

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

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

区域空气质量模拟中查表法的应用研究	谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮(1409)
长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用	苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健(1418)
北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究	徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋(1425)
上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究	张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红(1431)
青岛市大气 PM _{2.5} 元素组成及来源研究	李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军(1438)
冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究	王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅(1446)
再悬浮装置在大气 PM _{2.5} 源谱分析中的应用	段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲(1452)
黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究	魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵(1457)
三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探	蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静(1463)
香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析	王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰(1471)
臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响	陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅(1476)
托木尔峰青冰滩 72 号冰川径流水化学特征初步研究	赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰(1484)
五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究	张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林(1491)
7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律	卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷(1497)
巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性	李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠(1503)
北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析	郭婧,荆红卫,李金香,李令军(1511)
东莞运河排涝对东江河网水质影响分析	孙磊,毛献忠,黄旻旻(1519)
北京平原区地下水污染源识别与危害性分级	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(1526)
地下水曝气修复过程的三维数值模拟	李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌(1532)
垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究	邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永(1540)
新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究	高明瑜,谢慧君,王文兴(1550)
营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响	齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋(1556)
水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究	傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成(1564)
酞酸酯在模拟海河苕草微宇宙中的消减和分布特征	迟杰,杨青(1570)
电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究	刘书宇,吴明红,姜钦鹏(1575)
青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析	李强坤,胡亚伟,罗良国(1579)
四溴双酚 A 的辐射降解研究	李杰,徐殿斗,徐刚,马玲玲,吴明红(1587)
污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究	王红娟,齐飞,封莉,张立秋(1591)
高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响	李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰(1597)
城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成 NDMA 的影响因素研究	尚晓玲,李咏梅(1604)
利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究	沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙(1609)
好氧污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 的变化特性	王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓姣,竺建荣(1614)
活性污泥对病毒的生物吸附特性	周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪(1621)
阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律	邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松(1625)
两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征	李婷,孟昭福,张斌(1632)
表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响	张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州(1639)
南京市 4 个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析	葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军(1646)
焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能	陈春,李文英,吴静文,李静(1652)
Xanthobacter flavus DT8 降解二噁英的特性研究	金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟(1657)
未开发油气田地地表炔氧化菌空间定量分布	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(1663)
矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究	赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才(1670)
长江中游干流及 22 条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险	李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红(1676)
典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险	吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红(1682)
闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究	陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛(1687)
三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价	王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩(1693)
典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险	邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许政英(1700)
密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价	高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,李宏兵(1707)
湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性	杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰(1718)
基于 GIS 的某训练场土壤重金属污染评价	刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军(1725)
土壤质地和湿度对 SVE 技术修复苯污染土壤的影响	刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野(1731)
蒙脱土、高岭土和针铁矿对 DNA 吸附与解吸特征	王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰(1736)
LNAPL 在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究	潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙(1744)
亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征	董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷(1753)
蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究	任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥(1760)
固定化微生物技术修复 PAHs 污染土壤的研究进展	钱林波,元妙新,陈宝梁(1767)
《环境科学》征订启事(1483)	《环境科学》征稿简则(1620)
信息(1490,1496,1586,1743)	

垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究

邹锐^{1,5}, 周璟², 孙永健³, 嵇晓燕⁴, 岳佳⁵, 刘永^{2*}

(1. Tetra Tech, Inc. 10306 Eaton Place, Ste 340, Fairfax, VA 22030, USA; 2. 北京大学环境科学与工程学院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871; 3. 南京工业大学材料化学工程国家重点实验室, 南京 210009; 4. 中国环境监测总站, 北京 100012; 5. 昆明诚锐环保科技有限公司, 昆明 650101)

摘要: 在蓝藻水华的控制研究中, 目前的发展趋势是采用快速、生态安全且经济有效的技术, 其中使用垂向水动力扰动机抑制蓝藻备受关注, 但缺乏深入和定量的工程设计与效果评估研究. 针对垂向水动力扰动机的蓝藻抑制效应开展数值实验研究, 以三维数值营养盐-藻类动力学模型(EFDC)为框架, 定量探讨了扰动机数量及其位置分布对叶绿素、总氮和总磷的影响. 模拟结果表明, 扰动机的存在对蓝藻抑制具有比较明显的作用, 随着扰动机数量由0逐渐增加到20个时, Chl-a峰值浓度共减少了 $37.6952\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 并且扰动机对水质改善的程度与其数量存在很强的非线性关系, 即当扰动机数量由无到有并逐渐增加时, 藻类抑制的效果明显增强; 但当扰动机的数量增加到一定量时, 进一步增加数量将不会相应增强蓝藻抑制效果. 这表明扰动机存在一个最佳数量问题. 此外, 本研究发现除了数量之外, 扰动机的位置对蓝藻控制的效果也有很大影响. 数值实验结果显示如果扰动机放置位置得当, 少量的扰动机就可达到甚至超过更多扰动机所能达到的蓝藻控制效果. 尤其是优化12个扰动机的位置后, Chl-a峰值浓度比扰动机为20个时减少了 $7.1726\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 这些研究结果验证了国内外相关研究对水动力扰动机蓝藻控制效果的肯定性结果, 并进一步表明了在实际应用该项技术时必须因地制宜, 结合使用智能工程技术(如: 高分辨率数值模型)确定最佳扰动机数量与位置, 从而确保以最低成本获取最大的蓝藻控制效果. 除蓝藻控制之外, 数值实验结果也表明扰动机对营养盐浓度也有一定的降低效果.

关键词: 垂向水动力扰动机; 蓝藻; 数值实验; 数量; 空间分布

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1540-10

Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers

ZOU Rui^{1,5}, ZHOU Jing², SUN Yong-jian³, JI Xiao-yan⁴, YUE Jia⁵, LIU Yong²

(1. Tetra Tech, Inc. 10306 Eaton Place, Ste 340, Fairfax, VA 22030, USA; 2. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 3. State Key Laboratory of Materials-Oriented Chemical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China; 4. China National Environmental Monitoring Center, Beijing 100012, China; 5. Kunming Challenger Technology, Ltd., Kunming 650101, China)

Abstract: The main technology development on preventing blue-green algae blooms is moving towards developing efficient, ecologically safe, as well as cost-effective measures. Using vertical hydrodynamic mixers to inhibit blue-green algae is a long overlooked approach which deserves more attentions. In this paper, the algae suppression effect of vertical hydrodynamic mixer was studied using a numerical experiment approach, which models the influences of mixers on three water quality constituents Chl-a, TN and TP within a three-dimensional numerical nutrient-algae dynamics framework. The results showed that the presence of mixers had an obvious effect on suppressing blue-green algae. As the number of mixer gradually increased from 0 to 20, the peak concentration of Chl-a totally decreased $37.6952\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, and the magnitude of water quality improvement had a nonlinear relationship with the number of mixers. The nonlinearity is manifested by the results showing that the marginal suppression effect on algae corresponding to an additional mixer is significant when the number of mixers gradually increased from zero, and then became insignificant after the number of mixers reaches a certain threshold value. Therefore, the number of mixers should not exceed an upper threshold value to avoid low economical efficiency and non-optimal design. This study also found that the locations of mixers had significant impacts on the effectiveness of algae suppression. Numerical experiment results showed that if the mixers were placed at proper locations, fewer mixers could produce comparable or even higher algae suppression effect than more mixers that are placed at other locations. Especially when the number of mixer was 12, we maintained the same number but optimized its location, peak concentration of Chl-a reduced $7.1726\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ by comparing with the number of mixer was 20. In general, the numerical experiment results verified the findings of domestic and international researches regarding the algae suppression effect of vertical hydrodynamic mixers, and discovered the important

收稿日期: 2011-07-15; 修订日期: 2011-08-31

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2010ZX07102-006); 国家自然科学基金项目(41101180)

作者简介: 邹锐(1968~), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为水环境模型, E-mail: rz5q@yahoo.com

* 通讯联系人, E-mail: yongliu@pku.edu.cn

relationship between the algae suppression effectiveness and the number and locations of mixers. This study suggested that allowing cost-effective algae suppression in a specific waterbody, site-specific conditions must be accounted for applying an intelligent design approach with the aid of high-resolution numerical model to determine the optimal number and location of mixers. The numerical experiment also shows that mixers would reduce nutrient concentrations in addition to algae suppression, though at a much less magnitude.

Key words: vertical hydrodynamic mixer; blue-green algae; numerical experiment; quantity; spatial distribution

蓝藻水华能带来水体水质下降及一系列严重的水环境问题,是目前以及今后一段时期内全球共同面临的重大水环境问题之一.研究者在蓝藻水华的发生机制^[1,2]、蓝藻生长与环境因子关系^[3,4]等大量研究的基础上,探讨了抑制蓝藻的方法^[5,6]及抑藻后的环境效应^[7]等.目前虽有很多物理、化学和生物技术可以直接沉降或处理蓝藻,但其所花费的人力物力较大,若处理不当,反而会加重水华对水质的影响.因此,在快速、生态安全地抑制蓝藻水华的同时减少成本的投入,是今后防治蓝藻水华技术探索的主要方向.

控制营养物质浓度和人工水动力扰动是抑制藻华强度的 2 种方法^[8].在水体实现水动力扰动常用的办法包括压缩空气注入、使用飞机螺旋桨扰动机以及在水体表面安装相似设备等^[9].随着扰动技术的应用,Lewis 等^[10]提出将扰动作为一种方法,用以控制水库内部负荷和限制藻类生长;Jungo 等^[9]在荷兰 Nieuwe Meer 湖通过长达 7 a 的研究,发现水动力扰动使 Chl-a 浓度得到极大的降低;AMEC 地球与环境公司^[11]提出在美国樱桃溪水库安装浸没式扰动系统用以减少蓝藻生长的建议并得到了很好的实施应用;Hudnell 等^[12]通过长期研究发现,使用太阳能驱动的水动力扰动机 Solarbee 是一种有效控制淡水有害藻华的良好生态方法,此方法能够产生较长距离(>200 m)的水体表层扰动循环以抑制藻华.水动力扰动作为限制藻类生长的技术方法,在国外已经有很多应用实例^[8,13,14],但在国内相关报道相对较少^[15].

Hudnell^[16]指出垂向水动力扰动机技术作为一种在生态上安全的湖内管理技术,由于长期以来缺乏系统理论的研究,而使其应用受到不该有的忽视.迄今为止,在国际上对混合机蓝藻控制效应研究采用的都是传统的基于观测数据的现象性方法,即在不同的湖泊或水库安装扰动机并观察安装前后水华与水质如何改变.但是方法本身却有严重局限,在过去的研究中发现扰动机在一些水体中效果良好,而在另一些水体中则没有明显效果,而数据本身对此难以做出合理解释^[12].显然,

这些矛盾性的结论无法对水质管理机构对是否实施该项技术以及在何等规模上实施提供科学的决策支持.

综上,对于某一特定水体而言,要实现蓝藻控制和水质改善的决策支持,需要克服传统现象性实验方法的缺陷,转而通过智能工程设计技术(如:水质模型)来系统地研究安装水动力扰动机是否会产生效果,以及若有效果,扰动机的数量和位置是否对蓝藻控制效果有明显影响;进一步,即便两者都有明显影响,仍有必要对扰动机就数量和位置进行优化以使有限的工程项目投入产生尽可能大的治理效果.基于以上现实与科学问题,本研究在国际上首次以三维数值模型的形式基于 EFDC 三维数值营养盐-藻类动力学模型框架探索了垂向水动力扰动机对蓝藻生长的影响,并研究扰动机数量与位置对蓝藻控制效应的影响,以期有效防治蓝藻水华改善水质提供科学的决策支持.

1 研究方法

1.1 数值模型

本研究采用 EFDC(environmental fluid dynamics code)作为数值模拟的平台,EFDC 是由美国国家环保署支持并推荐用于复杂地表水模拟研究的高端水质-水动力模型系统^[17],包括水动力模块、泥沙模块、污染物输移模块和水质模块,可以用于湖库、海湾、河流河口和海域等水质模拟和环境容量计算.该模型在国内外都有广泛应用^[18~26].EFDC 模型采用 σ 坐标下的三维水动力方程,其 x 、 y 方向动量方程、连续性方程、状态方程和水质变量输移方程如下^[17,18]:

$$\begin{aligned} & \partial_t(mHu) + \partial_x(m_yHuu) + \partial_y(m_xHvu) + \\ & \partial_z(mwu) - (mf + v\partial_xm_y - u\partial_y m_x)Hv \\ & = -m_yH\partial_x(g\zeta + p) - m_y(\partial_xh - \\ & z\partial_xH)\partial_zp + \partial_z(mH^{-1}A_v\partial_zu) + Q_u \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \partial_t(mHv) + \partial_x(m_yHuv) + \partial_y(m_xHvv) + \\ & \partial_z(mwv) + (mf + v\partial_xm_y - u\partial_y m_x)Hu \\ & = -m_xH\partial_y(g\zeta + p) - m_x(\partial_yh - z\partial_yH)\partial_zp + \\ & \partial_z(mH^{-1}A_v\partial_zv) + Q_v \end{aligned} \quad (2)$$

$$\partial_t(m\zeta) + \partial_x(m_y Hu) + \partial_y(m_x Hv) + \partial_z(mw) = 0 \quad (3)$$

$$\rho = \rho(P, S, T) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \partial_t(m_x m_y Hc) + \partial_x(m_y Huc) + \partial_y(m_x Hvc) + \\ & \partial_z(m_x m_y wc) - \partial_z(m_x m_y w_{sc} c) \\ & = \partial_x \left(\frac{m_x}{m_x} HK_H \partial_x c \right) + \partial_y \left(\frac{m_x}{m_y} HK_H \partial_y c \right) + \\ & \partial_z \left(m_x m_y \frac{K_v}{H} \partial_z c \right) + Q_c \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $z = (z^* + h)/(\zeta + h)$, z^* 表示垂向的物理坐标, $-h$ 和 ζ 分别是底面和自由水面高程, $H = h + \zeta$ 是总水深, u 和 v 分别是曲线正交坐标系中 x 和 y 方向的速度分量, w 为垂向速度分量, m_x 和 m_y 是度量张量的对角元素的平方根, $m = m_x m_y$ 是雅克比行列式, p 是大气压, ρ 是水的密度, T 和 S 分别是温度和盐度. 动量方程中的 f 是柯氏力参数, A_v 是垂向紊动或涡旋黏度, Q_u 和 Q_v 是动量源汇项, 浮力 b 定义为密度的标准化偏移量. 在水质变量输移方程中, c 为水质变量浓度, K_v 和 K_H 分别为垂向和水平的紊动扩散系数, Q_c 为源汇项, 包括边界输入输出以及内部生物化学动力响应项.

在 EFDC 模型中, 上述控制方程是用有限差分法求解, 因此具体建模时对象水体将被切割为比较小的体积单元. 在应用 EFDC 研究水动力扰动机的蓝藻控制效果时, 将在模型中对相应的体积单元按照扰动机的取水深度与放水深度以及流量在控制方程(1)和(2)中对动量源汇项赋值, 并在水质输移方程(5)中对水质源汇项赋值. 如假设扰动机流量为 Q , 则在取水体积单元将产生来自于东南西北这 4 个方向的动量分量, 每个分量的大小相应水流量 $Q/4$. 相应的, 在放水体积单元中产生向 4 个方向扩散的动量分量, 每个分量相应的水流量为 $Q/4$. 在求解过程中上述的水流分量将被转化为速度分量以表达动量源. 除动量平衡之外, 水流与水质源汇项平衡以及由此引起的水动力与水质动力过程已在 EFDC 中表达, 在此不再赘述.

1.2 数值实验

本研究应用 EFDC 对特定水体开展垂向水动力扰动机对蓝藻控制效应的数值实验, 实验水体面积大小为 $100 \text{ m} \times 500 \text{ m}$, 深度为 6 m 左右. 为了充分表达水下地形的随机性, 本研究采用随机扰动的方式对每个网格的水深进行了扰动. 注意在实际水体中水下地形可能要平滑的多, 但是在本研究中将只考虑上述随机扰动地形的情况. 在最近进行的深入研究中, 本研究小组采用了平整地形的设置, 也得到了类似的扰动机蓝藻抑制结果, 表明本研究的发现对不同的地形条件也是适用的. 在实验中, 水动力扰动机的参数设置参考了美国 Solarbee Inc 公司的太阳能长程循环混合设备 Solarbee^[12] 和南京太阳能水生生态修复系统 IPOCH^[15]. IPOCH 主要采用太阳能水生生态修复系统 (IPOCH50S6-DH3F), 进水口结构采用 DI12/25 进水结构, 有 2 个可独立调节进水深度的进水口, 分流结构采用 ADS95/21 可调节流态的组合式分流结构. 这些设备已用于湖泊、水库、河流、水源地和城市景观水体的水质改善和蓝藻治理^[16,27,28]. 本研究中所用的扰动机流量规格为 $0.8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. 为了充分模拟水动力扰动对蓝藻暴发以及营养盐浓度的影响, 笔者采用国家水体污染控制与治理科技重大专项课题所开发的三维水动力-营养盐-藻类动力模型的水质与参数结构^[20], 以便能够表达真实富营养化水体的动力学特征. 由于扰动机的尺寸比较小, 因此要准确从空间上表达其影响就需要用很高网格分辨率. 本研究采用的网格分辨率为 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$, 并在垂直方向上将水体分为 6 层以表达垂直方向上的水动力与水质精细结构(图 1). 数值研究的首要目的是探索水动力扰动机究竟对蓝藻是否有抑制作用, 以及对 TN 和 TP 是否有改善作用. 进一步, 将探索水动力扰动机的数量及其在水体中的位置不同对蓝藻控制效果的影响. 为了实现上述研究目标, 本研究针对安装混合机之前及安装不同数量不同位置的混合机后的水质情况及蓝藻水平进行了长达 1 a 的模拟; 模拟时用的表面边界条件

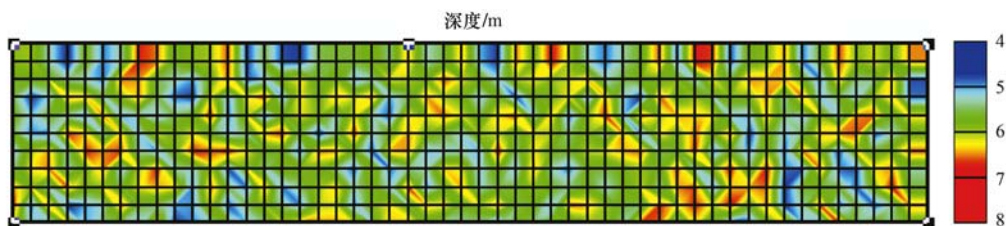


图 1 垂向扰动机数值实验所用的有限差分网格及实验水体地形示意

Fig. 1 Schematic plan about finite difference grids and topographic map of the experimental waterbody

(包括风向、风速、气温、相对湿度以及云度等)均与滇池模型相同。

2 结果与讨论

2.1 水动力扰动机对水体水质的影响

为探讨水动力扰动对水质的影响,在实验中设计了多个扰动机基本放置的方案情景,包括 0 个、1 个、4 个、8 个、12 个、20 个(图 2),图 2 中点代表每个扰动机在水体中放置的位置。由于本研究的目的是探索扰动机数量与位置对蓝藻抑制效果的可能影响,而不是对具体的工程提供实施指导,因此在扰动机的位置设置时采用了随机定位的方法,而不是针对性地根据水深位置等因素进行空间布置。采用随机定位的方法的优点在于

能够保证数值实验结果的无偏好性,因此结论更具有一般性。在现实的工程优化设计中,则需要根据水深空间分布等因素对扰动机位置进行安排以期取得尽可能好的效果。

对于不同扰动机数量及其相应的位置分布情况,通过 EFDC 进行模拟,评价指标主要选用 Chl-a 浓度峰值及 TP、TN 平均浓度;其理由在于 Chl-a 浓度峰值是评估蓝藻暴发的主要因子,TP、TN 平均浓度是评价营养盐浓度的主要因子。模拟后得出 3 个指标的值并进行比较(表 1、图 3)。

实验研究发现,水动力扰动机对水质有较为明显的影响。以 Chl-a 浓度峰值为例,在没有扰动机时,Chl-a 浓度峰值为 $157.6\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,在放置 1 个扰动机后,能改善到 $147.2\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,说明放置扰动机

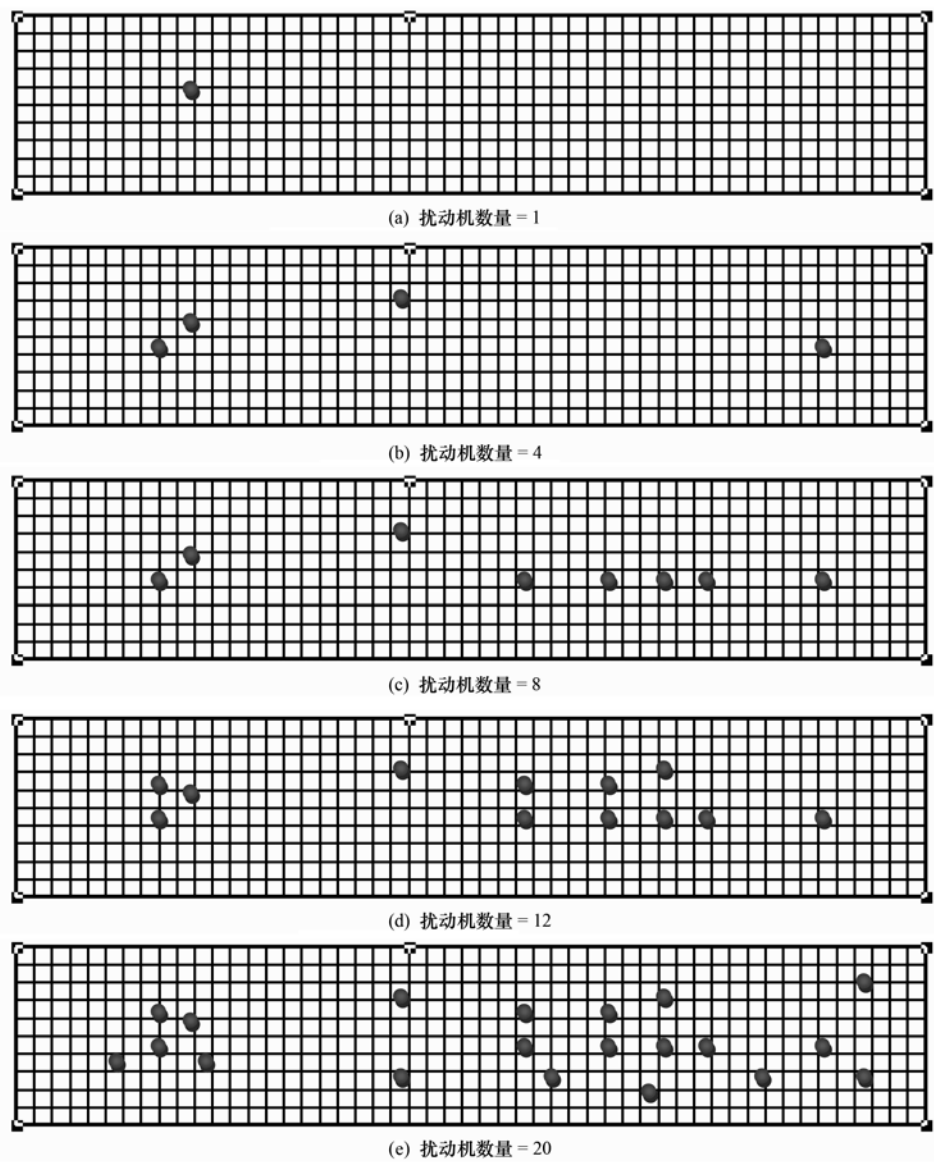


图 2 不同扰动机数量及其在水体中相应的位置

Fig. 2 Spatial placement of different numbers of mixers in waterbody

表 1 基本放置方案下Chl-a浓度峰值及 TN、TP 平均浓度的模拟值

Table 1 Simulated peak Chl-a and average TN and TP concentrations with different numbers of mixers

放置方案	扰动机数量 /个	Chl-a / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	TP / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
基本放置	0	157.6	0.17	2.01
基本放置	1	147.2	0.17	1.95
基本放置	4	122.9	0.16	1.91
基本放置	8	122.8	0.16	1.88
基本放置	12	120.9	0.16	1.86
基本放置	20	119.9	0.16	1.86

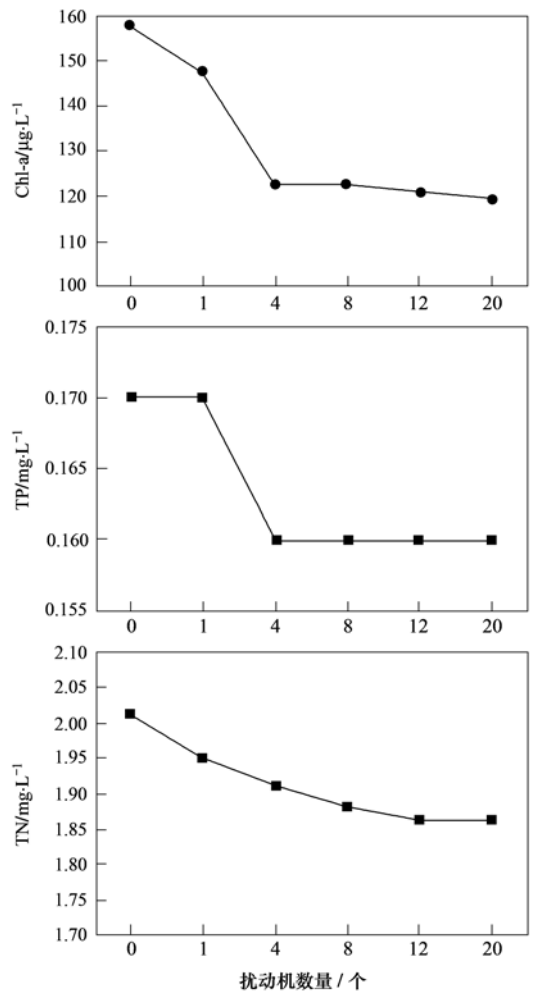


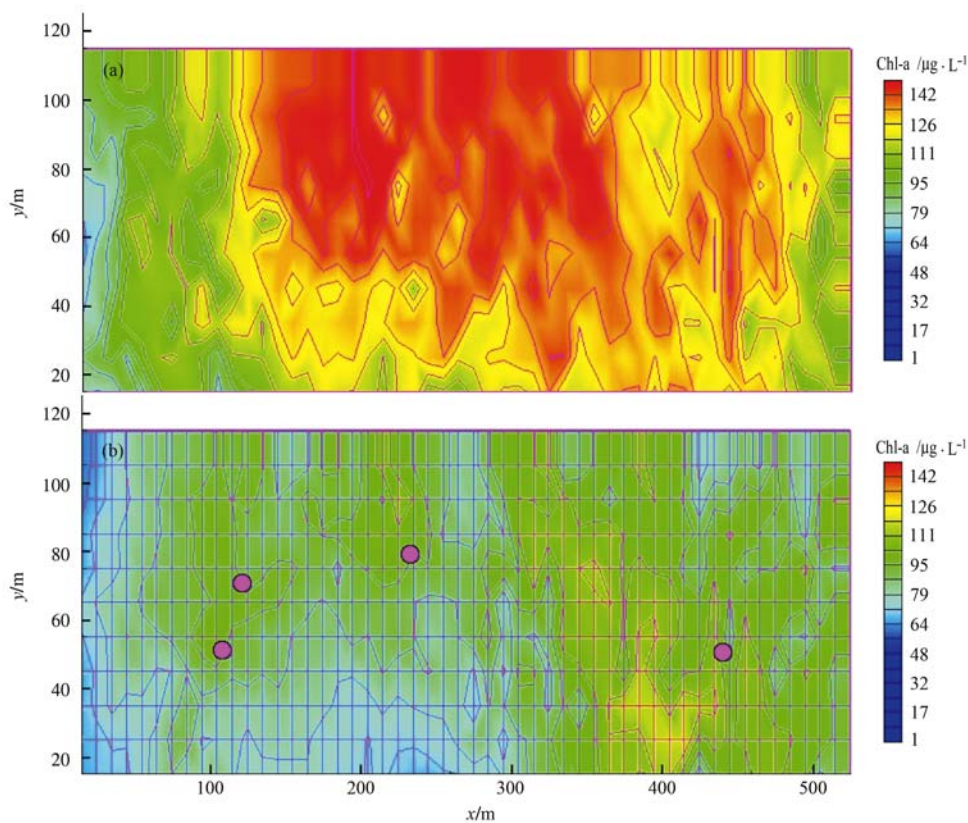
图 3 扰动机数量对Chl-a浓度峰值以及 TN、TP 平均浓度的影响

Fig. 3 Impact of the number of mixers on water quality improvement effects

确实能降低Chl-a的浓度峰值. 但是另一方面, 仅仅将叶绿素从 $157.6\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到 $147.2\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 虽然从数值上是比较明显的, 但是这个效果却并没有达到视觉上可以观察到的程度; 此外, 即使对这种效果进行水质采样监测, 但也可能因为监测频度不

够或者采样/分析误差而无法确定其效果. 这也可解释引言中提到的扰动机在一些水体中没有明显效果的原因, 很可能是因为扰动机数量不够造成, 当然也许还有其他一些因素, 但这些都不在本研究讨论范围之内. 进一步看表 1 和图 3, 当扰动机增加到 4 个时, Chl-a 浓度峰值下降到 $122.9\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 相比放置前下降了约 $35\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 即相当于大约 22% 的削减率; 显然, 在同样的水体中放置 4 个扰动机后藻类抑制效果是很明显的. 如图 4 所示, 在放置前后 2 种情形下水体中 Chl-a 空间分布差别明显 (图 4). 没有扰动机时, 整个水体 Chl-a 大部分集中在 $130\sim150\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右的浓度区域, 有 4 个扰动机时, 整个水体 Chl-a 浓度则明显下降, 大部分集中在 $100\sim120\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右的浓度范围. 通过模拟结果能很好地看到 Chl-a 浓度的下降, 表明扰动机对 Chl-a 的影响程度很大. 对比放置 1 个和 4 个扰动机对叶绿素的消减作用说明了要想得到理想的藻类抑制效果, 必须安装足够数量的扰动机. 反过来, 如果在实际研究中对某个需要安装 4 个扰动机才能产生明显效果的水体, 由于没有定量指导, 只安装 1 台扰动机而后通过现场观测来评估效果的话, 就可能会得出结论认为扰动机对蓝藻抑制没有效果. 显然, 这个结论是由于实验设计上的缺陷产生的, 并不代表真实情况. 这表明了在进行类似蓝藻控制实验的设计中应用定量的理论工具指导实验场很重要.

由表 1 的结果还可知, 随着扰动机数量的增加, Chl-a 浓度峰值和 TP、TN 平均浓度总体呈现减少趋势, 以 Chl-a 最为明显, 随着扰动机从 0 逐渐增加到 20 个, 其浓度峰值共减少了 $37.70\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 当扰动机增加到 20 个时, TP、TN 平均浓度分别减少了 $0.01\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.15\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 结合图 3 的分析, 在扰动机从 0 增加到 4 个时, Chl-a 浓度峰值共减少了 $34.7\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 即达到大约 22% 的削减率, 但此后继续增加扰动机所产生的藻类消减趋势变缓, 即当扰动机从 4 个增加到 20 个时, 也只进一步减少 $3.03\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Chl-a (大约 2% 左右); 总体来看, 在总共的 24% 削减率中, 前 4 个扰动机就达到了总削减率的 92% (即 22% 削减率), 而此后增加的 16 个扰动机仅仅完成总削减率的 8%. 产生这个现象的原因是由于蓝藻响应与扰动机数量之间存在非线性关系. 从图 3 可看出, 3 个指标变化与扰动机的数量有很强的非线性关系, 即当扰动机数量由无到有并逐渐增加时, 藻类抑制的效果明显, 但是当扰动机的数量增加到一定量时, 进一步增加扰动机数量将不会



X 代表水体长度; Y 代表宽度; (a) 无扰动机; (b) 4 个扰动机

图 4 没有扰动机与有 4 个扰动机情形下水体 Chl-a 浓度的影响比较

Fig. 4 Comparing Chl-a distributions between 4-mixer and no-mixer scenarios

相应增强对蓝藻的抑制效果(或效果不明显). 这表明要有效抑制一个特定富营养化水体的蓝藻,一方面需要安装足够多的扰动机以保证产生效果,另一方面,扰动机的数量并非多多益善,而是存在一个最佳数量的问题,所以在实际工程应用中,对于一个特定的水体首先要确定的就是究竟安装多少个扰动机才能够产生明显的蓝藻抑制效果,而后还需要应用科学的定量方法估计最适数量,以确保在产生足够蓝藻抑制效果的同时,不盲目安装过多的扰动机,从而避免浪费.

除抑制蓝藻之外,本数值实验也发现扰动机对 TP 和 TN 也会有一定的消减效果. 如表 1 所示,TP 和 TN 对于扰动机的存在与否以及数量具有一定的响应,这里的 TP 和 TN 不包括藻类中 N 和 P 变化的贡献,与蓝藻响应相比,营养盐的响应要微弱的多.

当扰动机数量由 1 ~ 20 个时,TP 平均浓度下降 0. 01 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 仅仅相当于大约 6% 左右的削减率; TN 平均浓度可以达到约 7. 5% 的削减率. 如果考虑到 Chl-a 降低所带来的藻类中 N 和 P 的降低,TP 和 TN 的削减率可能会更高些. 同样,扰动机数量对营养盐的消减作用也是存在非线性关系,即当扰动机增加到一定量后,营养盐将不会有进一步降低.

2. 2 水动力扰动机位置优化对水体水质的影响

上面探讨了扰动机对水质改善效果以及与扰动机数量之间的关系,下面将探讨水动力扰动机在水中不同位置是否会对水质产生不同的效应. 这里以 3 种放置情形进行比较(表 2). 序号 1 和 2 的放置情形即是扰动机数量分别为 8 个和 12 个时的基本放置方案; 对扰动机数量为 8 个时保持其数量不变、但变换放置的位置(图 5), 即变换位置放置方案

表 2 序号 1 ~ 3 放置方案下表层水体 Chl-a 浓度峰值和 TP、TN 平均浓度的模拟值

Table 2 Simulated peak Chl-a and average TN and TP concentrations under 1-3 placement schemes

序号	放置情形	扰动机数量/个	Chl-a/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
1	基本放置	8	122. 8	0. 16	1. 87
2	基本放置	12	120. 9	0. 16	1. 85
3	变换方位放置	8	119. 3	0. 16	1. 86

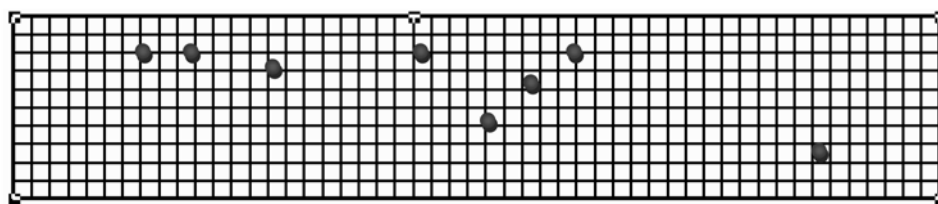


图5 扰动机数量为8的变换位置放置方案

Fig. 5 Alternative placement of 8 mixers

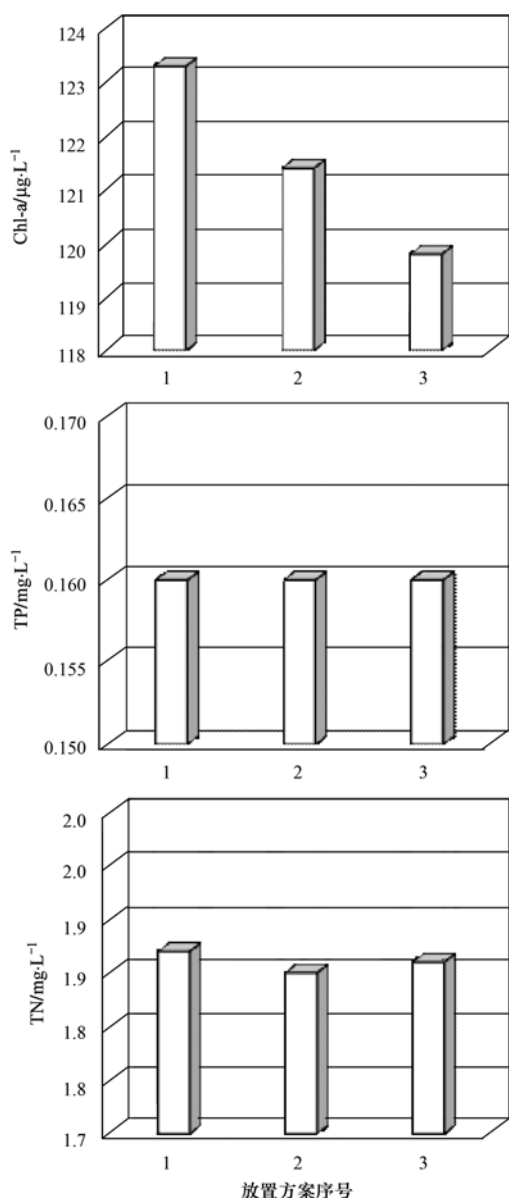


图6 序号1~3放置方案下表层水体Chl-a浓度峰值以及TP、TN平均浓度的影响比较

Fig. 6 Impact of mixer placement on peak Chl-a and average TP and TN concentrations under 1-3 placement schemes

(序号3). 在3种放置情形下对表层Chl-a浓度峰值和TP、TN平均浓度通过模拟结果进行比较(图6).

由表2,当8个扰动机均按基本方案放置,结果

表层水体Chl-a的浓度峰值是 $122.8 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 12个扰动机基于基本方案放置, Chl-a能稍微改善到 $120.9 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 然而,当8个扰动机根据变换位置方案(序号3)放置时, Chl-a的浓度峰值可低至 $119.3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,这甚至比基本方案的12个扰动机获得的效果还要略好. 由此可见,扰动机的安装位置不同会产生不同的蓝藻抑制效应; 上述研究显示,若扰动机放在合理的位置,用少量的扰动机就可能达到甚至超过在不合理位置上安装更多的扰动机能够带来的效应. 为了进一步验证这个结论,再对另一组放置方案进行分析,即在12个扰动机的基础上,将数量增加至20个,并对比3种放置情形(序号2、4、5)产生的效果(表3). 序号4的放置方案即是扰动机为20个时的基本放置方案; 对扰动机为12个时保持其数量不变但变换其放置的位置,即变换位置方案(序号5),见图7. 同样对3种放置方案下表层水体的Chl-a浓度峰值和TP、TN平均浓度通过模拟得出结果并进行比较,见图8.

由表3,当12个扰动机基于基本放置方案安装时,表层Chl-a浓度峰值是 $120.9 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 20个扰动机基于基本放置方案安装时, Chl-a能稍微改善到 $119.9 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 但当12个扰动机根据变换位置方案(序号5)放置时, Chl-a浓度峰值可低至 $112.7 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,这明显优于20个扰动机在基本放置方案安装所获得的效果. 这组比较验证了水动力扰动机的不同安装位置放置能显著影响对蓝藻的抑制效率; 当扰动机安装在合理的位置时,用少的扰动机(例如12个)就可能达到比安装在不合理位置上多的扰动机(例如20个)更大的蓝藻控制效益. 显然,在实际应用中,不只是需要通过科学方法确定合理的扰动机数量,以确保产生明显藻类抑制效果,还需要应用定量优化的方法,确定安装扰动机的优化安装位置,从而使工程实施中能够以尽可能低的费用实现尽可能高的蓝藻控制效果. 对于一个预期投入安装20台扰动机的控藻工程,如果优化了扰动机的安装位置,12台扰动机可以取代20台设备,用

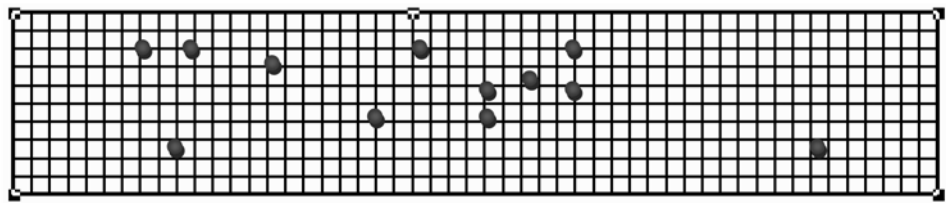


图 7 扰动机数量为 12 的变换位置放置方案
Fig. 7 Alternative placement of 12 mixers

表 3 序号 2、4、5 放置方案下表层水体 Chl-a 浓度峰值和 TP、TN 平均浓度的模拟值

Table 3 Simulated peak Chl-a and average TN and TP concentrations under placement schemes 2,4, and 5					
序号	放置情形	扰动机数量/个	Chl-a/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
2	基本放置	12	120.9	0.16	1.85
4	基本放置	20	119.9	0.16	1.86
5	变换方位放置	12	112.7	0.16	1.84

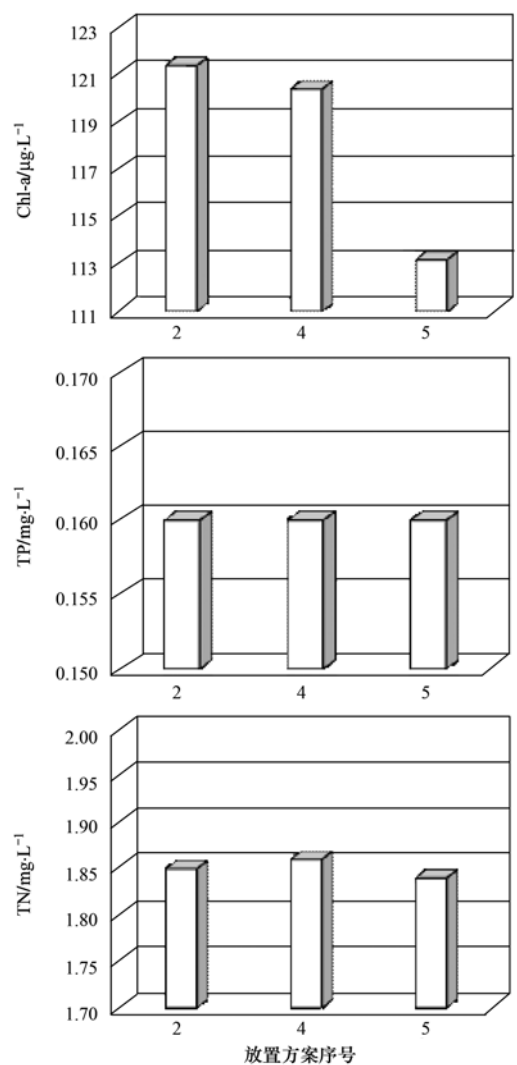


图 8 序号 2、4、5 放置方案下表层水体 Chl-a 浓度峰值以及 TP、TN 平均浓度的影响比较

Fig. 8 Impact of mixers placement on peak Chl-a and average TP and TN concentrations under placement schemes 2,4 and 5

效果。

表 2 和表 3 也给出了相应的营养盐控制效果。与蓝藻控制效果相比,营养盐对扰动机位置虽然也有一定响应,但是响应非常微弱。同样,如果考虑到 Chl-a 的降低所带来的藻类中 N 和 P 的降低,TP 和 TN 的削减率可能会更高些。

值得注意的是,上述扰动机效果的绝对量值只适用本研究设定的实验水体。对于现实中的不同水体,由于其所处的位置不同,气象条件不同,流域污染物特征不同,以及水下地形不同,相应的扰动机效果都是不一样的。在一个水体中某种放置方案会产生好效果,而在另一个水体中则可能需要变换位置以符合实际情况。在实际应用中,科学的方法就是对具体系统建立相应的 3-维高分辨率营养盐-藻类动力学模型,模拟由扰动机产生的水动力扰动以及对藻类及营养盐的抑制消减作用,从而确定合理的扰动机数量与位置,以确保在尽可能低的费用水平上产生尽可能明显藻类抑制效果,避免工程措施的盲目性与无效性。这些将是今后的重要研究内容。

虽然水动力扰动机的效果可能与其安装位置的水深具有一定相关关系,但是本研究没有对此进行深入探索,原因是在现实水体中,不单是局部水深,其周围水深分布都会对扰动机效果产生影响。而且当多个扰动机存在时,之间的交互作用也将使蓝藻抑制效果与安装位置水深的关系更加复杂,因此很难在某种特定的地形设置下得到具有普适性的扰动机效果与安装位置水深的关系。相反,实际的工程方案应该以针对性的模型研究为基础实施智能设计,而不是企图以数值实验的结果对现实中千变万化的水体工程设计为指导。基于相似的理由,以一个特定水体进行单个或多个扰动机影响范围之类的讨论也

60% 的投资获得比 100% 投资更好的蓝藻控制

没有现实的工程指导意义。

3 结论

(1)垂向水动力扰动机对水体蓝藻可以产生明显的抑制效应,这一结果与目前国际上这方面的有关实验研究结论相符。

(2)对于一个特定水体而言,扰动机数量对蓝藻控制效果有很大影响。只有当扰动机数量超过一定的下限阈值后,才能得到明显的蓝藻抑制效果。这个结果解释了在一些现场实验中观测不到蓝藻抑制效果的一种可能原因。

(3)数值实验结果表明藻类控制效果与扰动机的数量存在很强的非线性关系,说明当扰动机数量超过一定的上限阈值后,再增加扰动机数量就只能产生很小的额外效果;这表明在实践中,不仅需要确定扰动机的下限阈值,确保安装足够多的扰动机以产生明显效果,而且还需要确定扰动机的上限阈值,保证不盲目安装过多的扰动机。

(4)扰动机位置也会对蓝藻控制效果产生明显影响。结果显示,如果把12个扰动机安装在合理位置上,其产生的藻类抑制效果明显超过了20个安装在不合理位置的扰动机。这说明了优化扰动机的位置对改善水质的重要性。

(5)在所分析的水体中,在不考虑藻类密度变化对水体TN和TP的影响的情况下,扰动机对TN和TP也有一定的消减作用,但作用强度比对藻类的抑制效果弱的多。

(6)本研究中得到的扰动机效果的绝对量值只适用本研究设定的实验水体。对于现实中的不同水体,由于其所处的位置不同,气象条件不同,流域污染物特征不同,以及水下地形不同,相应的扰动机的效果及对数量与位置的响应都是不一样的。在实际应用中,科学的方法就是针对要治理的水体建立相应的3-维高分辨率营养盐-藻类动力学模型,模拟由扰动机产生的水动力扰动以及对藻类及营养盐的抑制消减作用,从而确定合理的扰动机数量与位置,以确保在尽可能低的费用水平上产生尽可能明显藻类抑制效果,避免工程措施的盲目性与无效性。这些将是今后的重要研究内容。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Xie L Q, Xie P, 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.
- [3] Joung S H, Oh H M, Ko S R, *et al.* Correlations between environmental factors and toxic and non-toxic *Microcystis* dynamics during bloom in Daechung Reservoir, Korea [J]. Harmful Algae, 2011, **10**(2): 188-193.
- [4] 李哲, 郭劲松, 方芳, 等. 三峡小江回水区蓝藻季节变化及其与主要环境因素的相互关系[J]. 环境科学, 2010, **31**(2): 301-309.
- [5] Nakai S, Inoue Y, Hosomi M, *et al.* Growth inhibition of blue-green algae by allelopathic effects of macrophytes [J]. Water Science and Technology, 1999, **39**(8): 47-53.
- [6] 郑宾国, 张继彪, 罗兴章, 等. γ -射线辐照对太湖水中原水中越冬蓝藻复苏的抑制[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(2): 316-320.
- [7] 潘继征, 李文朝, 陈开宁, 等. 滇池东北岸生态修复区的环境效应——I. 抑藻效应[J]. 湖泊科学, 2004, **16**(2): 141-148.
- [8] Elam K P. Effects of a surface circulator on temperature, dissolved oxygen, water velocity, and photosynthetic yield in Falling Creek Reservoir[D]. Master of Science in Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2008.
- [9] Jungo E, Visser P M, Stroom J, *et al.* Artificial mixing to reduce growth of the blue-green alga *Microcystis* in Lake Nieuwe Meer, Amsterdam; an evaluation of 7 years of experience[J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2001, **1**(1): 17-23.
- [10] Lewis W M, Saunders J F, McCutchan J H. Studies of phytoplankton response to nutrient enrichment in Cherry Creek Reservoir, Colorado[R]. 2004.
- [11] AMEC Earth & Environmental, Inc, Alex Horne Associates and Hydrosphere Resource Consultants, Inc. Feasibility Report Cherry Creek Reservoir Destratification[R]. 2005.
- [12] Hudnell H K, Jones C, Labisi B, *et al.* Freshwater harmful algal bloom (FHAB) suppression with solar powered circulation (SPC)[J]. Harmful Algae, 2010, **9**(2): 208-217.
- [13] Elliott J A, Irish A E, Reynolds C S. The effects of vertical mixing on a phytoplankton community: a modelling approach to the intermediate disturbance hypothesis[J]. Freshwater Biology, 2001, **46**(10): 1291-1297.
- [14] Byun D S, Wang X H, Zavatarelli M, *et al.* Effects of resuspended sediments and vertical mixing on phytoplankton spring bloom dynamics in a tidal estuarine embayment [J]. Journal of Marine Systems, 2007, **67**(1-2): 102-118.
- [15] 李瑞玲, 孙永健, 邹红菊. 太阳能水生态修复系统在南京溧水方便水库水体生态修复中的应用研究[C]. 第四届黄河杯城镇饮用水安全保障技术论坛论文集, 2010. 114-122.
- [16] Hudnell H K. Within water-body management: a needed but neglected complement to watershed management [J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2010, **12**(3): 205-207.
- [17] Hamrick J M. A Three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: theoretical and computational aspects[R]. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine

- Science, Special Report, 1992, **317**: 1-22.
- [18] Zou R, Parker A, Bai S. Hydrodynamic and eutrophication modeling for a tidal marsh impacted estuarine system using EFDC [C]. Estuarine and Coastal Modeling Congress, 2007. 561-589.
- [19] Zou R, Carter S, Shoemaker L, *et al.* Integrated hydrodynamic and water quality modeling system to support nutrient TMDL development for Wissahickon Creek, Pennsylvania [J]. Journal of Environmental Engineering, ASCE, 2006, **132** (4): 555-566.
- [20] 刘永,邹锐,郭怀成. 智能流域管理研究[M]. 北京:科学出版社,2012. 70-75.
- [21] He G J, Fang H W, Bai S, *et al.* Application of a three-dimensional eutrophication model for the Beijing Guanting Reservoir, China [J]. Ecological Modelling, 2011, **222** (8): 1491-1501.
- [22] Wu G Z, Xu Z X. Prediction of algal blooming using EFDC model: Case study in the Daoxiang Lake [J]. Ecological Modelling, 2011, **222** (6): 1245-1252.
- [23] 李兰,武见. 梯级水库三维环境流体动力学数值预测和水温分层与累积影响规律研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2010, **25** (2): 155-164.
- [24] 龙国庆,刘召平,梅志宏,等. 季调节深水大库全库区全年水温结构的模拟验证[J]. 水利学报, 2011, **42** (1): 33-39.
- [25] 郭羽,贾海峰. 水污染预警 DSS 系统框架下的白河水质预警模型研究[J]. 环境科学, 2010, **31** (12): 2866-2872.
- [26] 万由鹏,毛献忠. 深圳湾 TIN 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 数值模拟及减排效果分析[J]. 环境科学, 2011, **32** (2): 384-391.
- [27] 南京领先环保技术有限公司 [EB/OL]. <http://www.epfrontier.com>.
- [28] 太阳能驱动的水动力扰动机 Solarbee 技术[EB/OL]. <http://www.solarbee.com>.

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qingbiantan, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorus in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DT8	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《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5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 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. 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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行