

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第11期

Vol.36 No.11

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

北京市大气气溶胶中糖类化合物的组成及来源	梁林林, Guenter Engling, 段凤魁, 马永亮, 程远, 杜祯宇, 贺克斌 (3935)
北京大气 PM _{2.5} 与惰性 SiO ₂ 的生物毒性比较	刘梦娇, 黄艺, 文航, 邱国玉 (3943)
APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析	高庆先, 刘俊蓉, 王宁, 李文涛, 高文康, 苏布达 (3952)
2000 ~ 2014 年北京市 SO ₂ 时空分布及一次污染过程分析	程念亮, 张大伟, 李云婷, 陈添, 李金香, 董欣, 孙瑞雯, 孟凡 (3961)
利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因	周静博, 任毅斌, 洪纲, 路娜, 李治国, 李雷, 李会来, 靳伟 (3972)
长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟	张亮, 朱彬, 高晋徽, 康汉青, 杨鹏, 王红磊, 李月娥, 邵平 (3981)
珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征	刘建, 吴兑, 范绍佳 (3989)
春季黄渤海海水中尿素分布特征及溶解态氮的组成	李志林, 石晓勇, 张传松 (3999)
洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究	庞燕, 项颂, 储昭升, 薛力强, 叶碧碧 (4005)
大辽河主要污染源营养盐输入特征	马迎群, 张雷, 赵艳民, 秦延文, 潘晓雪, 曹伟, 刘志超, 杨晨晨 (4013)
三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析	张永生, 李海英, 任家盈, 卢佳 (4021)
不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究	李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 袁道先, 刘文, 张陶, 莫雪 (4032)
周丛生物存在下不同水层氧化还原带的分布及其与微生物的关联	王逢武, 刘玮, 万娟娟, 杨嘉利, 刘雪梅, 向速林, 吴永红 (4043)
华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因: 以南皮县为例	孔晓乐, 王仕琴, 赵焕, 袁瑞强 (4051)
某市典型地段地表水及地下水中氟喹诺酮类抗生素分布特征	崔亚丰, 何江涛, 苏思慧, 杨蕾, 乔肖刚 (4060)
乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物分布特征	贺惠, 甄毓, 米铁柱, 张玉, 付璐璐, 于志刚 (4068)
青木关地下河中溶解态甾醇来源及迁移、转化特征	梁作兵, 沈立成, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 张媚, 廖昱, 谢正兰, 张远瞩 (4074)
多环芳烃在岩溶地下表层沉积物-水相的分配	蓝家程, 孙玉川, 肖时珍 (4081)
降雨期间岩溶地下河溶解态多环芳烃变化特征及来源解析	江泽利, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 任坤, 谢正兰, 张媚, 廖昱 (4088)
重庆南山老龙洞地下河系统重金属分布、迁移及自净能力	任坤, 梁作兵, 于正良, 张宇, 王蓉, 袁道先 (4095)
三峡水库消落带植物汞的分布特征	梁丽, 王永敏, 李先源, 唐振亚, 张翔, 张成, 王定勇 (4103)
物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响	王忍, 李大鹏, 黄勇, 刘焱见, 陈俊 (4112)
超声、过硫酸钾协同去除水中诺氟沙星的效果	魏红, 史京转, 李佳霖, 李克斌, 赵琳, 韩凯 (4121)
载银活性炭活化过硫酸钠降解酸性橙 7	王忠明, 黄天寅, 陈家斌, 李文卫, 张黎明 (4127)
TiO ₂ 降解迪美唑的动力学及活性物质分析	陈冬梅, 喻泽斌, 孙蕾, 黄俊, 高丽红, 李明洁 (4135)
单宁酸铁吸附去除水中无机氮的性能与机制研究	张瑞娜, 李琳, 刘俊新 (4141)
间歇曝气式膜生物反应器对养猪沼液中兽用抗生素的去除特性	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 宋小燕, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (4148)
单级和两级串联臭氧-生物活性炭深度处理垃圾渗滤液比较研究	杜安静, 范举红, 刘锐, 邱松凯, 文晓刚, 陈吕军 (4154)
水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响	王会芳, 付昆明, 左早荣, 仇付国 (4161)
氨氮对 AOB 抑制的形态及规律	崔剑虹, 李祥, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵 (4168)
厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水	张诗颖, 吴鹏, 宋吟玲, 沈耀良, 张婷 (4174)
同步硝化反硝化耦合除磷工艺的快速启动及其运行特征	冷璐, 信欣, 鲁航, 唐雅男, 万利华, 郭俊元, 程庆锋 (4180)
HCO ₃ ⁻ 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的影响	李祥, 陈宗姮, 黄勇, 袁怡, 刘忻, 张大林 (4189)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥亚硝化性能调控及稳态研究	巫恺澄, 吴鹏, 沈耀良, 李月寒, 王建芳, 徐乐中 (4195)
活化过硫酸盐对市政污泥调理效果的影响	徐鑫, 濮文虹, 时亚飞, 虞文波, 张诗楠, 宋健, 张昊, 何姝, 杨昌柱, 杨家宽 (4202)
温度分化对 APBR 反应器性能及产甲烷菌群落的影响	谢海迎, 汪鑫, 李牧原, 阎叙西, 五十岚泰夫, 罗锋 (4208)
污染场地修复技术筛选方法及应用	白利平, 罗云, 刘俐, 周友亚, 颜增光, 李发生 (4218)
基于 Monte Carlo 模拟的土壤重金属综合风险评价与案例分析	杨阳, 代丹, 蔡怡敏, 陈卫平, 侯瑜, 杨锋 (4225)
大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价	张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 李发生, 谷庆宝 (4232)
缙云山不同土地利用方式对土壤团聚体微生物量碳氮的影响	李增全, 江长胜, 郝庆菊 (4241)
不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响	兰木岭, 高明 (4252)
生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征	杜毅飞, 方凯凯, 王志康, 李会科, 毛鹏娟, 张向旭, 王婧 (4260)
不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响	姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 马嘉伟, 柳丹, 叶正钱 (4268)
组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究	朱维, 刘丽, 吴燕明, 周航, 邓贵友, 杨文骏, 彭佩钦, 曾敏, 廖柏寒 (4277)
水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响	王美娥, 彭驰, 陈卫平 (4283)
大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估	王晓迪, 臧淑英, 张玉红, 王凡, 杨兴, 左一龙 (4291)
覆盖层甲烷氧化动力学和甲烷氧化菌群落结构	邢志林, 赵天涛, 高艳辉, 何芝, 杨旭, 彭绪亚 (4302)
阳极内添加阳离子交换树脂提升铝压“三合一”膜电极 MFC 性能	梅卓, 张哲, 王鑫 (4311)
应用基于单克隆抗体的免疫传感器检测环境中的茚和苯并茚	李鑫, 乔琰, 钟国祯 (4319)
《环境科学》征订启事 (4224) 《环境科学》征稿简则 (4318) 信息 (4080, 4173, 4290, 4301)	

三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析

张永生¹, 李海英^{1,2}, 任家盈^{1,2}, 卢佳^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 国家水电可持续发展研究中心, 北京 100038)

摘要: 为研究大宁河底泥营养盐时空分布与藻细胞分布的关系, 本研究在大宁河选择4个代表性的取样点: 菜子坝、白水河、双龙和大昌, 利用垂直重力采泥器, 按照2 cm厚度分层选取底泥, 检测底泥中总氮、氨氮、硝态氮、亚硝态氮、总磷、无机磷、有机磷和叶绿素的垂向分布, 分析叶绿素与营养盐的相关性。结果表明, 菜子坝底泥0.0~2.0 cm总氮浓度最高, 白水河底泥2.0~4.0 cm的总氮浓度最高; 菜子坝底泥2.0~4.0 cm氨氮浓度最高, 1和2月白水河底泥4.0~6.0 cm浓度较高; 硝酸氮和亚硝酸氮(除3月)在菜子坝底泥2.0~4.0 cm浓度最高; 氨氮、硝酸氮和亚硝酸氮浓度在同一个采样点底泥4.0 cm以下分层差异不显著; 白水河底泥总磷0.0~6.0 cm呈增加趋势, 菜子坝底泥表层的总磷和无机磷的浓度显著高于其它分层, 而且每一分层中总磷、无机磷浓度都高于其他3个取样点相应的分层; 有机磷在菜子坝和大昌的浓度高于白水河和双龙的浓度, 但是同一采样点底泥不同分层的有机磷浓度差异不显著; 同一深层底泥中的叶绿素a浓度在大昌最高, 其次是白水河, 再次菜子坝, 双龙处的叶绿素a浓度最低; 只有1月在大昌取样点处无机磷和叶绿素a的浓度显著正相关, 相关系数为0.87, 底泥中的营养盐不是影响底泥藻细胞分布的主要影响因素。

关键词: 三峡水库; 藻密度; 营养盐; 时空分布; 相关性

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)11-4021-11 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.11.011

Temporal and Spatial Distribution of Nutrients in Daning River Sediments and Their Correlations with Chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area

ZHANG Yong-sheng¹, LI Hai-ying^{1,2}, REN Jia-ying^{1,2}, LU Jia^{1,2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. National Research Center for Hydropower Sustainable Development, Beijing 100038, China)

Abstract: In order to understand the temporal and spatial distribution of nutrients in Daning river sediments and to investigate the relationship between nutrients and algal cells, samples were selected from 4 typical sampling sites, i. e. Caizi Dam, Baishui River, Shuanglong and Dachang. Vertical gravity mud samplers were used to collect the sediments from different layers within 20 cm in increment of 2 cm. Vertical distributions of TN, NH_4^+ -N, NO_3^- -N, NO_2^- -N, TP, inorganic P and organic P in sediments of different sampling sites were investigated. And so was the vertical distribution of chlorophyll. Moreover, the correlation between chlorophyll and the nutrients was analyzed. Results showed that the contents of TN were the highest at the depth of 0.0-2.0 cm in the Caizi Dam sediments, and at the depth of 2.0-4.0 cm in the Baishui River sediments. The highest NH_4^+ -N content occurred at 2.0-4.0 cm in the Caizi Dam sediments and at 4.0-6.0 cm in the Baishui River in January and February. As to NO_3^- -N and NO_2^- -N contents, they were the highest at 2.0-4.0 cm in Caizi Dam sediments except March. For NH_4^+ -N, NO_3^- -N and NO_2^- -N, there was no significant difference under 4.0 cm sediments at the same sampling site. The distribution of TP was increasing from 0.0 to 6.0 cm in Baizi River sediments. But in Caizi Dam sediments TP and inorganic P contents in 0.0-2.0 cm were higher than those of others layers; TP and inorganic P in all different layers of Caizi Dam sediments were greater than those of corresponding layers in other sampling sites' sediments. The contents of organic P at Caizi Dam and Dachang were higher than those of Baishui River and Shuanglong, while the difference of organic P contents was not significant in different sediments layers at the same sampling site. The chlorophyll a contents in Dachang were the highest at every layer comparing to the corresponding layers of others, followed by Baishui River, Caizi Dam, and Shuanglong. Only one significantly positive correlation was observed between the content of inorganic P and chlorophyll a in Dachang site in January, with the correlation coefficient was 0.87. The correlation results implied that nutrients in sediments were not the main factors affecting the distribution of algal cells.

Key words: Three Gorges Reservoir; algal density; nutrients; temporal and spatial distribution; correlation

近年来,我国部分湖库富营养化严重,频繁发生藻华灾害,严重影响湖泊生态安全和居民饮用水安全^[1,2]。为了预测藻华的暴发,科学家们对藻华的形成机制进行了长期探索,迄今研究表明藻华的形成

收稿日期: 2015-04-17; 修订日期: 2015-06-15

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX-006-05); 中国水利水电科学研究院科研专项(电集1227)

作者简介: 张永生(1977~), 博士, 高级工程师, 主要研究方向为水环境学、环境生物学, E-mail: yszsunny@163.com

基本可以分为 4 个阶段: 越冬、复苏、生长及消亡^[3,4].

藻细胞越冬通常包含水体和底泥两个相对独立而又关联的载体, 因此底泥中的藻细胞分布对预测次年藻华发生的地点是至关重要的. 越冬期, 微囊藻聚集在水库和湖泊中底泥表面, 为次年的藻华提供藻源^[5,6], 越冬期间 Mendota 湖底泥中的微囊藻主要集中在表层底泥(0~4.0 cm), 但具有光合作用活性^[7]; 有研究发现微囊藻在越冬期间底泥中的生物量大于悬浮游的生物量, 说明微囊藻能在底泥表面聚集并存活较长的时间^[8,9], 其研究结果间接地证实了蓝藻的越冬行为; Hansson^[10]认为 Mendota 湖底泥表面 4 种藻类上浮量与水体中藻类生物量有直接的关系, 说明上浮的藻类是水体中藻类生物量的重要来源. 季健等^[11]通过分析越冬期太湖底泥中藻细胞时空分布预测次年藻华的种源地在梅梁湾, ¹⁵N 稳定性同位素示踪的方法证实夏季水体中初期发生的微囊藻水华主要来源于底泥中的越冬微囊藻群体^[12]. 但是 Yang 等^[13]认为越冬的底泥微囊藻进入到水柱的数量有限, 藻华的形成是因为水柱中藻细胞大量生长所致. 很显然, 不同的研究地点, 不同的藻种类型, 其研究结果也不尽相同. 对于藻种的复苏, Verspagen 等^[14]认为微囊藻从底泥到水中的复苏是一个由于外来风力或生物扰动所产生的再次悬浮的被动过程. 对于藻种再悬浮之前藻种的分布与底泥的营养关系值得研究.

营养盐是影响藻华形成的一个重要因素, 但是目前相关研究大部分集中在水体营养盐与藻华生长互作关系, 对于底泥营养盐与藻华的关系研究并不多, 相关研究聚焦在湖库底泥的营养分布及营养盐形态转化方面^[15~17], 但将底泥营养盐分布与藻种来源的关系作为研究内容并不多. 季健和苗秀珍分析了年际间太湖底泥营养盐和叶绿素的浓度, 并初步分析了营养盐与叶绿素分布之间的关系, 结果表明总磷与叶绿素在 2 月呈显著相关^[18,19]. 在沉积物底部的缺氧和厌氧条件下, 铁铝磷向钙磷、有机磷转化, 此转化过程不利于藻细胞生长, 沉积物磷释放增加上覆水中的磷酸盐浓度, 为藻细胞生长繁殖提供了必要的营养条件^[20].

三峡水库蓄水以来, 支流流速减缓, 泥沙沉降, 库湾和支流污染物的滞留时间延长, 导致支流藻密度较高, 极易形成藻华^[21~27]. 大宁河(31°02'~31°20'N, 109°30'~110°01'E)是三峡库区重要的支流, 发源于重庆巫溪县境内, 于巫山县城以东注入长

江, 全长 202 km, 流域面积达 4 180.87 km² 距离三峡大坝约 123 km, 其回水水域主要位于重庆市巫山县境内. 大宁河是著名风景区——小三峡所在河流, 该河流回水区段淹没区域既有原来的农田, 又有原来的村寨, 还有 V 字型峡谷^[28], 底泥特征并不一致.

迄今, 在大宁河发生几次较大的藻华^[28], 目前研究表明: 大宁河春季藻细胞主要集中在水体上层 0~4.0 m 之间, 其密度与总氮、总磷、水温、DO、pH、浊度、高锰酸盐指数呈显著正相关关系, 与透明度呈负相关关系^[29], 形成水华原因除了水体水质达富营养化条件外, 回水区水动力条件的改变也是重要因素之一^[30]. 但是对于藻华种源是否来源于底泥还不得而知, 并且目前没有发现关于大宁河底泥营养盐的分布的相关报道, 因此进一步探究大宁河支流藻华形成机制, 为建立库区支流基于藻华形成机制的藻华预警体系, 分析越冬期间大宁河底泥营养盐分布及其与藻细胞分布关系是极为必要的.

1 材料与方法

1.1 研究地点

本研究选择三峡库区大宁河流域 4 个具有代表性采样位点, 分别是菜子坝、白水河、双龙及大昌(图 1). 菜子坝是大宁河支流与长江干流的交汇处, 其河底既有巫山县城老城区的城市土地, 又有原来大宁河河道的沉积物; 白水河是大宁河流域典型的河湾, 其河底平坦, 蓄水前多为农田, 此种类型的

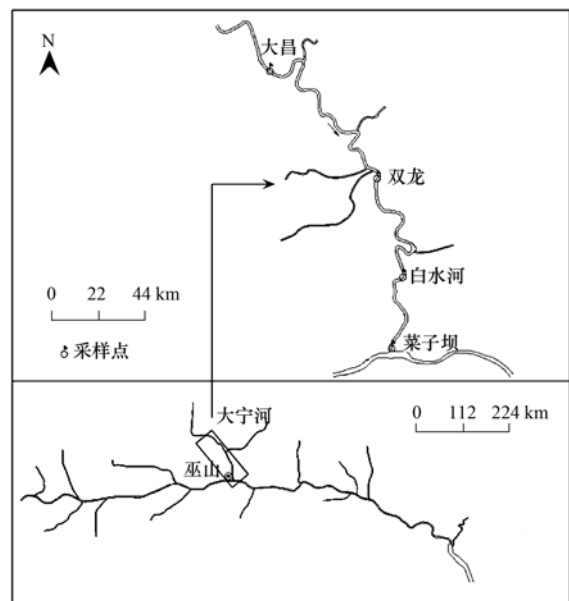


图 1 采样点在三峡库区的地理位置示意

Fig. 1 Sampling sites in Baishui Bay, the Daning River, the Three Gorges Reservoir

河湾在大宁河流域较为常见; 双龙取样点属峡谷航道, 两岸为石质峭壁, 河流横断面为“V”型, 其底部多为沙砾及砾石; 大昌取样点位于古城原址, 蓄水后大宁河的回水最上端区域。

1.2 野外采样

由于大昌取样点在 2007 年 12 月还曾出现过大规模藻华现象, 为了真实地反映越冬期藻细胞的所在场所, 野外底泥取样试验于 2013 年 1~4 月进行, 每月 15 日左右采样 1 次。

利用内径为 60 mm 的垂直重力柱状采泥器采集约 1.0 m 的底泥样品, 从底泥顶层按照每 2.0 cm 的厚度切取底泥移至密封袋中, 放入保温箱内冷藏保存。在每个采样点采集 3 份平行样品, 相关指标测定结果取其平均值。

1.3 测定方法

总氮、铵态氮、硝态氮、亚硝态氮、总磷、无机磷和有机磷在实验室测定。底泥中总氮的测定利用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 (GB/T 11894-1989), 硝酸盐氮的测定利用紫外分光光度法 (HJ/T 346-2007), 亚硝酸盐氮的测定利用分光光度法 (GB/T 7493-87), 铵态氮的测定利用纳氏试剂光度法 (HJ 535-2009), 总磷的测定利用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法 (GB 11893-89), 无机磷的测定利用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法 (GB 11893-89), 有机磷的测定利用钼酸铵分光光度法 (GB 11893-89)^[31]。

叶绿素的测定: 称取一定量解冻后的底泥样品, 于室内风干至恒重, 称取 5 g 研磨好的样品放入研钵中, 加入 90% 丙酮溶液 2 mL, 仔细研磨 5 min, 转移至 10 mL 具塞离心管中, 于 4℃ 黑暗条件下静置 8~10 h, 4 000 r·min⁻¹ 的转速离心 5 min, 上清液转移至 10 mL 容量瓶中, 最后用 90% 丙酮定容至 10 mL。此待测液用于测定叶绿素浓度^[32]。

1.4 数据处理

每个样品相关指标测定重复 3 次, 取其平均; 相关性分析利用 SPSS 16.0 处理, $P < 0.05$ 为显著性相关, $P < 0.01$ 时为极显著相关。

2 结果与分析

2.1 氮素时空分布

2.1.1 总氮

1~4 月, 菜子坝沉积物 0.0~2.0 cm 之间的总氮浓度分别为 1 215、1 186、1 276 和 1 198 mg·kg⁻¹, 其量显著高于其他深层的该元素浓度, 随着沉积物

的深度增加, 该元素浓度迅速下降, 在沉积物 4.0~12.0 cm 之间, 总氮元素变化不显著, 从 12.0 cm 该元素浓度又呈现上升趋势, 在 16.0 cm 处再次达到顶点其浓度分别为 849、831、876 和 821 mg·kg⁻¹, 随后其浓度再次下降。

1~4 月, 白水河沉积物中氮元素浓度最高的位置出现在 16.0 cm 处, 其浓度分别为 1 042、994、964 和 942 mg·kg⁻¹, 浓度次高点出现在 20.0 cm 处, 其浓度分别为 937、928、947 和 927 mg·kg⁻¹, 4.0~12.0 cm 之间, 总氮元素变化不显著, 16.0~20.0 cm 之间, 总氮元素变化也不显著。

1~4 月, 双龙处沉积物氮元素范围分别在 609~709、604~701、604~688 和 629~698 mg·kg⁻¹; 大昌处沉积物氮元素范围分别在 641~812、632~720、606~701 和 651~714 mg·kg⁻¹。双龙处沉积物各层的氮元素差异不显著, 大昌处沉积物中 12.0~14.0 cm 除了在 1 月高达 812 mg·kg⁻¹, 其他月份大昌沉积物各层氮元素差异不显著 (图 2)。

2.1.2 氨氮

1~4 月, 菜子坝沉积物 0.0~4.0 cm 之间的氨氮浓度较高, 其最高浓度位于 2.0~4.0 cm, 分别为 58.32、58.08、58.31 和 56.32 mg·kg⁻¹, 其他分层内氨氮在 4 个月份中均不显著。

1~3 月, 白水河沉积物中 0.0~2.0 cm 氨氮浓度最低, 其浓度分别为 24.3、25.2 和 28.3 mg·kg⁻¹, 该分层 4 月的氨氮浓度为 30.2 mg·kg⁻¹, 4 月沉积物中 14.0~16.0 cm 之间氨氮浓度最低, 为 28.4 mg·kg⁻¹。4 个月份沉积物在 0.0~6.0 cm 分层中氨氮浓度呈现上升趋势, 其中 4.0~6.0 cm 分层中浓度最高为 53.46、53.13、42.28 和 46.83 mg·kg⁻¹, 其浓度在其它分层中变化不显著, 均位于 29.42~42.19 mg·kg⁻¹。

1~4 月, 双龙处沉积物中仅在 12.0~14.0 cm 分层中略高 40 mg·kg⁻¹, 其它分层氨氮浓度差异不显著; 1~4 月, 大昌在 4 个取样点中, 沉积物中氨氮平均浓度最高分别为 40.18、39.99、40.11 和 39.20 mg·kg⁻¹ (图 3)。

2.1.3 硝态氮

1~4 月, 菜子坝沉积物 0.0~4.0 cm 之间的硝态氮浓度呈上升趋势, 其最高浓度位于 2.0~4.0 cm, 分别为 403.19、399.40、392.97 和 399.81 mg·kg⁻¹; 沉积物 4.0~6.0 cm 之间, 硝态氮浓度呈急剧下降趋势, 分别下降了 182.81、194.08、134.68 和 170.05 mg·kg⁻¹, 6.0~20.0 cm 之间, 其

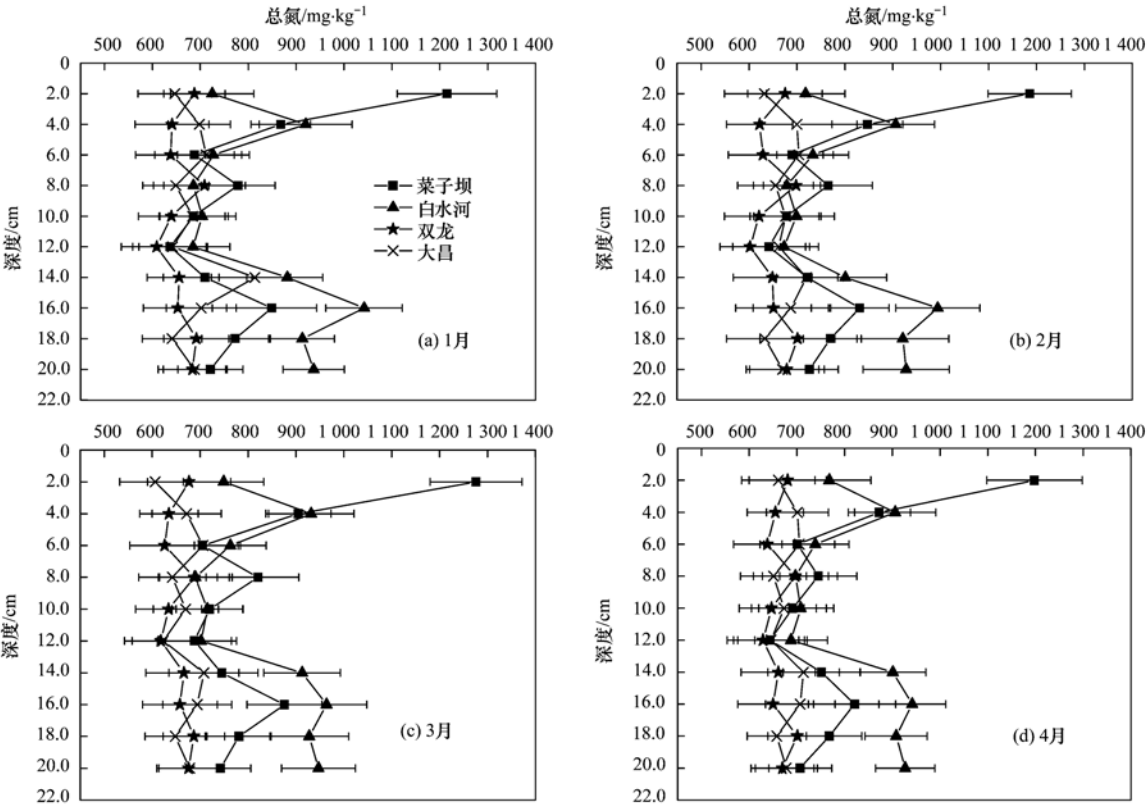


图 2 底泥中总氮的浓度分布

Fig. 2 Distribution of total nitrogen in sediment

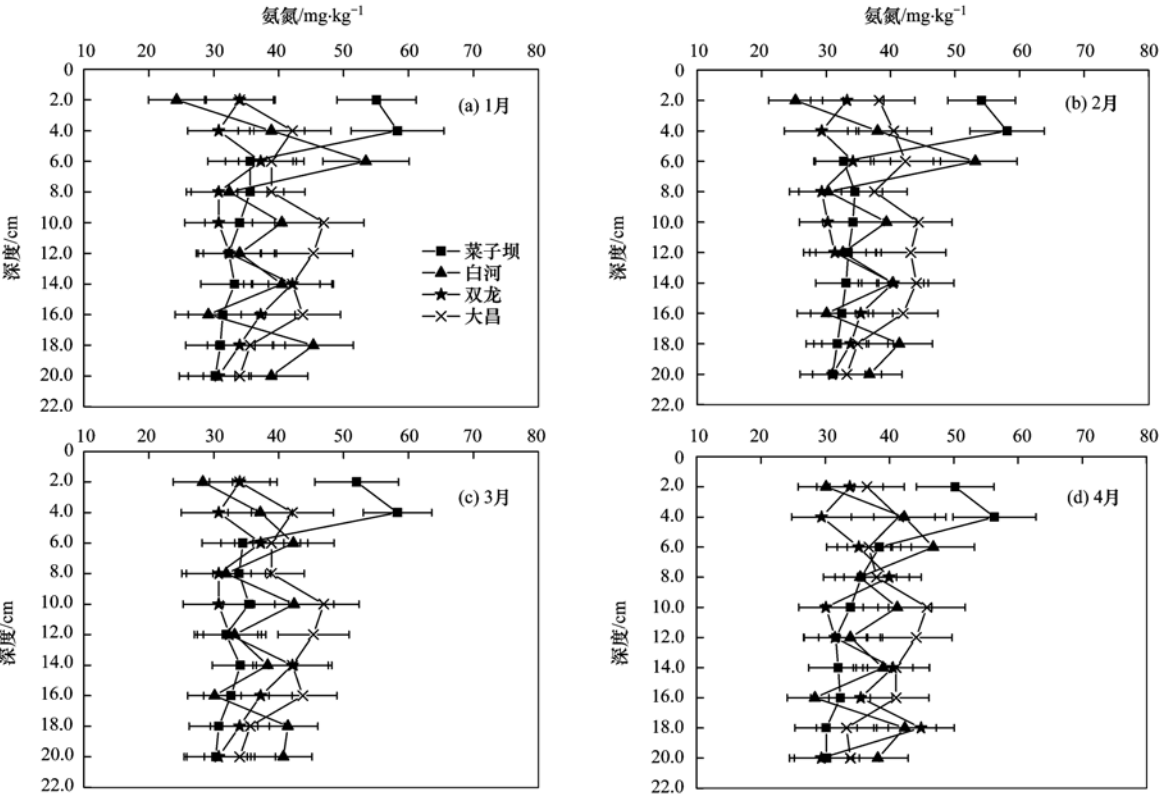
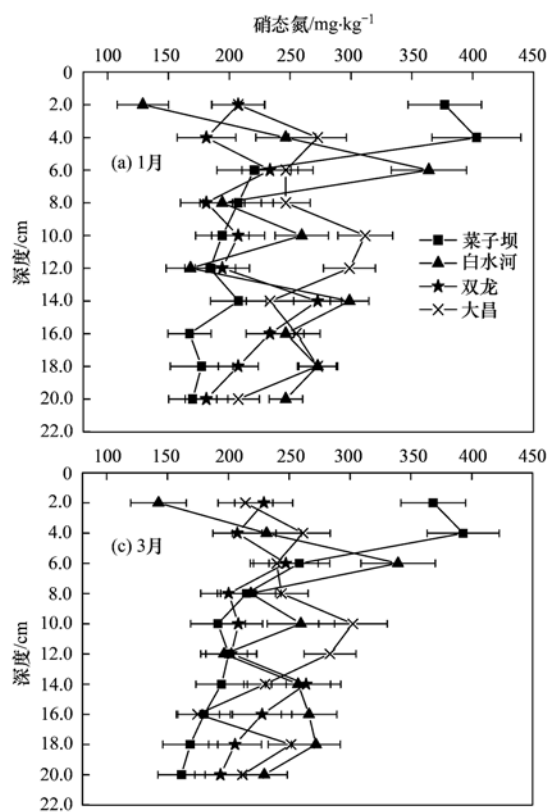


图 3 底泥中氨氮的浓度分布

Fig. 3 Distribution of ammonia nitrogen in sediment

浓度呈现略微降低趋势; 4.0 ~ 20.0 cm 分层中, 菜子坝在 4 个取样点中硝态氮平均浓度最低, 为 191.02、189.24、196.17 和 192.74 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1 ~ 4 月, 白水河沉积物在 0.0 ~ 6.0 cm 分层中硝态氮浓度呈现上升趋势, 其中 4.0 ~ 6.0 cm 分层中浓度最高为 364.02、331.83、339.43 和 337.81 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 随着沉积物深度增加, 其浓度逐渐降低, 其它分层中硝态氮浓度变化不显著。



1 ~ 3 月, 双龙沉积物在 12.0 ~ 14.0 cm 分层中硝态氮浓度最高为 272.61、245.43 和 263.84 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。4 月硝态氮最高浓度在 6.0 ~ 8.0 cm 分层中为 198.03 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1 ~ 4 月, 大昌沉积物在 8.0 ~ 10.0 cm 分层中硝态氮浓度最高为 311.18、295.31、302.36 和 307.53 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 但是其它分层中硝态氮的浓度变化明显差异显著(图 4)。

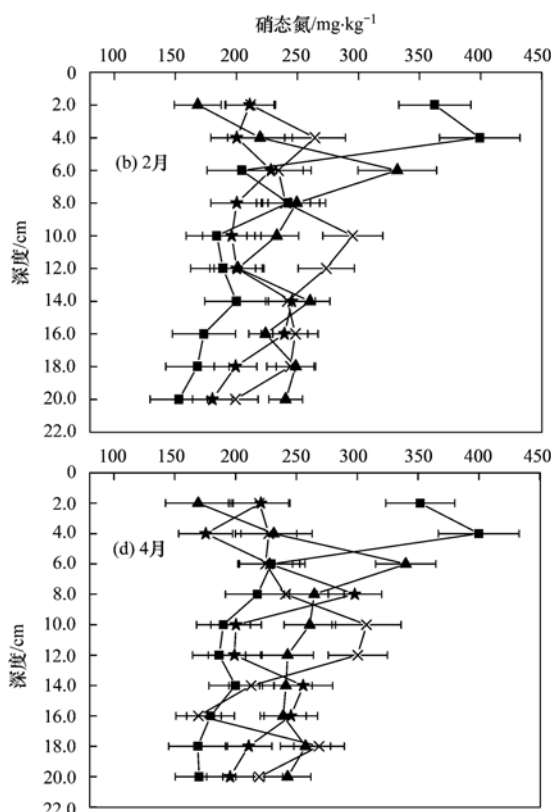


图 4 底泥中硝态氮浓度分布

Fig. 4 Distribution of nitrate nitrogen in sediment

2.1.4 亚硝态氮

除了 3 月, 菜子坝沉积物 0.0 ~ 4.0 cm 之间的亚硝态氮最高浓度, 132.58、134.61 和 126.34 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 3 月, 沉积物 0.0 ~ 2.0 cm 之间的亚硝态氮最高浓度, 130.04 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 2.0 ~ 4.0 cm, 亚硝酸盐浓度迅速降低; 其他分层其浓度变化不显著。

1 ~ 4 月, 白水河沉积物在 0.0 ~ 6.0 cm 分层中亚硝态氮浓度呈现上升趋势, 其中 4.0 ~ 6.0 cm 分层中浓度最高为 120.53、96.27、100.21 和 117.84 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 其它分层中亚硝态氮浓度变化不显著。

1 ~ 4 月, 双龙沉积物中亚硝态氮浓度相对稳定, 在 12.0 ~ 14.0 cm 分层中亚硝态氮浓度最高为 92.42、91.29、94.28 和 89.94 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。其它分层中亚硝态氮浓度变化不显著。

1 月, 大昌沉积物在 8.0 ~ 10.0 cm 分层中的亚硝态氮浓度最高为 100.45 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 2 ~ 4 月, 在 10.0 ~ 12.0 cm 分层中的亚硝态氮浓度最高为 102.73、101.02 和 101.38 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 但是 0.0 ~ 2.0 cm 分层中的亚硝态氮浓度较低(图 5)。

2.2 磷元素的分布

2.2.1 总磷的分布

1 ~ 4 月, 菜子坝沉积物中各分层中总磷的浓度总体上比其它 3 个取样点各对应分层的浓度高。4 个月份菜子坝沉积物中 0.0 ~ 2.0 cm 的总磷浓度最高, 分别为 785.11、763.68、772.12 和 767.90 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。2.0 ~ 20.0 cm 各分层中的总磷浓度变化不显著。1 ~ 4 月其它 3 个取样点沉积物中各分层的总磷浓度变化差异不显著, 仅在白水河沉积物中

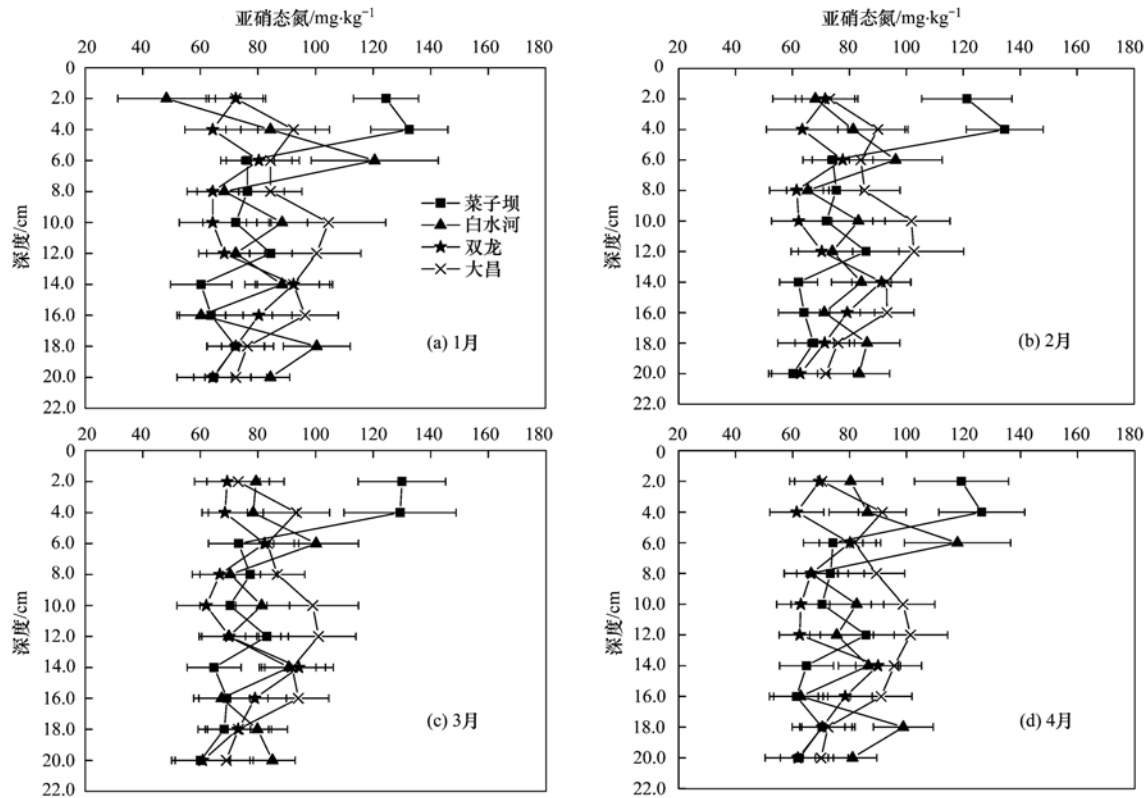


图 5 底泥中亚硝态氮浓度分布
Fig. 5 Distribution of nitrite nitrogen in sediment

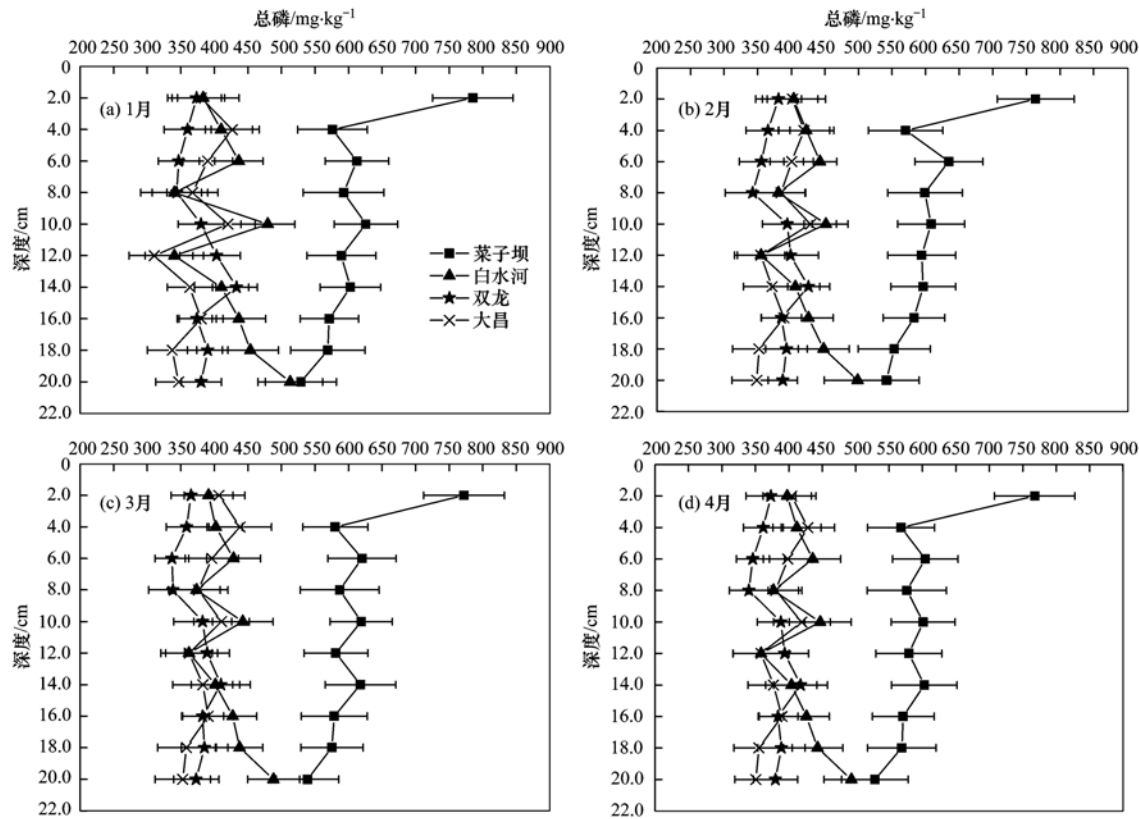


图 6 底泥中总磷浓度的分布
Fig. 6 Distribution of total phosphorus in sediment

18.0 ~ 20.0 cm 之间总磷浓度相对较高, 分别为 512.94、498.76、488.37 和 493.57 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 6).

2.2.2 无机磷的分布

1~4 月, 菜子坝沉积物中 0.0 ~ 2.0 cm 的无机磷浓度最高, 分别为 497.68、469.16、483.42 和 476.29 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 沉积物中 2.0 ~ 20.0 cm 各分层中的无机磷浓度变化不显著, 其浓度均介于 324.25 ~ 389.80 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

1~4 月, 白水河沉积物中无机磷的浓度为 205.11 ~ 241.27 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 双龙沉积物中无机磷的浓度为 191.77 ~ 224.37 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 大昌沉积物中无机磷的浓度为 168.43 ~ 211.09 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 这 3 个取样点沉积物中各分层的无机磷浓度变化非常不明显. 并且这 3 个取样点沉积物中各分层的无机磷浓度均比菜子坝各对应分层的该元素浓度低 (图 7).

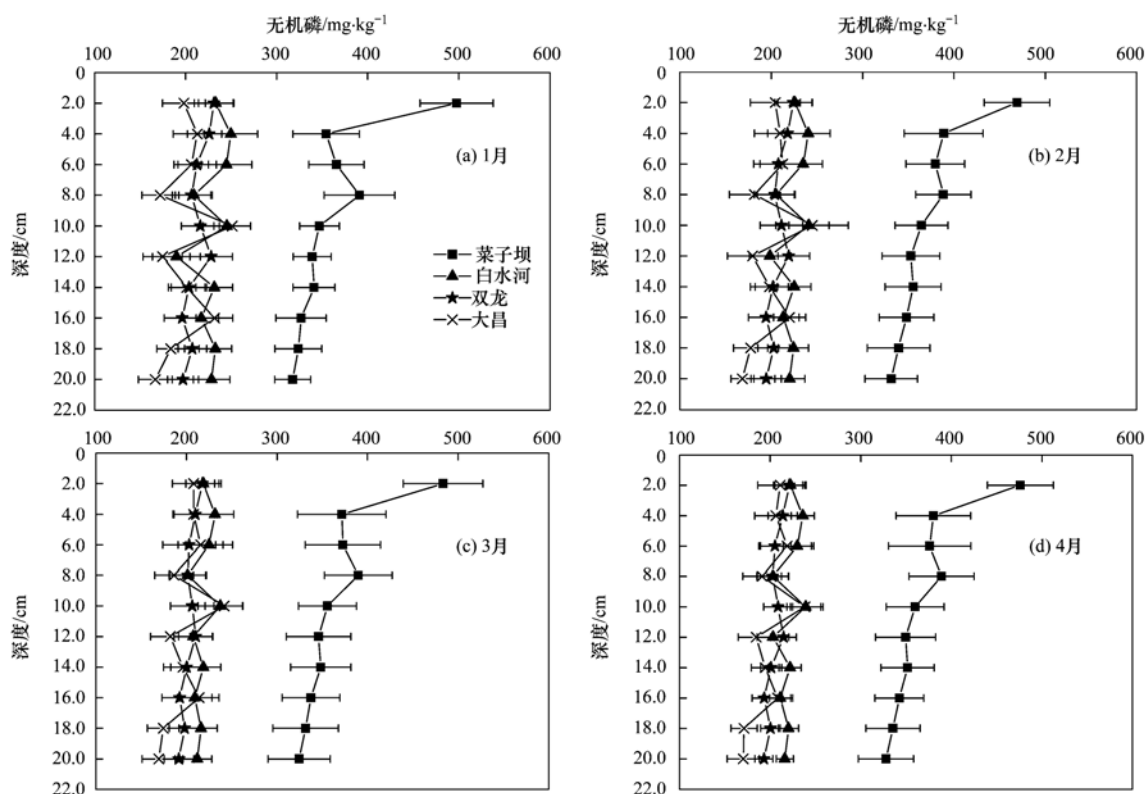


图 7 底泥中无机磷浓度分布

Fig. 7 Distribution of inorganic phosphorus in sediment

2.2.3 有机磷的分布

4 个取样点, 菜子坝和大昌处沉积物中有机磷的平均浓度高于白水河和双龙处的浓度, 4 个月菜子坝沉积物中有机磷的平均浓度分别为 188.75、185.07、186.91 和 185.99 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 大昌沉积物中有机磷的平均浓度分别为 150.94、148.49、146.04 和 147.26 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 白水河沉积物中有机磷的平均浓度分别为 152.76、155.21、156.03 和 154.39 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 双龙沉积物中有机磷的平均浓度分别为 116.42、112.86、111.09 和 109.31 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 8).

2.3 叶绿素分布

4 个月份, 不同取样点的底泥中叶绿素的分布特征类似. 在水平方向, 同一深层底泥中的叶绿素浓度在大昌最高, 其次是白水河, 再次菜子坝, 双龙

处的叶绿素浓度最低. 在底泥垂向, 叶绿素浓度从底泥表面到 8.0 cm 之间迅速下降, 大昌取样点底泥在 8.0 cm 以下检测不到叶绿素浓度, 白水河和菜子坝 2 个取样点在底泥 6.0 cm 以下检测不到叶绿素浓度, 而在双龙处底泥 4.0 cm 以下基本检测不到叶绿素浓度 (图 9).

2.4 叶绿素与营养盐的分布相关性

4 个取样点 4 个月份, 叶绿素 a 与 NO_2^- -N、有机磷负相关, 与其他营养盐正相关; 4 个取样点中仅在大昌处 1 月底泥中叶绿素 a 与无机磷显著相关, 相关系数为 0.87, 其它月份其它地点, 叶绿素 a 与各营养盐因子无显著相关; 4 个月份中, 底泥中的叶绿素 a 与同一营养盐因子的相关系数逐渐减少. 同一月份, 大昌底泥中的叶绿素 a 与同一营养盐因子的相关系数最高, 双龙处相关系数最低 (表 1).

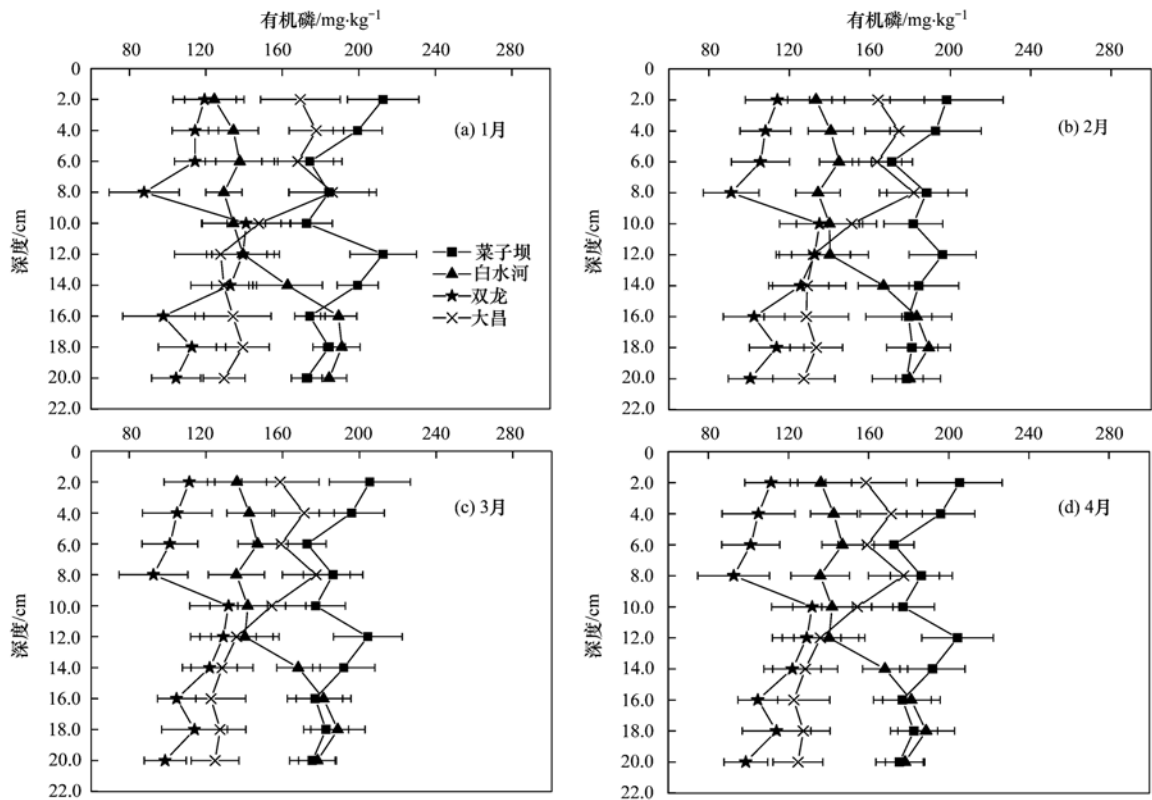


图 8 底泥中有机磷浓度分布
Fig. 8 Distribution of organophosphorus in sediment

表 1 大宁河底泥营养盐与叶绿素 a 的相关性分析

Table 1 Correlation analysis between nutrients and chlorophyll a in Daning River																
项目	菜子坝				白水河				双龙				大昌			
	1 月	2 月	3 月	4 月	1 月	2 月	3 月	4 月	1 月	2 月	3 月	4 月	1 月	2 月	3 月	4 月
TN	0.42	0.29	0.29	0.25	0.43	0.39	0.38	0.31	0.37	0.24	0.17	0.16	0.66	0.53	0.49	0.43
NH ₄ ⁺ -N	0.47	0.42	0.35	0.27	0.82	0.65	0.40	0.34	0.29	0.22	0.15	0.10	0.71	0.66	0.58	0.38
NO ₃ ⁻ -N	0.38	0.31	0.24	0.22	0.67	0.63	0.41	0.37	0.33	0.27	0.18	0.12	0.56	0.49	0.48	0.36
NO ₂ ⁻ -N	-0.35	-0.37	-0.36	-0.30	-0.64	-0.57	-0.42	-0.29	-0.28	-0.19	-0.11	-0.09	-0.65	-0.42	-0.27	-0.26
TP	0.41	0.42	0.31	0.31	0.74	0.54	0.46	0.35	0.21	0.22	0.11	0.11	0.80	0.67	0.36	0.32
无机磷	0.57	0.52	0.41	0.36	0.78	0.54	0.43	0.40	0.37	0.32	0.21	0.06	0.87*	0.83	0.52	0.31
有机磷	-0.48	-0.29	0.20	-0.21	-0.53	-0.39	-0.37	-0.33	-0.28	-0.19	-0.11	-0.10	-0.51	-0.37	-0.33	-0.29

3 讨论

3.1 沉积物中营养盐分布的影响因素

三峡水库蓄水以来,支流流速减缓,泥沙沉降,库湾和支流污染物的滞留时间延长^[21,26],同时,三峡大坝建成后大宁河支流回水区淹没了原来的农田和部分村庄,因此底泥与原来未建大坝时的底泥营养盐分布并不一致,但是自 2010 年蓄水至 175 m 以来,未见关于大宁河底泥营养分布的研究报道. 本研究在 1~4 月,选择大宁河 4 个具有代表性的点位,利用垂直重力采泥器采集柱状泥样,分析了 20.0 cm 以内的底泥营养盐的分布状况. 研究结果

表明底泥中 0.0~2.0 cm 总氮浓度在菜子坝最高,其次是白水河,大昌最小,菜子坝处的总氮可能主要是巫山县城生活污水中污染物的排放积累而成;而白水河处的总氮浓度最高的是 2.0~4.0 cm,其主要原因可能是由于取样地点淹没前是农田,由于长期使用化肥,导致氮元素的最高浓度不是出现在底泥表层,而是出现在底泥的某一分层. 整个试验期间菜子坝采样点底泥 2.0~4.0 cm 氨氮浓度最高,在 1 和 2 月白水河底泥 4.0~6.0 cm 浓度较高. 硝态氮和亚硝态氮(除 3 月)在菜子坝底泥 2.0~4.0 cm 浓度最高;氨氮、硝态氮和亚硝态氮在同一个采样点 4.0 cm 以下分层浓度差异不显著. 造成氮元

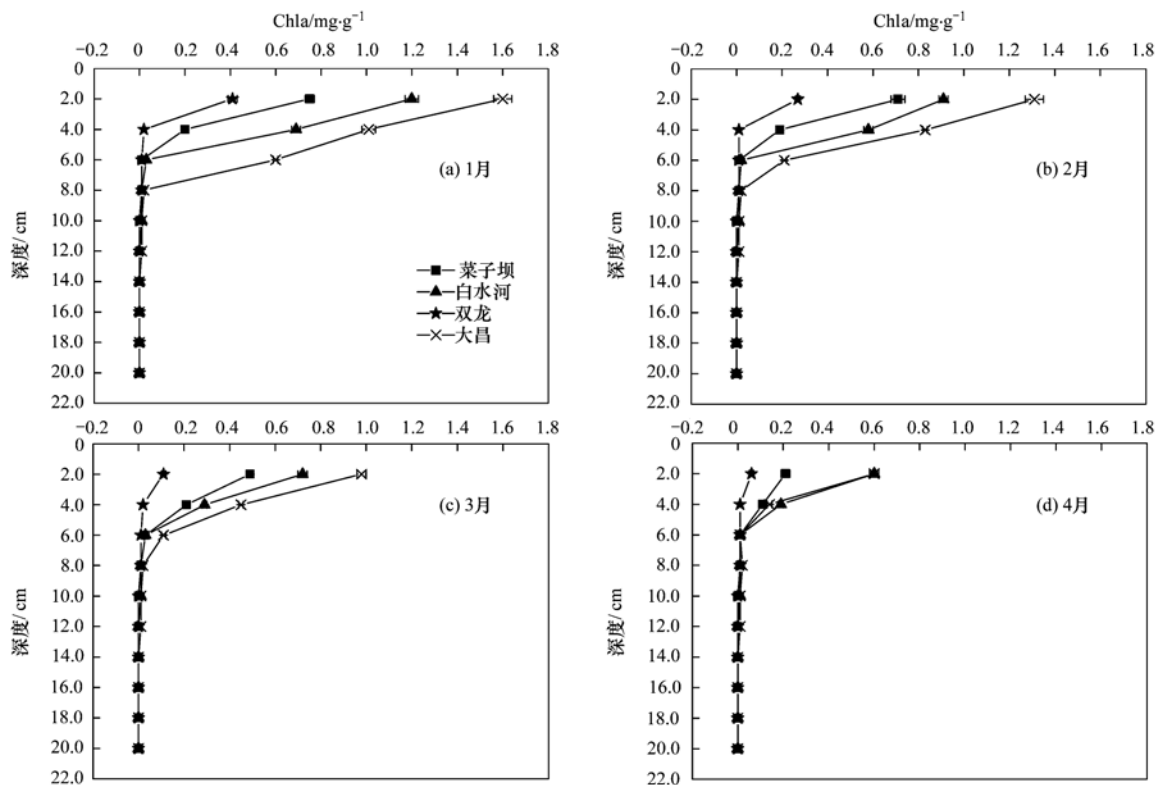


图9 底泥中叶绿素浓度分布

Fig. 9 Distribution of chlorophyll a in sediment

素分布特点的原因可能由于水-底泥界面的水动力或者环境条件并不适宜底泥微生物的生存,底泥微生物特别是厌氧微生物大部分集中在底泥 2.0 ~ 6.0 cm 之间,此泥层的环境更加有利于微生物对氮元素的形态转化。

受淹没前农田施肥状况影响,白水河处的总磷从 0.0 ~ 6.0 cm 呈增加趋势,但是菜子坝的总磷和无机磷不仅仅在表层的浓度显著高于其它分层,而且每一分层中总磷、无机磷浓度都高于其他 3 个取样点相应的分层,根据菜子坝的取样地点为原大宁河河道,推测菜子坝的总磷和无机磷主要来源不是来自农田施肥,而是巫山县城排放的生活污水或工业废水内的污染物在底泥中的沉积而成,在对巫山县城 12 个排污口的污染物分析也发现其中的总磷和无机磷显著高于其他 3 个取样点处点源污染的总磷和无机磷浓度。有机磷在菜子坝和大昌的浓度高于白水河和双龙的浓度,但是不同分层的浓度差异不显著,主要原因可能是菜子坝和大昌淹没前是原来城镇居民区,其有机磷由于不容易被底泥中微生物利用,因此累积量要远高于农田淹没区的白水河和峡谷河道的双龙。

双龙和大昌两处底泥中营养盐因子在底泥不同

分层中的浓度变化并不十分显著,其浓度变化浮动范围也比较窄。双龙是一个狭长且两岸陡峭的峡谷,取样点位于航道中心,因此底泥样品既不是原来农田土壤,也不是两岸护坡因地表径流而堆积土壤,而是水体中的固体颗粒物经过上千年的积累而成,是真正的“沉积物”,因此在沉积物各分层中营养盐的浓度变化不显著。

3.2 底泥中藻细胞分布与营养盐分布关系

藻细胞在底泥中越冬,底泥中的藻种为次年的藻华提供种源^[5,6,11-14],因此藻细胞在底泥中的分布与营养盐的分布有密切关系。但是不同湖库,生态环境不同,底泥中的藻种的分布规律也不相同,季健^[18]在太湖利用叶绿素 a 代表藻种密度,研究了藻细胞越冬期底泥中藻细胞与营养盐分布关系,依此结果预测次年藻华发生地点。但是本研究中,仅在 1 月大昌处发现叶绿素与无机磷有显著相关,相关系数为 0.87,其他取样点没有检测到叶绿素和营养盐显著相关,说明越冬期大宁河大部分流域底泥中的藻细胞无法为次年藻华提供种源。目前为了及早地预防藻华的发生,通常通过分析越冬期底泥中的藻细胞分布确定次年藻华的种源地,利用此方法确定了梅梁湾是太湖次年藻华暴发种源地^[18,19],而本研

究利用此方法却没有得出类似的结果,因此在三峡库区无法利用分析藻细胞在底泥中的分布确定次年水华藻种源地. 由于越冬期,三峡库区属于蓄水期,水位较高,底泥生境温度较低,光线较暗,并不适应藻细胞的越冬,而大昌处取样点由于处于汇水区上端,水深较浅,光线较其他取样点好,因此在越冬期,大昌极有可能是次年藻华的藻种来源地之一,其他取样点处藻细胞主要分布在水面以下 4.0 m 之内^[33]. 依据本研究及本课题组前期研究,推测对于深水湖泊,越冬期间,除死亡的藻细胞沉于底泥外,其他藻细胞悬浮于水体 0.0~4.0 m 之间,这期间主要受水体营养盐及水温的影响.

磷被认为是影响藻细胞生长的决定性因子^[34~38]. 越冬期,底泥中的磷元素分布也影响了底泥中藻细胞的分布,2月与3月太湖底泥中的磷元素与蓝藻分布具有显著相关性^[18,19],因而推测在浅水湖区底泥的磷元素与底泥蓝藻分布密切相关. 但是本研究发现,菜子坝处底泥的无机磷显著地高于其他取样点处,但是菜子坝处无机磷与叶绿素并不显著相关,大昌处和其他2个取样点的无机磷浓度差异不显著,但是在菜子坝处1月检测到无机磷与叶绿素显著正相关. 依据试验结果可推测,大宁河底泥中的营养盐不是影响底泥藻细胞分布的主要影响因素,大昌处底泥中的藻细胞主要来源于蓄水初期回水中的藻细胞聚集在大昌后沉降所致,由于大昌处水位较浅,底泥表面处的磷元素是影响藻细胞在底泥中分布的主要影响因素. 因此,依据本研究的结果可以推测,浅水湖泊与深水湖库中的藻细胞越冬地是不一样的,浅水湖泊藻细胞的越冬地为底泥,深水湖库藻细胞的越冬地为水体.

4 结论

(1)菜子坝底泥 0.0~2.0 cm 总氮浓度最高,白水河底泥 2.0~4.0 cm 的总氮浓度最高;菜子坝底泥 2.0~4.0 cm 氨氮浓度最高,1和2月份白水河底泥 4.0~6.0 cm 浓度较高;硝态氮和亚硝态氮(除3月)在菜子坝底泥 2.0~4.0 cm 浓度最高;氨氮、硝态氮和亚硝态氮浓度在同一个采样点底泥 4.0 cm 以下分层差异不显著.

(2)白水河处的总磷从 0.0~6.0 cm 呈增加趋势,菜子坝底泥表层的总磷和无机磷的浓度显著高于其它分层,而且每一分层中总磷、无机磷浓度都高于其他3个取样点相应的分层;有机磷在菜子坝和大昌的浓度高于白水河和双龙的浓度,但是同一

采样点底泥不同分层的有机磷浓度差异不显著.

(3)同一深层底泥中的叶绿素浓度在大昌最高,其次是白水河,再次菜子坝,双龙处的叶绿素浓度最低.

(4)只有1月在大昌取样点处无机磷和叶绿素的浓度显著正相关,相关系数为 0.87,底泥中的营养盐不是影响底泥藻细胞分布的主要影响因素,大昌底泥是大宁河藻细胞越冬地,是大宁河春末夏初水华藻种来源地.

参考文献:

- [1] 秦伯强. 太湖生态与环境若干问题的研究进展及其展望[J]. 湖泊科学, 2009, 21(4): 445-455.
- [2] 中国环境科学研究院等. 湖泊生态安全保障策略[M]. 北京:科学出版社, 2013. 1-12.
- [3] 孔繁翔, 马荣华, 高俊峰, 等. 太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践[J]. 湖泊科学, 2009, 21(3): 314-328.
- [4] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 589-595.
- [5] Brunberg A K, Blomqvist P. Recruitment of *Microcystis* (cyanophyceae) from lake sediments: the importance of littoral inocula [J]. Journal of Phycology, 2003, 39(1): 58-63.
- [6] Karlsson-Elfgren I, Brunberg A K. The importance of shallow sediments in the recruitment of *Anabaena* and *Aphanizomenon* (cyanophyceae) [J]. Journal of Phycology, 2004, 40(5): 831-836.
- [7] Fallon R D, Brock T D. Overwintering of *Microcystis* in Lake Mendota[J]. Freshwater Biology, 1981, 11(3): 217-226.
- [8] Takamura N, Yasuno M. Sedimentation of phytoplankton populations dominated by *Microcystis* in a shallow lake [J]. Journal of Plankton Research, 1988, 10(2): 283-299.
- [9] Boström B, Pettersson A K, Ahlgren I. Seasonal dynamics of a cyanobacteria-dominated microbial community in surface sediments of a shallow, eutrophic lake[J]. Aquatic Sciences, 1989, 51(2): 153-178.
- [10] Hansson L A. Algal recruitment from lake sediments in relation to grazing, sinking, and dominance patterns in the phytoplankton community[J]. Limnology and Oceanography, 1996, 41(6): 1312-1323.
- [11] 季健, 孔繁翔, 于洋, 等. 太湖越冬蓝藻空间分布的初步研究[J]. 湖泊科学, 2009, 21(4): 490-494.
- [12] Preston T, Stewart W D P, Reynolds C S. Bloom-forming cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* overwinters on sediment surface[J]. Nature, 1980, 288(5789): 365-367.
- [13] Yang Z, Kong F X, Zhang M. Effect of filtered cultures of flagellate *Ochromonas* sp. on colony formation in *Microcystis aeruginosa*[J]. International Review of Hydrobiology, 2010, 94(2): 143-152.
- [14] Verspagen J M H, Snelder E O F M, Visser P M, et al. Benthic-pelagic coupling in the population dynamics of the harmful

- cyanobacterium *Microcystis* [J]. *Freshwater Biology*, 2005, **50** (5): 854-867.
- [15] 范成新, 杨龙元, 张路. 太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及相互关系分析[J]. *湖泊科学*, 2000, **12** (4): 359-366.
- [16] Guo L. Doing battle with the green monster of Taihu Lake[J]. *Science*, 2007, **317**(5842): 1166.
- [17] Burton E D, Bush R T, Sullivan L A. Fractionation and extractability of sulfur, iron and trace elements in sulfidic sediments[J]. *Chemosphere*, 2006, **64**(8): 1421-1428.
- [18] 季健. 太湖越冬蓝藻时空分布研究[D]. 北京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2009. 47-50.
- [19] 苗秀珍. 太湖越冬蓝藻时空分布及过程[D]. 南京: 南京工业大学, 2010. 55-56.
- [20] 刘冬梅, 姜霞, 金相灿, 等. 太湖藻对水-沉积物界面磷交换过程的影响[J]. *环境科学研究*, 2006, **19**(4): 8-13.
- [21] 郭劲松, 张超, 方芳, 等. 三峡水库小江回水区水华高发期浮游植物群落结构特征研究[J]. *科技导报*, 2008, **26**(17): 70-75.
- [22] Ye L, Xu Y Y, Han X Q, *et al.* Daily dynamics of nutrients and chlorophyll *a* during a spring phytoplankton bloom in Xiangxi bay of the three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2006, **21**(2): 315-321.
- [23] Ye L, Han X Q, Xu Y Y, *et al.* Spatial analysis for spring bloom and nutrient limitation in Xiangxi bay of three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, **127**(1-3): 135-145.
- [24] 徐耀阳, 蔡庆华, 黎道丰, 等. 三峡水库香溪河库湾拟多甲藻昼夜垂直分布初步研究[J]. *武汉植物学研究*, 2008, **26** (6): 608-612.
- [25] 周广杰, 况琪军, 胡征宇, 等. 香溪河库湾浮游藻类种类演替及水华发生趋势分析[J]. *水生生物学报*, 2006, **30**(1): 42-46.
- [26] 郑丙辉, 曹承进, 张佳磊, 等. 三峡水库支流大宁河水华特征研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(11): 3218-3226.
- [27] 张永生, 郑丙辉, 王坤, 等. 三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布[J]. *环境科学*, 2013, **34**(6): 2166-2175.
- [28] 吴光应, 刘晓霁. 大宁河水体营养盐状况与水华爆发之间关系分析[J]. *中国环境监测*, 2009, **25**(4): 98-101.
- [29] 张佳磊, 郑丙辉, 刘录三, 等. 三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较[J]. *环境科学*, 2012, **33**(10): 3382-3389.
- [30] 刘敏, 吴光应. 三峡库区大宁河 2010 年和 2011 年春季水华特征研究[J]. *安全与环境工程*, 2013, **20**(1): 100-104.
- [31] 高继军, 周怀东, 陆瑾, 等. 三峡水库水环境质量监测技术方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [32] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 243-257.
- [33] 张永生, 郑丙辉, 姜霞, 等. 三峡库区大宁河藻细胞昼夜垂直迁移研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(11): 3787-3796.
- [34] Song Y Z, Kong F F, Xue Y, *et al.* Responses of chlorophyll and MDA of *Vallisneria natans* to nitrogen and phosphorus availability and epiphytic algae [J]. *Journal of Freshwater Ecology*, 2015, **30**(1): 85-97.
- [35] 朱广伟. 太湖富营养化现状及原因分析[J]. *湖泊科学*, 2008, **20**(1): 21-26.
- [36] Hussein E E, Dabrowski K, El-Saidy D M S D, *et al.* Effect of dietary phosphorus supplementation on utilization of algae in the grow-out diet of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* [J]. *Aquaculture Research*, 2014, **45**(9): 1533-1544.
- [37] Chu Z S, Jin X C, Yang B, *et al.* Buoyancy regulation of *Microcystis flos-aquae* during phosphorus-limited and nitrogen-limited growth [J]. *Journal of Plankton Research*, 2007, **29**(9): 739-745.
- [38] Douglas E J, Haggitt T R, Rees T A V. Relationship between tissue phosphorus and seawater phosphate in the brown alga *Hormosira banksii* [J]. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 2015, **49**(1): 64-68.

CONTENTS

Composition and Source Apportionments of Saccharides in Atmospheric Particulate Matter in Beijing	LIANG Lin-lin, Guenter Engling, DUAN Feng-kui, <i>et al.</i> (3935)
Comparing Cell Toxicity of <i>Schizosaccharomyces pombe</i> Exposure to Airborne PM _{2.5} from Beijing and Inert Particle SiO ₂	LIU Meng-jiao, HUANG Yi, WEN Hang, <i>et al.</i> (3943)
Analysis on Regional Characteristics of Air Quality Index and Weather Situation in Beijing and Its Surrounding Cities During the APEC ...	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, WANG Ning, <i>et al.</i> (3952)
Analysis About Spatial and Temporal Distribution of SO ₂ and An Ambient SO ₂ Pollution Process in Beijing During 2000-2014	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (3961)
Characteristics and Formation Mechanism of a Multi-Day Haze in the Winter of Shijiazhuang Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer(SPAMS)	 ZHOU Jing-bo, REN Yi-bin, HONG Gang, <i>et al.</i> (3972)
Modeling Study of A Typical Summer Ozone Pollution Event over Yangtze River Delta	ZHANG Liang, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3981)
Distribution of Regional Pollution and the Characteristics of Vertical Wind Field in the Pearl River Delta	LIU Jian, WU Dui, FAN Shao-jia (3989)
Distribution Characteristics of Urea and Constitution of Dissolved Nitrogen in the Bohai Sea and the Huanghai Sea in Spring	LI Zhi-lin, SHI Xiao-yong, ZHANG Chuang-song (3999)
Relationship Between Agricultural Land and Water Quality of Inflow River in Erhai Lake Basin	PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (4005)
Input Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients Pollution in the Primary Pollution Source of the Daliao River	MA Ying-qun, ZHANG Lei, ZHAO Yan-min, <i>et al.</i> (4013)
Temporal and Spatial Distribution of Nutrients in Daning River Sediments and Their Correlations with Chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area	 ZHANG Yong-sheng, LI Hai-ying, REN Jia-ying, <i>et al.</i> (4021)
Summer Greenhouse Gases Exchange Flux across Water-air Interface in Three Water Reservoirs Located in Different Geologic Setting in Guangxi, China	 LI Jian-hong, PU Jun-bing, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (4032)
Distribution of Redox Zone at Different Water Layers in the Presence of Periphyton and the Responsible Microorganisms	WANG Feng-wu, LIU Wei, WAN Juan-juan, <i>et al.</i> (4043)
Distribution Characteristics and Source of Fluoride in Groundwater in Lower Plain Area of North China Plain: A Case Study in Nanpi County	 KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, ZHAO Huan, <i>et al.</i> (4051)
Distribution Characteristics of Fluoroquinolones Antibiotics in Surface Water and Groundwater from Typical Areas in A City	CUI Ya-feng, HE Jiang-tao, SU Shi-hui, <i>et al.</i> (4060)
Distribution of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Sediments from Adjacent Waters of Rushan Bay	HE Hui, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (4068)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Sterols in Qingmuguan Underground River	LIANG Zuo-bing, SHEN Li-cheng, SUN Yu-chuan, <i>et al.</i> (4074)
Water-Sediment Partition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, XIAO Shi-zhen (4081)
Variation Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Subterranean River During Rainfall Events	JIANG Ze-li, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (4088)
Distribution and Transportation Characteristics of Heavy Metals in Nanshan Laolongdong Subterranean River System and Its Capacity of Self-Purification in Chongqing	 REN Kun, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (4095)
Distribution of Mercury in Plants at Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	LIANG Li, WANG Yong-min, LI Xian-yuan, <i>et al.</i> (4103)
Development of Sediment Micro-Interface Under Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combination Disturbance	WANG Ren, LI Da-peng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4112)
Norfloxacin Solution Degradation Under Ultrasound, Potassium Persulfate Collaborative System	WEI Hong, SHI Jing-zhuan, LI Jia-lin, <i>et al.</i> (4121)
Degradation of Acid Orange 7 with Persulfate Activated by Silver Loaded Granular Activated Carbon	WANG Zhong-ming, HUANG Tian-yin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (4127)
Kinetics and Reactive Species Analysis of Dimetridazole Degradation by TiO ₂	CHEN Dong-mei, YU Ze-bin, SUN Lei, <i>et al.</i> (4135)
Performance and Mechanism of Ferric Tannate in the Removal of Inorganic Nitrogen from Wastewater	ZHANG Rui-na, LI Lin, LIU Jun-xin (4141)
Performance of an Intermittent Aeration Membrane Bioreactor for Removal of Veterinary Antibiotics from Piggery Wastewater	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (4148)
Advanced Treatment of Incineration Leachate with O ₃ -BAC and Double O ₃ -BAC	DU An-jing, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4154)
Effects of Hydraulic Retention Time and Dissolved Oxygen on a CANON Reactor with Haydite as Carrier	WANG Hui-fang, FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (4161)
Inhibiting Form of Ammonium to AOB and Inhibiting Rule	CUI Jian-hong, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4168)
Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Denitrification for Treatment of Municipal Sewage	ZHANG Shi-ying, WU Peng, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (4174)
Rapid Start-up of Simultaneous Nitrification and Denitrification Coupled Phosphorus Removal Process and Its Performing Characteristics	LENG Lu, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (4180)
Effect of HCO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Efficiency in Partial Nitritation-ANAMMOX Process	LI Xiang, CHENG Zong-heng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4189)
Research on Cultivation and Stability of Nitritation Granular Sludge in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (4195)
Influence of the Application of Activated Persulfate on Municipal Sludge Conditioning	XU Xin, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (4202)
Influence of Temperature on the Anaerobic Packed Bed Reactor Performance and Methanogenic Community	XIE Hai-ying, WANG Xin, LI Mu-yuan, <i>et al.</i> (4208)
Research on the Screening Method of Soil Remediation Technology at Contaminated Sites and Its Application	BAI Li-ping, LUO Yun, LIU Li, <i>et al.</i> (4218)
Comprehensive Risk Assessment of Soil Heavy Metals Based on Monte Carlo Simulation and Case Study	YANG Yang, DAI Dan, CAI Yi-min, <i>et al.</i> (4225)
Heavy Metals Pollution in Topsoil from Dagang Industry Area and Its Ecological Risk Assessment	ZHANG Qian, CHEN Zong-juan, PENG Chang-sheng, <i>et al.</i> (4232)
Effects of Land Use Type on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Water-Stable Aggregates in Jinyun Mountain	LI Zeng-quan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4241)
Influence of Different Straws Returning with Landfill on Soil Microbial Community Structure Under Dry and Water Farming	LAN Mu-ling, GAO Ming (4252)
Carbon Source Utilization Characteristics of Soil Microbial Community for Apple Orchard with Interplanting Herbage	DU Yi-fei, FANG Kai-kai, WANG Zhi-kang, <i>et al.</i> (4260)
Effects of Different Kinds of Organic Materials on Soil Heavy Metal Phytoremediation Efficiency by <i>Sedum alfredii</i> Hance	YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, <i>et al.</i> (4268)
<i>In-situ</i> Study on Effects of Combined Amendment on Translocation Control of Pb and Cd in Soil-Vegetable System	ZHU Wei, LIU Li, WU Yan-ming, <i>et al.</i> (4277)
Effects of Rice Cultivar and Typical Soil Improvement Measures on the Uptake of Cd in Rice Grains	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (4283)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of PAHs in Water and Fishes from Daqing Lakes	WANG Xiao-di, ZANG Shu-ying, ZHANG Yu-hong, <i>et al.</i> (4291)
Depth Profiles of Methane Oxidation Kinetics and the Related Methanotrophic Community in a Simulated Landfill Cover	XING Zhi-lin, ZHAO Tian-tao, GAO Yan-hui, <i>et al.</i> (4302)
Enhanced Performance of Rolled Membrane Electrode Assembly by Adding Cation Exchange Resin to Anode in Microbial Fuel Cells	MEI Zhuo, ZHANG Zhe, WANG Xin (4311)
Development of a Monoclonal Antibody-Based Sensor for Environmental Pyrene and Benzo(a)pyrene Detection	LI Xin, QIAO Yan, ZHONG Guo-zhen (4319)

《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11月15日 第36卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 11 Nov. 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