

## 助力实现第六项可持续发展目标: 通过处理废水创造宝贵水资源

**Bothayna Al-Gashgari<sup>1,2</sup>, Fatimah Almulhim<sup>1,2</sup>, Claudia Sanchez-Huerta<sup>2</sup> 和 Pei-Ying Hong<sup>1,2\*</sup>**

<sup>1</sup>阿卜杜拉国王科技大学 (KAUST), 生物、环境科学与工程部 生物科学 (沙特阿拉伯, 图沃)

<sup>2</sup>阿卜杜拉国王科技大学 (KAUST), 生物、环境科学与工程部, 可持续食品安全卓越中心 (沙特阿拉伯, 图沃)

### 少年审稿人



ARNAU

年龄: 12



CARTER

年龄: 12



IMRAN

年龄: 11



ISLA

年龄: 12



LINAR

年龄: 11



RAPHAEL

年龄: 12

清洁饮用水和良好的卫生设施对人类健康至关重要。遗憾的是, 全球约有 22 亿人口缺乏这些基本条件。我们需要共同应对这一挑战。为此, 联合国制定了第六项可持续发展目标 (SDG 6), 要求全面了解并合理使用地球水资源, 重点关注缺水地区的水资源浪费问题, 寻求缺水解决方案。本文将介绍废水处理技术, 即通过净化废水实现循环利用, 构建类似自然水循环的永续体系, 合理用水, 守护人类与地球。

观看本文作者的专访视频, 获取更多精彩内容! ([视频 1](#))。

### SDG 6—清洁饮水和卫生设施

有没有想过平时用的水来自哪里? 如果答案是“水龙头”, 说明你属于全球人口中占比 74% 的幸运儿 [1]。水是地球所有生命的命脉, 是日常生活的必需品。不幸的是, 现有超过 20 亿人口因糟糕的卫生系统无法获得清洁饮用水。并非所有水源都可直接使用: 地下水需要抽取至地表处理, 地表水需要去除化学物质和微生物, 海水则需要脱盐淡化。许多降雨

稀少的干旱地区国家（如沙特阿拉伯）正面临供水危机。当地下水的水位下降时，这一风险将进一步加剧。目前约有 22 个国家的缺水风险极高 [1]。

我们必须珍惜水资源并思考如何合理利用。正因如此，联合国提出了 SDG 6（清洁饮水和卫生设施），作为 17 项可持续发展目标之一，旨在解决全球水资源危机，确保人人享有清洁饮水和卫生设施，同时减少污染物及有害化学物质排放，保护珍贵水源 [2]。

### 废水 (Wastewater)

含有污染物、需净化处理的水。

SDG 6 还揭示了一个常被忽视的潜在水源：废水，即使用后被排放的水。虽然废水比上述其他水源更难处理，但它是唯一一种所有国家都拥有的稳定水源。将处理后的废水作为主要水源，既能保障供水稳定，又可缓解淡水资源压力。尽管任务艰巨，但只要我们共同努力就能完成！新加坡是践行 SDG 6 的典范：这个拥有 500-700 万人口的岛国没有地下水，也无法完全储存丰沛降雨 [3]，却通过废水回收技术构建出“完美水循环”，确保一滴水都不浪费 [3]。科技解决重大挑战的力量令人惊叹！

## 废水从何而来？

如厕、淋浴、洗衣等日常活动都会产生废水：冲一次马桶大概会产生 6 升废水，洗 10 分钟的澡大概会产生 65 升废水，洗一次衣服最多可产生 95 升废水。日常生产活动的耗水量更加惊人：仅仅种出 1 公斤苹果便需要 822 升水，生产 1 公斤牛肉竟需要 1.5 万升水；制作一件衬衫需消耗 2700 升水，甚至制造一部 iPhone 手机也需要 1.2 万升水。面对每日巨量废水，净化并回收利用在保护环境和节约资源方面意义重大 [4]。

### 沉淀 (Sedimentation)

大颗粒物质随时间沉降至溶液底部的过程。

### 过滤 (Filtration)

通过尺寸分离从水中去除颗粒物的过程。

### 消毒 (Disinfection)

使用化学品或紫外线照射经过处理的水，确保杀灭细菌等有害生物的过程。

### 活性污泥法 (Activated Sludge)

利用有益细菌吞噬污染物并形成可移除菌团来净化废水，使水体安全回归自然的方法。

## 废水处理技术的类型

想了解废水处理的历史吗？让我们从 18 世纪说起：当时的人们发现将废水排入河流会导致水质污染，使饮水者生病，便建造出了史上首座废水处理厂（WWTP）来减少废水中的污染物（图 1A）。其工作原理为：废水先流经水平沉淀池，使杂质沉底，再通过装满不同粒径砂石的垂直过滤罐截留细小颗粒，这便是过滤 [1]。1854 年，废水处理厂开始在流程末端加氯杀灭细菌等病原体，这便是消毒（图 1B）[4]。到了 1913 年，两位科学家发现某些好氧微生物（有益细菌）能“吞噬”污染物，净化废水，由此诞生活性污泥法。移除有益细菌后，水体经消毒即可安全排放（图 2A）。此种方法比普通过滤更加高效快速，至今仍在使用。不过，随着大城市中人口不断增长，用水需求越来越大，科学家正在开发更先进的废水净化技术 [4]。

## 高效净水新技术

废水处理的能耗巨大。在全球能源仍主要依赖化石燃料的背景下，我们在向太阳能、风能等可再生能源过渡的同时，应尽可能降低所有活动

图 1

**(A)** 首座污水处理厂流程: (1) 收集废水, (2) 送入大型沉淀池, 进行大颗粒沉降, (3) 通过砂石层过滤小颗粒, (4) 氯消毒杀灭残余微生物, (5) 产出净化水。**(B)** 随后诞生的活性污泥法: (1) 将废水送入处理池, (2) 添加有益微生物吞噬有机废物, (3) 沉淀, (4) 消毒, (5) 获得净化水。

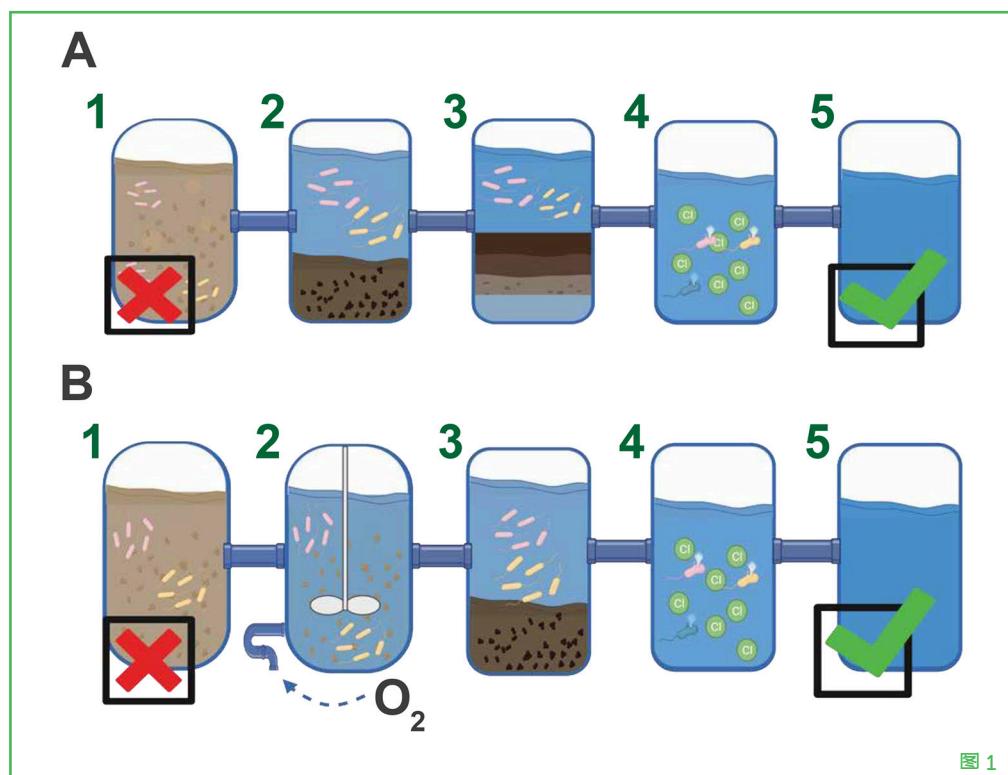


图 1

图 2

**(A)** 现代工艺: (1) 废水经 (2) 活性污泥法处理, (3) 通过膜过滤去除细微颗粒, (4) 氯消毒提升水质。**(B)** 最新技术: (1) 废水在 (2) 厌氧条件下由微生物分解有机物, 生成甲烷, (3) 膜过滤后 (4) 紫外线消毒, (5) 最终产出净化水。

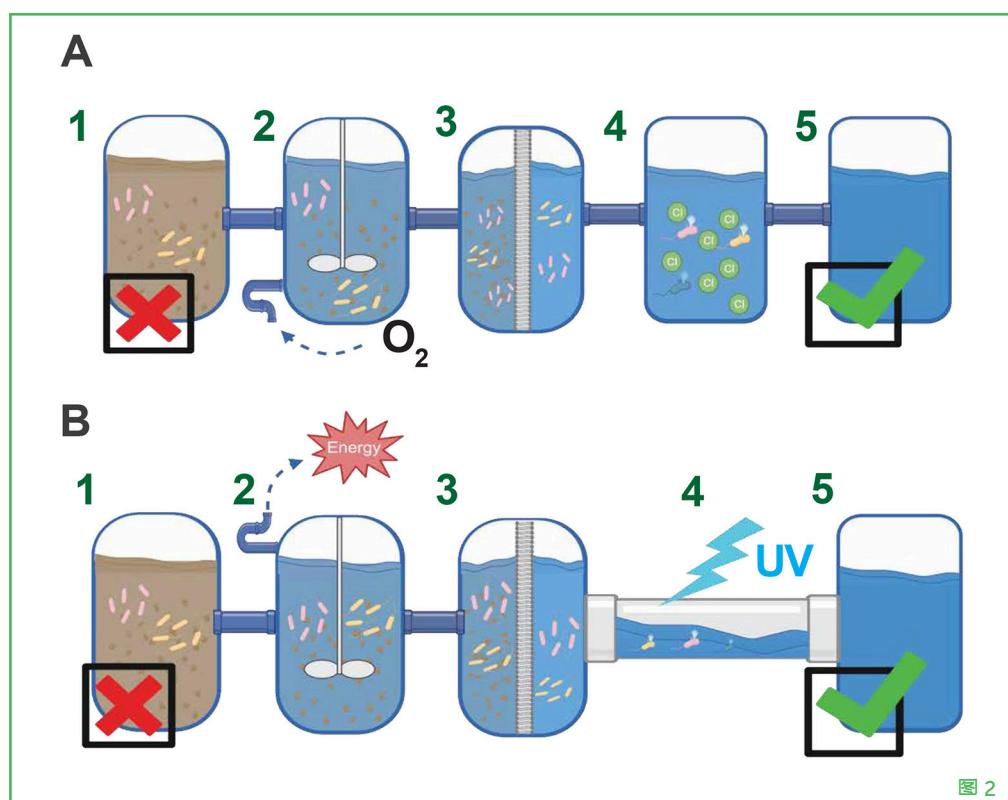


图 2

**厌氧**  
(Anaerobic)  
不存在氧气的环境。

的能耗。为此, 我们团队开始探索低能耗净水方法, 并研发出一种利用极小的**厌氧**微生物的新技术。这些微生物可在无氧环境下分解废水中的杂质, 将其转化为甲烷。甲烷可收集作为废水处理厂或其他工艺流程的能源。

## 厌氧膜生物反应器 (Anaerobic Membrane Bioreactor)

一种在无氧条件下运行并配备膜过滤装置的工程系统。

我们将厌氧微生物与膜技术结合，开发出了[厌氧膜生物反应器](#)系统。“生物反应器”指用于有益细菌处理废水时发生的生物反应的设备。最后增加紫外线消毒环节，通过破坏微生物 DNA 实现灭菌（图 2B）。成果如何呢？我们获得了富含植物和种粮所需营养物质的洁净水！为实地测试此工艺，我们在沙特建造了一座小型示范性废水处理厂，规模介于实验室装置与标准工厂之间，目前的运行数据显示：仅靠系统自身产生的能量，就能获得非常适合植物生长的洁净水 [5]！

## 我们的发现

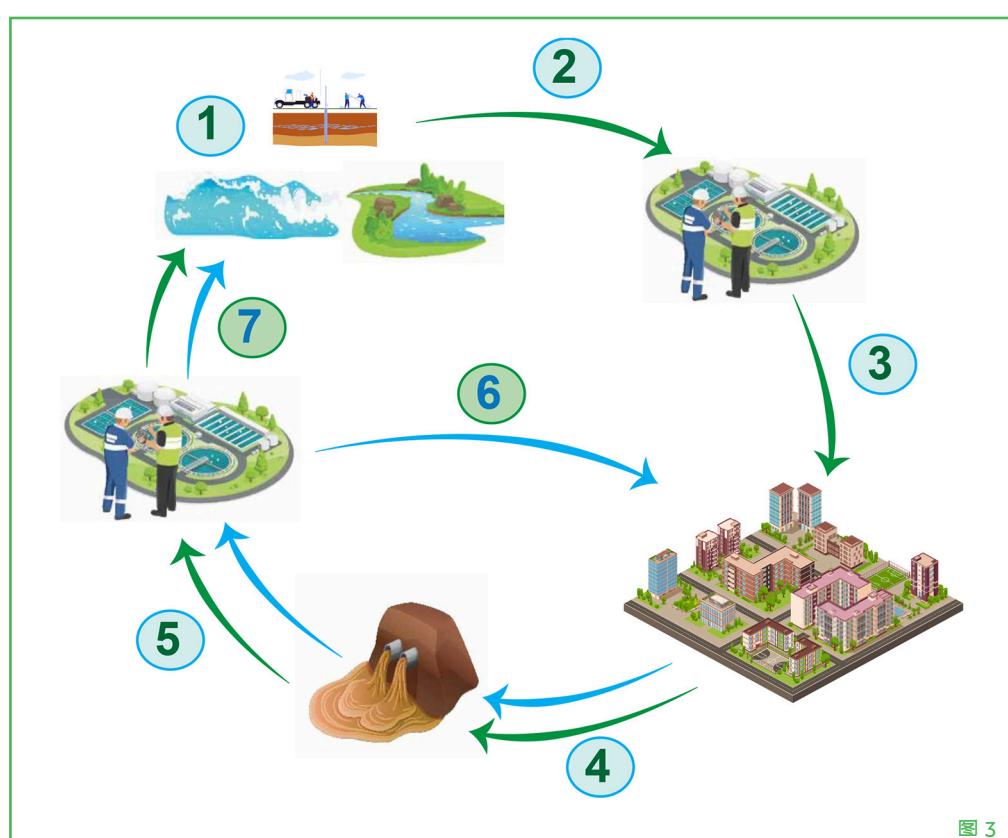
本文探讨了水资源短缺这一重大议题。联合国号召科学家与公众共同探索解决方案。每个人都能通过合理用水贡献一份力量。请牢记，所有用水者都是废水生产者，支持 SDG 6 人人有责。

如何为改善用水与废水分管理方式做出贡献呢？我们可以减少用水量，提高亲友的节水防污意识。例如，可缩短淋浴时间、刷牙时关闭水龙头、避免将药物冲入马桶、用桶收集雨水浇灌植物。

另一大关键在于建立对净化水的信任，相信它是提供稳定淡水和清洁环境的宝贵资源。令人振奋的是，目前很多国家正效仿新加坡的废水处理与循环利用方式（图 3）。科威特和卡塔尔等国已实现 100% 废水处理，确保对环境零负面影响，这证明即便在中东这类极度缺水地区也能安全回

**图 3**

未来水源愿景。这张图展示了我们在未来的最终目标：废水 100% 处理并循环利用。在未来图景中：(1) 天然水源会被收集起来，(2) 处理后 (3) 供人类使用，(4) 废水被回收，(5) 处理后 (6) 用于农业或工业，或 (7) 安全回归自然，补充水源。



**图 3**

收利用废水 [6]。令人欣慰的是, 全球已有 58% 的废水得到处理 [1], 但我们仍需努力实现全球 100% 废水循环利用的终极目标。

## 致谢

谨向阿卜杜拉国王科技大学 (KAUST) 的 Ruben Costa 与 Nicki Talbot 致以诚挚谢意, 感谢他们在初始撰写和审校阶段提供的宝贵支持, 本系列的完成离不开他们的专业贡献。同时向 KAUST 可持续发展办公室与联合国开发计划署沙特阿拉伯国家办公室表示谢意, 感谢他们始终致力于提升公众对联合国可持续发展目标 (SDG) 的认知, 共同推动世界走向更可持续的未来。

## AI 人工智能工具使用声明

本文中所有图表附带的替代文本 (alt text) 均由 Frontiers 出版社在人工智能支持下生成。我们已采取合理措施确保其准确性, 包括在可行情况下经由作者审核。如发现任何问题, 请随时联系我们。

## 参考文献

1. FAO UW. 2021. *Progress on Level of Water Stress Global Status and Acceleration Needs for SDG Indicator 6.4.2*. Rome: FAO; United Nations Water (UN Water), 95. doi: 10.4060/cb6241en
2. United Nations 2015. *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. Available at: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/development-agenda/>
3. Lee, H., and Tan, T. P. 2016. Singapore's experience with reclaimed water: NEWater. *Int. J. Water Resour. Dev.* 32:611–21. doi: 10.1080/07900627.2015.1120188
4. Lofrano, G., and Brown, J. 2010. Wastewater management through the ages: a history of mankind. *Sci. Total Environ.* 408:5254–64. doi: 10.1016/j.scitotenv.2010.07.062
5. Zhang, S., Tchalala, M. R., Cheng, H., Medina, J. S., Xiong, Y., and Hong, P.-Y. 2023. Anaerobic membrane bioreactor as the core technology for future decentralized wastewater treatment plants. *Curr. Opin. Chem. Eng.* 42:100975. doi: 10.1016/j.coche.2023.100975
6. WHO UN-Habitat. 2021. *Progress on Wastewater Treatment Global status and acceleration needs for SDG indicator 6.3.1*. Geneva: United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat) and World Health Organization (WHO).

线上发布: 2025 年 11 月 05 日

编辑: Susana Carvalho

科学导师: Nicki Talbot

**引用:** Al-Gashgari B, Almulhim F, Sanchez-Huerta C 和 Hong P-Y (2025) 助力实现第六项可持续发展目标: 通过处理废水创造宝贵水资源. *Front. Young Minds.* doi: 10.3389/frym.2024.1418929-zh

**英文原文:** Al-Gashgari B, Almulhim F, Sanchez-Huerta C and Hong P-Y (2024) Towards SDG 6: Wastewater Treatment Generates a Precious Water Resource. *Front. Young Minds* 12:1418929. doi: 10.3389/frym.2024.1418929

**利益冲突声明:** 作者声明本研究不涉及任何潜在商业或财务关系。

**版权** © 2024 © 2025 Al-Gashgari, Almulhim, Sanchez-Huerta 和 Hong. 这是一篇依据 [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](#) 条款发布的开放获取文章。根据公认的学术惯例，在注明原作者和版权所有者，及在标明本刊为原始出处的前提下，允许使用、传播、复制至其他平台。如违反以上条款，则不得使用、传播或复制文章内容。

## 少年审稿人



**ARNAU, 年龄: 12**

大家好, 我是 Arnaud, 今年 12 岁, 热爱科学、读书、烹饪和四处旅行。



**CARTER, 年龄: 12**

我喜欢运动与弹钢琴, 精力充沛, 擅长数学和科学, 还很痴迷蛇类, 曾举办过爬行动物主题的生日派对。



**IMRAN, 年龄: 11**

我很爱看科幻小说, 也爱写科普文章, 还是狂热的篮球迷, 天气凉爽时喜欢户外活动。



**ISLA, 年龄: 12**

我有一个妹妹。我很喜欢猫咪还有水里和海中的动物。我会打篮球、美式橄榄球和羽毛球, 今年刚参加了学校组织的马尔代夫研学之旅。



**LINAR, 年龄: 11**

我喜爱大海、海洋动物与猫咪, 喜欢看漫画, 还很有音乐创造力, 擅长创作节奏。我平时爱打羽毛球和静音球。



### RAPHAEL, 年龄: 12

我热爱足球, 喜欢在 YouTube 上看 BetaSquad 的视频。《指环王》系列电影我都看过。我还喜欢大象, 我的主队是拜仁慕尼黑。

## 作者



### BOTHAYNAAL-GASHGARI

Bothayna 在 Peiying Hong 教授指导下获得博士学位, 研究方向为应用环境微生物学, 目前专注于分析废水处理厂及循环利用环境中水平基因转移与多重耐药菌产生的关联性。



### FATIMAH ALMULHIM

Fatimah 是 Peiying Hong 教授指导的博士生, 本科毕业于加利福尼亚州州立大学东湾分校生物科学专业, 攻读硕士期间主要研究细菌分泌产物, 博士课题则聚焦细菌生成的微生物菌膜如何影响净化水配送系统中的水质。



### CLAUDIASANCHEZ-HUERTA

Claudia 是 KAUST 环境科学与工程专业的博士研究生, 致力于研究并改良好氧/厌氧生物处理工艺、膜分离工艺及消毒工艺在城市废水与工业废水处理中的效能。



### PEI-YING HONG

Peiying 现任 KAUST 生物、环境科学与工程部教授, 拥有新加坡国立大学环境科学与工程博士学位, 并在伊利诺伊大学厄巴纳 - 香槟分校开展博士后研究。她在 KAUST 领导的环境微生物安全与生物技术实验室研究团队致力于为改善全球水资源健康与管理提供基础科学依据及目标导向型研究成果。<sup>\*</sup> [peiying.hong@kaust.edu.sa](mailto:peiying.hong@kaust.edu.sa)

中文翻译由下列单位提供  
Chinese version provided by

