

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.7  
第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估 ..... 武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)

基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟 ..... 谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)

郑州市 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子特征及来源分析 ..... 杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)

能见度与 PM<sub>2.5</sub> 浓度关系及其分布特征 ..... 王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)

基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征 ..... 白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)

太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源 ..... 李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)

办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征 ..... 王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦春春 (3008)

南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征 ..... 张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)

黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征 ..... 张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)

基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析 ..... 王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)

李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响 ..... 徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)

水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价 ..... 王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)

银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价 ..... 田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)

人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例 ..... 谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)

渝江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析 ..... 唐金平, 张强, 胡谦, 张宇, 聂保伟 (3089)

三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因子分析 ..... 付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)

降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响 ..... 翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)

绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征 ..... 童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)

微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析 ..... 刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 鹏飞, 王凯军 (3126)

钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性 ..... 张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)

基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用 ..... 唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)

N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBk5 染料废水 ..... 于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)

Cu<sup>2+</sup> 对以 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 为电子受体反硝化过程的影响 ..... 买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)

CANON 中试反应器启动及性能优化 ..... 孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)

好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响 ..... 徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)

有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响 ..... 刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)

不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响 ..... 吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王伟佳, 张树军 (3195)

ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性 ..... 张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)

在线 NaClO 反洗对倒置 A<sup>2</sup>O-MBR 系统微生物群落的影响 ..... 王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)

基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价 ..... 袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)

北京市清水与再生水协同利用优化模型 ..... 张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)

N-亚硝酸胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除 ..... 柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)

北京市生活污水中曲霉和芬太尼的赋存 ..... 周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)

贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险 ..... 杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅男 (3249)

紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征 ..... 程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)

四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响 ..... 陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)

热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归 ..... 李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)

鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响 ..... 武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)

宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制 ..... 王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)

石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析 ..... 张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)

磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度 ..... 湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)

会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较 ..... 贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)

湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析 ..... 蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)

改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响 ..... 李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)

重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应 ..... 韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)

不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异 ..... 彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)

添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N<sub>2</sub>O 排放影响 ..... 孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)

渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响 ..... 刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)

不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征 ..... 鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)

西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征 ..... 廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)

生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响 ..... 李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)

《环境科学》征订启事(3194)      《环境科学》征稿简则(3222)      信息(3256, 3284, 3323)

# 北京市清水与再生水协同利用优化模型

张田媛, 谭倩\*, 王淑萍

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 开展协同利用清水与再生水的城市供水系统优化研究具有重要的科学意义和广阔的应用前景. 为促进城市水资源高效利用, 基于多水源转换关系以及再生水生产能力和利用潜力, 构建了面向多区域多部门的城市清水与再生水协同利用优化模型, 并以水资源严重短缺的北京市为例进行实证研究. 设置规划方案基准情景和规划替代方案情景, 分别优化了清水与再生水的协同利用方案以及再生水厂群的运行方案. 在规划方案基准情景下, 再生水占研究区用水总量的32%, 分别占农业、工业、环境用水量的60%、30%和42%. 海淀区和石景山区再生水供给矛盾将较为突出. 相比之下, 规划替代方案情景可以获得更高的经济效益, 总效益增加6.21亿元, 同时能增加再生水利用量36.59%、减少清水用量14.02%. 规划替代方案能更加充分地利用现有设施, 促进水资源循环利用. 此外, 还提供了在现有设施条件下, 再生水利用量由政策规划值逐渐提升至最佳规模过程中再生水厂群的运行过渡方案. 本文建立的研究方法具有较广泛的适用性, 可用于解决其它具有再生水利用潜力地区的水资源短缺问题.

**关键词:** 水资源管理; 供排水系统; 系统分析; 再生水; 优化模型; 污水处理

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-3223-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.201810217

## Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China

ZHANG Tian-yuan, TAN Qian\*, WANG Shu-ping

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Coordinated utilization of clear and reclaimed water in urban water supply systems has attracted wide attention from both academic and industrial communities. Although the potential and impacts of water reuse have been explored in previous studies, there is still a lack of model-based research that can optimize the utilization of clear and reclaimed water among multiple sectors and at multiple locations and the associated operations of multiple water treatment plants. In this study, an optimization model was developed for supporting the coordinated supply of clear and reclaimed water in urban water supply systems. This model was formulated based on the conversion relationships among clear water, wastewaters, and reclaimed water resources as well as a number of constraints such as the water reclamation capacities of existing wastewater treatment plants. The developed model provides optimal plans for allocating clear and reclaimed water and for operating wastewater treatment plants in a complex water supply system. The optimization model was applied to a case study in the central districts of Beijing, China. Optimal results were generated under both business-as-usual (BAU) and alternative scenarios in which the utilization scale of reclaimed water was capped and not capped, respectively, according to the existing city plans. Under the BAU scenario, reclaimed water accounted for 32% of the total water used, and contributed 60%, 30%, and 42% of agricultural, industrial, and environmental water consumption, respectively. The supply-demand contradiction of reclaimed water was apparent in Haidian and Shijingshan districts. Compared to the BAU scenario, the alternative scenario achieved 0.621 billion yuan more in economic gain, consumed 36.59% more reclaimed water, and reduced clear water use by 14.02%. The alternative scenario also improved the use of the capacities of existing facilities and promoted water reuse. Moreover, the operation plans of wastewater treatment plants for increasing the utilization amount of reclaimed water was provided. The developed model could be widely applied to other water-scarce cities with water reclamation potential without loss of generality.

**Key words:** water resources management; water supply and drainage systems; system analysis; reclaimed water; optimization models; wastewater treatment

由于人口的急剧增长、社会经济的快速发展和全球气候变化的影响, 中国乃至世界面临着日益严峻的水危机<sup>[1]</sup>. 中国人均水资源量仅2 100 m<sup>3</sup>, 是世界平均水平的28%, 部分大型城市的水资源短缺问题尤为严峻<sup>[2]</sup>. 随着污水处理技术的提升, 再生水正逐渐成为城市的补充水源, 对缓解城市水资源短缺、促进水资源循环利用起着越来越重要的作用. 在生态文明建设和水污染防治等宏观战略的导向下, 我国有望迎来再生水利用的快速发展期<sup>[3, 4]</sup>. 因此, 以再生水高效利用为目标, 开展城

市清污水多水源协同配置和再生水利用系统优化研究, 具有十分重要的科学意义和应用前景<sup>[5]</sup>.

目前, 国内外已有许多学者致力于城市再生水利用的研究<sup>[6]</sup>. 有研究表明, 再生水可作为清水(指自来水厂供水, 包括地表水、地下水与外调

收稿日期: 2018-10-27; 修订日期: 2019-01-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51822905, 51779255); 国家“千人计划”青年项目

作者简介: 张田媛(1994~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水资源优化配置, E-mail: zhangty@cau.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: qian\_tan@cau.edu.cn

水)的补充,成为城市的供水水源<sup>[7]</sup>,并具有较高的经济价值和利用潜力<sup>[8,9]</sup>。其中,大部分研究关注再生水利用潜力及其社会、经济<sup>[10]</sup>或环境效应<sup>[11]</sup>。例如,李旭<sup>[12]</sup>构建了北京市再生水利用的综合评价模型,对北京市再生水利用的社会经济和环境影响进行了模拟预测。在认识再生水利用价值与潜力的基础之上,现有研究还探讨了包含再生水在内的多水源供水系统的规划设计问题<sup>[13,14]</sup>。例如,Tan等<sup>[15]</sup>考虑了供水工程的不确定性规模经济效益,建立了交互式模糊随机二次规划方法,将包括再生水在内的多种水源在多个用水部门间进行了优化配置。He等<sup>[16]</sup>基于投入产出分析和线性规划方法,对山东枣庄市的水资源配置和新型污水处理技术的选择问题进行了研究。

随着城市的快速发展与大型化,各用水区域产业结构趋于稳定、功能划分愈加明确,不同区域中不同部门的用水需求存在明显差异。同时,城市供排水管网的逐渐完善,也使自来水厂和污水处理厂的跨区域联合调度成为可能。为最大化供水系统效益,需要协调清水与再生水源的配置并优化再生水厂区分用户收集处理与再供给的运行方案。然而,在已有的再生水利用系统规划研究中,针对大型城市中清水与再生水在多用水区域多用水部门间的协同利用以及再生水厂调度运行方案的优化研究尚不够深入。

大型城市具有良好的供排水基础设施条件、较高的经济和技术水平,进行再生水利用的潜力大、可行性高。尤其是对于北京市这样水资源短缺、经济发达、人口密集的大型城市,再生水是重要的供水水源之一,其高效利用对保障城市水安全和可持续发展具有举足轻重的作用<sup>[17]</sup>。目前,针对北京市再生水利用的研究多集中在问题分析与影响评价方面,或仅关注各水源的总量分配,少见清水与再生水在多区域多用水部门间协同配置的细化研究,欠缺对多个再生水厂跨区域联合调度及其最佳运行规模的研究<sup>[18-20]</sup>。

本研究利用系统分析方法,以供水系统净效益最大化为目标,对再生水高需求条件下城市清水与再生水协同利用问题,以及再生水厂厂群的最佳运行方案进行探索,并以水资源严重短缺的北京市为例进行实证研究,以为决策者提供科学的决策方法及方案支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况及问题

北京市(115°25'~117°35'E, 39°28'~41°05'

N)是我国的政治和文化中心,是京津冀区域协同发展的核心城市。北京市人均水资源量仅为150 m<sup>3</sup>,约为全国平均水平的1/15,水资源严重短缺<sup>[21]</sup>。北京市的用水来源包括地表水、地下水、南水北调水和再生水。多年平均降水量仅为556 mm,降水量年际间差异较大,常出现连续的枯水年或丰水年<sup>[22]</sup>。地下水长期超采,2016年末地下水平均埋深为25.23 m,与1980年末相比下降17.99 m<sup>[23]</sup>。南水北调中线工程的通水极大地缓解了用水矛盾,但仍不能完全解决北京市的水问题。随着城市供水管网和处理设施的逐步完善,再生水逐渐成为第二大供水水源。2016年,全市再生水用量高达10亿m<sup>3</sup>,占用水总量的26%。未来,再生水的利用量还将进一步增长。

本文的研究区北京市中心城区,即西城、东城、朝阳、海淀、石景山和丰台这6个行政区,是北京市经济最为发达、水资源矛盾最为突出的地区。中心城区的土地面积仅占全市总面积的8%,而用水量约占全市用水总量的66%,排污量大。中心城区具有良好的供排水基础设施,区内的污水处理厂均具备再生水生产能力(再生水厂),再生水利用条件成熟。

根据文献<sup>[24]</sup>的要求,2020年北京全市的再生水用量将达到12亿m<sup>3</sup>的规模,中心城区约为8亿m<sup>3</sup>。在既定的设施设计规模和布局条件下,如何实现多用水区多用水部门间清水和再生水的协同高效利用?如何对再生水厂群的污水收集、再生水生产与再供给进行合理运行调度?这些是研究区面临的关键问题。此外,现有规划提出的8亿m<sup>3</sup>的再生水生产利用总规模是否合理?在现有的厂群布局和设计规模条件下,从系统整体优化的角度考虑,再生水实际利用规模是否有更适宜的替代方案?也是亟需回答的问题。

### 1.2 数据收集与整理

本研究主要考虑农业、工业(包含第三产业)、生活和环境这4个用水部门,以及清水和再生水两种水源。其中,生活用水不采用再生水;环境用水包括城市河湖补水、绿地灌溉和道路浇洒。依据现行政策,为保证水质,工业和环境部门供水中清水和再生水的混合比例最小为1:1<sup>[25]</sup>。根据文献<sup>[24]</sup>所确定的中心城区空间结构和功能区划,本研究将中心城区划分为15个用水单元,对供水结构进行概化(图1)。各用水单元内均存在工业、生活和环境用水的需求,仅有部分单元存在农业用水。将用水单元中清水和再生水的集中供水点和污水排放点视为用水点。即本研究仅关注各用水单元与自来水

厂、再生水厂之间的供排水关系,优化清水、污水和再生水在用水单元之间的调配,而对于单一用水单元内部的输配水情况暂不作考虑.假设研究区内用水点与水厂间均可通过供水管网相互连通,实现水量的输送.本研究假设供排水管网与回用管网均齐备或可配套,即清水及再生水可跨区域优化调配.

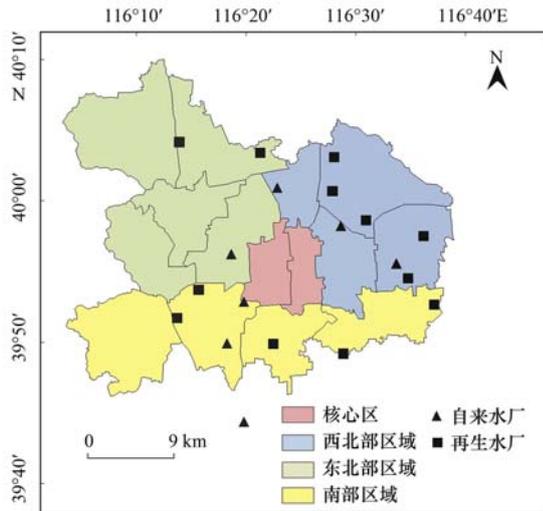


图1 用水单元划分及自来水厂和再生水厂分布示意

Fig. 1 Water use units, waterworks, and water reclamation plants in the study area

中心城区再生水厂再生水出水水质执行北京市《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB 11/890-2012)中的B标准<sup>[26]</sup>,能够满足再生水的利用要求.目前,服务于中心城区的自来水厂共有7座(其中1座位于中心城区外),再生水厂共有17座.将设计处理规模小于等于 $4 \text{万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的再生水厂与相邻的再生水厂合并,简化为12座再生水厂.由于各个再生水厂间的污水处理方式和生产规模不同,处理成本略有差异,合并简化后的再生水厂规模和成本参数见表1.中心城区水资源相关数据见表2.数据主要来源于历年北京市统计年鉴、政府工作报告、规划文件、地方和国家标准,以及相关研究<sup>[18, 27-29]</sup>.本研究仅考虑中心城区内部的污水处理和再生水供给情况,不考虑再生水厂与研究区外的关联关系.

## 2 清水与再生水协同利用优化模型

本研究在剖析清水、污水和再生水的互动关联关系的基础上,构建清水与再生水协同利用优化模型,对再生水和清水的协同利用以及再生水厂的生产规划方案进行研究.

清水、污水和再生水之间关联紧密,转换关系如图2所示.自来水厂的出厂清水供给生活、农业、

表1 再生水厂相关参数

再生水厂编号	名称	日设计处理规模/万 $\text{m}^3$	再生水生产成本/元 $\cdot \text{m}^{-3}$
1	高碑店再生水厂	100	1.43
2	小红门再生水厂	64	1.43
3	清河第二再生水厂	52	1.61
4	酒仙桥再生水厂	20	1.41
5	北小河再生水厂	10	1.97
6	定福庄再生水厂	30	2.00
7	高安屯再生水厂	10	1.72
8	清河再生水厂	57	1.53
9	永丰再生水厂	6	1.49
10	吴家村再生水厂	8	1.49
11	卢沟桥再生水厂	10	1.49
12	槐房再生水厂	60	1.64

表2 水资源相关参数

项目	数值
清水可用总量/亿 $\text{m}^3$	25.60
清水平均制水成本/元 $\cdot \text{m}^{-3}$	3.08
输水成本/元 $\cdot (\text{km} \cdot \text{m}^3)^{-1}$	0.10
清水输水损失系数	0.91
人均每日生活用水定额下限/L	85
人均每日生活用水定额上限/L	140

工业和环境部门使用后转化为污废水.其中,农田退水等不便于集中收集处理的污水将以面源形式直接排放.生活污水和工业废水通过城市排水管网集中收集后输送至再生水厂进行处理.再生水厂对污水进行达标处理后,其出水包括两部分,一部分直接排放,另一部分经管网输送至用水部门回用.因此,对各个用水单元而言,输入水量为清水和再生水,输出水量为集中收集处理污水(生活污水和工业废水)与直接排放的农田退水和绿化用水等.对供水系统整体而言,输入水量为清水,输出水量包括再生水厂处理达标后排放的污水和未经处理的农田退水等.

基于上述转换关系,建立清水与再生水协同利用优化模型.以供水系统净效益最大化为规划目标,决策变量包括清水量  $\text{CLW}_{jlm}$ 、再生水量  $\text{REW}_{klm}$ 、污水处理量  $\text{TW}_{klm}$  和直排污水量  $\text{UWW}_{lm}$ ,其中  $j$  代表自来水厂( $j=1, 2, \dots, J$ ),  $k$  代表再生水厂( $k=1, 2, \dots, K$ ),  $l$  代表用水单元( $l=1, 2, \dots, L$ ),  $m$  代表用水部门( $m=1, 2, \dots, M$ ).本文  $m=1, 2, 3, 4$  分别表示农业、工业、生活和环境.城市供排水管网之间相互连通,用水点与水厂间水源的调配流向由模型计算得到.模型的具体构建如下.

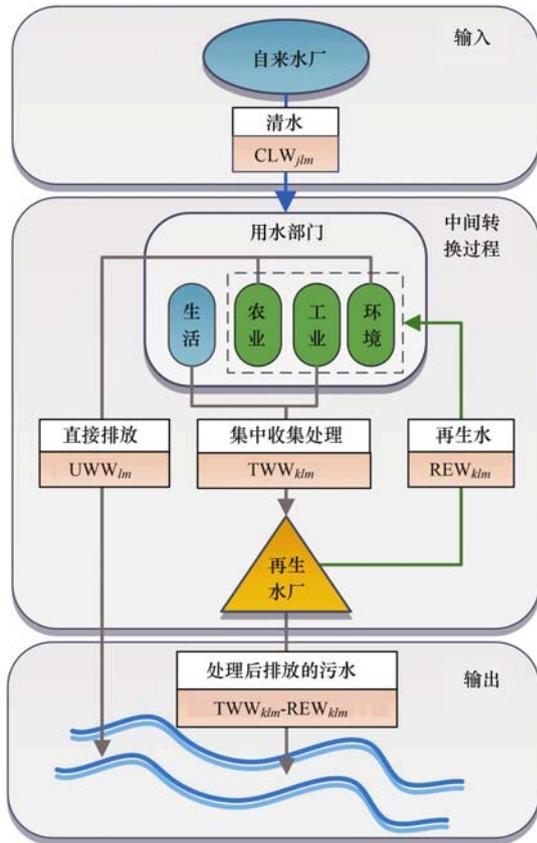


图2 水资源供给和转换关系示意  
Fig. 2 Conversion of water resources

2.1 目标函数

$$\text{Max Benefit} = A - B - C \quad (1)$$

式中, Benefit 为系统净收益(元); A 表示用水部门经济生产的总收益; B 表示制水成本, 包括清水制水成本、污水处理成本和污水深度处理为再生水所需的附加成本; C 表示输水成本。

(1) 用水部门经济生产总收益

$$A = \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \text{BNT}_{lm} \text{CLW}_{jlm} + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \text{BNT}_{lm} \text{REW}_{klm} \quad (2)$$

式中, BNT<sub>lm</sub> 表示用水单元 l 内用水部门 m 单位水耗产生的效益(元·m<sup>-3</sup>)。

(2) 制水成本

$$B = \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \text{CLW}_{jlm} \text{PCC}_j + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \text{TWW}_{klm} \times \text{PCS}_k + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \text{REW}_{klm} \text{ADD}_k \quad (3)$$

式中, PCC<sub>j</sub> 表示自来水厂 j 制水的单位成本(元·m<sup>-3</sup>); PCS<sub>k</sub> 表示再生水厂 k 将污水处理至排放标准的单位成本(元·m<sup>-3</sup>); ADD<sub>k</sub> 表示再生水厂 k 将达标污水进行深度处理为再生水的单位附加成本(元·m<sup>-3</sup>)。

(3) 清水、污水和再生水的输水费用

$$C = \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \text{CLW}_{jlm} \text{DWC}_{jl} \text{TPC} + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M (\text{REW}_{klm} + \text{TWW}_{klm}) \text{DSC}_{kl} \text{TPC} \quad (4)$$

式中, DWC<sub>jl</sub> 表示自来水厂 j 与用水单元 l 之间的输水距离(km); DSC<sub>kl</sub> 表示再生水厂 k 与用水单元 l 之间的输水距离(km); TPC 表示单位距离单方水的输水费用[元·(km·m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>]。

2.2 约束条件

(1) 水量平衡约束

清水可用水量约束:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \text{CLW}_{jlm} \leq (1 - \alpha) \text{TAW} \quad (5)$$

式中, α 表示清水输配过程的输水损失系数(%); TAW 表示清水的最大可利用水资源量(m<sup>3</sup>)。

清水、污水和再生水间的水量转换平衡关系:

$$\sum_{k=1}^K \text{TWW}_{klm} + \text{UWW}_{lm} = (1 - \gamma_m) \times \left( \sum_{j=1}^J \text{CLW}_{jlm} + \sum_{k=1}^K \text{REW}_{klm} \right) \quad \forall (l, m) \quad (6)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \text{REW}_{klm} \leq \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \text{TWW}_{klm} \quad \forall k \quad (7)$$

式中, UWW<sub>lm</sub> 表示用水单元 l 处用水部门 m 直接排放到环境中的排水(m<sup>3</sup>); γ<sub>m</sub> 表示用水部门生产中水量的消耗系数(%), 1 - γ<sub>m</sub> 即为污水产生系数。对供水区域 l 处用水部门 m 而言, 污水排放总量等于清水和再生水利用后的折损水量。

(2) 再生水利用总量约束

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \text{REW}_{klm} \leq \text{MARA} \quad (8)$$

式中, MARA 表示 2020 年中心城区再生水利用总量上限(m<sup>3</sup>)。

(3) 自来水厂及再生水厂的供需约束

自来水厂最大生产能力约束:

$$\sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \text{CLW}_{jlm} \leq \text{CPWW}_j \quad \forall j \quad (9)$$

式中, CPWW<sub>j</sub> 表示自来水厂的设计供水能力(m<sup>3</sup>)。自来水厂供给的清水不高于其设计供水能力。

自来水厂供给生活用水约束:

$$\sum_{l=1}^L \text{CLW}_{jlm} \geq \beta_1 \text{CPWW}_j \quad (m = 3, \forall j) \quad (10)$$

式中, β<sub>1</sub> 表示生活用水在自来水厂 j 供水能力中的最小比例(%). 自来水厂须保障居民的生活用水需求。

再生水厂运行负荷约束:

$$\sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \text{TW}W_{klm} \leq \text{CPWP}_k \quad \forall k \quad (11)$$

式中,  $\text{CPWP}_k$  表示再生水厂污水处理设计规模 ( $\text{m}^3$ ). 再生水厂的运行负荷不超过其设计规模.

再生水厂基本运行负荷约束:

$$\sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \text{TW}W_{klm} \geq \beta_2 \text{CPWP}_k \quad \forall k \quad (12)$$

式中,  $\beta_2$  表示再生水厂的基本运行负荷比例(%). 再生水厂的污水处理不小于基本运行负荷, 保证再生水厂的正常运行.

农业及环境用水排放约束:

$$\text{TW}W_{klm} = 0 \quad (m = 1, 4, \forall k, l) \quad (13)$$

农田退水及环境用水全部直接排放到环境中, 不进入再生水厂.

工业、生活污水全部由再生水厂处理:

$$\text{UW}W_{lm} = 0 \quad (m = 2, 3, \forall l) \quad (14)$$

(4) 用水单元的水量水质需求

用水部门用水需求:

$$\sum_{j=1}^J \text{CL}W_{jlm} + \sum_{k=1}^K \text{RE}W_{klm} \leq \text{UR}M_{lm} \quad \forall l, m \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^J \text{CL}W_{jlm} + \sum_{k=1}^K \text{RE}W_{klm} \geq \text{LR}M_{lm} \quad \forall l, m \quad (16)$$

式中,  $\text{UR}M_{lm}$  表示用水单元  $l$  用水部门  $m$  的最大需水量 ( $\text{m}^3$ );  $\text{LR}M_{lm}$  表示用水单元  $l$  用水部门  $m$  的最小需水量 ( $\text{m}^3$ ). 用水单元  $l$  用水部门  $m$  的供水量不高于允许的最大供水量, 不低于最小供水量.

行业用水总量限制:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \text{CL}W_{jlm} + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \text{RE}W_{klm} \leq \text{TR}M_m \quad \forall m \quad (17)$$

式中,  $\text{TR}M_m$  表示中心城区用水部门  $m$  的总用水上限 ( $\text{m}^3$ ). 用水部门  $m$  的用水总量不高于允许的用水上限.

用水部门清水的最小需求:

$$\sum_{j=1}^J \text{CL}W_{jlm} \geq \text{CR}M_{lm} \quad \forall l, m \quad (18)$$

式中,  $\text{CR}M_{lm}$  表示用水单元  $l$  用水部门  $m$  的最小清水需求 ( $\text{m}^3$ ). 用水单元  $l$  用水部门  $m$  的清水供给量不小于最小需求.

用水部门再生水的最小需求:

$$\sum_{k=1}^K \text{RE}W_{klm} \geq \text{RR}M_{lm} \quad \forall l, m \quad (19)$$

式中,  $\text{RR}M_{lm}$  表示用水单元  $l$  用水部门  $m$  的最小再生水需求 ( $\text{m}^3$ ). 用水单元  $l$  用水部门  $m$  的再生水供给量不小于最小需求.

用水部门水质约束:

$$\sum_{j=1}^J \text{CL}W_{jlm} \geq \mu_m \sum_{k=1}^K \text{RE}W_{klm} \quad \forall l, m \quad (20)$$

式中,  $\mu_m$  表示用水部门  $m$  中清水和再生水的最小配比. 用水单元  $l$  内用水部门  $m$  的清水、再生水配水比例需满足用水部门的水质要求.

再生水不用作生活用水:

$$\text{RE}W_{klm} = 0 \quad (m = 3 \quad \forall k, l) \quad (21)$$

(5) 污染物排放总量限制

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M (\text{TW}W_{klm} - \text{RE}W_{klm}) \text{PT} + \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \text{UW}W_{lm} \text{PU}_m \leq \text{APD} \quad (22)$$

式中,  $\text{APD}$  表示环境容许的 COD 最大排放量 ( $\text{g}$ );  $\text{PT}$  表示经处理达标的污水中 COD 浓度 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $\text{PU}_m$  表示由用水部门  $m$  直接排放到环境中的污水中 COD 浓度 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ). 区域水环境污染物排放量不高于总量控制上限.

(6) 非负约束

$$\text{CL}W_{jlm} \geq 0 \quad \forall j, l, m \quad (23)$$

$$\text{RE}W_{klm} \geq 0 \quad \forall k, l, m \quad (24)$$

$$\text{TW}W_{klm} \geq 0 \quad \forall k, l, m \quad (25)$$

$$\text{UW}W_{lm} \geq 0 \quad \forall l, m \quad (26)$$

## 3 结果与讨论

### 3.1 情景设置

在现有厂址布局和设计规模下, 本研究设置了两个情景, 对应不同情景分别提供清水与再生水协同利用与再生水厂群运行的优化方案. 其一为规划方案基准情景 (BAU 情景), 此情景下再生水的总利用量为文献 [24] 所要求的 8 亿  $\text{m}^3$ ; 其二为规划替代方案情景 (AS 情景), 此情景下再生水利用不受政策规划的总量限制, 但受设施设计规模等约束的限制, 通过系统自动寻优确定再生水的最佳利用总量.

利用 LINGO 11.0 软件编程求解建立的清水与再生水协同利用优化模型, 得到研究区各用水单元内各用水部门的清水和再生水利用量, 以及再生水厂产量等数据.

### 3.2 规划方案基准情景

BAU 情景下研究区用水总量为 25.24 亿  $\text{m}^3$ , 清水和再生水的供水总量分别为 17.24 亿  $\text{m}^3$  和 8.00 亿  $\text{m}^3$ , 分别占用水总量的 68% 和 32%, 清水是中心城区主要的用水来源.

各用水部门间清水和再生水供水总量如图 3 所示. 工业用水量最高, 达到 9.20 亿  $\text{m}^3$ ; 其次为环境用水, 用水量为 6.73 亿  $\text{m}^3$ ; 生活用水为 5.31 亿

m<sup>3</sup>, 略高于总量为 4.00 亿 m<sup>3</sup> 的农业用水. 农业、工业、环境这 3 个用水部门的再生水用量分别为 2.38、2.76 和 2.86 亿 m<sup>3</sup>, 分别占该部门用水总量的 60%、30% 和 42%. 清水是工业和环境部门的主要供水水源, 以及生活用水的全部来源; 再生水是农业的主要供水水源.

清水和再生水生产的总效益分别为 9 084 亿元和 7 288 亿元, 清水贡献的经济效益总值高于再生水. 清水和再生水的单方水效益分别为 527 元和 911 元, 再生水明显高于清水. 虽然清水的供给总量较大、经济总产出较高, 但更多地供给经济效益较低、但水质需求较高的部门(生活和环境的清水用量占清水总量的 53%). 再生水用量远低于清水、仅为清水用量的 46%, 但更多地供给经济效益较高、水质需求较低的部门(农业和工业的再生水用量占再生水总量的 64%).

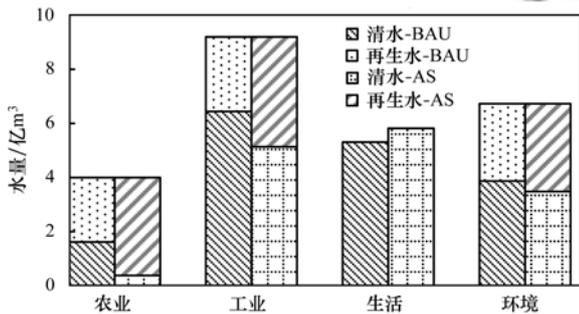


图3 规划方案基准情景(BAU)和规划替代方案(AS)下各用水部门清水和再生水用水量

Fig. 3 Allocation of clear water and reclaimed water by sectors under the business-as-usual and alternative scenarios

图 4 给出了各用水单元再生水的利用量与各再生水厂运行的规划方案. 用水单元 4 和 15 的再生水利用水平最高, 其次为用水单元 1 和 7; 用水单元 8 和 11 的再生水利用水平最低. 各再生水厂间的实际处理规模存在较大差异, 多数再生水厂尚未达到设计规模, 再生水回用总量仅占再生水厂现有设计处理规模的 51%. 规模较小的再生水厂 7、9、10 和 11, 以及位于研究区边缘的再生水厂 8 均处于满负荷运行状态, 运行压力较大. 再生水厂 12 的污水处理量占设计处理规模的 97%, 再生水回用量为实际处理量的 77%. 位于研究区外围的再生水厂 2 和 6 不为中心城区提供再生水. 其余再生水厂仅需维持模型设定的基础运行负荷. 虽然再生水厂 5 的规模较小, 但因其周边紧邻其他两座再生水厂, 因此仍保持低位运行状态.

各用水单元的再生水利用水平和再生水厂的分布、设计处理规模之间存在明显的空间分布差异. 基于文献[24]对中心城区划分的 4 个区域(图 1),

即核心区(用水单元 1、2, 即东城区和西城区)、东北部区域(用水单元 3~6, 即朝阳区北部, 分布有再生水厂 1、3、4、5 和 7)、西北部区域(用水单元 11~15, 即海淀区和石景山区, 分布有再生水厂 8 和 9)和南部区域(用水单元 7~10, 即丰台区和朝阳区南部, 分布有再生水厂 2、6、10、11 和 12), 对各区域再生水利用和再生水厂设计处理规模间的关系进行分析. 东北部和西北部区域再生水利用量最大, 均占中心城区再生水利用总量的 31%; 核心区和南部区域再生水利用水平相对较低, 分别占再生水总量的 14% 和 24%. 东北部、西北部和南部区域的再生水生产能力分别占研究区总设计处理规模的 45%、15% 和 40%. 可见, 东北部区域再生水利用水平和再生水厂设计处理规模较为协调, 南部区域的再生水生产能力相对充足, 再生水的供给矛盾主要存在于西北部区域. 西北部区域 15% 的再生水厂设计处理规模难以支撑 31% 的再生水利用量, 还需要依靠南部的再生水厂 10 和 12, 才能满足该区域的再生水利用需求. 为提高研究区再生水供给的稳定性和均匀性, 本文建议决策者在制定再生水厂规划时, 率先考虑提高西北部区域再生水厂的设计处理规模, 如新建再生水厂或对设计处理规模较低

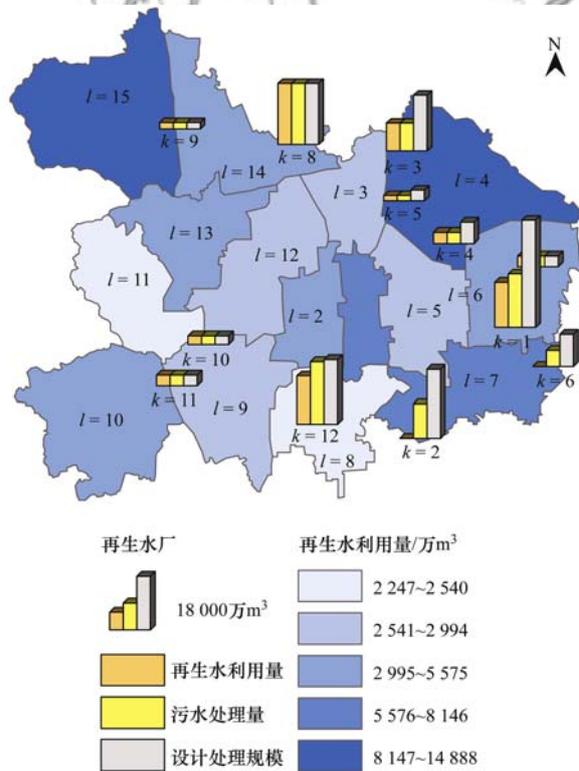


图 4 规划方案基准情景下各用水单元内再生水利用水平及再生水厂运行情况

Fig. 4 Reclaimed water allocated to the water use units and operating loads of water reclamation plants under the business-as-usual scenario

的再生水厂进行扩容改建.

各用水单元内清水和再生水的利用比例如图 5 所示. 模型输入中, 各用水单元内清水基础需求量均高于再生水. 有 13 个用水单元以利用清水为主, 清水用量占比超过了 50%. 对这些用水单元而言, 供应清水更为经济. 因为自来水厂多集中在中心区域, 而再生水厂分布较为分散、均位于研究区边缘. 尽管再生水的生产成本略低于清水, 但自来水厂距多数供水单元更近、输水成本更低. 用水单元 4 和 7 的再生水利用量略高于清水, 分别占用水单元用水总量的 52% 和 56%. 对这两个用水单元而言, 供应再生水更为经济. 很可能因为它们均位于研究区边缘, 距再生水厂较近、再生水的综合供水成本更低.

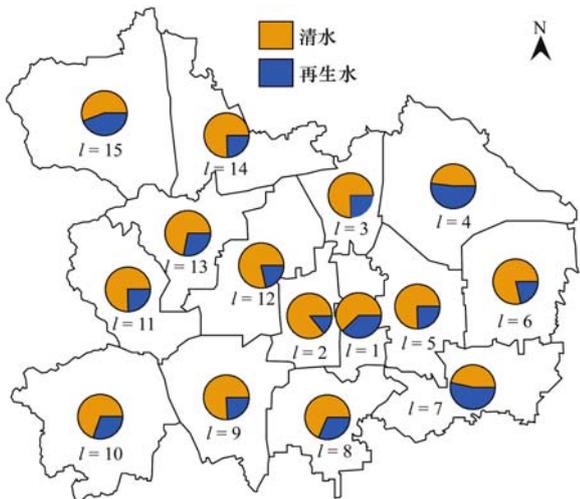


图 5 规划方案基准情景下各用水单元清水和再生水的利用比例  
Fig. 5 Ratios of clear and reclaimed water in different water use units under the business-as-usual scenario

### 3.3 规划替代方案情景

如图 6 所示, 与 BAU 情景相比, AS 情景的总效益增加了 6.21 亿元、增长了 0.04%. 研究区总用水量上升为 25.75 亿 m<sup>3</sup>, 增加了 2.02%, 主要由再生水实现. 清水取用量减少 14.02%, 而再生水利用总量比政策规划总量值提高了 36.59%. 与 BAU 情景相比, 再生水利用量在污水处理量中的占比提高了 31.16%. 可见, 在充分利用现有设施、不新建再生水厂的条件下, AS 情景的优化结果能够显著提高用水效益和再生水利用总量、显著降低清水取用量, 有助于促进水资源的可持续利用. 因此, AS 情景所得到的再生水利用总量 10.93 亿 m<sup>3</sup> 可视为研究区在现有设施条件下的再生水最佳利用量.

与 BAU 情景相比, 再生水厂 4、5 和 12 的污水处理量分别增加了 32%、50% 和 2%, 再生水厂 5 将满负荷运行; 再生水厂 6 的污水处理量降低了

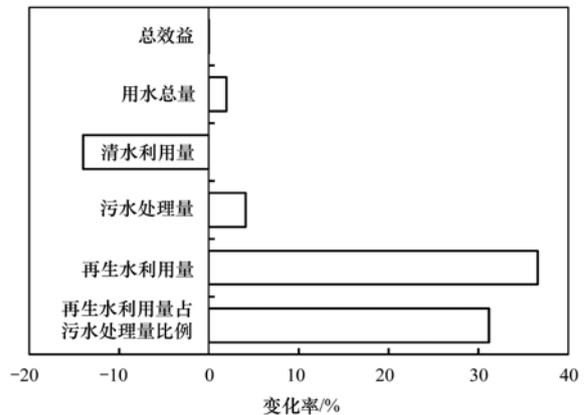


图 6 规划替代方案情景与规划方案基准情景的结果对比  
Fig. 6 Comparison of the results from the alternative scenario against those from the business-as-usual scenario

6% (图 7). 再生水回用量占现有设计处理规模的 70%, 与 BAU 情景相比提高了 19%. 同时, 再生水厂出水实现全部回用, 从而更充分地利用现有再生水厂的处理能力、最大限度地提升再生水利用规模.

AS 情景中各用水部门清水和再生水用水情况如图 3 所示. 再生水分别占农业、工业和环境用水量的 90%、44% 和 48%. 与 BAU 情景相比, 农业、工业和环境部门的用水量基本不变, 生活用水增加了 0.51 亿 m<sup>3</sup>、增长了 9%. 按照 2016 年中心城

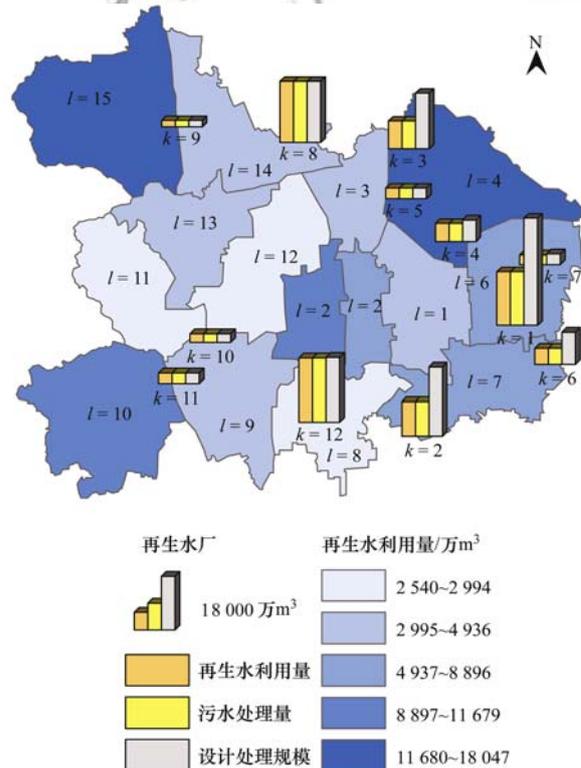


图 7 规划替代方案情景下各用水单元再生水利用水平及再生水厂运行情况

Fig. 7 Reclaimed water allocated to the water use units and operating loads of water reclamation plants under the alternative scenario

区常住人口数据 1282.8 万计算, 人均生活可用水量由 BAU 情景的 41.39 m<sup>3</sup> 增加到 45.37 m<sup>3</sup>. 在城市常住人口不断增长的背景下, AS 情景的优化结果可以提高城市的容纳能力、保障居民的生活用水. 工业部门的再生水增长最为明显, 相比于 BAU 情景增长了 1.30 亿 m<sup>3</sup>, 占工业用水量的 44%. 农业的再生水用量增加了 1.24 亿 m<sup>3</sup>, 再生水占比由 BAU 情景的 60% 增加到 90%. 环境用水中再生水用量增加了 0.39 亿 m<sup>3</sup>, 占比为 48%.

AS 情景中各用水单元再生水利用量如图 7 所示. 用水单元 2、4 和 15 的再生水利用水平最高, 而用水单元 8、11 和 12 的再生水利用水平最低. 与 BAU 情景相比, 各用水单元的再生水利用量或有增加或保持不变, 用水单元 2、10 和 15 中再生水利用量明显增大.

AS 情景中各用水单元中清水和再生水利用比例如图 8 所示. 用水单元 4、10 和 15 中再生水利用量分别占用水单元用水总量的 52%、59% 和 65%, 利用再生水更为经济. 其他 12 个用水单元利用清水更为经济.

### 3.4 向替代方案过渡的运行方案

为最大化供水系统效益, 充分发挥现有设施作用, 再生水利用总量可由规划方案中的 8 亿 m<sup>3</sup> 逐渐提升至替代方案推荐的最佳利用量 10.93 亿 m<sup>3</sup>. 本文分析了再生水利用量向 AS 情景中最佳利用量过渡的厂群运行方案(过渡方案).

令模型再生水利用总量约束[式(8)]中 MARA 的分别取值 8.5、9.0、9.5、10.0 和 10.5 亿 m<sup>3</sup>, 得到再生水利用水平逐步提高过程中, 再生水厂的再生水生产和回用方案(图 9).

过渡方案中再生水厂实际生产规模与设计处理

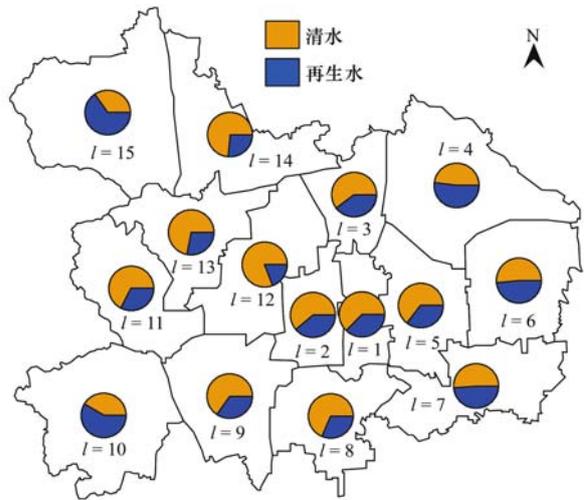
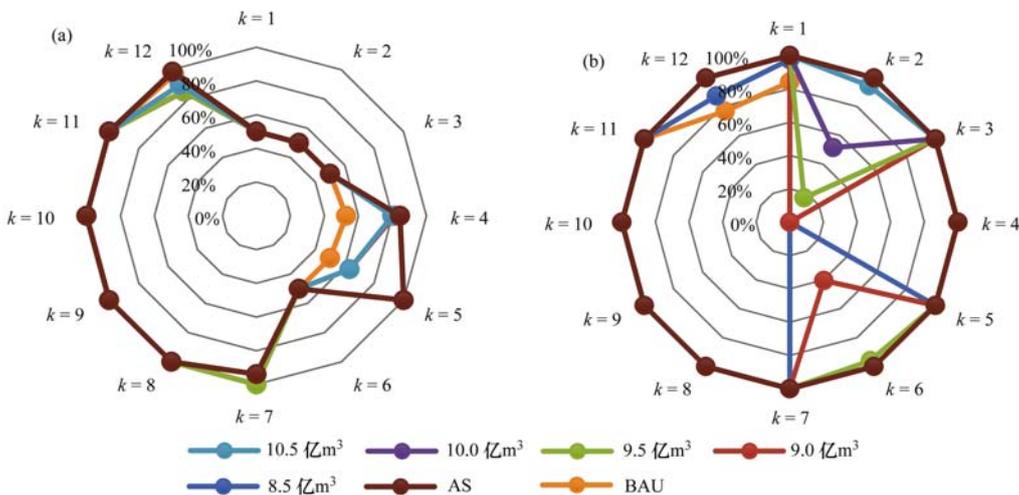


图 8 规划替代方案情景下各用水单元清水和再生水的利用比例

Fig. 8 Ratios of clear and reclaimed water in different water use units under the alternative scenario

规模间的比例关系如图 9(a) 所示. 再生水厂 1、2、3、6、8、9、10 和 11 的状态运行与 BAU 情景一致. 再生水厂 4 和 5 的运行负荷, 随着再生水利用量的增加而增加, 再生水量增加到 8.5 亿 m<sup>3</sup> 时, 再生水厂 4 的增速略高于再生水厂 5; 再生水达到最佳利用量时, 再生水厂 5 率先达到满负荷运行状态. 再生水厂 7 和 12 以较高负荷运行. 再生水利用量不超过 9.5 亿 m<sup>3</sup> 时, 再生水厂 7 满负荷运行; 再生水利用量继续增加时, 该厂将始终保持 94% 的运行负荷率. 再生水厂 12 的运行负荷呈现先下降后上升的趋势.

过渡方案中各再生水厂再生水回用量占实际生产规模的比例如图 9(b) 所示. 除再生水厂 1、2、6 和 12 外, 推荐其余再生水厂始终将全部出水再次利用. 随着再生水利用量的逐渐增加, 再生水厂 1



(a) 实际生产规模与设计处理规模的比例; (b) 再生水回用量占实际生产规模的比例; BAU: 规划方案情景; AS: 规划替代方案情景

图 9 向替代方案过渡的运行方案中再生水厂生产情况

Fig. 9 Water reclamation plants operation conditions under the different reclaimed water utilization conditions

和 12 由较高的再生水回用比例, 迅速提升至 100%; 再生水厂 2 和 6 的再生水回用比例应稳步增长. 当再生水用量为 8.5 亿  $\text{m}^3$  时, 均不建议研究区利用这两座再生水厂的出水. 当再生水利用总量增加到 10.5 亿  $\text{m}^3$  时, 再生水厂 6 应首先达到 100% 的再生水回用率, 再生水厂 2 的再生水回用比例达到 94%. 直至达到再生水最佳利用量时, 再生水厂 2 才应达到 100% 的再生水回用率.

#### 4 结论

(1) 规划方案基准情景结果表明, 2020 年北京市中心城区的用水总量为 25.24 亿  $\text{m}^3$ , 再生水占比 32%. 再生水分别占农业、工业、环境用水量的 60%、30% 和 42%, 是农业用水的主要来源. 西北部的海淀区和石景山区内的再生水厂难以维系区域内部再生水的利用需求, 再生水供给矛盾将较为突出. 本文建议决策者未来应率先考虑在西北部区域新建或改扩建再生水厂.

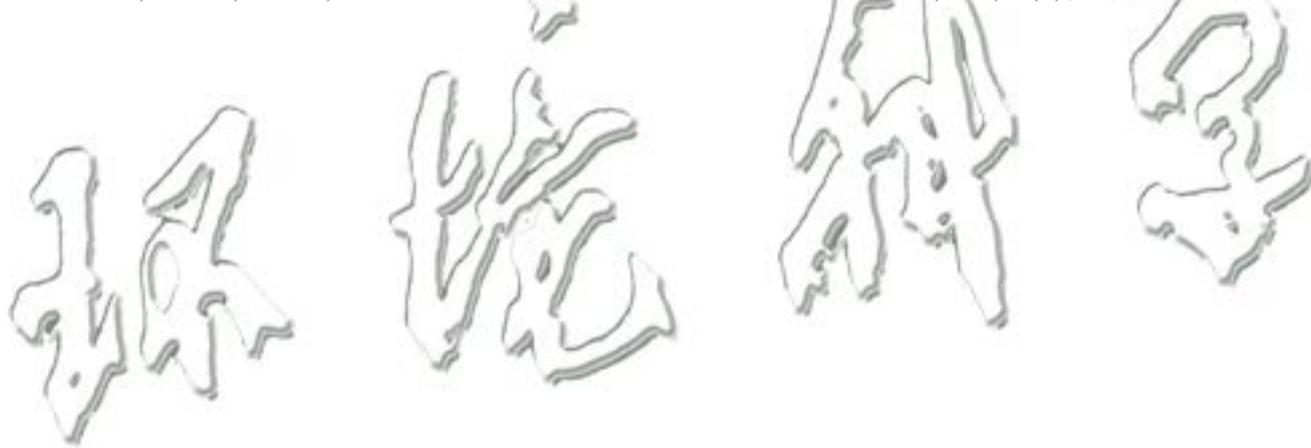
(2) 规划替代方案情景可以增加用水总效益 6.21 亿元. 在增加可用水量 2.02% 的同时, 减少新水用量 14.02%, 增加再生水利用量 36.59%, 从而充分利用现有设施能力, 促进水资源的循环利用. 现有设施条件下的再生水最佳利用量为 10.93 亿  $\text{m}^3$ .

(3) 为最大化供水系统效益、充分发挥现有设施作用, 再生水利用总量可由规划方案中的 8 亿  $\text{m}^3$  逐渐过渡为替代方案推荐的最佳利用量 10.93 亿  $\text{m}^3$ . 在再生水利用总量逐步提升期间, 对运行方案的优化结果显示, 高碑店和槐房再生水厂的再生水回用比例应迅速提升至设计规模的 100%, 小红门和定福庄再生水厂应从规划方案情景时的不提供再生水转变为逐步提升再生水回用量, 其余再生水厂始终将全部出水再次利用.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Yi L L, Jiao W T, Chen X N, *et al.* An overview of reclaimed water reuse in China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(10): 1585-1593.
- [ 2 ] Kang S Z, Hao X M, Du T S, *et al.* Improving agricultural water productivity to ensure food security in China under changing environment: from research to practice [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, **179**: 5-17.
- [ 3 ] Lyu S D, Chen W P, Zhang W L, *et al.* Wastewater reclamation and reuse in China: opportunities and challenges [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, **39**: 86-96.
- [ 4 ] 闫旭, 邱德志, 郭东丽, 等. 中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1256-1263.  
Yan X, Qiu D Z, Guo D L, *et al.* Emission inventory of greenhouse gas from urban wastewater treatment plants and its temporal and spatial distribution in China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1256-1263.
- [ 5 ] 刘晓君, 付汉良, 孙伟. 西北干旱缺水城市污水再生利用系统决策优化 [J]. *环境工程学报*, 2017, **11**(1): 211-217.  
Liu X J, Fu H L, Sun W. Optimized decision-making of reclaimed water reuse system of water resources constraint cities in northwest China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, **11**(1): 211-217.
- [ 6 ] 王骁, 许素, 陶文绮, 等. 再生水补水河道水质的生态修复示范工程及效能分析 [J]. *环境工程学报*, 2018, **12**(7): 2132-2140.  
Wang X, Xu S, Tao W Q, *et al.* Ecological restoration project of water quality in urban river supplied with reclaimed water and its efficiency analysis [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, **12**(7): 2132-2140.
- [ 7 ] Wu W Y, Dandy G C, Maier H R, *et al.* Identification of optimal water supply portfolios for a major city [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2017, **143**(9): 05017007.
- [ 8 ] Zhang W L, Wang C, Li Y, *et al.* Seeking sustainability: multiobjective evolutionary optimization for urban wastewater reuse in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(2): 1094-1102.
- [ 9 ] Pintilie L, Torres C M, Teodosiu C, *et al.* Urban wastewater reclamation for industrial reuse: An LCA case study [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **139**: 1-14.
- [ 10 ] Ray P A, Kirshen P H, Vogel R M. Integrated optimization of a dual quality water and wastewater system [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2010, **136**(1): 37-47.
- [ 11 ] 王永刚, 王旭, 孙长虹, 等. 再生水补给型城市河流水质改善效果模拟 [J]. *环境科学与技术*, 2017, **40**(6): 54-60.  
Wang Y G, Wang X, Sun C H, *et al.* Assessment of water environmental control on reclaimed water supply-type river [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **40**(6): 54-60.
- [ 12 ] 李旭. 北京市再生水利用的环境经济综合影响评价 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- [ 13 ] Ye Q L, Li Y, Zhuo L, *et al.* Optimal allocation of physical water resources integrated with virtual water trade in water scarce regions: A case study for Beijing, China [J]. *Water Research*, 2018, **129**: 264-276.
- [ 14 ] Dai C, Cai Y P, Liu Y, *et al.* A generalized interval fuzzy chance-constrained programming method for domestic wastewater management under uncertainty- A case study of Kunming, China [J]. *Water Resources Management*, 2015, **29**(9): 3015-3036.
- [ 15 ] Tan Q, Huang G H, Cai Y P. Multi-source multi-sector sustainable water supply under multiple uncertainties: an inexact fuzzy-stochastic quadratic programming approach [J]. *Water Resources Management*, 2013, **27**(2): 451-473.
- [ 16 ] He G Y, Yan J J, Sha J H, *et al.* Exploration of an optimal policy for water resources management including the introduction of advanced sewage treatment technologies in Zaozhuang City, China [J]. *Water*, 2016, **8**(12): 608.
- [ 17 ] 范育鹏, 陈卫平. 北京市再生水利用生态环境效益评估 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(10): 4003-4008.  
Fan Y P, Chen W P. Assessment of ecological environment benefits of reclaimed water reuse in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(10): 4003-4008.
- [ 18 ] 王强, 刘京, 王军. 北京市市中心城再生水利用规划探讨 [J]. *给水排水*, 2012, **38**(10): 47-51.  
Wang Q, Liu J, Wang J. Reclaimed water utilization potential in the central of Beijing [J]. *Water & Wastewater Engineering*,

- 2012, **38**(10): 47-51.
- [19] 王佳, 李雪, 潘涛, 等. 北京市再生水回用策略分析[J]. 给水排水, 2013, **39**(S1): 208-213.
- [20] Liang X, van Dijk M P. Evaluating the interests of different stakeholders in Beijing wastewater reuse systems for sustainable urban water management [J]. Sustainability, 2016, **8**(11): 1098.
- [21] 徐华山, 赵磊, 孙昊苏, 等. 南水北调中线北京段水质状况分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1357-1365.  
Xu H S, Zhao L, Sun H S, *et al.* Water quality analysis of Beijing segment of South-to-North water diversion middle route project[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1357-1365.
- [22] 王丽亚. 北京平原区地下水可持续利用模型研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- [23] 北京市水务局. 北京市水资源公报[R]. 北京: 北京市水务局, 2016. 1-19.
- [24] 北京市规划和国土资源管理委员会北京市政府. 北京城市总体规划(2016-2035) [EB/OL]. <http://bjghw.gov.cn/web/ztgh/ztgh100.html>, 2017-09-29.
- [25] 刘洪禄, 吴文勇, 师彦武, 等. 北京市再生水利用潜力与配置方案研究[J]. 农业工程学报, 2006, **22**(S2): 289-291.  
Liu H L, Wu W Y, Shi Y W, *et al.* Reclaimed wastewater use potential and collocation scheme for different industries in Beijing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, **22**(S2): 289-291.
- [26] DB11/890-2012, 城镇污水处理厂水污染物排放标准[S].
- [27] 蒋勇, 阜葳, 毛联华, 等. 城市污水处理厂运行能耗影响因素分析[J]. 北京交通大学学报, 2014, **38**(1): 33-37.  
Jiang Y, Fu W, Mao L H, *et al.* Influence factors analysis of urban sewage treatment plant on energy consumption[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2014, **38**(1): 33-37.
- [28] 许世伟, 刘菲, 白宇, 等. 北京市地方标准《污水单位产品能耗限额》的研究与思考[J]. 给水排水, 2014, **40**(11): 109-111.  
Xu S W, Liu F, Bai Y, *et al.* Study on Beijing local standard "Energy Consumption Limit of Sewage Unit Product" [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, **40**(11): 109-111.
- [29] 杨敏, 李亚明, 魏源送, 等. 大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 2203-2209.  
Yang M, Li Y M, Wei Y S, *et al.* Energy consumption comparison and energy saving approaches for different wastewater treatment processes in a large-scale reclaimed water plant [J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 2203-2209.



## CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China .....	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing .....	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> in Zhengzhou .....	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM <sub>2.5</sub> Concentrations and Distributions .....	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method .....	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China .....	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area .....	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project .....	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau .....	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes .....	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir .....	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir .....	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands .....	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing .....	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River .....	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir .....	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River .....	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus .....	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater .....	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes .....	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater .....	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene .....	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu <sup>2+</sup> on Denitrification Using NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> as an Electron Acceptor .....	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor .....	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment .....	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System .....	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions .....	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria .....	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A <sup>2</sup> O-MBR System .....	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge .....	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China .....	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes .....	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing .....	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants .....	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region .....	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge .....	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge .....	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes .....	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi .....	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City .....	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil .....	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China .....	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan .....	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System .....	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat .....	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper .....	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N <sub>2</sub> O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils .....	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland .....	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization .....	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area .....	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil .....	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)