

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.10

第40卷 第10期

目次

京津冀区域重污染期间 PM _{2.5} 垂直分布及输送·····	肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐遵, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文 (4303)
肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析·····	常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平 (4310)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析·····	衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰 (4319)
沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 排放因子及碳组分源谱·····	赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏 (4330)
城市生活垃圾露天焚烧排放 PM _{2.5} 中重金属污染特征及其暴露健康风险·····	程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜 (4337)
某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估·····	王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽 (4345)
南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制·····	邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟 (4355)
广州地区大气棕色碳气溶胶吸收特性·····	李铸杰, 谭浩波, 郑军 (4364)
郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析·····	张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹 (4372)
基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数·····	梁小明, 陈来国, 孙西勃, 赵伟, 卢清, 孙家仁, 陈朋龙, 叶代启 (4382)
北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱·····	方莉, 刘明文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊 (4395)
民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响·····	卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军 (4404)
利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性·····	王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波 (4412)
镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能·····	魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强 (4423)
长江源区大气降水化学特征及离子来源·····	汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森 (4431)
连续极端降雨对东江流域水质影响分析·····	车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷, 黄志伟 (4440)
基于湖泊与出入湖水水质关联性研究:以鄱阳湖为例·····	黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞 (4450)
金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征·····	刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧 (4461)
太湖不同介质电导率时空变化特征·····	王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛 (4469)
大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析·····	施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫 (4478)
基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析·····	李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博 (4487)
草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价·····	张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才 (4497)
太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律·····	祁闯, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥 (4505)
淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系·····	杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮 (4513)
岩溶区不同土地利用下地下水碳同位素地球化学特征及生态意义·····	任坤, 潘晓东, 曾洁, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏 (4523)
岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应·····	杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维 (4532)
巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析·····	唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇 (4543)
δ-MnO ₂ /沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮·····	马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠 (4553)
不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果·····	熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌 (4562)
不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化·····	刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志 (4569)
启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水·····	吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳 (4578)
聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析·····	孙事昊, 贾沛沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮 (4585)
典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素·····	冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江 (4594)
5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素·····	何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4604)
Cu ²⁺ 和 Pb ²⁺ 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用·····	卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺 (4611)
滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价·····	洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞 (4620)
贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价·····	唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰 (4628)
渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术·····	李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强 (4637)
不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选·····	陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃 (4647)
小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运·····	王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉 (4654)
微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响·····	廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟 (4661)
药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制·····	肖亮亮, 丁园 (4668)
磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征·····	张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明 (4678)
生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征·····	黄福义, 周曙仡聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张炯 (4685)
有机肥施用对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响·····	邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽 (4691)
灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响·····	周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明 (4700)
柑橘/大蒜盖套作下土壤 CO ₂ 排放及其效率对秸秆还田量的响应·····	游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体 (4708)
增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响·····	张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华 (4718)
O ₃ 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟·····	徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒 (4725)
2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征·····	潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群 (4733)
《环境科学》征订启事 (4394) 《环境科学》征稿简则 (4449) 信息 (4584, 4593, 4653)	

大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析

施媛媛^{1,2}, 李一平^{1,2*}, 程月^{1,2}, 程一鑫^{1,2}

(1. 河海大学环境学院, 南京 210098; 2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098)

摘要:以太湖作为大型浅水湖泊的代表, 以 EFDC 模型为基础建立关于磷的沉积成岩模型, 运用拉丁超立方抽样方法、普适似然不确定性分析方法和区域敏感性分析方法, 对成岩模块中与磷迁移转化有关的 16 个参数进行敏感性分析。结果表明, 太湖全湖区磷酸盐和总磷的时间空间分布都极不均匀, 成岩模块参数的不确定性在磷酸盐和总磷的模拟方面都存在强烈影响。以上覆水磷酸盐为输出目标, “沉积物-水”界面遭受的风浪扰动在水深相对更浅的湖区更为直接, 湖湾区水的流通性较差, 利于沉积物中溶解态磷释放。以上覆水总磷为输出目标, 湖心区颗粒态磷和溶解态有机磷的质量浓度受成岩模块参数不确定性的影响较大。敏感参数主要是动力特性与和氧相关的两类参数。对于大型浅水湖泊, 底泥沉积成岩模块敏感参数的重要性不弱于水动力、水质模块, 针对不同水质、底泥分布的水域, 模拟磷元素时应注重敏感参数的取值率定。

关键词:太湖; 普适似然不确定性分析方法 (GLUE); 区域敏感性分析方法 (RSA); 磷; EFDC 模型; 沉积成岩

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4478-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201903110

Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes

SHI Yuan-yuan^{1,2}, LI Yi-ping^{1,2*}, CHENG Yue^{1,2}, CHENG Yi-xin^{1,2}

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Lake Taihu was chosen as a typical large shallow lake, and a diagenesis model of phosphorus was established based on environmental fluid dynamic code (EFDC). The uncertainty of the simulation results and the sensitivity of 16 parameters related to phosphorus migration and transformation in the diagenesis model were analyzed using Latin hypercube sampling (LHS), generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE), and regionalized sensitivity analysis (RSA). The results showed that the temporal and spatial distribution of phosphate and total phosphorus in Lake Taihu was extremely uneven. Furthermore, the uncertainty of the diagenesis model had a strong influence on the simulation of phosphate and total phosphorus. For phosphate in the overlying, wind and wave disturbance at the ‘sediment-water’ interface was stronger in shallower water regions. The circulation of water in the bay area, where the dissolved oxygen content was low, was poor, which was conducive to the release of dissolved phosphorus in the sediment. For total phosphorus in the overlying water, the granular phosphorus and dissolved organic phosphorus contents in the central lake area were greatly affected by parameter uncertainties in the diagenesis model. The sensitive parameters mainly consisted of two kinds related to oxygen and dynamic characteristics, respectively. For large shallow lakes, the importance of parameter sensitivity in diagenesis models is no less than for hydrodynamic and water quality models. For large shallow lakes, the calibration of sensitive parameters should, therefore, be given attention when simulating the phosphorus content of areas with complicated water quality and sediment distributions.

Key words: Lake Taihu; generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE); regionalized sensitivity analysis (RSA); phosphorus; EFDC model; diagenesis

湖泊是一种能够反映周围环境变化的生态系统, 其中沉积物的形成更是“记录”了区域生态的演变^[1]。深水湖泊中磷元素的累积效应显著^[2], 而在大型浅水湖泊中, 含磷物质在“沉积物-水”界面进行迁移转化, 溶解态磷因吸附/解吸作用受沉积物起悬沉降影响显著。浅水环境下底泥磷元素与藻类分布相关^[3], 不同形态磷元素的输移特性是影响浅水湖泊水生态系统的关健^[4, 5]。

成岩作用的研究主要集中在地质矿物学或是深海领域^[6, 7], 涉及水域沉积物机理方面还不够成熟。Paraska 等^[8]总结并分类了 83 种涉及沉积物成岩模拟的模型变量、参数化和应用。之前的研究往往将营养盐内源释放速率设定为全局定值或是分区

设值, 造成不合理的“时空均匀性”。沉积物沉积成岩过程与水下复杂的地形、底泥物化特性等密切相关。但国内运用模型探究湖泊内源释放的案例不多, 更鲜有模型不确定性和参数敏感性方面的研究。

太湖是典型的藻-草混合型大型浅水湖泊, 梅梁湾和竺山湾等水域藻群生长茂盛, 水下低氧促进

收稿日期: 2019-03-13; 修订日期: 2019-04-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0405203, 2016YFC0401703); 中央高校建设世界一流大学 (学科) 和特色发展引导专项; 中央高校基本科研业务费专项 (2018B48214, 2017B20514, 2018B48214); 国家自然科学基金项目 (51779072, 51579071)

作者简介: 施媛媛 (1994 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境模拟与预测, E-mail: 1169211871@qq.com

* 通信作者, E-mail: liyiping@ hhu. edu. cn

沉积物营养盐释放^[9];而东太湖则是典型的草型浅水湖区,水质和生态环境较为良好^[10].太湖沉积物中磷赋存远高于上覆水,造成底泥释放风险较高,且氮磷的内源贡献分别为外源年输入量的2~6倍^[11].太湖的底泥主要分布在西部和东南部,沉积物营养盐主要集中在竺山湾、梅梁湾和东太湖.

本文以太湖为例,依据沉积成岩(diagenesis)理论构建以EFDC(environmental fluid dynamic code)模型为基础的太湖磷模型,选取上覆水的磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)和总磷(TP)为输出目标.采用拉丁超立方抽样方法(Latin hypercube sampling, LHS)对参数进行随机抽样,并选用普适似然不确定性分析方法(generalized likelihood uncertainty estimation, GLUE)和区域敏感性分析方法(regionalized sensitivity analysis, RSA)对模拟结果进行不确定性分析和参数敏感性分析.本研究结果能够从参数角度识别浅水湖泊内源释放的关键因素,帮助对比分析类似于太湖的大型浅水湖泊成岩模块的敏感参数,根据湖区特点提出参数调整的优先级,以期选取较优、较符合实际的浅水湖泊磷模型参数提供参考.

1 研究区域

太湖($30^{\circ}05'\sim 32^{\circ}08'\text{N}$, $119^{\circ}08'\sim 122^{\circ}55'\text{E}$)是中国第三大浅水湖泊,总面积2338 km²,平均水深1.9 m,最大水深为2.6 m,具有“面大水深浅”的特点(图1).太湖流域夏季主导风向是东南风,冬季主导风向是西北风,平均风速3.5~5.0 m·s⁻¹.太湖底部坡度为0°0'19.66",周边水系复杂,本研究将环湖河道概化为30条河^[12],整个水域被划分为8个湖区.由于水动力条件较弱,营养盐质量浓度较高,因此太湖在夏、秋季节常暴发藻类水华,并且存在着较大的空间差异性,其中竺山湾和梅梁湾最为严重,藻类最多,东部沿岸区最少^[13].

2 研究方法

2.1 沉积物沉积成岩模型概况

早期的成岩作用主要探索表层沉积物的物理、化学和生物动力学,在于了解营养盐、氧和碳的循环路径.埋藏、生物扰动、压实以及流体和有机物之间化学反应等一系列的综合效应统称为成岩作用.沉积物沉积成岩模型描述了控制沉积物中营养盐循环的沉积物转化过程.这些模型可用于评估沉积物对外部营养负荷变化的响应,以及预测沉积物-水界面的营养盐通量,物质的迁移过程和反应路径都被参数化,这有助于理解水体底泥区域的各种反应^[8],但使模型复杂化.

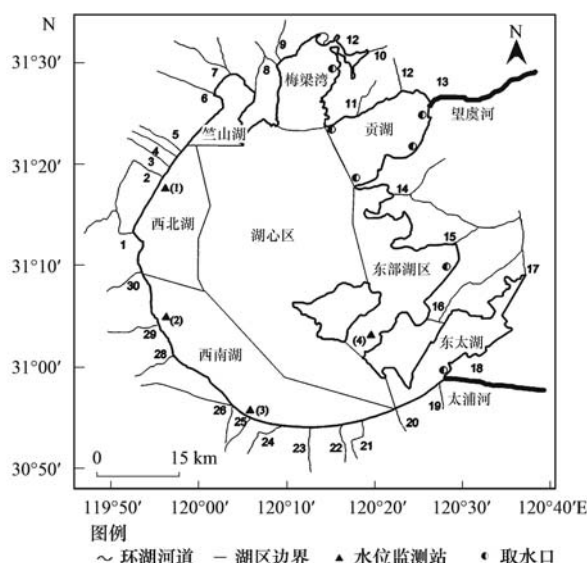


图1 研究区域地形及湖区划分示意

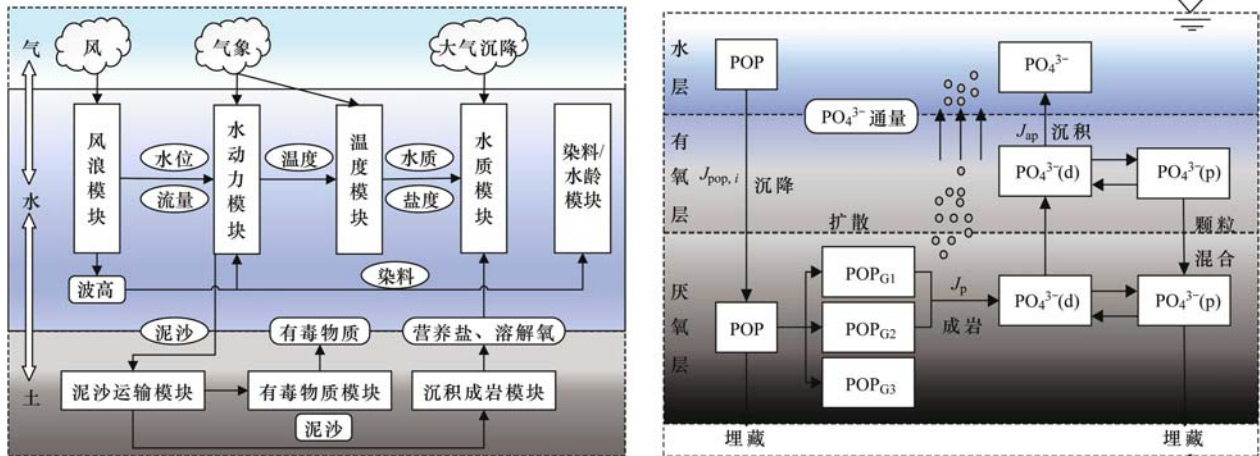
Fig. 1 Topography and division of the study areas

当前被广泛认可的沉积成岩模型框架为两层均匀结构,模型变量及动态过程的主要特征是,①三类通量:颗粒物质自上覆水向底床的沉降通量(depositional flux)、底床颗粒物质衰变产生的成岩通量(diagenesis flux)和溶解态物质自底床返回上覆水的沉积通量(sediment flux);②两层结构:上层很薄,通常有氧(aerobic),下层始终厌氧(anaerobic);③有机物3G分类:颗粒态有机物依据半衰期速率分为3类(G1:约20 d;G2:约360 d;G3:不衰变).

本研究选取国内外常用的EFDC模型来模拟太湖磷模型的水动力、水质及沉积物沉积成岩过程(图2).EFDC模型包含水动力、水质、温度、泥沙、风浪、有毒物质和沉积物等多个模块,其中沉积成岩模块内含在水质模块中,包含两层结构(有氧、厌氧)共27个变量,能够完整地模拟沉积物中营养盐的物理、化学和生物过程,并为上覆水提供连续变化的释放速率.

2.2 太湖磷模型构建

太湖磷模型水平方向采用笛卡尔直角坐标系,划分为4465个750 m×750 m的方形网格,垂直方向采用 σ 坐标,划分为3层.模型湖底坡度小于0.33,避免了 σ 坐标带来的压力梯度误差.以大气、风速风向、出入湖流量、水质、沉积物作为模型的边界条件输入.降雨量数据来自太湖附近8个监测站,大气条件和风场采用中国科学院南京地理与湖泊研究所太湖湖泊生态系统国家野外观测研究站的数据.模拟初始日期为1月1日,假设初始水位为水平,设置为模拟时段第1 d的平均值,初始流速设为0 m·s⁻¹.模型计算时间为365 d,时间步



POP_{G1}、POP_{G2}、POP_{G3}表示颗粒态有机磷依据半衰期速率分成的3类, $J_{\text{pop},i}$ 表示第*i*类颗粒态有机磷的沉降通量, J_p 表示颗粒有机磷的成岩通量, J_{ap} 表示溶解态磷酸盐的沉积通量, $\text{PO}_4^{3-}(\text{d})$ 表示溶解态磷酸盐, $\text{PO}_4^{3-}(\text{p})$ 表示颗粒态磷酸盐

图2 EFDC模型框架及磷循环过程

Fig. 2 EFDC model framework and phosphorus cycle

长 10 s. 模型参数的设置已得到率定验证^[14].

2.3 分析方法

经过鲁棒性检验, 将 LHS 随机抽样生产的 200 组参数组合, 代入 EFDC 模型运行 200 次. 以磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)和上覆水总磷(TP)为输出目标, 去明确对输出结果不会产生明显影响以及基于模型基本假定选用的参数, 选取下层(第二层)固体颗粒质量浓度($r\text{M2}$)、孔隙水扩散系数(D_d)和颗粒物混合

表面扩散系数(D_p)等 16 个主要参数进行不确定性和敏感性研究. 参考文献[15], 假定各个参数符合均匀分布, 且参数之间取值相互独立, 模型参数、意义及其取值范围见表 1. 采用普适似然不确定性分析方法(GLUE)和区域敏感性分析方法(RSA)来分析参数的敏感性. 似然判据采用 Nash-Sturcillfe 确定性系数^[14], 分别选取 97.5% 和 2.5% 作为 95% 置信区间的上下边界分位点.

表1 模型输入参数抽样取值范围

Table 1 Sampling range of model input parameters

序号	参数	参数意义	单位	最小值	最大值
1	rM2	下层(第二层)固体颗粒质量浓度	$\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.25	0.75
2	D_d	孔隙水扩散系数	$\text{m}^2\cdot\text{d}^{-1}$	0.000 06	0.000 864
3	D_p	颗粒物混合表面扩散系数	$\text{m}^2\cdot\text{d}^{-1}$	0.000 001	0.000 06
4	$\text{Th}D_d$	D_d 的温度调整常数	—	1.05	1.15
5	$\text{Th}D_p$	D_p 的温度调整常数	—	1.07	1.117
6	P2PO4	厌氧条件下 PO_4^{3-} 分配系数	$\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$	50	100/150
7	DOcPO4	PO_4^{3-} 吸附临界溶解氧值	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1	3
8	K_{MDp}	氧颗粒物混合半饱和和常数	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2	6
9	K_{ST}	累积底栖压力的一阶衰减速率	d^{-1}	0.015	0.045
10	K_{POP1}	G1 类 POP 在 20℃ 的衰减速率	d^{-1}	0.019	0.066
11	K_{POP2}	G2 类 POP 在 20℃ 的衰减速率	d^{-1}	0.001 2	0.008 8
12	$\text{Th}K_{\text{P1}}$	K_{POP1} 温度调节常数	—	1.052	1.166
13	$\text{Th}K_{\text{P2}}$	K_{POP2} 温度调节常数	—	1.052	1.166
14	H_{sed}	成岩沉积物厚度	m	0.05	0.15
15	W_2	沉积物覆盖速率	$\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$	0.02	1
16	DP1PO4	PO_4^{3-} 吸附加强因子	—	100	300/400

3 结果与分析

3.1 磷酸盐模拟结果的不确定性

以上覆水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 为输出目标, 8 个湖区对应的置信度为 95% 的不确定性区间如图 3 所示. 2.5% 边界下, 8 个湖区 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 全年质量浓度

($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 分别为: 0.06 ± 0.12 (梅梁湾)、 0.02 ± 0.08 (竺山湾)、 0.09 ± 0.35 (贡湖)、 0.09 ± 0.30 (东太湖)、 0.18 ± 0.30 (湖心区)、 0.13 ± 0.45 (东部湖区)、 0.09 ± 0.30 (西北湖) 和 0.13 ± 0.50 (西南湖); 97.5% 边界下, 8 个湖区 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 全年质量浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 分别为: 0.23 ± 0.26 (梅梁湾)、 0.01

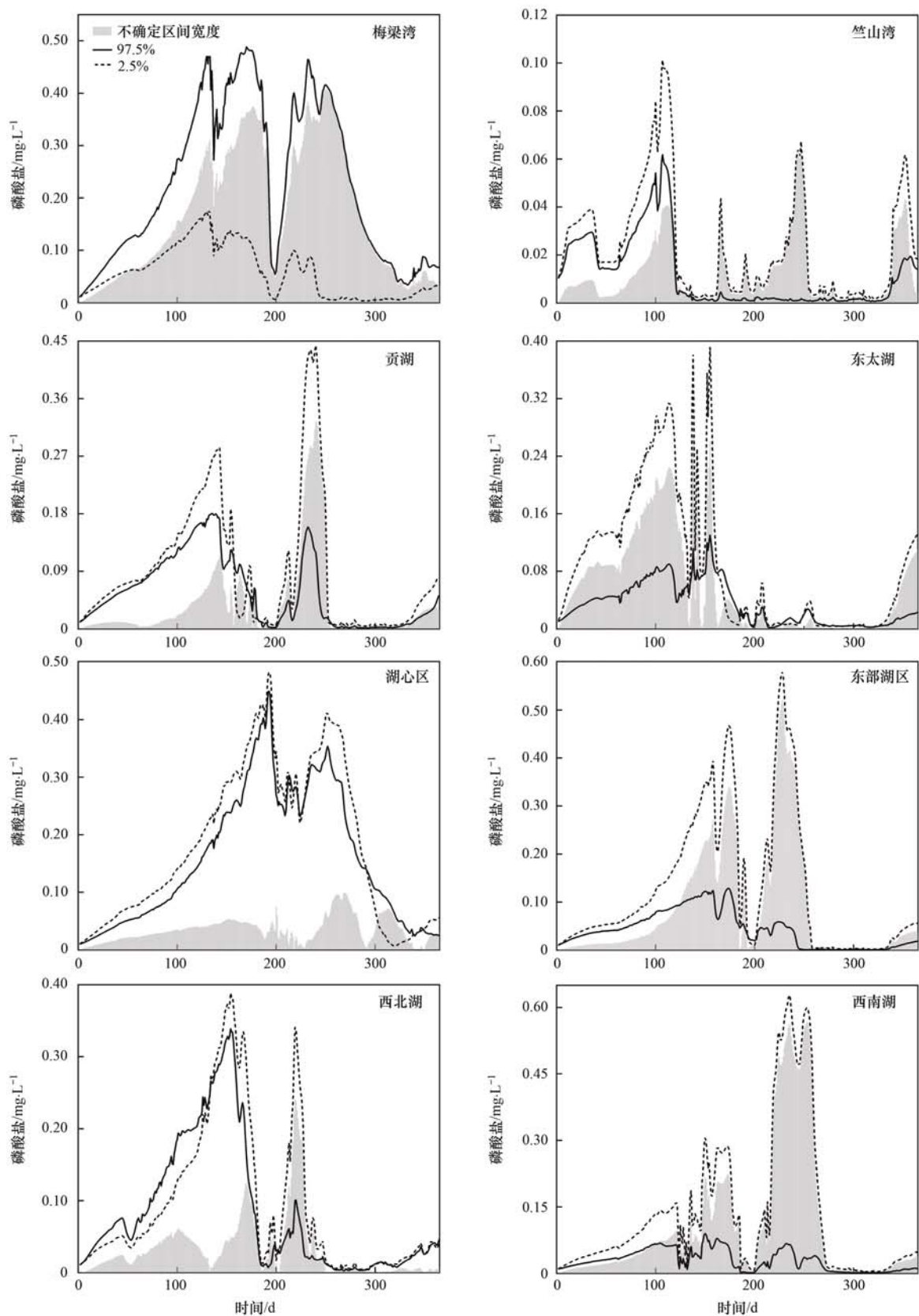


图3 磷酸盐模拟结果95%置信区间

Fig. 3 Uncertainty interval of phosphate in eight subareas

± 0.05 (竺山湾)、 0.06 ± 0.12 (贡湖)、 0.03 ± 0.10 (东太湖)、 0.16 ± 0.29 (湖心区)、 0.04 ± 0.09 (东部湖区)、 0.08 ± 0.26 (西北湖) 和 0.03 ± 0.06 (西南湖)；定义 2.5% 与 97.5% 上下边界间质量浓度

差的绝对值为不确定区间宽度，各湖区全年 PO_4^{3-} -P 模拟结果的不确定区间宽度最大值比较结果为：西南湖 ($0.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 东部湖区 ($0.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 梅梁湾 ($0.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 贡湖 ($0.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) >

东太湖($0.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 西北湖($0.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 湖心区($0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 竺山湾($0.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

结果表明太湖全湖区 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的时间空间分布极不均匀,成岩模块参数的不确定性在 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的模拟方面存在强烈影响。其中,西南湖和东部湖区的不确定区间宽度显著较高,西南湖主要与湖岸衔接,轮廓方向与主导风向东南风一致,受风生流影响较大,东部湖区岸线复杂,同时受到沿岸入流与湖流影响,两湖区水深较其他水域更浅,“沉积物-水”界面遭受的风浪扰动更为直接。其次,梅梁湾、贡湖、东太湖等湖区都处于湖湾区,水的流通性较差,溶解氧质量浓度较低,更利于沉积物中溶解态磷的释放,而溶解态磷在“沉积物-水”界面的交换正是磷循环迁移转化机制中的关键过程^[16]。湖心区的不确定性最小,此水域水深最大,远离湖岸,沉积物不易受到边界河道的入流冲击,以及风浪扰动较小,所以此区域成岩过程对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的转化影响最小。 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 模拟结果的不确定性在质量浓度峰值处达到最大,说明水体本身的物质量是影响沉积物成岩的重要因素,反映浓度梯度是内源释放的驱动力之一。

3.2 总磷模拟结果的不确定性

以上覆水 TP 为输出目标,8 个湖区对应的置信度为 95% 的不确定性区间如图 4 所示。2.5% 边界下,8 个湖区 TP 全年质量浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)分别为: 0.24 ± 0.17 (梅梁湾)、 0.19 ± 0.14 (竺山湾)、 0.24 ± 0.21 (贡湖)、 0.18 ± 0.14 (东太湖)、 0.39 ± 0.48 (湖心区)、 0.24 ± 0.38 (东部湖区)、 0.19 ± 0.16 (西北湖)和 0.23 ± 0.36 (西南湖);97.5% 边界下,8 个湖区 TP 全年质量浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)分别为: 0.19 ± 0.14 (梅梁湾)、 0.08 ± 0.06 (竺山湾)、 0.09 ± 0.07 (贡湖)、 0.06 ± 0.08 (东太湖)、 0.08 ± 0.07 (湖心区)、 0.08 ± 0.07 (东部湖区)、 0.09 ± 0.06 (西北湖)和 0.08 ± 0.07 (西南湖);各湖区全年 TP 模拟结果的不确定区间宽度最大值比较结果为:湖心区($0.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 东部湖区($0.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 西南湖($0.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 贡湖($0.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 西北湖($0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 竺山湾($0.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 东太湖($0.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) > 梅梁湾($0.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

EFDC 可以模拟难降解颗粒态有机磷(RPOP)、易降解颗粒态有机磷(LPOP)、溶解态有机磷(DOP)和总磷酸盐(total phosphate)这 4 种形态的磷。比较 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 TP 的模拟结果,能够间接反映颗粒态和溶解态有机磷的变化。相较于 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的模拟结果,梅梁湾、东太湖水域 TP 的不确定性却明显减弱,藻型和草型湖区的主导态磷分别为有机

磷和颗粒态磷^[17],表明有机磷和颗粒态磷在两类湖区受成岩模块参数不确定性的影响都较小。而湖心区 TP 的不确定性显著增强,这说明湖心区颗粒态磷和溶解态有机磷的质量浓度受成岩模块参数不确定性的影响较大。湖心区水深最大,水生植物分布少,受到的外界干扰弱,所以颗粒态磷和溶解态有机磷在湖心区更易受季节性温度影响,在藻类生长的旺盛期,掉落的植物叶片、腐败的藻群随水流汇聚于此,增加了湖心区的颗粒态磷和溶解态有机磷,底泥表层的覆盖物又能有效保护底泥,遏制沉积物中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 释放。

3.3 参数敏感性

针对 200 组参数组合使用定义的似然判据计算每一组参数组合对应的似然值,将似然值按大小分为 10 组后得到在参数取值区间上的累计似然函数,通过各个累计似然函数的最大偏离度计算参数敏感性指数。16 个参数在 8 个湖区的敏感指数如图 5。

根据参数特性,16 个敏感参数可以分为动力参数($rM2$ 、 D_d 、 D_p 、 K_{ST} 、 H_{sed} 、 W_2)、氧相关参数($DOcPO4$ 、 K_{MDp})、温度参数(ThD_d 、 ThD_p 、 ThK_{P1} 、 ThK_{P2})以及其他与磷有关的特定参数($P2PO4$ 、 K_{POp1} 、 K_{POp2} 、 $DP1PO4$)。水体中动力参数直接影响环流、水生生物生存迁移,所以沉积物中动力参数的敏感性同样不可小觑;沉积物需氧量(SOD)对浅水环境的水生态系统的稳定起到关键作用^[18],所以氧相关参数也需要重点关注。

针对太湖的不同湖区和不同模拟对象,参数敏感性程度差异较大。根据各个湖区模拟磷酸盐和总磷反映出的前 5 个敏感参数进行敏感性排序(表 2)分析结果,动力参数如下层(第二层)固体质量浓度($rM2$)、孔隙水扩散系数(D_d)、颗粒物混合表面扩散系数(D_p)在多数湖区都属于比较敏感的参数,这说明在任何水土环境中,一旦有与推动物质扩散相关的参数参与模拟,水体中的磷质量浓度将受到较大影响,直接反映了沉积物释放效应的不可忽视性。

和氧相关的参数,比如厌氧条件下(第二层) PO_4^{3-} 分配系数($P2PO4$)、 PO_4^{3-} 吸附临界溶解氧值($DOcPO4$)、氧颗粒物混合半饱和常数(K_{MDp})这一类属于次要敏感的参数,磷元素各形态之间的转化与溶解氧的存在密不可分^[19]。一方面,氧化还原环境直接影响与 Fe、Al、Ca 等金属离子与磷酸盐的结合,厌氧环境促进底泥中难溶性磷酸盐沉积物的溶解,解吸出的磷酸盐随间隙水回归至上覆水体,然而底泥的有氧层使铁离子始终处于氧化状态,与磷酸盐的结合更加紧密,所以有氧层成为了阻滞下

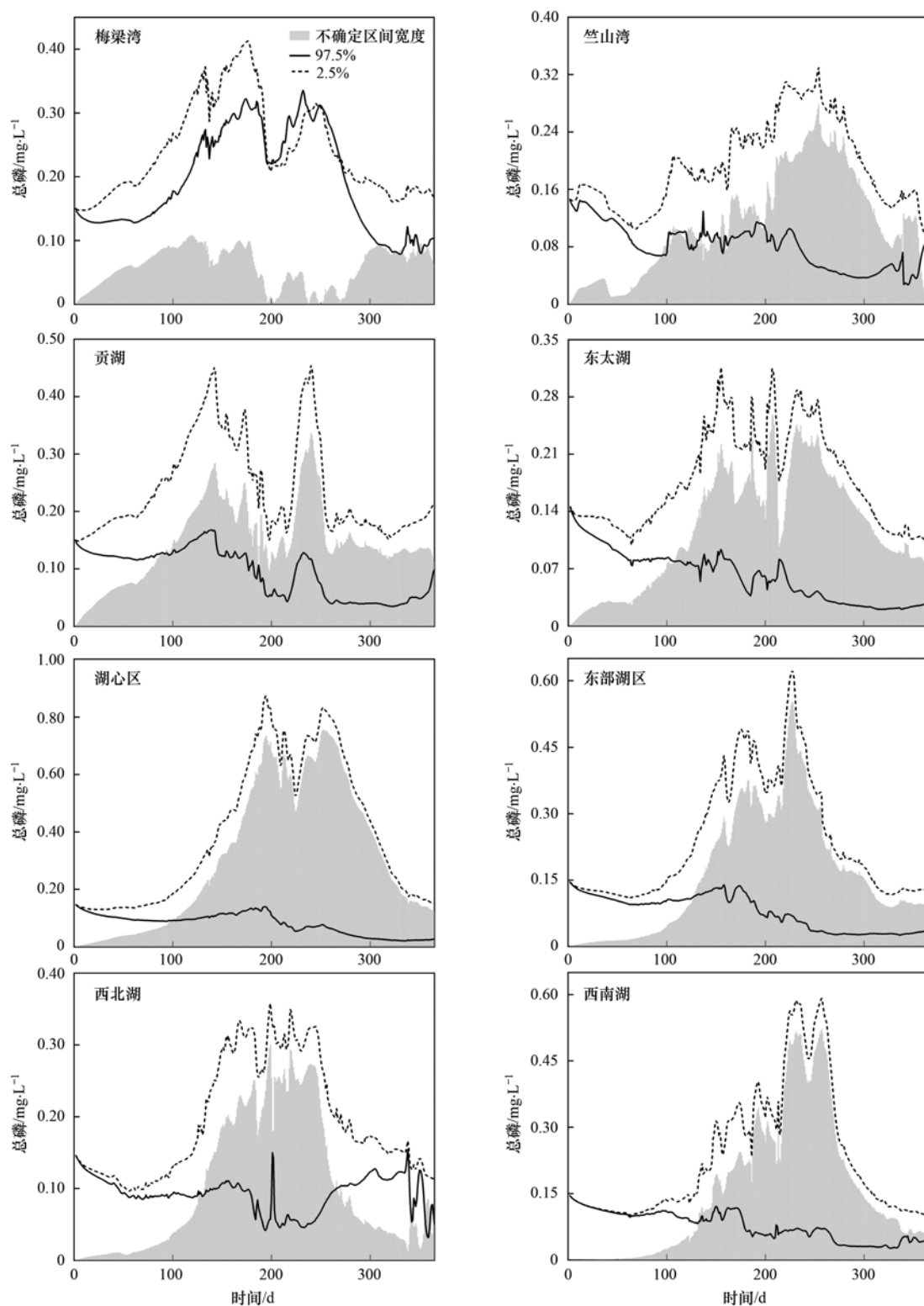


图4 总磷模拟结果 95%置信区间

Fig. 4 Uncertainty interval of total phosphorus in eight subareas

层厌氧层磷酸盐释放的“保护膜”;另一方面,底栖生物的生理代谢活动、底泥的毒理特性等与氧环境密不可分,生物活性的变化也间接影响微生物对磷的吸收^[20].相较于氮而言,水土界面的氧化还原环境变化对磷循环的影响更为突出^[21].

除此之外,关于温度的4个参数,即孔隙水扩

散系数的温度调整常数(ThD_d)、颗粒物混合表面扩散系数的温度调整常数(ThD_p)、 K_{POPI} 温度调节常数(ThK_{PI})和 K_{POPI} 温度调节常数(ThK_{PI})在湖心、东部、西北以及西南湖尤为敏感,这4个湖区的富营养化程度偏低,藻类生长和微生物活性都较弱,所以大部分氮磷营养盐淤积在湖底,尤其是表层底

泥,在水土两相浓度梯度无法成为物质扩散主要驱动力的情况下,温度对于物理特性的改变就尤为重要. G1 类 POP 在 20℃ 的衰减速率(K_{POP1})、G2 类 POP 在 20℃ 的衰减速率(K_{POP2})和 PO_4^{3-} 吸附加强因子(DP1PO4)等参数都属于成岩模块中属于磷的特有参数,所以在磷的模拟过程中对于水域空间差异的响应较弱.

太湖的底泥分布和营养盐释放规律与水体本身的水动力水质情况一样复杂,对于类似的大型浅水湖泊,从沉积物中释放的磷是不可忽视的营养内源,从水环境长期演变的角度考虑,底泥沉积成岩模块敏感参数的重要性不弱于水动力、水质模块,所以针对不同水质、底泥分布的水域,模拟磷元素时应注重这些敏感参数的取值率定.

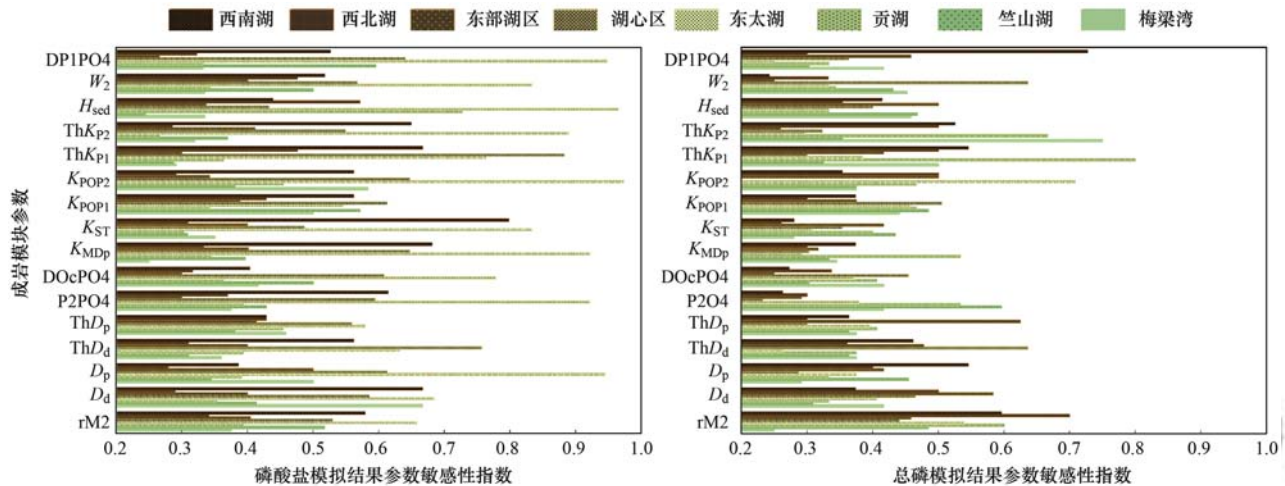


图 5 磷酸盐和总磷模拟参数敏感性指数
Fig. 5 Sensitivity indices in the simulation of phosphate and total phosphorus

表 2 参数敏感性排序(前五)
Table 2 Sensitivity ranks (top five) of the model parameters

项目	排序	梅梁湾	竺山湖	贡湖	东太湖	湖心区	东部湖区	西北湖	西南湖
磷酸盐	1	D_d	DP1PO4	H_{sed}	K_{POP2}	ThK_{P1}	D_p	H_{sed}	K_{ST}
	2	K_{POP2}	K_{POP1}	K_{POP2}	H_{sed}	ThD_d	ThD_p	W_2	K_{MDp}
	3	D_p	rM2	ThD_p	DP1PO4	K_{POP2}	ThK_{P2}	ThK_{P1}	ThK_{P1}
	4	K_{POP1}	DOcPO4	rM2	D_p	K_{MDp}	rM2	ThD_p	D_d
	5	ThD_p	W_2	P2PO4	P2PO4	DP1PO4	K_{MDp}	K_{POP1}	ThK_{P2}
总磷	1	ThK_{P2}	P2PO4	ThK_{P1}	K_{POP2}	W_2	ThD_p	rM2	DP1PO4
	2	ThK_{P1}	K_{POP1}	ThK_{P2}	rM2	ThD_d	D_d	D_d	rM2
	3	H_{sed}	rM2	rM2	K_{POP1}	K_{POP1}	H_{sed}	K_{POP2}	ThK_{P1}
	4	W_2	H_{sed}	P2PO4	D_d	D_d	K_{POP2}	ThK_{P1}	D_p
	5	K_{POP1}	D_p	K_{MDp}	ThD_p	DOcPO4	ThD_d	ThK_{P2}	ThK_{P2}

4 讨论

关于大型浅水湖泊(太湖)模型不确定性和敏感性分析,早期已经从水动力外部输入条件、水动力模块参数以及水质模块参数等方面进行了深入研究^[12, 14, 22].

对于外部输入条件,初始水位、边界流量对水体交换贡献较大,但磷一旦进入水体便难以通过换水去除,水生生物吸收排泄、颗粒吸附沉降才是磷循环的重要环节;风场主要影响湖区内部的水体流动,风场引起的环流既是影响蓝藻水华形成及其时空分布的重要物理因素^[23],也是生物栖息场所迁移、颗粒物沉降起悬过程的主导驱动力,同时风向

波向、风速波频高度一致^[24],波浪的卷携作用是造成底泥磷释放的重要外力,所以风场能对磷的沉积成岩过程产生间接影响.

水动力模块中,风场、地形参数依旧占决定性影响,与紊动直接相关的参数反而影响较小,原因在于“面大”和“水浅”环境下水体垂向运动受到的外界约束更为强烈,不同于深水湖泊中底泥处于一个相对“安全稳定”的位置,磷释放主要取决于温度、pH 值和氧化还原环境等^[25].

水质模块中藻类生长参数是整个藻类生长-代谢-牧食-沉降生命周期中最敏感的一类,其中光照、温度是藻类生长的限制性因子,在无外界条件的干扰下,藻类生长促进营养盐的富集被吸收,所以在

特定时段,相较于草型湖区,藻类生长茂密的水域中营养盐赋存量反而更低,但代谢、死亡过程又将底泥变为营养盐的下一步归宿,这意味着沉积物-水两相间的营养盐浓度梯度会成为加速释放过程的巨大隐患,因此这是个难以解决的“恶性循环”问题。

成岩模块和水质模块相似,不确定性的时空差异性显著,参数的敏感程度也非固定不变,不能忽视低营养盐质量浓度湖区的潜在隐患。各模块间环环相扣,能作为补充解释的依据。

5 结论

(1)太湖全湖区磷酸盐和总磷的时间空间分布都极不均匀,成岩模块参数的不确定性在磷酸盐和总磷的模拟方面都存在强烈影响。以上覆水磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)为输出目标,在水深相对更浅的湖区,“沉积物-水”界面遭受的风浪扰动更为直接,湖湾区水的流通性较差,利于沉积物中溶解态磷的释放。以上覆水总磷(TP)为输出目标,湖心区颗粒态磷和溶解态有机磷的质量浓度受成岩模块参数不确定性的影响较大。磷酸盐和总磷模拟结果的不确定性在质量浓度峰值处达到最大。

(2)参数敏感性方面,动力参数如下层(第二层)固体质量浓度(rM_2)、孔隙水扩散系数(D_d)和颗粒物混合表面扩散系数(D_p)在多数湖区都比较敏感;与氧相关的参数,比如厌氧条件下(第二层) PO_4^{3-} 分配系数(P2PO4)、 PO_4^{3-} 吸附临界溶解氧值(DOcPO4)和氧颗粒物混合半饱和常数(K_{MDp})这一类属于次要敏感的参数。

(3)对于大型浅水湖泊,从沉积物中释放的磷是不可忽视的营养内源,沉积成岩模块敏感参数的重要性不弱于水动力、水质模块,针对不同水质、底泥分布的水域,模拟磷元素时应注重敏感参数的取值率定。

参考文献:

- [1] Choudhary S, Tiwari A K, Nayak G N, *et al.* Sedimentological and geochemical investigations to understand source of sediments and processes of recent past in Schirmacher Oasis, East Antarctica[J]. *Polar Science*, 2018, **15**: 87-98.
- [2] 杨旭,李畅游,李文宝,等. 达里诺尔湖磷赋存特征及底泥释放影响因素[J]. *水土保持通报*, 2018, **38**(4): 92-97, 102.
Yang X, Li C Y, Li W B, *et al.* Characteristics of phosphorus occurrence and influence factors of sediment release in Dali-Nor Lake[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, **38**(4): 92-97, 102.
- [3] 张永生,李海英,任家盈,等. 三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4021-4031.
- [4] Zhang Y S, Li H Y, Ren J Y, *et al.* Temporal and spatial distribution of nutrients in Daning river sediments and their correlations with chlorophyll in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(11): 4021-4031.
- [5] Boudreau B P. The mathematics of early diagenesis; from worms to waves[J]. *Reviews of Geophysics*, 2000, **38**(3): 389-416.
- [6] Colborne S F, Maguire T J, Mayer B, *et al.* Water and sediment as sources of phosphate in aquatic ecosystems; the Detroit River and its role in the Laurentian Great Lakes[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **647**: 1594-1603.
- [7] Lai J, Wang G W, Wang S, *et al.* Review of diagenetic facies in tight sandstones; diagenesis, diagenetic minerals, and prediction via well logs[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, **185**: 234-258.
- [8] Niespolo E M, Sharp W D, Kirch P V. ^{230}Th dating of coral abrasers from stratified deposits at Tangatatau Rockshelter, Mangaia, Cook Islands; implications for building precise chronologies in Polynesia[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2019, **101**: 21-33.
- [9] Paraska D W, Hipsey M R, Salmon S U. Sediment diagenesis models: review of approaches, challenges and opportunities[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2014, **61**: 297-325.
- [10] Vinçon-Leite B, Casenave C. Modelling eutrophication in lake ecosystems: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **651**: 2985-3001.
- [11] 曾野,朱金格,王艳平,等. 东太湖水温变化与水-沉积物界面热通量初探[J]. *湖泊科学*, 2018, **30**(6): 1599-1609.
Zeng Y, Zhu J G, Wang Y P, *et al.* Changes of water temperature and heat flux at water-sediment interface, East Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, **30**(6): 1599-1609.
- [12] 秦伯强,朱广伟,张路,等. 大型浅水湖泊沉积物内源营养盐释放模式及其估算方法——以太湖为例[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, **35**(S2): 33-44.
Qin B Q, Zhu G W, Zhang L, *et al.* Estimation of internal nutrient release in large shallow Lake Taihu, China[J]. *Science in China Series D*, 2006, **49**(S1): 38-50.
- [13] Li Y P, Tang C Y, Zhu J T, *et al.* Parametric uncertainty and sensitivity analysis of hydrodynamic processes for a large shallow freshwater lake[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2015, **60**(6): 1078-1095.
- [14] 马荣华,孔繁翔,段洪涛,等. 基于卫星遥感的太湖蓝藻水华时空分布规律认识[J]. *湖泊科学*, 2008, **20**(6): 687-694.
Ma R H, Kong F X, Duan H T, *et al.* Spatio-temporal distribution of cyanobacteria blooms based on satellite imageries in Lake Taihu, China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, **20**(6): 687-694.
- [15] Jiang L, Li Y P, Zhao X, *et al.* Parameter uncertainty and sensitivity analysis of water quality model in Lake Taihu, China[J]. *Ecological Modelling*, 2018, **375**: 1-12.
- [16] Testa J M, Brady D C, Di Toro D M, *et al.* Sediment flux modeling: Simulating nitrogen, phosphorus, and silica cycles[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, **131**: 245-263.
- [17] 郝文超,王从锋,杨正健,等. 氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律[J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 640-648.
- [18] Hao W C, Wang C F, Yang Z J, *et al.* Speciation and transformation of phosphorus in sediments during the redox cycle[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 640-648.

- [17] 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 等. 基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(2): 590-602.
Lü W W, Yao X, Zhang B H, *et al.* Temporal-spatial distribution of nitrogen and phosphorus nutrients in Lake Taihu based on geostatistical analysis [J]. Environmental Science, 2019, **40**(2): 590-602.
- [18] Akomeah E, Lindenschmidt K E. Seasonal variation in sediment oxygen demand in a northern chained river-lake system [J]. Water, 2017, **9**(4): 254.
- [19] 杨赵. 湖泊沉积物中氮磷源—汇现象影响因素研究进展[J]. 环境科学导刊, 2017, **36**(S1): 16-19, 29.
Yang Z. Advances in factors influencing release of nitrogen and phosphorus in sediments [J]. Environmental Science Survey, 2017, **36**(S1): 16-19, 29.
- [20] 丰卫华, 王志富, 张荣保, 等. 宁德海域表层沉积物氧化还原环境特征及其影响因素[J]. 海洋环境科学, 2016, **35**(6): 882-887, 907.
Feng W H, Wang Z F, Zhang R B, *et al.* The environment characteristics of redox in the surface sediments of Ningde coastal sea area in relation to influence factors [J]. Marine Environmental Science, 2016, **35**(6): 882-887, 907.
- [21] Hietanen S, Lukkari K. Effects of short-term anoxia on benthic denitrification, nutrient fluxes and phosphorus forms in coastal Baltic sediment[J]. Aquatic Microbial Ecology, 2007, **49**(3): 293-302.
- [22] 李一平, 邱利, 唐春燕, 等. 湖泊水动力模型外部输入条件不确定性和敏感性分析[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(2): 410-416.
Li Y P, Qiu L, Tang C Y, *et al.* Uncertainty and sensitivity analysis of input conditions in large shallow lake hydrodynamic model[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(2): 410-416.
- [23] 余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 等. 风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3519-3529.
Yu M L, Hong G X, Zhu G W, *et al.* Wind field influence on spatial distribution of cyanobacterial blooms and nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China[J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3519-3529.
- [24] 许遐祯, 陶蓉茵, 赵巧华, 等. 大型浅水湖泊太湖波浪特征及其对风场的敏感性分析[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(1): 55-64.
Xu X Z, Tao R Y, Zhao Q H, *et al.* Wave characteristics and sensitivity analysis of the wind field in a large shallow lake—Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2013, **25**(1): 55-64.
- [25] 张红, 陈敬安, 王敬富, 等. 贵州红枫湖底泥磷释放的模拟实验研究[J]. 地球与环境, 2015, **43**(2): 243-251.
Zhang H, Chen J A, Wang J F, *et al.* A simulation study on the release of phosphorus from sediments in Lake Hongfeng, Guizhou Province, China[J]. Earth and Environment, 2015, **43**(2): 243-251.

CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of PM _{2.5} During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, <i>et al.</i> (4303)
Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing	CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (4310)
Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (4319)
Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang ...	ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, <i>et al.</i> (4330)
Characteristics of Heavy Metal Pollutants of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks	CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, <i>et al.</i> (4337)
Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City	WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, <i>et al.</i> (4345)
High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City	SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, <i>et al.</i> (4355)
Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou	LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou	ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (4372)
Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, <i>et al.</i> (4382)
Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing	FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, <i>et al.</i> (4395)
Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature	LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, <i>et al.</i> (4404)
Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations	WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (4412)
Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, <i>et al.</i> (4423)
Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, <i>et al.</i> (4431)
Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin	CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, <i>et al.</i> (4440)
Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake	HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, <i>et al.</i> (4450)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow	LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, <i>et al.</i> (4461)
Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China	WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, <i>et al.</i> (4469)
Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes	SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (4478)
Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images	LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4487)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu	ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, <i>et al.</i> (4497)
Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu	QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (4505)
Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai ...	DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (4513)
Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas	REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, <i>et al.</i> (4523)
Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization	YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, <i>et al.</i> (4532)
Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (4543)
Removal of Fe(II), Mn(II), and NH ₄ ⁺ -N by Using δ-MnO ₂ Coated Zeolite	MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, <i>et al.</i> (4553)
Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland	XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, <i>et al.</i> (4562)
Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies	LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, <i>et al.</i> (4569)
Start-up of a Three-stage PN/A Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia	JI Xiao-qing, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4578)
Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis	SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, <i>et al.</i> (4585)
Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu	RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (4594)
Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System	HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)
Adsorption and Interaction of Cu ²⁺ and Pb ²⁺ on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites	BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, <i>et al.</i> (4611)
Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province	HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)
Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou	TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (4628)
Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing	LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, <i>et al.</i> (4637)
Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars	CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, <i>et al.</i> (4647)
Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice	WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, <i>et al.</i> (4654)
Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	LIAO Yuan-chen, Nazgul·Jahitbek, LI Mei, <i>et al.</i> (4661)
Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System	XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)
Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole	ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, <i>et al.</i> (4678)
Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, <i>et al.</i> (4685)
Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability	SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, <i>et al.</i> (4691)
Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil	ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, <i>et al.</i> (4700)
Response of Soil CO ₂ Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems	YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4708)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure	ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, <i>et al.</i> (4718)
Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, <i>et al.</i> (4725)
Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015	PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, <i>et al.</i> (4733)