

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究	王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏 (401)
北京城区 PM _{2.5} 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析	陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥 (411)
北京地区冬春 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系	赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清 (418)
北京市 PM _{2.5} 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析	王艳慧,肖瑶 (428)
杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征	谢小芳,孙在,杨文俊 (436)
春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征	王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽锋,杨洋 (442)
南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征	吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳娟 (451)
忻州市环境空气 PM ₁₀ 中有机碳和元素碳污染特征分析	史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娟,杨花 (458)
广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征	青亮,苏原,苏青,张素坤,任明忠 (464)
燃煤电厂锅炉 PM _{2.5} 排放危害度评价模型建立及案例分析	史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知涛,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)
中国南海大气降水化学特征	肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强 (475)
临安本底站酸雨长期观测特征分析	李正泉,马浩,毛裕定,冯涛 (481)
北京城区大气氮湿沉降特征研究	贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔 (490)
烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势	贾龙,徐永福 (495)
祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征	董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)
生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究	羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邵俊,陈檬 (513)
生物滴滤塔处理苯酚气体研究	何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶纪宏,罗雨薇,魏在山 (520)
国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究	楼狄明,徐宁,范文佳,张涛 (526)
翻堆频率对猪粪条堆肥过程温室气体和氨气排放的影响	赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉嘉,韩圣慧,万合峰 (533)
CuBr ₂ 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究	胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平 (541)
浙闽沿海岸域总溶解态无机锡的分布及影响因素研究	张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹 (547)
基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例	贾海峰,郭羽 (555)
北京平原区第四系地下水污染风险评价	郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟 (562)
不同季节辽河口营养盐的河口混合行为	张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳 (569)
太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征	马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛 (577)
亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价	陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉 (585)
潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究	白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊 (592)
凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响	周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国峰 (597)
不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响	田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振 (605)
溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用	李佳,林建伟,詹艳慧,陈祖梅,王鹏钧 (611)
四环素光催化降解特性与选择性研究	宋晨怡,尹大强 (619)
微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究	符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖 (626)
市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全	杨赛,周启星,华涛 (633)
膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究	李彬,王志刚,安莹,吴志超 (643)
臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究	刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德 (651)
厌氧生物法处理果胶废水的研究	陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳 (657)
氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究	赵兴兴,于水利,王哲 (663)
平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能	胡晓婧,戴婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟 (669)
基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征	王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹 (678)
广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价	郭鹏然,雷永乾,蔡大川,张涛,吴锐,潘佳钊 (684)
中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究	张小敏,张秀英,钟大洋,江洪 (692)
废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价	周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄 (704)
深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究	章迪,曹善平,孙建林,曾辉 (711)
洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策	谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇峰,徐笠,吕永龙 (719)
施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响	曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒 (727)
螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征	尹雪,陈家军,吕策 (733)
<i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1 的锰氧化特性研究	周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江 (740)
$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响	陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌 (746)
杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究	龚婵娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云 (753)
鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究	赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)
黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究	朱艾嘉,许战洲,柳圭泽,邓丽杰,方宏达,黄良民 (764)
3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究	王艳,马泽民,吴石金 (770)
新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价	李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰 (780)
黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羧基硫排放动态研究	李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青 (786)
农田土壤 N ₂ O 产生的关键微生物过程及减排措施	朱永官,王晓辉,杨小茹,徐会娟,贾炎 (792)
《环境科学》征订启事 (691) 《环境科学》征稿简则 (800) 信息 (489,519,591,791)	

基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例

贾海峰, 郭羽

(清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 为了加强湖库流域水环境保护与污染负荷排放管理, 支持湖库控制单元允许纳污负荷量的计算和污染负荷分配决策的制定, 在总结国内外环境容量相关研究的基础上, 针对现状水环境总量控制技术中允许纳污负荷计算与分配环节存在的问题, 提出基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算方法. 并以 EFDC (environmental fluid dynamic code) 水环境模型为核心, 通过模型概化、参数率定等建模技术与方法的研究, 利用估算与精算相结合的方法制定排污情景, 并应用模型完成情景分析. 应用多次情景试算、分析的方法, 制定优化的排污情景, 从而计算出湖库允许纳污负荷量. 最后以辽宁省柴河水库为实证区进行方法的应用, 证明了方法具备科学性与计算精度.

关键词: 湖库控制单元; 允许纳污量; 双向算法; EFDC 模型; 柴河水库

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)02-0555-07

Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study

JIA Hai-feng, GUO Yu

(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the reviews and summaries of water environment carrying capacity researches and practices, the main problems of allowable pollutants load estimation and its allocation in China were analyzed. Then a bi-direction algorithm for allowable pollutants loads calculation was proposed to support the pollutants loads management in the lake and reservoir control units. It was the combination of forward algorithm and backward algorithm. The two major steps were modeling and scenario analysis. Firstly, the basic scenario was proposed using the estimation model. Then the basic scenario was analyzed using the water quality simulation model to assess the compliance of water quality objectives. The allowable pollutant loads were calculated after several loops of scenario simulation, result analysis and scenario optimization. Finally, the Chaihe Reservoir in Liaoning Province, China was used as a case study using Environmental Fluid Dynamic Code (EFDC) model as the kernel model. The results demonstrated that the algorithm proposed provided an efficient and appropriate methodology for allowable pollutant load calculation.

Key words: lake and reservoir control unit; allowable pollution loads; bi-direction algorithm; environmental fluid dynamic code (EFDC); Chaihe Reservoir

在经济发展与环境保护并重的今天, 进行湖库流域管理时, 既要允许湖库接纳一定量的污染物负荷, 又要保证湖库水体的环境质量, 维持湖、库的环境功能. 在此目标下, 各类湖库水环境模型以及基于水环境容量的环境管理方法得到广泛的研究与应用^[1~3]. 随着对流域水环境管理要求的逐步提高, 人们已经不满足于仅使用零维或一维水环境模型进行环境容量的估算, 希望利用机理模型, 根据不同污染源排放的时空特征以及水体水文、水质时空变化特征, 刻画出以保护湖库水体环境保护敏感区环境目标为前提的允许纳污量, 并分配到相应的污染源^[4~6].

EFDC 模型是美国 EPA 推荐使用的湖库三维水动力-水质模型^[7]. 它是一种在设定了上游来水水文、水质条件以及排污口位置和排污特征状况下, 求解水体控制断面水质指标的正向算法模型. 而目

前常用的水环境容量计算模型, 则是基于受纳水体的结构、水文特征以及水质保护目标, 反推水体的环境容量和允许排放量^[3]. 常用的水环境容量模型属于静态模型, 模拟因子少, 优点是简单实用, 适用于数据情况较差, 水环境容量计算精度要求不高的湖库水环境管理中. 而利用 EFDC 模型构建的湖库水环境容量模型是一个考虑多水质因子的动态水环境模型, 它对水质因子间的交互关系以及水质的时空变化刻画的较为精确, 但对数据的要求高, 需要通过情景分析法等方法, 寻找达标情景. 本研究将集成这两类方法, 以 EFDC 模型为核心, 建立基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算方法, 并以柴河

收稿日期: 2013-06-06; 修订日期: 2013-08-27

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07526-005)

作者简介: 贾海峰 (1967 ~), 男, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为城市环境系统分析, E-mail: jhf@tsinghua.edu.cn

水库为例进行实证分析。

1 基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算方法

1.1 技术路线

针对现状水环境总量控制技术中允许纳污负荷计算与分配环节存在的问题,借鉴美国 TMDL 技术^[8,9],提出基于双向算法的湖库允许纳污负荷

量计算方法,其技术路线可分为两条主线:①允许纳污负荷计算研究;②污染负荷分配研究。在传统的容量总量控制中,允许纳污量计算与污染负荷分配是相互独立的,而在本研究中,将两条主线进行整合,让容量计算、负荷分配、模型模拟工作有机结合,互相参考、互为支持。技术路线如图 1 所示。

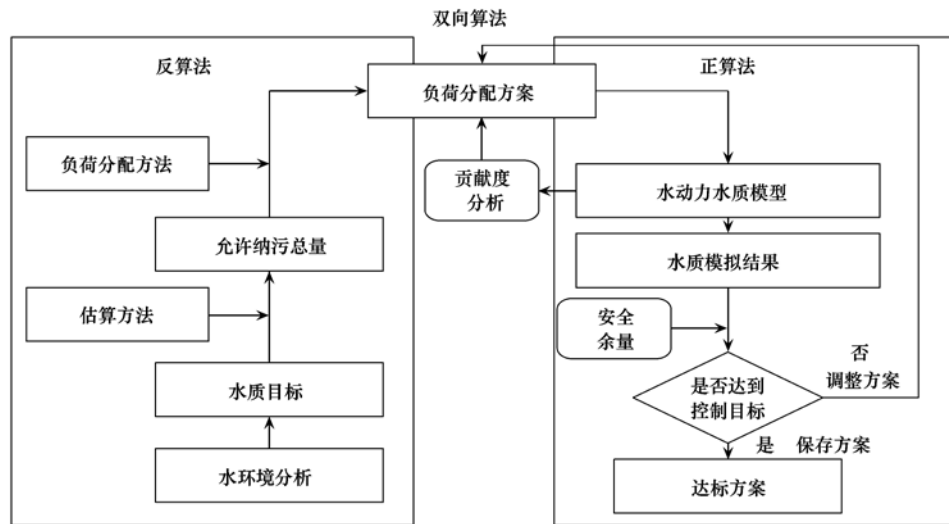


图 1 基于双向算法的水体允许纳污负荷量计算技术路线

Fig. 1 Roadmap of allowable pollution loads calculation based on bi-direction algorithm

图 1 中反算法是根据控制断面或控制区域的水质目标,反推水体纳污总量的估算方法。通过反算法可以得到允许纳污负荷总量的初算结果,以此为基础,结合污染负荷的分配方法,制定不同的负荷分配情景,然后通过正算法进行分配方案的达标校核与其对水质影响的分析。在负荷分配方案优化中,利用模型对污染源贡献度的分析,计算污染源权重,并结合分配方案的环境影响程度、经济因素、技术可行性因素等,对方案进行筛选和优化。

根据此技术路线图,具体的技术环节可以分为:①水环境问题分析与水质目标制定;②允许纳污负荷总量估算;③负荷分配方法与技术;④水动力-水质模型对情景方案的模拟;⑤模型不确定性分析与安全余量计算;⑥污染源-水质响应关系分析与分配方法的优化。

1.2 基于 EFDC 模型的湖库动态水质模型构建

包括模型建立和情景制定分析两个环节,如图 2 所示。

1.2.1 模型概化与数据输入

(1)空间概化 利用 EFDC 构建湖库三维水环境模型,首先要进行空间概化。基本过程是将湖库

水体划分为模型计算单元网格的组合。网格划分后,按照模型的数据需求,将网格坐标、网格间连接方式、网格内的初始水动力条件、初始水质指标等进行整理,作为模型输入。

(2)时间概化 时间步长的划分关系到模型求解的时间与运算的稳定性。EFDC 需要输入多种时间序列的边界条件(例如:入流、出流、蒸发、降水、气温、负荷输入等),由于数据条件限制,一般需要按照时间步长要求,将已有数据进行平滑、插值等处理,完成时间序列相关的数据与参数的输入。

1.2.2 参数率定和模型验证

EFDC 模型常规水质指标模拟中,相关反应主要包括 4 类:藻类生长动力学、氮反应动力学、磷反应动力学、溶解氧-有机碳相关反应。基于 4 类动力学反应过程,EFDC 模型可模拟 22 种水质指标在水体中的相互转换与影响。EFDC 模型反应机理较为复杂,控制各种反应的水质参数众多,因此,模型的参数率定是保证模拟结果精度的重要技术环节。

如果率定结果满意,再利用另外一套与用于参数率定的数据独立实际监测数据进行模型验证。如果验证不能满足要求,则重新进行参数率定,直到验

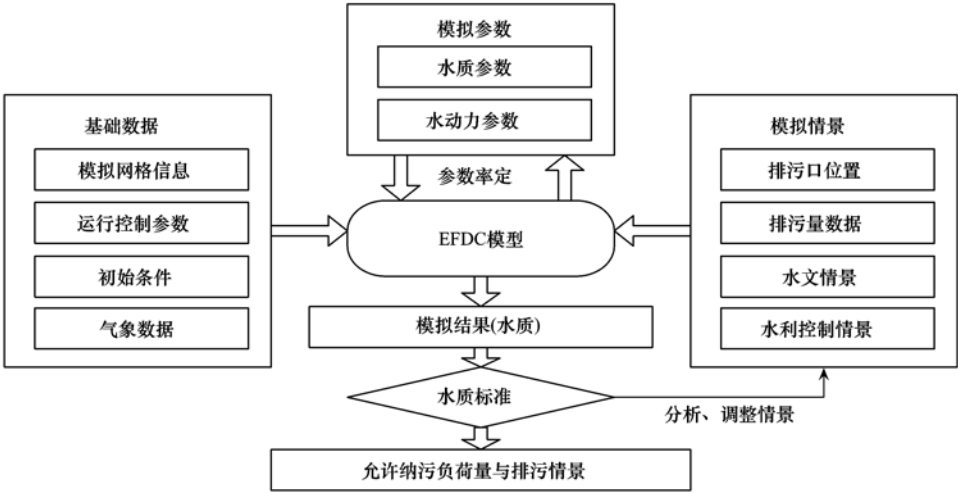


图 2 基于 EFDC 的湖库动态水质模型建立

Fig. 2 Setup process of the EFDC dynamic water quality model

证结果满足要求。

1.3 情景分析法计算允许纳污负荷量

EFDC 模型是在已知排污口及其排放特征的情况,求解控制断面水质的正向算法模型。可以使用情景分析法,进行允许纳污负荷计算。情景分析法通过设定排污情景、模拟排污情景下控制断面水质、分析模拟结果并计算排污口对控制断面水质的贡献度、调整排污情景等步骤,多次循环寻找优化排污方式以及此种排污方式对应的湖库允许纳污负荷量。

1.3.1 估算模型与初始情景设置

合理的设置初始排污情景,有利于缩短利用情景分析法寻找优化排放的时间。可以利用传统水环境容量模型作为估算模型,利用其由控制断面水质推算排污口允许排放量的特点,粗略的估算允许排放量,并将此计算结果作为 EFDC 模型情景分析中的初始情景。

1.3.2 EFDC 模型与情景分析

情景设定为模型确定了输入条件,通过对水质模拟结果进行分析,判断设定的排污情景是否达到水环境管理的标准,并通过多次模拟寻找排污口与控制断面之间的水质响应关系,通过线性拟合、多元回归等方法,建立关系函数,求解单个排污口对控制断面水质的贡献度,有利于指导更合理的情景方案的设定。

2 柴河水库实证研究

选择柴河水库作为研究的实证区,利用 EFDC 模型对柴河水库进行三维建模,并设置多种水文条件,计算不同条件下柴河水库最主要的入库河

流——柴河在不同月份允许带入水库的最大污染负荷量,通过计算结果,对柴河水库流域污染源排放进行管理。

2.1 研究区概况

柴河水库是辽河一级支流柴河上建设的一座大型水库,位于辽宁省铁岭市东南,是铁岭市主要饮用水源地之一。水库总库容为 6.36 亿 m³,控制流域面积 1 355 km²。柴河水库流域以非点源污染为主,重点污染期出现在丰水期,超标的主要水质指标为氨氮和总磷^[11]。

根据管理需求,模型模拟的主要水质指标为氨氮和总磷。主要控制断面为柴河水库坝前断面,以柴河水库的水环境功能分区要求(《地表水环境质量标准(GB 3838-2002)》Ⅱ类标准)为控制断面水质目标,并对污染物混合区(污染物入库后允许超标的区域)面积、藻类浓度等进行考虑。具体控制目标如下。

(1)控制断面水质目标。控制断面在全年范围内,月均值达到Ⅱ类水标,氨氮为 0.5 mg·L⁻¹,总磷为 0.025 mg·L⁻¹。

(2)水库在控制断面达到峰值浓度时,要求全库混合区面积小于 30%,即至少有 70% 网格的模拟结果在全年 90% 的时间内的污染物峰值浓度低于 0.5 mg·L⁻¹。

2.2 模型概化

2.2.1 模型空间概化

将柴河水库多年平均蓄水水位下区域概化为模型模拟区域,对此模拟区域进行三维空间网格划分,在垂直方向上将水库分为上下两层,每层由 480 个

网格组成,每个网格为 200 m × 200 m. 模拟区域总面积为 19.2 km².

2.2.2 模型时间概化

为保证模型的运算的稳定性,并考虑模型的计算效率,确定本次水动力模拟的基本时间单元为 1 d,计算时间步长为 1 min. 水质模拟的时间步长为水动力模拟的 2 倍.

2.3 模型的参数研究

2.3.1 参数灵敏度分析

根据模拟对象的设置,需要确定 EFDC 的 34 个水质反应参数. 首先对参数进行灵敏度分析,选取需要精确率定的敏感参数^[12]. 下面以氮反应动力学过程中的主要参数为例,进行参数灵敏度分析,表 1 为分析计算的结果.

表 1 参数灵敏度分析结果

Table 1 Parameters sensitive analysis results

参数名	参数说明	参数取值	灵敏度系数/%
rNitM	最大硝化速率系数	0.8	-6.76
KNit1	水温大于最适硝化作用温度时的温度系数	0.059	15.64
KNit2	水温小于最适硝化作用温度时的温度系数	0.003	0.114
KDN	有机氮矿化速率系数	0.04	16.83
KHNitDO	硝化作用的溶解氧半饱和系数	1	0.582
KDRN	有机氮相间分配系数	0.58	34.50

表 1 中显示,在柴河水库 EFDC 模型对氨氮的模拟中,最大硝化速率系数、水温大于最适硝化作用温度时的温度系数、有机氮矿化速率系数、有机氮相间分配系数是相对敏感的参数. 对于其他反应参数也可以使用类似的灵敏度分析方法.

2.3.2 参数率定与模型验证

参考湖库水质模型的参数研究成果^[13~16],使用 2005 年柴河水库入库口、库中、坝前的实际监测数据,分别完成了对 EFDC 模型的水动力、水质模拟的参数率定;使用 2009 年同样上述监测点的实际监测数据进行模型验证. 以坝前监测点为例,参数率定与模型验证结果如图 3 和图 4 所示.

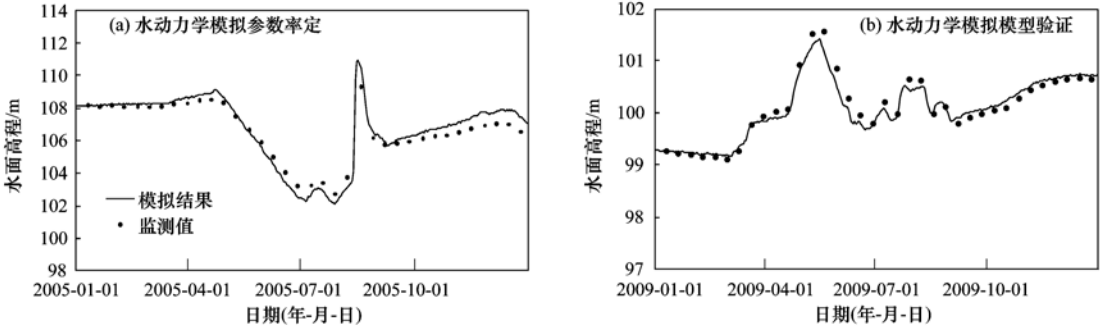


图 3 EFDC 水力学模拟参数率定和模型验证结果

Fig. 3 Calibration and verification result of hydrodynamic simulation

采用中值误差对模型参数率定与模型验证的模拟结果进行误差分析,如表 2 所示. 可见模型可以从宏观和趋势上反映柴河的精度,可以支持柴河水库的水环境管理和允许纳污量计算.

表 2 模拟结果中值误差分析表/%

Table 2 Median error of simulation/%

点位	指标	参数率定	模型验证
入库区	氨氮	7.3	15.1
	总磷	30.1	25.2
库中区	氨氮	43.4	27.5
	总磷	34.0	37.8
坝前区	氨氮	50.2	21.0
	总磷	27.8	19.7

2.4 允许纳污量计算

2.4.1 初始情景设定与分析

使用式(1)所示的简单营养盐容量模型进行了氨氮与总磷的允许纳污负荷量的估算.

$$W = P(\sigma Z + 31.536Q_{out})$$
$$\sigma = k_1 + k_2 H \xi$$
$$\xi = 3153.6 \frac{Q_{out}}{V} \quad (1)$$

式中, W 为水库典型污染因子的环境容量 ($t \cdot a^{-1}$); P 为水质目标 ($mg \cdot L^{-1}$); σ 为典型污染物的沉降速率系数 ($m \cdot a^{-1}$); Z 为湖库水面面积 (km^2); H 为湖库平均深度 (m); ξ 为湖库的冲刷系数 ($1 \cdot a^{-1}$); V

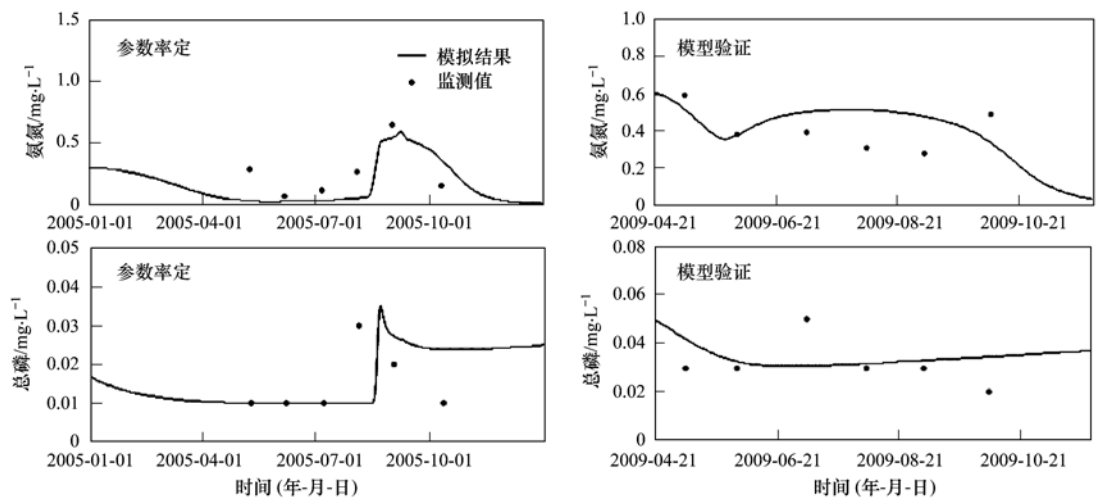


图 4 水质参数率定与模型验证水质指标图

Fig. 4 Calibration and verification result of water quality simulation

为湖库的蓄水量(万 m^3); Q_{out} 为水库的出流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); 各系数为单位转换系数。

在初始情景设置中,参考估算模型计算的年柴河入库口允许纳污负荷量,按照入库水量等比例将其分配到各月。

在模型水动力模拟上,选取 2005 年柴河水库水动力条件作为模拟对象,将 2005 年 8 月作

为柴河水库典型丰水月,在此条件上进行污染排放控制,可以达到控制最不利条件,保证其他水文条件下水质达标得目的。将柴河水库 2005 年出、入流量数据,蒸发、降水、渗漏、取水工程取水量等数据,估算模型得出的允许排污量数据等,输入 EFDC 模型进行模拟。模拟结果如图 5 所示。

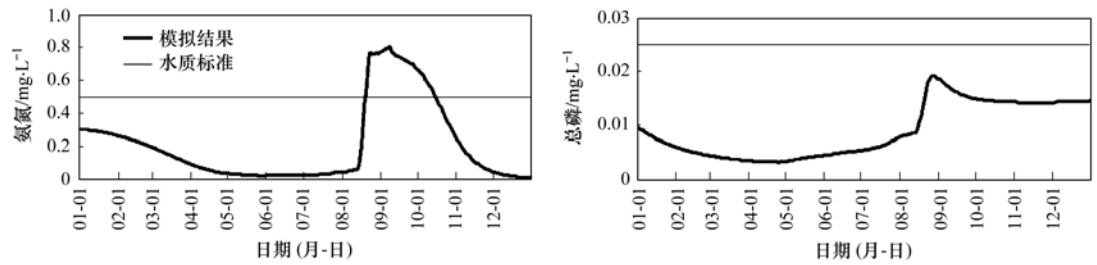


图 5 初始情景模拟结果

Fig. 5 Simulation results of basic scenario

可以看出在初始情景的计算结果中,污染峰值浓度较为接近水质标准,具备一定的估算价值。不过高估了氨氮的降解速度,低估了总磷的沉降速率。因此,需要在初始情景基础上进行调整。

2.4.2 排污口-控制断面水质响应关系

分别调整氨氮与总磷的入库浓度进行调整,设置情景后,输入 EFDC 模型进行模拟,模拟结果如表 3 所示。

通过多次模拟,分析污染物排放口与控制断面之间的水质响应关系,可以看出排放口污染物浓度与控制断面水质之间具有较好的线性关系,可以用线性模型进行拟合。基于此线性关系,可以求解在典型丰水月条件下的柴河入库口的污染物允许入库负荷量。

表 3 排污口-控制断面水质响应关系/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 3 Response relationship of pollution load and water quality at the control point/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

编号	氨氮		总磷	
	入库浓度	控制断面峰值浓度	入库浓度	控制断面峰值浓度
1	0.80	0.676	0.044	0.019 2
2	0.70	0.618	0.050	0.020 8
3	0.65	0.588	0.060	0.023 3
4	0.40	0.446	0.070	0.028 8
5	0.60	0.559	0.080	0.032 6
6	0.55	0.531	0.065	0.027 2
7	0.50	0.501	0.055	0.022 5

2.4.3 混合区面积校核

根据控制目标的要求,水库在控制断面达到峰

值浓度时,要求全库混合区面积小于 30%,即至少有 70% 网格的模拟结果在全年 90% 的时间内的污染物峰值浓度低于 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 对于两个主要控制指标氨氮与总磷,氨氮在柴河水库的控制难度较大,因此在进行面积校核时,选取氨氮模拟结果进行.

根据入库污染源-控制断面水质相应关系分析,以及其超标区域面积分析,在氨氮入流浓度为 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,库中区氨氮超标面积仍较大,超标区内氨氮峰值浓度接近 $0.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 其主要原因是入流总氮浓度较高,总氮沉降后底泥释放出氨氮,以及溶解态有机氮转化为氨氮. 因此,需要通过限制总氮入流浓度,以满足氨氮超标区域面积限制的控制目标.

通过模型多次试算,计算总氮入流浓度限制为 $1.37\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 在此情景下,氨氮超标区域大于 30% 的天数被控制在 36 d 之内.

2.4.4 模型不确定性与最终允许入库负荷量

安全余量 (margin of safety, MOS) 的概念在美国 TMDL 计划中被提出,是指在水环境管理中由于计算污染负荷与受纳水体之间关系时存在的不确定性,而需要在水环境管理过程中,在模型计算结果的基础上,留出余量,保证水质达标率^[17-19].

在柴河水库 EFDC 模型进行允许纳污负荷计算过程中,使用 FOEA (First-Order Error Analysis) 法对模型进行不确定性分析^[20],并计算安全余量. FOEA 法中,将模型的参数不确定性简化假设为单个参数不确定性的线性加和,通过泰勒多项式对模型在参数取值点进行展开,通过求解单个参数灵敏度以及参数经验取值范围,而求解模型的整体参数不确定性.

FOEA 法求解的安全余量结果如图 6、表 4 所示,这样就可计算出最终的允许入库负荷量.

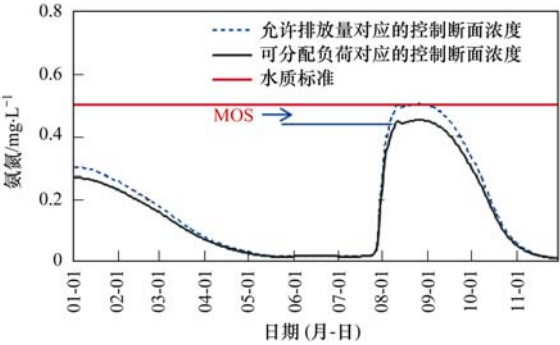


图 6 氨氮的安全余量与允许入库负荷量

Fig. 6 MOS and allowable pollution loads of NH_3

3 结论

针对我国在水环境总量控制中允许纳污负荷计

表 4 典型丰水月水文条件下允许入库负荷量及安全余量计算结果/ $\text{t}\cdot\text{month}^{-1}$

Table 4 Calculation results of allowable pollution loads and MOS in typical wet month/ $\text{t}\cdot\text{month}^{-1}$

污染指标	模型计算的允许入库负荷量	安全余量	最终允许入库负荷量
氨氮	142.78	14.53	128.25
总磷	17.53	0.88	16.65

算与分配环节存在的问题,借鉴以美国 TMDL 技术为主的国外先进水环境管理技术,提出基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算方法,让容量计算、负荷分配、模型模拟工作有机结合,互相参考、互为支持,支持水环境的水质目标管理. 并基于 EFDC 机制模型的特征,建立以 EFDC 模型为核心的湖库允许纳污负荷量计算模型,可通过“初步情景设置-计算模拟-情景分析与修改-再模拟分析”过程,加快达标情景与优化情景的求解速度. 最后以柴河水库为研究实证区,通过模型概化、参数灵敏度分析和率定与模型验证,完成了柴河水库允许入库负荷量的计算. 该方法可用于其它水体的允许纳污量计算和污染负荷管理.

参考文献:

[1] 宋国君. 论中国污染物排放总量控制和浓度控制[J]. 环境保护, 2000, 6(1): 11-13.

[2] 刘洁, 冯银厂, 朱坦. 总量控制在环境管理中应用[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(1): 59-61.

[3] 程声通. 河流环境容量与允许排放量[J]. 水资源保护, 2003, 19(2): 8-10.

[4] 孟伟, 张楠, 张远, 等. 流域水质目标管理技术研究 (I)——控制单元的总量控制技术[J]. 环境科学研究, 2007, 20(4): 1-8.

[5] Armstrong N E. Water quality modeling and total maximum daily loads [J]. Water Environment Research, 2001, 73(2): 131.

[6] DePinto J V, Paul L, Freedman P E, et al. Models quantify the total maximum daily load process[J]. Journal of Environmental Engineering, 2004, 130(6): 703-713.

[7] Hamrick J M. A Three-Dimensional Environmental Fluid Dynamics Computer Code: Theoretical and Computational Aspects [R]. Gloucester Point: The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science. Special Report 317, 1992.

[8] 叶兴平, 张玉超. TMDL 计划在污染物总量控制中的应用初探[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(8): 13-16.

[9] Elshorbagy A, Teagaravatapu R S V, Ormsbee L. Total maximum daily load (TMDL) approach to surface water quality management: concepts, issues, and applications[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2005, 32(2): 442-448.

[10] 王建平, 程声通, 贾海峰, 等. 环境模型参数识别方法研究综述[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 574-580.

- [11] 元红. 柴河水库饮用水源地水质现状调查及评价[J]. 内蒙古环境科学, 2008, **20**(3): 48-50.
- [12] 于顺东, 尤学一. WASP 水质模型检验及参数敏感度分析[J]. 水资源与水工程学报, 2007, **18**(6): 41-47.
- [13] 贾海峰, 程声通, 杜文涛. GIS 与地表水水质模型 WASP5 的集成[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, **41**(8): 125-128.
- [14] 王建平, 苏保林, 贾海峰, 等. 密云水库及其流域营养物集成模拟的模型体系研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(7): 1286-1291.
- [15] 贾海峰, 张岩松, 何苗. 北京水系多藻类生态动力学模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, **49**(12): 1992-1996.
- [16] Zou R, Lung W S, Wu J. Multiple-pattern parameter identification and uncertainty analysis approach for water quality modeling[J]. Ecological Modeling, 2009, **220**(5): 621-629.
- [17] Dilks D W, Freedman P L. Improved consideration of the margin of safety in total maximum daily load development[J]. Journal of Environmental Engineering, 2004, **130**(6): 690-694.
- [18] Benaman J, Shoemaker C A. Methodology for analyzing ranges of uncertain model parameters and their impact on total maximum daily load process[J]. Journal of Environmental Engineering, 2004, **130**(6): 648-656.
- [19] Melching C S, Yoon C G. Key source of uncertainty in QUAL2E model of Passaic River[J]. Journal of Water Resource Planning and Management, 1996, **112**(2): 105-113.
- [20] Zhang H X, Yu S L. Applying the first-order error analysis in determining the margin of safety for total maximum daily load computations[J]. Journal of Environmental Engineering, 2004, **130**(6): 664-673.

CONTENTS

Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China	WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, <i>et al.</i> (401)
Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in PM _{2.5} and Source Analysis in Beijing	TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (411)
Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} and PM ₁₀ Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing	ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, <i>et al.</i> (418)
Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on PM _{5.0} Inhalable Particulate in Beijing	WANG Yan-hui, XIAO Yao (428)
Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring	XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun (436)
Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (442)
Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (451)
Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ in Xinzhou City	SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (458)
Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou	QING Xian, SU Yuan, SU Qing, <i>et al.</i> (464)
Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis	SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, <i>et al.</i> (470)
Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea	XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, <i>et al.</i> (475)
Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data	LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, <i>et al.</i> (481)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area	HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (490)
Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation	JIA Long, XU Yong-fu (495)
Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China	DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, <i>et al.</i> (504)
Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area	QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, <i>et al.</i> (513)
Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (520)
Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends	LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, <i>et al.</i> (526)
Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting	ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (533)
Oxidation of Mercury by CuBr ₂ Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition	HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, <i>et al.</i> (541)
Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian	ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, <i>et al.</i> (547)
Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study	JIA Hai-feng, GUO Yu (555)
Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain	GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, <i>et al.</i> (562)
Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary	ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (569)
Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary	MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (577)
Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area	CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, <i>et al.</i> (585)
Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands	BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, <i>et al.</i> (592)
Impacts of <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of <i>Microcystis aeruginosa</i>	ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, <i>et al.</i> (597)
Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water	TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, <i>et al.</i> (605)
Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite	LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (611)
Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride	SONG Chen-yi, YIN Da-qiang (619)
Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System	FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (626)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety	YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao (633)
Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment	LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, <i>et al.</i> (643)
Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter	LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (651)
Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process	CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, <i>et al.</i> (657)
Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes	ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe (663)
Biosorption Characteristics of Cu ²⁺ by Spent Substrate of <i>Pleurotus</i> Oyster	HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, <i>et al.</i> (669)
Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition	WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, <i>et al.</i> (678)
Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, <i>et al.</i> (684)
Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China	ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, <i>et al.</i> (692)
Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site	ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, <i>et al.</i> (704)
Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China	ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, <i>et al.</i> (711)
Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River	TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, <i>et al.</i> (719)
Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants	ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, <i>et al.</i> (727)
Impact of Compound Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites	YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce (733)
Characterization of Manganese Oxidation by <i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1	ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (740)
Effects of the Ratio of NO ₃ ⁻ -N to NO ₂ ⁻ -N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture	CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, <i>et al.</i> (746)
Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou	GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (753)
Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhammolipid Reverse Micelles	ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, <i>et al.</i> (759)
Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea	ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, <i>et al.</i> (764)
Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on <i>Eisenia foetida</i>	WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin (770)
Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System	LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (780)
Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from <i>Suaeda salsa</i> Marsh in the Yellow River Estuary	LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, <i>et al.</i> (786)
Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies	ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, <i>et al.</i> (792)

《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)

2014年2月15日 35卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 2 Feb. 15, 2014

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