

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

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

太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟

韩涛¹, 翟淑华², 胡维平¹, 张红举^{2,3}, 李钦钦³

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 水利部太湖流域管理局水资源保护局, 上海 200434; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 于2011年9月对太湖竺山湖开展了1次湖区实验, 根据质量平衡原理, 通过进出竺山湖湖区河道以及竺山湖湾心、湾口水量、水质测量, 弄清了竺山湖湖区营养物质进出以及消纳规律, 从而为完善水量-水质模型参数提供依据, 也为进一步研究太湖水体自净能力提供了基础资料. 采用EcoTaihu模型模拟了太湖营养物质的循环以及自净能力, 根据竺山湖湖区实测结果对模型进行了验证, 实验得到竺山湖湖区总氮年自净能力为1 979 t, 总磷年自净能力为119 t, 通过EcoTaihu模型计算得到竺山湖总氮年自净能力为1 911 t, 总磷年自净能力为116 t, 实测数据和模型较为吻合. 模型计算结果表明, 2006、2008、2010年太湖氮元素自净能力分别为4.00、4.27、4.11万t. 2006、2008、2010年太湖磷元素自净能力分别为1 566、1 798、1 712 t.

关键词: 自净能力; EcoTaihu模型; 太湖; 营养物质循环; 富营养化

中图分类号: X143; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-3862-10

Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu

HAN Tao¹, ZHAI Shu-hua², HU Wei-ping¹, ZHANG Hong-ju^{2,3}, LI Qin-qin³

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Water Resources Conservation Bureau, Taihu Basin Authority, Ministry of Water Resources, Shanghai 200434, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A field experiment was carried out in Zhushanhu in September, 2011. On the basis of mass balance, nutrients flow in and out of Zhushanhu and their Digestion-absorption law was illustrated through water quantity-water quality observation of bay heart, bay mouth and rivers around Zhushanhu, which provides basic data for the further research on the self-purification capacity of Lake Taihu. The EcoTaihu model was adopted to simulate the nutrients flow and their self-purification capacity of Lake Taihu. The simulated annual self-purification capacity of total nitrogen and total phosphorus of Zhushanhu was 1 911 t and 116 t, respectively, whereas the observed annual self-purification capacity of total nitrogen and total phosphorus of Zhushanhu was 1 979 t and 119 t, respectively. The model was validated by the observation data. The simulated result showed that the self-purification capacity of total nitrogen of Lake Taihu in year 2006, 2008 and 2010 was 4.00×10^4 t, 4.27×10^4 t and 4.11×10^4 t, respectively, whereas the self-purification capacity of total phosphorus of Lake Taihu in year 2006, 2008 and 2010 was 1.56×10^3 t, 1.80×10^3 t and 1.71×10^3 t, respectively.

Key words: self-purification capacity; EcoTaihu model; Lake Taihu; nutrients flow; eutrophication

太湖是我国的第三大浅水湖泊, 目前面临着严重的富营养化危机^[1,2]. 2007年5月发生在无锡的太湖饮用水危机事件, 其直接原因就是湖泊富营养化导致的蓝藻水华暴发, 并在合适的气象条件下在取水口附近大量堆积、死亡、腐烂, 使得饮用水水源地受到污染所致^[3]. 此次水危机事件凸显出我国目前湖泊富营养化问题的严重性, 引起了全国乃至全世界的高度关注^[4,5]. 为有效保护太湖水环境, 深入研究太湖水体自净能力具有重要意义. 湖泊水体的自净能力是一个包括物理、化学和生物的复杂过程^[6,7], 是指湖泊生态系统通过自然生态过程及物质循环作用, 将水体中的富营养化物质或有害物质予以吸收、转化、再分配, 使水体得以净化的能力^[8-10]. 目前对自净能力的研究多基于环境容

量^[11-15], 以实验和统计分析为主^[16-18], 不能很好地分析太湖自净机制. 为了更好地理解太湖自净能力, 本研究开展了竺山湖湖区实验, 得出了竺山水体自净能力, 在此基础上利用EcoTaihu模型分析了典型年太湖营养物质循环以及水体自净能力, 以期太湖的富营养化治理提供技术支持.

1 材料与方法

本实验于2011年8月14~21日选择竺山湖湖区开展高频观测, 通过竺山湖进出河道以及湾心、湾口水量、水质测量, 弄清竺山湖营养物质进出以

收稿日期: 2013-01-17; 修订日期: 2013-04-16

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201101025)

作者简介: 韩涛(1975~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为水环境数值模拟, E-mail: than@niglas.ac.cn

及消纳规律,进而为研究水体污染物降解过程和太湖水体自净能力提供基础资料.

1.1 样品采集

在竺山湖入湖河道百渎港、雅浦港、马山港、殷村港、沙塘港以及竺山湖入太湖湾口处各设置一个观测断面,见图1,进行连续7 d 水位、流量、流速、水质观测,监测频率为每天4次,流量观测的仪器为瑞江超声剖面流量仪.

1.2 实验方法

水质采样点位于河道流量观测断面上(图1),采样时间与流量、流速测量同步.湾口的样品为上、中、下3层的混合水样;河口水样采集用整层水柱采样器采集.水样的易变的指标在现场监测,其余指标及时送实验室检测.水质监测指标为水温、氨氮(NH_4^+-H)、总氮(TN)、溶解态氮(D-TN)、高锰酸盐指数、总磷(TP)、溶解态磷(D-TP)、叶绿素a(Chl-a),共8项.采用过硫酸盐氧化法同时测定水中的总氮和总磷;采用纳氏比色法测定氨氮;采用酸性法测定高锰酸盐指数;采用乙醇萃取法测定叶绿素a浓度.

2 结果与分析

2.1 入湖河道和湾口流量

对竺山湖殷村港、沙塘港、百渎港、雅浦港、

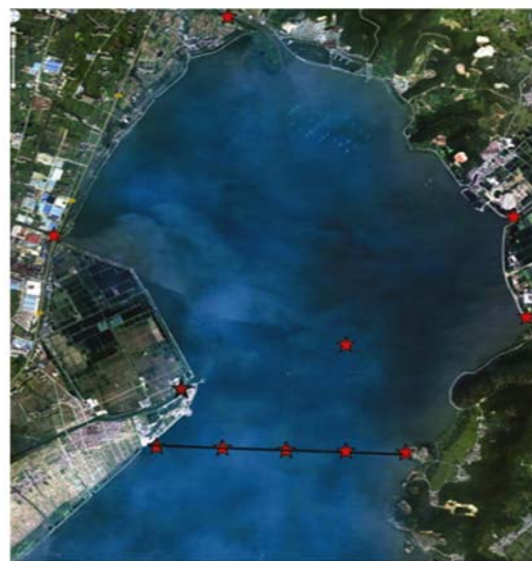


图1 采样点位置示意

Fig. 1 Location of sampling points

马山港以及湾口处流量的监测结果见图2.从中可以看出,殷村港、沙塘港、百渎港、雅浦港流量基本以入湖为主,沙塘港最大流量为 $63.32 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,最小值为 $22.85 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,平均流量为 $47.51 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 左右;殷村港流量在 $39.01 \sim 146.32 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,8月19日出现峰值,平均流量为 $75.50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;百渎港流量的变化范围为 $19.30 \sim 161.27 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,均值为 $68.29 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;雅浦港流量的最大值为 115.07

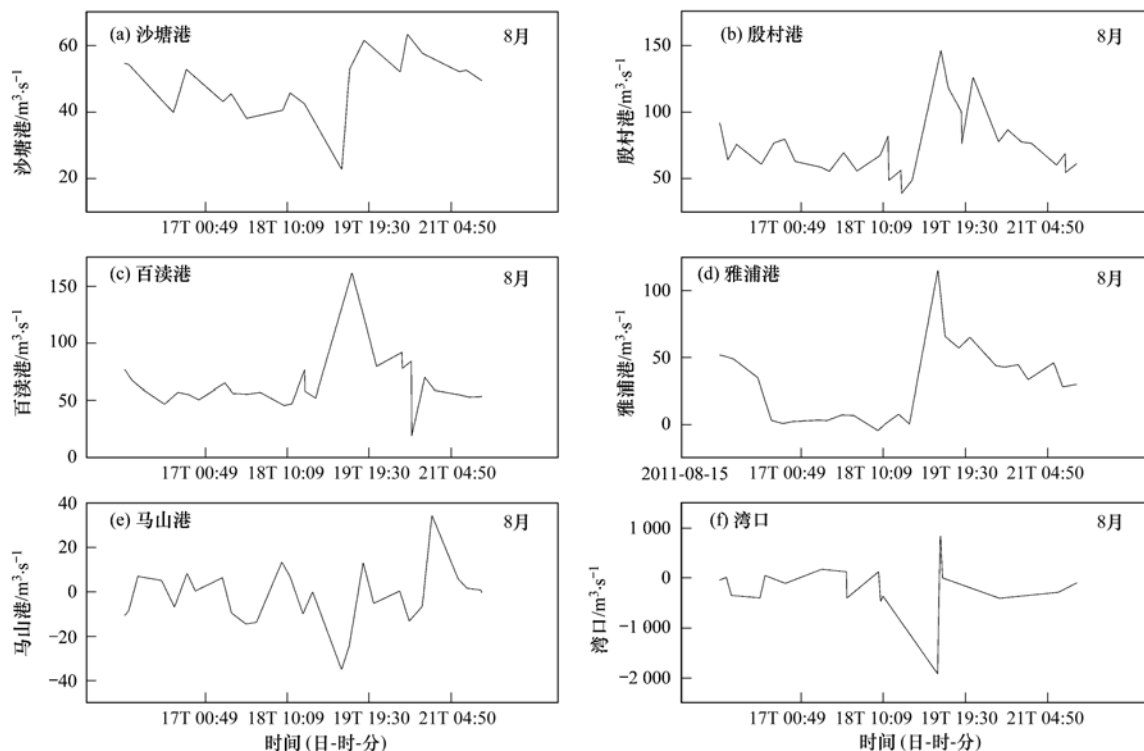


图2 竺山湖河道与湾口流量过程线

Fig. 2 Flow duration curve of rivers and bay mouth of Zhushanhu

$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 最小值约为 $-4.57 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 均值仅为 $29.97 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. 马山港与湾口处的流量与其他 4 条河道不同, 马山港基本以出湖为主, 伴有偶尔的入湖, 流量在 $-34.90 \sim 34.27 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 之间变化; 竺山湖湾口处流量较大, 流量变化范围为 $-1\,920.09 \sim 835.84 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 表现出水量从竺山湾向大太湖入湖为主, 偶

尔也有少量从大太湖流向竺山湖.

2.2 入湖河道与湾口氮磷浓度

竺山湖殷村港、沙塘港、百渎港、雅浦港、马山港以及湾口总氮和总磷的监测结果见图 3. 从中可以看出, 殷村港总氮浓度介于 $1.45 \sim 2.70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均为 $2.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 雅浦港总氮浓度均

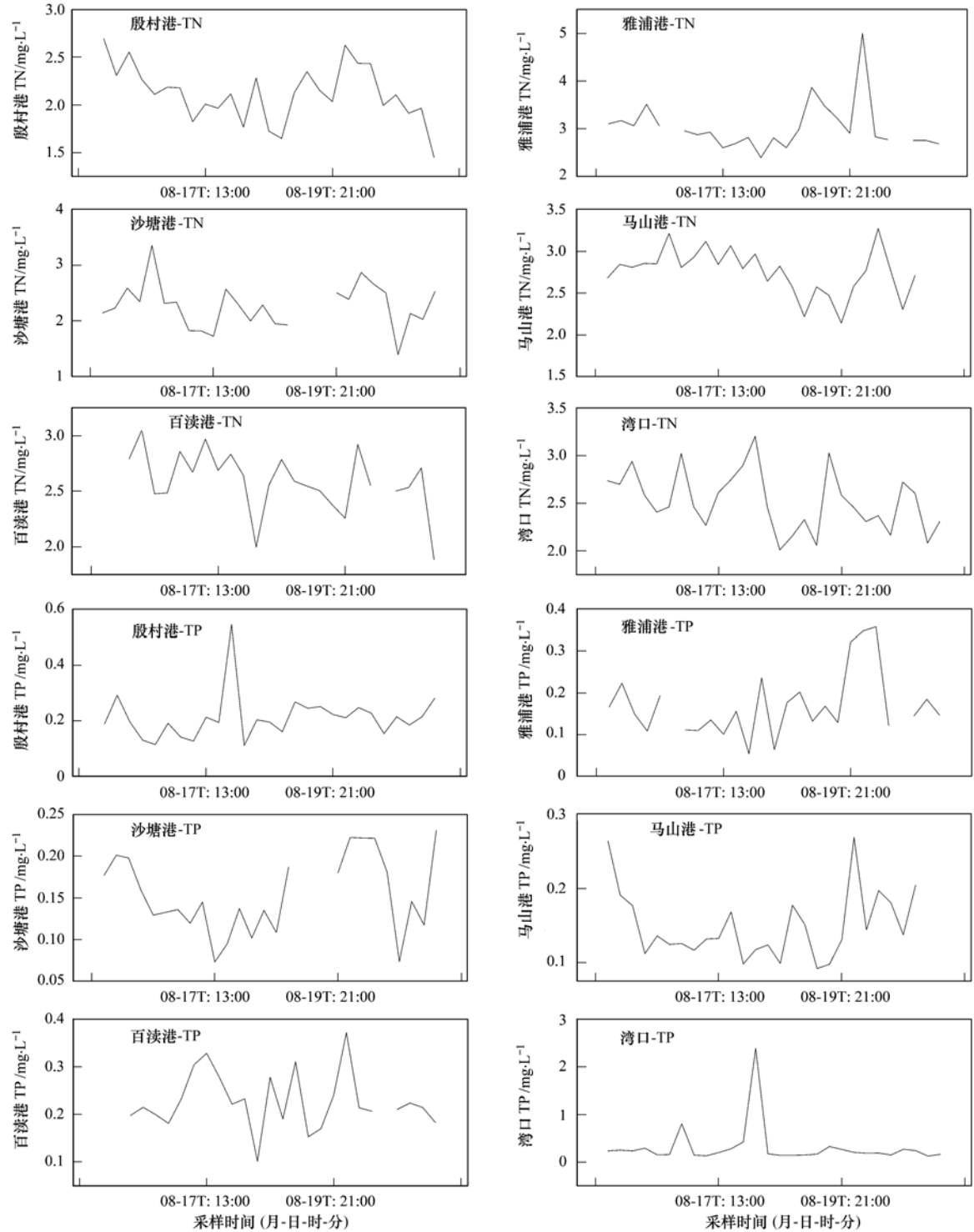


图 3 入湖河道与湾口 TN、TP 变化过程

Fig. 3 Curve of total nitrogen and total phosphorus of rivers and bay mouth of Zhushanhu

值为 $3.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 19 日晚出现最大值为 $5.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最小值则为 $2.93 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 沙塘港总氮的变化范围在 $1.39 \sim 3.36 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 波动范围比较大, 均值为 $2.27 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 马山港总氮的变化范围为 $2.14 \sim 3.28 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 均值为 $2.76 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 百渎港总氮最大值为 $3.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最小值为 $1.89 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均浓度为 $2.60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 湾口总氮的变化最为剧烈, 变化范围在 $1.90 \sim 3.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 均值约为 $2.67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 殷村港总磷浓度 17 日下午出现最大值为 $0.545 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最小值为 $0.111 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 $0.212 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 雅浦港的总磷变化在 $0.054 \sim 0.357 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 变化范围比较大, 波动比较大, 均值为 $0.167 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 沙塘港总磷的变化范围为 $0.073 \sim 0.231 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 波动范围也比较大, 均值为 $0.153 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 马山港总磷最大值为 $0.269 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最小值为 $0.092 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均浓度为 $0.149 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 百渎港总磷的变化趋势与总氮相似, 时间上变化相对比较剧烈, 最大值达到 $0.372 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最小值为 $0.102 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 $0.225 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 湾口总磷的变化与总氮不同, 除了在某一时刻出现了异常高值点, 其余时刻变化比较平缓.

2.3 成果分析

根据质量平衡方程, 竺山湖水体净化污染量可以表示为:

$$c_c = c_{rin} + c_{air} + c_{sed} - c_{rout} - c_B \quad (1)$$

式中, c_c 指水体元素自净量, c_{rin} 指元素通过河道流

入量, c_{air} 指大气干湿沉降量, c_{sed} 指底泥净释放量. c_{rout} 指元素通过河道和湾口流出量, c_B 是湖泊水体元素浓度变化产生量,

$$c_B \text{ 可以表示为: } c_B = Q_1 c_1 - Q_0 c_0 \quad (2)$$

式中, Q_0 、 Q_1 为研究时段开始、结束时的水体容量, c_0 、 c_1 是研究时段开始、结束时的营养盐浓度, 根据竺山湖湾心平台水质浓度的监测结果, 研究开始时刻 TN 浓度为 $2.45 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP 浓度为 $0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 水位为 2.02 m 研究结束时刻 TN 浓度为 $2.42 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP 浓度为 $0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 水位未发生变化, 考虑到水质测量误差, 近似认为 $c_B = 0$.

按流量和水质浓度乘积计算得到: 沙塘港入湖总氮为 85.36 t , 殷村港入湖总氮 114.91 t , 百渎港流入总氮为 86.25 t , 雅浦港流入总氮为 47.53 t , 马山港流出总氮 15.21 t ; 沙塘港入湖总磷为 5.69 t , 殷村港流入总磷为 7.72 t , 百渎港流入总磷为 5.63 t , 雅浦港流入总磷为 3.12 t , 马山港流出总磷 0.91 t . 湾口流出总氮 290.18 t , 流出总磷 19.37 t .

大气干湿沉降采用文献[19]和江苏环境监测站的数据, 即太湖一年总氮干湿沉降约 $9\,800 \text{ t}$, 总磷干湿沉降 210 t , 实验时间为 7 d , 竺山湖占太湖面积的 2.98% , 则竺山湖实验期间干湿氮沉降量 $= 9\,800 \times 7/365 \times 0.0298 = 5.60 \text{ t}$. 同理算出总磷干湿沉降量为 0.12 t .

根据实验期间风速监测和模型计算得到试验期间底泥释放总氮 3.7 t , 底泥释放总磷 0.29 t . 具体结果见表 1.

表 1 试验期间竺山湖营养盐平衡表/t

Table 1 Balance table of nutrient salts of Zhushanhu during the experiment period/t

元素	存量变化	河道带入	河道与湾口流出	大气带入	底泥释放	净化作用
氮	0	334.05	305.39	5.6	3.7	37.96
磷	0	22.16	20.28	0.12	0.29	2.29

通过竺山湖湖区实验得出如下结论: ①根据实验数据, 统计得出竺山湖自净能力约为每周 37.96 t , 即竺山湖总氮自净能力每年约为 $1\,979 \text{ t}$. ②竺山湖实验前后湖心区浓度未有明显变化, 统计得出竺山湖总磷自净能力约为每周 2.29 t , 即竺山湖总磷自净能力每年约为 119 t .

3 太湖自净能力数值模拟

3.1 EcoTaihu 模型结构

本次研究采用 Eco-Taihu 模型, 模型在开发过程中, 集成了 1960 年以来太湖湖流、水位、水质以及生态系统变化调查、实验资料, 特别是 2001 年以

来太湖生态系统研究站监测资料的基础上, 构建了太湖生态环境演变基础数据库, 发展了太湖三维的正压水动力模型. 通过湖泊水动力、营养盐转化、生物生长、代谢及种群竞争等过程的耦合, 创立了包含湖泊水动力要素(水位、湖流)、水质参数(氨态氮、硝态氮、亚硝态氮、正磷酸盐磷、底泥可交换态氮、底泥可交换态磷、底泥间隙水溶解性磷、溶解氧)、生物要素(浮游植物生物量、浮游动物生物量、鱼类生物量、水生植物生物量、碎屑、浮游植物态氮、浮游动物态氮、水生植物态氮、鱼类态氮、碎屑态氮、浮游植物态磷、浮游动物态磷、水生植物态磷、鱼类态磷、碎屑态磷)等 27 个变量的

“太湖水动力学-富营养化生态模型”EcoTaihu. 运用野外原位试验、定点长期观测和数值模拟结合方法确定了模型参数.

EcoTaihu 模型状态变量模块见图 4. 模型主要由三大模块组成,第一块为水动力学湖流、水位变化模拟模块;第二块为食物链网模拟模块,包括鱼类、有机碎屑、浮游动物、藻类以及高等水生植物;

模块、氮输移转化子块和磷输移转化子模块,其中氮子模块含有 9 个子模块,它们为氨氮、亚硝酸盐、硝酸盐氮、碎屑氮、藻类氮、浮游动物氮输移转化子模块及鱼类氮、高等水生植物氮、底泥氮转化子模块;磷子模块包含正磷酸盐磷、碎屑磷、藻类磷、浮游动物磷输移转化子模块,以及高等植物磷、鱼类磷、底泥间隙水磷、底泥可交换磷子模块,太湖生态模型说明及在太湖应用见参考文献[20~23].

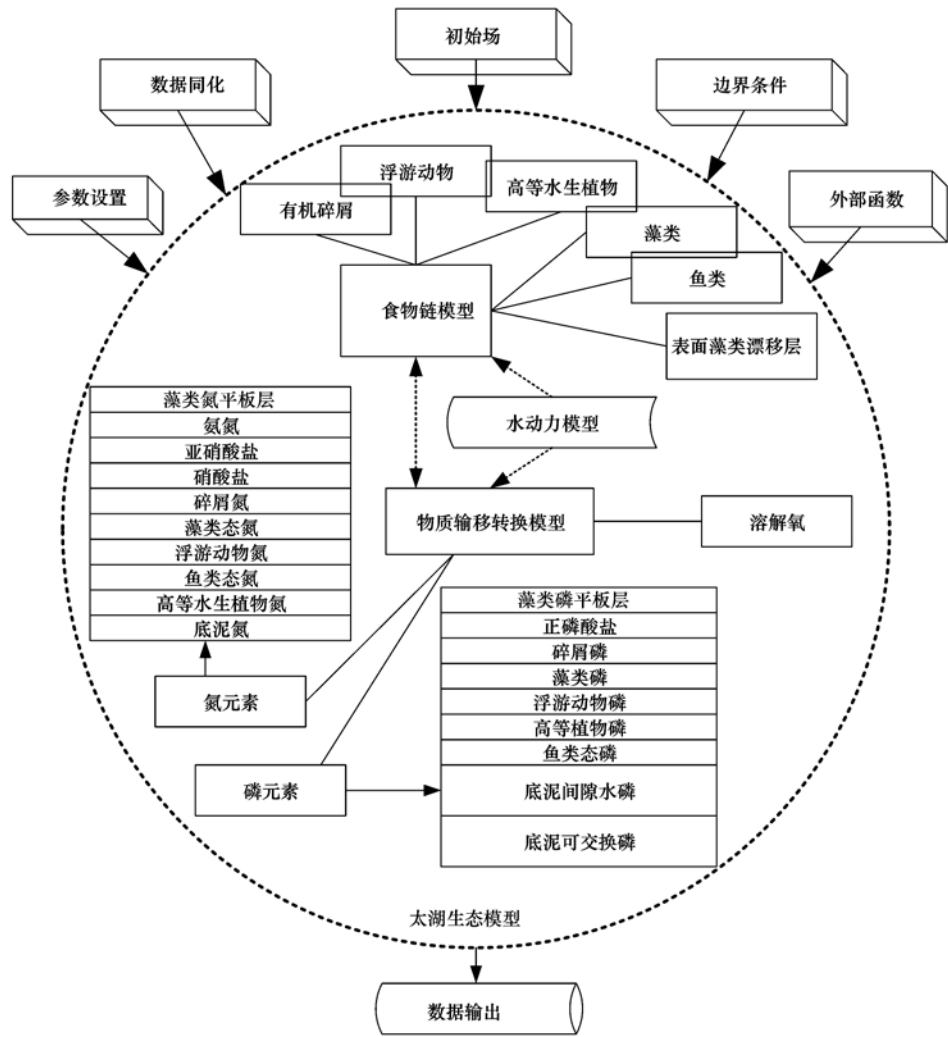


图 4 EcoTaihu 模型模块构成
Fig. 4 Structure of the EcoTaihu model

3.2 模型验证

基于 2010 年水文、气象监测资料,开展了太湖在湖面非均匀风场作用下太湖水体营养盐氮、磷含量、以及溶解氧含量的数值模拟,并用水利部太湖流域管理局无锡水文监测局太湖常规监测站点小湾里、渔业村、龙头、贡湖、庙港、钱港外、湖心南、胥湖、横山、梅园、胥江口、竺山湖、大浦、伏东、焦山、拖山、三号标、乌龟山、大贡山、沙墩港、平

台山、14 号标、夹浦、新塘、小梅口、大钱、西山、胥口、漫山和东太湖等 30 个测点实测值进行了模型检验.

2010 年各测点总氮和总磷各月部分观测点模拟值与实测值比较见图 5 和图 6,从中可以看出,藻型湖区如西太湖和竺山湖等,模型计算值和实测值较为一致,如龙头、竺山湖、夹浦、新塘等监测点,而水生植物生长较为旺盛的湖区、如西山、东太湖

等监测点,计算值和实测值的差异相对较大一些,这可能与水生植物吸收氮磷的速率有关系. 总体而言,除小湾里、胥湖、梅园、阊江口、大浦、西山、

东太湖等测点平均相对误差较大以外,其余测点模拟效果较好,且大多数测点的模拟计算结果的变化趋势与实测值一致,模型能较好地描述了水体中氮、

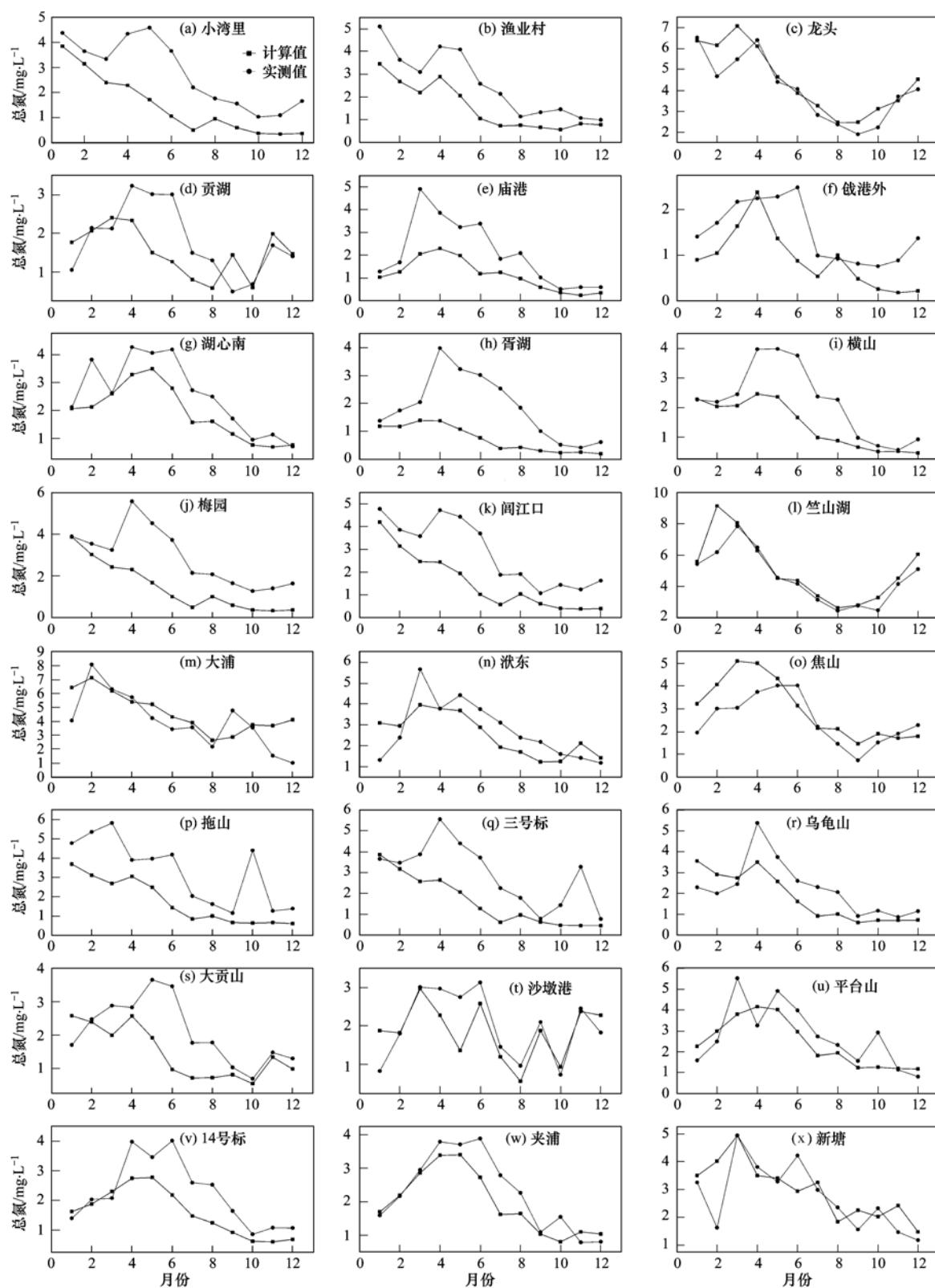


图5 2010年各监测总氮点实测值和计算值

Fig. 5 Observation data and simulation data of TN in each observation station in 2010

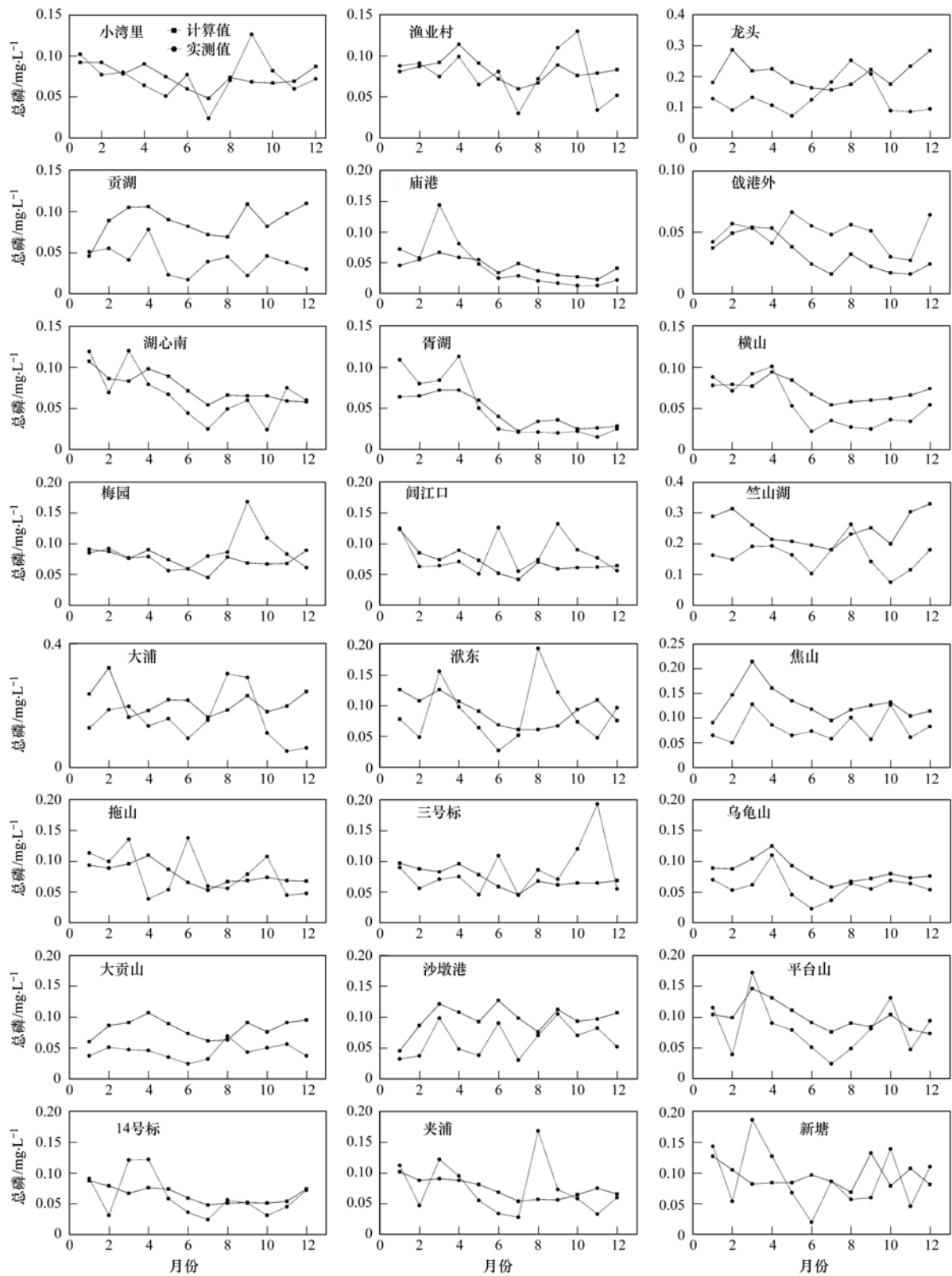


图 6 2010 年各监测总磷点实测值和计算值

Fig. 6 Observation data and simulation data of TP in each observation station in 2010

磷的变化.

根据 EcoTaihu 模型计算得到的竺山湖自净能

力和通过竺山湖湖区试验得到的自净能力对比见表 2,竺山湖 2006 年总氮自净能力1 853 t,2008 年总氮

自净能力 1981.7 t, 2010 年总氮自净能力 1 898.9 t, 平均为 1911 t·a⁻¹, 竺山湖湖区试验得到的总氮自净能力为 1 979 t, 2006 年总磷自净能力 105.9 t, 2008 年总磷自净能力 125.5 t, 2010 年总磷自净能力 117.5 t, 平均为 116 t·a⁻¹, 竺山湖湖区试验得到的总氮自净能力为 119 t·a⁻¹, 数值模拟结果和试验结果吻合地较好。

3.3 太湖自净能力模拟

表 2 竺山湖营养盐自净能力计算值与小区试验值比较/t·a⁻¹

Table 2 Simulation results and experiment results of Zhushanhu/t·a⁻¹

指标	自净能力(计算值)				湖区试验
	2006 年	2008 年	2010 年	平均	
氮	1 853.0	1 981.7	1 898.9	1 911	1 979
磷	105.9	125.5	117.5	116	119

3.3.1 计算条件设置

2002 ~ 2010 年太湖入湖水量特征统计可得太

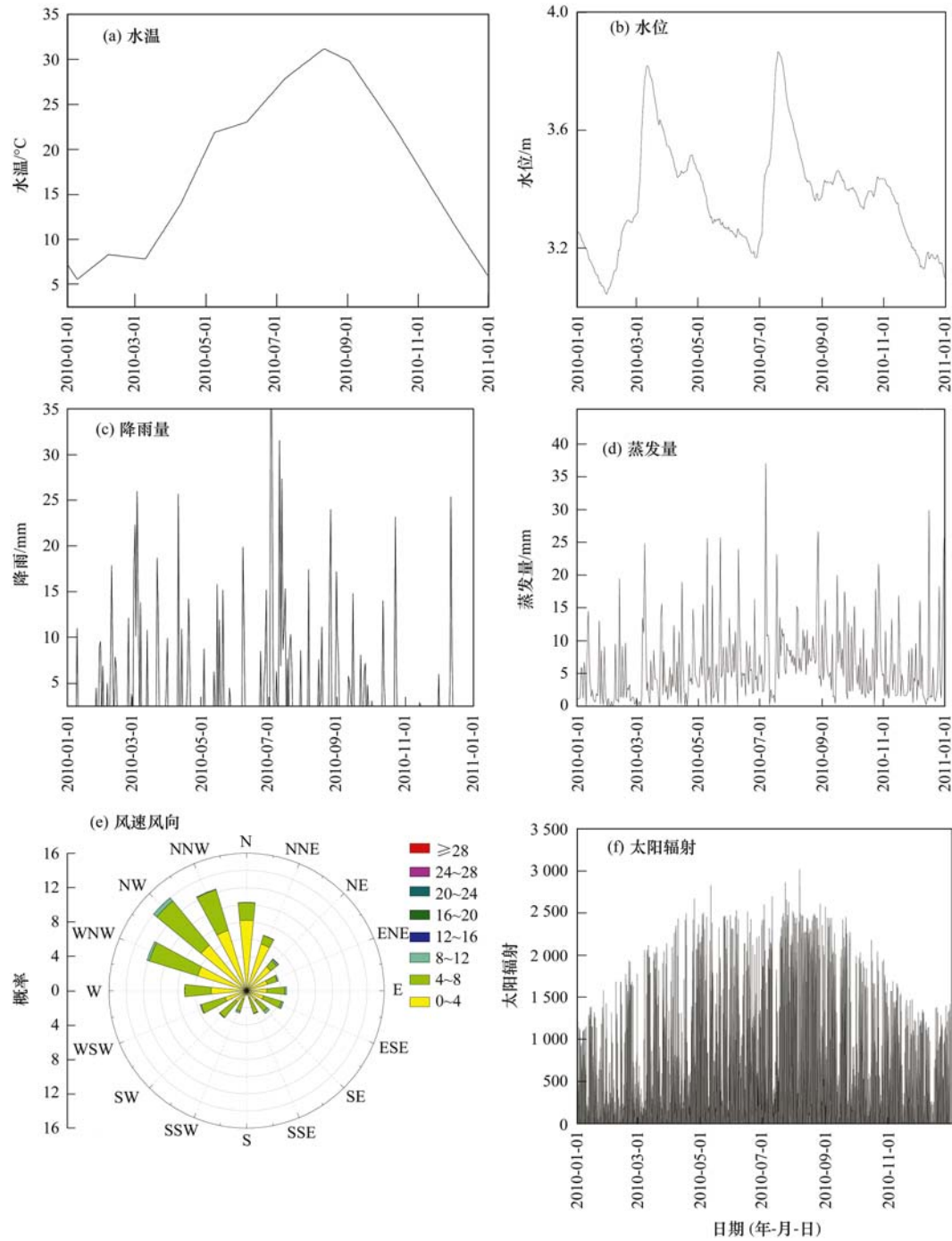


图 7 计算外部条件

Fig. 7 External simulation condition

湖入湖水量最大年为 2010 年,入湖水量 118.81 亿 m^3 ; 入湖水量最小年为 2006 年,入湖水量 73.85 亿 m^3 ; 2002 ~ 2010 年平均入湖水量为 95.43 亿 m^3 , 与之相近的是 2008 年,入湖水量为 98.5 亿 m^3 , 因此本文选择 2006、2008、2010 年作为太湖自净能力代表年计算. 计算条件中,河流入湖流量和水质等边界条件采用太湖局每月巡测资料,降雨量是根据太湖局提供的 8 个监测站点(包括大浦口、犊山口、西山、小梅口、夹浦、望亭立交、太浦闸上游和瓜泾口)的实测资料求平均所得,太湖湖面的风场资料是根据太湖局及太湖站 4 个测站(太湖站、大浦口、贡湖和平台山)的实测资料求平均所得. 太湖水位、水温以及太阳辐射资料采用太湖站观测资料,2010 计算外部条件见图 7.

3.3.2 太湖氮、磷自净能力计算结果

太湖氮、磷的自净能力可通过太湖生态模型中与氮、磷循环相关的过程计算得到,具体氮的自净过程为:①氨氮转化为沉水植物氮;②硝态氮转化为沉水植物氮;③碎屑氮的沉降;④鱼类固定的氮;⑤反硝化作用(脱氮作用);⑥沉水植物氮转化为鱼中氮.

太湖氮自净能力计算公式为:

$$M_N = F_{nh2sub} + F_{n32sub} + F_{ndet} + F_{nfish} + F_{n2air} - F_{nsub2fish} \quad (2)$$

式中, M_N 为太湖氮的自净能力, F_{nh2sub} 为氨氮转化为沉水植物氮的数量, F_{n32sub} 为硝酸盐氮转化为沉水植物氮的数量, F_{ndet} 为碎屑氮沉降到底泥沉积物的数量, F_{nfish} 为鱼类吸收藻类以及沉水植物氮的数量, F_{n2air} 为氮的反硝化作用脱氮数量, $F_{nsub2fish}$ 为沉水植物转化为鱼体内氮的数量, 由于鱼类固定的氮包含鱼类吸收沉水植物体内的氮, 而这部分氮已经在水体氮被沉水植物吸收时考虑, 为避免重复计算, 氮的自净能力需要扣除这部分数量. 太湖总氮自净能力计算结果见表 3.

表 3 太湖总氮自净能力计算成果/t

Table 3 Simulation results of the TN self-purification capacity of Lake Taihu/t

项目说明	2006 年	2008 年	2010 年
沉水植物吸收水体氨氮	667	636	682
沉水植物吸收水体硝酸盐氮	59	57	62
藻类及碎屑氮的沉降	37 028	39 627	37 955
鱼类固氮	2 039	2 136	2 234
硝态氮转化为氮气	357	382	365
扣除:沉水植物转化鱼类氮	150	151	153
太湖总氮自净能力小计	40 000	42 687	41 147

太湖磷的自净能力具体过程为:①水体溶解性磷被植物体吸收;②碎屑磷的沉降;③鱼类固定的磷;④沉水植物磷转化为鱼中磷,太湖磷自净能力计算公式为:

$$M_P = F_{p2sub} + F_{pdet} + F_{pfish} - F_{p2fish} \quad (3)$$

式中, M_P 为太湖的自净能力, F_{p2sub} 为水体溶解性磷转化为沉水植物磷的数量, F_{pdet} 为碎屑磷沉降到底泥沉积物的数量, F_{pfish} 为鱼类吸收藻类以及沉水植物磷的数量, F_{p2fish} 为沉水植物转化为鱼体内磷的数量, 由于鱼类固定的磷包含鱼类吸收沉水植物体内的磷, 而这部分磷已经在被沉水植物吸收时考虑, 为避免重复计算, 磷的自净能力需要扣除这部分数量. 太湖总磷自净能力计算结果见表 4.

表 4 太湖总磷自净能力计算成果/t

Table 4 Simulation results of the TP self-purification of Lake Taihu/t

项目说明	2006 年	2008 年	2010 年
沉水植物吸收水体磷	151	142	154
碎屑磷的沉降	1 294	1 535	1 436
鱼类固定的磷	142	145	147
扣除:沉水植物转化鱼类磷	21	24	25
总磷自净能力小计	1 566	1 798	1 712

4 讨论

2006、2008、2010 年总氮的自净能力分别为 4.0、4.3、4.1 万 t; 总磷的自净能力分别为 1 566、1 798、1 712 t, 根据太湖局相关资料, 2006 年太湖库容为 44.9 亿 m^3 , 2008 年太湖库容为 48.4 亿 m^3 , 2010 年太湖库容为 47.2 亿 m^3 , 3 a 自净能力大小与太湖库容大小相符, 说明太湖自净能力与太湖水体容量密切相关. 太湖氮、磷的自净能力主要通过碎屑沉降到底底, 碎屑主要来自于藻类死亡, 浮游动物死亡、浮游动物排泄、鱼类的死亡及排泄和陆源输入, 值得关注的是, 沉水植物净化量小于鱼类净化水质作用, 这主要是因为沉水植物目前仅分布在太湖的贡湖、东太湖、东部滨岸区以及湖心区, 而鱼类转化区域遍布整个太湖.

需要指出的是, 本研究计算中得出的氮素反硝化作用较小, 只有 300 t, 远小于陈小峰等^[18]得出的太湖氮的反硝化能力为 3 万 t 的量. 这是因为本研究主要考虑的太湖水体的净化能力, 而太湖水体是富氧环境, 反硝化作用很少在水体中发生, 太湖底泥存在厌氧环境, 适合反硝化反应发生, 按本研究的计算, 太湖水体每年沉降到底泥中的氮 3.8 万 t, 底泥净释放 6 000 t, 相当于底泥每年从水体中接受 3.2 万 t 氮, 如果底泥中反硝化去除为 2.97 万 t, 则底泥

每年沉积氮素为2 300 t,这也与文献[24~26]的结论太湖底泥沉积物年氮素2 100 t相接近,说明本研究的结果是可靠的。

5 结论

(1)根据质量平衡原理,通过竺山湖进出河道以及湾心、湾口水量、水质测量,弄清了竺山湖营养物质进出以及消纳规律。

(2)通过 EcoTaihu 模型模拟得到总氮自净能力平均为 $1\,911\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,总磷自净能力平均为 $116\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ 竺山湖湖区试验得到的总氮自净能力为 $1\,979\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,总磷自净能力为 $119\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$,数值模拟结果和湖区试验结果吻合地较好,证明了数值模拟的有效性。

(3)通过 EcoTaihu 模型得到 2006、2008、2010 年太湖总氮的自净能力分别为 4.0、4.3、4.1 万 t;总磷的自净能力分别为1 566、1 798、1 712 t,自净能力与太湖容量呈正相关关系。

参考文献:

- [1] 朱广伟. 太湖富营养化现状及原因分析[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(1): 21-26.
- [2] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 1-13.
- [3] 秦伯强, 王小冬, 汤祥明, 等. 太湖富营养化与蓝藻水华引起的饮用水危机——原因与对策[J]. 地球科学进展, 2007, **22**(9): 896-906.
- [4] Guo L. Doing battle with the green monster of Taihu Lake[J]. Science, 2007, **317**(5842): 1166-1166.
- [5] Yang M, Yu J, Li Z, *et al.* Taihu Lake not to blame for Wuxi's woes[J]. Science, 2008, **319**(5860): 158-158.
- [6] Vagnetti R, Miana P, Fabris M, *et al.* Self-purification ability of a resurgence stream[J]. Chemosphere, 2003, **52**(10): 1781-1795.
- [7] Ostroumov S A. On some issues of maintaining water quality and self-purification[J]. Water Resources, 2005, **32**(3): 337-346.
- [8] Ostroumov S A. On the biotic self-purification of aquatic ecosystems, Elements of the theory [J]. Doklady Biological Sciences, 2004, **39**(6): 206-211.
- [9] 任瑞丽, 刘茂松, 章杰明, 等. 过水性湖泊自净能力的动态变化[J]. 生态学杂志, 2007, **26**(8): 1222-1227.
- [10] 张晟, 郑坚, 刘婷婷, 等. 三峡水库入库支流水体中营养盐季节变化及输出[J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 58-63.
- [11] 王军良, 方志发. 城中湖水环境容量计算和对策研究[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(1): 129-132.
- [12] 王亚红, 劳国民, 黄志珍. 钱塘江流域水环境容量研究[J]. 水资源保护, 2008, **24**(1): 30-33.
- [13] 王晓昇. 梯级开发河流纳污能力分析计算[J]. 东北水利水电, 2007, **25**(11): 61-63.
- [14] 杨杰军, 王琳, 王成见, 等. 中国北方河流环境容量核算方法研究[J]. 水利学报, 2009, **40**(2): 194-199.
- [15] 张红举, 杨利芝. 感潮河流水环境容量计算——以太湖流域太浦河为例[J]. 水资源保护, 2009, **25**(6): 12-15.
- [16] 陈春华. 海口湾海域重金属自净能力研究[J]. 海洋学报, 1997, **19**(6): 77-83.
- [17] 许磊, 李华, 陈英旭, 等. 南太湖地区小型浅水湖泊自净能力季节变化研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(4): 924-930.
- [18] 陈小锋, 揣小明, 曾巾, 等. 太湖氮素出入湖通量与自净能力研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(7): 2309-2314.
- [19] 杨龙元, 秦伯强, 胡维平, 等. 太湖大气氮、磷营养元素干湿沉降率研究[J]. 海洋与湖沼, 2007, **38**(2): 104-110.
- [20] Hu W P, Jørgensen, S E, Zhang F B. A vertical-compressed three-dimensional ecological model in Lake Taihu, China[J]. Ecological Modelling, 2006, **190**(3-4): 367-398.
- [21] Hu W P, Jorgensen, S E, Zhang F B, *et al.* A model on the carbon cycling in Lake Taihu, China[J]. Ecological Modelling, 2011, **222**(16): 2973-2991.
- [22] Hu W P, Zhai S J, Zhu Z C, *et al.* Impacts of the Yangtze River water transfer on the restoration of Lake Taihu[J]. Ecological Engineering, 2008, **34**(1)30-49.
- [23] 韩红娟, 胡维平, 晋义泉. 风速变化对竹湖流场结构影响的数值试验[J]. 海洋与湖沼, 2008, **39**(6): 567-576.
- [24] 刘凌, 崔广柏, 王建中. 太湖底泥氮污染分布规律及生态风险[J]. 水利学报, 2005, **36**(8): 900-905.
- [25] 薛滨, 姚书春, 王苏民, 等. 长江中下游不同类型湖泊沉积物营养盐蓄积变化过程及其原因分析[J]. 第四纪研究, 2007, **27**(1): 122-127.
- [26] Sun S C, Zhang C. Nitrogen distribution in the lakes and lacustrine of China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, **57**(1): 23-31.

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM _{2.5} in Nanjing Region	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash	JI Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO ₂ in Aquatic System	CHEN Jin-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO ₂ Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu ²⁺ Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO ₂ Leakage by High-throughput Sequencing Technology	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行