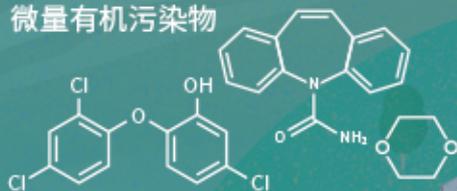


城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路  
王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营

微量有机污染物



## 深度处理

- 污染物非靶向筛查
- 新型处理技术开发
- 处理效率替代性指标
- 工艺运行指南与排放标准

污水处理厂

深度处理

污水再生利用

湖泊湿地等

景观娱乐用水

污水达标排放

下游城市河湖

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年6月

第42卷 第6期  
Vol.42 No.6

目次

综述与专论

城市环境生物安全研究的进展与挑战 ..... 苏建强, 安新丽, 胡安谊, 朱永官 (2565)  
城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路 ..... 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪莹 (2573)  
污泥 EPS 作为阻燃剂的机制归纳与潜力分析 ..... 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 时琛, 吴远远 (2583)

研究报告

北京大气 PM<sub>2.5</sub> 载体金属浓度、来源及健康风险的城郊差异 ..... 周安琪, 刘建伟, 周旭, 毕思琪, 张博哈, 高越, 曹红斌 (2595)  
京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度特征及相关性分析 ..... 金国因, 杨兴川, 晏星, 赵文吉 (2604)  
天津市 PM<sub>2.5</sub> 中二次硝酸盐形成及防控 ..... 肖致美, 武婷, 卫昱婷, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 陈魁, 邓小文 (2616)  
南京市大气细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 ..... 傅银银, 文浩哲, 王向华, 于南洋, 李冰, 韦斯 (2626)  
汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 ..... 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐 (2634)  
西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析 .....  
..... 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 朱波, 彭超, 周佳维, 车汉雄, 黄汝辉, 杨复沫, 刘合凡, 谭钦文, 韩丽, 陈军辉, 陆克定, 陈阳 (2648)  
气溶胶中溶解性有机质 (DOM) 液相氧化 ..... 陶冶, 陈彦彤, 李楠旺, 张敬宇, 叶招莲, 盖鑫磊 (2659)  
基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析 .....  
..... 曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 苏玲, 杨怡萱, 张洋, 蔡超琳, 刘敏 (2668)  
石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析 ..... 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 崔建升, 陈静, 刘大喜, 石文雅 (2679)  
基于光化学指数的邯郸市臭氧生成敏感性 ..... 牛元, 程水源, 欧盛菊, 姚诗音, 沈泽亚, 关攀博 (2691)  
基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响 ..... 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 胡贵贵, 梁秀娟, 牛林芝, 韩海青 (2699)  
基于卫星遥感和地面观测的人为源 VOCs 区域清单多维校验 ..... 王玥, 魏巍, 任云婷, 王晓琦, 陈赛赛, 程水源 (2713)  
中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算 ..... 王娜萍, 李海萍, 张帆 (2721)  
北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益 ..... 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 牛传真, 李勃 (2730)  
工业大气污染源排放绩效定量评价及应用 ..... 李廷昆, 冯银厂, 吴建会, 毕晓辉, 张裕芬 (2740)  
基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序 ..... 周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦 (2748)  
基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力 ..... 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 邓晰元, 郑皓 (2758)  
基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 ..... 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙博 (2769)  
大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 ..... 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚 (2778)  
不同流域水陆过渡带磷有效态的特征对比及环境意义 ..... 朱海, 袁旭音, 叶宏萌, 成瑾, 毛志强, 韩年, 周慧华 (2787)  
基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析 .....  
..... 李华林, 张建军, 张耀方, 常国梁, 时迪迪, 徐文静, 宋卓远, 于佩丹, 张守红 (2796)  
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征 ..... 吴小雨, 李天阳, 何丙辉 (2810)  
渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 ..... 刘鑫, 向伟, 司炳成 (2817)  
太湖流域上游南苕溪水夏季水体溶存二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素 .....  
..... 梁佳辉, 田琳琳, 周钟昱, 张海阔, 张方方, 何圣嘉, 蔡廷江 (2826)  
低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量: 以白洋淀为例 ..... 文艳, 单保庆, 张文强 (2839)  
覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响 ..... 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇 (2848)  
圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附 ..... 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 庄海峰, 方程冉 (2856)  
两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响 ..... 凌欣, 徐慧平, 陆光华 (2868)  
铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 ..... 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 熊维霞, 曾唯, 陈俊江, 江长胜 (2875)  
CDs-BOC 复合催化剂可见光下活化过硫酸盐降解典型 PPCPs ..... 雷倩, 许路, 艾伟, 李志敏, 杨磊 (2885)  
pg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOBr/Ag 复合材料的制备及其光催化降解磺胺甲噁唑 ..... 杨利伟, 刘丽君, 夏训峰, 朱建超, 高生旺, 王洪良, 王书平 (2896)  
海藻酸钠负载硫化零价铁对水体中 Cr(VI) 的还原去除 ..... 王旭, 杨欣楠, 黄币娟, 刘壮, 牟诗萌, 程敏, 谢燕华 (2908)  
超顺磁性纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub> 功能化材料对镉的吸附机制 ..... 张立志, 易平, 方丹丹, 王强 (2917)  
典型药物在医院废水和城市污水处理厂中的污染特征及去除情况 ..... 叶璞, 游文丹, 杨滨, 陈阳, 汪立高, 赵建亮, 应光国 (2928)  
印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性 ..... 徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石炬, 王岩, 金鹏康 (2937)  
短程硝化反硝化除磷颗粒污泥的同步驯化 ..... 王文琪, 李冬, 高鑫, 刘博, 张杰 (2946)  
厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复 ..... 李冬, 刘名扬, 张杰, 曾辉平 (2957)  
市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估 ..... 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 左宁, 陈芳媛 (2966)  
不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性 ..... 黄福义, 周曙仡, 王佳妮, 苏建强, 李虎 (2975)  
宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 ..... 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 尚天浩, 沈聪 (2981)  
温度和搅拌对牛粪厌氧消化系统抗生素抗性基因变化和微生物群落的影响 .....  
..... 许继飞, 张秋萍, 朱天骄, 秦帅, 朱文博, 庞小可, 赵吉 (2992)  
小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响 ..... 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 金相乐, 张阿凤 (3000)  
农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素 ..... 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 张兴昌, 甄庆, 李鹏飞 (3010)  
汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价 ..... 王锐, 邓海, 贾中民, 王佳彬, 余飞, 曾琴琴 (3018)  
调理剂对磷镉富集土壤中两种元素交互作用的影响 ..... 黄洋, 胡学玉, 曹坤坤, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (3028)  
S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制 ..... 程六龙, 黄永春, 王常荣, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽 (3037)  
连续 4 个生长季大气 CO<sub>2</sub> 升高与土壤铅 (Pb) 污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征 .....  
..... 贾夏, Lkhagvajargal Khadkhurel, 赵永华, 张春燕, 张宁静, 高云峰, 王子威 (3046)  
嗜热脂肪地芽孢杆菌对聚苯乙烯的降解性能 ..... 邢睿智, 赵子强, 赵文琪, 陈志, 陈金凤, 周顺桂 (3056)  
冬青和女贞叶表面颗粒物微形态及叶际细菌群落结构 ..... 李慧娟, 徐爱玲, 乔凤祿, 蒋敏, 宋琪 (3063)  
罗红霉素对大型溛生殖生长及抗氧化系统的影响 ..... 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 陆光华 (3074)  
中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染响应关系 ..... 冯兆忠, 彭金龙 (3084)  
《环境科学》征订启事(2698) 《环境科学》征稿简则(2712) 信息(3027, 3055, 3073)

# 基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力

郑锦涛<sup>1,2</sup>, 马涛<sup>1,3\*</sup>, 刘九夫<sup>1,3</sup>, 彭安帮<sup>1,3</sup>, 邓晰元<sup>1,3</sup>, 郑皓<sup>1,3</sup>

(1. 南京水利科学研究所, 南京 210029; 2. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 3. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

**摘要:**为促进我国再生水高效利用,优化水资源配置结构,针对再生水开发利用潜力开展再生水开发利用影响因素分析,剖析再生水资源的特殊性与竞争性,揭示再生水开发利用的驱动机制与约束机制,建立再生水供需双侧协调交互式的潜力指标体系,并基于冗余分析(RDA)筛选潜力预测关键指标,并以此为基础,构建具有随机效应的潜力预测模型(REM),预测全国再生水开发利用潜力.同时,针对REM模型参数的不确定性,刻画10%~90%分位数水平下的参数置信区间.结果发现,生态用水量、建成区供水管道密度、再生水处理设施建设固定资产投资和污水处理总量这4项指标与再生水开发利用紧密相关,为潜力预测关键指标.REM潜力预测模型拟合精度较高,最大拟合误差为-8.5%.未来一段时期内,我国再生水开发利用量将继续保持高速增长趋势,2025年全国开发利用潜力有望达到129亿m<sup>3</sup>,将有助于优化城市供水结构,提高区域水资源循环利用率.

**关键词:**再生水; RDA-REM模型; 潜力分析; 冗余分析(RDA); 水资源管理

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)06-2758-11 DOI: 10.13227/j.hjcx.202009068

## China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model

ZHENG Jin-tao<sup>1,2</sup>, MA Tao<sup>1,3\*</sup>, LIU Jiu-fu<sup>1,3</sup>, PENG An-bang<sup>1,3</sup>, DENG Xi-yuan<sup>1,3</sup>, ZHENG Hao<sup>1,3</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** To promote the efficient utilization of China's reuse water resources and optimize the allocation of water resources, an analysis of factors influencing the development and utilization of reuse water resources was conducted. The uniqueness and competitiveness of reuse water resources were analyzed, and the driving and constraint mechanisms were revealed. A potential indicator system for the bilateral coordination of the supply and demand of reuse water was also established. Based on redundancy analysis (RDA), key indicators for the prediction of reuse water development and utilization potential were screened. On this basis, a national-scale reuse water development and utilization potential prediction model was constructed (the random effects model, REM). Given some uncertainty in the parameters of the REM model, the confidence interval ranges of the parameters at the 10%-90% quartile levels were identified. The results show that four indicators (ecological water consumption, density of water supply pipelines in built-up areas, fixed asset investment in the construction of reuse water treatment facilities, and total wastewater treatment) are closely related to the development and utilization of reuse water and, hence, are key indicators. The REM for the potential prediction has a high fitting accuracy, which can effectively reflect the fluctuations in the observed values with a maximum fitting error of -8.5%. China's reuse water development and utilization will continue to maintain rapid growth long into the future, reaching 12.9 billion m<sup>3</sup> by 2025. This will help optimize national urban water supply structures and improve the reuse rate of regional water resources.

**Key words:** reused water; RDA-REM model; potential analysis; redundancy analysis(RDA); water resources management

我国水资源总量丰富,但由于人口基数大,导致人均水资源占有量仅为世界平均水平的1/4,属于水资源极度匮乏的国家之一,随着我国工业化和城市化进程加快,水环境污染日趋严重,进一步加剧了我国水资源短缺压力.在水资源供需矛盾日益严峻的形势下,如何更好地应对水资源短缺压力成为现阶段我国亟待解决的问题.再生水开发利用可置换常规水资源,降低对新鲜水的消耗,提高水资源循环利用率,对于缓解水资源供需矛盾具有积极作用,“将再生水纳入水资源统一配置体系”已成为新时期水利部推进全国节约用水工作、贯彻落实“节水优先”方针的一项重要举措<sup>[1]</sup>.不过由于我国再生水开发利用工作尚处于发展阶段<sup>[2]</sup>,再生水开发利用量在全国供水总量中所占比重尚不足1.5%,与世

界先进水平存在较大差距.因此,研究再生水开发利用的驱动和约束因素,掌握再生水开发利用潜力水平,对于提升再生水利用规模和效率、破解制约再生水开发利用瓶颈十分必要.

目前,针对再生水开发利用潜力研究较少,集中于某一时间段内区域规划、经济技术等条件确定情况下的供需平衡分析<sup>[3-5]</sup>.唐莲等<sup>[6]</sup>按照再生水厂处理能力计算出银川市再生水可供水量,根据再生水利用途径计算出再生水需水量,通过供需平衡分

收稿日期: 2020-09-07; 修订日期: 2020-11-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0403501); 水利部水资源节约项目(126302001000190006)

作者简介: 郑锦涛(1993~),男,博士研究生,主要研究方向为水文学与水资源, E-mail: 2261669514@qq.com

\* 通信作者, E-mail: tma@nhri.cn

析,确定再生水潜在开发利用量.田巍等<sup>[7]</sup>结合地区供水规划,采用定额法计算城市需水量,通过指定未来时期的再生水利用比例,测算了再生水开发利用潜力.采用供需平衡分析需要对研究区域进行完备的供需水量测算,通过供需水量差值或按照需水量的一定比例计算再生水开发利用潜力,所需数据类型较为庞杂,针对再生水利用比例的选取也具有一定主观性,同时,难以判断工艺技术、市场参与等因素对再生水开发利用的影响.

本文通过综合考虑区域水资源禀赋条件、水源特性与区域常规水资源稀缺程度、生态环境脆弱状态、开发利用水平、社会经济条件和配套工程完备性等要素,构建基于供需双侧协调交互式的潜力指标体系,并基于冗余分析方法研究各个指标对再生水开发利用影响程度,以筛选出潜力预测关键指标,建立随机效应潜力预测模型,进而对再生水开发利用潜力进行分析,以期为再生水合理开发利用提供参考.

## 1 我国再生水开发利用现状

我国较大规模开展再生水开发利用及其研究较

以色列和新加坡等缺水型国家起步晚,2009年全国再生水利用量仅为24亿 $\text{m}^3$ ,占总供水量的0.40%.但随着相关法律法规的相继颁布<sup>[8,9]</sup>,尤其是2012年实行最严格水资源管理制度以来,我国再生水利用事业快速发展,截至2018年,全国再生水利用量已达73.50亿 $\text{m}^3$ ,再生水生产能力也由2009年的1153万 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 提升至3578万 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ .与此同时,随着PPP模式的兴起,多元投资主体共同发展,政府和企业再生水处理设施基础设施建设方面也逐渐丰满,再生水管道敷设里程增长率达到了35.95% $\cdot \text{a}^{-1}$ .

2009年~2018年再生水开发利用量和再生水生产能力如图1所示.从中可知,再生水生产能力与开发利用量呈逐年递增趋势,再生水利用量占全国供水总量的比例由2009年不足0.40%提升到2018年的1.22%.根据文献[10]的规划,到2020年,缺水城市再生水利用率将达到20%以上,作为缓解我国水资源危机的现实选择与重要途径,再生水资源的巨大潜力未来将得到进一步释放,“第二水源”的作用也将得到进一步增强.

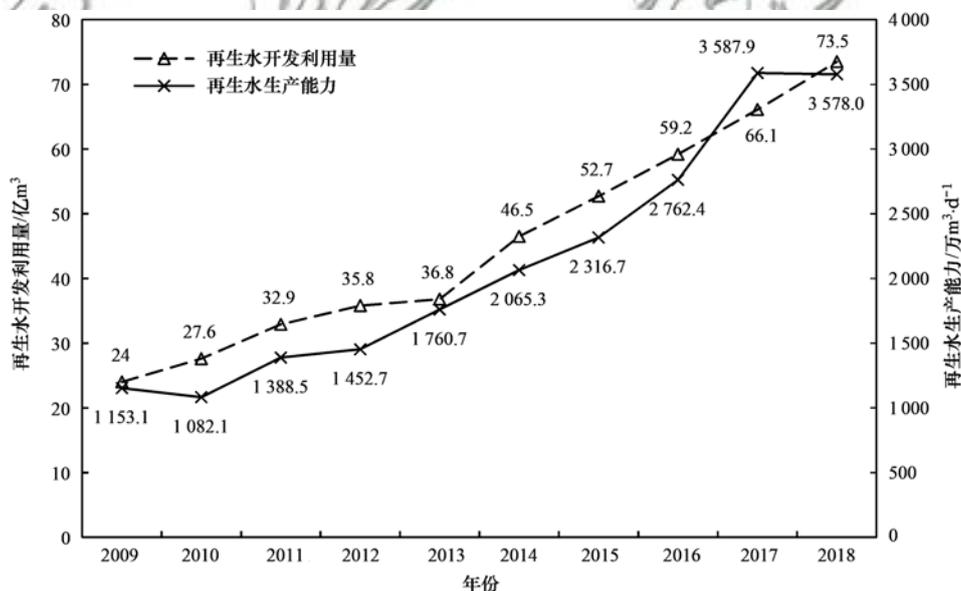


图1 2009~2018年再生水开发利用量与生产能力

Fig. 1 Reuse water development, utilization, and production capacity, 2009-2018

## 2 再生水开发利用影响因素分析及潜力指标体系建立

本文从驱动因素和约束因素这2个方面对再生水开发利用影响因素进行了分析,综合考虑区域水资源禀赋条件、水源特性、常规水资源稀缺程度、生态环境脆弱状态、开发利用水平、社会经济条件和配套工程完备性等要素,建立了基于供需双侧协调交互式的再生水潜力指标体系.

### 2.1 再生水开发利用影响因素分析

#### 2.1.1 驱动因素

再生水开发利用受到供给、需求双侧的共同驱动影响,区域天然水资源禀赋条件、再生水供水水源稳定性、政策激励程度以及市场参与度为再生水开发利用供给侧的影响因子,人口增长、城市化进程加快以及工业、农林牧渔、生态等用水需求紧张为需求侧的影响因子.正是基于再生水开发利用供给、需求双侧驱动,再生水资源的潜力才具有现实

意义。

(1) 供给侧 为研究供给侧对再生水开发利用的影响,本文选取了水资源总量、人均水资源量、污水处理量和水处理业就业人员数这 4 项指标。其中,水资源总量与人均水资源量代表了当地水资源禀赋条件<sup>[11]</sup>,反映出当地水资源对再生水水源的潜在补给能力;由于再生水厂进水水源多为污水处理厂处理后的尾水<sup>[12]</sup>,因此污水处理厂的污水处理量对于保证再生水供水水源的稳定性也具有重要意义;水处理业就业人员数反映了再生水资源的市场化程度,可综合体现再生水开发利用政策激励程度与市场参与程度。

(2) 需求侧 提高再生水资源的开发利用率为“以水定城”要求的内在体现,意味着再生水开发利用与城市化发展密切相关,也是对未来新型城市化发展的必然要求。因此,需求侧驱动指标选取了城区面积、城市人口密度指标,从城区面积、城市人口两个维度较为综合地反映城市化进程的发展<sup>[13]</sup>,体现了城市化发展对再生水开发利用的需求;目前国内尚未统计再生水各领域利用量,余鹏明等<sup>[14]</sup>研究表明:再生水在生产运营、公共服务、居民生活和生态环境等领域中将发挥愈加重要的作用,并且再生水利用量与各领域用水量之间的相关性呈逐年显著性递增趋势。因此,本文添加了各领域用水指标作为再生水开发利用需求驱动指标。

### 2.1.2 约束因素

(1) 工程条件 再生水开发利用受到水源特性与现有水利工程设施的影响和限制,强化再生水厂处理设施建设及配套管网建设是推动再生水开发利用的关键<sup>[15]</sup>。本文综合考虑了再生水水源水量及水质条件、配套管网体系完备程度等方面因素,选取了城市污水日处理能力、建成区供水管道密度、建成区排水管道密度、具备二、三级污水处理能力污水处理厂数量、污水处理率、污水处理总量和供水综合生产能力这 7 项指标作为反映再生水开发利用工程条件约束的指标集。

(2) 经济条件 国民经济层次中,再生水开发利用项目作为一种公共投资,应综合考虑当地经济发展水平、再生水处理设施与主体工程成本等方面因素<sup>[16]</sup>。本文选取了地区生产总值、人均地区生产总值指数、工业污染治理废水投资完成情况、污水处理设施建设固定资产投资和再生水处理设施建设固定资产投资这 5 项指标作为反映再生水开发利用经济条件约束的指标集。

(3) 技术水平 再生水处理技术的发展对于再生水开发利用的普及至关重要<sup>[17]</sup>,随着再生水厂深

度处理技术由 20 世纪 80 年代的简单生物曝气处理向超滤-反渗透、超磁分离和膜生物反应器等技术的发展,再生水处理效率得以极大提升。因此,本文考虑处理工艺技术和利用技术措施等方面的因素,选取了水处理业专利授权数作为综合反映再生水开发利用技术水平约束的指标。

(4) 生态环境 再生水开发利用对现有水生态环境将产生一定影响,具体体现在水量、水质两方面<sup>[18]</sup>。水量上,再生水资源作为城市“第二水源”,原污水处理厂尾水被深度处理为“下游用户”所需水质,随着再生水利用规模的增加,自然水循环中的水量将可能减少,从而对水生态环境产生不利影响<sup>[19]</sup>;水质上,随着《城市污水再生利用 景观环境用水水质》(GB/T 18921-2019)和《城市污水再生利用 地下水回灌水质》(GB/T 19772-2005)等国家标准的颁布与更新,对用于补给生态环境的再生水水质提出了更为严格的要求,将有利于水生态环境的改善。本文选取了年平均降水量、年平均蒸发量、地表水资源量、地下水资源量、劣 V 类河长百分比和建成区绿化覆盖率这 6 项指标作为反映再生水开发利用生态环境约束的指标集。

## 2.2 潜力指标体系建立

基于上述再生水开发利用影响因素分析,建立了潜力指标体系(见表 1)。

## 3 筛选再生水潜力预测关键指标

为探究各影响因子对再生水开发利用的影响机制,基于上述建立的再生水开发利用潜力指标体系,依据 2018 年全国节约用水办公室组织各省(自治区、直辖市)、各计划单列市和新疆生产建设兵团统计的 2015~2018 年再生水开发利用量数据与 2009~2018 年全国再生水开发利用量数据<sup>[20]</sup>,结合潜力指标体系中 32 项指标的面板数据,以此为基础数据,采用冗余分析法(redundancy analysis, RDA)分析了指标集特征,研究了各指标对再生水开发利用的影响程度,并最终筛选出潜力预测关键指标。

### 3.1 方法介绍

冗余分析不仅可用于研究影响因子之间的相关性,还可用于探索目标对象与影响因子的相互关系,其本质上为回归分析结合主成分分析的排序方法,也是多响应变量多元回归分析的拓展<sup>[23]</sup>。通过冗余分析,可以计算由解释变量提取的典范特征根向量所能解释的响应变量样本总方差比例,以测度各指标的信息贡献率,从而筛选相互独立且贡献率较大的指标。冗余分析计算流程如图 2 所示。

表 1 再生水开发利用潜力指标体系

Table 1 Indicator system for potential utilization of reuse water

影响因素	影响因子	指标层	指标编号	单位	文献
驱动因素	供给侧	水资源总量	E1	亿 m <sup>3</sup>	[20]
		人均水资源量	E2	m <sup>3</sup> ·人 <sup>-1</sup>	[20]
		污水处理量	E3	亿 m <sup>3</sup>	[21]
		水处理业就业人员数	E4	人	[22]
	需求侧	城区面积	E5	km <sup>2</sup>	[21]
		城市人口密度	E6	人·km <sup>-2</sup>	[21]
		用水总量	E7	亿 m <sup>3</sup>	[20]
		农业用水情况	E8	亿 m <sup>3</sup>	[20]
		工业用水情况	E9	亿 m <sup>3</sup>	[20]
		生活用水情况	E10	亿 m <sup>3</sup>	[20]
		生态用水情况	E11	亿 m <sup>3</sup>	[20]
		人均用水量	E12	L	[20]
		生产用水	E13	亿 m <sup>3</sup>	[20]
		工程条件	城市污水日处理能力	E14	万 m <sup>3</sup>
建成区供水管道密度	E15		km·km <sup>-2</sup>	[21]	
建成区排水管道密度	E16		km·km <sup>-2</sup>	[21]	
污水处理厂(二、三级处理)数量	E17		座	[21]	
污水处理率	E18		%	[21]	
污水处理总量	E19		万 m <sup>3</sup>	[21]	
供水综合生产能力	E20		万 m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>	[22]	
经济条件	地区生产总值		E21	亿元	[22]
	人均地区生产总值指数		E22	—	[22]
	工业污染治理废水投资完成情况		E23	万元	[22]
	污水处理设施建设固定资产投资	E24	万元	[21]	
	再生水处理设施建设固定资产投资	E25	万元	[21]	
	水处理业专利授权数	E26	个	[22]	
生态环境	年平均降水量	E27	mm	[20]	
	年平均蒸发量	E28	mm	[20]	
	地表水资源量	E29	亿 m <sup>3</sup>	[20]	
	地下水资源量	E30	亿 m <sup>3</sup>	[20]	
	劣 V 类河长百分比	E31	%	[20]	
	建成区绿化覆盖率	E32	%	[21]	

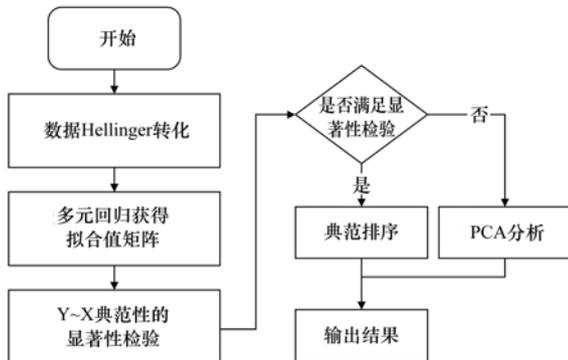


图 2 RDA 分析计算流程

Fig. 2 RDA analysis calculation flow

3.2 计算结果

为降低数据间欧氏距离对高数值数据的敏感度,须对原始数据进行 Hellinger 转化<sup>[24]</sup>. 基于 Hellinger 转化的再生水开发利用量及 32 项指标构成的面板数据,通过 RDA 分析,结果表明,由 32 类潜力指标组成的前五典范排序轴的累计方差解释率为 94.67%,意味着排序轴较好地代表了再生水资源

的原始信息,主要的结构趋势已被潜力指标解释. 同时,对 RDA 分析结果进行置换检验,检验各排序轴显著性情况. 排序轴方差解释量及置换检验结果见表 2.

表 2 排序轴的方差解释量及方差解释率

Table 2 Variance and percentage of variance for sorting axes

排序轴	方差解释量	方差解释率/%	累计方差解释率/%	P 值
RDA1	1.49	29.79	29.79	0.001
RDA2	1.18	23.63	53.42	0.001
RDA3	1.07	21.44	74.86	0.001
RDA4	0.55	10.94	85.80	0.116
RDA5	0.44	8.86	94.67	0.958

由表 2 可知,第一、二和三排序轴置换方差解释量大于 1,高于期望均值,且检验结果显著,累计方差解释率达到了 74.86%,对原始信息依然具有良好的代表性. 因此选取第一、二和三排序轴为约束轴,绘制 RDA 三序图(见图 3 和图 4),用以判别各潜力指标与再生水开发利用的相关性,从而筛选潜

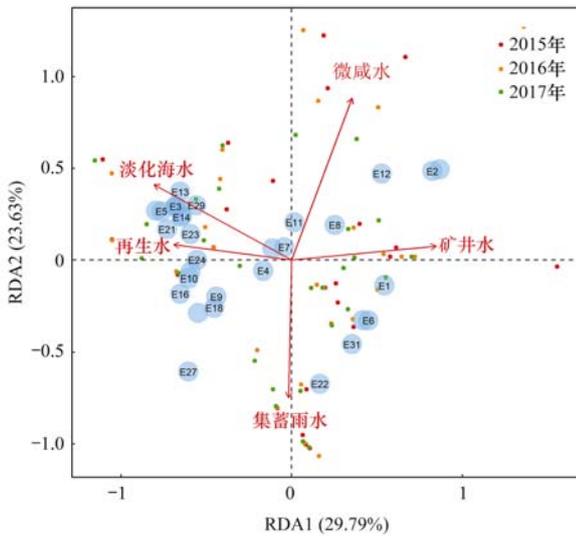


图3 潜力指标 RDA 分析(第一、二排序轴)

Fig. 3 RDA analysis of potential indicators (first-and second-order axes)

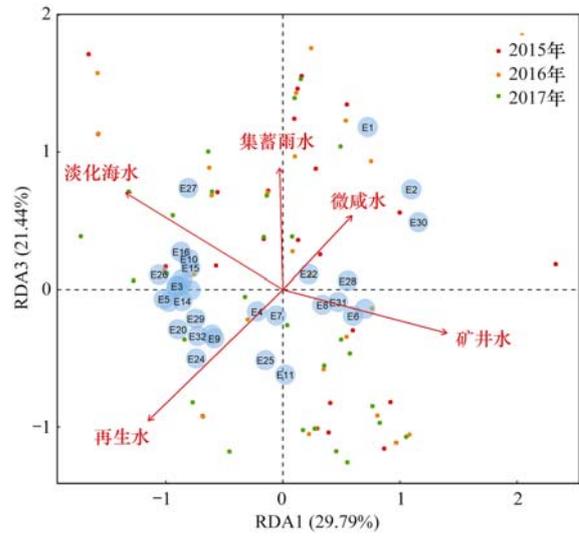


图4 潜力指标 RDA 分析(第一、三排序轴)

Fig. 4 RDA analysis of potential indicators (first-and third-order axes)

力预测关键指标。

依据 RDA 排序解释变量的位置坐标,分析其在响应变量方向向量上的投影,以探究解释变量对响应变量的影响程度.若解释变量在响应变量方向向量上的投影模数越大,表明其对响应变量的影响越大.解释变量与响应变量方向向量间的夹角情况也可用于判断二者相关性,若夹角越接近90°,表明二

者相关性越小,独立性越强.由图中再生水投影方向向量与潜力指标的坐标位置可初步判断各指标与再生水利用的相关性,通过计算潜力指标与响应变量方向向量间的倾角与投影模数,可定量判断不同指标对再生水开发利用的影响程度.潜力指标与再生水投影方向向量间倾角及投影模数比例见表3.

表3 潜力预测关键指标的筛选

Table 3 Screening of key indicators for potential prediction

指标名称	倾角/(°)	投影模数	模数比例/%	指标名称	倾角/(°)	投影模数	模数比例/%
E15	-12.6	0.55	30.6	E32	39.9	0.26	14.5
E19	23.6	0.54	30.5	E12	-45.2	0.26	14.3
E25	23.3	0.54	30.4	E28	52.3	0.24	13.5
E11	20.1	0.45	25.5	E1	50.7	0.23	12.6
E9	37.2	0.38	21.1	E18	54.6	0.22	12.5
E14	35.0	0.36	20.1	E22	-59.4	0.22	12.1
E24	43.9	0.36	20.0	E10	47.7	0.19	10.7
E30	45.6	0.34	18.8	E20	-52.8	0.19	10.7
E26	39.0	0.33	18.6	E13	-62.0	0.17	9.3
E7	19.2	0.33	18.3	E3	74.3	0.16	9.2
E23	46.5	0.32	18.1	E2	26.6	0.15	8.2
E5	45.7	0.32	18.0	E8	64.9	0.14	7.9
E31	48.6	0.31	17.3	E6	23.2	0.13	7.0
E29	46.4	0.30	16.6	E16	-59.0	0.09	5.3
E4	46.5	0.29	16.0	E21	72.0	0.09	4.8
E17	30.5	0.27	14.9	E27	34.8	0.06	3.1

由表3分析可知,生态用水量(E11)、建成区供水管道密度(E15)、污水处理总量(E19)和再生水处理设施建设固定资产投资(E25)等潜力指标与再生水投影方向向量间倾角小于25°,投影模数比例大于25%,意味着指标与再生水资源紧密相关,综合考虑指标时间序列长度及数据可获得性,将其选为再生水开发利用潜力预测关键指标:

(1) 建成区供水管道密度 指建成区内供水管道分布的疏密程度.计算公式为:

$$\text{建成区供水管道密度} = \frac{\text{供水管道长度}}{\text{建成区面积}} \quad (1)$$

(2) 污水处理总量 指污水处理厂(或污水处理装置)实际处理的污水量,包括物理处理量、生物

处理量和化学处理量。

(3) 再生水处理设施建设固定资产投资 指计划总投资在 5 万元以上的再生水处理设施项目, 包括固定资产更新、改建、扩建、新建等活动。

(4) 生态用水总量 仅包括人为措施供给的城镇环境用水和部分河湖、湿地补水, 而不包括降水、径流自然满足的水量。

#### 4 面板数据回归分析

基于上述潜力预测关键指标的筛选分析, 构建关键指标与再生水利用量的回归模型, 预测再生水开发利用量潜力。

##### 4.1 单位根检验

针对面板数据的回归分析, 需对模型变量进行单位根检验, 以检验其残差序列的平稳性, 避免模型出现伪回归情况。本文采用 ADF 检验<sup>[25]</sup> 及 KPSS 检验<sup>[26]</sup> 进行面板数据单位根检验, 检验结果见表 4。

表 4 面板数据单位根检验结果<sup>1)</sup>

变量	ADF 检验	KPSS 检验	平稳性	一阶差分	平稳性
E11	-3.84 (0.02)	0.051 ( > 0.1 )	平稳	—	—
E15	-4.59 ( < 0.01 )	0.203 ( > 0.1 )	平稳	—	—
E19	-3.15 (0.10)	0.068 ( > 0.1 )	不平稳	0.035 ( > 0.1 )	平稳
E25	-4.43 ( < 0.01 )	0.285 ( > 0.1 )	平稳	—	—

1) 数据系笔者计算, 括号内为  $P$  值

由表 4 可知, E19 拒绝不存在单位根假设, 但对变量数据一阶差分后, 各变量均拒绝原假设, 即一阶差分后变量均不含单位根, 表现出序列平稳性, 因此可将原变量数据纳入回归模型。

##### 4.2 REM 潜力预测回归模型

常用面板数据回归模型<sup>[27]</sup> 包括固定效应模型<sup>[28]</sup> (fixed effects model, FEM)、随机效应模型<sup>[29]</sup> (random effects model, REM) 和混合回归模型<sup>[30]</sup> (mixed effects model, MEM) 这 3 类。基于面板数据变量的平稳性检验, 构建 3 类回归模型, 参数估计采用 OLS 估计。模型参数估计结果见表 5。

针对回归模型的选择, 分别构造  $F$  统计量和 Hausman 统计量<sup>[31]</sup>, 其中  $F$  检验用于检验识别 MEM 模型与 FEM 模型, Hausman 检验用于检验识别 FEM 模型与 REM 模型。依据  $F$  检验与 Hausman 检验结果可知(见表 6),  $F$  检验统计量大于置信水平阈值,  $P$  值  $< 0.001$ , 拒绝了原假设, 认为固定效应显著。综合 Hausman 检验结果, Hausman 统计量为

2.718, 相对应的概率为 0.746, 在 5% 的置信水平上接受原假设, 即接受个体随机效应模型, 因此本文最终选取 REM 模型用于实证分析。

表 5 不同模型参数估计结果<sup>1)</sup>

系数	FEM	REM	MEM
截距	—	3 944.8 (0.000)	1 897.9 (0.000)
E11	503.14 (0.140)	899.8 (0.000)	960.2 (0.000)
E15	-278.01 (0.416)	-1 183.3 (0.000)	-917.0 (0.000)
E19	0.24 (0.001)	0.166 (0.000)	0.164 (0.000)
E25	0.007 (0.333)	0.068 (0.000)	0.025 (0.000)

1) 数据系笔者计算, 括号内为  $P$  值

表 6 模型统计检验结果

项目	统计量	$P$ 值
$F$ 检验	15.043	$< 0.001$
Hausman 检验	2.718	0.746

面板数据回归模型对极端数值较为敏感, 变量共线性、参数异方差等问题也可能导致回归结果出现偏差<sup>[32]</sup>, 导致回归系数的不确定性较大, 并且通过回归模型无法了解解释变量对响应变量影响趋势的变化过程。因此针对模型稳健性, 开展参数的分位数分析, 可以更好地了解模型参数的不确定性情况与解释变量对响应变量影响的趋势变化情况。REM 模型各参数 10%~90% 分位数水平下的区间估计结果如图 5 所示。

由图 5 分析可知, E11、E19、E25 与再生水开发利用均存在明显的正向影响关系, 但在分位数水平为 0.1~0.3 情况下出现较大范围波动。E15 与再生水开发利用存在负向影响, 与指标含义基本吻合。模型参数在不同分位数情况下的区间估计符号与 REM 模型参数符号基本一致, 表明 REM 模型的参数估计较为稳健。

## 5 潜力预测

### 5.1 潜力预测关键指标序列延展

基于 REM 模型计算未来时期的再生水开发利用潜力, 需对各潜力预测关键指标序列进行延展。其中, 生态用水量和污水处理总量随时间变化特征显著, 拟合曲线如图 6 和图 7 所示。

由图 6 可知, 继 2012 年国务院对实行最严格水资源管理制度作出的全面部署和具体安排以来, 全国生态用水量呈逐年递增趋势, 在可预见的时间内

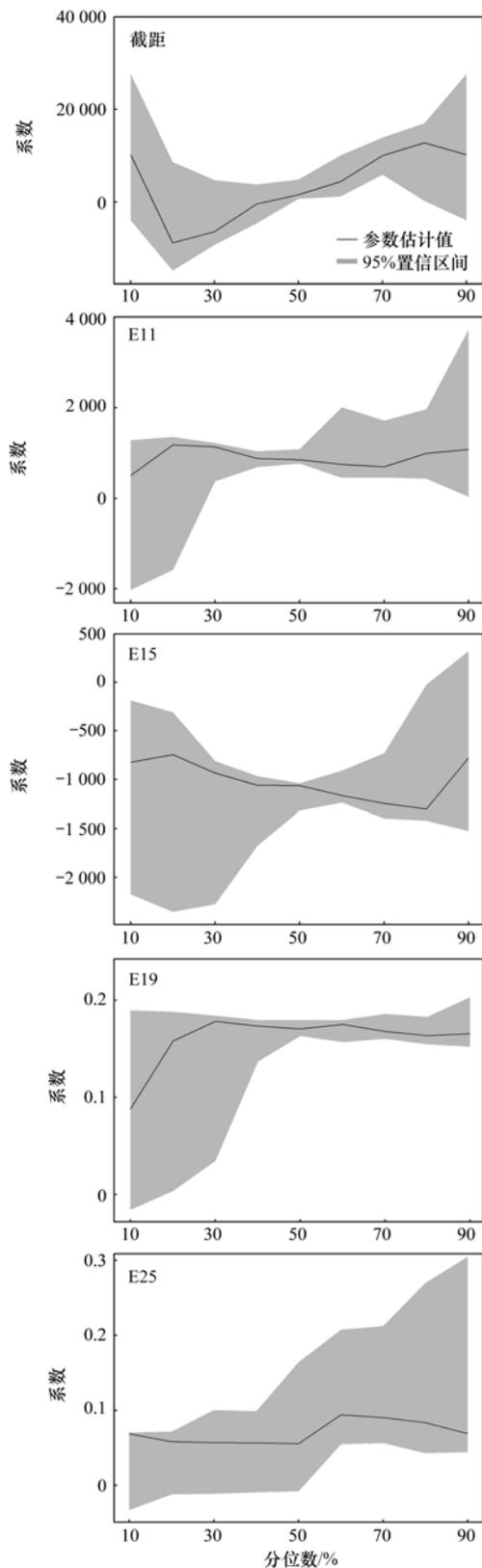


图 5 10%~90%分位数水平下 REM 模型参数

Fig. 5 REM model parameters at 10%-90% quantile level

生态用水总量与时间变量之间拟合曲线为:

$$y = 299\,000 - 297x + 0.073\,9x^2 \quad (2)$$

式中,  $y$  为生态用水量;  $x$  为年份.

由图 7 可知,随着经济社会的发展,污水处理总

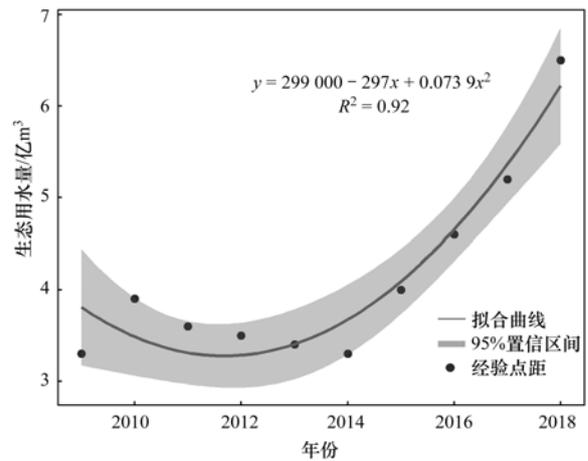


图 6 生态用水量指标拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve for the ecological water use indicator

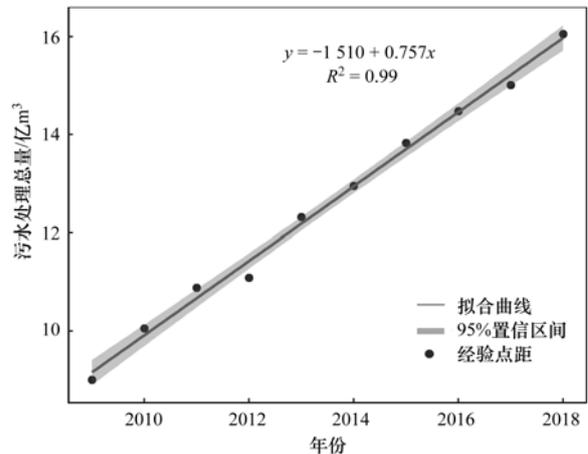


图 7 污水处理总量指标拟合曲线

Fig. 7 Fitting curve for the total wastewater treatment indicator

量逐年递增,并与时间变量存在显著的线性相关关系,其拟合曲线为:

$$y = -1\,510 + 0.757x \quad (3)$$

式中,  $y$  为污水处理总量;  $x$  为年份.

根据排水固定资产投资的两大主体(污水、污泥)和四大分项(污水处理、污泥处置、再生水利用、其他)的投资情况来看(如图 8),再生水利用的分项投资比例波动较小,多年固定资产投资运行基本平稳.

由图 8 分析可知,排水固定资产投资与时间变量显著相关,再生水处理设施建设多年平均固定资产投资占排水固定资产总投资的约 5.54%. 可通过构建排水固定资产投资的拟合曲线,结合再生水处理设施建设固定资产投资的多年平均占比,延展其时间序列长度.

排水固定资产投资拟合曲线为:

$$y = 892.47 - 96.379x + 16.207x^2 \quad (4)$$

式中,  $y$  为排水固定资产投资;  $x$  为年份.

建成区供水管道密度与建成区面积及供水管道

长度密切相关,可通过分别构建建成区面积与供水管道长度随时间变化的拟合曲线,依据公式(1),推

导建成区供水管道密度. 供水管道长度及建成区面积拟合曲线如图 9 所示.



图 8 排水固定资产投资

Fig. 8 Fixed asset investment in reuse water treatment facilities

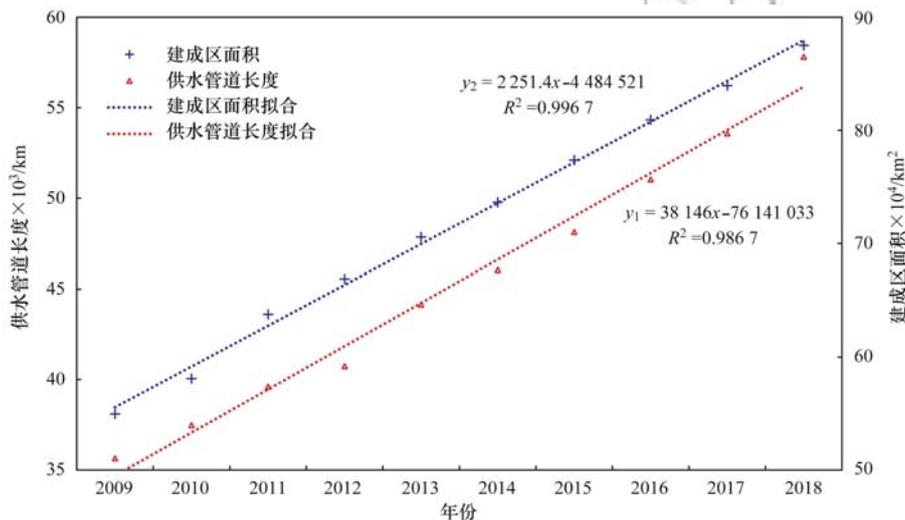


图 9 供水管道长度及建成区面积趋势

Fig. 9 Trend in the length of the water supply pipeline and the size of built-up areas

供水管道长度及建成区面积的拟合曲线分别为:

$$y_1 = 38.146x - 76.141033 \quad (5)$$

$$y_2 = 2.251.4x - 4.484.521 \quad (6)$$

式中,  $y_1$  为供水管道长度;  $y_2$  为建成区面积;  $x$  为年份.

根据上述潜力预测关键指标拟合曲线,结合指标含义,延展各指标时间序列至 2025 年,各指标预测值的计算结果见表 7.

### 5.2 再生水开发利用潜力预测

目前,全国再生水开发利用量约为 2 013.7 万  $m^3 \cdot d^{-1}$ ,依据构建的 REM 模型及各潜力预测关键指标序列延展结果,测算再生水 2019~2025 年开发利用潜力,并绘制再生水开发利用潜力 25%、50% 和 75% 分位数灰度图(见图 10).

表 7 潜力预测关键指标的推计结果

Table 7 Extrapolation of the key indicators for potential prediction

年份	E11 /亿 $m^3$	E15 /km $\cdot$ km <sup>-2</sup>	E19 /亿 $m^3$	E25 /亿元
2019	7.2	13.2	16.7	99.4
2020	8.4	13.4	17.5	114.7
2021	9.7	13.6	18.2	131.9
2022	11.1	13.8	19.0	150.8
2023	12.7	14.1	19.8	171.5
2024	14.5	14.3	20.5	194.0
2025	16.4	14.5	21.3	218.3

基于 REM 模型,根据各潜力预测关键指标 2019~2025 年推导值,计算出 2025 年全国再生水开发利用潜力约为 129 亿  $m^3$ , 25%~75% 分位数水平下开发利用潜力范围为 [76.4, 159.5], 其中低分位数水平下再生水开发利用潜力增长缓慢与模型参数在低分位数水平下存在较大负值变化有关.

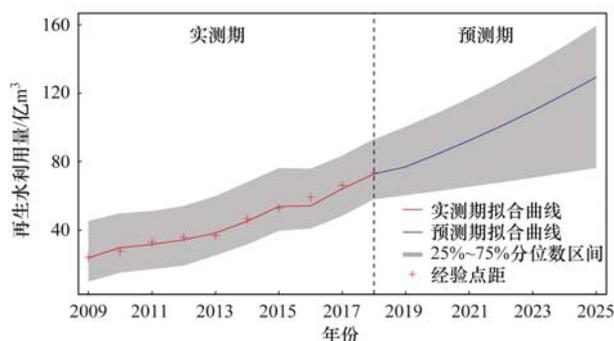


图 10 再生水开发利用潜力

Fig. 10 Potential for the development and utilization of reuse water

### 5.3 合理性分析

通过再生水开发利用量的模型预测值与实际值对比发现,实测期 REM 模型的预测点距与经验点距拟合精度较高(见表 8),最大拟合误差为  $-8.5\%$ ,并且回归曲线有效反映了经验点距的波动情况,表明通过 RDA 分析筛选的 4 类潜力预测关键指标对再生水开发利用的原始信息具有良好代表性.从再生水开发利用量的变化趋势来看,预计 2019~2025 年全国再生水开发利用量将保持增长趋势,这与城市供水结构调整方向基本一致,符合水资源利用与产业结构和空间布局等协调发展的要求.因此,REM 模型预测结果基本合理.

表 8 REM 模型拟合结果<sup>1)</sup>

Table 8 REM model fitting results

年份	统计值/亿 m <sup>3</sup>	拟合值/亿 m <sup>3</sup>	拟合误差/%
2009	24.0	23.8	-0.8
2010	27.6	29.7	7.9
2011	32.9	31.6	-3.7
2012	35.8	34.4	-4.0
2013	36.8	38.3	4.0
2014	46.5	45.2	-2.7
2015	52.7	53.8	2.0
2016	59.2	54.2	-8.5
2017	66.1	64.2	-2.8
2018	73.5	72.8	0.9

1)  $R^2 = 0.847$

## 6 建议

(1) 推动统筹规划编制 建议尽快制定出台再生水利用指导意见,明确再生水建设和运营主体,建立再生水利用监管体系,限制具有再生水使用条件的用户取用原水和自来水.推进各地区再生水配置利用专项规划编制工作,以再生水系统、给排水系统、道路系统三系统同步进行,近期远期相结合为原则,统筹规划再生水系统布局.

(2) 推进管网规划建设 结合各再生水厂现状,加快推进再生水管网规划编制工作,按照属地管理原则,明确资金筹资主体,根据不同片区发展定位

和土地利用规划,同步建设再生水输配水设施.建议再生水主管网及利用设施由市财政投资,在新建及改造道路实施工程中,由工程实施主体同步配套建设再生水管网预留孔,同时对再生水开发利用企业予以补贴,降低水资源开发成本,鼓励污水处理厂及再生水供水管线周边用户使用再生水,全面提升再生水利用效率.

(3) 加大政策激励力度 再生水基础设施建设具有投资运营成本高、投资回报周期长、公益性强等特点,仅依托相关企业和社会力量投资建设难度大.建议在设备和管道等工程建设阶段,国家能够给予专项资金支持,拓宽建设资金来源渠道,与地方政府和相关企业共同承担基础设施建设费用.同时,在运营管理阶段,对再生水经营主体和用户予以税费减免、政策补贴等政策激励措施,提高用户和经营主体积极性.

(4) 创新处理技术科技 建议加强生活污水源头减量和尾水回收利用,探索新的再生水利用途径.加大财政对再生水生产技术研发的投入力度,不断推动已有技术的改进与更新,同时加强新工艺、新流程、新技术和新设备的研究开发与推广应用,促进再生水生产技术集成体系的形成.尤其要加强对膜处理工艺的研发,提高国产膜的质量与性能,使质优价廉的国产膜得到推广应用,从而进一步降低再生水生产的技术成本.

(5) 合理制定水价机制 由于再生水是自来水的的天然替代品,对于部分自来水价格偏低的地区,再生水不具有经济优势,难以实现再生水推广利用.建议完善该地区自来水价格设计机制,合理制定可持续的水价机制.同时,建议针对不同的再生水回用对象及不同服务市场,采取不同的定价策略,通过合理制定阶梯水量分界点和用水单价,更好地刺激用户对再生水使用的积极性,进而调节市场供需平衡.

(6) 加大示范宣传力度 利用互联网、电视、移动终端等媒介,加强再生水的宣传科普,提升再生水利用意识,提高用户使用再生水的积极性.加强示范高校、示范企业,尤其是高耗水企业等再生水回用节水减排建设,发挥示范企业引领作用.

## 7 结论

(1) 通过对供需双侧协调交互式再生水开发利用潜力指标体系的 RDA 分析,生态用水量、建成区供水管道密度、再生水处理设施建设固定资产投资和污水处理总量 4 类指标与再生水开发利用紧密相关,可作为再生水开发利用潜力预测的关键指标.

(2) 构建的 REM 模型预测点距与经验点距拟

合精度较高,可有效反映经验点距波动情况。同时,通过潜力预测分析,未来一段时期内我国再生水开发利用将继续保持高速增长趋势,2025 年开发利用量有望达到 129 亿  $m^3$ ,这将有助于提高区域水资源循环利用,优化城市供水结构。

致谢:感谢全国节约用水办公室对本研究工作的大力支持!

#### 参考文献:

- [ 1 ] 中华人民共和国水利部办公厅. 水利部关于非常规水源纳入水资源统一配置的指导意见[Z]. 2017-08-16.
- [ 2 ] 刘晓君, 杨兴, 付汉良. 再生水研究的发展态势与研究热点分析——基于 CiteSpace 的图谱量化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(4): 68-75.  
Liu X J, Yang X, Fu H L. Development trend and research hotspots of reclaimed water research: visualize quantitative research based on CiteSpace[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(4): 68-75.
- [ 3 ] Hussain M I, Muscolo A, Farooq M, *et al.* Sustainable use and management of non-conventional water resources for rehabilitation of marginal lands in arid and semiarid environments [J]. Agricultural Water Management, 2019, 221: 462-476.
- [ 4 ] 张田媛, 谭倩, 王淑萍. 北京市清水与再生水协同利用优化模型[J]. 环境科学, 2019, 40(7): 3223-3232.  
Zhang T Y, Tan Q, Wang S P. Model-based optimization for the coordinated supply of clear and reclaimed water in the central districts of Beijing, China[J]. Environmental Science, 2019, 40(7): 3223-3232.
- [ 5 ] 付意成, 邢乃春, 赵进勇, 等. 北方缺水城市水资源短缺问题决策策略研究——以廊坊市为例[J]. 中国农村水利水电, 2017, (11): 1-5.  
Fu Y C, Xing N C, Zhao J Y, *et al.* Solutions to the water shortage of water-lacking cities in the North China: taking Langfang City as an example [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017, (11): 1-5.
- [ 6 ] 唐莲, 刘超. 基于供需平衡的城市污水再生利用潜力预测[J]. 节水灌溉, 2014, (11): 56-59.  
Tang L, Liu C. Sewage regeneration and reuse potential estimation based on supply and demand balance [J]. Water Saving Irrigation, 2014, (11): 56-59.
- [ 7 ] 田巍, 陈耀文, 周志轩. 银川市市区再生水利用潜力测算与配置研究[J]. 中国农村水利水电, 2018, (3): 40-43.  
Tian W, Chen Y W, Zhou Z X. Research on the potential calculation and collocation of reclaimed water in Yinchuan City [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018, (3): 40-43.
- [ 8 ] 生态环境部. 新《中华人民共和国水法》[EB/OL]. [http://fgs.mee.gov.cn/fl/201811/t20181129\\_676286.shtml](http://fgs.mee.gov.cn/fl/201811/t20181129_676286.shtml), 2016-10-08.
- [ 9 ] 生态环境部. 中华人民共和国循环经济促进法[EB/OL]. [http://www.mee.gov.cn/ywz/fgbz/fl/201811/t20181114\\_673624.shtml](http://www.mee.gov.cn/ywz/fgbz/fl/201811/t20181114_673624.shtml), 2018-11-14.
- [ 10 ] 中国政府网. 发展改革委 水利部联合印发《国家节水行动方案》[EB/OL]. [http://www.gov.cn/xinwen/2019-04/19/content\\_5384418.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2019-04/19/content_5384418.htm), 2019-04-19.
- [ 11 ] 徐依婷, 穆月英. 粮食生产水足迹动态演变及分解效应[J]. 华南农业大学学报(社会科学版), 2020, 19(3): 70-83.  
Xu Y T, Mu Y Y. Dynamic change and decomposition effects of water footprint in grain production[J]. Journal of South China Agricultural University (Social Science Edition), 2020, 19(3): 70-83.
- [ 12 ] 刘健, 程丽华, 王明月, 等. 不同水源的再生水中溶解性有机物的特性[J]. 中国给水排水, 2019, 35(21): 92-96.  
Liu J, Cheng L H, Wang M Y, *et al.* Characteristic of dissolved organic matter of reclaimed water from different sources [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(21): 92-96.
- [ 13 ] Bao C, He D M. Scenario Modeling of urbanization development and water scarcity based on system dynamics: a case study of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(20), doi: 10.3390/ijerph16203834.
- [ 14 ] 余鹏明, 管孝艳, 陈俊英, 等. 基于 Spearman 秩相关的再生水利用量影响因素研究[J]. 节水灌溉, 2019, (10): 78-82, 88.  
Yu P M, Guan X Y, Chen J Y, *et al.* Study on factors affecting reclaimed water utilization based on Spearman rank correlation [J]. Water Saving Irrigation, 2019, (10): 78-82, 88.
- [ 15 ] 刘广奇, 赵志伟, 白桦. 基于复杂网络理论的城市给排水系统规划优化[J]. 中国给水排水, 2020, 36(13): 113-118.  
Liu G Q, Zhao Z W, Bai H. Optimization of urban water system planning based on complex network theory [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(13): 113-118.
- [ 16 ] 高旭阔, 刘奇. 再生水项目国民经济评价体系研究[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(4): 229-236.  
Gao X K, Liu Q. National economic evaluation of reclaimed water project [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(4): 229-236.
- [ 17 ] 胡洪营, 吴乾元, 吴光学, 等. 污水特质(水征)评价及其在污水再生处理工艺研究中的应用[J]. 环境科学研究, 2019, 32(5): 725-733.  
Hu H Y, Wu Q Y, Wu G X, *et al.* Evaluation of water feature and its application in the wastewater reclamation [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(5): 725-733.
- [ 18 ] 张瑞, 刘操, 孙德智, 等. 北京地区再生水补给型河湖水质改善工程案例分析与问题诊断[J]. 环境科学研究, 2016, 29(12): 1872-1881.  
Zhang R, Liu C, Sun D Z, *et al.* Water quality improvement engineering for urban rivers and lakes supplied by reclaimed water in Beijing: case analysis and problem diagnosis [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(12): 1872-1881.
- [ 19 ] 廖安然, 宋献方, 张应华, 等. 2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5440-5450.  
Liao A R, Song X F, Zhang Y H, *et al.* Impact of maximum precipitation in 2017 on the runoff component of reclaimed water-intaking river [J]. Environmental Science, 2018, 39(12): 5440-5450.
- [ 20 ] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.  
Ministry of Water Resources People's Republic of China. China water resources bulletin [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2019.
- [ 21 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市建设统计年鉴 [EB/OL]. <http://www.mohurd.gov.cn/xytj/tjzljxytjgb/jstjnj/>, 2020-03-27.
- [ 22 ] 国家统计局. 中国统计年鉴 [EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>, 2020-07-14.
- [ 23 ] 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.
- [24] 董明刚, 姜振龙, 敬超. 基于海林格距离和 SMOTE 的多类不平衡学习算法[J]. *计算机科学*, 2020, **47**(1): 102-109.  
Dong M G, Jiang Z L, Jing C. Multi-class imbalanced learning algorithm based on Hellinger distance and SMOTE algorithm [J]. *Computer Science*, 2020, **47**(1): 102-109.
- [25] 左秀霞. 带高次趋势项的 ADF 单位根检验[J]. *数量经济技术经济研究*, 2019, **36**(1): 152-169.  
Zuo X X. ADF unit root test with high order trend term [J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2019, **36**(1): 152-169.
- [26] 管河山, 邹清明, 罗智超. 时间序列平稳性分类识别研究 [J]. *统计与信息论坛*, 2016, **31**(4): 3-8.  
Guan H S, Zou Q M, Luo Z C. Study on classification and identification of time series stationarity [J]. *Statistics & Information Forum*, 2016, **31**(4): 3-8.
- [27] 陶丽, 邵凌楠, 田茂再. 带固定效应面板分位回归方法的构建与比较[J]. *统计与决策*, 2020, **36**(17): 9-13.  
Tao L, Tai L N, Tian M Z. Construction and comparison of quantile regression method with fixed effects panel [J]. *Statistics & Decision*, 2020, **36**(17): 9-13.
- [28] 李雅男, 丁振民, 邓元杰, 等. 中国城市工业化发展与 PM<sub>2.5</sub> 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1987-1996.  
Li Y N, Ding Z M, Deng Y J, *et al.* Relationship between urban industrialization and PM<sub>2.5</sub> concentration in China and the internal mechanism of EKC [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1987-1996.
- [29] 叶伟鹏, 刘苗苗, 毕军. 中国臭氧短期暴露与人群死亡之间关系的 Meta 分析研究 [J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(7): 2644-2651.  
Ye W P, Liu M M, Bi J. Meta-analysis of the associations between short-term ozone exposure and human mortality in China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(7): 2644-2651.
- [30] 王晓彦, 王帅, 朱莉莉, 等. 2014 ~ 2016 年京津冀沿山城市空气质量首要污染物特征分析 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(10): 4422-4429.  
Wang X Y, Wang S, Zhu L L, *et al.* Characteristics of primary pollutants of air quality in cities along the Taihang Mountains in Beijing-Tianjin-Hebei region during 2014- 2016 [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4422-4429.
- [31] 连玉君, 王闻达, 叶汝财. Hausman 检验统计量有效性的 Monte Carlo 模拟分析 [J]. *数理统计与管理*, 2014, **33**(5): 830-841.  
Lian Y J, Wang W D, Ye R C. The efficiency of Hausman test statistics: a Monte-Carlo investigation [J]. *Journal of Applied Statistics and Management*, 2014, **33**(5): 830-841.
- [32] 温珺, 阎志军, 程愚. 数字经济驱动创新效应研究——基于省际面板数据的回归 [J]. *经济体制改革*, 2020, (3): 31-38.  
Wen J, Yan Z J, Cheng Y. Research on the effect of digital economy on upgrading innovation capacity-based on provincial-level panel data [J]. *Reform of Economic System*, 2020, (3): 31-38.

## CONTENTS

Advances and Challenges in Biosafety Research for Urban Environments .....	SU Jian-qiang, AN Xin-li, HU An-yi, <i>et al.</i> (2565)
Key Problems and Novel Strategy of Controlling Emerging Trace Organic Contaminants During Municipal Wastewater Reclamation .....	WANG Wen-long, WU Qian-yuan, DU Ye, <i>et al.</i> (2573)
Mechanisms Summary and Potential Analysis of EPS as a Flame Retardant .....	HAO Xiao-di, ZHAO Zi-cheng, LI Ji, <i>et al.</i> (2583)
Concentrations, Sources, and Health Risks of PM <sub>2.5</sub> Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs .....	ZHOU An-qi, LIU Jian-wei, ZHOU Xu, <i>et al.</i> (2595)
MAIAC AOD and PM <sub>2.5</sub> Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas .....	JIN Jian-nan, YANG Xing-chuan, YAN Xing, <i>et al.</i> (2604)
Formation and Prevention of Secondary Nitrate in PM <sub>2.5</sub> in Tianjin .....	XIAO Zhi-mei, WU Ting, WEI Yu-ting, <i>et al.</i> (2616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitro Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM <sub>2.5</sub> of Nanjing, China .....	FU Yin-yin, WEN Hao-zhe, WANG Xiang-hua, <i>et al.</i> (2626)
Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain .....	LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, <i>et al.</i> (2634)
Sources Apportionment of Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs) in a Typical Southwestern Region in China During Summer .....	CHEN Mu-lan, WANG Sai-nan, CHEN Tian-shu, <i>et al.</i> (2648)
Aqueous-phase Oxidation of Dissolved Organic Matter (DOM) from Extracts of Ambient Aerosols .....	TAO Ye, CHEN Yan-tong, LI Nan-wang, <i>et al.</i> (2659)
Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data .....	CAO Shan-shan, DUAN Yu-sen, GAO Chan-chan, <i>et al.</i> (2668)
Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O <sub>3</sub> and NO <sub>2</sub> in Shijiazhuang .....	WANG Shuai, NIE Sai-sai, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (2679)
Applying Photochemical Indicators to Analyze Ozone Sensitivity in Handan .....	NIU Yuan, CHENG Shui-yuan, OU Sheng-ju, <i>et al.</i> (2691)
Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization .....	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, ZHANG Xiu, <i>et al.</i> (2699)
Multidimensional Verification of Anthropogenic VOCs Emissions Inventory Through Satellite Retrievals and Ground Observations .....	WANG Yue, WEI Wei, REN Yun-ting, <i>et al.</i> (2713)
Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration .....	WANG Na-ping, LI Hai-ping, ZHANG Fan (2721)
Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing .....	LU Ya-ling, FAN Zhao-yang, JIANG Hong-qiang, <i>et al.</i> (2730)
Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources .....	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (2740)
Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks .....	ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, <i>et al.</i> (2748)
China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model .....	ZHENG Jin-tao, MA Tao, LIU Jiu-fu, <i>et al.</i> (2758)
Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality .....	RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (2769)
Sensitivity Analysis of Boundary Load Reduction in a Large Shallow Lake Water Quality Model .....	WANY Ya-ning, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (2778)
Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance .....	ZHU Hai, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2787)
Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods .....	LI Hua-lin, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yao-fang, <i>et al.</i> (2796)
Characteristics of Runoff-related Total Nitrogen and Phosphorus Losses Under Long-term Fertilization and Cultivation on Purple Soil Sloping Croplands .....	WU Xiao-yu, LI Tian-yang, HE Bing-hui (2810)
Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments .....	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (2817)
Characteristics and Drivers of Dissolved Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Nantiaoxi River System in the Upper Reaches of the Taihu Lake Basin During Summer-Autumn .....	LIANG Jia-hui, TIAN Lin-lin, ZHOU Zhong-yu, <i>et al.</i> (2826)
Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake .....	WEN Yan, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang (2839)
Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping .....	CHEN Shu-tong, LI Da-peng, XU Chu-tian, <i>et al.</i> (2848)
Coadsorption of Heavy Metal and Antibiotic onto Humic Acid from Polder River Sediment .....	XUE Xiang-dong, YANG Chen-hao, YU Jian-lin, <i>et al.</i> (2856)
Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River .....	LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua (2868)
Wastewater Treatment Effects of Ferric-carbon Micro-electrolysis and Zeolite in Constructed Wetlands .....	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, <i>et al.</i> (2875)
CDS-BOC Nanophotocatalyst Activating Persulfate Under Visible Light for the Efficient Degradation of Typical PPCPs .....	LEI Qian, XU Lu, AI Wei, <i>et al.</i> (2885)
Preparation of pg-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /BiOBr/Ag Composite and Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole .....	YANG Li-wei, LIU Li-jun, XIA Xun-feng, <i>et al.</i> (2896)
Sodium Alginate Loading of Zero-Valent Iron Sulfide for the Reduction of Cr(VI) in Water .....	WANG Xu, YANG Xin-nan, HUANG Bi-jian, <i>et al.</i> (2908)
Adsorption Mechanism of Cadmium by Superparamagnetic Nano-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub> Functionalized Materials .....	ZHANG Li-zhi, YI Ping, FANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2917)
Pollution Characteristics and Removal of Typical Pharmaceuticals in Hospital Wastewater and Municipal Wastewater Treatment Plants .....	YE Pu, YOU Wen-dan, YANG Bin, <i>et al.</i> (2928)
Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors .....	XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, <i>et al.</i> (2937)
Simultaneous Domestication of Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules .....	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (2946)
Long-term Storage and Rapid Activity Recovery of ANAMMOX Granular Sludge .....	LI Dong, LIU Ming-yang, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (2957)
Migration and Environmental Effects of Heavy Metals in the Pyrolysis of Municipal Sludge .....	JIANG Yuan-yuan, WANG Yan, DUAN Wen-yang, <i>et al.</i> (2966)
Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands .....	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (2975)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Cattle Farms in Ningxia .....	ZHANG Jun-hua, CHEN Rui-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (2981)
Effects of Temperature and Stirring on the Changes of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Anaerobic Digestion of Dairy Manure .....	XU Ji-fei, ZHANG Qiu-ping, ZHU Tian-jiao, <i>et al.</i> (2992)
Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices .....	LIU Zhen-jie, LI Peng-fei, HUANG Shi-wei, <i>et al.</i> (3000)
Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone .....	ZHANG Yan-jiang, WANG Jun-peng, WANG Yu, <i>et al.</i> (3010)
Spatial Distribution Characteristics, Pollution, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Mercury Mining Areas .....	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (3018)
Interaction and Mechanism Between Conditioning Agents and Two Elements in the Soil Enriched with Phosphorus and Cadmium .....	HUANG Yang, HU Xue-yu, CAO Kun-kun, <i>et al.</i> (3028)
Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings .....	CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, WANG Chang-rong, <i>et al.</i> (3037)
Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO <sub>2</sub> on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils .....	JIA Xia, Lkhagvajargal Khadkhurel, ZHAO Yong-hua, <i>et al.</i> (3046)
Biodegradation of Polystyrene by <i>Geobacillus stearothermophilus</i> .....	XING Rui-zhi, ZHAO Zi-qiang, ZHAO Wen-qi, <i>et al.</i> (3056)
Micro-morphological Characteristics of Particles on Holly and Ligustrum Leaf Surfaces and Seasonal Changes in Bacterial Communities .....	LI Hui-juan, XU Ai-ling, QIAO Feng-lu, <i>et al.</i> (3063)
Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of <i>Daphnia magna</i> .....	ZHANG Ling-yu, LIU Jian-chao, LENG Yang, <i>et al.</i> (3074)
Relationship Between Relative Crop Yield/Woody Plant Biomass and Ground-level Ozone Pollution in China .....	FENG Zhao-zhong, PENG Jin-long (3084)