

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第3期

Vol.34 No.3

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

BP网络框架下MODIS气溶胶光学厚度产品估算中国东部PM _{2.5}	郭建平, 吴业荣, 张小曳, 李小文(817)
北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究	林海峰, 辛金元, 张文煜, 王跃思, 刘子锐, 陈传雷(826)
气象因素对长三角背景地区甲烷浓度的影响分析	浦静姣, 徐宏辉, 顾骏强, 马千里, 方双喜, 周凌晔(835)
密闭化填埋作业条件下的场内恶臭污染分布情况与分析	路鹏, 吴世新, 戴志锋, 张晓辉, 苏昭辉, 周小飞, 代占国, 卢旭飞, 郑斌, 沈凯, 卫潘明(842)
冬季中国东海海水中挥发性卤代烃的分布特征和海-气通量	何真, 陆小兰, 杨桂朋(849)
2000~2010年大鹏湾颗粒有机物的年变化和年际变化	李绪录, 周毅频, 夏华永(857)
渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析	周然, 彭士涛, 覃雪波, 石洪华, 丁德文(864)
青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化	王鹏, 尚英男, 沈立成, 伍坤宇, 肖琼(874)
漳卫南运河流域非点源污染负荷估算及最佳管理措施优选	徐华山, 徐宗学, 刘品(882)
面向对象的湖泊污染控制智能工程设计方法	邹锐, 周璟, 刘永, 朱翔, 赵磊, 阳平坚, 郭怀成(892)
九龙江口湿地植物凋落物对沉积物有机质赋存的贡献	罗专溪, 邱昭政, 王振红, 颜昌宙(900)
修复达标土壤回填对地下水环境影响的层次化评估方法应用研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 樊艳玲, 夏天翔, 李婷婷, 田美影(907)
去除地下水中硝酸盐的渗透性反应墙研究	李秀利, 杨君君, 卢晓霞, 张姝, 侯珍(914)
北京城区雨水管道沉积物污染负荷研究	李海燕, 徐波平, 徐尚玲, 崔爽(919)
城市污水处理厂及其受纳水体中5种典型PPCPs的赋存特征和生态风险	温智皓, 段艳平, 孟祥周, 陈玲(927)
城市景观娱乐水体微生物风险评价	孙傅, 沙婧, 张一帆, 刘彦华(933)
模拟曝气生物滤池去除邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯试验研究	李伟, 赵晶, 余健, 任文辉(943)
膜生物反应器处理工业废水中膜污染及膜过滤特性研究	范举红, 余素林, 张培帅, 兰亚琼, 刘锐, 陈吕军(950)
γ -Al ₂ O ₃ 负载磷钨酸催化强化电化法处理水中酸性大红3R的研究	岳琳, 王开红, 郭建博, 杨景亮, 刘宝友, 廉静, 王涛(955)
活性炭催化过硫酸钠降解金橙G动力学	杨梅梅, 周少奇, 刘琳, 郑可(962)
ABR反应器处理碱减量印染废水的启动研究	杨波, 钟启俊, 李方, 田晴(968)
O ₃ -BAF深度处理制革废水中沿程污染物降解规律	余彬, 刘锐, 程家迪, 范举红, 李昌湖, 冉坤, 曹国华, 陈吕军(974)
规模化猪场养殖废水UASB-SFSBR-MAP处理工艺中试研究	王亮, 陈重军, 陈英旭, 吴伟祥(979)
连续流态下以城市污水培养好氧颗粒污泥及颗粒特性研究	牛姝, 段百川, 张祚薰, 刘士峰, 张家铭, 王聪, 周丹丹(986)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅰ)——模型的建立	张超, 陈银广(993)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅱ)——动力学模拟	张超, 陈银广(998)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅲ)——模型的应用	张超, 陈银广(1004)
三峡水库两条支流水-气界面CO ₂ 、CH ₄ 通量比较初探	李哲, 白镭, 郭劲松, 方芳, 蒋滔(1008)
不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素	陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 刘艳, 任景全, 谢薇(1017)
黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素	周小刚, 张彦军, 南雅芳, 刘庆芳, 郭胜利(1026)
层次化健康风险评估方法在苯污染场地的应用及效益评估	姜林, 钟茂生, 梁竞, 姚珏君, 夏天翔, 樊艳玲, 李敬东, 唐振强(1034)
海州湾滩涂重金属污染的历史记录	张瑞, 张帆, 刘付程, 尹福军, 丁迎军, 高金荣, 陈晶, 邵威(1044)
草海典型高原湿地表层沉积物重金属的积累、分布与污染评价	张清海, 林昌虎, 谭红, 林绍霞, 杨鸿波(1055)
大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析	程芳, 程金平, 桑恒春, 于金莲, 席磊, 皮帅帅(1062)
典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估	李如忠, 姜艳敏, 潘成荣, 陈婧, 徐晶晶(1067)
典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估	李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 陈婧, 姜艳敏(1076)
城市表层土壤磁化率与重金属含量分布的相关性研究	陈秀端, 卢新卫, 杨光(1086)
典型热带林地土壤团聚体颗粒中重金属的分布特征及其环境意义	龚仓, 徐殿斗, 成杭新, 任雅阁, 刘志明, 刘应汉, 刘飞, 聂海峰, 郑祥, 马玲玲(1094)
生态沟渠底泥属性与磷吸附特性研究	张树楠, 贾兆月, 肖润林, 杨凤飞, 余红兵, 刘锋, 吴金水(1101)
三峡库区澎溪河底泥及消落区土壤磷的形态及吸附特性研究	孙文彬, 杜斌, 赵秀兰, 何丙辉(1107)
Triton X-100在黄土上的吸附行为及影响因素	钟金魁, 赵保卫, 朱琨, 钱小龙, 张杰西(1114)
新疆哈密地区有机氯农药大气、土壤残留特征、气-土交换及潜在生态风险	马子龙, 毛蒲萱, 丁中原, 高宏, 黄韬, 田慧, 郭强(1120)
青海省西宁市与天峻县大气中得克隆与十溴联苯醚的水平与来源	何畅, 金军, 马召辉, 王英, 扎西卓玛, 马丽花(1129)
太湖沉积物中多溴联苯醚和类二噁英多氯联苯的水平垂直分布	马召辉, 金军, 亢学奎, 王英, 姜霞, 何松洁, 李明圆(1136)
典型电器工业区河涌沉积物中有机污染物特征分析	刘近, 邓代永, 许玫英, 孙国萍(1142)
柴油轿车颗粒多环芳烃的排放特性	谭丕强, 周舟, 胡志远, 楼狄明(1150)
机械炼焦过程生成飞灰中多环芳烃分布特征研究	牟玲, 彭林, 刘效峰, 白慧玲, 张建强(1156)
污泥干化床与芦苇床稳定化污泥中多环芳烃的含量比较	崔玉波, 孙红杰, 冉春秋, 李金凤, 谢瑶(1161)
固体添加剂对污泥焚烧过程中重金属迁移行为的影响	刘敬勇, 孙水裕, 陈涛(1166)
铸造废砂的环境毒性研究	张海凤, 王玉珏, 王劲磷, 黄天佑, 熊鹰(1174)
Cr ⁶⁺ 生物可利用度检测的微生物全细胞传感器CB10的构建及其响应特征	侯启会, 马安周, 庄绪亮, 庄国强(1181)
反硝化脱硫工艺中微生物群落结构及动态分析	于皓, 王爱杰, 陈川(1190)
农业废物好氧堆肥中环境因子对nirK、nirS和nosZ数量的影响	胡春晓, 陈耀宁, 张嘉超, 唐聪, 曾光明(1196)
蚯蚓体内过氧化物还原蛋白PRDX基因对土壤PAHs污染胁迫的转录响应	林康丽, 郑森林, 宋玉芳, 邱晓燕, 薛文玲(1204)
有序介孔碳载金/L-赖氨酸/纳米金修饰电极的制备及其对邻苯二酚、对苯二酚的检测响应研究	周耀渝, 汤琳, 李贞, 刘媛媛, 杨贵德, 伍梦诗, 雷晓霞, 曾光明(1211)
新建核电站风险信息沟通实证研究	贺桂珍, 吕永龙(1218)
《环境科学》征订启事(942) 《环境科学》征稿简则(992) 信息(932, 949, 1061, 1210) 专辑征稿通知(1173)	

面向对象的湖泊污染控制智能工程设计方法

邹锐¹, 周璟², 刘永^{2*}, 朱翔³, 赵磊³, 阳平坚², 郭怀成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. 云南省环境科学研究院, 昆明 650034)

摘要: 针对传统湖泊污染治理在工程设计上存在的不足, 在分析传统方法与面向对象的智能设计方法差异性的基础上, 提出面向对象的智能设计方法的关键特征, 即: 对象视角、因果为基、集点成面、时空优化。以蓝藻控制为对象, 基于垂向水动力扰动机和抽水除藻回灌技术, 对蓝藻控制和水质改善的效果进行了面向对象的智能设计分析。主要的研究结论如下: 传统的工程设计范式无法科学指导切实有效的湖泊污染工程设计与决策; 在案例中, 智能设计方法基于对象视角和定量因果分析, 确定扰动机技术对于实现低到中等的水质改善目标(如在本试验水体中设置 Chla 浓度峰值控制目标为 $70 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 具有比抽水技术高得多的效率, 但如果水质目标高于一定值(如在本试验水体中设置 Chla 浓度峰值控制目标 $> 100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 时, 扰动机不能实现, 抽水技术可以实现, 但单独使用抽水技术成本太高; 结合两种技术比单独使用其中一项都更有效率, 且两种技术的定量规模控制对实际工程效益和成本具有显著影响。本研究显示了应用面向对象的智能设计方法的重要性与潜力, 为促进湖泊污染的有效治理、有效改善湖泊水质以及相关决策提供一种新的方法学和思路。

关键词: 对象; 智能设计; 湖泊污染; 控制工程; 因果关联

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)03-0892-08

An Object-Oriented Intelligent Engineering Design Approach for Lake Pollution Control

ZOU Rui¹, ZHOU Jing², LIU Yong², ZHU Xiang³, ZHAO Lei³, YANG Ping-jian², GUO Huai-cheng²

(1. Tetra Tech, Inc. 10306 Eaton Place, Ste 340, Fairfax, VA 22030, USA; 2. The Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Yunnan Institute of Environmental Science, Kunming 650034, China)

Abstract: Regarding the shortage and deficiency of traditional lake pollution control engineering techniques, a new lake pollution control engineering approach was proposed in this study, based on object-oriented intelligent design (OOD) from the perspective of intelligence. It can provide a new methodology and framework for effectively controlling lake pollution and improving water quality. The differences between the traditional engineering techniques and the OOD approach were compared. The key points for OOD were described as object perspective, cause and effect foundation, set points into surface, and temporal and spatial optimization. The blue algae control in lake was taken as an example in this study. The effect of algae control and water quality improvement were analyzed in details from the perspective of object-oriented intelligent design based on two engineering techniques (vertical hydrodynamic mixer and pumping algacide recharge). The modeling results showed that the traditional engineering design paradigm cannot provide scientific and effective guidance for engineering design and decision-making regarding lake pollution. Intelligent design approach is based on the object perspective and quantitative causal analysis in this case. This approach identified that the efficiency of mixers was much higher than pumps in achieving the goal of low to moderate water quality improvement. However, when the objective of water quality exceeded a certain value (such as the control objective of peak Chla concentration exceeded $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ in this experimental water), the mixer cannot achieve this goal. The pump technique can achieve the goal but with higher cost. The efficiency of combining the two techniques was higher than using one of the two techniques alone. Moreover, the quantitative scale control of the two engineering techniques has a significant impact on the actual project benefits and costs.

Key words: object; intelligent design; lake pollution; control engineering; cause and effect relationship

湖泊富营养化与生态退化已成为目前我国水环境领域面临的重要挑战, 湖泊污染控制、治理及管理等方面急需开展综合研究^[1]。面对日益严重的湖泊污染, 目前所采用的控制对策主要包括宏观与微观两个层面: ① 宏观上以流域为单位, 以流域规划为指导, 调整源排放强度与时空分布^[2,3]; ② 微观上主要针对需要解决的污染问题(如营养盐过高、

蓝藻暴发等), 采用工程手段, 以期对湖泊污染起到控制作用^[4,5]。其中, 宏观层面的分析为系统的流域

收稿日期: 2012-05-29; 修订日期: 2012-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101180); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07102-006)

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

控制提供了基础,而湖泊的治理成效在很大程度上仍需取决于在宏观指导下的工程设计与实施。秦伯强等^[6]在太湖水源地采用生物净化技术与工程措施相结合的方法,使水质参数改善 30% ~ 60%,进一步说明了非生物方法在富营养化水体水质净化中的作用。经过多年的研究,目前已出现多项可行的技术,如流域 BMP 技术^[7~9]、湖滨湿地技术^[10,11]、河道恢复技术^[12]、水生植被恢复技术^[13]、抽水除藻回灌技术^[14]、湖面蓝藻收集技术^[15]、底泥治理技术^[16,17]、微生物控藻技术^[18]、扰动机蓝藻抑制技术^[19]等,但是要解决实际湖泊富营养化问题不是任何单项技术所能完成的。传统的工程措施虽然取得一定效果,但大多存在一个共同特征:即面向自身(而非治理的湖体)的设计方法,并在此基础上改进工艺与设计参数,而与实际湖泊污染控制目标间的结合不足。这也是许多技术在实验室条件下或小型水体中试验效果良好,但应用到实际湖泊治理时却达不到应有效果的原因所在。当然,问题的存在并非完全否定现有的工程设计方法,而是需要转换视角,以现有技术为立足点,将设计的视角从工程自身扩展到要改善的对象之上,从全局的角度进行审视与把握并辅以智能化的决策设计。Schauser 等^[20]在德国 Arendsee 湖的研究中提出了一种系统化方法,对湖泊内部的磷截留进行适宜的评价;该研究认为,在选择措施前,需定义措施目标,识别湖泊的问题并评估成功的概率。这种思想也正是基于对象全局思想的重要体现。因此,为促进湖泊水质改善,并为相关决策提供一种新的方法学和思路,本研究提出面向对象的智能设计方法(object-oriented intelligent design, OOID)。

1 关键问题与 OOID 方法

传统的环境工程可以概括为基于“内向视角”的特点。所谓“内向视角”是指在工程设计时,考虑的是如何调整工程设施自身内部的结构与功能以实现最好的设计效果,而未能将该工程所要保护或改善的水体响应纳入设计的范畴。如对于湖滨湿地建设,在传统的设计范式下考虑的是如何配置水生植物物种以及调整水动力条件等以实现最大可能地削减污染物。但是在这个传统的设计范式下,该湿地工程究竟对要保护的湖泊产生什么样的水质改善却并无在设计中体现出来。由于传统工程方法的“内向视角”特征,尽管近几十年来国内外进行的大量深入研究,对许多具体的技术从内部结构处理机制

及效率优化方面有了很大进展,但是在实现保护湖泊水质方面却往往效果乏善可陈。很多技术在实验室条件或示范工程尺度都效果良好,但是一旦用到真的湖泊污染控制工程时却常常不能产生预期效果。这种在湖泊污染控制中所面临的困境很大程度上就是由于传统环境工程的“内向视角”造成的。

针对传统工程“内向视角”的局限性,OOID 方法将工程设计的着眼点从“内向视角”扩展到要保护的对象之上,着眼于全局、以需要改善的环境单元为对象,基于各项污染控制单项技术处理效率、机制及其与环境对象间的因果响应关系,从时、空及规模上配置多项或单项技术,从而高效率地实现环境对象状况的改善目标。具体而言,OOID 的主要特征可概括为:对象视角、因果为基、集点成面、时空优化。所谓对象视角,就是在 OOID 设计范式下,不只是需要对特定技术的内部结构处理机制及效率优化方面有深入研究与了解,而且还必须以对象水体的水质改善目标为驱动因子来设计单项或多项技术及配置。所谓因果为基,就是实施从“内向视角”到“对象视角”的扩展不是盲目的,而是基于对工程效果与对象水体水质改善之间因果关系的定量了解。失去了这个基础,则整个 OOID 的设计范式也就成了无源之水。集点成面指的是对一个特定对象水体,设计并不只是针对单个空间位置的单项技术,而是要考虑单项或多项技术在空间上的复合效益。时空优化指的是在 OOID 设计范式下,工程设计要考虑时空优化的可能性,从而实现在固定工程投资的条件下尽可能地改善对象水体是水质。

综上,本研究提出的 OOID 方法,目的是为了了解决传统工程方法存在的盲目性、滥用性等问题,并突出智能设计的特殊作用。一个环境单元的改善,可能需要多项技术共同实施以达到预期效果,其中某一项技术及其对象响应、多项技术及其对象响应以及各项技术之间的时空优化等问题都不是独立的,而是通过智能设计整合在一个因果关联的系统中。其抽象的表达式如下:

单项个体技术:

$$F(i) = f_i(X1_i, X2_i, X3_i \cdots Xn_i) \quad (1)$$

单项群体技术对象响应:

$$G(i) = g_i[m_i, f_i(X1_i, X2_i, X3_i \cdots Xn_i)] \quad (2)$$

多项群体技术对象响应:

$$G = \int g[m_i, f(X1_i, X2_i, X3_i \cdots Xn_i)] \quad (3)$$

面向对象的智能设计:

$$[m_i, X1_i, X2_i, X3_i \cdots Xn_i] = InvG() \quad (4)$$

式中, $X1_i, X2_i, X3_i \cdots Xn_i$ 为结构或功能参数; m_i 是规模因子; $\int$ 表示规模因子与多种技术的结构与功能参数在对象层面的整合; $InvG()$ 代表对 G 模型的逆响应模型. 之所以说这些表达式是抽象的是因为本文没有给出每个函数的具体形式. 实际上, 这些函数对于不同的工程方案和水体对象都是不同的, 且非常复杂, 无法用解析函数来表达. 如对于湖泊蓝藻控制问题而言, 每一个函数实际上都可能都是由多个偏微分方程联立求解而得; 在本研究的案例分析中, 这些函数就是以三维数值水质水动力模型的形式构造. 式(1)表达的是对于一个特定的技术, 如果依照一定的结构和功能参数设计并实施, 那么其产生的水质响应就可以用一个或一系列函数式来定量表达. 换言之, 式(1)可以帮助回答的问题是: 如果一项技术在实验室试验成功后, 将其应用到真正的水质改善工程中, 那么它的水质改善效果究竟会是什么样? 有没有效果? 如果有, 效果究竟有多大? 在过去的很多水质控制工程中, 有许多技术在实验室相当成功, 但被应用于实际水体时却见效甚微, 其原因就在于在设计过程中缺乏式(1)这样的映射系统的指导; 只是将特定的单项工程与对象水体的水质响应耦合起来, 因此在进行工程设计时完全没有预见性, 而是盲目的将实验室条件的效果外推到真实系统中. 由于真实系统的各种特征与实验室条件差别很大, 所以直接将实验室条件下获得的经验外推到真实水体就面临很大的失败风险.

式(2)是对式(1)的延伸, 其必要性是源于水质系统的非线性特征. 式(1)量化了一个水体对单个技术实施的水质响应, 但是, 如果该项技术需要在一个水体的不同地方实施, 那么产生的集合效益并不是简单的叠加. 因此, 要准确地评估水质对某项技术实施规模的响应水平, 就需要式(2)来量化这种综合效果. 没有式(2), 在实际工程设计中就无法对单项技术的规模和空间布局进行量化, 因此对工程方案的效果也无法有预见性, 很难有效地配置资源产生应用的效果. 对于相对简单的系统, 可能实施单项技术就足以有效解决问题. 但是, 在实践中经常面临的情况却是单项技术无法有效解决污染问题, 而需要多项技术的结合. 因此, 在进行智能化设计的时候, 如果设计人员不能量化多项技术在不同位置、不同规模实施所产生的综合水质响应, 那么就无法合理地进行工程配置与设计. 为了

实现这个目标, 就需要式(3)所代表的多项群体技术的对象响应. 在式(3)的基础上, 科研与设计人员就有可能在设计之前评估不同的技术配置的费用与水质效益, 从而筛选出既节省费用又具有理想水质改善效果的工程配置. 式(1)~(3)构成了实施面向对象智能设计的定量框架, 由此导出面向对象的智能设计的数学形式, 即方程(4). 方程(4)的物理意义是基于对象系统对多项技术的空间-规模实施的定量响应, 逆向获取能够实现污染控制目标的规模水平与工程设计参数. 基于方程(4)获得的设计方案将提高实现水质改善目标的可能性, 避免了传统工程设计方法的盲目性.

在 OOID 设计框架中, 各组成部分、要素通过智能设计衔接并互为因果关联, 因此智能设计贯穿整个过程并起到重要作用. 面向对象的智能设计, 将依据相关信息预先做出判断, 进而对各个技术的选用、实施位置及规模、时空搭配、费用效应、最优效率等问题进行深入分析, 得出各种可能存在的结果后, 根据管理目标、管理决策、最大效应等最终确定技术的取舍与实施. 智能设计方法的“智能”主要体现在: 基于传统工程, 扩展到对象视角, 立足定量因果关系, 在整个过程中体现智能因素; 各部分以智能设计相互衔接, 尽可能减少无效投入并达到最优效率.

2 案例研究

2.1 案例构造

为进一步揭示 OOID 的基本思想和技术方法, 本研究以一个相对简单的湖泊蓝藻控制为例来加以展示. 当然在实际应用中, 还需要针对不同的湖泊和不同的适用技术进行相应的研究与设计. 本研究选用 2 种潜在可行的技术进行示范研究, 即: 垂向水动力扰动机、抽水除藻回灌技术. 在多种藻类控制技术中, 垂向水动力扰动机技术通过压缩空气注入来实现水体水动力扰动, 被视为未来蓝绿藻控制和防范的重要技术之一^[21, 22]. 前期的研究定量分析了垂向水动力扰动机数量、位置与蓝藻抑制效果间的响应关系^[23]. 抽水除藻回灌技术的优点是能够直接去除湖泊内部营养盐与藻类, 在缺乏外来清洁水源的情况下不失为一种潜在可行的方法; 但其缺点是费用高, 且目前缺乏对其效果定量评价的有效手段; 即使能够去除营养盐与藻类, 但是究竟是否能够在可行费用的前提下明显抑制蓝藻水平常常是未知数. 目前, 抽水除藻在国内大型湖泊(如太湖和滇

池)中都有一定规模的试验性实施,但是效果如何尚无结论。上述工程措施都属于传统工程的范畴,在应用上都面临无法评估效果的问题。在现有的研究中,对这些工程方案效果的评估还停留在基于数据采集的经验性阶段。由于真实的湖泊生态系统具有很大的时间变异性,即在不同的时候会显示完全不同的水质水平,因此依靠数据采集分析工程实施前后的水质是无法真正的评估工程实施的效果的。此外,这类研究没有建立实施规模与效果之间的因果关系,所以不能为进一步的实施该类技术提供指导。

在 OOID 的范式下,整个工程设计的指南性问题就是:对一个特定的蓝藻暴发水体,用扰动机和抽水除藻回灌技术分别能够产生多大的效果?其投资与效果的关系如何?两种技术是单独实施还是联合使用效果更好?如果联合使用,应该用什么样的投入比例分别实施这些技术以实现最好效果?在本研究中,将分别对水动力扰动机技术和抽水除藻回灌技术的水质改善效果进行单独试验,然后比较两者结合以及单个与两者结合在费用-效益方面的差别。

试验水体面积大小为 $100\text{ m} \times 500\text{ m}$ 的矩形系统,深度均匀 3 m ,基于三维水质-水动力模型系统 EFDC 开展数值模拟。为建立这个试验水体的数值模型,首先对水体进行网格划分,以 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 为分辨率。为充分模拟两种技术对蓝藻暴发以及营养盐浓度的影响,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滇池三维水动力-营养盐-藻类动力模型的水质与参数结构^[24],以便能够表达真实富营养化水体的动力学特征,模拟时用的表面边界条件均与滇池模型相同。底泥与水体的交互作用直接通过模型模拟,其基本设定也参照滇池模型。在垂直方向上将水体分为 6 层以解析垂直方向上的水动力与水质精细结构。在试验中,水动力扰动机的参数设置参考了美国 Solarbee 公司的太阳能长程循环混合设备 Solarbee^[19]和南京领先环保的太阳能水生态修复系统 IPOCH^[25],详细的数值实现方法见文献[23],抽水除藻回灌技术在模型里直接采用 EFDC 的抽水回灌模块,只是在水质模型内加入除藻过程,即在水回灌之前将藻类完全去除。注意这里代表的是一种理想状况,即所有藻类都被去除,在实际操作中其实也可能存在藻类不能完全去除的情况;在实际的工程设计中,这些细节均需进行系统的考虑。

2.2 研究方法

在工程实施前,需要考虑以下问题:①垂向水动力扰动机在对象水体中安装能否起到抑制蓝藻的作用?②如果扰动机能够抑制蓝藻,那么,蓝藻抑制作用强度与安装数量有什么关系?③安装位置对蓝藻抑制效果有何影响?④抽水回灌工程中对象水体中能否起到抑制蓝藻作用?⑤蓝藻抑制效果与抽水流量有何关系?⑥采用单项技术与搭配两种技术在蓝藻控制效率上有何差异?⑦最好的设计方案是什么?其中问题①~③在前期的研究中已经涉及,但仅为单一的对扰动机的分析^[23]。同时,还应考虑到过程中需要进行的相关分析:①从智能设计方法看,需固定时空、分化因子,定量化工程设计的湖泊水质/蓝藻抑制效果响应,实现物理空间到数学空间的映射;②需要定量分析扰动机数量+位置的蓝藻抑制效果;③需要定量分析抽水量、抽水时空分布、蓝藻去除率、营养盐去除率、回灌空间分布等与湖内蓝藻及水质响应之间的关系。此外,还应对以下问题进行探索:扰动机数量和位置以及区域自然条件与扰动机效果如何互动;在一个特定湖库中如何配置扰动机以实现最经济最有效的蓝藻控制;探索两种技术结合的可能性,优势以及与高环境经济效率的综合工程设计方案。

为科学定量回答上述问题,本研究中以 EFDC 为分析框架^[23,24],并通过求解水动力方程组、营养盐迁移转化方程组、营养盐与藻类的动力学交互作用关系方程组、藻类与光照条件方程组、底泥与水体间营养盐交换方程组等 5 个主要的方程组实现定量化工程设计。在 EFDC 模型中,通过求解水动力扰动机对 5 个部分变化的方程组形成相应于扰动机技术的智能设计模块;通过求解抽水、除藻及回灌对 5 个部分变化的方程组形成相应于抽水除藻回灌工程的智能模块。

3 结果与讨论

3.1 水动力扰动机和抽水除藻回灌工程对水体水质的影响

在试验中设计了多个扰动机基本放置的方案情景,包括 0、1、2、4、6、8、10、12、14、20、30、50 个,扰动机的位置设置采用随机定位的方法,此法优点在于能够保证数值试验结果的无偏好性,使结论更具有普遍性。评价指标主要选用 Chl-a 峰值浓度减少量及 TP、TN 的平均浓度减少量,这是因为 Chl-a 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。Chl-a 峰值浓度是通过对

模型每 6 h 输出结果在全年与整个水体所有网格取最大值得到,而 TP 和 TN 平均浓度则是通过对所有网格求取全年平均浓度而得. 抽水除藻回灌试验设计中,对抽水机数量的设置方案与扰动机相同,选用相同的评价指标. 工程的成本折算成 IPOCH 或 pump 的数量,以便比较(图 1).

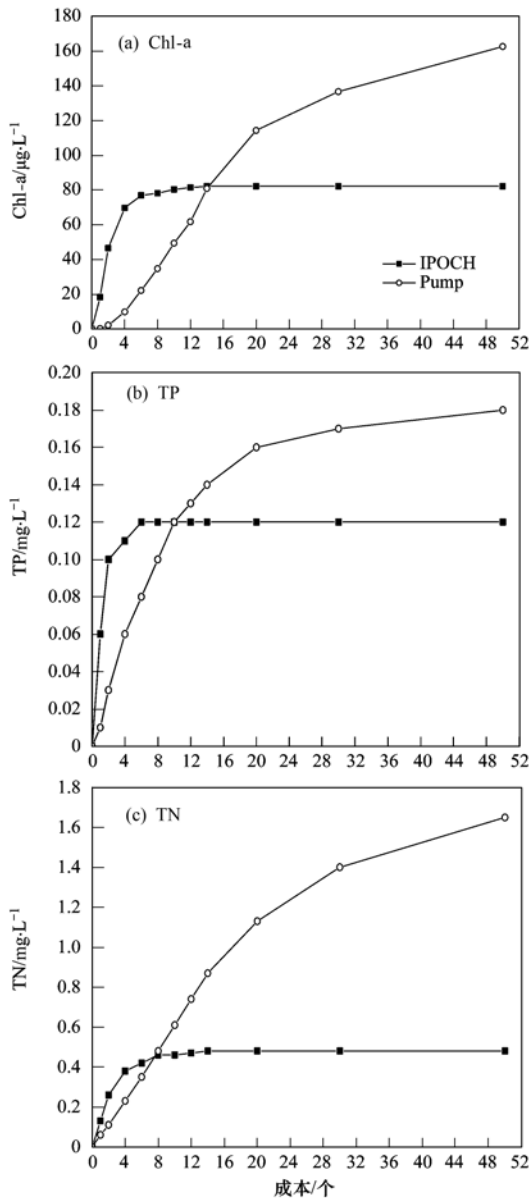


图 1 扰动机和抽水机不同成本下 Chl-a 浓度峰值以及 TN、TP 平均浓度的减少量变化

Fig. 1 Changing of peak Chl-a and average reduction in TN and TP concentrations under different costs of mixers and pumps

数值试验发现,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,放置 2 个扰动机后,峰值减少了 $46 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,说明放置 2 个扰动机后藻类抑制效果是很明显的. 随着扰动机数量的增加,3 个指标的减少量也逐渐增加,当放置 4 个扰动

机后,Chl-a 浓度峰值共减少了 $70 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 但此后继续增加扰动机数量所产生的藻类削减趋势变缓,如当扰动机从 4 个增加到 8 个时,也只进一步减少 $8 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Chl-a. 由图 1 可见,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相应增强对蓝藻的抑制效果(或效果不明显). 这说明扰动机的放置存在一个最佳数量的问题,在实际工程应用中,还需要应用科学的定量方法估计最适数量,并探讨工程优化,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,避免浪费.

扰动机对 TP 和 TN 也有一定的削减效果. 如图 1 所示,当扰动机数量由 0 增加到 6 个,TP 平均浓度减少了 $0.12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但此后增加扰动机数量,TP 平均浓度没有进一步降低. 对于 TN 平均浓度,扰动机数量由 0 增加到 14 个,TN 平均浓度共减少了 $0.48 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但此后增加扰动机数量,TN 平均浓度没有进一步降低.

3 个指标与抽水除藻回灌工程规模也呈现非线性关系,但非线性的变化形式不同. 由图 1,在工程规模很小时,随着抽水量的不断增加,Chl-a 浓度峰值最初减少不明显,抽水成本为 2 时只减少了 $2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,但此后减少趋势变大,当抽水成本增加到 20 时,Chl-a 浓度峰值共减少了 $114 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,继续增加抽水量 Chl-a 减少趋势变缓. 当增加到 30 时,Chl-a 浓度峰值也只比成本为 20 时减少了 $22 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;当增加到 50 时,则在 30 的基础上减少了 $26 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 说明如果工程规模太小,藻类没有明显响应,所以如果实施这些规模,必须确保规模增加到一定阈值以上,这样藻类抑制作用才会明显,但是,如果工程规模到了一定水平后,此后继续增加规模,边际效应开始减弱. 图 1 同时也显示,抽水工程对营养盐的改善也具有相似的费用-效应趋势.

3.2 单个工程以及工程组合对水体水质影响的比较

下面将就单独实施抽水、单独使用扰动机和两种技术混合的工程方案的费用效益特征进行比较,选用相同评价指标,通过 EFDC 模拟得出 3 个指标的值. 首先比较单独使用其中一个技术,当成本为 14 时,扰动机和抽水机对 Chl-a 峰值浓度的减少分别为 $82 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $81 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,相差不大(图 2);当成本 < 14 时,扰动机的抑藻效果要明显好于抽水机;此后随着投入增加,扰动机的蓝藻抑制效果没有相

应增强,抽水机逐渐好于扰动机,但其边际效应却在逐渐减弱。这说明,从工程开始到某一工程规模时,扰动机效果远好于抽水机,当达到一定规模后,抽水机好于扰动机,但其蓝藻抑制效果没有之前显著。对于 TP、TN 平均浓度也是同样变化。由比较可知,对于试验水体,如果目标是把 Chl-a 峰值浓度降低 $70 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,那么扰动机将比抽水机高效(成本只相当于 30% 左右),但扰动机面临阈值局限性,如果目标是把 Chl-a 峰值浓度降低 $100 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,扰动机将无法实现。抽水机能实现,但也意味着更多的投入。

如图 2,单独使用抽水机和两种技术结合的比较,当成本达到 32 ~ 50 个这个区间时,单独使用抽水机的效果与两种技术结合的效果基本等效,两条曲线几乎重合。而当成本控制在中等到较低水平时,两种技术结合均好于单独使用抽水机。特别是对于蓝藻控制目标设定得不是很高的情况下,用两种技术结合比单独用抽水除藻回灌技术效率要高得多。对于 TP 平均浓度,成本 < 14 时,两种方式结合使用好于单独使用抽水机,当成本 > 14 后,两者效果基本等同。对于 TN 平均浓度,成本在 20 以下时,两种技术结合好于单独使用抽水机,当成本增加到 50 时,两种方式分别为 $1.65 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.59 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,单独使用抽水机也只多减少了 $0.06 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。可明显看出,两种技术结合比单独使用抽水机更有优势,在相同的投入下,两种技术结合能获得更高的蓝藻抑制和水质改善效果并节省成本,但如果蓝藻抑制和水质目标定得很高时,则两者效率相似。

综上,从 3 个指标的变化来看,两种技术结合均好于单独使用扰动机。要注意的是,在这里比较成本小于或等于 4 的情况是没有意义的,因为在混合技术中当成本为 4(或以下)时二者是等同的,即只有扰动机。总体看,两种技术结合比单独使用扰动机具有明显优势,整条曲线当成本大于 4 后,都是两种技术结合更好。而在成本为 4 或以下时,二者等效。综合上述比较,在两种技术中,扰动机对于实现低到中等的品质改善目标具有比抽水技术高得多的效率,如本案例水体中,如果目标是把 Chl-a 峰值浓度降低 $70 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的话,扰动机将比抽水技术节约 70% 左右的成本。但如目标高于一定值时,扰动机不能实现,但单独使用抽水技术成本太高,也不是优越的工程设计方案。结合两种技术比单独使用其中一项都更有效率,当水质改善目标不是极端高时,结合两种技术比单独使用抽水技术要高效得多,同样

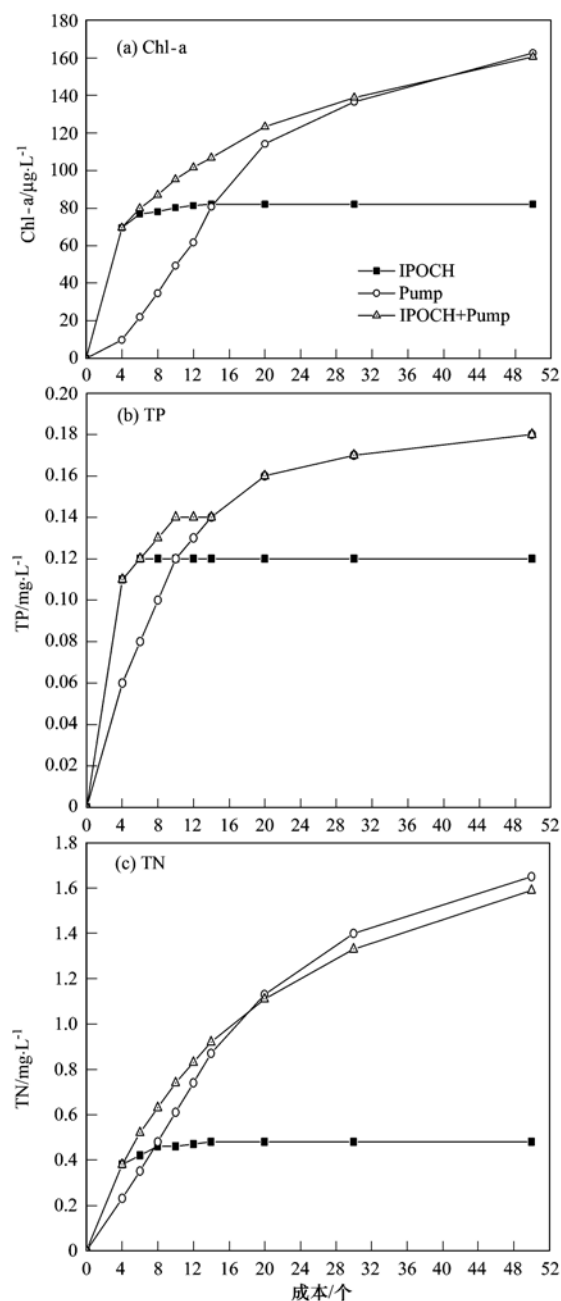


图 2 单独使用一种技术与两种技术结合对 Chl-a 浓度峰值以及 TN、TP 平均浓度减少量的比较

Fig. 2 Comparison of peak Chl-a and average reduction in TN and TP concentrations between pumps or mixers alone and the combination of mixers and pumps

在整个水质目标区间,两种技术结合比单独使用扰动机的效率也要高。因而,智能设计的思路就是,以扰动机的下限阈值和上限阈值为指导,确定合理的扰动机数量,并以智能设计的扰动机模块和抽水回灌模块为工具,确定在不同投入水平下的最佳空间与规模组合,实现高效率的工程设计,确保实现水质目标。此外,需要指出的是,本研究的主要目的是系统化地提出 OOID 的思路和方法,因此案例研究并

未涵盖湖泊污染控制的全部,而仅仅是用来示范思路和方法的意义。同时,在实际的工程中,对于有些工程措施,可以依靠经验来做简单的判定,但如果希望得到确定的科学结论,则仍然需要依靠 OOID 方法来确定。案例研究的结果也证实,在湖泊污染控制中,即使像案例这种非常简单的设计问题,应用 OOID 都具有很显著的意义和必要性。

3.3 讨论

本研究针对传统湖泊污染控制工程方法存在的盲目性、滥用性以及缺乏智能化设计等问题,提出了面向对象的智能设计方法。以湖泊蓝藻控制为案例,对可采用的技术(垂向水动力扰动机和抽水除藻回灌)对蓝藻控制和水质改善的效果进行详细分析,并对单独使用扰动机技术、单独使用抽水技术以及两个技术结合这3种方式对水质改善的效果进行比较。

假设本案例中蓝藻控制目标(以Chl-a计)是 $100\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,那么究竟采用扰动机工程方法还是抽水工程方法,如两者结合数量又该如何配置?如果采用扰动机技术,管理部门需确定能否实现目标、扰动机数量、投入资金等问题,还需考虑扰动机安装在什么地方才会产生更好的效果。如果采用抽水回灌技术,管理部门需确定能否实现目标、工程规模、工程实施运行时间、资金投入等问题,还需考虑评估方法的时空困境。如果采用两种技术结合,那么应考虑如何配置,例如同样是1000万的成本,投入200万到扰动机和800万到抽水技术可能会比投入400万到扰动机和600万到抽水技术的效果要好得多。以上问题,是智能设计方法中能够全方位考虑的问题,而传统的工程设计方法无法为上述问题提供答案。

本案例智能设计的思路是,以扰动机的下限阈值和上限阈值为指导,确定合理的扰动机数量,并以智能设计的扰动机模块和抽水回灌模块为工具,确定在不同投入水平下(或水质目标下)的最佳空间与规模组合,实现高效率的工程设计,确保实现水质目标。智能设计的思路和方法可以推广到更复杂的现实湖泊污染控制当中去,将湖泊水质目标作为指导工程设计的出发点,以工程方案与湖泊水质的因果关联响应为纽带,以数学模型为平台,对实际的湖泊污染控制提供适用的科学决策支持。

本研究的主要目的是构造面向对象的智能设计的基本理论框架,并设计案例来演示整个思路和方法的实际意义。在实际的湖泊污染控制中,研究和

设计人员所面临的问题可能要更为复杂,这对于 OOID 的应用会产生一定的挑战。在此需要明确的是:①现实问题的复杂性并不会使得上面描述的 OOID 方法框架失效,因为 OOID 实际上是一种系统的思路,在这种系统的思路下,湖泊污染控制的设计是以水质对象与污染控制措施之间的定量响应关系为驱动的,因此无论现实问题如何复杂,这个思路本身是不会失效的;②现实问题的复杂性也导致在实际应用 OOID 方法时不能僵化和教条,而需要针对不同的系统构造特定的定量因果响应系统以及不同的工程和技术模块,从而获取真正可靠和具有实际意义的智能设计方案。对于 OOID 而言,一个显著的特征就是设计的定量化和局地化,因此需要对不同的湖泊、不同的水质水生态问题,针对不同的保护目标进行差异性的智能设计。综上,OOID 实际上是开拓了一个研究方向,因为在构造特异性的定量因果响应系统和工程技术模块时,将涉及到大量深入的包含试验、数据采集和分析以及理论和模型研究。所有这些研究最终被纳入 OOID 的系统框架里面,为实现现实湖泊污染控制的智能设计提供科学与技术基础。

4 结论

(1)垂向水动力扰动机对水体蓝藻抑制和水质改善可以产生明显的效应,但控制效果与扰动机的数量存在很强的非线性关系,当扰动机数量超过一定的上限阈值后,再增加扰动机数量没有明显效果;这表明在实践中,不仅需要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。

(2)抽水工程最初藻类没有明显响应,当规模增加到一定阈值后,藻类抑制作用开始明显,此后继续增加规模,边际效应开始减弱。营养盐对工程规模的响应值从开始投入时即显著,达到一定规模后边际效应逐渐减弱。这表明在实践中,抽水技术投入到一定规模后,继续增加投入带来的效果也会减弱。

(3)对于试验水体,如果目标是把Chl-a峰值浓度降低 $70\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的话,那么扰动机将比抽水机高效得多,但扰动机面临阈值局限性,如果目标是把Chl-a峰值浓度降低 $100\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的话,扰动机将无法实现。抽水机能实现,但也意味着更多的投入。

(4)结合两种技术比单独使用其中一项都更有效率,当水质改善目标不是极端高时,结合两种技术

比单独使用抽水技术要高效得多,同样在整个水质目标区间,两种技术结合比单独使用扰动机的效率也要高。

参考文献:

- [1] 吴丰昌, 孟伟, 宋永会, 等. 中国湖泊水环境基准的研究进展[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(12): 2385-2393.
- [2] Qin B Q, Xu P Z, Wu Q L, *et al.* Environmental issues of Lake Taihu, China[J]. *Hydrobiologia*, 2007, **581**: 3-14.
- [3] 范成新, 羊向东, 史龙新, 等. 江苏湖泊富营养化特征、成因及解决途径[J]. 长江流域资源与环境, 2005, **14**(2): 218-223.
- [4] Pu P M, Hu W P, Yan J S, *et al.* A physico-ecological engineering experiment for water treatment in a hypertrophic lake in China[J]. *Ecological Engineering*, 1998, **10**(2): 179-190.
- [5] 陈开宁, 包先明, 史龙新, 等. 太湖五里湖生态重建示范工程——大型围隔试验[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(2): 139-149.
- [6] 秦伯强, 胡维平, 刘正文, 等. 太湖水源水质净化的生态工程试验研究[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(1): 5-12.
- [7] Brannan K M, Mostaghimi S, McClellan P W, *et al.* Animal waste BMP impacts on sediment and nutrient losses in runoff from the Owl Run watershed[J]. *Transactions of the ASAE*, 2000, **43**(5): 1155-1166.
- [8] Santhi C, Srinivasan R, Arnold J G, *et al.* A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in a watershed in Texas [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2006, **21**(8): 1141-1157.
- [9] Wu J, Yu S L, Zou R. A water quality-based approach for watershed wide BMP strategies [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2006, **42**(5): 1193-1204.
- [10] Wardrop D H, Kentula M E, Stevens D L, *et al.* Assessment of wetland condition: an example from the upper Juniata watershed in Pennsylvania, USA[J]. *Wetlands*, 2007, **27**(3): 416-431.
- [11] 李荫玺, 胡耀辉, 王云华, 等. 云南星云湖大街河口湖滨湿地修复及净化效果[J]. 湖泊科学, 2007, **19**(3): 283-288.
- [12] Giller P S. River restoration: seeking ecological standards. Editor's introduction[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2005, **42**(2): 201-207.
- [13] 方云英, 杨肖娥, 常会庆, 等. 利用水生植物原位修复污染水体[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(2): 407-412.
- [14] Chen X, Zhang G Q, Peng J G, *et al.* The performance of an open-loop lake water heat pump system in south China [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, **26**(17-18): 2255-2261.
- [15] 张明真, 傅海燕, 柴天, 等. 连续式自清洁蓝藻收集设备的中试研究[J]. 环境工程学报, 2011, **5**(9): 2018-2022.
- [16] 吴芝瑛, 虞左明, 盛海燕, 等. 杭州西湖底泥疏浚工程的生态效应[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(3): 277-284.
- [17] Reitzel K, Hansen J, Andersen F Ø, *et al.* Lake restoration by dosing aluminum relative to mobile phosphorus in the sediment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(11): 4134-4140.
- [18] 王瑜, 刘录三, 方玉东, 等. 生物操纵方法调控湖泊富营养化研究进展[J]. 自然科学进展, 2009, **19**(12): 1296-1301.
- [19] 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.
- [20] Schauser I, Lewandowski J, Hupfer M. Decision support for the selection of an appropriate in-lake measure to influence the phosphorus retention in sediments[J]. *Water Research*, 2003, **37**(4): 801-812.
- [21] Lopez C B, Jewett E B, Dortch Q, *et al.* Scientific assessment of freshwater harmful algal blooms [A]. In: Interagency Working Group on Harmful Algal Blooms, Hypoxia, and Human Health of the Joint Subcommittee on Ocean Science and Technology, 2008, Washington, DC.
- [22] 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.
- [23] 邹锐, 周璟, 孙永建, 等. 垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1540-1549.
- [24] 刘永, 邹锐, 郭怀成. 智能流域管理研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012. 114-126.
- [25] 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[A]. 见: 第四届黄河杯城镇饮用水安全保障技术论坛论文集[C]. 济南, 2010. 114-122.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} over Eastern China from MODIS Aerosol Optical Depth Using the Back Propagation Neural Network	GUO Jian-ping, WU Ye-rong, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (817)
Comparison of Atmospheric Particulate Matter and Aerosol Optical Depth in Beijing City	LIN Hai-feng, XIN Jin-yuan, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i> (826)
Impacts of Meteorological Factors on Atmospheric Methane Mole Fractions in the Background Area of Yangtze River Delta	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, GU Jun-qiang, <i>et al.</i> (835)
Dispersion and Analysis of Odor Pollution in Landfill Area Under the Enclosed Operation Condition	LU Peng, WU Shi-xing, DAI Zhi-feng, <i>et al.</i> (842)
Distribution Characteristics and Sea-Air Fluxes of Volatile Halocarbons in the East China Sea in Winter	HE Zhen, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng (849)
Intra- and Inter-annual Variabilities of Particulate Organic Matter in the Mirs Bay from 2000 to 2010	LI Xu-lu, ZHOU Yi-pin, XIA Hua-yong (857)
Phytoplankton Assemblages and Their Relation to Environmental Factors by Multivariate Statistic Analysis in Bohai Bay	ZHOU Ran, PENG Shi-tao, QIN Xue-bo, <i>et al.</i> (864)
Characteristics and Evolution of Hydrochemical Compositions of Freshwater Lake in Tibetan Plateau	WANG Peng, SHANG Ying-nan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (874)
Estimation of Nonpoint Source Pollutant Loads and Optimization of the Best Management Practices (BMPs) in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, LIU Pin (882)
An Object-Oriented Intelligent Engineering Design Approach for Lake Pollution Control	ZOU Rui, ZHOU Jing, LIU Yong, <i>et al.</i> (892)
Contribution of Plant Litters to Sediments Organic Matter in Jiulong River Estuary Wetland	LUO Zhuang-xi, QIU Zhao-zheng, WANG Zhen-hong, <i>et al.</i> (900)
Application of Tiered Approach to Assess the Impact of Backfilling Remediated Soil on Groundwater	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (907)
Removal of Nitrate from Groundwater Using Permeable Reactive Barrier	LI Xiu-li, YANG Jun-jun, LU Xiao-xia, <i>et al.</i> (914)
Research on Pollution Load of Sediments in Storm Sewer in Beijing District	LI Hai-yan, XU Bo-ping, XU Shang-ling, <i>et al.</i> (919)
Occurrence and Risk Assessment of Five Selected PPCPs in Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	WEN Zhi-hao, DUAN Yan-ping, MENG Xiang-zhou, <i>et al.</i> (927)
Microbial Risk Assessment of Urban Water Bodies for Aesthetical and Recreational Uses	SUN Fu, SHA Jing, ZHANG Yi-fan, <i>et al.</i> (933)
Study on Removal of Di-(2-Ethylhexyl) Phthalate by Using of Small-Scale Biological Aerated Filter	LI Wei, ZHAO Jing, YU Jian, <i>et al.</i> (943)
Mechanism of Membrane Fouling and Filtration Characteristics in a Membrane Bioreactor for Industrial Wastewater Treatment	FAN Ju-hong, YU Su-lin, ZHANG Pei-shuai, <i>et al.</i> (950)
Enhanced Electro-Chemical Oxidation of Acid Red 3R Solution with Phosphotungstic Acid Supported on γ -Al ₂ O ₃	YUE Lin, WANG Kai-hong, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (955)
Degradation Kinetics of Activated Carbon Catalyzed Persulfate Oxidation Orange G	YANG Mei-mei, ZHOU Shao-qi, LIU Dan, <i>et al.</i> (962)
Study on the Start-up of the Anaerobic Baffled Reactor for Treating Alkali-dewighting and Dyeing-printing Wastewater	YANG Bo, ZHONG Qi-jun, LI Fang, <i>et al.</i> (968)
Study on the Pollutants Removal Performance Along the Advanced Treatment in Tannery Wastewater by O ₃ -BAF	YU Bin, LIU Rui, CHENG Jia-di, <i>et al.</i> (974)
Effect of Pilot UASB-SFSBR-MAP Process for the Large Scale Swine Wastewater Treatment	WANG Liang, CHEN Chong-jun, CHEN Ying-xu, <i>et al.</i> (979)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Municipal Wastewater and Studies on Its Characteristics Under the Continuous Flow	NIU Shu, DUAN Bai-chuan, ZHANG Zuo-li, <i>et al.</i> (986)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (I) : Model Constitution	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (993)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (II) : Process Simulation	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (998)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (III) : Model Application	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (1004)
Comparative Study on Water-air CO ₂ , CH ₄ Flux in Two Tributaries in the Three Gorges Reservoir, China	LI Zhe, BAI Lei, GUO Jin-song, <i>et al.</i> (1008)
Factors Influencing the Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Regimes	CHEN Shu-tao, LIU Qiao-hui, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1017)
Differences in Soil Respiration Between Cropland and Grassland Ecosystems and Factors Influencing Soil Respiration on the Loess Plateau	ZHOU Xiao-gang, ZHANG Yan-jun, NAN Ya-fang, <i>et al.</i> (1026)
Application and Benefit Evaluation of Tiered Health Risk Assessment Approach on Site Contaminated by Benzene	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, LIANG Jin, <i>et al.</i> (1034)
History of Heavy Metal Pollution from Tidal Flat in Haizhou Bay	ZHANG Rui, ZHANG Fan, LIU Fu-cheng, <i>et al.</i> (1044)
Accumulation, Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Surface Sediment of Caohai Plateau Wetland, Guizhou Province	ZHANG Qing-hai, LIN Chang-hu, TAN Hong, <i>et al.</i> (1055)
Assessment and Correlation Analysis of Heavy Metals Pollution in Soil of Dajinshan Island	CHENG Fang, CHENG Jin-ping, SANG Heng-chun, <i>et al.</i> (1062)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Stream Sediments from a Typical Nonferrous Metals Mining City	LI Ru-zhong, JIANG Yan-min, PAN Cheng-rong, <i>et al.</i> (1067)
Contamination and Health Risk for Heavy Metals via Consumption of Vegetables Grown in Fragmentary Vegetable Plots from a Typical Nonferrous Metals Mine City	LI Ru-zhong, PAN Cheng-rong, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1076)
Correlativity Study of the Distribution of Soil Magnetic Susceptibility and the Heavy Metal Contents in Xi'an City	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, YANG Guang (1086)
Distribution Characteristics and Environmental Significance of Heavy Metals in Soil Particle Size Fractions from Tropical Forests in China	GONG Cang, XU Dian-dou, CHENG Hang-xin, <i>et al.</i> (1094)
Study on Phosphorus Adsorption Characteristic of Sediments in an Ecological Ditch	ZHANG Shu-nan, JIA Zhao-yue, XIAO Run-lin, <i>et al.</i> (1101)
Fractions and Adsorption Characteristics of Phosphorus on Sediments and Soils in Water Level Fluctuating Zone of the Pengxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	SUN Wen-bin, DU Bin, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1107)
Sorption Behavior of Triton X-100 on Loess and Affecting Factors	ZHONG Jin-kui, ZHAO Bao-wei, ZHU Kun, <i>et al.</i> (1114)
Residual Levels in Air, Soil and Soil-Air Exchange of Organochlorine Pesticides in Hami Region of Xinjiang and Its Potential Ecological Risk	MA Zi-long, MAO Xiao-xuan, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (1120)
Levels and Sources of Decabromodiphenyl Ether and Dechlorane Plus in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	HE Chang, JIN Jun, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of PBDEs and DL-PCBs in Sediments of Taihu Lake	MA Zhao-hui, JIN Jun, QI Xue-kui, <i>et al.</i> (1136)
Characteristics of Organic Pollutants in the Sediments from a Typical Electronics Industrial Zone	LIU Jin, DENG Dai-yong, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (1142)
Emission Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Exhaust Particles from a Diesel Car	TAN Pi-qiang, ZHOU Zhou, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (1150)
Characterization of PAHs in Fly Ashes from Coke Production	MU Ling, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (1156)
Comparison of PAHs Distribution in Stabilized Sludge by Sludge Drying Bed and Reed Bed	CUI Yu-bo, SUN Hong-jie, RAN Chun-qiu, <i>et al.</i> (1161)
Effects of Adsorbents on Partitioning and Fixation of Heavy Metals in the Incineration Process of Sewage Sludge	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu, CHEN Tao (1166)
Environmental Toxicity of Waste Foundry Sand	ZHANG Hai-feng, WANG Yu-jue, WANG Jin-lin, <i>et al.</i> (1174)
Construction and Properties of a Microbial Whole-cell Sensor CB10 for the Bioavailability Detection of Cr ⁶⁺	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xu-liang, <i>et al.</i> (1181)
Structure and Dynamics of Microbial Community in the Denitrifying Sulfide Removal Process	YU Hao, WANG Ai-jie, CHEN Chuan (1190)
Effects of Physico-chemical Parameters on the Abundance of the Denitrification-associated Genes <i>nirK</i> , <i>nirS</i> and <i>nosZ</i> During Agricultural Waste Composting	HU Chun-xiao, CHEN Yao-ning, ZHANG Jia-chao, <i>et al.</i> (1196)
Impact of PAHs on the Expression of PRDX in Earthworm (<i>Eisenia fetida</i>)	LIN Kang-li, ZHENG Sen-lin, SONG Yu-fang, <i>et al.</i> (1204)
Preparation of OMC-Au/L-Lysine/Au Modified Glassy Carbon Electrode and the Study on Its Detection Response to Hydroquinone and Catechol	ZHOU Yao-yu, TANG Lin, LI Zhen, <i>et al.</i> (1211)
Risk Communication in Construction of New Nuclear Power Plant	HE Gui-zhen, LÜ Yong-long (1218)

《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3月15日 34卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 3 Mar. 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

国内外公开发行人