Process	ZHAO Zhi-rui, MIAO Zhi-jia, LI Duo, <i>et al.</i>	(237)
Application of FISH-NanoSIMS Technique in Environmental Microbial Ecology Study	CHEN Chen, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i>	(244)
Influence of Microcystin-LR on Cell Viability and Surface Characteristics of <i>Pseudomonas putida</i>	DENG Ting-jin, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i>	(252)
Screening, Combination of Microbial Deodorizer and the Optimization of Its Deodorizing Conditions	ZENG Su, LI Nan-hua, SHENG Hong-chan, <i>et al.</i>	(259)
Distribution and Enrichment Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Halobios from Qingbang Island in Zhoushan, China	ZHANG Ze-zhou, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i>	(266)
Levels of Polychlorinated Biphenyls in Tibetan and Yi Adolescents' Hair from Liangshan Prefecture, Sichuan Province	ZHOU Ying, SUN Yi-ming, JIN Jun, <i>et al.</i>	(274)
Effects of Single and Co-Exposure of Cu and Chlorpyrifos on the Toxicity of Earthworm	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, WANG Nan, <i>et al.</i>	(280)
Effect of Exogenous Selenium on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Cucumber(<i>Cucumis sativus</i> L.)	XIONG Shi-juan, LIU Jun, XU Wei-hong, <i>et al.</i>	(286)
Pollution Characteristics of Platinum Group Elements in Road Rust in Xiamen	HONG Zhen-yu, HONG You-wei, YIN Li-qian, <i>et al.</i>	(295)
Spatial Distribution of Se in Soils from Different Land Use Types and Its Influencing Factors Within the Yanghe Watershed, China	SHANG Jing-min, LUO Wei, WU Guang-hong, <i>et al.</i>	(301)
Immobilization Impact of Different Fixatives on Heavy Metals Contaminated Soil	WU Lie-shan, ZENG Dong-mei, MO Xiao-rong, <i>et al.</i>	(309)
Form Tendency and Bio-availability Dynamics of Cu and Zn in Different Farm Soils After Application of Organic Fertilizer of Livestock and Poultry Manures	SHANG He-ping, LI Yang, ZHANG Tao, <i>et al.</i>	(314)
Analysis of Composition Characteristics of Municipal Solid Waste in South China	ZHANG Hai-long, LI Xiang-ping, QI Jian-ying, <i>et al.</i>	(325)
Sewage Sludge Conditioning by Bioleaching Combined with Fenton-like Oxidation	LIU Chang-geng, ZHANG Pan-yue, JIANG Jiao-jiao, <i>et al.</i>	(333)
Applicability of Bisphenol A Detection by a Planar Waveguide Fluorescent Biosensor	XU Wei-qi, ZHANG Yong-ming, ZHOU Xiao-hong, <i>et al.</i>	(338)
A New "Turn-on" Fluorescent Probe for Visual Detection of Hydrogen Sulfide	LIU Chun-xia, MA Xing, WEI Guo-hua, <i>et al.</i>	(343)
Analysis of Sap Flow Characteristics of the Chinese Pine in Typical Loess Plateau Region of China	ZHANG Han-dan, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i>	(349)
Simultaneous Production of Hydrogen and Volatile Fatty Acid from <i>Macrocystis pyrifera</i>	ZHAO Xiao-xian, FAN Xiao-lei, GUO Rong-bo, <i>et al.</i>	(357)
Behaviors of Engineered Nanoparticles in Aquatic Environments and Impacts on Marine Phytoplankton	LI Man-lu, JIANG Yue-lu	(365)

《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)

2015年1月15日 第36卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 1 Jan. 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