

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京地区大气气溶胶 PM _{2.5} 中稳定碳同位素组成研究	吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 孙德玲, 卢霞, 姜文娟 (3727)
太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析	胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 韩峰, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九 (3733)
交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究	罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 官兆宁, 熊秋林 (3741)
公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性	楼狄明, 陈峰, 胡志远, 谭丕强, 胡炜 (3749)
兰州及其周边区域大气降水 δ ¹⁸ O 特征及其水汽来源	陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲 (3755)
天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析	岳晓英, 李忠勤, 张明军, 周平, 樊晋 (3764)
O ₃ /H ₂ O ₂ 氧化苯乙烯气体性能及机制	何觉聪, 黄倩茹, 叶杞宏, 罗雨薇, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (3772)
马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪	关晖, 肖化云, 朱仁果, 郑能建, 瞿玲露 (3777)
江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究	李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代敏 (3782)
辽河流域非点源污染空间特征遥感解析	王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪 (3788)
景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究	杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 邹松兵, 尹振良 (3797)
金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	游丽丽, 宗海波, 张淑芳, 尹国宇, 李涛, 侯立军 (3804)
崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探	韩建刚, 曹雪 (3810)
FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性	刘叶, 邹立, 刘陆, 高冬梅 (3818)
中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析	袁海峰, 成杭新, 赵传冬, 刘应汉, 杨柯, 李括, 彭敏, 刘飞 (3825)
深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价	孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 卢腾腾, 杜飞雁, 马胜伟, 林钦 (3832)
PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源	边璐, 李田, 侯娟 (3840)
三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究	余杨, 王雨春, 周怀东, 高博, 赵高峰 (3847)
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	李飞鹏, 张海平, 陈玲 (3854)
太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟	韩涛, 翟淑华, 胡维平, 张红举, 李钦钦 (3862)
湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究	陈超, 钟继承, 范成新, 孔明, 余居华 (3872)
水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究	周慧华, 宋晓光, 吴革, 谢鑫源 (3879)
底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响	区凤荏, 孙国萍, 许玫英 (3888)
区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究	易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷 (3894)
4 种人工湿地填料的 f2 噬菌体吸附特性	陈迪, 郑祥, 魏源送, 杨勇 (3904)
稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究	纪莹雪, 王凤贺, 张帆, 张艳红, 王国祥, 顾中铸 (3912)
紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究	王文东, 周礼川, 丁真真, 王洪平, 孙学军 (3921)
基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较	朝木尔乐格, 冯流, 霍艳霞 (3927)
nTiO ₂ 在水中的分散沉降行为研究	陈金媛, 方金凤, 魏秀珍 (3933)
微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响	谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 谢巧勤 (3940)
两性离子在聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜表面接枝改性的研究	周桂花, 肖峰, 肖萍, 王东升, 段晋明, 石健, 臧莉 (3945)
化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究	周锋, 王文林, 王国祥, 马久远, 万寅婧, 唐晓燕, 梁斌, 季斌 (3954)
珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价	李文英, 彭智平, 于俊红, 黄继川, 徐培智, 杨少海 (3963)
污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响	金树权, 周金波, 陈若霞, 林斌, 王德耀 (3969)
活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素	李振亮, 张代钧, 卢培利, 曾善文, 杨永浩 (3975)
不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响	郭秀丽, 高大文, 卢健聪 (3981)
生物陶粒反应器的氨自养反硝化研究	陈丹, 王弘宇, 宋敏, 杨开, 刘晨 (3986)
亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究	严俊霞, 李君剑, 李洪建, 张义辉 (3992)
SiB3 模式对作物区 CO ₂ 通量的模拟研究	张庚军, 卢立新, 蒋玲梅, 蒋磊, Ian Baker (4000)
缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响	徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔 (4009)
典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例	闫慧, 陈杰, 肖军 (4017)
苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯	史双昕, 董亮, 李玲玲, 张辉, 李斯明, 张天野, 黄业茹 (4024)
废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性	吴彦瑜, 胡小英, 洪鸿加, 彭晓春 (4031)
铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究	王旌, 罗启仕, 张长波, 谈亮, 李旭 (4036)
典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究	李曼, 陈卫平, 魏福祥, 焦文涛 (4042)
3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中迁移行为研究	方婧, 余博阳 (4050)
多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征	李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4058)
毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究	白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊 (4066)
珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究	梁惜梅, 袁湘平, 施震 (4073)
江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价	刘洋, 付强, 高军, 徐网谷, 殷波, 曹亚乔, 秦卫华 (4081)
铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响	张义贤, 付亚萍, 肖志华, 张喜文, 李萍 (4090)
利用高通量测序对封存 CO ₂ 泄漏情景下土壤细菌的研究	田地, 马欣, 李玉娥, 查良松, 伍洋, 邹晓霞, 刘爽 (4096)
酸性矿山废水区域废矿石中真核生物多样性分析	李思远, 郝春博, 王丽华, 吕铮, 张丽娜, 刘莹, 冯传平 (4105)
十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析	常晶晶, 尹华, 秦华明, 叶锦韶, 彭辉, 宋小飞 (4112)
硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响	胡堂, 黄益宗, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏 (4119)
外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响	刘俊, 周坤, 徐卫红, 陈惠, 张明中, 江玲, 杨芸, 王崇力, 熊治庭 (4126)
电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析	李力, 吕永龙, 王铁宇 (4132)
《环境科学》征稿简则 (3926) 《环境科学》征订启事 (4057) 信息 (3878, 3953, 3999, 4041)	

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

李飞鹏¹, 张海平^{2*}, 陈玲²

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 以崇明岛前卫村的一个小型封闭富营养化水体为对象, 自 2007 年 7 月~2011 年 9 月进行了约 4 a 的野外观测, 研究了物化因子、水动力因素和叶绿素 a (Chl-a) 的时空分布特征及其相关性。结果表明, 该水体 Chl-a 含量具有明显的时空差异性。Chl-a 含量与水温、浊度、TN 和 TP 均呈显著正相关关系, 水温和营养盐是影响浮游植物季节动态的主要因素, 浊度的季节变化是浮游植物生长的结果表征。Chl-a 的空间差异性与不同水域水动力条件的差异有关, 受风影响显著的水域(北河道)流速多分布在 $0.08 \sim 0.22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内, Chl-a 含量显著较低(平均浓度为 $53.11 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)。从流速与 Chl-a 的关系分析来看, 流速与 Chl-a 浓度呈显著负相关关系, 流速总体分布在 $0 \sim 0.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的水域 Chl-a 含量显著偏高(平均浓度为 $35.30 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)。该结果表明较大强度的水动力条件能够对富营养化封闭水体中浮游植物生长产生显著的抑制作用, 可为相关水体的水华防治提供有益借鉴。

关键词: 封闭水体; 环境因子; 叶绿素 a; 水动力; 时空分布

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-3854-08

Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake

LI Fei-peng¹, ZHANG Hai-ping², CHEN Ling²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: About four year's field observation was conducted from July 2007 to September 2011, in a small enclosed eutrophic lake located in Qianwei Village, Chongming Island. The temporal and spatial distribution of environmental factors (including physical-chemical factors and hydrodynamic condition) and chlorophyll-a (Chl-a) were studied and their correlation was analyzed. Results indicated that there were significant differences in the spatial and temporal distribution of Chl-a in the lake. Significantly positive correlation was found between Chl-a and water temperature, turbidity, TN and TP. Water temperature and nutrients were the main limited factors of seasonal changes of phytoplankton. It could be the result of phytoplankton growth that caused the seasonal change of turbidity. It was found that hydrological changes were the primary factor affecting the spatial difference of Chl-a concentration. Lower average Chl-a concentration ($35.30 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) was recorded in the north watercourse, in condition with higher wind driven flow velocity ranging from $0.08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ to $0.22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. A strong negative correlation was found between Chl-a concentration and flow velocity. Higher average Chl-a concentration ($53.11 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) was frequently found under flow conditions ranged from $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ to $0.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. These findings indicated that increasing hydrodynamic condition would significantly inhibit the growth of phytoplankton and reduce the risk of algae blooming in summer in these eutrophic water bodies.

Key words: enclosed water; environmental factors; chlorophyll-a; hydrodynamic condition; temporal and spatial distribution

封闭水体是指由自然存在或人工建造或改造的湖泊、溪流、河道等, 具有封闭性较强、水体流动性差、水环境容量小, 自净能力低等特点。封闭水体的富营养化和水华问题日益引起关注^[1]。一方面, 随着我国房地产市场流行的“亲水”风和“亲水”热, 城市中的人造景观水体或独立内河水景日益增多, 但许多水体设计不合理及后期维护管理较差; 另一方面, 许多城市为过度追求统一化美感, 对城市河道干涉过于严重, 多数城市河道修建统一高度护岸, 硬化河底水泥, 忽略了部分河段水深不适、形态有缺

陷等问题。这些措施导致水体富营养化问题突出, 水华频繁暴发, 甚至水体变黑变臭^[2, 3], 相关政府部门不得不耗费大量人力物力和财力整治封闭水体日益严重的富营养化和水华问题。开展封闭水体浮游植物环境因子与浮游植物的影响研究, 探索科学有效的技术手段进行富营养化控制, 对研究富营养化

收稿日期: 2013-01-14; 修订日期: 2013-02-26

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAJ21B01)

作者简介: 李飞鹏(1983~), 男, 博士后, 主要研究方向为生态水力学, E-mail: lifeipeng@tongji.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: hpzhang@tongji.edu.cn

机制和降低水华风险具有重要的意义。

国内外对于富营养化水体的研究多以大型水体为研究对象^[4~6],但对封闭水体的研究较少。大型水体,如太湖、巢湖、三峡水库及其次级支流,多为开放式水体,与外部水资源交换速度快,复杂多变的生态系统和人为影响为富营养化科学的研究带来较多困难^[7]。小型封闭水体由于水域环境较为封闭,不存在较大规模的点源污染,生态系统相对简单,是研究富营养化的理想对象^[8]。然而,多数封闭水体的研究侧重于水质下降和水华暴发对养殖效益的影响^[9]、封闭河道水质的评估^[10]、生物修复和改善技术等^[11]。对于受污染的封闭水体,目前采用的修复和治理方法有底泥疏浚、机械除藻、人工曝气、引水置换及生态修复等^[12],但由于缺乏对封闭水体的特征及浮游植物生消的环境调控机制的认识,这些方法虽然在一定条件下能取得较好的效果,但往往存在耗时、耗力等缺点,从长期的维护运行来看均有不足之处。

本文以崇明岛一个典型的小型封闭水体中心湖为研究对象,通过长达 4 年多的野外观测,分析了环境因子(物化因子和水动力)和叶绿素 a (Chl-a)的时空分布特征,并通过多元分析方法分析了环境因子和 Chl-a 的相关性,以期采取科学有效的技术手段对封闭水体的富营养化进行控制和降低水华风险提供基础依据。

1 研究区域概况

中心湖位于上海市崇明县竖新镇前卫村,该水体毗邻同济大学长江水环境教育部重点实验室崇明水环境研究中心,十分便于野外密集观测和现场实验研究。中心湖于 2002 年底由人工开挖而成,水体整体呈现“日”字形,由 5 条相互贯通的河段组成封闭水域,湖体形状和周围环境如图 1 所示。湖体基本靠雨水和地表径流补水。中心湖周边无较大点源污染,四周用地多为景观和林业用地,无大面积农业面源污染。西北角和西南角有零散的生活污水排入,一般在旅游旺季污水排放量增大。综合来看,中心湖水域面积较小,约为 52 000 m²,环境相对封闭,是典型的富营养化封闭水体,也是开展富营养化水体中环境因子对浮游植物生消影响的理想研究对象。

2 材料与方法

从 2007 年 7 月~2011 年 9 月对中心湖的相关

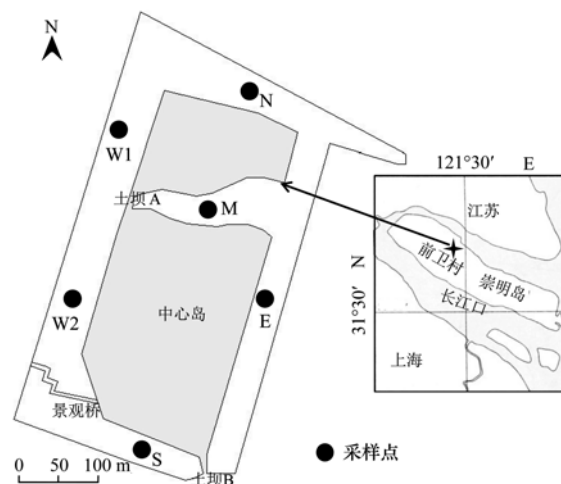


图 1 中心湖水域位置及采样点分布示意

Fig. 1 Map of Zhongxin Lake and sampling point distributions

环境因子和浮游植物生物量进行长期的密集观测。采样点布置如图 1 所示,由于实际水域范围较小,各河道长度较短且相互贯通,因此在东、南、中、北四条河道各布设一个代表性采样点,标记为 E、S、M、N,西河道靠近住宅区,且河道较长,布设两个采样点 W1 和 W2。

于 2007 年中旬至 2008 年底对中心湖不同河道的流速进行了逐日单次测量,以每次测得流速平均值代表当日不同河道的流速值。由于风是影响中心湖水动力差异的主要因子,因此流速测量选择在不同的天气条件(主要为不同的风速和风向)下进行,采用便携式智能流速仪(LGY-II 型,南京水利科学研究院)测定,测量时段基本在 16:00~18:00。

水质因子采样频次基本为每月 2~3 次,于 2010 年 4~5 月和 8 月间藻类生长敏感期和旺盛期在西河段(W2)进行了加密监测。由于水体较浅,根据文献^[13]推荐的简易采样器和采样方法,采集水面下 0.5 m 深处水样,取样时间固定为每天 16:00 左右,现场通过便携式水质分析仪(Hq40d, HACH, 美国)测定并记录溶解氧(DO)、pH 值、电导率(COND)、水温(WT)等指标,采样后立即送回实验基地进行分析,采用散射光浊度仪(WGZ-1A 系列,上海昕瑞仪器仪表有限公司)测定样品浊度(TURB)。参照国家环保部推荐的标准方法测定氨氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、溶解性总氮(DTN)、总氮(TN)、磷酸盐(PO₄³⁻-P)、溶解性总磷(DTP)、总磷(TP)等营养盐指标的浓度。浮游植物生物量用 Chl-a 浓度表示,采用国际上通用的测定 Chl-a 的方法“热乙醇萃取法”^[14]。

多元统计分析方法在探讨浮游植物生物量与其它主要环境因子之间的关系的研究应用较多,本研究采用 SPSS 13.0 for Windows 软件对 Chl-a 于环境因子之间的相关关系进行 Pearson 相关分析和多元线性回归分析,讨论影响浮游植物生物量的主控环境因子。

3 结果与讨论

3.1 物化因子时空分布

中心湖水体平均 pH 值约为 8.27,水温变化范围为 3.6 ~ 35.2℃,日平均气温与水温呈现显著的正相关关系($R^2 = 0.9323, P < 0.01$),日平均气温总体上比水温低 4℃左右。电导率在冬季和春季略高,夏季较低。DO 冬季最高,夏秋季节较低,春末 DO 往往出现剧烈的变化,这可能是由反复的气温变化引起的,夏季和秋初 DO 日变化非常大。浊度具有明显的季节动态规律,最大值一般出现在每年的夏季至秋初,浊度维持在较高的水平,平均值在 80 NTU 左右,春季浊度值约为 40 NTU 左右。每年冬季浊度值最低,浊度仅为 5 ~ 10 NTU。由于湖体较小,中心湖水温、pH 和电导率在所有监测点位之间的差异不大,DO 在中部河道明显偏高,在西部河道(W2)和北部河段则相对偏低。浊度的空间差异比较明显,北部河道浊度平均值最高,其次为中部河道和南部河道,而东河道和西部河道平均浊度值最低。

中心湖营养盐具有明显的季节变化规律。不同形态的氮营养盐的季节动态如图 2 所示。 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 在春末和夏季出现较大值,浓度超过 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;秋季 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量逐渐降低,冬季一般达到最低水平,约在 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度在春末夏初出现明显的峰值,夏秋季浓度略有降低,约在 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,但在冬季也有一定的升高,达到 $0.30 \sim 0.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。春末较高的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度可能与这段时期的旅游旺季有关。DTN 和 TN 总体上在春末到秋初含量较高,平均浓度分别在 $1.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 、DTP 和 TP 的季节动态如图 3 所示, $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 全年含量偏低,平均浓度在 $0.007 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,仅在夏季中旬出现较高值,略高于 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。DTP 与 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 变化趋势相同,平均浓度约是 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 浓度的两倍。TP 最大值一般出现在春末到秋初,浓度总体高于 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,最大值超过 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,冬季 TP 浓度较低,约为 $0.075 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其它季节含量基本在 $0.015 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 含量约为 TP 含量的 5.1%,DTP 含量

约为 TP 含量 1/5,说明中心湖的磷以颗粒态磷为主,TP 的来源可能与风浪扰动引起底泥再悬浮过程密切相关。

从各种营养盐的空间分布来看,含氮营养盐在西河道和北河道含量偏高, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、DTN 和 TN 的含量明显高于东河道,西河道(W1)处 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 出现最高值,可能与该处鱼类养殖有关; $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 和 DTP 的含量空间差异不太明显,S 和 W1 点位 DTP 含量略微高于其他点位,TP 平均含量以 S 点位最高,其次为北河道,显著高于其他河道。

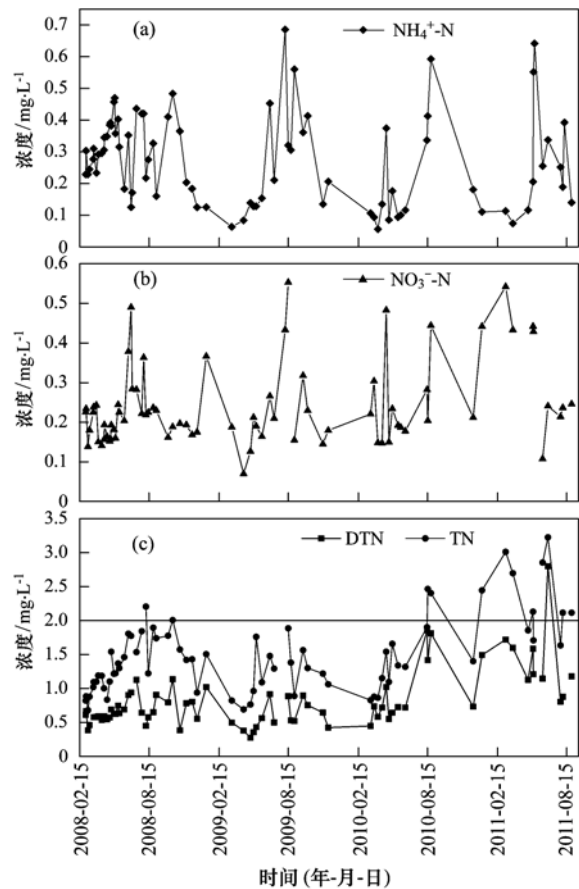


图 2 中心湖氮营养盐($\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、DTN 和 TN)的季节变化曲线

Fig. 2 Seasonal changes of ammonia, nitrate, DTN and TN in Zhongxin Lake

3.2 水动力特征

中心湖各河道间流速差异性比较明显(如图 4)。北河道流速总体较大,总体分布集中在 $0.08 \sim 0.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,东河道和西河道次之,流速总体集中在 $0.05 \sim 0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的范围内,中河道(M)和南河道(S)流速最小,流速分别集中在 $0 \sim 0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0 \sim 0.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内。这与中心湖的地形特点是十分吻合的。由于中心湖河道流速受风的影响较

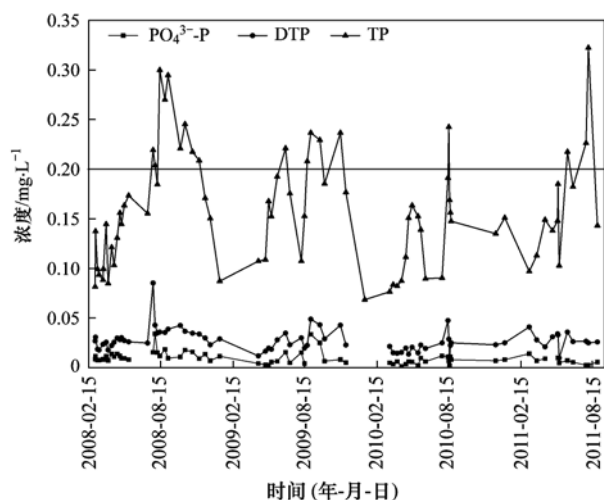


图3 中心湖磷营养盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、DTP 和 TP)的季节变化曲线

Fig. 3 Seasonal changes of SRP, DTP and TP in Zhongxin Lake

大,北河道与东、西两河道连通较好,这样在盛行风东北风、东南风和偏南风的作用下均能形成风生流,因此流速比其他河道相对较大;中河道与西河道之间、南河道与东河道之间均有土坝阻隔,导致中河道和南河段不易与其他河道形成环流,且盛行风向也不易于这两个河道形成流动,因此流速偏小;西河道在盛行风作用下易形成定向流动. 在夏季台风的影响下,当地风风等级可达到7~8级,中心湖各个河道流速均会出现较大值,北点位最大值可达

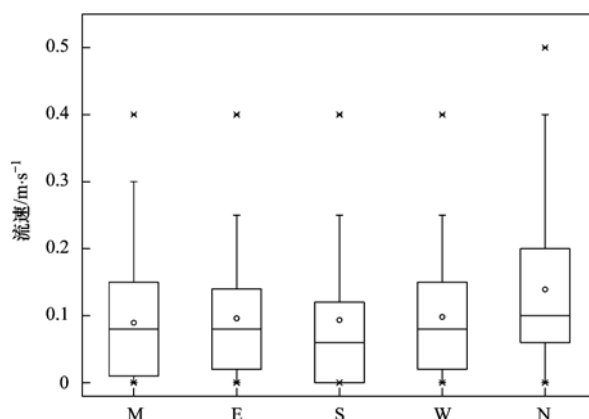


图4 中心湖各河道流速测量结果比较

Fig. 4 Comparison of field flow velocity in each watercourse of Zhongxin Lake

$0.50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,其它点位也会出现流速为 $0.40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的最大观测值.

3.3 叶绿素 a 时空分布

中心湖各河道的 Chl-a 浓度呈现出明显的季节差异,如图5所示. 夏季水体 Chl-a 的平均含量为 $71.04 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,其次为秋季, $65.71 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,冬季和春季含量相当,仅有 $20.00 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Chl-a 的最大值基本出现在8月中下旬左右,这个时期浮游植物生长旺盛,Chl-a 浓度在多数时日内超过 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 春季 Chl-a 浓度受天气影响较大,通过对2010年5月 Chl-a 的逐日密集观测发现,4月末至5月上旬,

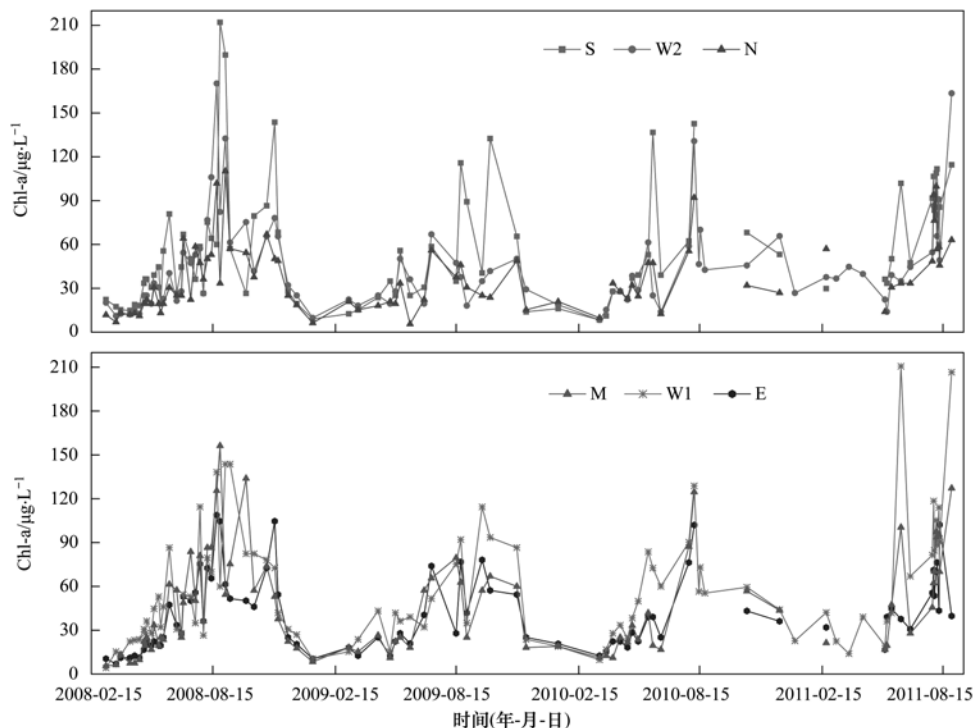


图5 中心湖 Chl-a 的季节变化和空间分布

Fig. 5 Seasonal changes and spatial distributions of Chl-a concentration in Zhongxin Lake

尽管气温有所回升,但 Chl-a 浓度持续偏低,这可能是由于该时期持续的大风天气和经常性的雨水,一定程度上抑制了浮游植物的生长;到了 5 月 16 日,Chl-a 浓度出现一个峰值,这一方面与该时段风力减弱、持续的气温上升的天气条件有关,此时日平均风速由之前的 $3.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降至 $2.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,气温上升了 1.0°C ;另一方面,前期持续的水流扰动引起底泥再悬浮,促进水体营养盐含量的增加也是一个重要原因;随着之后天气条件的变化,如 18 日之后的风力增强和降雨,Chl-a 浓度迅速下降. 从年际分布来看,2008 年和 2011 年 Chl-a 含量在夏秋高峰期略高于 2009 年和 2010 年,这可能是由于 2008 年和 2011 年降雨量在这段时期内的日分布极不均匀,强降雨带来的营养盐一定程度上能够刺激浮游植物的生长,而 2009 年和 2010 年降雨日偏多,连续的阴雨天又会对浮游植物生长产生抑制作用.

Chl-a 随季节变化外还呈现出不同的空间差异性(如图 5). 北河段与东河段全年 Chl-a 含量基本处于较低水平,最大值分别为 $108.81 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $110.21 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,中河段全年 Chl-a 含量处于中等水平,最大值可达 $133.92 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,南河段和西河段 Chl-a 含量总体偏高. 研究期间 Chl-a 浓度极大值出现在 2008 年 8 月 26 日 S 点位($212.04 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). 北河道(N)的 Chl-a 浓度显著偏低,南河道(S)和西河道(W1)的 Chl-a 浓度明显偏高,这可能是由于以下两个方面的原因引起的:从水动力的角度看,水动力强度增加能够显著抑制浮游植物的生长^[15, 16]. 南河段以东受土坝阻隔,靠西面建有景观桥,水动力条件最弱,Chl-a 含量最高;北河道长年流速明显高

于其它河段,而 Chl-a 含量长年处于较低水平,比较中河段和南河段可以发现,中河段向东开口宽阔,在大风天气受东河段较大流速的干扰,水体扰动比较强烈,观测到的较大流速值略高于南河段,Chl-a 浓度略低于南河段. 这些结果均表明浮游植物的生长受水动力条件的影响显著. 从营养的角度看,W1 和 W2 尽管同位于西河段,W1 受鱼类养殖干扰较大,营养盐含量略高,且受到其它负面影响较小,因此 W1 处 Chl-a 浓度高于 W2 处. 西河段和东河段尽管具有类似的水动力条件,但西河段营养盐含量偏高,一定程度上减轻了水动力带来的影响,Chl-a 浓度偏高.

3.4 环境因子与 Chl-a 的关系分析

3.4.1 相关分析

中心湖 6 个监测点位 Chl-a 含量和相关环境因子之间的 Pearson 相关系数及其双尾显著性分析结果如表 1 所示. 从中可以看出,各监测点位 Chl-a 含量与水温、浊度、TN 和 TP 均呈显著正相关关系,与 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 均无显著相关,综合全湖,Chl-a 与除 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 这 3 个指标外的所有指标均有相关关系. 王书航等^[17]对巢湖环境因子与 Chl-a 的分析也得出了相似的结论,并认为这可能是由于浮游植物生长过程中伴随着对水体中这些溶解性营养盐的吸收过程,但同时促进营养盐由间隙水向上覆水扩散,补充上覆水中营养盐含量,故 Chl-a 与 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的相关性不显著. 从各监测点来看,Chl-a 还与 pH 值呈显著正相关关系,仅出现在 M 点位,与 DO 呈显著正相关关系,出现在 M 点位、W1 点位,与电导率呈显著负

表 1 各监测点位和全湖 Chl-a 与环境因子相关系数¹⁾

Table 1 Correlation coefficients between Chl-a and some environmental factors at each site and the whole lake

指标	M	E	S	W1	W2	N	全湖
WT	0.558 ^b	0.547 ^b	0.515 ^b	0.515 ^b	0.403 ^b	0.392 ^b	0.465 ^b
pH	0.301 ^a	0.192	0.080	0.024	0.188	0.161	0.142 ^b
DO	0.325 ^b	0.096	0.237	0.249 ^a	0.078	-0.094	0.201 ^b
TURB	0.641 ^b	0.780 ^b	0.644 ^b	0.570 ^b	0.506 ^b	0.496 ^b	0.519 ^b
COND	-0.408 ^a	-0.304	-0.467 ^b	-0.627 ^b	-0.396 ^b	-0.391	-0.402 ^b
NH_4^+-N	0.032	0.057	0.015	-0.050	-0.034	-0.021	-0.001
NO_3^--N	0.131	0.093	0.011	-0.097	-0.004	-0.001	0.004
DTN	0.130	0.131	0.107	0.243 ^b	0.141	0.177	0.163 ^b
TN	0.470 ^b	0.423 ^b	0.470 ^b	0.585 ^b	0.396 ^b	0.391 ^b	0.471 ^b
$\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$	0.071	0.194	0.020	0.100	0.071	-0.044	0.041
DTP	0.302 ^b	0.344 ^b	0.127	0.535 ^b	0.313 ^b	0.205	0.230 ^b
TP	0.725 ^b	0.439 ^b	0.653 ^b	0.561 ^b	0.552 ^b	0.525 ^b	0.533 ^b
TN/TP	-0.267 ^a	-0.250 ^a	-0.224	0.007	-0.011	-0.124	-0.081

1) a: 在 0.05 水平下显著相关; b: 在 0.01 水平下显著相关

相关关系,出现在 M 点位、S 点位、W1 点位和 W2 点位,与 DTN 呈显著正相关关系,出现在 W1 点位,与 DTP 显著正相关关系,出现在 M 点位、E 点位、W1 和 W2 点位. 除 E 点位和 N 点位外,Chl-a 与电导率均呈显著负相关关系. 李秋华等^[18]认为,富营养化是导致水体电导率上升的重要原因,水体的电导率主要是由 NO_3^- -N、 PO_4^{3-} -P 的浓度决定的. 中心湖电导率整体偏高,在浮游植物生长旺盛的夏秋季略有降低,这可能是由于浮游植物大量生长吸收了水体中 NO_3^- -N、 PO_4^{3-} -P等溶解性磷酸盐引起的.

TN 和 TP 均与 Chl-a 呈显著正相关关系,Chl-a 与 TP 的相关系数均大于 Chl-a 与 TN 的相关系数. TN/TP 通常被认为判定湖泊氮限制还是磷限制的依据. Redfield 定律认为,藻类细胞组成的原子比率 C: N: P = 106: 16: 1,如果氮磷比超过 16: 1,磷被认为是限制因素;反之,当氮磷比小于 10: 1 时,氮通常被考虑为限制因素;而当氮磷比在 10 ~ 20 之间时,限制性因素则变得不确定^[19]. 中心湖各监测点位的 TN/TP 平均值介于 8.68 ~ 10.68 之间,全湖平均值为 9.35,与氮限制的临界值十分接近,因此 TN 和 TP 均可能是中心湖浮游植物生长潜在的限制性营养盐. Smith^[20]认为,当 TN/TP < 29 时,可以形成水华的蓝藻会占优势. 然而,Chl-a 含量与 TN/TP 相关关系很弱,仅在 M 点位和 E 点位与 Chl-a 在 0.05 水平下呈现负相关关系. 调查期间,中心湖较低的 TN/TP 并没有帮助蓝藻在竞争中占据优势形成水华,说明在营养盐相对丰富的封闭水体中,浮游植物的生长和竞争与

TN/TP 关系不大. Xie 等^[21]认为,较低的 TN/TP 可能是蓝藻水华产生的结果,中心湖长年较低的 TN/TP 值也可能是由浮游植物生长引起的.

3.4.2 环境因子对叶绿素 a 的逐步回归分析

环境因子对浮游植物的影响作用各不相同,各环境因子之间存在不同程度的显著相关,因此,为了防止多重共线性,同时为了找出与藻类生物量最为密切的环境因子,采用多元回归分析,建立环境因子对 Chl-a 的回归方程,筛选出对 Chl-a 相对重要的环境因子.

选择各监测点位与 Chl-a 显著相关的环境因子作为逐步回归方程的自变量,逐步回归的分析结果如表 2 所示. 从中可以看出,各监测点位分别有 1 ~ 3 个因子入选,都为正相关,但筛选出的对 Chl-a 有显著影响的因子各不相同. TP 在 4 个点位(M、S、W2、N)作为第一限制因子入选,TURB 作为唯一限制因子在 E 点位入选,并在 S 点位和 N 点位入选,由于中心湖磷基本以颗粒磷为主,风浪扰动引起底泥再悬浮是 TP 的主要来源,底泥再悬浮还会造成水体浊度的改变,因此风浪扰动可能是中心湖大多数监测点位受 TP 和 TURB 限制的间接原因. TN 在 W1 点位作为第一限制因子入选,水温和 DTP 依次入选,该点位靠近垂钓区,朱宜平^[22]分析发现,饲料投加造成的 TP 占其源负荷的 92.8%,由于饲料投加在浮游植物生长旺季增多,造成 TP 含量急剧增加,TN/TP 比下降,因此 TN 可能是 W1 附件水域影响浮游植物生长的主要因子.

表 2 Chl-a 和环境因子的回归方程

Table 2 Stepwise multiple regression between Chl-a and environmental factors

监测点	逐步回归方程	R	综合 F 值
M	$\text{Chl-a} = -69.340 + 292.011\text{TP} + 1.341\text{WT} + 3.054\text{DO}$	0.809	39.901
E	$\text{Chl-a} = -3.730 + 0.778\text{TURB}$	0.780	100.774
S	$\text{Chl-a} = -19.234 + 197.762\text{TP} + 0.599\text{TURB}$	0.717	33.799
W1	$\text{Chl-a} = -48.170 + 21.251\text{TN} + 1.656\text{WT} + 1.083.177\text{DTP}$	0.711	21.110
W2	$\text{Chl-a} = -14.917 + 226.931\text{TP} + 11.907\text{TN}$	0.616	24.795
N	$\text{Chl-a} = -1.497 + 104.795\text{TP} + 0.209\text{TURB}$	0.586	16.734
全湖	$\text{Chl-a} = -72.388 + 113.382\text{TP} + 20.754\text{TN} + 4.397\text{DO} + 0.311\text{TURB} - 18.861\text{DTN} + 0.751\text{WT}$	0.741	83.113

从全湖来看,在极显著水平下共有 6 个因子入选,依次为 TP、TN、DO、TURB、DTN 和 WT,分别代表了影响浮游植物生长的营养盐、能源、光照和水温. TN、TP 和 DTN 提供了浮游植物生长的营养盐,同时浮游植物的生长又会造成水体 TN、TP 含量的增加;DO 是浮游植物代谢过程中的重要能源物质,浮游植物生消会引起水体 DO 浓度变化;水温通过对浮游植物光合作用和呼吸代谢速率的控制

而影响 Chl-a 含量;浊度的变化造成浮游植物光利用环境的改变,与水动力扰动关系密切.

3.4.3 水动力与叶绿素 a 的关系分析

中心湖水动力条件主要受风的影响,总体较弱,总体平均流速为 $0.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 对 209 个流速数据分析发现,0 ~ $0.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内观测值最多,占 68.3%,之后依次为 0.10 ~ 0.20、0.20 ~ 0.30 和 0.30 ~ $0.40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的范围内,分别占 17.6%、8.6%

和 5.2%, $0.50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的流速仅在北河段观测到 1 次. 各个流速范围内 Chl-a 的分布如图 6 所示. 大于 $90 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Chl-a 浓度全部在 $0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下, Chl-a 的峰值都在 $0 \sim 0.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的流速条件下测得, 而大的流速下, 即使在夏季, Chl-a 浓度也低于 $90 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 相关性分析发现, Chl-a 浓度与流速呈显著的负相关关系 ($R^2 = 0.618$, $P < 0.001$)^[23]. 从中心湖水动力的空间特征来看, 较大的流速观测值均出现在北河段, 北河段平均流速为 $0.14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 显著高于中河段和南河段的 $0.09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 也高于东河段和西河段的 $0.09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 但北河段 Chl-a 含量长年处于最低水平, 年均含量为 $30.82 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 远低于南河段和中河段 Chl-a 的年均含量, 两个河段分别为 $50.62 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $41.13 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 也低于西和东河段的 $39.47 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $36.16 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 这些分析结果均说明较大的水动力条件能够降低浮游植物的生物量, 对比南河段和北河段, 可以发现, 在各种形态营养盐水平差异不明显, 河道形态比较类似时, 当平均流速从 $0.09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 提高到 $0.14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, Chl-a 浓度可降低 39.11%.

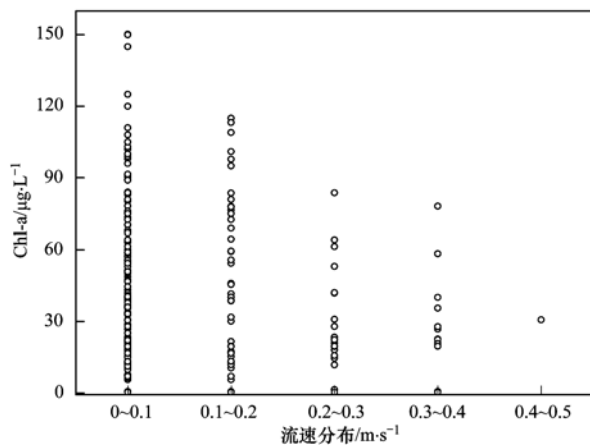


图 6 Chl-a 浓度在不同流速范围内的分布

Fig. 6 Distributions of Chl-a concentration in different ranges of flow velocity

水动力条件与 Chl-a 的负相关关系在不少研究中也见报道. Isvánovics 等^[24]对东欧 3 条河流 5 ~ 8 a 的分析发现, 每小时的流量和 Chl-a 总体上呈负相关关系. Desortová 等^[25]对捷克 Vltava 河 2002 ~ 2007 年的密集观测发现, Chl-a 与流速呈显著相关 ($R^2 = 0.359$, $P < 0.001$). 王丽平等^[26]对三峡水库支流大宁河的调查发现, 3 月和 5 月水华暴发期间 Chl-a 浓度与流速均呈显著负相关关系, 认为流速和流量都对藻细胞增殖或聚集产生直接或间接的影响. 王玲玲等^[27]发现香溪河库湾流速与 Chl-a 浓

度存在负相关关系, 且相关性可采用对数曲线进行描述. 王红萍等^[28]对汉江水华的水文因素分析发现, 流量增大减缓了藻类的比增长速率, 有利于抑制水华的发生. 在澳大利亚, 较小的河面坡度和围堰使得河流流速缓慢, 致使 1991 年以来多次暴发水华事件, 近年来通过流速控制, 大大降低了水华暴发的风险^[29]. 对于中心湖北河段和南河段, 两个河道营养盐水平相当, 受阳光照射条件相当, 但受地形和盛行风向的影响, 北河段平均流速为 $0.14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, Chl-a 常年处于最低水平, 南河段平均流速仅为 $0.09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, Chl-a 则常年处于较高水平, 可见两个河道之间 Chl-a 的差异与不同的水动力条件有关. 在遇到浮游植物含量过高引起水质恶化时, 通过适当提高河道流速, 能够有效抑制浮游植物的生长.

4 结论

(1) 中心湖全湖 TN 浓度为 $0.53 \sim 4.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP 浓度为 $0.056 \sim 0.75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 属典型的富营养化封闭水体, 主要环境因子浊度、TN、TP 等和 Chl-a 含量具有相似的季节变化趋势. 多元分析表明, 中心湖各浮游植物生物量与水温、浊度、TN 和 TP 均呈显著正相关关系, 水温是浮游植物生长的重要限制因子, 浊度、TN 和 TP 既是浮游植物生长的影响因素, 又是浮游植物生物量增加的结果, TN/TP 对浮游植物生长的影响无关.

(2) 水动力条件空间差异比较明显, 是导致 Chl-a 空间差异的主要因素. 在盛行风向和河道地理位置的影响下, 北河段常年流速最高, 年平均值为 $0.14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 但 Chl-a 浓度常年处于较低水平, 与之对应的南河段流速最低, 平均流速仅为 $0.09 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, Chl-a 浓度最高, 为北河段的 1.6 倍. 流速与 Chl-a 浓度呈显著的负相关关系. 富营养化封闭水体中, 较大强度的水动力条件能够对浮游植物生长产生显著的抑制作用, 可为相关水体的水华防治提供有益借鉴.

参考文献:

- [1] 刘春光, 金相灿, 孙凌, 等. 城市小型人工湖围隔中生源要素和藻类的时空分布[J]. 环境科学学报, 2004, 24(6): 1039-1045.
- [2] Li F P, Zhang H P, Meng X Z, et al. Contamination by persistent toxic substances in surface sediment of urban rivers in Chaohu City, China[J]. Journal of Environmental Sciences-China, 2012, 24(11): 1934-1941.
- [3] 刘波, 王国祥, 王凤贺, 等. 不同曝气方式对城市重污染河道水体氮素迁移与转化的影响[J]. 环境科学, 2011, 32

- (10): 2971-2978.
- [4] Duan H T, Ma R H, Xu X F, *et al.* Two-decade reconstruction of algal blooms in China's Lake Taihu [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(10): 3522-3528.
- [5] 龙天渝, 蒙国湖, 吴磊, 等. 水动力条件对嘉陵江重庆主城区藻类生长影响的数值模拟[J]. *环境科学*, 2010, **31**(7): 1498-1503.
- [6] 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.
- [7] Paerl H W, Hall N S, Calandrino E S. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a world experiencing anthropogenic and climatic-induced change[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(10): 1739-1745.
- [8] Lehman J T. Nuisance cyanobacteria in an urbanized impoundment: interacting internal phosphorus loading, nitrogen metabolism, and polymixis[J]. *Hydrobiologia*, 2011, **661**(1): 277-287.
- [9] 江敏, 余根鼎, 戴习林, 等. 凡纳滨对虾养殖塘叶绿素 a 与水质因子的多元回归分析[J]. *水产学报*, 2010, **34**(11): 1712-1718.
- [10] Schneider Y, Grube S, Weilandt M. Determination and evaluation of the phosphorus load of an artificial shallow lake[J]. *Water Science and Technology*, 2008, **58**(10): 1993-2000.
- [11] 蒋小欣, 阮晓红, 邢雅囡, 等. 城市重污染河道上覆水氮营养盐浓度及 DO 水平对底质氮释放的影响[J]. *环境科学*, 2007, **28**(1): 87-91.
- [12] 王宇尧. 微循环曝气技术修复受污染封闭水体的研究[J]. *中国给水排水*, 2010, **26**(19): 90-91.
- [13] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [14] 陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(5): 550-552.
- [15] 朱宜平, 张海平, 李飞鹏, 等. 水动力对浮游生物影响的围隔研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(1): 69-75.
- [16] 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.
- [17] 王书航, 姜霞, 金相灿. 巢湖水环境因子的时空变化及对水华发生的影响[J]. *湖泊科学*, 2011, **23**(6): 873-880.
- [18] 李秋华, 林秋奇, 韩博平. 广东大中型水库电导率分布特征及其受 N、P 营养盐的影响[J]. *生态环境*, 2005, **14**(1): 16-20.
- [19] 丰茂武, 吴云海, 冯仕训, 等. 不同氮磷比对藻类生长的影响[J]. *生态环境*, 2008, **17**(5): 1759-1763.
- [20] Smith V H. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton[J]. *Science*, 1983, **221**(4611): 669-671.
- [21] Xie P, Xie L Q, Li S X, *et al.* The low TN: TP ratio, a cause or a result of Microcystis blooms? [J]. *Water Research*, 2003, **37**(9): 2073-2080.
- [22] 朱宜平. 富营养化水体主要生态过程机理及生态动力学模拟研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
- [23] Li F P, Zhang H P, Zhu Y P, *et al.* Effect of flow velocity on phytoplankton biomass and composition in a freshwater lake[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **447**: 64-71.
- [24] Istvánovics V, Honti M. Phytoplankton growth in three rivers: The role of meroplankton and the benthic retention hypothesis [J]. *Limnology and Oceanography*, 2011, **56**(4): 1439-1452.
- [25] Desortová B, Punčochář P. Variability of phytoplankton biomass in a lowland river: Response to climate conditions [J]. *Limnologica*, 2011, **41**(3): 160-166.
- [26] 王丽平, 郑丙辉, 张佳磊, 等. 三峡水库蓄水后对支流大宁河富营养化特征及水动力的影响[J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(2): 232-237.
- [27] 王玲玲, 戴会超, 蔡庆华. 香溪河水动力因子与叶绿素 a 分布的数值预测及相关性研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2009, **17**(5): 652-658.
- [28] 王红萍, 夏军, 谢平, 等. 汉江水华水文因素作用机理——基于藻类生长动力学研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2004, **13**(3): 282-285.
- [29] Mitrovc S M, Chessman B C, Bowling L C, *et al.* Modelling suppression of cyanobacterial blooms by flow management in a lowland river[J]. *River Research and Applications*, 2006, **22**(1): 109-114.

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM _{2.5} in Nanjing Region	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by O ₃ /H ₂ O ₂	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash	JI Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO ₂ in Aquatic System	CHEN Jin-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO ₂ Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu ²⁺ Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO ₂ Leakage by High-throughput Sequencing Technology	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《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)

2013年10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行