

# 2023 年水污染控制与水资源利用热点回眸

李江<sup>1</sup>, 张婷<sup>2</sup>, 潘章斌<sup>3</sup>, 李媛<sup>4</sup>, 李彦澄<sup>1</sup>, 丁士元<sup>5</sup>, 孟庆梅<sup>6</sup>, 王斌<sup>7</sup>, 王涛<sup>1</sup>, 杨超<sup>8</sup>, 刘保森<sup>9</sup>, 高军凯<sup>10</sup>, 王晶<sup>11</sup>, 张雅琴<sup>12</sup>, 王燕杉<sup>2</sup>, 罗阳<sup>1</sup>, 侯立安<sup>13\*</sup>

1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025
2. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072
3. 山东省城市供排水水质监测中心, 济南 250014
4. 安徽大学信息材料与智能感知安徽省实验室, 物质科学与信息技术研究院, 合肥 230601
5. 天津大学地球系统科学学院, 天津 300072
6. 山东理工大学资源与环境工程学院, 淄博 255000
7. 贵州大学土木工程学院, 贵阳 550025
8. 东莞理工学院生态环境工程技术研发中心, 东莞 523808
9. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 济南 250101
10. 浙江海洋大学船舶与海运学院, 舟山 316022
11. 浙江大学化学工程与生物工程学院, 杭州 310058
12. 工业新水源技术浙江省工程研究中心, 杭州 311121
13. 中国人民解放军 96911 部队, 北京 100011

**摘要** 从常规水资源治理和非常规水资源开发角度, 回顾了 2023 年地表水中新污染物防控、地下水资源保护、饮用水安全保障、污水处理降碳增效、废水资源化利用、非常规水源开发及中国水资源保护与利用等方面的全球科技研究热点及亮点工作。分析表明: 地表水新污染物防控体系建设聚焦于环境质量标准、污染治理技术的研究, 借助现代水文地质学有望提升地下水资源保护水平, 新膜技术有助于饮用水安全保障, 增效降碳协同发展成为污水处理行

收稿日期: 2023-12-22; 修回日期: 2024-01-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51968008, 22306037, 52000136, 22108247); 安徽省教育厅自然科学基金项目(2023AH050111); 贵州大学科研创新团队项目(贵大科创团[2023]05号)

作者简介: 李江, 教授, 研究方向为污(废)水资源化利用、有机固废循环利用、新污染物治理, 电子信箱: jli82@gzu.edu.cn; 侯立安(通信作者), 正高级工程师, 中国工程院院士, 研究方向为水安全保障、特种水污染控制、人居环境及密闭空间空气净化等, 电子信箱: h20091957@126.com

引用格式: 李江, 张婷, 潘章斌, 等. 2023 年水污染控制与水资源利用热点回眸[J]. 科技导报, 2024, 42(1): 114-123; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.01.007

业面临的新挑战,农村污水处理与资源化领域在技术的革新、管理的优化和污水的资源化等多个方面取得了实质性成效和研究成果,碳基纳米材料等在环境放射性核素分离领域得到广泛关注,结晶技术是高盐废水零排放的关键技术,新型膜蒸馏技术助推海水淡化技术与工程建设稳步发展,中国治水成就为世界贡献中国智慧、中国方案。

**关键词** 水资源利用;水安全保障;水污染控制;新污染物防控

## 1 地表水新污染物防控

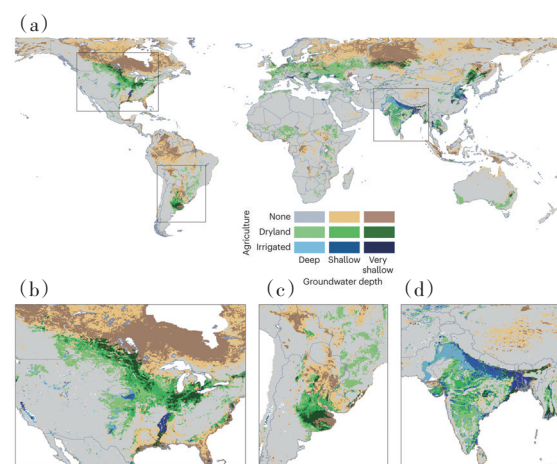
近年来,地表水源水中频繁检出持久性有机污染物(如全氟化合物等)、内分泌干扰物(EDCs)、抗生素、微塑料等4类新污染物,对公众饮水健康和水生态安全带来新的挑战。瓦格宁根大学 Stokal 团队联合荷兰公共工程和水资源管理总局 Vriend 团队<sup>[1]</sup>通过模型统计全球河流排入海洋微塑料的含量,结果显示:在欧洲、北美州和大洋洲,微塑料在近40%的流域中占主体<sup>[1]</sup>。纽约大学格罗斯曼医学院 Trasande 团队<sup>[2]</sup>提出应重视EDCs在食物链中积累和水环境中的迁移转化,且需尽快建立地表水EDCs的监测系统、制定和完善地表水EDCs的环境质量标准,地表水源水中的新污染物防控刻不容缓。因此,侯立安团队围绕饮用水源中新污染物赋存特征,针对饮用水源新污染物防控体系建设标准化、绿色化、优质化的发展目标,提出面向2035年的饮用水源新污染物防控技术路线。南京大学史薇团队<sup>[3]</sup>通过收集过去10年中国地表水中所有报告的新污染物,揭示中国地表水的风险状况,提出采用多层次风险特征分析方法对中国地表水中的新污染物进行深度管控。贵州大学李江团队针对城市污水处理厂作为新污染物重要的“源”和“汇”,提出污水中新污染物“微生物共代谢-催化氧化”深度去除工艺并开展技术示范。

## 2 地下水资源保护

2023年7月10日至11日,2023年国际地下水

会议提出了现代水文地质学学科内涵与外延、学科“核心”科学问题,展示了地下水领域的最新科研成果和相关新技术,对中国地下水科学与技术的发展起到了巨大的推动作用。

以往的全球水文模型(如PCR-GLOBWB模型)预测地下水主要是基于地下水抽取减补给(通量法),忽略了地下水和地表水之间的关系。2023年美国德克萨斯大学 Scanlon 团队<sup>[4]</sup>将地下水和地表水视为一种资源,对当前和历史淡水供应进行全面估计。地下水监测显示:印度西北部、巴基斯坦中部和美国西北部的储水量增加,而美国高平原和中央山谷的储水量下降。气候多变性导致储水发生一些变化,但人为干预,特别是灌溉,是一个主要的驱动因素(图1<sup>[4]</sup>)。通过多样化的管理战略,可以提高水资源的复原力。中国水利部在2023年编



(a) 全球地图示意;(b) 美国和加拿大;  
(c) 南美潘帕斯和查科地区;(d) 印度和巴基斯坦  
图1 农业发展与地下水深度的关系

制完成了《“十四五”重点区域地下水超采综合治理方案》和《地下水保护利用管理办法》，推进地下水储备布局，划定储备范围，明确储备量，推动地下水资源保护与合理利用。

地下水中的氟化物一直备受关注。2023年瑞士联邦水产科学与技术研究所 Podgorski 等<sup>[5]</sup>基于机器学习和 40 多万个氟化物测量值，提出了一个最先进的全球氟化物危害图，然后用于估计风险人群。地下水氟化物危害图显示的热点包括澳大利亚中部、北美西部、巴西东部以及非洲和亚洲的许多地区。其中在较温暖的地区，由于用水需求增加，饮用水中氟化物的下限可能是可取的，这表明受影响的热带和亚热带地区（如中非和南亚地区）的健康风险可能更大。应对这些当前和未来挑战的关键解决方案包括在易氟化物地区测试水井和泉水，并在必要时实施纠正措施。

### 3 饮用水安全保障

水厂传统净化工艺对水中超标离子及新污染物去除效果有限，越来越多的给水厂选择反渗透、纳滤等膜处理工艺，新型膜材料在饮用水资源开发及净化方面展现出巨大的应用前景。水和盐在反渗透膜中的传输一直被认为符合溶解-扩散模型，美国耶鲁大学 Elimelech 团队<sup>[6]</sup>基于非平衡分子动

力学模拟和溶剂渗透实验，发现反渗透膜中的水是以团簇的形式通过短暂连接的孔隙网络，证实反渗透膜-盐传输机制符合孔流模型。因此采用表面更加光滑的新型反渗透膜，可以提高水的传输效率，降低运行能耗。哈尔滨工业大学邵路团队<sup>[7]</sup>采用“冰限域”界面聚合(IC-IP)技术成功制备出高度离子化聚酰胺纳滤膜(图 2<sup>[7]</sup>)。该纳滤膜具有独特的高度离子化三维准层状褶皱结构，具有优异的盐分离效果和一/二价阴离子筛分性能，可高效过滤纳米/亚纳米级小分子和离子物质，打破了传统的渗透-选择权衡效应(Trade-off)效应。侯立安团队<sup>[8]</sup>采用尿素辅助一步热处理法获得 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合光催化陶瓷膜，将金属有机框架材料应用于 g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 陶瓷膜的改性，Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合陶瓷膜在过一硫酸盐(PMS)辅助下实现了光催化降解性能的极大提升，实现了对 EDCs 的高效降解；同时也发明了纳滤饮水净化和以预处理-纳滤膜-后处理组合工艺处理特种污染水的方法和系列装备，有效去除水体中“致癌、致畸、致突变”物质和核生化污染物，实现了特种污染水的快速灵活处理，可为饮用水安全保障提供实用技术和系列装备。

饮用水处理工艺的构建及优化应从供水全流程的视角进行系统性分析。传统的“加法”技术因化学药剂添加带来了新的慢性毒性问题。佐治亚理工学院陈勇生团队<sup>[9]</sup>提出“减法”技术，将微生物

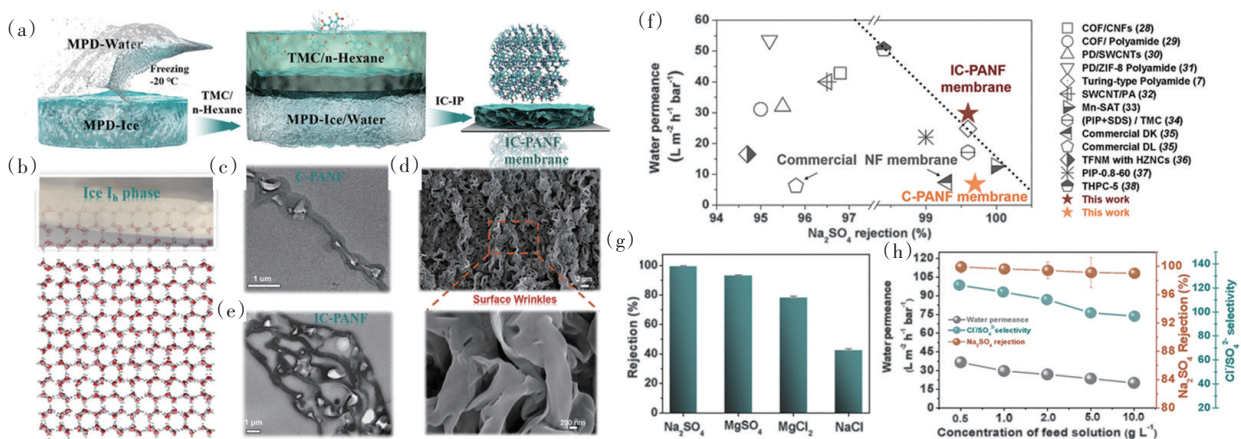


图2 冰限域界面聚合合成纳滤膜过程及膜结构与性能

和其他污染物先从原水中分离出来,更侧重于采用河(湖)岸过滤、生物过滤、吸附、以及膜技术等物理和生物处理方法,在关键位置采用较小剂量的紫外和化学消毒以最大程度地减少微生物再生风险。此外,还可以将量子化学计算以及机器学习等方法应用到工艺过程,便于预测目标化合物的降解途径和毒理学特性<sup>[10]</sup>,该技术可以带来更安全的饮用水,更低的处理成本,以及更高的可持续发展绩效。

#### 4 城镇污水处理降碳增效

传统污水处理多采用“以能消能”的除“污”模式,违背资源能源回收、碳中和等可持续发展目标。从实现“双碳目标”“能量自给”和“资源回收”等角度出发,城镇污水处理厂正逐步向增效降碳方向发展。普林斯顿大学 Ren 团队<sup>[11]</sup>采用文献挖掘的方法,定量分析水资源回收设施中不同下水道系统和处理工艺的甲烷( $\text{CH}_4$ )排放,确定了主要的 $\text{CH}_4$ 排放源和潜在减缓 $\text{CH}_4$ 排放的方法,提供了一个全面且具有代表性的排放清单,并详细比较了不同处理工艺和相关排放源的 $\text{CH}_4$ 排放强度。结果表明, $\text{CH}_4$ 排放范围为 $0.01\sim 110\text{ g CH}_4/\text{m}^3$ ,美国城镇污水集中处理的 $\text{CH}_4$ 年排放量约为 $(10.9\pm 7.0)\text{ MMT}$ , $\text{CO}_2\text{-eq}$ 约为2019年排放量 $(4.3\sim 6.1\text{ MMT CO}_2\text{-eq})$ 的2倍。

大多数情况下,寡碳缺氧区对营养物质的去除贡献亟待提升。北京工业大学彭永臻团队<sup>[12]</sup>在处理城市污水的连续流中试装置中( $55\text{ m}^3/\text{d}$ ),于寡碳缺氧区中引入原生物载体。在517 d的监测过程中,发现厌氧氨氧化菌在生物膜内高度自我富集,并在氮代谢中占主导地位,对脱氮的贡献率为92.5%。寡碳缺氧区对总氮去除的贡献比例由 $(9.2\pm 4.1)\%$ 提高到 $(19.2\pm 4.2)\%$ ,同时其 $\text{N}_2\text{O}$ 排放通量降低了84.5%。该研究进一步揭示了被忽视的寡碳缺氧区的脱氮潜力(图3<sup>[12]</sup>)。

中山大学陈绍晴团队<sup>[13]</sup>系统分析了中国300余个地级市的城镇污水处理厂运行和再生水的分布式数据,量化了城镇污水厂的全生命周期温室气体排放,发现中国城镇污水处理温室气体排放强度下

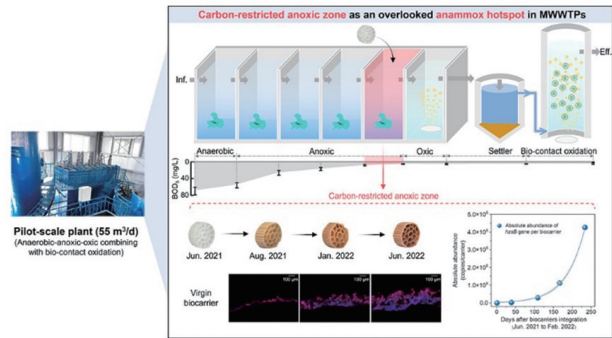


图3 城市污水处理厂中被忽视的厌氧氨氧化热点区域-寡碳缺氧区

降且水资源压力缓解显著,进一步提出了统筹推动低碳处理技术集成等“水-碳”协同优化政策建议。

#### 5 农村污水净化与资源化

农村污水具有水量小、水质不稳定等特点,污染分散且难以收集处理,因此加快农村污水的处理与资源化进程刻不容缓。2023年农村污水处理与资源化领域在技术的革新、设备的试点、管理的优化和污水的资源化等多个方面取得了实质性成效和研究成果。(1) 在技术的革新方面,东南大学吕锡武团队<sup>[14]</sup>采用碳毡厌氧折流板反应器在室温下处理黑水,对有机物有较好的处理效果,并能回收高纯度沼气。贵州大学李江团队<sup>[15]</sup>研究了“厌氧折流板反应器+一体化人工湿地(ABR-CWs)”对农村污水中氧氟沙星的处理效果(图4<sup>[15]</sup>),为今后农村污水中新污染物的控制提供了技术支撑。在设备的试点方面,南开大学周明华团队<sup>[16]</sup>开发了一种用于处理分散农村污水的中试规模太阳能电化学综合污水处理设备,集成了类Fenton氧化、电氧化和 $\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ ,以及 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 为主的絮凝,可以有效地去除废水中的各种污染物。(2) 在管理的优化方面,海南大学李艳团队<sup>[17]</sup>提出了利用地理信息系统(GIS)技术改进农村污水处理设施的方法,通过群体选址多目标优化模型来确定设备的最优化选址。智利圣地亚哥大学Gaggero团队<sup>[18]</sup>发现不同农村污水处理技术能降低SARS-CoV-2、NoVGI和NoVGII的病毒浓度,进而提出需加强对废水中病毒的感染

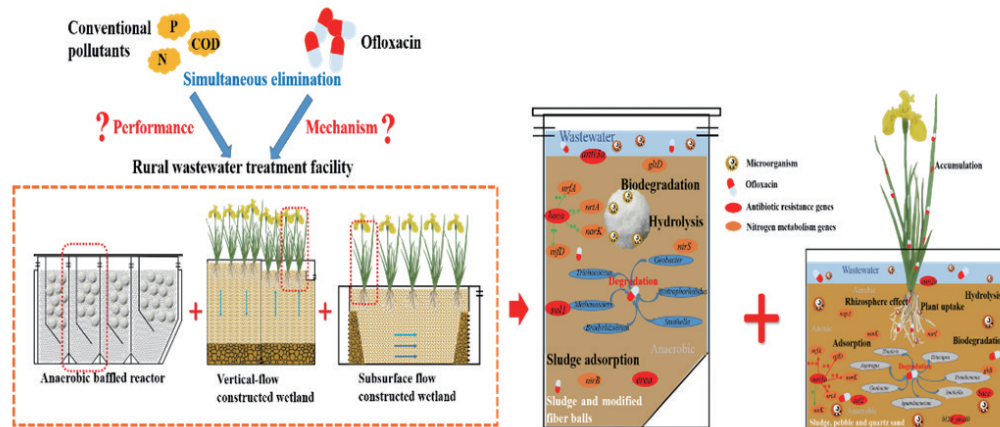


图4 氧氟沙星在农村污水处理系统中的降解示意

能力的研究,有助于农村地区流行病学的监测管理。西安交通大学金鹏康团队<sup>[19]</sup>结合西安76个农村污水处理站1年的观测,发现由于明显间断流影响了处理效果,并开发了间歇运行及溶解氧调控策略。(3)在农村污水资源化方面,南京水利研究所李伟团队<sup>[20]</sup>采用由简易生物滤池、人工湿地和营养生物塘组成的新型近自然系统(BCT系统)对农村生活污水进行原位处理并灌溉农田。上海市政工程设计研究总院黄开团队<sup>[21]</sup>对农村污水中的资源化利用提出了“相邻联治、分类分治、资源利用、因地制宜”治理模式。

## 6 特种废水资源化利用

日本福岛核污水排海事件引发全球对核废水安全处置的热切关注和担忧,亟需发展相应的分离技术从复杂环境体系中选择性去除核素离子,助力核能安全使用并减轻公众和环境健康危害。具有高比表面积、丰富活性位点以及结构可设计的新型纳米材料如石墨烯(GO)、MXene材料、有机共价框架材料(COFs)以及其他碳基纳米材料等在环境放射性核素分离领域得到广泛关注。

中国原子能科学研究院叶国安团队<sup>[22]</sup>设计了离子COF-Py-TFImI-25,利用钍-骨架N配位相互作用实现对放射性核素钍(Th)的特异性吸附。美国北德克萨斯大学马胜前团队<sup>[23]</sup>通过在骨架结构上嫁接不同基团实现了光子电子-空穴的高效分

离,制备的COF-4P能够同步实现 $UO_2^{2+}$ 吸附和还原。尽管COFs在放射性元素吸附领域展现出巨大的潜力,但是其高昂的成本和复杂的制备工艺限制了其实际应用。侯立安团队利用吸收磷酸盐后的羟基磷灰石实现对放射性元素铀的特异性吸附,是一种有前途且具有成本效益的吸附剂,有望在放射性元素铀吸附领域得到广泛应用<sup>[24]</sup>。

吸附分离膜将吸附与膜分离过程结合,能够实现痕量放射性核素的选择性高效分离。侯立安团队<sup>[25]</sup>开发了一种高水通量和优异分离性能的松散纳滤膜,通过引入高电负性和丰富的含氧官能团可有效去除水中的放射性核素铀(99.35%),此外,通过将普鲁士蓝、GO和聚乙二醇掺入聚砜基质中,制备了一种新型改良纳滤膜来处理放射性核素污染的水,实现了对铯( $Cs^+$ , 99.5%)和锶( $Sr^{2+}$ , 97.5%)的有效截留<sup>[26]</sup>。中国科学院高能物理研究所石伟群团队<sup>[27]</sup>仿生“章鱼触手吸盘”构筑了一种具有超高的结构稳定性以及高效纳滤性能的新型无机-有机杂化二维层状膜(TBM),如图5<sup>[27]</sup>所示。该层状膜能够选择性分离富集模拟海水中的铀,为适于海

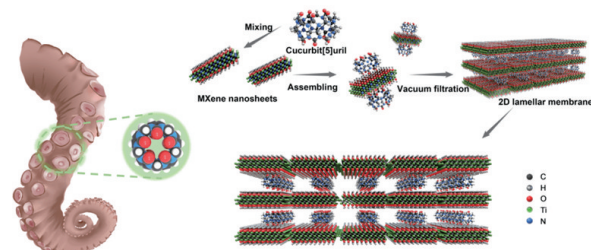


图5 生物启发的二维层状膜制备示意

水提铀的二维层状膜研发提供了新的构筑策略。

目前新型分离材料在放射性核素净化研究中取得了显著成果,然而当前针对新型分离材料的研究多处于实验室阶段,实际应用研究仍较少。因此,仍需加强不同分离净化技术的融合,在材料的辐射稳定性、化学稳定性和热稳定性、放射性核素的分离新机制以及降低新型纳米复合材料成本等方面开展深入研究。

## 7 高盐废水循环利用

高盐废水循环利用往往需要多种技术组合处理,2023年12月发布的首个高盐有机废水处理应用技术指南推荐<sup>[28]</sup>,对于全盐量小于8%的高盐有机废水处理流程为:预处理+生化处理+深度处理+脱盐处理,而高于8%的高盐有机废水则将脱盐处理提至生化处理前端,该标准为高盐有机废水处理和循环利用提供了科学指导。华南理工大学韦朝海团队<sup>[29]</sup>初步明确了未来焦化废水零排放路径,构建了焦化废水零排放工艺,实现了98%以上的水回用。

结晶技术是高盐废水零排放的关键技术。中国石化工程建设有限公司提出基于冷冻结晶为核心的废水零排放工艺流程,不仅解决了废水零排放,同时还实现了回收硫酸钠和杂盐<sup>[30]</sup>。此外,膜蒸馏被证实是有效实现盐结晶的方式,但长期以来受困于易结垢问题且结垢机制仍不明确。中国科学院生态环境科学研究中心魏源送团队<sup>[31]</sup>采用级联策略,揭示了异质成核、表面晶化和堆砌结晶是膜蒸馏处理高盐废水的主要结垢机制。基于导电膜蒸馏能够同时控制阳离子和阴离子的潜力,悉尼科技大学 Ho Kyong Shon 团队联合韩国高丽大学 Seungkwan Hong 团队<sup>[32]</sup>提出了交流导电膜蒸馏 (ECMD) 的操作,较传统膜蒸馏水回收率提高了27%。随着“双碳”目标的提出,利用太阳能结晶器驱动高盐废水中盐分从接近饱和的盐水中结晶出来,从而实现零排放的目标,也逐渐成为研究热点。香港理工大学范金土团队设计了一种人工树状太阳能结晶器(图6<sup>[33]</sup>),可显著增加蒸发面,实现了超高蒸发率和高能效。

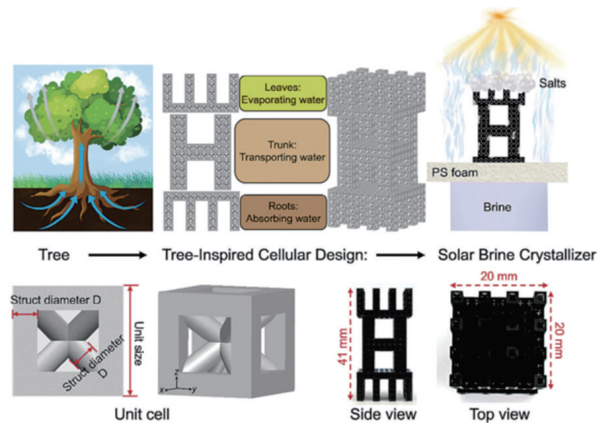


图6 树状太阳能结晶器结构的设计理念

## 8 非常规水源开发与利用

海水淡化是非常规水资源利用的重要内容。近年来,基于膜法的海水淡化技术与工程建设稳步发展,新型膜蒸馏技术也备受关注。新型膜材料开发为膜蒸馏海水淡化的发展提供了关键的材料支撑,其中石墨烯类二维材料展示出了优于传统材料的高渗透能力。中国科学院上海高等研究院曾高峰团队<sup>[34]</sup>以多孔铜中空纤维为复合膜载体与原位催化剂,通过双炔偶联反应制备出石墨二炔/铜中空纤维复合膜,该复合膜表现出优异的脱盐性能,且纯水渗透通量高达  $740 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,高出传统聚合物膜3个数量级(图7<sup>[34]</sup>)。此外,纳米材料以其微观结构特性也备受关注。武汉大学侯佑民团队<sup>[35]</sup>开发出一种复合微纳米层级多孔膜的设计与规模化加工方法,该材料在高进水压力等极端工况下可实现稳定脱盐。另外发展基于绿色能源的海水淡

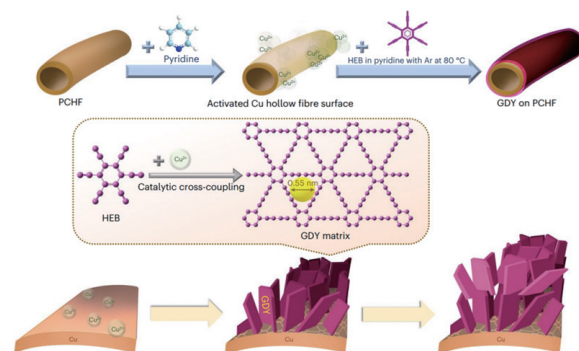


图7 膜蒸馏中空纤维膜制备示意

化技术也是热点研究方向,尤其太阳能海水淡化得到了广泛关注。大连理工大学唐大伟团队<sup>[36]</sup>受电鳗细胞结构启发,构建了由双层异质离子选择透过性水凝胶和受限水路层叠组成的蒸发器,实现了电迁移、扩散与对流三者间的协同强化,海水蒸发效率高达  $6.8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

再生水多来源于企业和人们生活中产生的废污水,其回用通常需要多种水处理技术的耦合。芬顿氧化技术以其氧化能力强、环境友善、占地小等特点被广泛应用于废污水处理。为提高传统芬顿氧化法的催化氧化性能,中国科学技术大学俞汉青团队<sup>[37]</sup>开发出了磷化铁(FeP)材料替代传统的铁基催化剂(如  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  和  $\text{FeOOH}$ ),性能提高了近 20 倍。为减缓芬顿氧化过程中  $\text{H}_2\text{O}_2$  的额外消耗,吉林大学董双石团队<sup>[38]</sup>开发了以  $^1\text{O}_2$  为主导的原位类 Fenton 体系,利用近程 N 原子和长程 N 空位重建 Fe 自旋态,实现了  $\text{H}_2\text{O}_2$  的有效生成。

## 9 中国水资源保护与利用

2023 年 3 月 22 至 24 日,联合国水大会发布《2023 年联合国世界水发展报告》<sup>[39]</sup>,指出在过去的 40 年中,全球用水量以每年约 1% 的速度增长,在人口增长、社会经济发展和消费模式变化的共同推动下,预计直到 2050 年,全球用水量仍将以类似的速度继续增长。2023 年 9 月 11 至 15 日,第 18 届世界水资源大会在北京召开,凝聚了国际社会治水共识,深化了水利行业国际交流与务实合作,同时展示中国治水成就、讲好中国治水故事,为世界贡献中国智慧、中国方案。

加强水资源可持续利用有助于经济社会可持续发展,许多研究人员利用不同方法和数学模型对水资源利用和保护进行评价。在河流领域,北京工业大学丁飞团队<sup>[40]</sup>基于机器学习方法优化了水质指数模型,建立了新的水质评价体系并对海河水系五大河流之一——潮白河流域开展水质评估,证明了模型的可靠性。中国矿业大学李效顺团队<sup>[41]</sup>从水-能源-粮食关系视角出发,采用 InVEST 模型、供需指数(SDI)和 Pearson 相关方法分析了协调生态

系统供需匹配模式,并应用于黄河流域的评估,提出了分区管控、分类策略、分级治理的一体化方案,为区域水资源有效配置和可持续生态系统管理提供参考和依据。在地下水领域,吉林大学张文卿团队<sup>[42]</sup>提出了一种核密度估算耦合蒙特卡罗模型的非参数估计方法以确定松原市地下水中的氟化物和硝酸盐对人类健康造成的风险,该方法可提高人体健康风险参数的估计精度,为地下水质量的科学评价和地下水资源的有效管理提供理论依据。在沿海水域,自然资源部第一海洋研究所冉祥滨团队<sup>[43]</sup>采用流域营养物模型耦合海岸水动力生物地球化学模,研究了陆源污染物对中国东部沿海海域内有害藻华的发展影响,证实了该模型对预测有害藻华风险的可行性,提出了需要减少溶解无机氮和无机磷的负荷以阻止渤海、黄海和东海部分海域养分进一步积累,为中国沿海水域和世界其他存在有害藻华风险地区制定有效的污染缓解和保护管理策略。

第三次全国水资源调查评价成果客观反映了中国水资源及其开发利用总体状况,也反映出部分区域水资源、水生态、水环境状况仍不容乐观。必须坚持以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导,深入贯彻习近平总书记“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”治水思路和关于治水重要论述精神,认真落实党中央、国务院决策部署,持续开展水资源动态监测和评价,强化水资源刚性约束,全方位贯彻“四水四定”,加强水资源集约节约安全利用,为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障。

## 10 结论

水污染高效控制与水资源绿色利用在 2023 年取得了丰硕的科研成果。全球科技工作者分别从宏观表象、微观机制、模型预测、环境监测、材料开发、工艺构建等方面为解决水资源问题做出了积极的贡献。本文聚焦于常规水资源治理和非常规水资源开发,涵盖了地表水新污染物防控、地下水资源保护、饮用水安全保障、污水处理降碳增效与资

源化、特种废水处理、高盐废水循环利用等全球范围内的科技热点和亮点。展望2024年,我们期待水污染控制与水资源利用领域能涌现出更多具有原创性和突破性的成果。

### 参考文献(References)

- [1] Stokal M, Vriend P, Mirjam P B, et al. River export of macro-and microplastics to seas by sources worldwide[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 4842.
- [2] Carol D L, Maricel V M, Christopher D K, et al. The regulation of endocrine-disrupting chemicals to minimize their impact on health[J]. *Nature Reviews Endocrinology*, 2023, 19: 600-614.
- [3] Guo J, Tu K, Chou L, et al. Deep mining of reported emerging contaminants in China's surface water in the past decade: Exposure, ecological effects and risk assessment[J]. *Water Research*, 2023, 243: 120318.
- [4] Scanlon B R, Fakhreddine S, Rateb A, et al. Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4: 87-101.
- [5] Podgorski J, Berg M. Global analysis and prediction of fluoride in groundwater[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 4232.
- [6] Wang L, He J, Heiranian M, et al. Water transport in reverse osmosis membranes is governed by pore flow, not a solution-diffusion mechanism[J]. *Science Advances*, 2023, 9(15): eadf8488.
- [7] Zhang Y, Wang H, Guo J, et al. Ice-confined synthesis of highly ionized 3D-quasilayered polyamide nanofiltration membranes[J]. *Science*, 2023, 382(6667): 202-206.
- [8] Zhang M L, Bao Y P, Hou L A, et al. Will the photocatalytic ceramic membrane be the solution for the next generation of photocatalysis? A comprehensive comparison between g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> powder and g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> modified ceramic membrane[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 305: 122400.
- [9] Reid E, Igou T, Zhao Y Y, et al. The minus approach can redefine the standard of practice of drinking water treatment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(18): 7150-7161.
- [10] Lee Y H, Sedlak D L, Gunten U V. Oxidative water treatment: The track ahead[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(47): 18391-18392.
- [11] Song C H, Zhu J J, Willis J L, et al. Methane emissions from municipal wastewater collection and treatment systems[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57: 2248-2261.
- [12] Zhao Q, Zhang L, Li J W, et al. Carbon-Restricted anoxic zone as an overlooked anammox hotspot in municipal wastewater treatment plants[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57: 21767-21778.
- [13] Chen S Q, Zhang L M, Liu B B, et al. Decoupling climate impact of wastewater infrastructure and water stress alleviation across 300 cities in China is an extremely challenging yet plausible scenario by 2030[J]. *Nature Water*, 2023, 1: 534-546.
- [14] 温仓祥, 戴喆秦, 查晓, 等. 碳毡厌氧折流板反应器处理农村黑水性能研究[J]. *中国环境科学*, 2023, doi: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20231128.002.
- [15] Liu D, Zhang Y, Yang Q, et al. Fate of ofloxacin in rural wastewater treatment facility: Removal performance, pathways and microbial characteristics[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 371: 128611.
- [16] Zhang Q, Wang X, Liang R, et al. A pilot scale of electrochemical integrated treatment technology and equipment driven by solar energy for decentralized domestic sewage treatment[J]. *Chemosphere*, 2023, 340: 139991.
- [17] 刘洪好, 李艳, 曹新颖, 等. 基于GIS的跨行政区划农村污水处理设施选址优化研究[J]. *给水排水*, 2023, 59(6): 157-162.
- [18] Plaza-Garrido A, Ampuero M, Gaggero A, et al. Norovirus, Hepatitis A and SARS-CoV-2 surveillance within Chilean rural wastewater treatment plants based on different biological treatment typologies[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 863: 160685.
- [19] Rong Y, Zhang Y, Sun Z, et al. Characteristics of rural sewage discharge and a case study on optimal operation of rural sewage treatment plant in Shaanxi, China[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 453: 139853.
- [20] Peng X, Yang W, Jin Q, et al. Biofilter-constructed wetland-trophic pond system: A new strategy for effective sewage treatment and agricultural irrigation in rural area [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 332: 117436.
- [21] 李世峰, 黄开, 赵荣, 等. 青岛市某新区农村生活污水系统化治理模式和技术研究[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(18): 15-21.
- [22] Liu X, Gao F, Jin T, et al. Efficient and selective capture of thorium ions by a covalent organic framework[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 5097.
- [23] Yang H, Hao M J, Xie Y H, et al. Tuning local charge distribution in multicomponent covalent organic frameworks for dramatically enhanced photocatalytic uranium extraction[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2023, 62: e202303129.

- [24] Kong L, Ruan Y, Zheng Q, et al. Uranium extraction using hydroxyapatite recovered from phosphorus containing wastewater[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 382: 120784.
- [25] Ye Z, Yang Y, Guo L, et al. Carbonate modified polyester nanofiltration membrane: Separation performance and mechanism investigation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 322: 124340.
- [26] Ye Z, Zhang Y, Hou L, et al. Preparation of a GO/PB-modified nanofiltration membrane for removal of radioactive cesium and strontium from water[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 446: 137143.
- [27] Zhang P C, Zhang Y J, Wang L, et al. Bioinspired macrocyclic molecule supported two-dimensional lamellar membrane with robust interlayer structure for high-efficiency nanofiltration[J]. *Advanced Science*, 2023, 10(5): 2206516.
- [28] 中华环保联合会. 高盐有机废水处理应用技术指南: T/ACEF 115—2023[S/OL]. [2023-12-17]. <https://www.ttbz.org.cn/upload/file/20231215/63838248985520657199-43713.pdf>.
- [29] Ke X, Wei T, Wei G R, et al. Integrated process for zero discharge of coking wastewater: A hierarchical cycle-based innovation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 457: 141257.
- [30] 宋健健. 乙烯裂解废碱液零排放技术路线研究[J]. *现代化工*, 2023, 43(6): 227-230.
- [31] Zheng L B, Li C L, Zhang C, et al. Mixed scaling deconstruction in vacuum membrane distillation for desulfurization wastewater treatment by a cascade strategy[J]. *Water Research*, 2023, 238: 120032.
- [32] Kim J, Tijing L, Shon H K, et al. Electrically conductive membrane distillation via an alternating current operation for zero liquid discharge[J]. *Water Research*, 2023, 244: 120510.
- [33] Wang C, Zhang H C, Kang Z X, et al. 3D cellular solar crystallizer for stable and ultra-efficient high-salinity wastewater treatment[J]. *Advanced Science*, 2023: 2305-313.
- [34] Chen H L, Liu X, Gong D, et al. Ultrahigh-water-flux desalination on graphdiyne membranes[J]. *Nature Water*, 2023, 1(9): 800-807.
- [35] Hou Y M, Shah P, Constantoudis V, et al. A super liquid-repellent hierarchical porous membrane for enhanced membrane distillation[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 6886.
- [36] He N, Yang Y F, Wang H N, et al. Ion-transfer engineering via Janus Hydrogels enables ultrahigh performance and salt-resistant solar desalination[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35: 2300189.
- [37] Mei S C, Li L, Huang G X, et al. Heterogeneous Fenton water purification catalyzed by iron phosphide (FeP)[J]. *Water Research*, 2023, 241: 120151.
- [38] Jiang J, Liu S, Shi D, et al. Spin state-dependent in-situ photo-Fenton-like transformation from oxygen molecule towards singlet oxygen for selective water decontamination[J]. *Water Research*, 2023, 244: 120502.
- [39] United Nations. The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and cooperation for water[R/OL]. [2023-12-10]. [https://www.gwp.org/global-assets/global/gwp-china\\_files/knowledge-resources/publications/3/2023.pdf](https://www.gwp.org/global-assets/global/gwp-china_files/knowledge-resources/publications/3/2023.pdf).
- [40] Ding F, Zhang W J, Cao S H, et al. Optimization of water quality index models using machine learning approaches[J]. *Water Research*, 2023, 243: 120337.
- [41] Yin D Y, Yu H C, Shi Y Y, et al. Matching supply and demand for ecosystem services in the Yellow River Basin, China: A perspective of the water-energy-food nexus[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 384: 135469.
- [42] Yan J H, Chen J S, Zhang W Q, et al. A new probabilistic assessment process for human health risk (HHR) in groundwater with extensive fluoride and nitrate optimized by nonparametric estimation method[J]. *Water Research*, 2023, 243: 120379.
- [43] Wang H, Bouwman A F, Van Gils J, et al. Hindcasting harmful algal bloom risk due to land-based nutrient pollution in the Eastern Chinese coastal seas[J]. *Water Research*, 2023, 231: 119669.

## Hot spots of water pollution control and water resource utilization in 2023: An overview

LI Jiang<sup>1</sup>, ZHANG Ting<sup>2</sup>, PAN Zhangbin<sup>3</sup>, LI Yuan<sup>4</sup>, LI Yancheng<sup>1</sup>, DING Shiyuan<sup>5</sup>, MENG Qingmei<sup>6</sup>, WANG Bin<sup>7</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>, YANG Chao<sup>8</sup>, LIU Baosen<sup>9</sup>, GAO Junkai<sup>10</sup>, WANG Jing<sup>11</sup>, ZHANG Yaqin<sup>12</sup>, WANG Yanshan<sup>2</sup>, LUO Yang<sup>1</sup>, HOU Li'an<sup>13\*</sup>

1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China
2. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China
3. Shandong Province City Water Supply and Drainage Water Quality Center, Jinan 250014, China
4. Information Materials and Intelligent Sensing Laboratory of Anhui Province, Institutes of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China
5. School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China
6. School of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China
7. College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China
8. Research Center for Eco-Environmental Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China
9. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China
10. School of Naval Architecture and Maritime, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China
11. College of Chemical & Biological Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China
12. Zhejiang Engineering Research Center of New Industrial Water Source Technology, Hangzhou 311121, China
13. 96911 Unit, Chinese People's Liberation Army, Beijing 100011, China

**Abstract** Realizing efficient control of water pollution and green utilization of water resources is a necessary condition for maintaining public health, promoting ecological civilization construction, and promoting sustainable economic and social development. This study reviews and summarizes the global scientific and technological research hotspots in this field in 2023, with highlights on prevention and control of new pollutants in surface water, protection of groundwater resources, safety assurance of drinking water, carbon reduction and efficiency enhancement in sewage treatment, resource utilization of wastewater, development of unconventional water sources, and protection and utilization of water resources in China. Research shows that construction of a new pollution prevention and control system for surface water should focus on the research of environmental quality standards and pollution control technologies. It is expected to improve the protection level of groundwater resources with the help of modern hydrogeology. New membrane technology helps ensure drinking water safety, and the synergistic development of efficiency and carbon reduction has become a new challenge for the sewage treatment industry. In the field of rural sewage treatment and resource utilization, substantial achievements and research results have been made in multiple aspects such as technological innovation, management optimization, and sewage resource utilization. Carbon based nanomaterials and other materials have received widespread attention in the field of environmental radioactive nuclide separation. Crystallization technology is a key technology for zero discharge of high salinity wastewater. New membrane distillation technology can promote the steady development of seawater desalination technology and engineering construction. All these research results have important meanings to the major strategic engineering practices of water resource protection and utilization, as well as water pollution control.

**Keywords** water resource utilization; water safety assurance; water pollution control; prevention and control of emerging pollutants ●



(责任编辑 卫夏雯)