

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



2020

Vol.41 No.9
第41卷 第9期

目次

2020年天津市两次重污染天气污染特征分析·····	肖致美,徐虹,蔡子颖,李鹏,刘彬,元洁,郑乃源,唐遨,陈魁,邓小文(3879)
基于高分辨率MARGA分析成都市PM _{2.5} 中水溶性离子污染特征·····	尹寒梅,陈军辉,冯小琼,姜涛,钱骏,刘政(3889)
宿迁市PM _{2.5} 中水溶性无机离子的季节特征和来源分析·····	马红璐,赵欣,陆建刚,王辉,许纯领,欧阳琰,朱新胜,殷堂兵,漆丹,陆亚秋,汪玖阳,陆声兴(3899)
鼎湖山大气颗粒物中OC与EC的浓度特征及粒径分布·····	李安娜,温天雪,华维,杨员,孟泽,胡波,辛金元(3908)
鞍山市道路扬尘碳组分特征及来源解析·····	林孜,姬亚芹,林宇,国纪良,马妍,赵静琦(3918)
西安市冬季PM _{2.5} 中WSOC的光谱特性和来源解析·····	杨毅,张亚楠,刘焕武,田萍萍,李亚飞,雷颖,王一博(3924)
长三角地区气溶胶光学性质与新粒子生成观测·····	杜盈盈,陈军,张家洛,甘桂城,刘瑜存,苏明旭,楼晟荣,周敏,陶士康,乔利平(3932)
连云港市挥发性有机化合物的组分特征及来源解析·····	崔金梦,王体健,李秋潼,董立文,黄丛丞,曹云擎(3941)
成都市城区大气VOCs季节污染特征及来源解析·····	王成辉,陈军辉,韩丽,徐晨曦,王波,李英杰,刘政,钱骏(3951)
德州市夏季臭氧敏感性特征及减排方案·····	严茹莎(3961)
超低改造下中国火电排放清单及分布特征·····	屈加豹,王鹏,伯鑫,薛晓达,董广霞,崔磊,康明雄,王彤,汤铃,朱法华,李时蓓(3969)
浙江省人为源氨排放清单建立及分布特征·····	赵睿东,于兴娜,侯新红,沈丽(3976)
垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术的评估与筛选·····	赵思岚,奚鹏飞,郭凤艳,邓双,贾建丽(3985)
兰州市两场典型降水事件稳定同位素特征及其水汽来源·····	韩婷婷,张明军,王圣杰,杜勤勤,马转转,郭蓉,曹晏风(3993)
然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素·····	张涛,王明国,张智印,刘廷,何锦(4003)
河套灌区地下水化学演变特征及形成机制·····	崔佳琪,李仙岳,史海滨,孙亚楠,安海军,邢进平(4011)
石期河流域地下水化学特征及物质来源分析·····	李笑,于爽,李亮,郭永丽(4021)
长江中下游湖泊水体氮磷时空变化特征及其影响因素·····	季鹏飞,许海,詹旭,朱广伟,邹伟,朱梦圆,康丽娟(4030)
2016~2017年长荡湖流域湖库系统营养盐时空分布机制分析·····	李新艳,李恒鹏,姜三元,马培,赖锡军,邓建才,陈东强,耿建伟(4042)
菹草对湖泊水质及浮游植物群落结构的影响·····	康丽娟,许海,邹伟,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,陈洁(4053)
金泽水库库区细菌群落构建过程与关键驱动因子分析·····	刘明坤,童俊,朱慧峰,白晓慧(4062)
典型氟工业园周边河流沉积物中全(多)氟化合物的分布特征·····	孙琳婷,赵祯,唐建辉(4069)
微塑料对河水抗生素抗性基因的影响·····	周昕原,王言仔,苏建强,黄福义(4076)
莲花水库水体中抗生素污染特征及生态风险评价·····	廖杰,魏晓琴,肖燕琴,李青松,范洪勇,刘学军,庄马展,刘超翔(4081)
拟柱孢藻生长及碱性磷酸酶活性对不同磷浓度和磷形态响应的株系间差异·····	叶金梅,赵莉,罗旭,彭亮,雷腊梅(4088)
奶水河湿地植物作用及调水水质响应模拟·····	李亚娟,杜彦良,毕二平,王亮,陈翠柏(4095)
浅基质层干植草沟运行效果的现场实验·····	张佳炜,李田,张庭秀(4105)
海绵城市地块汇水区颗粒污染物的传输·····	李佳,谢文霞,姜智绘,单溪环,廖云杰,赵洪涛,李叙勇(4113)
天然黄铁矿吸附去除水中Sb(V):性能与机制·····	石松,吴乾元,李新正,黄满红(4124)
过硫酸盐氧化处理含苯磺酸废水·····	章晋门,卢钧,刘晓琛,陈泉源(4133)
温度对城市污水厌氧生物滤池运行效果与菌群结构的影响·····	刘智斌,刘秀红,周桐,章世勇,李健敏,杨庆(4141)
ABR-MBR耦合工艺启动及优化反硝化除磷性能·····	缪新年,汪倩,郭凯成,刘文如,沈耀良(4150)
低温下全自养脱氮颗粒污泥适应低基质效能·····	刘雨馨,王建芳,钱飞跃,陈倩苗,乔伟,沈聪(4161)
雄安新区土壤重金属地球化学监测关键问题探讨·····	郭志娟,周亚龙,杨峥,赵传冬,成杭新,孔牧,彭敏(4169)
基于土壤重金属及PAHs来源的人体健康风险定量评价:以北京某工业污染场地为例·····	吴志远,张丽娜,夏天翔,贾晓洋,李慧颖,王世杰(4180)
基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价·····	张富贵,彭敏,王惠艳,马宏宏,徐仁廷,成晓梦,侯召雷,陈子万,李括,成杭新(4197)
云南兰坪铅锌矿区优势植物重金属富集特性及应用潜力·····	张龙,张云霞,宋波,吴勇,周子阳(4210)
水培试验下水稻Pb吸收累积关键生育期·····	胡雨丹,周航,辜娇峰,霍洋,邓鹏辉,魏宾纭,刘俊,廖柏寒(4218)
田间条件下养分调控八宝景天Cd修复效率·····	郭俊梅,杨俊兴,杨军,郑国砥,周小勇,陈同斌,卞建林,孟晓飞,李玉峰(4226)
桉树枝条生物炭输入对桂北桉树人工林酸化土壤的作用效果·····	段春燕,沈育伊,徐广平,滕秋梅,张德楠,何成新,张中峰,周龙武,孙英杰(4234)
秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响·····	杨彩迪,卢升高(4246)
土壤微生物群落结构对生活源和工业源再生水灌溉的差异化响应·····	王燕,程东会,檀文炳,余红,席北斗,姜永海,党秋玲(4253)
粪肥和有机肥施用对稻田土壤微生物群落多样性影响·····	理鹏,吴建强,沙晨燕,叶春梅,黄沈发(4262)
松花江下游沿江湿地土地利用变化对土壤细菌群落多样性的影响·····	张拓,徐飞,怀宝东,杨雪,隋文志(4273)
黄土高原草地土壤细菌群落结构对于降水变化的响应·····	李娜,王宝荣,安韶山,焦峰,黄倩(4284)
土地利用方式对会仙岩溶湿地土壤真菌群落和功能类群的影响·····	程跃扬,靳振江,王晓彤,贾远航,袁武,周军波(4294)
黑土真菌群落互作及其与梯度有机质碳分子结构的关系·····	尚秋彤,黄瑞林,倪浩为,隋跃宇,孙波,梁玉婷(4305)
贵州茂兰喀斯特森林不同演替下土壤真核微生物多样性·····	王显,龙健,李娟,刘灵飞,廖洪凯,李宜蓉,杨睿(4314)
玉米秸秆生物炭固化细菌对镉砷吸附·····	刘玉玲,朱虎成,彭鸥,李丹阳,杨蕊嘉,彭晶,铁柏清(4322)
无机态氮素转化机制及水土体氮源识别方法·····	梁杏,孙立群,张鑫,张洁,付鹏宇(4333)
《环境科学》征订启事(4061)	
《环境科学》征稿简则(4132)	
信息(4233, 4293, 4304)	

妣水河湿地植物作用及调水水质响应模拟

李亚娟^{1,2}, 杜彦良^{1*}, 毕二平², 王亮¹, 陈翠柏²

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 本文基于湿地植物在河流湖泊中的物理、生化反应机制,应用 MIKE21 中 EcoLab 的编辑功能,建立湿地植物的水质模块,将植物的阻流、产氧、耗氧及微生物和植物吸收营养盐过程参与计算中,耦合湿地水动力实现水质模拟. 在对妣水河表流湿地调研及监测基础上,建立妣水河下游与三里河的模型,考虑湿地植物类型、分布及水量变化下的植物有效面积等作用,定量研究工程尺度上河流湿地水动力及水质净化效果. 计算中采用实测数据率定湿地植物对水质作用的关键参数,并对模拟结果进行验证. 通过模拟,无循环系统对支流三里河及上游调水时,岸带湿地建设后相比建设前,下游出口处氨氮、磷酸盐和总氮的浓度下降了 14.29%、33.33% 和 20.00%; 循环系统运行后,三里河和妣水河上游流量分别增加 $0.4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,使得部分河段水位抬升,断面平均流速略有增加,三里河和妣水河的有效湿地覆盖率分别增加了 144.44% 和 13.16%,出水口处水质与工程前相比,氨氮、磷酸盐和总氮分别下降了 35.71%、50.00% 和 46.67%,循环体系的建设加强了湿地净化功能. 模型有机地将湿地植物分布融合进模型水质计算中,为河湖湿地生态修复、方案设计和水利调控等综合措施下的水质响应研究提供了模型方法和技术支撑.

关键词: 表流湿地; MIKE 21-EcoLab; 水质模拟; 植物净化作用; 妣水河

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)09-4095-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202002052

Simulation of Water Quality Response of Guishui River Wetland Plants and Water Diversion

LI Ya-juan^{1,2}, DU Yan-liang^{1*}, BI Er-ping², WANG Liang¹, CHEN Cui-bai²

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. School of Water Resources & Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: A two-dimensional model MIKE21 coupled with a modified EcoLab module was applied to model the water quality of surface flow wetlands. In the model, vegetation effects, oxygen production, nutrient consumption by microorganisms and vegetation were set in the solutions of hydrodynamic, chemical, and biological processes. Based on the field investigation and measurements in the Guishui River wetland, the model was established for the downstream reaches of the Guishui River and the Sanli River. The model calculated the hydrodynamics and water quality changes by vegetation type and distribution. The model parameters were calibrated and results were validated using the measurements. The concentrations of ammonia nitrogen, phosphate, and total nitrogen at outflow decreased by 14.29%, 33.33%, and 20.00% in the presence of wetland vegetation compared to no wetland vegetation. During water circulation, the flow rate increased by $0.4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ at the inlet of Guishui and Sanli rivers, increasing the water level and velocity in some parts of the rivers. The water areas with vegetation in Sanli and Guishui rivers increased by 144.44% and 13.16%, respectively. The concentrations of ammonia nitrogen, phosphate, and total nitrogen at outflow decreased by 35.71%, 50.00%, and 46.67% compared to no wetlands and no circulation. The circulation strengthened the wetland purification function. The wetland vegetation distribution was organically integrated into the model for water quality calculation, which provides the technical support for the water quality response research under comprehensive measures such as river and lake wetland ecological restoration and water conservancy regulation.

Key words: surface wetland; MIKE 21-EcoLab; water quality simulation; purification function of vegetation; Guishui River

表流人工湿地被广泛运用于河湖生态修复和水质改善中,湿地基质、植物及微生物协同转化可有效去除污染物. 有研究表明,湿地植物的类型、密度及分布均能影响水质净化效果^[1,2]. 湿地植物的种植,局部区域流速降低,颗粒态物质发生沉降,可达到部分水质净化的作用. 同时,湿地植物种植还可通过以下途径参与水体物质的生化反应,影响水质净化. 首先是植物的光合作用,沉水植物产生的氧气直接进入水体,挺水植物产生的氧气通过通气组织输送至根区,在植物根系上层形成有氧区域,增加了水体中溶解氧含量^[3]. 湿地植物光合作用和呼吸作用交替

进行,系统内部形成氧化还原条件,促进硝化和反硝化反应的完成,提高了污染物的降解^[4]. 其次,植物发达的根系为微生物生存提供局部小环境,植物根系分泌有机碳源为基质微生物的生长提供适宜的碳源^[5,6],同时好氧环境增加好氧微生物数量及活性,

收稿日期: 2020-02-10; 修订日期: 2020-03-27

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07101004); 国家重点研发计划项目 (2017YFC0405804); 中国水利水电科学研究院重大水利工程生态安全保障及调控技术研究创新团队项目 (WE0145B592017)

作者简介: 李亚娟(1994~),女,硕士研究生,主要研究方向为水处理技术, E-mail: 1790073434@qq.com

* 通信作者, E-mail: duyil@iwhr.com

加强了污染物的生物降解^[7,8]. 最后,植物生长吸收各种营养盐,秋冬季对植物的收割可从湿地系统中移除部分氮磷量^[9,10].

湿地的水质净化功能一直是研究的热点,通过小尺度湿地模型研究污染物的去除效率^[11~15]及湿地水质净化机制^[16~18],但是实验室表流湿地模型研究具有一定的局限性,如研究区域有限,植被均匀分布,水动力条件单一,模型设计过于理想化^[9,18]. 为量化湿地在大范围上对水质的净化效果、优化湿地设计、合理配置水量等,数值模型是个重要的工具之一. Ji 等^[17]利用 EFDC 模型模拟湿地水深变化的影响. 李红艳等^[19]运用 WASP 水质模型模拟了扎龙湿地氮磷的变化. 一维 WASP 模型局限于通过直接调整水质参数方式来考虑植物作用^[20],当水量变化及湿地植物种植面积变化时,需要人为调整参数;三维 EFDC 模型适用于水深变化较大的湖泊^[21,22].

本文基于 MIKE21-EcoLab 中的“WQ with nutrients and chlorophyll-a”模块,考虑植物的移动性不强,建立水质 + 植物 (WQ with nutrients and vegetation) 模块,体现植物对水体的作用:①湿地植物阻碍水体流动的物理过程;②湿地植物分泌氧气进入溶解氧反应过程;③湿地植物种植后微生物对氮磷的摄取;④植物吸附或吸收氮磷. 研究区域为北京市妫水河中下游,出口断面为官厅水库主要入流断面. 利用 MIKE21 水动力耦合上述水质模块,构建妫水河下游及三里河的二维模型. 模型中根据实际情况设定湿地植物空间分布,模拟其在水中参与生化反应,同时可体现水量变化下的湿地植物面积的变化,综合计算出水质净化效率. 本文基于实测数据,对模型进行率定验证,研究了生态修复方案中湿地植物种植及调水对水质改善的效果,以期为研究区后期制定行之有效的妫水河补水和水循环方案提供了参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域为妫水河下游段,上游边界为东大桥水文站,下游为官厅水库库尾,中间有支流三里河汇入,河流沿途经过北京市延庆区城市段. 受上游水库及用水的影响导致河道水量远小于天然条件水量且河道全年水量基本稳定,局部区域水体流动性差,氮、磷浓度较高,影响官厅水库入流水质. 为改善妫水河下游水环境状况,保障官厅水库水质,在妫水河及三里河浅水区构建挺水与沉水植物组合的人工湿地;其次依托延庆城北循环管线,将下游的水通过循环管线调至上游,增加上游水体的入流流量,将三

里河及妫水河串联为“内、外”两个循环,形成“引水活源,改善水质”的湿地型河流. 本文利用模型手段对上述的环境改善方案进行评估.

1.2 水动力模块

河流水动力数值模拟应用 MIKE21 模型,模型计算基于二维水深平均的浅水方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS_f \quad (1)$$

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S_f \quad (2)$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S_f \quad (3)$$

式中, t 为时间(d); x 和 y 为横轴和纵轴坐标(m); η 为水位(m); h 为总水深(m); $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 为沿水深的平均流速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); g 为重力加速度($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$); ρ 为水体的密度($\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$); τ_{sx} 、 τ_{sy} 、 τ_{bx} 和 τ_{by} 为 x 和 y 方向的表面风应力和底部切应力($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$); S_f 为源项 [$\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{s})^{-1}$]; u_s 和 v_s 为源项水流流速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); T_{ij} 为侧向应力($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$).

1.3 湿地作用的水质模块

河道各水质变量计算中通用的二维物质输移方程为:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + S_c + P_c \quad (4)$$

式中, c 表示 EcoLab 中状态变量的浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 模拟计算水质变量为 BOD、溶解氧 (DO)、氨氮 (NH_4^+-N)、亚硝酸盐 (NO_2^--N)、硝酸盐 (NO_3^--N) 和磷酸盐 ($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$) 等,二级变量有总氮 ($\text{TN} = \text{NH}_4^+-\text{N} + \text{NO}_2^--\text{N} + \text{NO}_3^--\text{N}$); u 和 v 表示组分流速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); D_x 和 D_y 表示各组分在 x 和 y 方向上的扩散系数; S_c 为源汇项; P_c 为 EcoLab 生化反应, P_c 可由以下公式表示:

$$P_c = \frac{dc}{dt} = \sum_{i=1}^n \text{Process}_i \quad (5)$$

式中, P_c 为特定状态变量涉及的进程数, Process_i 为影响水体中物质浓度变化的各种生化反应过程. 为了使模型能恰当地反映表流人工湿地的作用,模型在水质模拟时依据湿地净化机制进行设置.

模型中,湿地植物对水体中 DO 产生作用,湿地植物改变水动力学,对水体 DO 的复氧水平产生影响,计算采用公式(6):

$$\frac{d(\text{DO})}{dt} = \text{大气复氧} - \text{BOD 降解} - \text{硝化反应} +$$
$$P - R - \text{SOD} \quad (6)$$

式中,SOD 为底泥耗氧量[$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]; P 和 R 分别为植物产氧量和耗氧量[$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$].

大气复氧由公式(7)计算:

$$\text{大气复氧量} = K_1 \cdot (c_s - \text{DO}) \quad (7)$$
$$(K_1 = 27\,185 \cdot u^{0.931} \cdot h^{-0.692} \cdot I^{1.09})$$

式中, K_1 为大气复氧常数(d^{-1}),为流速和水深的函数; u 为流速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); I 为河流坡降($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$); c_s 为 DO 的饱和浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 植物分布改变了流速和水深等变量,影响区域大气复氧和水体的区域复氧量.

湿地植物产氧量 P 随昼夜光照强度波动,计算采用公式(8):

$$P = P_{\max} \cdot \cos 2\pi(\tau/\alpha) \cdot \theta_1^{(T-20)} \quad (8)$$

式中, $P_{\max}$ 为午时最大产氧量[$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$],计算区域中午时最大产氧量,根据植物分布、密度及类型等,作为计算的条件分区设定;同样 R 也分区设定; τ 为光合作用最大产氧时刻与正午(12:00)的偏差小时数; θ_1 为影响植物产氧量和呼吸速率的阿伦尼斯温度系数; α 为相对昼长; T 为水温.

湿地植物根系泌氧为好氧细菌的生长提供环境,细菌数量及活性增加,促进了水体中氮磷吸收量^[23],主要为 NH_4^+ -N和 PO_4^{3-} -P,计算采用公式(9)和公式(10):

$$\text{细菌摄取氨氮的量} = \text{UN}_b \cdot K_3 \cdot \text{BOD} \cdot \theta_3^{(T-20)} \times$$
$$\frac{\text{NH}_3}{\text{NH}_3 + \text{HS_NH}_4^+} \cdot \frac{P_{\max}}{P_{\max} + \text{HS_}P_{\max}} \quad (9)$$

$$\text{细菌摄取磷的量} = \text{UP}_b \cdot K_3 \cdot \text{BOD} \cdot \theta_3^{(T-20)} \times$$
$$\frac{\text{PO}_4}{\text{PO}_4 + \text{HS_PO}_4^{3-}} \cdot \frac{P_{\max}}{P_{\max} + \text{HS_}P_{\max}} \quad (10)$$

式中, UN_b 为细菌摄取氨氮的系数, UP_b 为细菌摄取磷的系数; K_3 为摄取速率(d^{-1}); BOD 为水体中有有机物的含量($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); θ_3 为影响细菌活性的阿伦尼斯温度系数; HS_NH_4^+ 为细菌摄取氨氮的半饱和

浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,以 N 计), HS_PO_4^{3-} 为细菌摄取磷的半饱和浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,以 P 计), $\text{HS_}P_{\max}$ 为细菌对应植物的午时最大产氧量的半饱和浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,以 O 计).

水体温度、植被光合速率及呼吸速率影响植物对氮磷的摄取量,计算采用公式(11)和公式(12):

$$\text{植物摄取氨氮的量} = \text{UN}_p \cdot [P - R \cdot \theta_1^{(T-20)}] \quad (11)$$

$$\text{植物摄取磷的量} = \text{UP}_p \cdot [P - R \cdot \theta_1^{(T-20)}] \quad (12)$$

式中, UN_p 为植物摄取氨氮的系数, UP_p 植物摄取磷的系数.

1.4 模型构建

1.4.1 模型设置

模型采用三角形非结构网格,根据人工湿地布局、河道深泓及漫滩的形态,对妯水河主河道和三里河进行了局部加密. 进水断面有 2 个,分别位于妯水河上游和三里河上游,下游出流边界为官厅水库库尾,有橡胶坝控制的水位边界,见图 1. 妯水河上游由于水库的建设和用水,入流量小,根据资料和湿地调研,流量(Q)在年内变化不大,计算区域的流量边界按现状流量给入;水质计算边界采用监测得到的入流水质数据,通过现场踏勘及资料收集,区间污染源主要分布在三里河沿岸,沿途点源及面源排污口概化为 3 个主要污染源见图 1 和表 1.

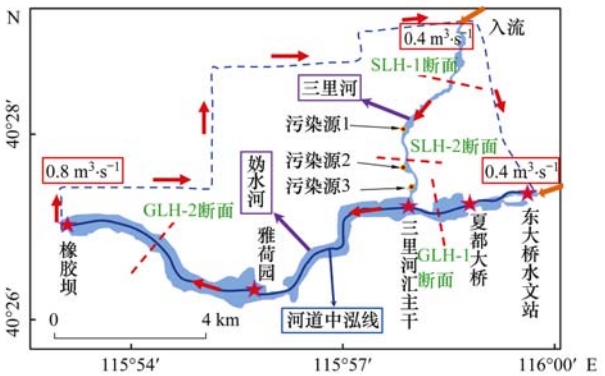


图 1 计算区域及断面、点位信息
Fig. 1 Computed domain, sections, and points

表 1 污染源排污强度及水质指标

Table 1 Discharge intensity of pollution sources and water quality indicators							
污染源	Q / $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	BOD / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	DO / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	NH_4^+ -N / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	NO_2^- -N / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	NO_3^- -N / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TP / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
1	0.06	6.00	1.50	2.50	0.10	0.60	1.05
2	0.06	6.00	1.50	1.80	0.10	0.50	1.16
3	0.06	6.00	1.00	2.00	0.10	0.30	1.25

1.4.2 模型情景及参数设置

妯水河表流湿地模拟计算的情景有 3 个,情景

1:不考虑湿地植物生长的无植物情景,研究区各参数空间均匀;情景 2:考虑河岸带种植植物的种类和

密度的有植物情景,分区域设定植物影响下的曼宁系数、午时最大氧气生成量、呼吸速率和底泥需氧量;情景3:考虑植物和奶水河下游水体提送至三里河支流及奶水河上游构成的水循环系统,流量及湿地面积变化的情景.

植物种植后奶水河表流湿地糙率值设定时依据奶水河 CAD 平面设计图中植物布局及相关内容,一共分 12 个区域,每个区的植物及面积根据设计图纸勾出,详见图 2. 依据参考文献[24,25]得出研究区河道糙率取值范围为 0.03~0.05,不同区域曼宁系数数值见表 2.

研究区挺水植物芦苇、千屈菜、菖蒲、香蒲、水葱、鸢尾和红蓼均为 $8\text{株}\cdot\text{m}^{-2}$,荷花为 $2\text{株}\cdot\text{m}^{-2}$;沉水植物微齿眼子菜、金鱼藻、狐尾藻、轮叶黑藻和菹草均为 $20\sim30\text{丛}\cdot\text{m}^{-2}$,每丛 2 株,苦草为 $40\sim60\text{丛}\cdot\text{m}^{-2}$,每丛 2 株.植物的 $P_{\max}$ 和 R 同样可类似图 2 中分区给出,不同植物所在区域的 SOD、 R 和 $P_{\max}$ 见表 2.

参考 MIKE 模型的文档资料, UN_b 取值范围为 $0\sim1.000$, UP_b 取值范围为 $0\sim0.100$, $HS_NH_4^+$ 取值范围为 $0\sim5.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (以 N 计), $HS_PO_4^{3-}$ 取值

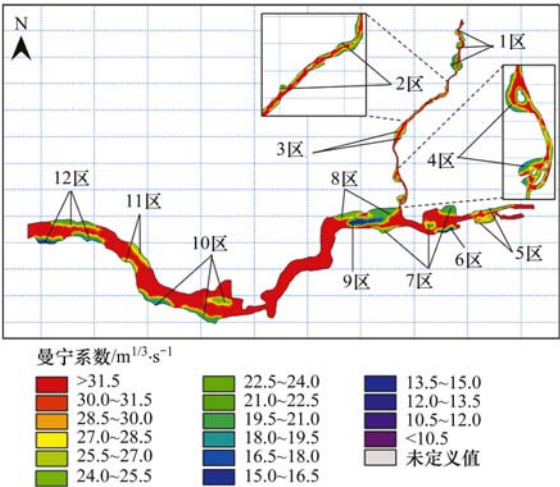


图 2 研究区植物分区情况

Fig. 2 Vegetation division in the study area

范围为 $0\sim2.0\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (以 P 计), UN_b 取值范围为 $0\sim0.200$, UP_b 取值范围为 $0\sim0.100$,并结合参考文献[26],模型计算中各参数取值分别为: UN_b 为 0.013, UP_b 为 0.009, $HS_NH_4^+$ 为 $0.8\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (以 N 计), $HS_PO_4^{3-}$ 为 $0.6\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (以 P 计),湿地植物种植前 UN_b 为 0.011, UP_b 为 0.008,植物种植后 UN_b 为 0.013, UP_b 为 0.009.

表 2 研究区植物分布水质参数

Table 2 Water quality parameters of vegetation distribution in the study area

区域编号	植物情况	曼宁系数 $/\text{m}^{1/3}\cdot\text{s}^{-1}$	$P_{\max}$ $/\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$	R $/\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$	SOD $/\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$
1	金鱼藻、狐尾藻、鸢尾和芦苇	24.0	5.00	0.70	0.50
2	香蒲、菖蒲和千屈菜	26.0	4.00	0.30	0.42
3	菖蒲、芦苇、香蒲和苦草	24.0	4.50	0.50	0.47
4	微齿眼子菜、轮叶黑藻、狐尾藻、千屈菜、金鱼藻和菹草	22.0	5.00	0.70	0.45
5	金鱼藻、狐尾藻、菖蒲和鸢尾	25.0	4.50	0.50	0.12
6	红蓼、金鱼藻和芦苇	22.0	2.50	0.20	0.13
7	鸢尾、菹草、菖蒲、红蓼和香蒲	24.0	5.00	0.70	0.15
8	香蒲、菖蒲、千屈菜和红蓼	24.0	5.00	0.70	0.12
9	菹草、苦草、水葱、鸢尾、狐尾藻和金鱼藻	20.0	5.00	0.70	0.12
10	千屈菜、轮叶黑藻、水葱和荷花	25.0	4.70	0.60	0.15
11	荷花、苦草和微齿眼子菜	26.0	4.50	0.50	0.15
12	菖蒲、芦苇和香蒲	24.0	4.50	0.50	0.14

1.5 模型率定验证

2003 年奶水河上游修建水库以来,下游河道流量急剧减小且平坦化,研究区上边界东大桥水文站平水期及丰水期月均流量变幅区间为 $1.2\sim2.1\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,平均流量为 $1.7\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. 研究区域枯水期湿地植物凋零,受冰冻影响,调水系统停止运行,因此可认为枯水期湿地植物及调水系统对水体的净化作用不大. 本文着重讨论湿地植物及调水的作用,考虑植物在春夏季为主要生长周期,计算时间段为 5 月 1 日至 8 月 1 日. 奶水河流域的实测水质数据分别为 2018 年 5、7、10 月和 2019 年 3 月,但由于采样

点位和区域不同,单一年份不能反映整体水域的水质变化,综合考虑 2018~2019 年实测水质数据对模型进行率定验证. 计算输入多年平均水温过程作为胁迫的变量. 计算区域水域面积较大,换水周期较长,计算结果中前 30 天为消除水质的初始值. 计算结果稳定的 8 月 1 日的 DO 、 NH_4^+-N 、 $PO_4^{3-}-P$ 和 TN 浓度从上边界东大桥水文站至下边界橡胶坝,沿奶水河中泓线(见图 1)的变化与实测值的对比见图 3,图中实线为计算值,点为实测值,河道长度为 11.23km ,实测点位从右至左分别为东大桥水文站、夏都大桥、三里河汇主干、雅荷园和橡胶坝.

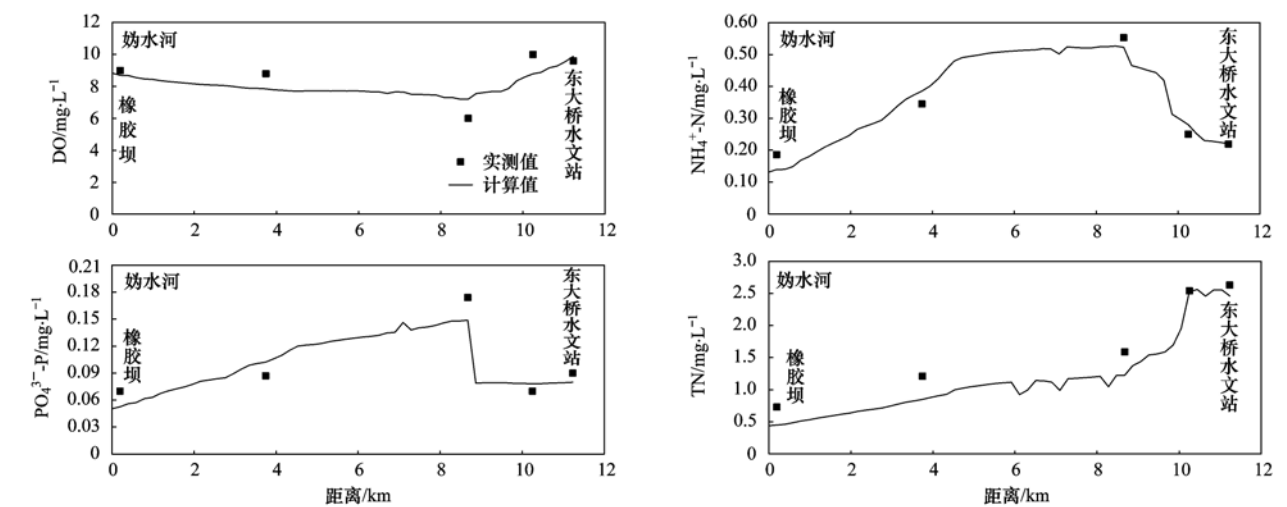


图3 各水质指标实测与计算比较

Fig. 3 Comparison of measured and calculated water quality indexes

计算结果与实测数据比较用于率定验证,污染物从东大桥水文站向橡胶坝迁移一段距离后,浓度增加,反映了三里河分支水体的汇入.在模拟计算时情景1各个断面水质指标(DO、NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P和TN)的计算值与实测值相对误差(ε)计算公式如下:

$$\varepsilon = |X_m - X_0| / X_0$$

式中, X_m 为各水质指标计算值, X_0 为各水质指标实测值.模拟计算90 d的表流湿地水体中各断面DO、

NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P和TN的计算值与实测值的相对误差见表3.

分析表3,DO、NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P和TN在5个监测点位的计算值与实测值的平均相对误差分别是9.77%、10.47%、16.52%和18.01%,数值模拟中计算值与实测值的变化趋势基本一致,因此模型率定的参数符合模拟要求,奶水河表流湿地的水质模拟结果可信.

表3 奶水河表流湿地建设前水质指标计算值与实测值比较

Table 3 Comparison of calculated and measured water quality indexes of Guishui River surface flow wetland before construction									
断面	污染物	计算值 /mg·L ⁻¹	实测值 /mg·L ⁻¹	相对误差 /%	平均相对 误差/%	污染物	计算值 /mg·L ⁻¹	实测值 /mg·L ⁻¹	相对误差 /%
东大桥水文站	DO	9.88	9.60	2.92	9.77	东大桥水文站	0.08	0.09	11.11
夏都大桥		8.82	10.00	11.80		夏都大桥	0.08	0.07	14.29
三里河汇主干		7.20	6.00	20.00		三里河汇主干	0.15	0.22	31.82
雅荷园		7.85	8.80	10.80		雅荷园	0.10	0.09	11.11
橡胶坝		8.70	9.00	3.33		橡胶坝	0.06	0.07	14.29
东大桥水文站	NH ₄ ⁺ -N	0.22	0.22	0.00	10.47	东大桥水文站	2.46	2.63	6.46
夏都大桥		0.28	0.25	12.00		夏都大桥	2.53	2.54	0.39
三里河汇主干		0.52	0.55	5.45		三里河汇主干	1.35	1.59	15.09
雅荷园		0.38	0.35	8.57		雅荷园	0.85	1.21	29.75
橡胶坝		0.14	0.19	26.32		橡胶坝	0.45	0.73	38.36

2 结果与分析

2.1 水动力分析

对3个不同情景奶水河表流湿地水动力结果进

行分析,选择奶水河上 GSH-1 和 GSH-2 断面(见图1)的流速分布作比较,见图4.

有植物与无植物相比,河岸带种植植物后阻碍水体流动,使河道断面流速分布发生变化,沿

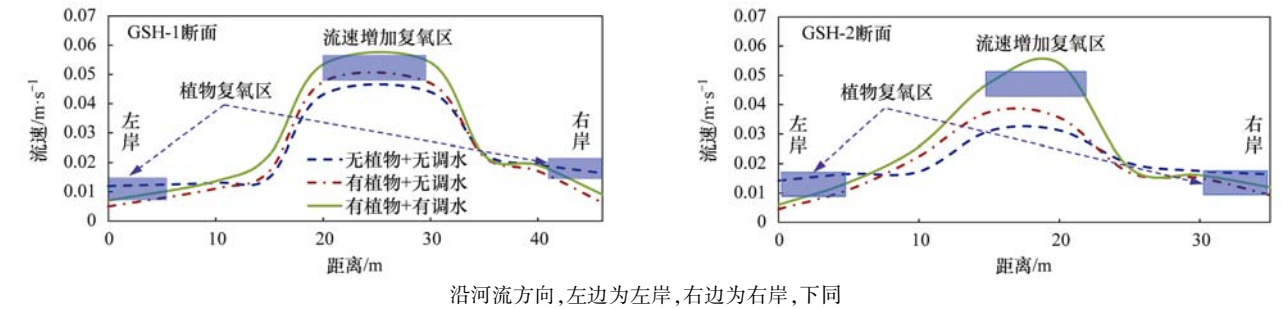


图4 奶水河不同情景横断面流速分布

Fig. 4 Cross-sectional velocity distribution of Guishui River in different scenarios

岸湿地流速降低,河道中游的流速略微升高. 当水循环系统运行后, 妫水河上游流量增加, 断面流速整体变大. 妫水河下游受橡胶坝控制水位的

影响, 水位对于流量变化不明显, 但三里河为山区性溪流, 流量的增加对水位产生较大影响, 见图 5.

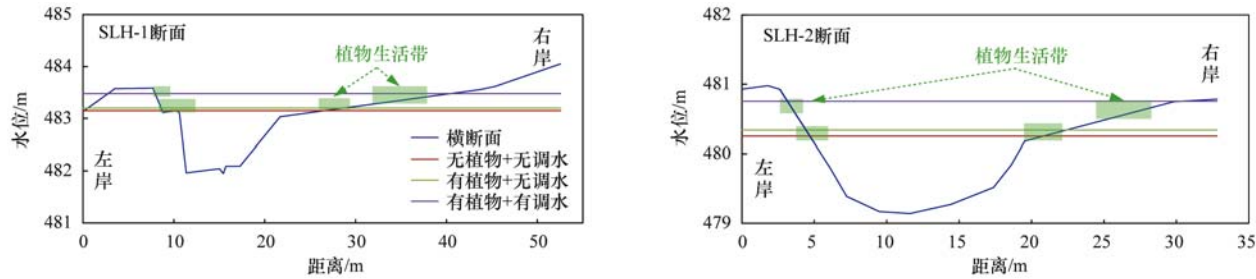


图 5 SLH-1 及 SLH-2 断面不同情景水位变化

Fig. 5 Water level changes in different scenarios of SLH-1 and SLH-2 sections

湿地植物通常在水陆交错带的一定区域内生长, 有植物与无植物相比, 三里河 SLH-1 和 SLH-2 断面水位略抬升 0.05 m 和 0.09 m. 统计不同情景下湿地面积的变化, 见表 4.

水循环系统的运行导致水面及有效湿地面积的增加, 三里河水面面积增加了 0.34 km², 变化率为

87.18%, 其有效湿地面积增加了 0.26 km², 湿地覆盖率增加了 144.44%. 妫水河水面面积增加了 0.15 km², 变化率为 4.59%, 其有效湿地面积增加了 0.05 km², 湿地覆盖率增加了 13.16%. 水循环系统运行后, 不论是湿地面积还是湿地覆盖率均有提高, 有利于湿地水质净化.

表 4 不同情景水面和湿地面积变化

Table 4 Changes in water surface and wetland area in different scenarios

项目	三里河			妫水河		
	水面面积/km ²	湿地面积/km ²	占比/%	水面面积/km ²	湿地面积/km ²	占比/%
情景 2	0.38	0.18	46.15	3.27	0.38	11.62
情景 3	0.73	0.44	60.27	3.42	0.43	12.57
变化率/%	87.18	144.44	/	4.59	13.16	/

2.2 水质浓度分析

选取 4 个计算水质变量 DO、NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P 和 TN 进行结果展示, 各变量的分布见图 6~9.

由图 6~9 可见, 受三里河污染源入流的影响, 在距离橡胶坝 8.67 km 处, 较高浓度的污染源消耗水体中较多 DO, 使 DO 浓度出现最小值, NH₄⁺-N 和 PO₄³⁻-P 浓度出现最大值, 同时在该点 TN 去除率趋

于 0. 妫水河整体呈现上游和下游 DO 较高, 中段 DO 降低; 妫水河 NH₄⁺-N 和 PO₄³⁻-P 在中段均有不同程度的升高, 上下游较低; TN 在上游较高, 沿程下降, 表明湿地植物产氧增加有利于硝化反硝化细菌的生存, 较多的 NH₄⁺-N 经硝化菌吸收转化成氮气, 水体中 TN 含量减少. 对河道中泓线上的水质指标进行比较, 见图 10.

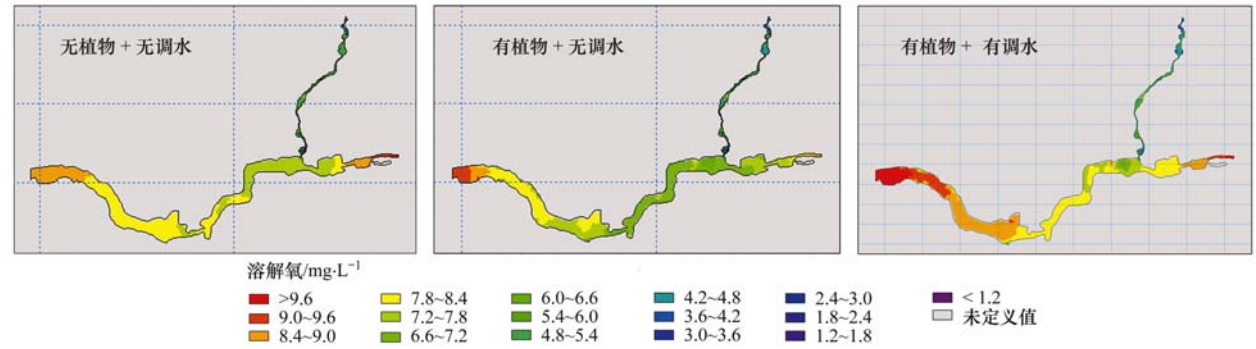


图 6 妫水河不同情景溶解氧分布

Fig. 6 Distribution of dissolved oxygen in different scenarios in Guishui River

情景 2、3 的出口处除 DO 浓度增加外其他各水质指标浓度均比入口处小, 3 个情景 DO 排序为 DO_{情景3} > DO_{情景2} > DO_{情景1}, 通过植物提高了 DO 含量可加快污

染物的去除, 整体上 NH₄⁺-N 和 PO₄³⁻-P 去除效果明显. NH₄⁺-N 去除效率明显高于 TN, 与其他存在形式的氮素相比, 植物及微生物更偏好利用 NH₄⁺-N^[27,28].

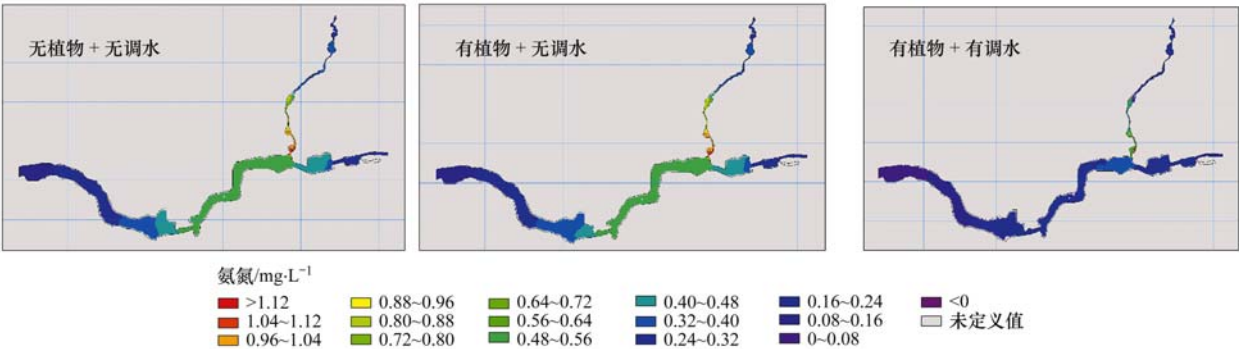


图7 奶水河不同情景氨氮分布

Fig. 7 Distribution of ammonia nitrogen in different scenarios in Guishui River

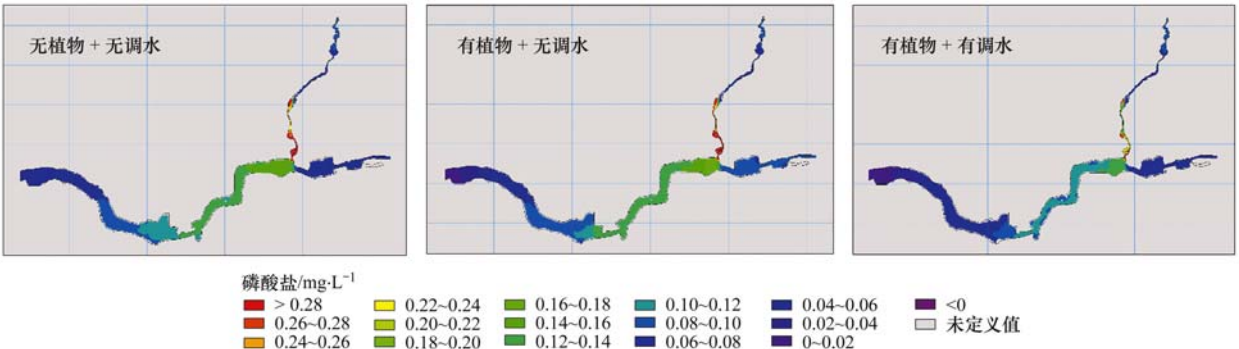


图8 奶水河不同情景磷酸盐分布

Fig. 8 Distribution of phosphate in different scenarios in Guishui River

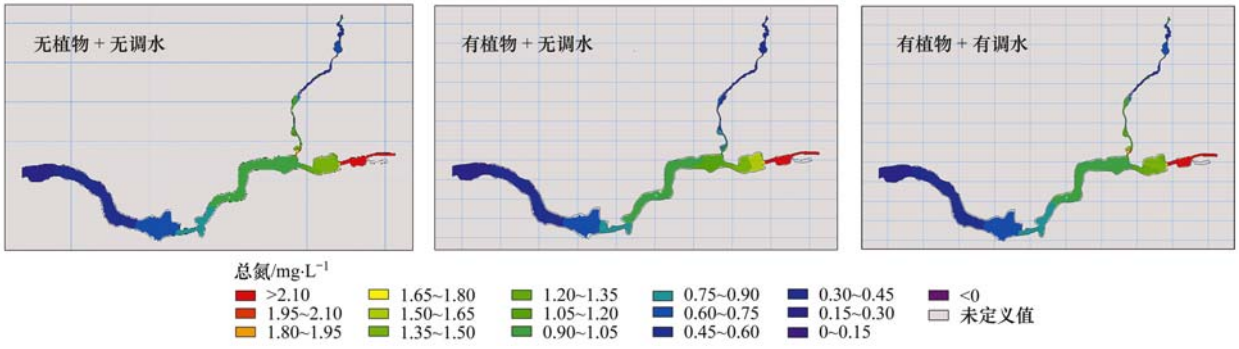


图9 奶水河不同情景总氮分布

Fig. 9 Total nitrogen distribution in different scenarios in Guishui River

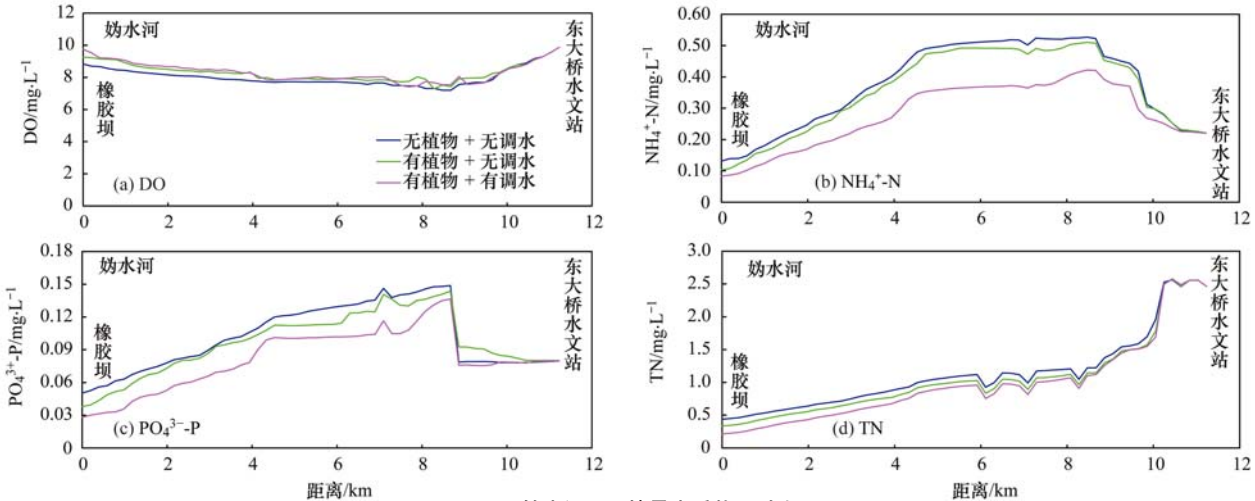


图10 奶水河不同情景水质状况对比

Fig. 10 Comparison of water quality in different scenarios in Guishui River

2.3 水质净化效果

为了定量分析妣水河表流湿地水质净化效果,

将 3 个情景模拟计算的 DO、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 TN 的模拟结果进行比较,见表 5 和表 6.

表 5 妣水河监测断面 DO 浓度变化¹⁾

Table 5 Change in dissolved oxygen concentrations in Guishui River monitoring section

项目	点位	情景 1	情景 2	情景 3	2 VS 1 复氧率/%	3 VS 1 复氧率/%
DO/mg·L ⁻¹	东大桥水文站	9.88	9.88	9.88	0.00	0.00
	夏都大桥	8.82	8.81	8.82	-0.11	0.00
	三里河汇主干	7.20	7.81	8.06	8.47	11.94
	雅荷园	7.85	8.24	8.29	4.97	5.61
	橡胶坝	8.70	9.23	9.53	6.11	9.52

1)2 VS 1 代表情景 2 与情景 1 比较, 3 VS 1 代表情景 3 与情景 1 比较,下同

表 6 妣水河监测断面各水质指标浓度变化

Table 6 Changes in the concentrations of water quality indicators in Guishui River monitoring section

项目	点位	情景 1	情景 2	情景 3	2 VS 1 净化率/%	3 VS 1 净化率/%
$\text{NH}_4^+\text{-N/mg}\cdot\text{L}^{-1}$	东大桥水文站	0.22	0.22	0.22	0.00	0.00
	夏都大桥	0.28	0.25	0.24	10.71	14.29
	三里河汇主干	0.52	0.45	0.39	13.46	25.00
	雅荷园	0.38	0.37	0.26	2.63	31.58
	橡胶坝	0.14	0.12	0.09	14.29	35.71
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P/mg}\cdot\text{L}^{-1}$	东大桥水文站	0.08	0.08	0.08	0.00	0.00
	夏都大桥	0.08	0.08	0.07	0.00	12.50
	三里河汇主干	0.15	0.11	0.09	26.67	40.00
	雅荷园	0.10	0.10	0.07	0.00	30.00
	橡胶坝	0.06	0.04	0.03	33.33	50.00
TN/mg·L ⁻¹	东大桥水文站	2.46	2.46	2.46	0.00	0.00
	夏都大桥	2.53	2.50	2.50	1.19	1.19
	三里河汇主干	1.35	1.29	1.25	4.44	5.93
	雅荷园	0.85	0.76	0.65	10.59	23.53
	橡胶坝	0.45	0.36	0.24	20.00	46.67

从表 5 和表 6 中可以看出,情景 1 是对实测数据的率定验证.三里河是山区型溪流,沿途有较多污染源汇入,当三里河河水汇入妣水河,将其携带的污染物也一同带入主河道,导致点位三里河汇主干处 DO 出现最小值,氮磷浓度增大.表 5 中,在增大入流流量时,位于妣水河下游的橡胶坝和雅荷园的复氧率分别为 9.52% 和 5.61%,而且在仅有植物时,橡胶坝和雅荷园的复氧率分别为 6.11% 和 4.94%,这表明增大流量,流速增大,有利于水体复氧,与此同时水位抬升,有效湿地面积增多,植物根区供氧增大,水体中 DO 增加.

表 5 的湿地植物种植及调水方案(情景 3)中河流水质的净化率基本均大于单一植物种植方案(情景 2)对水质的净化率,这也在一定程度上说明了增大入流流量使有效湿地面积增加,植物产氧与大气复氧增大水体 DO 含量,同时植物生长产生光反应暗反应交替出现,在水体中形成氧化还原微环境,有利于硝化反硝化细菌进行脱氮反应,提高水体中氮的去除,有利于水质净化;位于上游的东大桥水文站计算值与实测值相近,该点距离妣水河入流口仅

有 50 m,因此对水质净化较少,可以忽略不计.位于下游的橡胶坝水质净化率较高,湿地植物与调水方案中橡胶坝处 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 TN 的净化率分别为 35.71%、50.00% 和 46.67%;雅荷园处 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 TN 的净化率分别为 31.58%、30.00% 和 23.53%,说明污染物在妣水河沿程不断被降解,越靠近下游水质净化率越高,这也反映了妣水河沿程水流复氧且河岸带分布的植物产氧均有助于水质净化,模拟结果能较好地反映实际情况.模拟结果和实测值存在差异主要是因为实际妣水河中表流湿地水体中的反应机制更复杂^[29].北方缺水河流流量的增加有利于维持湿地功能的提升.

3 讨论

本文采用 MIKE21 和 EcoLab 模型构建一套湿地水质模型,模型基于湿地对水质的作用机制,考虑植物对水动力、及 DO、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的作用,根据实际湿地植物种植及空间分布状况,设定水中植物带,模拟植物在水中参与生化反应,计算河道水质的变化.在大量的湿地生态保护实践中,湿地水量是

湿地健康的核心因子之一,该模型耦合水动力变化,可体现河流或湖泊流量变化下的湿地面积的动态变化,模型结果可对叠加调水等方案的湿地生态修复方案的水质净化作用进行综合评估.模型方法在奶水河湿地模型构建及模拟中得到应用,模型模拟湿地植物种植前后水质变化,以及为改善河道缺水的调水工程运行后的湿地水质净化效果.

模型结果显示,湿地植物种植后与种植前相比,奶水河出流处 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 TN 分别下降了 14.29%、33.33% 和 20.00%, DO 水平提高了 6.11%. 为改善河道缺水,当增加运行循环调水工程,三里河和奶水河上游流量分别增加 $0.4\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,使得部分河段水位抬升,流速略有增加,三里河和奶水河的有效湿地覆盖率分别增加了 144.44% 和 13.16%,出水口处水质与工程前相比, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 TN 分别下降了 35.71%、50.00% 和 46.67%, DO 提高了 9.52%. 模型结果表明,缓解北方河流的缺水问题,调水能有效改善湿地运行效果.通过奶水河湿地水质模拟计算实例,本文的模型方法设计合理,计算结果可信,可以是研究湿地对水质的净化功能的工具,同时为复杂湿地生态恢复方案的优化设计提供科学支撑.

4 结论

(1) 基于植物对水流及水质的作用,构建的湿地生态水质的 EcoLab 模块中考虑了植物的阻流、产氧、微生物及植物生长的吸收作用,模拟了奶水河下游段的河流湿地及调水调控作用下的水质演变.湿地种植植物后,模型计算奶水河出流处 DO 浓度与无植物相比提高了 6.11%. 湿地植物生长提高了细菌的活性及吸收水体的氮磷量,综合植物作用,奶水河出流处 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 TN 分别下降了 14.29%、33.33% 和 20.00%.

(2) 叠加调水的湿地生态修复方案可以改善河道缺水的湿地水质净化效果.三里河和奶水河的有效湿地覆盖率分别增加了 144.44% 和 13.16%,出水口处水质与工程前相比, DO 提高了 9.52%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 TN 分别下降了 35.71%、50.00% 和 46.67%. 叠加调水的湿地生态修复方案可以改善河道缺水的湿地水质净化效果.

参考文献:

- [1] Sabokrouhiyeh N, Bottacin-Busolin A, Tregnaghi M, *et al.* Variation in contaminant removal efficiency in free-water surface wetlands with heterogeneous vegetation density [J]. *Ecological Engineering*, 2020, **143**: 105662.
- [2] 何露露, 杨平, 谭立山, 等. 福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征 [J]. *环境科学*, 2019, **40** (4): 1788-1796.
- [3] He L L, Yang P, Tan L S, *et al.* Nutrient distribution of overlying water in tidal marshes in five estuaries and bays of the Fuzhou region in autumn [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (4): 1788-1796.
- [4] Wang W L, Han R M, Wan Y J, *et al.* Spatio-temporal patterns in rhizosphere oxygen profiles in the emergent plant species *acorus calamus* [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(5): e98457.
- [5] Sudarsan J S, Annadurai R, Mukhopadhyay M, *et al.* Domestic wastewater treatment using constructed wetland: an efficient and alternative way [J]. *Sustainable Water Resources Management*, 2018, **4**(4): 781-787.
- [6] 黄磊, 梁银坤, 梁岩, 等. 生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1280-1286.
- [7] Huang L, Liang Y K, Liang Y, *et al.* Influences of biochar application on root aerenchyma and radial oxygen loss of *acorus calamus* in relation to subsurface flow in a constructed wetland [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1280-1286.
- [8] Saeed T, Sun G Z. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, **112**: 429-448.
- [9] García J, Rousseau D P L, Morató J, *et al.* Contaminant removal processes in subsurface-flow constructed wetlands: a review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2010, **40**(7): 561-661.
- [10] Huett D O, Morris S G, Smith G. *et al.* Nitrogen and phosphorus removal from plant nursery runoff in vegetated and unvegetated subsurface flow wetlands [J]. *Water Research*, 2005, **39**(14): 3259-3270.
- [11] 赵梦云, 熊家晴, 郑于聪, 等. 植物收割对人工湿地中污染物去除的长期影响 [J]. *水处理技术*, 2019, **45**(11): 112-116.
- [12] Zhao M Y, Xiong J Q, Zheng Y C, *et al.* Long-term effect of plant harvesting on pollutants removal in constructed wetlands [J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, **45**(11): 112-116.
- [13] 李莎莎, 田昆, 刘云跟, 等. 不同空间配置的湿地植物群落对生活污水的净化作用研究 [J]. *生态环境学报*, 2010, **19** (8): 1951-1955.
- [14] Li S S, Tian K, Liu Y G, *et al.* Compare the purification effects of sewage by the wetland plant community composition and spatial patterns [J]. *Ecology and Environment*, 2010, **19**(8): 1951-1955.
- [15] 蒋倩文, 刘锋, 彭英湘, 等. 生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2194-2201.
- [16] Jiang Q W, Liu F, Peng Y X, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal by integrated ecological engineering treatment system in a small agricultural watershed [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2194-2201.
- [17] Xing W M, Han Y G, Guo Z F, *et al.* Quantitative study on redistribution of nitrogen and phosphorus by wetland plants under different water quality conditions [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **261**: 114086.
- [18] Li J H, Yang X Y, Wang Z F, *et al.* Comparison of four aquatic plant treatment systems for nutrient removal from eutrophied water [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **179**: 1-7.
- [19] Martín M, Oliver N, Hernández-Crespo C, *et al.* The use of free water surface constructed wetland to treat the eutrophicated waters

- of lake L'Albufera de Valencia (Spain) [J]. Ecological Engineering, 2013, **50**: 52-61.
- [15] Di Luca G A, Mufarrege M M, Hadad H R, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal and *Typha domingensis* tolerance in a floating treatment wetland[J]. Science of the Total Environment, 2019, **650**: 233-240.
- [16] 孙瑞莲, 刘健. 3 种挺水植物对污水的净化效果及生理响应[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(5): 926-932.
- Sun R L, Liu J. Physiological response of emergent hydrophytes to wastewater stress and their potential for reducing COD and nutrients[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, **27**(5): 926-932.
- [17] Ji Z G, Jin K R. An integrated environmental model for a surface flow constructed wetland: water quality processes[J]. Ecological Engineering, 2016, **86**: 247-261.
- [18] Qin Z R, Zhao Z H, Xia L L, *et al.* The dissipation and risk alleviation mechanism of PAHs and nitrogen in constructed wetlands: the role of submerged macrophytes and their biofilms-leaves[J]. Environment International, 2019, **131**: 104940.
- [19] 李红艳, 章光新, 孙广志. 基于水量-水质耦合模型的扎龙湿地水质净化功能模拟与评估[J]. 中国科学: 技术科学, 2012, **42**(10): 1163-1171.
- Li H Y, Zhang G X, Sun G Z. Simulation and evaluation of the water purification function of Zhalong Wetland based on a combined water quantity-quality model [J]. Science China Technological Sciences, 2012, **55**(7): 1973-1981.
- [20] 冯媛. 表面流人工湿地水动力-水质模拟与分析[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- Feng Y. Simulation and analysis of hydrodynamics-water quality for surface flow constructed wetland [D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [21] Qi L Y, Huang J C, Gao J F, *et al.* Modelling the impacts of bathymetric changes on water level in China's largest freshwater lake[J]. Water, 2019, **11**(7): 1469.
- [22] Wang J J, Zhao Q H, Pang Y, *et al.* Dynamic simulation of sediment resuspension and its effect on water quality in Lake Taihu, China[J]. Water Supply, 2017, **17**(5): 1335-1346.
- [23] 张惠. 冷、暖季型水生植物配置提高人工湿地脱氮效果[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- Zhang H. Improving nitrogen removal efficiency of constructed wetland by the configuration of warm and cool season plants[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.
- [24] 冯诗韵, 王飞儿, 俞洁. 基于 Matlab 软件自动化求取参数的 HEC-RAS 模型构建[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(2): 623-630.
- Feng S Y, Wang F E, Yu J. A HEC-RAS model building with parameters automatically calibrated in Matlab[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(2): 623-630.
- [25] 宫雪亮, 孙蓉, 芦昌兴, 等. 基于 MIKE21 的南四湖上级湖水量水质响应模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2019, (1): 70-76, 82.
- Gong X L, Sun R, Lu C X, *et al.* Research on the water quality and quantity response based on MIKE 21 in the upper-reach lakes of Nansi Lake[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019, (1): 70-76, 82.
- [26] Galanopoulos C, Sazakli E, Leotsinidis M, *et al.* A pilot-scale study for modeling a free water surface constructed wetlands wastewater treatment system [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2013, **1**(4): 642-651.
- [27] Nayar S, Collings G J, Miller D J, *et al.* Uptake and resource allocation of ammonium and nitrate in temperate seagrasses *Posidonia* and *Amphibolis*[J]. Marine Pollution Bulletin, 2010, **60**(9): 1502-1511.
- [28] Saha P, Shinde O, Sarkar S. Phytoremediation of industrial mines wastewater using water hyacinth[J]. International Journal of Phytoremediation, 2017, **19**(1): 87-96.
- [29] 陈德坤, 朱文博, 王洪秀, 等. WASP 水质模型在表流人工湿地中的优化与应用[J]. 工业水处理, 2018, **38**(2): 70-74.
- Chen D K, Zhu W B, Wang H X, *et al.* Optimization of WASP water quality model and its application to free water surface constructed wetland systems [J]. Industrial Water Treatment, 2018, **38**(2): 70-74.

CONTENTS

Characterization of Two Heavy Pollution Episodes in Tianjin in 2020	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3879)
Analysis of Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Chengdu Based on the MARGA	YIN Han-mei, CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3889)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} in Suqian City	MA Hong-lu, ZHAO Xin, LU Jian-gang, <i>et al.</i> (3899)
Characterization and Size Distribution of Carbonaceous Aerosols at Mountain Dinghu	LI An-na, WEN Tian-xue, HUA Wei, <i>et al.</i> (3908)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust in Anshan	LIN Zi, JI Ya-qin, LIN Yu, <i>et al.</i> (3918)
Spectral Characteristics and Source Analysis of WSOC of PM _{2.5} in Winter of Xi'an	YANG Yi, ZHANG Ya-nan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3924)
Observation of Aerosol Optical Properties and New Particle Formation in the Yangtze River Delta	DU Ying-ying, CHEN Jun, ZHANG Jia-luo, <i>et al.</i> (3932)
Component Characteristics and Source Appointment of Volatile Organic Compounds in Lianyungang City	CUI Jin-meng, WANG Ti-jian, LI Qiu-tong, <i>et al.</i> (3941)
Seasonal Pollution Characteristics and Analysis of the Sources of Atmospheric VOCs in Chengdu Urban Area	WANG Cheng-hui, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3951)
Ozone Sensitivity Analysis and Emission Controls in Dezhou in Summer	YAN Ru-sha (3961)
Inventory and Distribution Characteristics of China's Thermal Power Emissions Under Ultra-Low Reconstruction	QU Jia-bao, WANG Peng, BO Xin, <i>et al.</i> (3969)
Establishment and Spatial Distribution of Anthropogenic Ammonia Emission Inventory in Zhejiang Province	ZHAO Rui-dong, YU Xing-na, HOU Xin-hong, <i>et al.</i> (3976)
Evaluation and Screening of Dioxin Control Technology in Waste Incineration Flue Gas	ZHAO Si-lan, XI Peng-fei, GUO Feng-yan, <i>et al.</i> (3985)
Characteristics of Stable Isotopes and Moisture Sources of Two Typical Precipitation Events in Lanzhou City	HAN Ting-ting, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (3993)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of the Surface Water in Ranwu Lake Basin	ZHANG Tao, WANG Ming-guo, ZHANG Zhi-yin, <i>et al.</i> (4003)
Chemical Evolution and Formation Mechanism of Groundwater in Hetao Irrigation Area	CUI Jia-qi, LI Xian-yue, SHI Hai-bin, <i>et al.</i> (4011)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Shiqi River Basin	LI Xiao, YU Shi, LI Liang, <i>et al.</i> (4021)
Spatial-temporal Variations and Driving of Nitrogen and Phosphorus Ratios in Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	JI Peng-fei, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4030)
Spatiotemporal Variations in Nutrient Loads in River-lake System of Changdang Lake Catchment in 2016-2017	LI Xin-yan, LI Heng-peng, JIANG San-yuan, <i>et al.</i> (4042)
Influence of <i>Potamogeton crispus</i> on Lake Water Environment and Phytoplankton Community Structure	KANG Li-juan, XU Hai, ZOU Wei, <i>et al.</i> (4053)
Phylogenetic Processes and Key Driving Factors of Bacterial Communities in Jinze Reservoir	LIU Ming-kun, TONG Jun, ZHU Hui-feng, <i>et al.</i> (4062)
Distribution Characteristics of Per-/polyfluoralkyl Substances in River Sediments Around Typical Fluorine Industrial Parks	SUN Lin-ting, ZHAO Zhen, TANG Jian-hui (4069)
Microplastics-Induced Shifts of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in River Water	ZHOU Xin-yuan, WANG Yan-zi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4076)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Lianhua Reservoir	LIAO Jie, WEI Xiao-qin, XIAO Yan-qin, <i>et al.</i> (4081)
Intraspecific Variation in Growth and Alkaline Phosphatase Activity of <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> Strains in Response to Different Phosphorus Concentrations and Sources	YE Jin-mei, ZHAO Li, LUO Xu, <i>et al.</i> (4088)
Simulation of Water Quality Response of Guishui River Wetland Plants and Water Diversion	LI Ya-juan, DU Yan-liang, BI Er-ping, <i>et al.</i> (4095)
Performance Assessment of Field-scale Dry Grass Swale with Shallow Substrate Layer	ZHANG Jia-wei, LI Tian, ZHANG Ting-xiu (4105)
Transition of Particulate Pollutant in the Parcel-based Catchment of Sponge City	LI Jia, XIE Wen-xia, JIANG Zhi-hui, <i>et al.</i> (4113)
Adsorption of Sb(V) in Water by Natural Pyrite: Performance and Mechanism	SHI Song, WU Qian-yuan, LI Xin-zheng, <i>et al.</i> (4124)
Treatment of Wastewater Containing Naphthalene Sulfonic Acid by Persulfate Oxidation	ZHANG Jin-men, LU Jun, LIU Xiao-chen, <i>et al.</i> (4133)
Effect of Temperature on Performance and Microbial Community Structure of Anaerobic Biofilter-Treated Domestic Wastewater	LIU Zhi-bin, LIU Xiu-hong, ZHOU Tong, <i>et al.</i> (4141)
Start-up and Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal in ABR-MBR Coupling Process	MIAO Xin-nian, WANG Qian, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (4150)
Adaptability of Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Granular Sludge to Low-Strength at Low Temperature	LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4161)
Discussion on Key Issues of Geochemical Monitoring of Soil Heavy Metal in Xiongan New District	GUO Zhi-juan, ZHOU Ya-long, YANG Zheng, <i>et al.</i> (4169)
Quantitative Assessment of Human Health Risks Based on Soil Heavy Metals and PAHs Sources: Take a Polluted Industrial Site of Beijing As an Example	WU Zhi-yuan, ZHANG Li-na, XIA Tian-xiang, <i>et al.</i> (4180)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals at Township Scale in the High Background of Heavy Metals, Southwestern, China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, WANG Hui-yan, <i>et al.</i> (4197)
Potential of Accumulation and Application of Dominant Plants in Lanping Lead-zinc Mine, Yunnan Province	ZHANG Long, ZHANG Yun-xia, SONG Bo, <i>et al.</i> (4210)
Key Growth Stage of Pb Accumulation in Rice Through a Hydroponic Experiment with Pb Stress	HU Yu-dan, ZHOU Hang, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Nutrient Regulation and Control on Cd Accumulation Efficiency of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Field Conditions	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (4226)
Effects of <i>Eucalyptus</i> Branches Biochar Application on Soil Physicochemical Properties of Acidified Soil in a <i>Eucalyptus</i> plantation in Northern Guangxi	DAUN Chun-yan, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (4234)
Dynamic Effects of Direct Returning of Straw and Corresponding Biochar on Acidity, Nutrients, and Exchangeable Properties of Red Soil	YANG Cai-di, LU Sheng-gao (4246)
Different Responses of Soil Microbial Community Structure to Irrigation with Treated Wastewater from Domestic and Industrial Sources	WANG Yan, CHENG Dong-hui, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (4253)
Effects of Manure and Organic Fertilizer Application on Soil Microbial Community Diversity in Paddy Fields	LI Peng, WU Jian-qiang, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Land Use Changes on Soil Bacterial Community Diversity in the Riparian Wetland Along the Downstream of Songhua River	ZHANG Tuo, XU Fei, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (4273)
Response of Soil Bacterial Community Structure to Precipitation Change in Grassland of Loess Plateau	LI Na, WANG Bao-rong, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (4284)
Effect of Land-use on Soil Fungal Community Structure and Associated Functional Group in Huixian Karst Wetland	CHENG Yue-yang, JIN Zhen-jiang, WANG Xiao-tong, <i>et al.</i> (4294)
Interactions of Fungi Community and Relationship with the Carbon Structure in Arable Mollisols with Gradient Organic Matter Content	SHANG Qiu-tong, HUANG Rui-lin, NI Hao-wei, <i>et al.</i> (4305)
Diversity of Soil Eukaryotic Microbes in Different Succession Stages in Maolan Karst Forest of Guizhou	WANG Xian, LONG Jian, LI Juan, <i>et al.</i> (4314)
Adsorption of Cadmium and Arsenic by Corn Stalk Biochar Solidified Microorganism	LIU Yu-ling, ZHU Hu-cheng, PENG Ou, <i>et al.</i> (4322)
Mechanism of Inorganic Nitrogen Transformation and Identification of Nitrogen Sources in Water and Soil	LIANG Xing, SUN Li-qun, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4333)