

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第11期

Vol.33 No.11

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

京津冀与长三角区域大气 NO₂ 污染特征 王英, 李令军, 刘阳 (3685)

2008~2011年夏季京津冀区域背景大气污染变化分析 杨俊益, 辛金元, 吉东生, 朱彬 (3693)

沧州市大气污染特征观测研究 王永宏, 胡波, 王跃思, 刘伟, 张武 (3705)

华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源 李月梅, 潘月鹏, 王跃思, 王英锋, 李杏茹 (3712)

广州市交通主干道空气中苯系物的测量 叶丛雷, 谢品华, 秦敏, 凌六一, 郑尼娜, 刘文彬, 黄祖照 (3718)

基于实时交通信息的道路机动车动态排放清单模拟研究 黄成, 刘娟, 陈长虹, 张健, 刘登国, 朱景瑜, 黄伟明, 巢渊 (3725)

柴油轿车燃用煤基 F-T 合成油的排放特性 胡志远, 程亮, 谭丕强, 楼狄明 (3733)

九龙江口滨海湿地生源要素空间分布特征 余小青, 杨军, 刘乐冕, 田原, 余正, 王昌付 (3739)

南四湖水体氮、磷营养盐时空分布特征及营养状态评价 舒凤月, 刘玉配, 赵颖, 吴艳鹏, 李爱华 (3748)

天目湖流域湿地对氮磷输出影响研究 李兆富, 刘红玉, 李恒鹏 (3753)

北京市新建城区不透水地表径流 N、P 输出形态特征研究 李立青, 吕书丛, 朱仁肖, 刘泽权, 单保庆 (3760)

云阳宗海湖的分布与来源 张玉玺, 向小平, 张英, 陈玺, 刘景涛, 王金翠, 张媛静, 孙继朝 (3768)

南方某城市地表水体中粪源性污染指示微生物的分布特征研究 孙傅, 沙婧, 刘彦华 (3778)

三峡库区大宁河藻细胞昼夜垂直迁移研究 张永生, 郑丙辉, 姜霞, 郑浩, 钟娜, 陈春宵 (3787)

江淮农村生态型排水系统构建及截污作用研究 单保庆, 李楠, 唐文忠 (3797)

人工湿地植物床-沟壕系统水质净化效果 汪仲琼, 张荣斌, 陈庆华, 魏宏斌, 王为东 (3804)

潜流人工湿地演变对废水中有机物、氮及磷去除的影响 魏泽军, 谢建平, 黄玉明 (3812)

人工湿地处理含盐生活污水的特性研究 高峰, 杨朝晖, 李晨, 金卫红, 邓一兵 (3820)

催化湿式氧化法降解水中的 β-萘酚 刘杰, 于超英, 赵培庆, 陈革新 (3826)

ZVI/EDDS/Air 体系降解水中 2,4-二氯酚的研究 孙倩, 周海燕, 曹梦华, 吴琳娜, 王琳玲, 陈静, 陆晓华 (3833)

微波改性 MWNTs/TiO₂ 复合材料对 1,2,3-三氯苯的光催化降解研究 施周, 张茜, 张伟, 徐舜开, 张骅 (3840)

腐殖酸对生物炭去除水中 Cr(VI) 的影响机制研究 丁文川, 田秀美, 王定勇, 曾晓岚, 徐茜, 陈健康, 艾小雨 (3847)

臭氧氧化-活性污泥法处理含 PVA 工业废水的试验研究 邢晓琼, 黄程兰, 刘敏, 陈滢 (3854)

复合底物对颗粒化 EBPR 系统除磷特性的影响及优化试验研究 徐少娟, 孙培德, 郑雄柳, 董毅 (3859)

进水比例对水解反应器出水水质的影响研究 梁康强, 熊娅, 戚茂荣, 林秀军, 朱民, 宋英豪 (3868)

厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场渗滤液水质水量变化规律的研究 韩智勇, 刘丹, 李启彬, 陈馨 (3873)

我国城市污水处理回用调查研究 郭宇杰, 王学超, 周振民 (3881)

快雌醇和壬基酚在土壤中的吸附-解吸特征 姜鲁, 王继华, 李建忠, 辛佳, 李森, 刘翔 (3885)

黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探 马昕昕, 许明祥, 杨凯 (3893)

半干旱黄土丘陵区土壤结皮的地表水文效应 卫伟, 温智, 陈利顶, 陈瑾, 吴东平 (3901)

广西大石围巨型漏斗土壤中多环芳烃与环境因素 孔祥胜, 祁士华, 蒋忠诚, 黄保健 (3905)

酸性条件下黄铁矿氧化机制的研究 王楠, 易筱筠, 党志, 刘云 (3916)

淋洗条件下砂土和粉土水盐运移过程的监测研究 付腾飞, 贾永刚, 郭磊, 刘晓磊 (3922)

空气注射修复苯污染地下水模拟研究 樊艳玲, 姜林, 张丹, 钟茂生, 贾晓洋 (3927)

不同终点检测 5 种双酚 A 类化合物对 MCF-7 的细胞毒性 张帅帅, 刘堰, 刘树深, 朱祥伟 (3935)

上海世博园后滩湿地糙足类群落特征及其对环境因子的响应 陈立婧, 吴艳芳, 景钰湘, 王聪, 张饮江 (3941)

耐盐石油烃降解菌的筛选鉴定及其特性研究 吴涛, 谢文军, 依艳丽, 李小彬, 王君, 胡相明 (3949)

高效降酚菌株 *Ochrobactrum* sp. CH10 生长动力学和苯酚降解特性的研究 陈晓华, 魏刚, 刘思远, 孙江曼, 王芳芳, 李昊源, 刘宇军 (3956)

四溴双酚 A 好氧降解菌的筛选及其降解特性研究 钱艳园, 刘莉莉, 于晓娟, 丁丛, 王志平, 施玉衡, 李晨君 (3962)

长期施用有机和无机肥对黑土 *nirS* 型反硝化菌种群结构和丰度的影响 尹昌, 范分良, 李兆君, 宋阿琳, 朱平, 彭畅, 梁永超 (3967)

三氯乙烯在不同土壤中的吸附特性及其影响因素研究 何龙, 邱兆富, 吕树光, 逯志昌, 王治立, 隋倩, 林匡飞, 刘勇弟 (3976)

多菌灵在农田土壤中的降解及其影响因子研究 肖文丹, 杨肖娥, 李廷强 (3983)

硫化物对垃圾焚烧污泥焚烧飞灰高温过程中重金属挥发的影响 刘敬勇, 孙水裕 (3990)

关于医疗垃圾飞灰中二噁英在惰性气氛下的低温热脱附研究 纪莎莎, 李晓东, 徐旭, 陈彤 (3999)

第七届环境模拟与污染控制学术研讨会论文

稻田气溶胶 NH₃ 和气体 NO_x 排放在线测定研究 龚巍巍, 栾胜基 (4006)

一种可同时检测挥发性氯代烷烃和氯代烯烃的电子鼻的研制 文晓刚, 刘锐, 蔡强, 万梅, 汤灵容, 陈吕军 (4012)

基于被动采样技术的垃圾焚烧厂及周边大气中 PAHs 分布研究 孙少艾, 李洋, 周轶, 王海蛟, 孙英 (4018)

涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别 丁晓雯, 沈珍瑶 (4025)

人工湿地不同区域基质磷含量的差异分析 曹雪莹, 种云霄, 余光伟, 仲海涛 (4033)

基于 RT-qPCR 选择性检测水中活性病原菌 林怡雯, 李丹, 吴舒旭, 何苗, 杨天 (4040)

消毒副产物生成的温度影响和动力学模型 张小璐, 杨宏伟, 王小任, 付静, 解跃峰 (4046)

一种厌氧微定量研究新方法 张仲良, 吴静, 蒋剑凯, 姜洁, 李怀志 (4052)

梧桐树叶作为反硝化碳源的研究 熊剑锋, 徐华, 阎宁, 张永明 (4057)

降解嗜盐菌 AD-3 的筛选、降解特性及加氧酶基因的研究 崔长征, 冯天才, 于亚琦, 董斐, 杨昕梅, 冯耀宇, 刘勇弟, 林汉平 (4062)

《环境科学》征订启事 (3711) 《环境科学》征稿简则 (3767) 信息 (3998, 4039, 4045, 4056) 专辑征稿通知 (4051)

三峡库区大宁河藻细胞昼夜垂直迁移研究

张永生¹, 郑丙辉^{1*}, 姜霞¹, 郑浩^{1,2}, 钟娜¹, 陈春宵¹

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 西华师范大学国土资源学院, 南充 637009)

摘要: 旨在准确为三峡库区藻华预警提供基础数据, 本研究于 2011 年 7 月底在三峡库区大宁河流域进行藻细胞昼夜垂直迁移试验. 结果表明, 大宁河在此期间, 藻细胞主要以绿藻、蓝藻、硅藻和甲藻为主; 藻细胞在水体中的分布不均匀, 72.5% ~ 76.2% 的藻细胞集中在 0.5 ~ 4.0 m 水体之间, 0 ~ 0.5 m 处藻细胞较少, 占垂直水体藻密度的 7.5% ~ 16.3%, 白天藻细胞 Morisita 指数 (MI) 为 1.41 ~ 1.97, 夜晚 MI 指数为 1.17 ~ 1.55, 叶绿素 a 白天 MI 指数为 1.31 ~ 1.59, 而夜晚 MI 指数为 1.17 ~ 1.39. 藻细胞在水体中存在明显的昼夜垂直迁移现象, 该现象主要发生在 0.5 ~ 4.0 m 水体之间. 水体中的藻密度受营养盐的影响较小, 与可溶性总磷显著相关 ($r=0.89$), 藻密度主要受温度、pH 值和导电率影响, 藻密度与温度、pH 值和导电率呈极显著相关, 相关系数分别为 0.96、0.97 和 -0.99.

关键词: 三峡; 藻细胞; 垂直迁移; 藻华预警; 相关性分析

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)11-3787-10

Vertical Migration of Algal Cells in the Daning River Bay of the Three Gorges Reservoir

ZHANG Yong-sheng¹, ZHENG Bing-hui¹, JIANG Xia¹, ZHENG Hao^{1,2}, ZHONG Na¹, CHEN Chun-xiao¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012, China; 2. College of Land and Resources, China West Normal University, Nanchong 637009, China)

Abstract: To support the basic data for forecast of algal blooms, circadian vertical migration experiment was carried out in the Daning River Bay of the Three Gorges Reservoir in July, 2011. The results were as follows: in this period, different algal species were found in the Daning River Bay, including cyanobacteria, green algae, dinoflagellates and diatoms etc; the distribution of algal cells was uneven, 72.5%-76.2% of algal cells aggregated at 0.5-4.0 m water depths from 10:00 AM to 10:00 AM next day, but 7.5%-16.3% of algal cells aggregated at 0-0.5 m. Morisita's indexes (MI) of algal cells were from 1.41 to 1.97 in day time, and from 1.17 to 1.55 at night. Morisita's indexes of chlorophyll a (Chla) were from 1.31 to 1.59 in day time, and from 1.17 to 1.39 at night. The vertical migration also occurred at 0.5-4.0 m water depths. The algal density was not significantly related with the concentrations of nutrient except that of dissolved total phosphorus (DTP) ($r=0.89$). The algal density was also influenced by water temperature (WT), pH and specific conductance (SPC), and the correlation coefficients were 0.96, 0.97 and -0.99, respectively.

Key words: Three Gorges Reservoir; algal cells; vertical migration; forecast of algal blooms; correlation analysis

藻细胞的垂直迁移规律是探究藻华形成机制、藻华预警的基础研究之一, 不同的藻种在不同的水环境条件下, 藻细胞的垂直迁移规律也不尽相同. 束丝藻从中午到傍晚有 76% ~ 84% 的丝状体浮在水面, 而夜间则有 94% ~ 98% 的丝状体浮在水面^[1]; 铜绿微囊藻夜间聚集在湖面, 上午水层表面以下 0.2 ~ 0.3 m 处的群体密度约 50%^[2]; 蓝丝藻在光强为 $2 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 时漂浮在水面, 当光强为 $3.9 \sim 8.0 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 时, 丝状体达到浮力平衡状态, 而光强超过 $25 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 时, 多数丝状体下沉^[3]; 拟多甲藻白天聚集在水体上层, 晚上在水柱中随机分布^[4]. 这些研究利用某单一藻种的昼夜迁移分析了藻华形成机制^[5,6], 然而野外水体含藻种较多, 某一藻种的垂直迁移规律并不能真实地反映自然环境下全部藻细胞的垂直迁移规律, 并

且野外不同湖库、生态环境和营养状况不同, 导致湖库内的藻细胞垂直迁移现象也不一致. 太湖的优势藻种是微囊藻, 而三峡库区的优势藻种有明显的交替现象^[7], 不同藻种浮力调节机制也不尽相同, 具有伪空胞的藻细胞可以依靠伪空胞和藻群体细胞间空隙调节自身在水体中的垂直迁移^[8-13], 不具有伪空胞的藻细胞垂直迁移研究却较少.

三峡水库蓄水以来, 库区江段从天然河道变成了季调型水库, 受干流顶托作用, 支流流速减缓, 泥沙沉降, 水体扩散能力减弱, 库湾和支流污染物的滞留时间延长^[14], 干流藻密度度较低, 支流藻密度较

收稿日期: 2011-12-30; 修订日期: 2012-05-08

基金项目: 国家国际科技合作计划项目 (2007DFA90510)

作者简介: 张永生 (1977 ~), 男, 博士, 主要研究方向为湖泊生态学、环境生物学, E-mail: yszsunny@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhengbh@craes.org.cn

高,而且呈逐年加重趋势^[15],这种环境极易导致藻华的形成.水华暴发有明显的时间差异,枯水期(5~9月)比丰水期(10~4月)发生藻华的几率高^[16],因此探究三峡库区枯水期藻细胞垂直迁移规律对藻华预警是至关重要的,但是目前该方面的研究较少.

大宁河是三峡库区重要的支流,是著名风景区小三峡所在河流,人为影响较其他支流严重,并且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,而且上游大昌镇污水处理厂日排放生活污水 500 t·d⁻¹^[17],该河流的污染源在三峡库区具有典型的代表性,因此本研究在枯水期对大宁河水体内藻细胞的昼夜垂直迁移规律进行分析,以期探究三峡库区藻华形成机制和三峡库区藻华预警体系提供基础数据.

1 材料与方法

1.1 野外采样

采样点(图1)位于三峡库区大宁河白水河交汇处(31°06′32″N, 109°53′40″E),试验开展时正值三峡库区处于低水位运行期间,采样点处的水体深度为 10 m,试验于 2011 年 7 月 30 日 10:00 至 31 日 10:00,期间气温 28~35℃,风速为 0.2 m·s⁻¹,风向南偏东 16.12°.水位变化不明显,采样点处无大型船只来往,因此所取样品能够代表野外水体内藻细胞的真实分布.采样时每 2 h 定点分层监测,分层深度为 0、0.5、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、

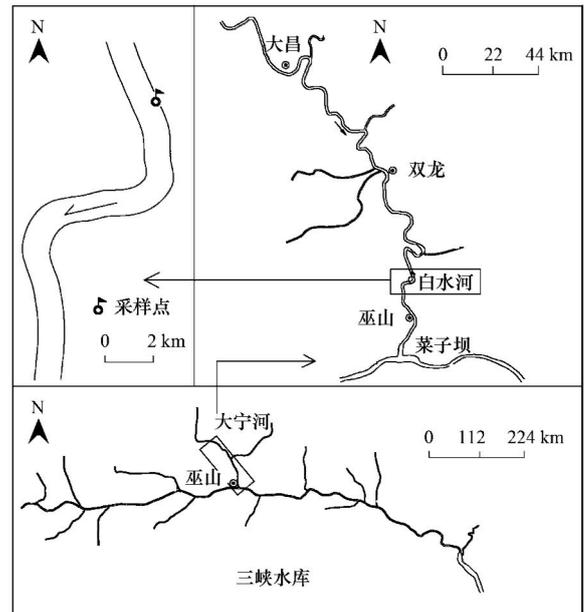


图1 采样点在三峡库区的地理位置

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

7.0、8.0、9.0、10.0 m,每一水层取一个样品.

1.2 测定方法

利用 Onset 照度计测定不同水层的光强和水温.利用 Rivecat 多普勒 YCN-RC3025 测定不同水层的流速,由于测定不同流速所需时间较长,为不影响试验进展,依据前期研究结果,仅选择有代表性的时间段测试流速.不同水层光强水温 and 流速如表 1~表 3.

表1 不同水层的光照强度/ $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$

Table 1 Light intensity at different water depths/ $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$

水深/m	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	24:00	02:00	04:00	06:00	08:00
0	8 271	10 002	8 722	7 577	1 954	109	9	3	2	9	1 032	4 127
0.5	7 520	9 329	7 293	6 621	982	75	1	0	0	2	864	3 284
1.0	6 682	8 529	6 827	4 528	736	32	0	0	0	0	574	2 103
2.0	5 094	7 021	4 868	3 961	495	6	0	0	0	0	325	1 003
3.0	3 362	4 953	3 587	3 001	108	0	0	0	0	0	79	776
4.0	2 787	3 725	2 853	2 497	71	0	0	0	0	0	24	249
5.0	1 883	2 198	1 854	1 536	4	0	0	0	0	0	2	69
9.0	402	805	458	398	0	0	0	0	0	0	—	4

表2 不同水层的水温/℃

Table 2 Temperature of water at different water depths/℃

水深/m	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	24:00	02:00	04:00	06:00	08:00
0	32.25	32.45	33.35	33.96	34.39	35.06	34.00	33.30	31.10	31.11	31.25	30.94
0.5	31.36	30.24	31.37	31.86	32.38	34.89	31.86	32.63	31.73	31.49	31.33	30.28
1.0	30.35	30.38	30.41	30.69	30.78	30.58	30.69	30.71	30.10	30.09	30.51	28.98
2.0	28.35	27.85	28.13	29.12	29.47	28.98	28.15	28.77	28.43	28.39	28.70	27.84
3.0	26.84	26.6	26.67	26.77	26.83	27.69	27.01	27.09	27.27	27.25	27.30	26.63
4.0	26.11	26.13	26.15	26.32	26.41	26.58	26.34	26.07	26.20	26.18	26.14	25.81
5.0	25.65	25.61	25.66	25.64	25.59	25.72	25.79	25.65	25.70	25.66	25.73	25.55
9.0	24.84	25.06	25.07	25.09	25.12	25.10	25.01	25.05	25.10	24.99	24.97	25.03

表3 不同水层不同时段流速¹⁾/m·s⁻¹
Table 3 Speed of water at different water depths/m·s⁻¹

水深/m	10:00	14:00	18:00	22:00	02:00	06:00
0	0.05	0.05	0.04	0.02	0.01	0.02
0.5	0.05	0.06	0.02	0.01	0	0.03
2.0	0.04	0.04	-0.01	0.01	0	-0.01
4.0	0.02	0.02	0	0	0.01	0.01
10.0	0.01	0.02	0.01	-0.01	0	0.01

1) 负值为逆流

现场用水质多参数仪 YSI26600 (美国, 金泉公司) 测定电导率、溶解氧和 pH. 对野外水样直接利用电子显微镜对藻细胞进行分类和计数, 每个视野计数 3 次, 每个样品观察 3 个视野, 藻种的鉴定参考水生生物学图谱数据库^[18]; 叶绿素 a 采用分光光度法^[19], 采集 0、0.5、2.0、5.0 和 9.0 m 处水样, 用于总氮、硝态氮和亚硝态氮、铵态氮、总磷、溶解性总磷和磷酸盐的实验室测定. 水质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), 氨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), 溶解性总磷的测定利用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法 (GB 11893-89), 溶解性正磷酸盐的测定利用钼酸铵分光光度法 (GB 11893-89).

1.3 数据处理

藻细胞密度和叶绿素 a 的垂直分布格局利用 Morisita 指数 (Morisita's index, MI) 检验^[20], 该指数的计算公式为:

$$MI = n \times \left(\frac{\sum_{i=1}^n X_i^2}{\sum_{i=1}^n X_i} \right) / \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \right)^2 - \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \right]$$

式中, n 为水柱取样的分层数, X_i 为水柱中第 i 层的藻细胞密度或叶绿素 a 浓度. 当 $MI = 1$ 时, 表示藻细胞和叶绿素 a 的含量在水柱中随机分布; 当 $MI < 1$ 时, 表示藻细胞和叶绿素 a 的含量在水柱中均匀

分布; 当 $MI > 1$ 时, 表示藻细胞和叶绿素 a 的含量在水柱中集群分布^[21-23].

每个样品相关指标重复 3 次, 取其平均; 相关性分析利用 SPASS 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 藻细胞的种类、形态和分布

在整个昼夜垂直迁移试验过程中, 大部分藻细胞均以分散的单细胞形态存在 (图 2), 很少发现藻群体. 藻细胞的门类主要以蓝藻门、绿藻门、硅藻门和甲藻门为主. 蓝藻门主要有微囊藻、束丝藻、鱼腥藻等, 绿藻门主要有肾形藻、卵囊藻、小球藻、盘星藻、月牙藻、实球藻等, 硅藻门主要有直链藻、小环藻、环状扇形藻、细齿棱形藻、角甲藻等, 甲藻门主要有埃尔多甲藻等.

不同时间垂向水层中藻细胞含量不尽相同. 上午 10:00, 蓝藻占 0 m 处所有藻细胞的比列最大, 为 36.1%; 绿藻占 0 m 处所有藻细胞的 26.6%, 2.0 m 处的该比例为 28.9%; 硅藻占 0.5 m 处藻细胞比例最大 35.9%. 14:00, 蓝藻占 0 m 处所有藻细胞的 26.9%, 比 10:00 百分含量 (36.2%) 下降, 0.5 m 和 2.0 m 处百分含量 (25.0%、30.5%) 与 10:00 百分含量 (25.6%、27.6%) 相近; 绿藻占 0 m 处所有藻细胞的 26.5%, 与 10:00 的百分比 (26.6%) 差异不大, 绿藻在 0.5 和 2.0 m 处占该处在细胞的百分比分别为 34.0% 和 34.7%, 相对 10:00 百分比高 (25.6% 和

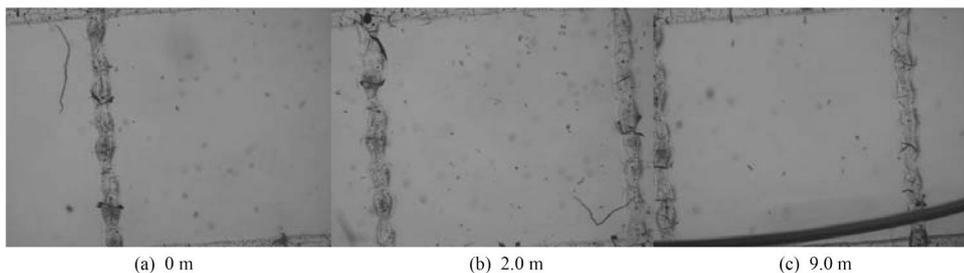


图2 12:00 水深 0、2.0 和 9.0 m 处藻细胞的种类及形态

Fig. 2 Species and morphology of algae at 12:00 pm at water depths of 0, 2.0 and 9.0 m, respectively

28.9%); 硅藻占 0 m 处所有藻细胞的 34.7%, 在其他水层, 藻细胞的百分比随水深度呈降低趋势; 甲藻和其他藻种的百分含量在此期间相对稳定. 18:00, 蓝藻占 0 m 处所有藻细胞的 8.8%, 在 0.5 m 和 2.0 m 处其百分比含量相对稳定, 分别为 10.8% 和 12.9%; 绿藻占 0 m 处所有藻细胞的 64.3%, 且随着水深其百分比降低; 除了水深 9.0 m 处, 硅藻在其他各水层中, 占相应水层内藻细胞的百分比较高为 23.6% ~ 44.5%, 其百分比呈增加趋势, 水深 9.0 m 处其百分比为 15.5%. 22:00, 蓝藻在 0、0.5、2.0 和 5.0 m 处分别占相应水层内藻细胞的 32.2%、18.9%、15.9% 和 15.7%; 绿藻占 0 m 处所有藻细胞的 39.1%, 比

18:00 下降, 但是各水层的绿藻百分比相对均匀, 为 33.3% ~ 44.0%; 硅藻在各水层的百分含量与 18:00 类似; 次日 02:00, 各藻种在各水层中含量相对稳定, 蓝藻的百分含量约为 33.3% ~ 41.8%; 绿藻的百分含量约为 34.9% ~ 45.1%; 硅藻的百分含量约为 10.7% ~ 18.2%; 甲藻的百分含量约为 3.6% ~ 6.4%. 次日 06:00, 蓝藻占 0 m 处所有藻细胞的比例最大为 39.6%; 而绿藻的百分比相对稳定, 约为 29.7% ~ 36.2%; 而硅藻在 0、0.5、2.0 和 5.0 m 处, 占相应水层内藻细胞百分比分别为 17.1%、24.8%、27.0% 和 21.2%; 甲藻含量相对为稳定, 4.1% ~ 9.0% (图 3).

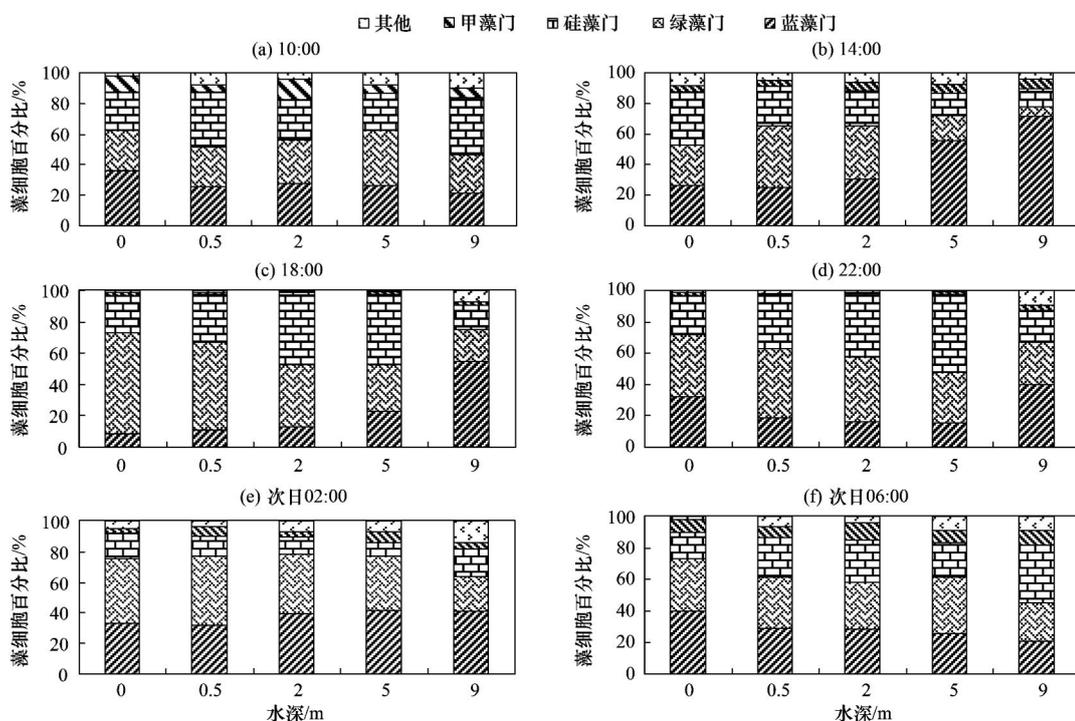


图 3 不同时间藻细胞在不同水层的百分比

Fig. 3 Percentage of algal species at different times at different water depths

不同水层间藻细胞昼夜变化明显. 0 m 处, 昼夜期间蓝藻占 0 m 处藻细胞的比例逐渐变小, 18:00 其百分比仅为 8.8%, 随后增加; 绿藻占 0 m 处藻细胞的比例变化趋势先变大后变小, 18:00 该比例最大, 为 64.3%; 硅藻在 14:00 的百分含量最大为 34.7%, 其他时间含量在 16.7% ~ 24.5% 之间. 甲藻在上午 10:00 和次日 06:00 占 0 m 处藻细胞的比例较大, 分别为 10.0% 和 8.1%, 其他时间其比例 $\leq 4.0\%$. 0.5 m 处, 昼夜期间蓝藻在该处比例变化趋势与 0 m 类似, 18:00 其百分比为 10.7%; 绿藻占该处藻细胞的比例在 18:00 最大为 55.9%, 绿藻在该处比例变化趋势也与 0 m 的变化趋势类似; 硅

藻在次日 02:00 百分含量最小为 12.9%, 其他时间含量较为稳定, 在 24.7% ~ 35.8% 之间; 甲藻在昼夜期间在此处的比例 $\leq 7.0\%$. 2.0 m 处, 次日 02:00 蓝藻占该处藻细胞的比例最高 39.2%; 绿藻在昼夜期间的比例较为稳定 29.7% ~ 41.4%; 此处硅藻在昼夜期间的比例变化较大, 18:00 硅藻占此处藻细胞比例最大 45.6%, 而次日 02:00 其比例最小, 仅为 10.7%; 甲藻在 18:00 和 22:00 占此处藻细胞比例较小, 分别为 4.6% 和 5.6%. 5.0 m 处, 14:00 蓝藻占该处藻细胞的比例最高 55.6%, 22:00 其比例最小 15.7%; 14:00 绿藻占该处藻细胞的比例最低 16.6%; 22:00 硅藻占此处藻细胞比例最大

48.9%，而次日 02:00 其比例最小，仅为 9.3%；甲藻在 18:00 和 22:00 占此处藻细胞比例较小，分别为 2.1% 和 2.2%。9.0 m 处，14:00 蓝藻占该处藻细胞的比例最高 71.6%，次日 06:00 其比例最小 21.2%；绿藻在此处的比例较低，14:00 其比例仅为 5.9%，22:00 其比例最高，也仅为 27.0%；10:00 硅藻占该处藻细胞的比例最高 37.5%，14:00 其比例最低 11.9%；甲藻的比例较为稳定 7.1% ~ 13.6% (图 4)。

2.2 藻细胞和叶绿素 a 的昼夜垂直迁移及变化

昼夜过程中，藻密度分布不均匀。水深 0 ~ 0.5 m 之间，藻细胞较少，仅占垂直水体藻细胞的 7.5% ~ 16.3%，上午 10:00，该水层藻细胞最多 (16.3%)，随后藻细胞所占比例逐步下降，直至 22:00 水表面的藻细胞达到最少 (7.5%)，随后水表面的密度百分比又逐渐升高；大部分藻细胞集中在水深 0.5 ~ 4.0 m 之间，其百分比约为 72.5% ~ 76.2%，此水层中各时段内藻细胞的百分比没有明显的变化，约为 74% 左右，仅在 10:00 高达 76.2%。水深 4.0 ~ 9.0 m 之间，藻细胞占垂直水体全部藻细胞的 7.5% ~ 18.1%，其百分比为从 10:00 (7.5%) 逐渐增大，至 22:00 藻细胞在该水层的百分比达到最大为 18.1%，随后逐渐降低，其中 14:00 的百分比 (11.1%) 略比 12:00 低 (11.4%) (表 4)。

尽管昼夜期间藻细胞的百分比在 0.5 ~ 4.0 m 之间变化差异不大，但在此水层间内部，藻细胞垂直迁移现象明显。藻细胞密度上午 10:00 最大值出现在水下 1.0 m，为 $5.45 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ ；12:00 ~ 16:00 藻密度最大值出现在水下 0.5 m，分别为 $5.20 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 、 $5.07 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 和 $6.61 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ ；18:00 藻密度最大值出现在水下

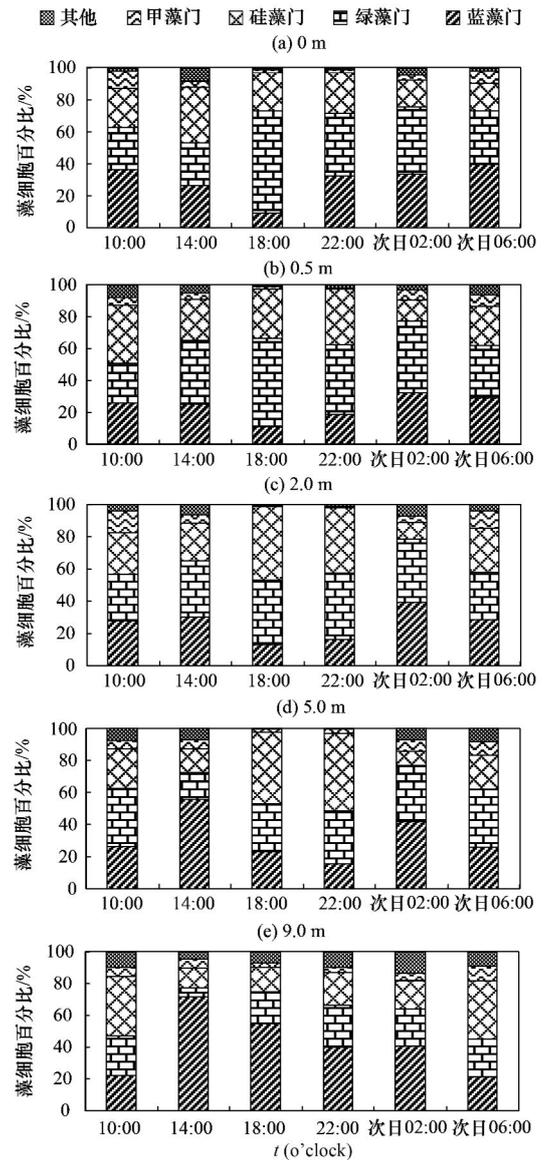


图 4 不同水层藻细胞随时间变化的百分比
Fig. 4 Percentage of algal species at different water depths at different times

表 4 不同水层间藻细胞密度的百分比/%

Table 4 Percentages of algal cells at different times at different water depths gaps/%

水深/m	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	24:00	02:00	04:00	06:00	08:00
0 ~ 0.5	16.3	14.3	13.6	11.6	11.2	8.9	7.5	9.7	10.7	11.9	12.4	16.2
0.5 ~ 4.0	76.2	74.3	75.3	74.5	73.5	74.8	74.4	72.5	74.7	74.1	74.7	73.6
4.0 ~ 9.0	7.5	11.4	11.1	13.9	15.3	17.3	18.1	17.8	14.6	14.0	12.9	10.2

1.0 m，为 $4.56 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ ；20:00 藻密度最大值出现在水下 2.0 m，为 $5.02 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ ；22:00 和 00:00 藻密度最大值出现在水下 1.0 m，分别为 $5.24 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ 和 $5.57 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ ；次日凌晨 02:00 ~ 06:00 藻密度最大值出现的位置依次降低，分别为水下 0.5、1.0 和

2.0 m，分别为 5.05×10^5 、 4.78×10^5 和 $5.78 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ ；次日上午 08:00 藻密度最大值出现的位置为 0.5 m，为 $4.66 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ ，次日上午 10:00 藻细胞密度最大值再次出现在水下 1 m，为 $5.07 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ (图 5)。

叶绿素 a 的分布和藻细胞的分布类似，10:00

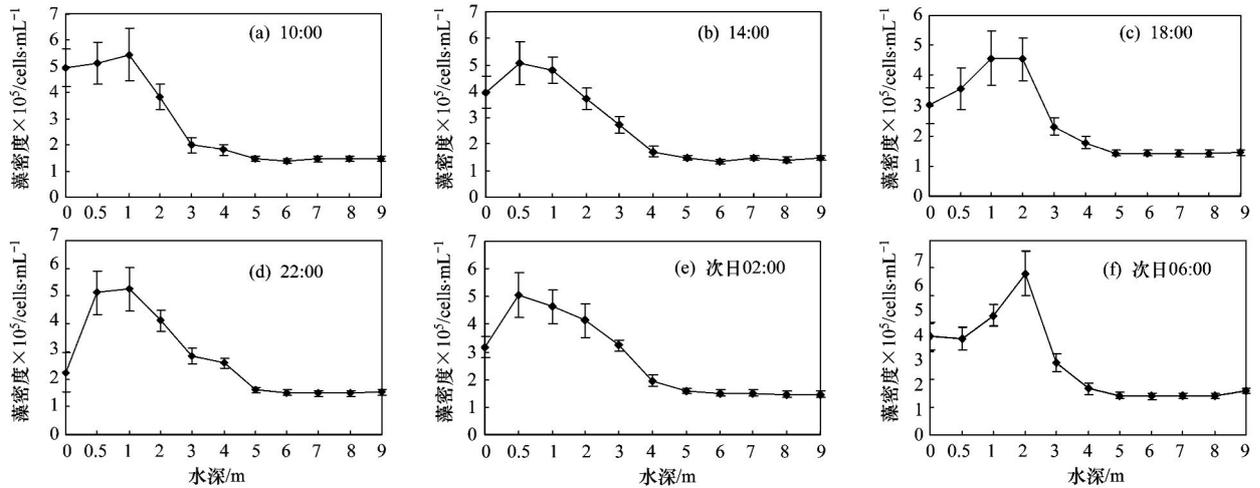


图5 不同时间水体中藻细胞的分布

Fig. 5 Distributions of algal densities at different times

叶绿素 a 含量最大值在 1.0 m, 为 $24.03 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 12:00 ~ 14:00 叶绿素 a 的含量最大值在 0.5 m, 为 $24.24 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $25.31 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 10:00 ~ 14:00, 叶绿素 a 主要集中在 0.5 和 1.0 m 处, 该两水层间的叶绿素 a 含量差异不显著; 16:00 ~ 18:00 叶绿素 a 的含量最大值在 1.0 m, 为 $28.43 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $28.34 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 20:00 ~ 24:00 叶绿素 a 的含量出现的位置分别是

1.0、0.5 和 1.0 m, 其最大值为 $33.66 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $33.86 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 次日凌晨 02:00 ~ 04:00, 叶绿素 a 最大量在 0.5 m 处, 分别为 $29.42 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $28.21 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 叶绿素 a 主要集中在水下 0.5 ~ 1.0 m 之间, 两个水层之间叶绿素 a 的含量差异不显著; 次日早上 06:00 ~ 08:00, 叶绿素 a 的最大值在水下 1.0 m, 最大量分别为 $29.42 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $28.21 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 6).

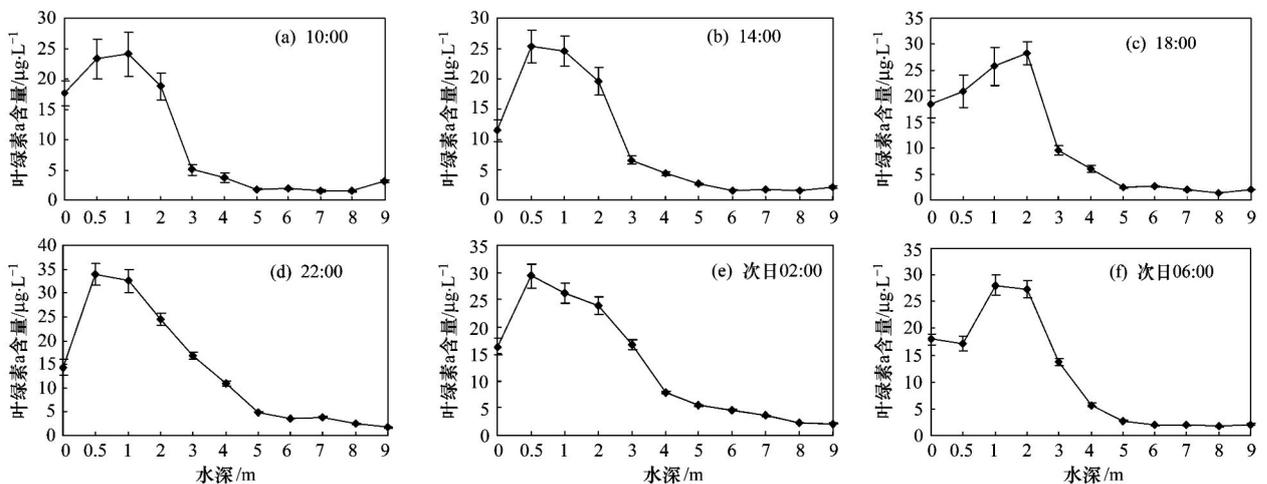


图6 不同时间水体中叶绿素 a 含量的分布

Fig. 6 Distributions of Chl a at different times

在昼夜过程中, 藻细胞均呈现聚集状态, 并且分布极不均匀, 白天的聚集程度比夜晚严重, 白天 MI 指数 1.41 ~ 1.97 之间, 而夜晚 MI 指数 1.17 ~ 1.55 之间. 而叶绿素 a 的分布也表现出与藻细胞分布类似的趋势, 白天聚集程度较重, 夜晚聚集程度较轻, 但聚集程度比藻细胞的聚集程度轻, 白天 MI 指数 1.31 ~ 1.59 之间, 而夜晚 MI 指数 1.17 ~ 1.39 之间

(表 5).

2.3 藻细胞分布的影响因素

相关性分析表明, 藻密度与叶绿素 a、水温呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.96 和 0.97, 与 pH 值、可溶性总磷显著相关, 相关系数分别为 0.92 和 0.89; 与导电率呈极显著负相关, 相关系数为 -0.97. 叶绿素 a 与水温、pH 值、可溶性总磷、

表 5 藻密度和叶绿素 a 昼夜 MI 指数

Table 5 Morisita's index (MI) of algal densities and chla in day time and at night

项目 ¹⁾	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	24:00	02:00	04:00	06:00	08:00
MI-AD	1.84	1.97	1.92	1.87	1.71	1.52	1.55	1.32	1.17	1.21	1.41	1.67
MI-Chla	1.59	1.55	1.51	1.42	1.47	1.39	1.22	1.17	1.21	1.33	1.39	1.31

1) MI-AD:藻密度的 MI 指数; MI-Chla:叶绿素 a 的 MI 指数

PO_4^{3-} 呈显著相关,相关系数分别为 0.88、0.93、0.91 和 0.92;与导电率呈显著相关,相关系数为 -0.88。但是本研究没有发现藻细胞和叶绿素与其生长极为密切的光强有相关性。研究还发现光强与水温存在极显著相关,其相关系数为 0.98;与 pH 显著相关,其相关系数 0.86;与导

电率与透明度负相关,其相关系数分别为 -0.91 和 -0.81;导电率分别与水温和 pH 值呈极显著负相关,相关系数为 -0.98 和 -0.99。浊度与总磷呈显著负相关,其相关系数分别为 -0.90,溶解性的总磷与 PO_4^{3-} 呈极显著正相关($r = 0.97$) (表 6)。

表 6 相关指标的相关性分析¹⁾

Table 6 Correlation analysis of related indexes

	AD	Chla	LI	WT	SPC	DO	pH	TUR	TP	DTP	PO_4^{3-}	TN	NH_4^+	NO_3^-	NO_2^-
AD	1														
Chla	0.96**	1													
LI	0.73	0.76	1												
WT	0.97**	0.88*	0.98**	1											
SPC	-0.97**	-0.88*	-0.91**	-0.98**	1										
DO	0.59	0.77	0.71	0.41	-0.38	1									
pH	0.92*	0.93*	0.86*	0.99**	-0.99**	0.49	1								
TUR	-0.32	-0.36	-0.81*	-0.29	0.12	-0.58	-0.26	1							
TP	0.31	0.33	0.43	0.31	-0.14	0.52	0.28	-0.90*	1						
DTP	0.89*	0.91*	0.33	0.82	-0.77	0.74	0.83	-0.59	0.41	1					
PO_4^{3-}	0.83	0.92*	0.54	0.71	-0.70	0.84	0.76	-0.50	0.31	0.97**	1				
TN	0.55	0.32	0.67	0.69	-0.73	-0.34	0.64	0.31	-0.17	0.19	0.04	1			
NH_4^+	0.54	0.59	0.54	0.48	-0.46	0.60	0.53	-0.32	0.63	0.33	0.33	0.15	1		
NO_3^-	0.35	0.11	0.62	0.52	-0.49	-0.45	0.42	0.40	-0.17	0.27	0.07	0.75	-0.39	1	
NO_2^-	-0.37	-0.18	-0.67	-0.52	0.37	0.08	-0.42	0.53	-0.70	-0.23	0.00	-0.50	-0.40	-0.46	1

1) **表示极显著相关 $p < 0.01$; *表示显著相关 $p < 0.05$; AD:藻密度; Chla:叶绿素 a; LI:光强; WT:水温; SPC:导电率; DO:溶解氧; TUR:浊度

3 讨论

3.1 大宁河藻细胞的垂直迁移特征

藻细胞垂直迁移是探究藻华形成机制和藻华预警体系等研究内容的重要组成部分。由于研究的目的不同,藻细胞垂直迁移研究的研究地点及时间也不尽相同。在探究藻华形成机制方面,藻细胞垂直迁移研究试验频率较高时间较长,但是藻细胞垂直迁移试验作为藻华预警体系的有机组成部分^[24],特别是短期预警(72 h 或 48 h 内),试验时间较短,且尽量减少其他因素对细胞垂直迁移的影响,真实反映野外原位藻细胞自身的垂直迁移规律。本研究旨在为建立适合大宁河藻华预警体系提供数据,枯水期是大宁河易出现藻华时期^[17,24],在此期间多次藻细胞昼夜垂直迁移研究结果表明其规律类似,但藻密度差异较大,不宜将多次试验数据整合平均后处

理,以便造成试验现象不明显,甚至给读者误导,前人在研究藻细胞垂直运动时,研究周期为昼夜为单位^[1~4],本研究借鉴了前人的试验周期。

目前藻细胞垂直迁移研究都是基于单一藻种^[1~4],而野外的藻种较多,其藻华形成机制与单一藻种不同。本研究野外原位试验表明,大宁河水体中没有明显的优势藻种,多个藻种并存,主要以绿藻、蓝藻、硅藻和甲藻为主,并且大部分以单细胞的形态存在,没有形成群体,进而不能形成群体细胞间空隙,而绿藻和硅藻等并不含有伪空胞,因此它们在水体中的垂直迁移机制和含有伪空胞的蓝藻并不同,含有伪空胞的蓝藻可以通过伪空胞和群体细胞间空隙调节自身在水体中的位置,但不含伪空胞并且不能形成群体的绿藻等藻种可能通过自身的鞭毛在水体迁移,以获得营养物质^[7-12]。在本研究中并未发现很大藻群体,因此藻细胞不会受到胞外多糖

的“束缚”,在不良的生态环境下,具有鞭毛的藻细胞可以利用鞭毛而“各奔东西”.绿藻等依靠自身的鞭毛使其自身在水体中迁移的能力可能是为弥补自身没有浮力调节器官,为适应不良环境,在长期的进化过程中形成的.

Porat 等^[1]认为束丝藻从中午到傍晚有 76% ~ 84% 的丝状体浮在水面,而夜间则有 94% ~ 98% 的丝状体浮在水面;Wallace 等^[2]则认为铜绿微囊藻夜间聚集在湖面,而上午水层表面 0.2 ~ 0.3 m 处的群体密度下降约 50%. 本研究发现在大宁河水体中藻细胞昼夜期间的分布不均匀,72.4% ~ 76.2% 的藻细胞聚集在 0.5 ~ 4.0 m 水体之间,尤其 0.5 ~ 2.0 m 之间,而在 0 ~ 0.5 m 的藻细胞仅有 7.5% ~ 16.3%,而且藻细胞垂直迁移也主要集中在 0.5 ~ 4.0 m 水体之间,4.0 ~ 9.0 m 之间藻细胞密度相对稳定,因此推测大宁河的藻华形成机制可能与其他湖泊(太湖、巢湖等)的藻华形成机制并不相同. 目前根据太湖和巢湖等藻华特征而研制去除水深 0.3 米之内的藻华的装置在大宁河也许并不可行,而且大宁河内藻细胞的昼夜垂直迁移现象严重,白天的藻细胞聚集程度较高,特别是 10:00 ~ 16:00,MI 值为 1.84 ~ 1.97,因此如果在大宁河开展藻细胞去除作业,白天去除效果较好,夜间去除效果较差. 虽然近几年大宁河流域没有发生像太湖那样严重的藻华危害,但是大宁河内的藻华生物量却逐年上升(另文发表),依据本研究的试验结果可知,在预防藻华方面,不能简单地套用在太湖取的研究成果,毕竟大宁河与太湖所处的地理位置及气候方面具有较大差异,因此应该借鉴前人的研究成果建立适合大宁河特征的藻华预警和治理方案.

3.2 大宁河藻细胞垂直分布的影响因素

光照是影响藻细胞分布的重要因素^[26,27]. 本研究中藻密度和叶绿素的分布与光强并不显著相关,其相关系数仅分别为 0.73 和 0.76. 昼夜期间藻密度和叶绿素的主要分布在 0 ~ 4.0 m 之间(图 5 和 6),但是光强在昼夜期间变化极大 0 ~ 10 002 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ (表 1),藻密度和叶绿素分布变化却没有那么剧烈,22:00 ~ 次日 04:00 时水体内的光强变化差异不大,但藻密度和叶绿素在水体中分布却不均匀,故推测光强对藻细胞短期垂直运动的影响可能远小于对其长期生长的影响. 本研究中水温与藻密度和叶绿素的相关系数高达 0.97 和 0.88,且水温在 0 ~ 4.0 m 之间昼夜变化没有光照变化那样剧烈. 对照藻密度和叶绿素的分布(图 5 和图 6)

与水温的差异,除了藻密度在次日 06:00 水深 2 m 水温 28.30℃,藻密度和叶绿素含量最高时的水温在 30 ~ 31℃之间,昼夜期间藻密度和叶绿素含量在水深 4 m 以下变化差异不大,而水深 4 m 处的水温在 26℃左右,因此推测大宁河流域藻细胞最适合的水温为 30℃左右,而水温 26℃以下,藻密度和叶绿素的含量变化不大.

湖库的富营养化是藻华形成的重要原因之一^[28]. 水体中氮和磷达到 0.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.02 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后,就有藻水华暴发的潜在危险^[29,30]. 但本研究发现在大宁河水体中表层的总氮为 2.26 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,总磷为 0.038 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;水深 2.0 m 处的总氮浓度最低,为 1.74 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在水体的总磷的变化不大,水深 2.0 m 处的总磷浓度为 0.031 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但是在大宁河并没有发生藻华现象,本研究中,藻密度与营养盐的相关性也比较小,只与可溶性磷(DTP)显著相关,与营养盐相比,藻密度更容易受到水温、导电率和 pH 值的影响,因此营养盐对大宁河流域的藻密度及藻分布的影响较小.

水动力条件是影响藻细胞分布、藻种多样性和藻种演替的重要因素^[31,32],按以往经验和常识,河流水动力条件明显要比湖泊剧烈,但是本研究测定的不同水层的流速在 0.01 ~ 0.06 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间(表 3). 其原因有两方面:其一,三峡大坝截流后,长江在三峡区段已由天然河道变成峡谷型深水水库,库区水位提高、水流减缓,其水动力条件不同于河流;其二,本研究旨在为大宁河蓝藻水华预警体系提供基础数据,复杂的蓝藻预警体系可以分解为 3 个不同独立且相互联系的研究内容:藻细胞的生长及消亡、藻细胞的上浮及下沉、藻细胞的漂入及漂出^[24]. 为准确获取大宁河原位藻细胞的上浮及下沉的速率,应尽可能减少水动力和风力等因素对藻细胞水平运动的影响,因此本研究所选择的试验位置位于大宁河流域一个湾内,而非主航道处. 故本研究所检测的流速并不代表大宁河主航道处的流速,其流速与中国三峡集团公司每天开闸泄水量与来往船只的航速有关.

在野外水体中,藻华的形成不仅受水体运动方式、风向等因素的影响,而且还受到群落的大小和捕食压力等因素的影响^[33],而本研究在大宁河没有发现藻华现象. 本研究发现在此期间大宁河的藻种主要是绿藻、蓝藻、硅藻和甲藻等,郑丙辉等^[25]研究了三峡库区的藻种演替,认为 5 月和 6 月三峡库区的优势藻种为绿藻,此时正是太湖极易形成大量

蓝藻水华的时候,其优势种却是蓝藻,由此推测藻种的差异也有可能是形成藻华的重要因子之一,蓝藻比绿藻更容易形成藻华。

夏季是水生植物繁殖的主要时期,水体中叶绿素 a 的含量的高低表征了水生浮游植物的密度高低。本研究发现藻细胞密度与叶绿素 a 具有极显著相关(0.96),Chen 等^[34]也以叶绿素 a 的浓度 $30 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $60 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 分别作为预测荷兰海岸带水华发生的判断标准。本研究仅在夜间 20:00 和 22:00, 0.5 ~ 2.0 m 之间检测到叶绿素 a 的含量 $> 30 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 并且叶绿素 a 的分布与藻密度的分布类似,因此在三峡库区藻华预警系统中可以将叶绿素 a 的含量作为最主要的检测指标是合适。

4 结论

(1) 夏季大宁河内藻细胞主要以绿藻、蓝藻、硅藻和甲藻为主。

(2) 藻细胞在水体中的分布不均匀,72.5% ~ 76.2% 的藻细胞集中在 0.5 ~ 4.0 m 水体之间,0 m 藻细胞占垂直水体藻密度的 7.5% ~ 16.3%; 白天藻细胞 Morisita 指数(MI)在 1.41 ~ 1.97 之间,夜晚 MI 指数在 1.17 ~ 1.55 之间,叶绿素 a 白天 MI 指数在 1.31 ~ 1.59 之间,夜晚 MI 指数在 1.17 ~ 1.39 之间。

(3) 藻细胞在水体中存在明显的昼夜垂直迁移现象,垂直迁移现象主要发生在 0.5 ~ 4.0 m 水体之间。

(4) 藻密度与叶绿素、温度、pH 值呈极显著正相关,与导电率呈极显著负相关,与营养盐的相关性较小,仅与可溶性磷显著相关。

参考文献:

- [1] Porat K, Tetsch B, Perrlman A, *et al.* Diel buoyancy changes by the cyanobacterium *Aphanizomenon ovalisporum* from a shallow reservoir[J]. *Journal of Plankton Research*, 2001, **23**(7): 753-763.
- [2] 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.
- [3] Bright D I, Walsby A E. The daily integral of growth by *Planktothrix rubescens* calculated from growth rate in culture and irradiance in Lake Zürich[J]. *New Phytologist*, 2000, **146**(2): 301-316.
- [4] 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.
- [5] 唐忠波. 蓝藻垂直迁移及沉积物氮磷释放对其浮力调节影响研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2008.
- [6] 吴凯. 太湖水华蓝藻上浮特征及其机理研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [7] 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): 43-46.
- [8] 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.
- [9] Walsby A E. Gas vesicles [J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 1994, **58**(1): 94-144.
- [10] Becker S, Hayes P K, Walsby A E. Different *gvpC* length variants are transcribed within single filaments of the cyanobacterium *Planktothrix rubescens* [J]. *Microbiology*, 2005, **151**(1): 59-67.
- [11] Shukla H D, DasSarma S. Complexity of gas vesicle biogenesis in *Halobacterium* sp. strain NRC-1: identification of five new proteins [J]. *Journal of Bacteriology*, 2004, **186**(10): 3182-3186.
- [12] Chu Z S, Jin X C, Yang B, *et al.* Buoyancy regulation of *Microcystis flosaquae* during pHospHorus-limited and nitrogen-limited growth [J]. *Journal of Plankton Research*, 2007, **29**(9): 739-745.
- [13] 张永生, 李海英, 孔繁翔, 等. 群体细胞间空隙在微囊藻水华形成过程中的浮力调节作用[J]. *环境科学*, 2011, **32**(6): 1602-1607.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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): 135-147.
- [17] 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]. *中国环境检测*, 2009, **25**(4): 98-101.
- [18] <http://www1.gdou.edu.cn/scxy/gexi/course/mouse/index.asp#>.
- [19] 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.
- [20] Thackeray S J, George D G, Jones R I, *et al.* Statistical quantification of the effect of thermal stratification on patterns of dispersion in a freshwater zooplankton community [J]. *Aquatic Ecology*, 2006, **40**(1): 23-32.
- [21] Córdoba-Aguilar A. Adult survival and movement in males of the damselfly *Hetaerina cruentata* (Odonata: Calopterygidae) [J]. *Florida Entomologist*, 1994, **77**(2): 256-264.
- [22] Hills J M, Thomason J C. A multi-scale analysis of settlement density and pattern dynamics of the barnacle *Semibalanus balanoides* [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1996, **138**:

- 103-115.
- [23] Quinn V S, Graves B M. Space use in response to conspecifics by the red-backed salamander (*Plethodon cinereus*, Plethodontidae, Caudata) [J]. *Ethology*, 1999, **105**(11): 993-1002.
- [24] 黄佳聪, 吴晓东, 高俊峰, 等. 蓝藻水华预报模型及基于遗传算法的参数优化[J]. *生态学报*, 2010, **30**(4): 1003-1010.
- [25] 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.
- [26] 任健, 蒋名淑, 商兆堂, 等. 太湖蓝藻暴发的气象条件研究[J]. *气象科学*, 2008, **28**(2): 221-226.
- [27] 夏健, 钱培东, 朱玮. 2007年太湖蓝藻水华提前暴发气象成因探讨[J]. *气象科学*, 2009, **29**(4): 531-535.
- [28] 郑丙辉. 中国湖库富营养化评价标准研究报告[R]. 北京: 中国环境科学研究院, 2011.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 王华, 逢勇. 藻类生长的水动力学因素影响与数值仿真[J]. *环境科学*, 2008, **29**(4): 884-889.
- [32] 张毅敏, 张永春, 张龙江, 等. 湖泊水动力对蓝藻生长的影响[J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(5): 707-711.
- [33] 阳振. 微囊藻群体形成的驱动因子研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [34] Chen Q W, Mynett A E. Predicting *Phaeocystis globosa* bloom in Dutch coastal waters by decision trees and nonlinear piecewise regression[J]. *Ecological Modelling*, 2004, **176**(3-4): 277-290.

CONTENTS

Characteristics of Atmospheric NO ₂ in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and the Yangtze River Delta Analyzed by Satellite and Ground Observations	WANG Ying, LI Ling-jun, LIU Yang (3685)
Variation Analysis of Background Atmospheric Pollutants in North China During the Summer of 2008 to 2011	YANG Jun-yi, XIN Jin-yuan, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3693)
Characteristics of Atmospheric Pollutants in Cangzhou	WANG Yong-hong, HU Bo, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3705)
Chemical Characteristics and Sources of Trace Metals in Precipitation Collected from a Typical Industrial City in Northern China	LI Yue-mei, PAN Yue-peng, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3712)
BTX Monitoring Nearby Main Road Traffic in Guangzhou	YE Cong-lei, XIE Pin-hua, QIN Min, <i>et al.</i> (3718)
Dynamic Road Vehicle Emission Inventory Simulation Study Based on Real Time Traffic Information	HUANG Cheng, LIU Juan, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (3725)
Emission Characteristics of a Diesel Car Fueled with Coal Based Fischer-Tropsch (F-T) Diesel and Fossil Diesel Blends	HU Zhi-yuan, CHENG Liang, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (3733)
Spatial Variations of Biogenic Elements in Coastal Wetland Sediments of the Jiulong River Estuary	YU Xiao-qing, YANG Jun, LIU Le-mian, <i>et al.</i> (3739)
Spatio-Temporal Distribution of TN and TP in Water and Evaluation of Eutrophic State of Lake Nansi	SHU Feng-yue, LIU Yu-pei, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (3748)
Impact on Nitrogen and Phosphorous Export of Wetlands in Tianmu Lake Watershed	LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Heng-peng (3753)
Nitrogen and Phosphorus Composition in Urban Runoff from the New Development Area in Beijing	LI Li-qing, LÜ Shu-cong, ZHU Ren-xiao, <i>et al.</i> (3760)
Distribution and Sources of Arsenic in Yangzonghai Lake, China	ZHANG Yu-xi, XIANG Xiao-ping, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3768)
Occurrence of Fecal Indicator Bacteria in Urban Surface Water: A Case Study in Southern China	SUN Fu, SHA Jing, LIU Yan-hua (3778)
Vertical Migration of Algal Cells in the Daning River Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3787)
Construct of Yangtze-Huai River Rural Areas Ecological Drainage System and Its Retention Effect on Pollutants	SHAN Bao-qing, LI Nan, TANG Wen-zhong (3797)
Water Treatment Efficiency of Constructed Wetland Plant-Bed/Ditch Systems	WANG Zhong-qiong, ZHANG Rong-bin, CHEN Qing-hua, <i>et al.</i> (3804)
Effect of the Subsurface Constructed Wetland Evolution into Free Surface Flow Constructed Wetland on the Removal of Organic Matter, Nitrogen, and Phosphorus in Wastewater	WEI Ze-jun, XIE Jian-ping, HUANG Yu-ming (3812)
Treatment Characteristics of Saline Domestic Wastewater by Constructed Wetland	GAO Feng, YANG Zhao-hui, LI Chen, <i>et al.</i> (3820)
Degradation of β -Naphthol by Catalytic Wet Air Oxidation	LIU Jie, YU Chao-ying, ZHAO Pei-qing, <i>et al.</i> (3826)
Degradation of 2,4-Dichlorophenol in Aqueous Solution by ZVI/EDDS/Air System	SUN Qian, ZHOU Hai-yan, CAO Meng-hua, <i>et al.</i> (3833)
Study on Photocatalytic Degradation of 1,2,3-Trichlorobenzene Using the Microwaved MWNTs/TiO ₂ Composite	SHI Zhou, ZHANG Qian, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3840)
Mechanism of Cr(VI) Removal from Aqueous Solution Using Biochar Promoted by Humic Acid	DING Wen-chuan, TIAN Xiu-mei, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3847)
Research on the Treatment of Wastewater Containing PVA by Ozonation-Activated Sludge Process	XING Xiao-qiong, HUANG Cheng-lan, LIU Min, <i>et al.</i> (3854)
Effects of Composite Substrates on the Phosphorus Removal in Granule-based EBPR System and Its Optimization Experiment	XU Shao-juan, SUN Pei-de, ZHENG Xiong-liu, <i>et al.</i> (3859)
Research of Input Water Ratio's Impact on the Quality of Effluent Water from Hydrolysis Reactor	LIANG Kang-qiang, XIONG Ya, QI Mao-rong, <i>et al.</i> (3868)
Evolution of Leachate Quantity and Quality in the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin, <i>et al.</i> (3873)
National Survey of Urban Sewage Reuse in China	GUO Yu-jie, WANG Xue-chao, ZHOU Zhen-min (3881)
Sorption and Desorption of 17 α -Ethinyl Estradiol and 4-n-Nonylphenol in Soil	JIANG Lu, WANG Ji-hua, LI Jian-zhong, <i>et al.</i> (3885)
Soil Organic Carbon Mineralization of Black Locust Forest in the Deep Soil Layer of the Hilly Region of the Loess Plateau, China	MA Xin-xin, XU Ming-xiang, YANG Kai (3893)
Effects of Soil Crusts on Surface Hydrology in the Semiarid Loess Hilly Area	WEI Wei, WEN Zhi, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3901)
Environmental Factors on Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils from Dashiwei Karst Giant Doline (Tiankeng) in Guangxi, China	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, JIANG Zhong-cheng, <i>et al.</i> (3905)
Investigation on Mechanism of Pyrite Oxidation in Acidic Solutions	WANG Nan, YI Xiao-yun, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3916)
Monitoring of Water and Salt Transport in Silt and Sandy Soil During the Leaching Process	FU Teng-fei, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (3922)
Simulation on Remediation of Benzene Contaminated Groundwater by Air Sparging	FAN Yan-ling, JIANG Lin, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3927)
Detecting the Cytotoxicities of Five Bisphenol A Analogues to the MCF-7 Human Breast Carcinoma Cell Line Through Different Endpoints	ZHANG Shuai-shuai, LIU Yan, LIU Shu-shen, <i>et al.</i> (3935)
Response of Copepod Community Characteristics to Environmental Factors in the Backshore Wetland of Expo Garden, Shanghai	CHEN Li-jing, WU Yan-fang, JING Yu-xiang, <i>et al.</i> (3941)
Isolation, Identification and Characterization of Halotolerant Petroleum-degrading Bacteria	WU Tao, XIE Wen-jun, YI Yan-li, <i>et al.</i> (3949)
Growth Kinetics and Phenol Degradation of Highly Efficient Phenol-degrading <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10	CHEN Xiao-hua, WEI Gang, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (3956)
Isolation of Aerobic Degrading Strains for TBBPA and the Properties of Biodegradation	QIAN Yan-yuan, LIU Li-li, YU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3962)
Influences of Long-term Application of Organic and Inorganic Fertilizers on the Composition and Abundance of <i>nirS</i> -type Denitrifiers in Black Soil	YIN Chang, FAN Fen-liang, LI Zhao-jun, <i>et al.</i> (3967)
Characteristics and Influencing Factors of Trichloroethylene Adsorption in Different Soil Types	HE Long, QIU Zhao-fu, LÜ Shu-guang, <i>et al.</i> (3976)
Degradation of Carbendazim in Paddy Soil and the Influencing Factors	XIAO Wen-dan, YANG Xiao-e, LI Ting-qiang (3983)
Effects of Sulphur Compounds on the Volatile Characteristics of Heavy Metals in Fly Ash from the MSW and Sewage Sludge Co-combustion Plant During the Disposal Process with Higher Temperature	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3990)
Low-temperature Thermal Treatment of Dioxin in Medical Waste Fly Ash Under Inert Atmosphere	JI Sha-sha, LI Xiao-dong, XU Xu, <i>et al.</i> (3999)
Hourly Measurement on Aerosol NH ₃ and Gas NO _x Emission in the Rice Field	GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (4006)
Implementation of an Electronic Nose for Rapid Detection of Volatile Chloroalkane and Chloroalkene	WEN Xiao-gang, LIU Rui, CAI Qiang, <i>et al.</i> (4012)
Pilot Study on PAHs of the Atmosphere Around the Refuse Incineration Plant Based on the Technology of Passive Sampling	SUN Shao-ai, LI Yang, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (4018)
Spatial Distribution and Pollution Source Identification of Agricultural Non-Point Source Pollution in Fujiang Watershed	DING Xiao-wen, SHEN Zhen-yao (4025)
Difference of P Content in Different Area Substrate of Constructed Wetland	CAO Xue-ying, CHONG Yun-xiao, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (4033)
Selective Detection of Viable Pathogenic Bacteria in Water Using Reverse Transcription Quantitative PCR	LIN Yi-wen, LI Dan, WU Shu-xu, <i>et al.</i> (4040)
Formation of Disinfection By-products; Temperature Effect and Kinetic Modeling	ZHANG Xiao-lu, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (4046)
A Novel Quantitative Approach to Study Dynamic Anaerobic Process at Micro Scale	ZHANG Zhong-liang, WU Jing, JIANG Jian-kai, <i>et al.</i> (4052)
Leaves of <i>Platanus orientalis</i> as the Carbon Source for Denitrification	XIONG Jian-feng, XU Hua, YAN Ning, <i>et al.</i> (4057)
Isolation, Characterization of an Anthracene Degrading Bacterium <i>Marteella</i> sp. AD-3 and Cloning of Dioxygenase Gene	CUI Chang-zheng, FENG Tian-cai, YU Ya-qi, <i>et al.</i> (4062)

《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)

2012年11月15日 33卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 11 Nov. 15, 2012

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮局	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: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人