

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

**2017**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次(卷终)

京津冀区域 PM<sub>2.5</sub> 污染相互输送特征 ..... 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)

顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应 ..... 许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)

基于多源数据的 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空分布预测与制图 ..... 肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)

华东区域 PM<sub>2.5</sub> 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估 ..... 郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)

南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征 ..... 张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)

菏泽市 PM<sub>2.5</sub> 碳组分季节变化特征 ..... 刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)

辽宁典型城市道路扬尘 PM<sub>10</sub> 中水溶性无机离子组分特征及来源解析 ..... 张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)

天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征 ..... 姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)

高原城市昆明公路隧道大气中 PM<sub>2.5</sub> 理化特征分析 ..... 王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)

2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析 ..... 段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)

不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响 ..... 楼狄明, 张子骏, 刘继跃, 谭丕强, 胡志远 (4983)

ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响 ..... 董小芳, 杨华玮, 张彦, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)

我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量 ..... 程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)

新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征 ..... 杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)

三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价 ..... 卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)

三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征 ..... 程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)

太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程 ..... 李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)

典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例 ..... 连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)

缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征 ..... 马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)

基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法 ..... 熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)

北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险 ..... 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)

深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征 ..... 凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)

供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析 ..... 刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)

低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化 ..... 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)

臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨 ..... 刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)

碱化过一硫酸盐降解水中环丙沙星 ..... 葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)

MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯 ..... 王九妹, 关泽宇, 王金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)

常温下加装脱硫装置的 MCAnMBR 处理高硫酸盐有机废水试验 ..... 徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)

载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收 ..... 成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)

不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能 ..... 马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)

ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化 ..... 吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)

海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性 ..... 周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)

游离氨(FA)对氨氧化过程氨逃逸影响试验 ..... 孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)

西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构 ..... 康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)

厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征 ..... 汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)

SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化 ..... 岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)

活性污泥中硝化螺菌(Nitrospira)的富集及其动力学参数 ..... 姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)

pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响 ..... 张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)

接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响 ..... 张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)

活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比 ..... 孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)

长期暴露下纳米 TiO<sub>2</sub> 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响 ..... 李慧婷, 崔福义 (5229)

长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征 ..... 赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)

不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异 ..... 张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)

有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征 ..... 何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)

上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价 ..... 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)

大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析 ..... 宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)

工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应 ..... 杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)

上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险 ..... 周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)

基施硅肥对土壤镉生物有效性及水稻镉累积效应的影响 ..... 高子翔, 周航, 杨文毅, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)

水稻对气态单质汞的吸收与挥发 ..... 尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)

麦田 O<sub>3</sub> 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算 ..... 赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)

缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果 ..... 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)

生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)

成都平原不同类型沟渠 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放通量特征及其影响因素 ..... 冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)

河流 CO<sub>2</sub> 与 CH<sub>4</sub> 排放研究进展 ..... 王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)

《环境科学》第 38 卷(2017 年)总目录 ..... (5367)

《环境科学》征稿简则(4950) 《环境科学》征订启事(5031) 信息(4923, 5105, 5161)

# 基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法

熊鸿斌, 陈雪, 张斯思

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009)

**摘要:** 为寻求提高污染河流水质改善效果的方法, 本研究选择中国多坝闸重污染河流颍河为研究对象, 针对引江济淮工程颍河段的水质改善要求, 以颍河主要的污染物高锰酸盐指数、氨氮为指标, 提出了应用 MIKE11 建立试验河流一维河网水动力和水质模型, 采用数值模拟的方法, 试验研究河流水质改善的最优技术方法, 模拟试验主要进行了补水流量、补水水质、补水位置和补水方式等措施对改善颍河水质效果的影响。模拟结果表明: 用 MIKE11 模型中水动力模块 (HD) 和对流扩散模块 (AD) 并结合降雨径流模块 (NAM) 来进行污染河流水质改善是可行的, 即补水流量为河流本底流量的 10%, 分别对补水点 1 采用 III 类水, 补水点 2 和补水点 3 采用 IV 类水进行补给, 补给效果最佳, 高锰酸盐指数和氨氮的去除率分别为 72.3% 和 55.7%, 使研究区颍河 85% 以上的河段达到 IV 类水水质标准, 为河流污染控制提供了一种新方法。

**关键词:** MIKE11 模型; 补水; 水质改善; 污染河流; 方法

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-5063-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201703257

## Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model

XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In order to seek ways to improve the quality of polluted rivers, this study selected the heavily polluted Yinghe River in China for study, as there is a requirement to improve water quality from the Yangtze River to the Yinghe River. The permanganate index and ammonia nitrogen are the main pollutant targets for the Yinghe River. This study applies MIKE11 to set up a one-dimensional model of the hydrodynamics and water quality using a numerical simulation method to determine the optimal method for river water quality improvement. The simulation experiment tests the influence of factors, such as the supplementary water flow, replenishment water quality, water replenishment position, and method of water supply to improve the water quality. The simulation results indicate that water quality improvement can be simulated with the hydrodynamic module (HD) and the convective diffusion module (AD) combined with the rainfall runoff module (NAM) in the MIKE11 model. In practice, the option with the best replenishment effect is to use class III at point 1 and to use class IV at points 2 and 3 when the supplementary water flow rate is 10% of the river bottom flow. The reduction in permanganate index and ammonia nitrogen was, respectively, 72.3% and 55.7%, and over 85% of the study area reached the standard of class IV water quality. This provides a new method for river pollution control.

**Key words:** MIKE11 model; replenishment; water quality improvement; polluted rivers; method

跨流域调水是我国水资源优化配置的重要组成部分之一, 自新中国成立, 修建了一系列跨流域调水工程, 如引滦入津、引黄济青、南水北调等。引江济淮工程是一项以工业和城市供水为主, 兼有农业灌溉补水、生态环境改善和发展江淮航运等综合效益的大型跨流域调水工程。补水是改善河流水质的有效辅助措施, 国内关于对改善流域水质的研究时间较短, 且研究方法侧重于技术修复和补水。吴蕾<sup>[1]</sup>提出以巢湖水作为入湖补水水源, 经处理后作为景观河道的生态补水, 补水成效显著。张帆<sup>[2]</sup>从补水水源、补水规模等方面进行方案比选, 得出最佳补水流量。补给方式(位置、水量和水质)影响河流的水动力条件, 河流水质模型模拟是解决该类问题的一种有效手段<sup>[3]</sup>。

目前水质模型应用较多的有 WASP、QUAL2K、EFDC、MIKE 等模型, 主要应用于污染物的模拟预测<sup>[4-6]</sup>、水量模拟<sup>[7,8]</sup>、水质预警<sup>[9]</sup>等研究领域。朱文博等<sup>[10]</sup>应用 WASP 水质模型评价不同时段河道曝气对河流水质的提升作用, 最终确定河道曝气最优条件。丁一等<sup>[11]</sup>建立了 EFDC 水动力模型, 对 8 种不同的调水优化情景进行分析评价, 得到了最佳的调水流量。钱海平等<sup>[12]</sup>应用 MIKE 系列软件, 建立了能客观反映感潮河网特征的水动力和水质模型, 计算出达到水质改善目标应削减的污染负荷。

收稿日期: 2017-03-29; 修订日期: 2017-06-09

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07204-007); 安徽省省级环保科研项目(2015-13)

作者简介: 熊鸿斌(1963~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为水污染处理技术, E-mail: xhb6324@sina.com

高学琰等<sup>[13]</sup>构建河网一维水动力水质耦合模型,可实现江北城区河网水系景观生态补水的合理配置.目前国内对污染河流的补水研究侧重于补水后水体水质改善效果评价<sup>[14]</sup>,应用 MIKE11 模型中水动力模块(HD)和对流扩散模块(AD)并结合降雨径流模块(NAM)对污染河流的水质改善方法的研究在国内鲜少见到.且最佳补水位置和补水的流量的确定是该领域有待深入探讨的问题之一.因此,本文以引江济淮江水北送段重污染河流的典型代表——颍河为研究对象,选取颍河线路周口浅口闸至颍上闸为模拟河段,以引江济淮的调水水质为要求,以高锰酸盐指数、氨氮为研究目标,应用 MIKE11 模型建立水动力模块、对流扩散模块和降雨径流模块,采用数值模拟的方法,分析不同补水方式(位置、流量和水质)对污染河流的水质改善效果,以期引江济淮工程江水北送段颍河的水质改

善提供技术支持,并为类似地区流域水污染治理和水量调控方案提供参考和借鉴,该成果的结论对于中国的河流水质改善方法研究有着重要的应用和参考价值.

## 1 研究区域概况

### 1.1 研究范围

颍河发源于河南省登封县嵩山,经周口市、安徽省阜阳市,在颍上县沫河口注入淮河,是淮河最大的支流.颍河流域地处亚热带和暖温带的过渡区域,年降雨量 500~1 000 mm,降雨主要集中于夏季.颍河主河道沿程设有周口浅口闸、阜阳闸和颍上闸等拦河节制闸蓄水工程,主要有沙河、汾泉河等支流.

本研究区域范围是从颍河的周口浅口闸至颍上闸的汇水面积.研究区域如图 1 所示.

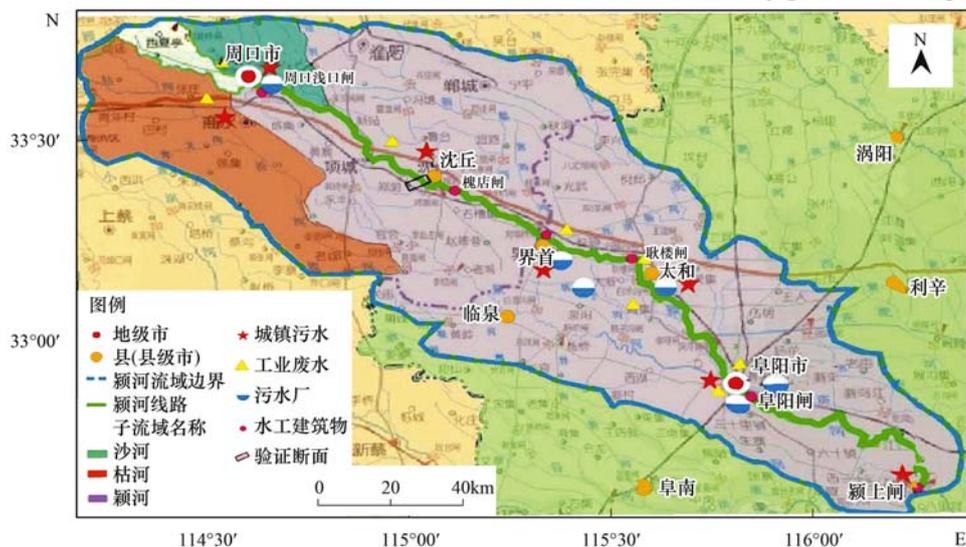


图 1 研究区域示意

Fig. 1 Map of the research area

### 1.2 颍河流域现状水质

根据 2016 年的水质监测数据,颍河中上游水质均处于劣 V 类,下游处于 IV~V 类,主要污染物质是高锰酸盐指数和氨氮.颍河是引江济淮工程江水北送段的受水区与供水区,其水质要求应在 IV 类水以上.由于大量工业废水和生活污水排入河道,在实际的监测数据中,平水期和丰水期基本达标,但枯水期颍河氨氮浓度均值为  $3.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,相对于 IV 类水质标准超标了 120%,故不满足调水水质要求.

## 2 水质模型的建立

MIKE11 是适用于河口、河流、灌溉渠道以及

其他水体模拟的一维水动力、水质和泥沙运输是专业工程软件.本研究采用 MIKE11 中的水动力模块(HD)和对流扩散模块(AD)并结合降雨径流模块(NAM),建立颍河水质模型.

### 2.1 数学模型

#### 2.1.1 水动力模块(HD)

水动力模块(HD)中描述一维非恒定水流运动规律的物质和动量守恒方程即圣维南方程组,用来模拟河流或河口的水流状态,按顺序交替布置水位点和流量点采用 Abbot 六点隐式差分格式求解.

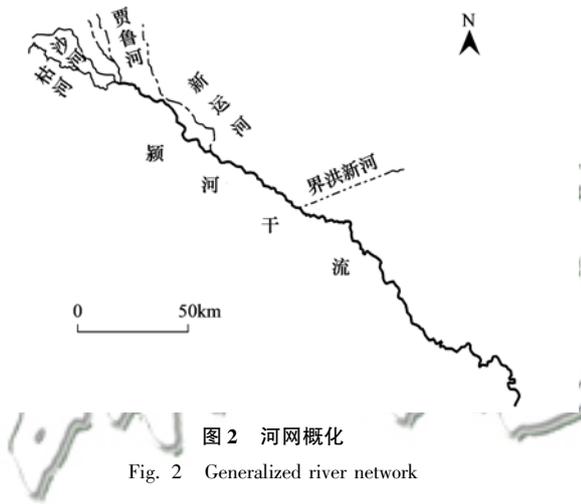
#### 2.1.2 对流扩散模块(AD)

对流扩散模块(AD)是利用 HD 模块生成的水

动力条件，对水体中的可溶性物质和悬浮物质应用对流扩散方程进行计算. AD 模块可以准确计算模拟污染物的运输过程.

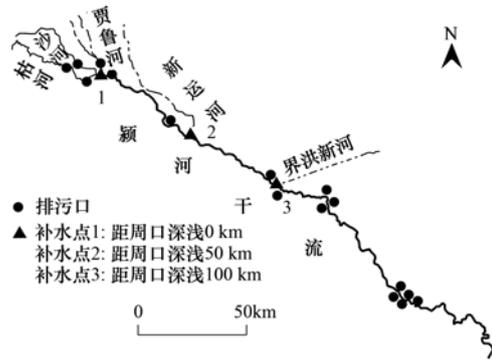
### 2.2 河网概化

在掌握颍河河网水文资料的基础上，能基本反映天然河网的水力特性，遵循于实际河网输水能力、调蓄能力等保持一致原则. 在对颍河河网概化中，根据地形条件及水流情况，着重考虑主要的河道，水量较小以及对整个河网影响不大的短小河段不予考虑. 对颍河干流水质影响较大的支流，及子流域内有概化排污口的河道保留，支流及排污口均概化到该支流汇入颍河的节点处，最终河网概化为以颍河为主干河道，沙河和枯河作为支流，其中研究区颍河沿线有支流贾鲁河、新运河和界洪新河，研究区河网概化如图 2 所示，排污口和补水点如图 3 所示.



### 2.3 数据准备

本研究建模水动力模块需要的数据包括颍河流域图、颍河实测断面的起始距及河床高程数据、闸



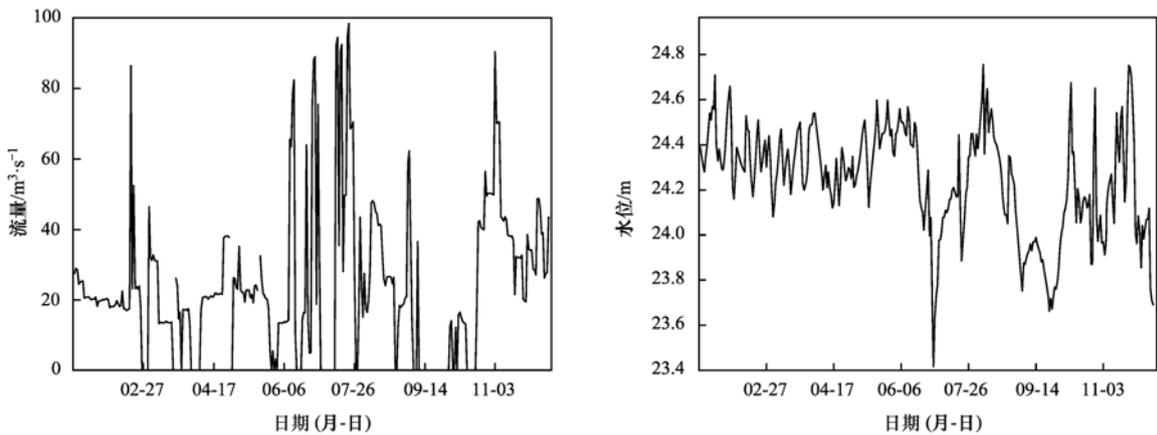
门构筑物参数、研究区颍河上下游断面的流量和水位数据. 对流扩散模块在以上基础上需要断面水质实测数据、研究区颍河沿线的排污口的水质水量数据. 降雨径流模块需要每日降雨量和每日蒸发量数据. 其中水文数据来源于安徽省水利部门和安徽省水文遥测信息中心，水质数据和污染源数据来源于 2016 年安徽省环境统计数据 and 安徽省环境保护局发布的重点监控企业监测数据.

### 2.4 模型的边界条件

模型的上下边界分别设在河南省周口市周口浅口闸和安徽省颍上县颍上闸，水动力模型以每日流量和水位数据设置，上边界采用流量-时间数据，下边界采用水位-时间数据. 水质模型的边界条件以 2016 年每月一次的水质监测数据设定，其中上边界入流流量数据与下边界出流水位数据如图 4 所示，上边界条件入流污染物浓度如图 5 所示.

由于颍河的水质较差，取水量比较小，因此模拟只设置河段两端边界条件，假定研究区域无取水点没有流量汇出.

为提高模型的计算精度，结合降雨径流模块，



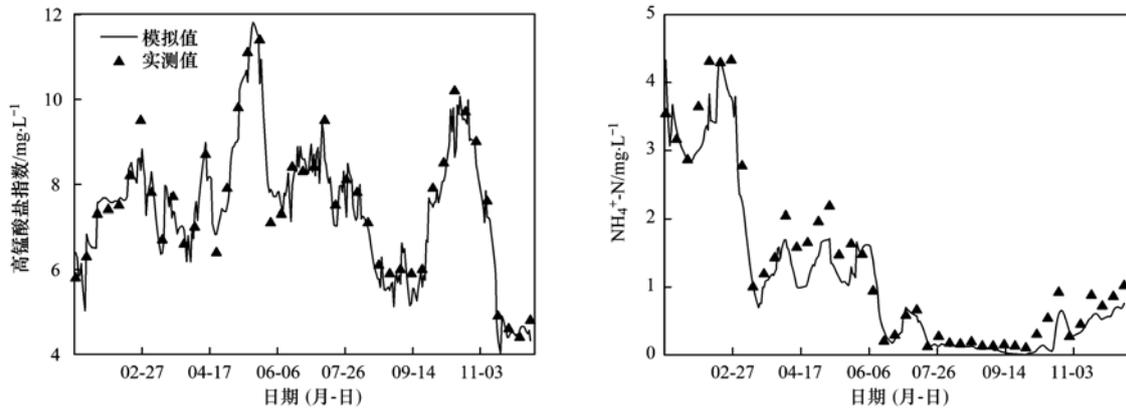


图5 上边界条件入流污染物浓度

Fig. 5 Pollutant concentration of the upper boundary

将研究区域划分为多个子流域并模拟每个子流域的降雨径流,本文收集到3个雨量站(周口浅口闸、阜阳闸、颍上闸),两个蒸发站(界首站、阜阳闸)的资料,各子流域采用区域范围内或最近雨量站的日降雨量和日蒸发量来计算该子流域的日均降雨量和日均蒸发量。

研究区域河段污染源包括点源污染和面源污染,点源污染包括城镇生活污水、工业废水,沿线存在15个概化点源排污口,其中工业企业直排污水2 946.11万t,高锰酸盐指数2 282 t,氨氮760 t,城镇生活直排污水16 714.16万t,高锰酸盐指数35 843 t,氨氮5 376 t,及6个污水厂排污口排放污水3 784.32万t,高锰酸盐指数1 148 t,氨氮116.64 t,模型数据以恒定值设定,分布图如图1所示。面源污染包括随地表径流进入河流的污染负荷及农村生活与农田面源负荷以及城市径流污染,根据2016年环境统计数据及其他补充资料计算,2016年随地表径流汇入到研究区域河段的高锰酸盐指数13 723.5 t,氨氮为2 917 t,模型数据以每日流量和污染物浓度值按分布式污染源设定,污染负荷如表1所示。

## 2.5 模型的参数及率定

### 2.5.1 水动力学模块(HD)

依据2016年水文数据,将研究区域颍河河段划分为周口浅口闸—界首、界首—阜阳闸、阜阳

闸—颍上闸,采用试错法对水量模型进行率定,需率定的参数为曼宁系数即河床的粗糙度,得到结果如表2所示。

表1 面源污染负荷

污染源	污水量 /万t·a <sup>-1</sup>	高锰酸盐指数 /t·a <sup>-1</sup>	氨氮 /t·a <sup>-1</sup>
农村生活	25 594.4	6 961	1 064
农业面源	—	4 860	1 739
城市径流	—	1 902.5	114.1
合计	25 594.4	13 723.5	2 917.1

表2 颍河段曼宁系数

位置	周口浅口闸—界首	界首—阜阳闸	阜阳闸—颍上闸
数值	0.018	0.017	0.022

由流量、水位实测与模拟数据对比分析,得到阜阳闸的流量相对误差为8.7%,界首站的水位相对误差为2.8%,模拟效果较为精确,说明参数选取合理,可准确反映水动力变化过程。阜阳闸流量和界首站水位实测值与模拟值对比如图6所示。

### 2.5.2 对流扩散模块(AD)

AD模块中需率定的参数为高锰酸盐指数和氨氮的扩散系数和污染物的衰减系数,经率定扩散系数取值为 $8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,衰减系数根据文献[15~20]给出的推荐值率定,得到率定结果如表3所示。

表3 污染物在颍河段综合衰减系数

Table 3 Degradation coefficient for the quality of pollution in the Yinghe River

项目	周口浅口闸—界首	界首—阜阳闸	阜阳闸—颍上闸
高锰酸盐指数/d <sup>-1</sup>	0.026	0.029	0.031
氨氮/d <sup>-1</sup>	0.012	0.015	0.027

选择河南周口沈丘为模型的验证断面,验证断面位置如图1所示,用2016年的高锰酸盐指数和

氨氮模拟值与实测值进行比对,结果如图7所示。

根据图7高锰酸盐指数和氨氮实测值与模拟值

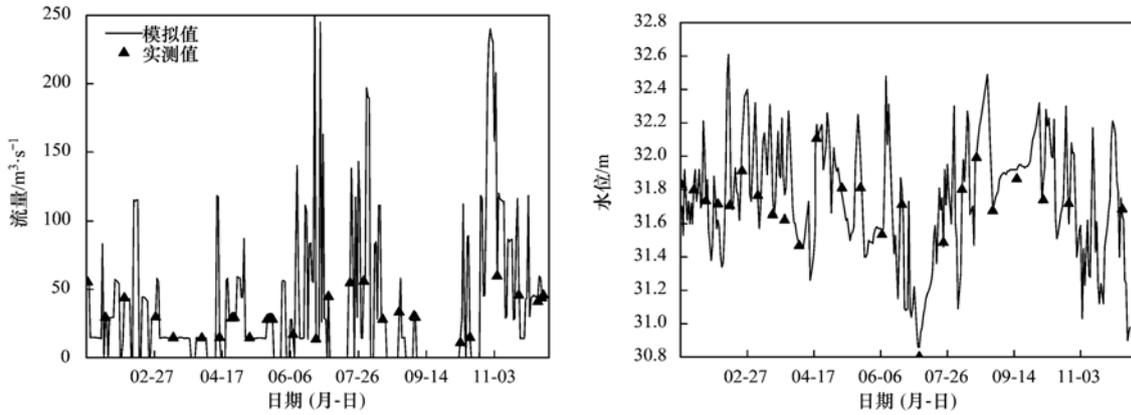


图 6 流量、水位模拟值与实测值对比

Fig. 6 Comparison of simulated and observed flow and water level

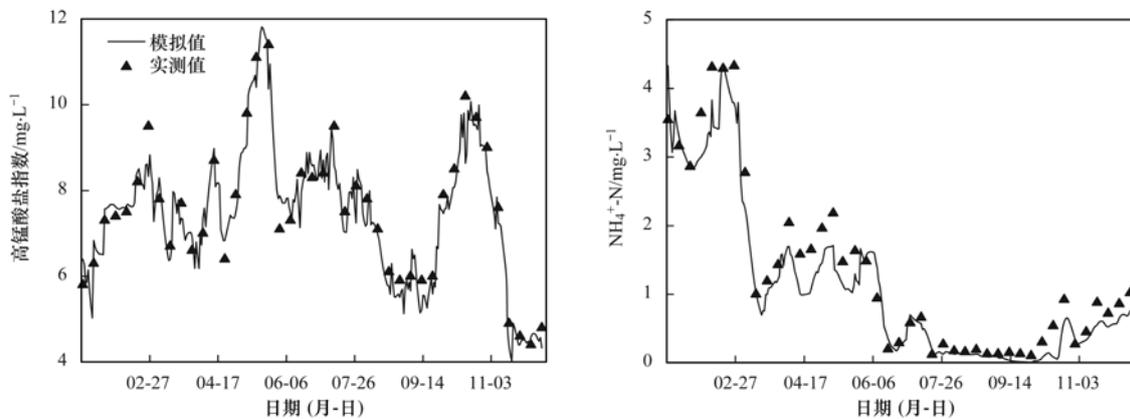


图 7 高锰酸盐指数和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N实测值与模拟值比较

Fig. 7 Comparison of stimulated and measured values for permanganate index and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N concentration

比较分析，高锰酸盐指数和氨氮的相对误差分别为 10.4% 和 12.95%，说明监测站点的污染指标 高锰酸盐指数和氨氮模拟结果与实测结果较为一致，表明模型基本能够描述颍河的水动力、水质时空演变规律。

2.5.3 降雨径流模块(NAM)

NAM 模块参数包括地表储水层最大含水量  $U_{max}$ 、土壤层或根区最大含水量  $L_{max}$ 、壤中流排水常数  $C_{KIF}$ 、坡面流系数  $C_{QOF}$ 、坡面流临界值 TOF、坡面流和壤中流时间常量  $CK_{12}$  等。根据国内外相关研究<sup>[21,22]</sup>，模型经率定得到  $U_{max} = 10 \text{ mm}$ 、 $L_{max} = 100$

$\text{mm}$ 、 $C_{KIF} = 500 \text{ h}$ 、 $C_{QOF} = 0.4$ 、 $\text{TOF} = 0$ 、 $CK_{12} = 30 \text{ h}$ 。

3 补水情景模拟与讨论

3.1 补水方案

为保证引江济淮工程的输水水质，补水是改善河流水质的有效辅助措施<sup>[23]</sup>，针对颍河的地理环境和污染特征，提出 4 种通过补水改善颍河水质的方法进行探讨分别是：补水流量、补水位置、补水水质、补水方式，探究 4 种方法对改善颍河水质的效果研究。根据模拟试验得到的结果，将试验方案整理如表 4 所示。

表 4 补水方案

Table 4 Replenishment program

补水方案	试验变量	试验条件(不变)
方案一(补水流量)	$0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ; $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ; $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ; $6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ; $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	用IV类水在点 1 处连续补给 30 d
方案二(补水位置)	点 1; 点 1、点 2; 点 1、点 2、点 3	用IV类水以流量 $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 连续补给 30 d
方案三(补水水质)	III类水; IV类水	点 1、点 2、点 3 处以流量 $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 连续补给 30 d
方案四(补水方式)	点 1 III类水、点 2、点 3 IV类水; 点 1、点 2 III类水、点 3 IV类水; 点 1、点 2、点 3 III类水; 点 1、点 2、点 3 IV类水	以流量 $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 连续补给 30 d

### 3.2 治污前水质模拟

为研究不同的补水方法对水体中高锰酸盐指数和氨氮浓度的改善情况,需了解现状水质,并与各种情景下补水的效果进行对比。本研究选择水质最差的月份即非汛期(1月)的水质变化进行对比,颍河周口浅口闸至颍上闸沿程污染物浓度分布见图

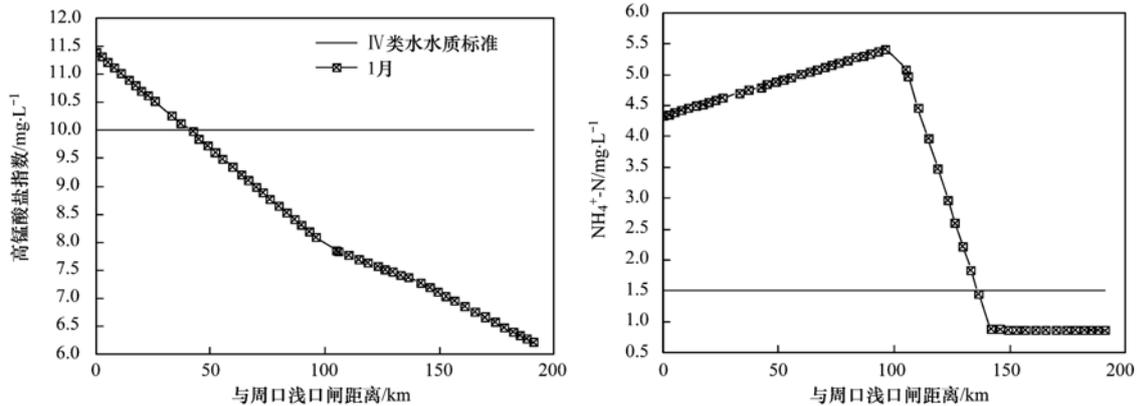


图8 污染物浓度分布

Fig. 8 Distribution of pollutant concentration

### 3.3 补水流量

为改善水质,关于最佳补水流量确定的研究鲜少看到,根据现阶段对补水流量的研究<sup>[24]</sup>和研究区域颍河的水文条件,对 $0.1 \sim 10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 补水流量进行对比分析,考虑到经济成本,选取IV类水进行补给,补给点越靠近上游对河流水质的改善作用越大<sup>[25]</sup>,选取距周口浅口闸0 km处为补水点1,连

续补给30 d。其中1月颖河流量为 $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,在距周口浅口闸0~50 km左右,高锰酸盐指数浓度均值为 $10.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,与IV类水水质标准对比超标了7%;在距周口浅口闸0~135 km左右,氨氮浓度均值为 $4.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,与IV类水水质标准对比,超标了195%,污染物浓度很高,水质很差。

续补给30 d。

因此进行模拟试验时,颖河流量为 $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,补水水质为IV类水,高锰酸盐指数和氨氮浓度分别为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、补水点距周口浅口闸0 km处不变,研究不同的补水流量 $0.1 \sim 10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,对污染河流水质改善的效果,得到的结果如图9所示。

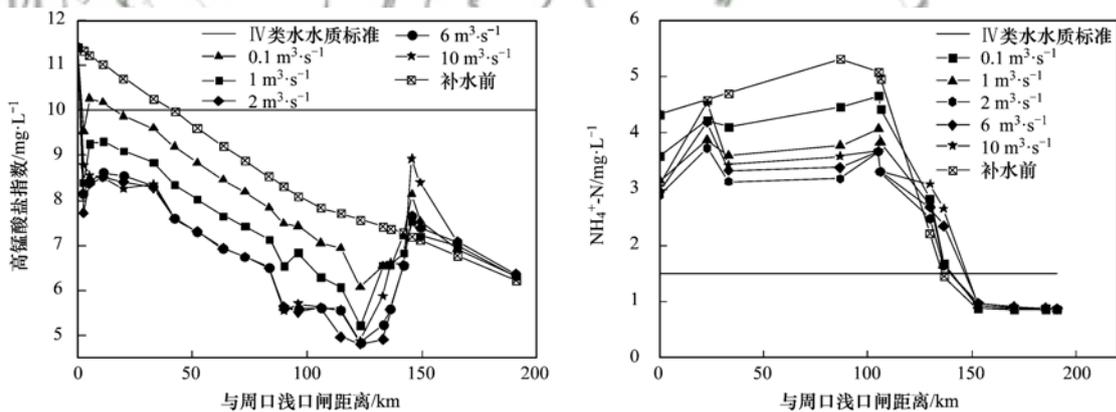


图9 不同流量补水对河道污染物浓度的影响

Fig. 9 Impact of different replenishment flows on water pollutant concentration

不同流量补水对污染物浓度影响的模拟结果(图9)分析如下。

(1) 当补水流量为 $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 时,高锰酸盐指数浓度在距周口浅口闸5 km开始到125 km的河段有下降的趋势,从125~150 km处左右高锰酸盐指数浓度升高,从150~200 km又逐渐降低,平均浓度降低 $0.58 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,去除率为6.7%;氨氮浓度从

距周口浅口闸0~100 km处缓慢上升,从100~150 km逐渐下降后趋于平稳,平均浓度降低 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,去除率为6.45%。当补水流量为 $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ,高锰酸盐指数浓度沿线逐渐降低后逐渐升高至150 km达到峰值后下降趋于平缓,平均浓度降低 $1.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,去除率为13.5%;氨氮浓度沿线升高后下降趋于平缓,平均浓度降低 $0.45$

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 去除率为 14.6%。当补水流量为 2、6 和  $10\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  时, 高锰酸盐指数和氨氮浓度变化趋势与前面两种情景相同, 高锰酸盐指数平均浓度降低分别为 1.79、1.71 和  $1.51\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 去除率分别为 20.5%、19.6% 和 17.3%; 氨氮平均浓度降低 0.65、0.51 和  $0.39\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 去除率分别为 20.9%、16.3% 和 12.7%。

(2) 5 种不同流量补水情景下, 模拟污染物去除率由小到大分别为:  $0.1\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1} < 1\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1} < 10\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1} < 6\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1} < 2\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , 说明当流量为  $2\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  时, 补水效果最佳, 研究区颍河沿线 30% 的水质达到 IV 类水水质标准。由于上游来水氨氮浓度较大, 且沿线有生活污水排放, 仍有 70% 的河段未达标, 仅单点水质改善效果并不理想。

(3) 中下游高锰酸盐指数浓度上升, 由于提高补水流量可以在短时间内迅速降低河流的污染物浓度, 也因此携带了更多的污染物浓度, 因此高锰酸盐指数浓度主要受补水稀释和污染物扩散降解共同作用的结果。

(4) 当补水流量为 0.1、1、2、6 和  $10\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , 连续补水 30 d 后, 带来高锰酸盐指数污染负荷分别为 2592、25920、51840、155520 和 259200 t, 氨氮污染负荷分别为 388.8、3888、7776、23328 和 38880 t, 上游来水的高锰酸盐指数和氨氮污染负荷分别为 59.0976 万 t 和 2.2912 t, 不同补水流量情景下, 污染物负荷从小到大排列为:  $0.1\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1} < 1\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1} < 2\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1} < 6\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1} < 10\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , 当补水流量越大时, 带来的污染物负荷也较大, 导致水体的自净能力减弱, 水质改善效果也较差, 当补水流量占本底流量 10% 时, 水质改善效果最好。

(5) 从成因上分析: 影响补水流量对污染河流改善的原因可能有: 补水量的总量(涉及到补水时

间)、单位时间补水量与河流本底流量的比例、河流水体的流速、河流断面的形状及搅拌混合作用强弱等因素, 本试验研究案例, 在其它条件不变时获得上述结论。

对于颍河由于其本底流量为  $20\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , 当补水流量为  $0.1\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  和  $1\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  时, 虽然调入颍河的补水带来的污染负荷较小, 但流量较小占本底流量比例低, 在当前自然的河流流速条件下和上游来水的高锰酸盐指数和氨氮污染负荷分别为 59.0976 万 t 和 2.2912 t 时, 搅拌条件差, 不足以达到完全混合, 可能会形成层流, 对河流的扰动小, 通过河流的自净作用(物理、化学和生物作用), 经过一定的时间后, 水质改善的效果较差; 反之, 当补水流量为  $6\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  和  $10\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  时, 流量占本底流量比例大, 搅拌条件好于前者, 混合效果好, 但调入颍河的补水带来的污染负荷较大, 综合的效果也是水质改善的效果不理想。

### 3.4 补水位置

根据研究区 1 月颍河沿线的污染物浓度分布, 中上游河段污染物浓度特别是氨氮较高。且在研究区颍河沿线有支流贾鲁河、新运河和界洪新河, 水质为 IV 类水, 因此根据河流的实际情况, 利用河网的分布以及中上游河段污染物特性确定补水点位置。

进行模拟试验时, 颍河本底流量为  $20\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , 补水水质为 IV 类水, 高锰酸盐指数和氨氮浓度分别为  $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $1.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 研究不同的补水点情景一: 在补水点 1 处, 补水流量为  $2\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ; 情景二: 补水点 1 处和补水点 2 处, 补水流量各为  $2\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ; 情景三: 在补水点 1、补水点 2 和补水点 3 处, 补水流量各为  $2\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , 连续补水 30 d, 对污染河流水质改善的效果, 得到的结果如图 10 所示。

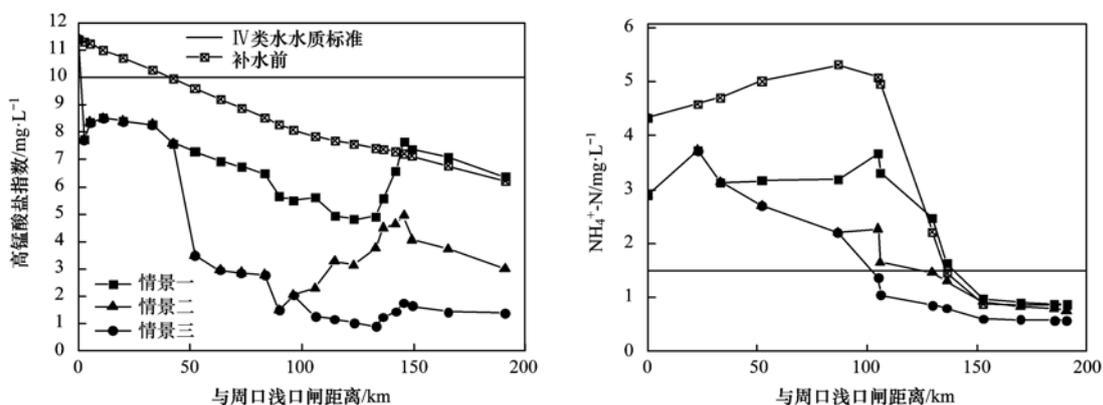


图 10 不同补水点补水对河道污染物浓度的影响

Fig. 10 Impact of different replenishment points on water pollutant concentration

不同补水位置补水对污染物浓度影响的模拟结果(图 10)分析如下。

(1) 情景一对补水点 1 处补水, 高锰酸盐指数浓度平均浓度降低  $1.79 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 去除率为 20.5%; 氨氮平均浓度降低  $0.65 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 去除率为 20.5%。情景二对补水点 1 和补水点 2 处补水, 高锰酸盐指数浓度从 50 km 左右迅速下降后缓慢升高至 150 km, 后又趋于平缓, 平均浓度降低  $3.81 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 去除率为 43%; 氨氮浓度从 25 km 有下降的趋势至 100 km 左右略有上升, 说明此段有生活污水的排放, 后又缓慢下降, 平均浓度降低  $1.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 去除率为 36.8%。情景三对补水点 1、补水点 2 和补水点 3 处补水, 高锰酸盐指数和氨氮浓度在 100 km 之后均有下降的趋势, 平均浓度降低  $4.86 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $1.43 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 去除率分别为 55.6% 和 44.1%。

(2) 3 种不同情景下, 模拟污染物去除率由小到大分别为: 情景一 < 情景二 < 情景三, 说明多点补水效果良好, 能使研究区颍河 50% 的河段达到 IV 类水水质标准。在补水点附近污染物浓度有升高的趋势, 说明补水的同时, 也带来了一定浓度的污染物, 随着污染物向补给点上下游扩散降解, 高锰酸盐指数和氨氮的浓度增幅减弱, 并在河流自净能力的作用下, 颍河的水质得到改善。

(3) 情景三的 3 点补水(图 9)与对 0 km 处单

点补水且补水流量为  $6 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (图 9)相对比, 补水总量在相同的情况下, 多点补水优于单点补水, 多点补水可有效削弱因集中补水对补给点附近造成的污染程度, 促进污染物的稀释扩散作用。且多点补水可以对补水点附近的污染源进行直接稀释, 迅速降低河流的污染物浓度, 加速污染物的稀释扩散。

### 3.5 补水水质

根据以上研究发现, 用 IV 类水进行补给, 尽管会降低污染物的浓度, 使河道的水质得到改善, 但 IV 类水中高锰酸盐指数和氨氮的浓度依然较高, 仍有 50% 的河段不达标, 因此本研究选取不同的水质进行补水, 考虑到研究区颍河的地理位置, 河网周边存在 III 类水水源, 在补水点 1 附近有平原水库, 补水点 2 和补水点 3 附近有中小型灌区水库, 因此研究区内有 III 类水水源调用的可能, 这种条件对于全国不同的大小河流情况不一定相同, 用这种 III 类水水源来补水经济效果虽然不一定好, 但补水效果好, 作为一种可能, 把这种情况列为研究的情景之一。

因此进行模拟试验时, 颍河本底流量为  $20 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , 补水水质为 IV 类水, 高锰酸盐指数和氨氮浓度分别为  $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、补水流量在补水点 1、补水点 2 和补水点 3 处均为  $2 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  不变, 研究不同的补水水质 III 类水和 IV 类水, 连续补水 30 d, 得到的结果如图 11 所示。

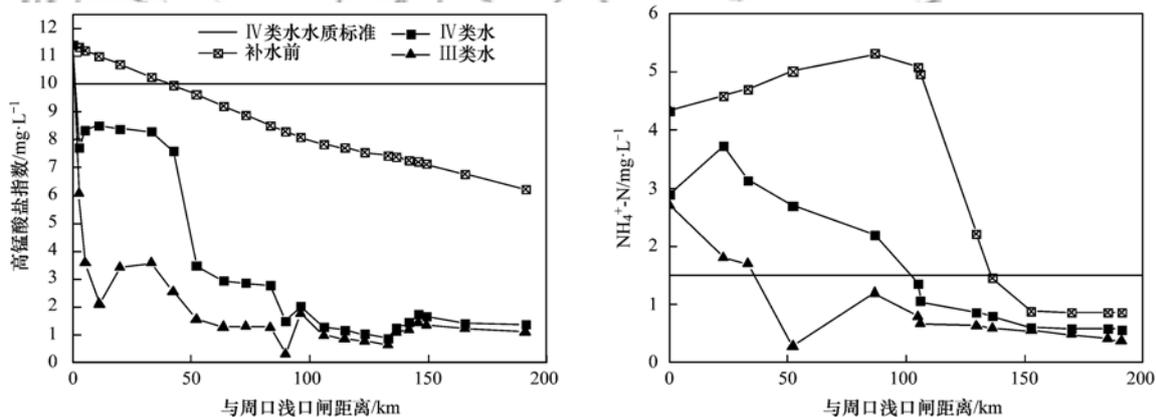


图 11 不同水质补水对河道污染物浓度的影响

Fig. 11 Impact of different replenishment quality on water pollutant concentration

不同水质补水对河道污染物浓度影响的模拟结果(图 11)分析如下。

(1) 用 III 类水对颍河补给, 高锰酸盐指数浓度在 0 km 处迅速下降, 后有所上升, 40 km 处下降至 95 km 左右达到最低值, 之后有所上升, 但总体趋于平缓, 高锰酸盐指数平均浓度降低 6.52%, 去除

率为 74.6%; 氨氮浓度有下降的趋势, 在 50 km 处达到最低值, 之后有上升趋势后又下降趋于稳定, 氨氮平均浓度降低  $2.07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 去除率为 63.7%。补给水质为 IV 类水时, 高锰酸盐指数和氨氮浓度相对较高。

(2) 两种不同水质补水, 用 III 类水对颍河补

给, 水质改善效果比Ⅳ类水明显, 能使研究区颍河约 86% 的河段达到Ⅳ类水水质标准. 但是使用Ⅲ类水为补给源, 相应增加了经济成本.

(3) 由图 10 可以看到, 当用Ⅲ类水和Ⅳ类水进行补水时, 在距周口浅口闸 50 km 处, 高锰酸盐指数和氨氮的浓度均有不同程度的下降, 在 50 km 和 100 km 处以后, 污染物的浓度下降趋于平缓, 得到上游补水的水质越好, 水质改善的效果越好.

### 3.6 补水方式

根据以上研究发现, 当补水水质为Ⅲ类水时, 补水效果虽是最佳, 但是增加了经济成本. 且无论补水水质是Ⅲ类水还是Ⅳ类水, 在研究区颍河下游的污染物浓度均趋于平缓, 只有当补水水质为Ⅲ类

水时, 对颍河河段上游的影响较大. 因此本研究不同的补水方式进行补水, 分别为: 方案一: 在补水点 1 采用Ⅲ类水补给, 在补水点 2 和补水点 3 处, 采用Ⅳ类水进行补给; 方案二: 在补水点 1 和补水点 2 处采用Ⅲ类水补给, 在补水点 3 采用Ⅳ类水补给; 方案三: 在补水点 1、补水点 2 和补水点 3 均采用Ⅲ类水进行补给; 方案四: 在补水点 1、补水点 2 和补水点 3 均采用Ⅳ类水进行补给.

因此进行模拟试验时, 颍河的本底流量为  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 补水水质为Ⅳ类水, 高锰酸盐指数和氨氮浓度分别为  $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 3 个补水点的补水流量分别为  $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  不变, 连续补水 30 d, 研究 4 种不同的补水方式, 得到的结果如图 12 所示.

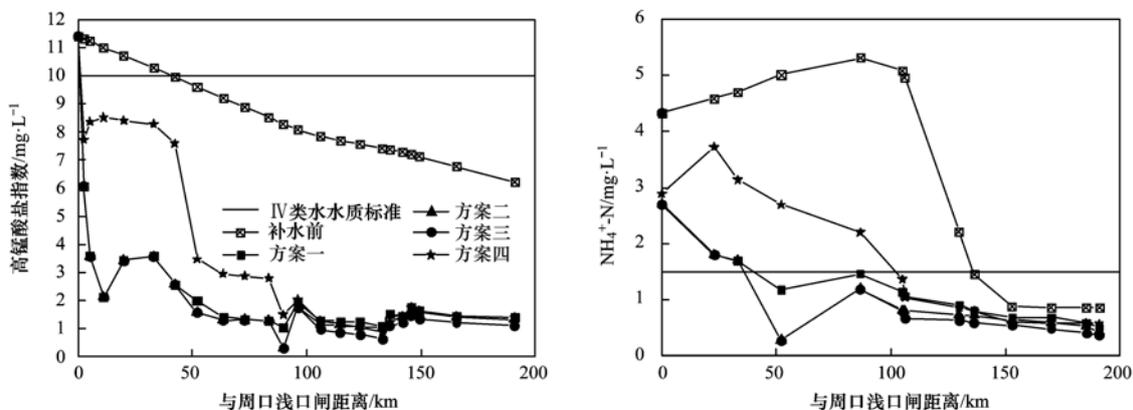


图 12 不同补水方式对河道污染物浓度的影响

Fig. 12 Impact of different replenishment method on water pollutant concentration

不同补水方式对河道污染物浓度影响的模拟结果(图 12)分析如下.

(1) 方案一在距周口浅口闸 0 km 处采用Ⅲ类水补给, 在 50 km 和 100 km 处, 采用Ⅳ类水进行补给, 高锰酸盐指数浓度在 0~15 km 段迅速下降, 后稍有升高又持续平稳下降并趋于平缓, 平均浓度降低  $6.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 去除率为 72.3%; 氨氮浓度从 0~50 km 缓慢下降后趋于平缓, 平均浓度降低  $1.81 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 去除率为 55.7%. 方案二与方案一污染物浓度变化趋势相似, 高锰酸盐指数和氨氮平均浓度降低  $6.42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $2.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 去除率分别为 73.4% 和 62%. 方案一、方案二与方案三、方案四相比较, 在考虑经济成本的基础上, 方案一与方案二最佳.

(2) 与补水前相比较, 方案一与方案二均能不同程度地降低研究区颍河河道污染物浓度, 方案一: 在距周口浅口闸 0 km 处采用Ⅲ类水补给, 在 50 km 和 100 km 处, 采用Ⅳ类水进行补给, 模拟得到的结果虽在部分河段较高于方案二和方案三, 但仍

使研究区颍河 85% 的河段水质满足了Ⅳ类水水质标准, 且相较于方案二更为经济.

## 4 结论

(1) 本文提出一种基于 MIKE11 模型改善河流水质的方法, 通过研究补水流量、补水位置、补水水质和补水方式, 应用 MIKE11 模型中水动力模块 (HD) 和对流扩散模块 (AD) 并结合降雨径流模块 (NAM) 建立颍河水水质模型, 结合经济技术等方法, 分别得出不同的改善效果, 试验研究河流水质改善的最优技术方案, 以颍河为研究对象, 验证颍河水水质达标的最佳方案, 最终得到颍河 85% 的河段达到Ⅳ类水水质标准, 结合技术、经济为河流治理提供可行的技术与方法.

(2) 研究得到: 当补水流量为  $2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  即为颍河本底流量的 10% 时, 对补水点在距周口浅口闸 0 km 处采用Ⅲ类水, 50 km 和 100 km 处采用Ⅳ类水进行补给, 补给效果最佳, 可降低高锰酸盐指数和氨氮平均浓度  $6.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $1.81 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 去除

率分别为 72.3% 和 55.7%，可使研究区颍河 85% 以上的河段达到Ⅳ类水水质标准。

(3) 本文通过应用 MIKE11 模型，以颍河为研究对象，确定了颍河的最佳补水方案。即：当上游来水的高锰酸盐指数和氨氮污染负荷分别为 59.097 6 万 t 和 2.291 2 t，颍河的本底流量为  $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  时，对距周口浅口闸 0 km 处采用Ⅲ类水补给，对距周口浅口闸 50 km、100 km 处采用Ⅳ类水进行补给，两个补水点补水流量均为本底流量的 10% 时，连续补给 30 d，补水效果最好。表明通过利用 MIKE11 模型，可以确定污染河流的最佳补水流量、补水位置、补水水质和补水方式，为其他污染河流的治理提供了新思路。

(4) 本研究对补水流量、补水位置、补水水质和补水方式进行模拟研究，对模拟得到的污染物浓度进行方案分析，仍存在其他影响因素，如补水速率、补水时间和河道底泥等，以及缺乏对河流整个生态功能的评估。

(5) 本文结合研究对象颍河地理位置、河网条件、水质和污染源等实际情况，对补水流量、补水位置、补水水质和补水方式进行模拟研究，分别得出不同程度的水质改善效果，考虑经济成本和技术可行，得到最优补水方案。对于河流污染的治理，可结合河流的具体实际情况，方法简单可调且意义重大。

#### 参考文献：

- [ 1 ] 吴蕾. 巢湖水用于城市景观河道生态补水工程[J]. 中国给水排水, 2013, **29**(6): 69-72.  
Wu L. Application of Chao Lake water to ecological water supplement of urban landscape river [J]. China Water & Wastewater, 2013, **29**(6): 69-72.
- [ 2 ] 张帆. 福州市台江区内河补水方案探讨[J]. 中国给水排水, 2015, **31**(12): 25-27.  
Zhang F. Discussion on Water Replenishment Schemes for Inland Rivers in Fuzhou Taijiang District [J]. China Water & Wastewater, 2015, **31**(12): 25-27.
- [ 3 ] 王亚伟, 杜向群, 郁达伟, 等. 温榆河氨氮污染控制措施的效果模拟[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(2): 479-486.  
Wang Y W, Du X Q, Yu D W, et al. Assessment of ammonia nitrogen pollution control in Wenyu River by QUAL2K simulation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(2): 479-486.
- [ 4 ] 匡翠萍, 李正尧, 顾杰, 等. 洋河-戴河河口海域 COD 时空分布特征研究[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(12): 3689-3697.  
Kuang C P, Li Z Y, Gu J, et al. Study on spatial and temporal characteristics of the COD in estuarine and coastal waters of the Yanghe River and the Daihe River [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(12): 3689-3697.
- [ 5 ] 邹锐, 苏晗, 陈岩, 等. 流域污染负荷-水质响应的时空数值源解析方法研究[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(12): 3639-3649.  
Zou R, Su H, Chen Y, et al. A numerical source apportionment approach for quantifying the spatial-temporal water quality responses to watershed loadings [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(12): 3639-3649.
- [ 6 ] 贾海峰, 郭羽. 基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 555-561.  
Jia H F, Gu Y. Calculation of allowable pollution loads for lake and reservoir based on Bi-direction algorithm and its case study [J]. Environmental Science, 2014, **35**(2): 555-561.
- [ 7 ] 万由鹏, 尹魁浩, 彭盛华. 调水型水库藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 2054-2060.  
Wan Y P, Yin K H, Peng S H. Response of algae to nitrogen and phosphorus concentration and quantity of pumping water in pumped storage reservoir [J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 2054-2060.
- [ 8 ] Wang B, Lu S Q, Lin W Q, et al. Water quality model with multiform of N/P transport and transformation in the Yangtze River Estuary [J]. Journal of Hydrodynamics, Series B, 2016, **28**(3): 423-430.
- [ 9 ] Huang B S, Hong C H, Du H H, et al. Quantitative study of degradation coefficient of pollutant against the flow velocity [J]. Journal of Hydrodynamics, Series B, 2017, **29**(1): 118-123.
- [ 10 ] 朱文博, 王洪秀, 柳翠, 等. 河道曝气提升河流水质的 WASP 模型研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1326-1331.  
Zhu W B, Wang H X, Liu C, et al. Improvement of river water quality by aeration: WASP model study [J]. Environmental Science, 2015, **36**(4): 1326-1331.
- [ 11 ] 丁一, 贾海峰, 丁永伟, 等. 基于 EFDC 模型的水乡城镇水网水动力优化调控研究[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(4): 1440-1446.  
Ding Y, Jia H F, Ding Y W, et al. Hydrodynamic optimization of urban river network of water towns based on EFDC model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(4): 1440-1446.
- [ 12 ] 钱海平, 张海平, 于敏, 等. 平原感潮河网水环境模型研究[J]. 中国给水排水, 2013, **29**(3): 61-65.  
Qian H P, Zhang H P, Yu M, et al. Water environment model for plain tidal river network [J]. China Water & Wastewater, 2013, **29**(3): 61-65.
- [ 13 ] 高学珑. 福州市感潮河网水动力水质耦合模型研究[J]. 中国给水排水, 2014, **30**(13): 88-91.  
Gao X L. Hydrodynamic and water quality model for tidal river network in Fuzhou city [J]. China Water & Wastewater, 2014, **30**(13): 88-91.
- [ 14 ] 陈玥, 侯道平, 陈星, 等. 台州市核心区生态补水最佳流量研究[J]. 水资源保护, 2016, **32**(2): 87-91.  
Chen Y, Hou D P, Chen X, et al. Optimal flow of ecological water supplement in core area of Taizhou City [J]. Water Resources Protection, 2016, **32**(2): 87-91.
- [ 15 ] 张亚丽, 申剑, 史淑娟, 等. 淮河支流污染物综合降解系数动态测算[J]. 中国环境监测, 2015, **31**(2): 64-67.  
Zhang Y L, Shen J, Shi S J, et al. Dynamic change of the river pollutions' composite degradation coefficient in Huaihe River's tributary [J]. Environmental Monitoring in China, 2015, **31**(2): 64-67.
- [ 16 ] 吕菲菲, 单楠, 马天海, 等. 多闸坝河网水系 TMDLs 计算模型构建及应用[J]. 南京大学学报(自然科学), 2016, **52**

- (1): 96-102.
- Lv F F, Shan N, Ma T H, *et al.* Buildup of TMDLs model for river networks with multi-sluices and its application[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2016, **52**(1): 96-102.
- [17] 左其亭, 李冬锋. 基于模拟-优化的重污染河流闸坝群防污调控研究[J]. *水利学报*, 2013, **44**(8): 979-986.
- Zuo Q T, Li D F. Research on regulation for pollution-control of dams on heavily polluted river base on the model of simulation and optimization[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, **44**(8): 979-986.
- [18] 刘佳明, 张艳军, 宋星原, 等. 江湖连通方案的最佳引水流量研究——以湖北磁湖为例[J]. *湖泊科学*, 2014, **26**(5): 671-681.
- Liu J M, Zhang Y J, Song X Y, *et al.* Optimal discharge of pollution flushing in an interconnected river-lake network: a case study of lake Cihu, Hubei province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, **26**(5): 671-681.
- [19] 李夏, 王刚, 齐珺, 等. 考虑水温变化的变降解系数在北京市北运河水质模拟中的应用[J]. *中国环境监测*, 2016, **32**(5): 67-72.
- Li X, Wang G, Qi J, *et al.* The application of variable degradation coefficient considering water temperature variation in water quality simulation taking Beijing North Canal River as an example[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, **32**(5): 67-72.
- [20] 胡琳, 卢卫, 张正康. MIKE11 模型在东茗溪水源地水质预警及保护的应用[J]. *水动力学研究与进展*, 2016, **31**(1): 28-36.
- Hu L, Lu W, Zhang Z K. Application of MIKE11 model in water quality early-warning and protection in Dong Tiaoxi water source [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2016, **31**(1): 28-36.
- [21] 何文学, 邹冰, 陈冬云, 等. 平原河网区调水配水改善水环境方案设计[J]. *中国给水排水*, 2012, **28**(17): 63-67.
- He W X, Zou B, Chen D Y, *et al.* Design of water transfer and distribution schemes of river network in plain areas for improving water environment[J]. *China Water & Wastewater*, 2012, **28**(17): 63-67.
- [22] Ostojski M. Application of hydrological and hydraulic models for hydrological data transfer[J]. *Acta Geophysica*, 2013, **61**(3): 690-705.
- [23] 周宏, 刘俊, 刘鑫, 等. MIKE 11 模型在望虞河西控工程排涝计算中的应用[J]. *中国农村水利水电*, 2016, (1): 39-43.
- Zhou H, Liu J, Liu X, *et al.* The application of MIKE 11 model to drainage calculation in west bank control project of Wangyu River[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016, (1): 39-43.
- [24] 殷洪, 钱新, 姚红, 等. 基于水质模型的河流水环境调控方案效果评估——以太浦河为例[J]. *环境保护科学*, 2015, **41**(2): 48-52, 66.
- Yin H, Qian X, Yao H, *et al.* Effect evaluation of the river water environmental risk prevention and control based on WASP by taking Taipu River as an example [J]. *Environmental Protection Science*, 2015, **41**(2): 48-52, 66.
- [25] 夏高原, 葛军, 柯正辰, 等. 城市内河综合水质对再生水补水的响应[J]. *环境工程学报*, 2017, **11**(1): 136-142.
- Xia G Y, Ge J, Ke Z C, *et al.* Comprehensive water quality of urban river in response to reclaimed water recharge[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, **11**(1): 136-142.

## CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM <sub>2.5</sub> in Jingjinji Region, 2015 .....	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks .....	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM <sub>2.5</sub> Fine Particulates Based on Multi-source Data .....	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM <sub>2.5</sub> in East China .....	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing .....	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM <sub>2.5</sub> in Heze .....	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM <sub>2.5</sub> in Selected Cities in Liaoning Province .....	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin .....	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM <sub>2.5</sub> in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming .....	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015 .....	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus .....	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ( $\delta^2\text{H}$ ) and Oxygen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai .....	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China .....	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO <sub>2</sub> Emissions from the Xin'anjiang Reservoir .....	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area .....	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir .....	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin .....	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin .....	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain .....	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model .....	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing .....	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen .....	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems .....	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter .....	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent .....	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water .....	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate .....	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature .....	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite .....	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes .....	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater .....	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater .....	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process .....	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an .....	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX .....	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms .....	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization .....	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate .....	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor .....	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR .....	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO <sub>2</sub> Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor .....	LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta .....	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers .....	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir .....	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai .....	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City .....	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area .....	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai .....	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants .....	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice .....	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield .....	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields .....	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N <sub>2</sub> O Emission in the North China Plain .....	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , and N <sub>2</sub> O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain .....	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Emissions from Rivers .....	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)