



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Advanced Water Science and Technology—Perspective

面向未来饮用水净化的 OSRO 技术——基于河岸过滤的一步反渗透技术

Yujia Zhai^{a,b}, 刘刚^{c,d,*}, Walter G.J. van der Meer^{a,b,*}

^a Oasen Drinkwater, Gouda 2800 AC, Netherlands

^b Faculty of Science and Technology, University of Twente, Enschede 7500 AE, Netherlands

^c Key Laboratory of Drinking Water Science and Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

^d Sanitary Engineering Research Group, Department of Water Management, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft 2600 GA, Netherlands

ARTICLE INFO

Article history:

Received 6 December 2020

Revised 14 January 2021

Accepted 6 February 2021

Available online 21 April 2021

关键词

饮用水处理

河岸过滤

反渗透

人工滤池

水资源回收和再利用

摘要

水环境中出现的新污染物给饮用水处理厂带来了巨大挑战。由于新污染物的浓度较低、特性不明,传统的水处理工艺无法对其进行有效去除,因此技术、经济和环境友好的水净化技术日益重要。本文介绍了一种由河岸过滤(riverbank filtration, RBF)和反渗透(reverse osmosis, RO)组成的一步反渗透(one-step reverse osmosis, OSRO)概念,用于饮用水处理。OSRO 概念结合了相对成本较低的河水自然预处理与先进的工程净化系统。RBF 提供了一个连续天然水源,具有稳定的水质和强大的污染物屏障。与直接提取地表水相比,由于预先清除了颗粒物、有机物、有机微污染物(organic micro-pollutant, OMP)和微生物, RBF 成为基于 RO 膜的净化系统的理想水源。OSRO 处理可以去除几乎 99.9% 的颗粒物、病原体、病毒和 OMP, 以及绝大多数的营养物质,从而满足无氯饮用水的要求,且具有较高的生物稳定性。与标准的常规净化步骤(包括喷淋过滤器过滤、软化操作和活性炭吸附)相比, OSRO 处理更具有成本效益。人工滤池(artificial bank filtration, ABF)与砂滤系统相结合,起到人工补给的作用,是 OSRO 概念中 RBF 的替代方案,用于从当地可用资源中供应饮用水。本文建议以风能作为替代能源来实施 OSRO, 以提高可持续性和可再生性。本文还提出了一种基于 OSRO 的分散式系统,用于水的回收和再利用。本文建议未来的水处理应侧重于自然系统和工程系统的结合,通过技术上有效、经济上可行、资源可重复利用和与环境相关的方式提供饮用水。

© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

在过去的几十年中,供水公司面临着新污染物越来越多或水源中污染物愈发令人担忧的问题[1]。这一事实,加上实验室设备的不断改进,能够以越来越低的检测限检测更多的化合物,以及公众对饮用水中添加药物这一概念的高度敏感和直观排斥,导致了现有水净化技术的不断改

进[2]。在不断变化的世界中,水行业面临的这些挑战需要我们更新现有的水净化技术,以便在未来可持续地利用水资源。

药物、个人护理产品、紫外线(UV)过滤器、环境激素、违禁药物、添加剂、代谢物、消毒副产品、阻燃剂和杀虫剂等新兴污染物是主要由人类活动产生的化学和(或)生物物质的剩余产物[3]。一旦被释放到水环境(如

* Corresponding authors.

E-mail addresses: gliu@rcees.ac.cn (G. Liu), w.g.j.vandermeer@utwente.nl (W.G.J. van der Meer).

2095-8099/© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

英文原文: Engineering, 2022, 9(2):27–34.

引用本文: Yujia Zhai, Gang Liu, Walter G.J. van der Meer. One-Step Reverse Osmosis Based on Riverbank Filtration for Future Drinking Water Purification. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.02.015>

地下水 and 地表水) 中, 这些新兴污染物就会经历化学、光化学和生物降解过程, 从而改变其环境行为和生态毒理学特征[4]。新兴污染物的生物累积性、生物放大性、持久性和毒性对水生生物和人类都是有害的, 会造成内分泌系统紊乱、雌激素或激素紊乱、胎儿畸形, 甚至损伤 DNA 等问题[5]。

为确保饮用水安全, 已为数量有限的人为化合物制定了全球法定水质标准。例如, 美国环境保护署最近确定饮用水中全氟辛烷磺酸(perfluorooctanesulfonate, PFOS) 和全氟辛酸(perfluorooctanoic acid, PFOA) 的建议健康水平为 $70 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ [6], 这个数值与普遍接受的毒理学关注阈值(toxicological concern, TTC) 相比, 低得难以置信, 因为 TTC 值低于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的物质被认为是无关紧要的[7]。在分配无氯饮用水的荷兰, 防止分配网络中的细菌再生是另一个值得关注的问题。研究有力地证明, 在饮用水中颗粒物和营养物质较少的情况下, 机会病原体生长的风险也会降低[8]。

当今饮用水生产和分配的高标准, 导致现有处理厂增加了额外的净化步骤。由于工业发展, 水源中出现的污染物可能会对人类健康造成影响[9], 而传统的饮用水处理方法不能完全去除这些单个化合物或化学混合物的微量浓度。根据水源和特定供水设施的关键参数, 传统的一系列生物、化学和物理净化步骤(即混凝、沉淀、慢砂过滤、软化和滴滤) 通过额外的处理工艺得到增强。例如, 据报道, 包括基于紫外线(UV)/臭氧(O_3) 的应用、Fenton 工艺和光催化氧化工艺在内的高级氧化工艺可有效去除天然有机物并减少消毒副产物[10]。然而, 高级氧化法仅将天然有机物分解成小的脂肪族和亲水性化合物, 而不能将天然有机物完全氧化。低分子量亲水化合物可能是可降解的, 也可能是持久且有利的, 并且其副产物的产生给大规模应用带来了挑战[11]。

颗粒或粉末活性炭吸附以及二氧化硅、氧化铝、沸石和金属氧化物吸附剂也可用于去除饮用水设施中出现的污染物, 但是吸附剂的能耗和成本非常高[12]。此外, 饮用水处理厂的每个阶段(如建设、运营、化学品使用、处理过程) 对气候变化(即能源消耗和温室气体排放) 的影响意味着需要对供水技术进行改进及发展更可持续的供水技术[13]。

因此, 水务部门迫切需要一种以自然为基础, 可以绿色、高效地去除新兴污染物的技术。为了提供高质量和低风险的饮用水, 饮用水公司倾向于使用最清洁的可用水源, 并结合先进的处理方法来提高处理效率, 同时尽可能降低投资、劳动力、运营成本和能源需求。因此, 水务部

门需要在自然发生过程的基础上, 将自然过程与工程系统(combination of natural and engineered systems, cNES) 相结合, 以改善水质[14]。

2. 基于河岸过滤的一步反渗透技术——一种自然且高效的饮用水生产工艺

本文提出使用反渗透(RO) 作为单步处理, 以便从河岸滤液中生产高质量饮用水。虽然 RO 膜可以从给水中去除几乎所有种类的物质, 但它们通常配备有预处理步骤, 以调节和改变给水, 防止膜组件的堵塞和结垢[15]。由于其天然的预处理和改善水质的能力, 与直接从河流取水相比, 河岸过滤(RBF) 是 RO 的有利来源。为了进一步提高饮用水质量和 RO 性能, 本文建议将 RBF 与 RO 结合起来, 成为一步反渗透(OSRO) 处理技术, 目的是以更低的能耗和更少的化学添加剂实现自然净化。如图 1 所示, 河水流经土壤通道以去除颗粒、有机物、细菌和病毒。之后, 经过 RBF 预处理的水从抽水井中被抽出, 并用 RO 膜进行进一步净化以供应饮用水。

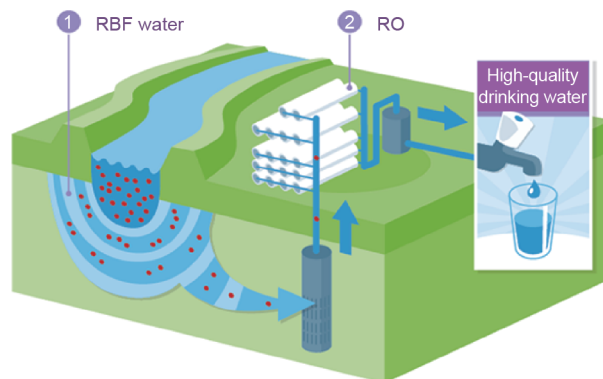


图 1. 基于 RBF 的 OSRO 示意图。在 RBF 中发生自然净化过程, 河水在被提取为饮用水源之前通过河岸土壤通道流向收集井。提取的河岸滤液还会通过 RO 膜进行深度处理, 以生产高质量的饮用水。

2.1. 河岸过滤

地表水和地下水是全球饮用水的两个主要水源。然而, 地表水质量的日益恶化、城市化进程和人类文明的发展导致淡水资源的枯竭和污染, 尤其在干旱地区这一现象更为严重。在这种情况下, 稳定可靠的饮用水供应对于保障人类健康而言至关重要。经过 150 多年的使用和不断改进, RBF 在欧洲已被公认为饮用水净化的成熟技术[16]。其自然清洁能力(即过滤、吸附和生物降解) 已在多项研究中得到证实, 且 RBF 已被证明具有全球供水的潜力, 如在美国[17]、韩国[18]、印度[19]、埃及[20]和巴西[21]。

RBF 是一种天然的水净化过程。这一过程不是直接抽

取河水，而是在被抽取为饮用水之前，让水通过河岸土壤中的土壤通道流到收集井[22]。RBF可以去除悬浮固体、有机物、营养物质、可溶性化学物质、微生物和新出现的污染物[23]。RBF包含两个基本部分：土壤含水层和抽水井。土壤含水层一侧与河床水力连接，另一侧与抽水井连接。一旦开始取水，地下水位就会降低，水从地表通过河床流向土壤含水层并流向抽水井。通过这种方式，地表水被土壤净化[24]。河水在土壤含水层长时间的停留时间内会发生物理化学和生物过程，如过滤、生物降解、吸附和离子交换[25]。RBF性能在很大程度上取决于含水层的特性。季节性变化、氧化还原条件和河水基质等环境因素会影响污染物去除效率[26]。由于农业或医疗应用和污染物降解造成的季节性变化决定了河水中污染物的初始浓度。好氧和（或）厌氧条件对不同类型污染物的清除具有选择性，河水中的有机物含量促进某些有机微污染物（organic micro-pollutants, OMP）的共同代谢[27]。RBF性能还受河岸地质状况和厚度以及滞留时间、移动距离、流速等因素的影响。这些水文地质因素也影响污染物在含水层中的衰减[28]。最近，RBF不仅被单独应用，而且还与人工补水、人工湿地和其他自然水净化过程相结合[29]。与直接作为水源的地表水相比，RBF水的水质更高、更稳定，且后处理更简单。

2.2. 反渗透

尽管RBF能够去除生物和化学杂质，但并非所有污染物都能在通过河岸渗透的过程中被消除（如OMP和人工化合物）[30]。为了获得高质量的饮用水，额外的处理可能仍是必要的。在外加压力下RO使用部分可渗透的膜，这通常用于深度饮用水净化过程[31]。之前与饮用水生产相关的RO研究主要是在RO元件用于海水脱盐的假设下进行的[32]。浓差极化会影响RO膜的能量消耗、结垢及对污染物的吸收和保持[33]。当将RO应用于淡水时，由于渗透压差可以忽略不计，浓差极化对能量消耗的影响明显变小。最近，人们更加关注使用RO技术净化淡水资源[34–36]。使用RO进行淡水净化的主要原因是它提供了一个有效的屏障，防止不断出现的微米和纳米污染物通过，而传统的处理技术无法轻易去除这些污染物[37]。

RO是一种物理分离过程，在此过程中，为了克服渗透压，通过正静水压力迫使自然流动的水通过膜流向浓度更高的溶液[38]。RO膜的聚合材料形成分层的网状结构，水分子必须沿着曲折的路径穿过膜才能到达渗透侧[39]。流体的流动取决于膜的孔隙率、膜体积分数和曲折度（即分子必须穿过膜的距离除以膜的厚度）[40]。假设通过膜

的流体流量遵循溶液-扩散模型[41]，该模型取决于复杂的溶质-膜相互作用，包括空间位阻[42]、静电相互作用[43]和疏水-亲水相互作用[44]。与其他膜相比，包括纳滤（nanofiltration, NF）、超滤（ultrafiltration, UF）和微滤（microfiltration, MF）膜，RO膜（孔径在0.1~1 nm之间）可以滤除最小的污染物和单价离子[45]。RO膜通常是以横流模式运行，最常见的是螺旋缠绕膜（spiral-wound membranes, SWM），其中膜片缠绕在收集渗透物的内管上。研究表明，RO可以在很大程度上去除离子物质[46]。当RO被结合到常规处理过程中时，能耗是很高的[47]。然而，通过使用需要最少预处理的天然水作为独立RO的给水，RBF和RO的组合构成了一种可以生产高质量饮用水的新工艺，且运营成本低，对环境影响小。

3. 基于河岸过滤的一步反渗透——荷兰某案例研究中的可行性和有效性评估

为了更加直观地了解OSRO概念，Oasen Drinkwater 饮用水处理站（北纬51°53'37.5"、东经4°38'29.2"，位于荷兰Lek河沿岸）进行了一项将RBF与RO相结合的试点研究。该研究从温度波动、氧化还原条件、水质、生物稳定性、潜在必要的后处理和能源消耗等方面评估了OS-RO的可行性和有效性。

河水的季节性温度变化会改变水流量，并可能降低RO性能[48]。当RO与涉及RBF的预处理相结合时，河水会流经土壤通道，抑制季节性温度变化，从而为RO膜提供温度恒定的水。在河水温度从4~25 °C之间变化的地区，抽取的RBF水的温度始终为11~12 °C。这种稳定的温度对RO膜单元的稳态工艺提供了有利条件，从而形成了一个无压力变化的体系，并且由于沿膜的聚合浓度较低，因此结垢较少。

进水的氧化还原条件是下游RO系统设计和运行的重要因素。营养物质和氧气造成的生物污垢需要额外的关注和维护[49]。此外，同时含有Fe²⁺和O₂的进水通常会产生Fe(OH)₃的沉淀。这种沉淀会严重影响RO膜的性能，因此需要对给水进行额外的预处理步骤，例如，在膜过滤单元之前设置滴滤器[49]。由于缺乏氧气和营养物质，厌氧地下水可以最大限度地减少反渗透装置中的生物污染问题。因此，纯好氧河岸滤液是RO膜净化装置的充分来源。

原水水源中的颗粒物是RO处理设施的主要关注点。进水中存在的颗粒物会污染膜，降低RO膜的去除效率

[50]。在从RBF井中抽取的水中，原水的浊度下降了95%~99%，这提高了RO膜给水的水质。除颗粒物外，原水中的病原体，尤其是病毒，在60~110天后，通过好氧（厌氧）河岸地下通道被去除到6个对数单位（即99.9999%的杀菌率）。在RBF之后，颗粒和病原体都被有效去除，提高了RO后处理的净化能力。因此，OSRO处理完全能够生产无氯饮用水[51]。

新出现的OMP，包括杀虫剂、药品和个人护理产品、家用化学品和工业废品，进入天然水源后可能会对饮用水的人构成高风险[5]。由于RBF涉及物理渗透、化学吸附和生物降解过程，OMP首先被自然预处理，然后通过RO处理进一步去除。在中试规模的OSRO处理中，研究人员从2018年到2019年监测了10种选定OMP的去除情况（图2）。该检测观察到大多数OMP的去除效率超过75%，并发现从2018年和2019年的原水中提取的阿特拉津、苯达松、卡马西平、二甘醇二甲醚、碘帕醇、1,4-二氧杂环己烷、非那松和1,2-二氯苯的OMP被完全去除（100%）。此外，我们之前的研究调查了OSRO在处理混有30种选定模型OMP的原始厌氧河岸滤液的稳健性[31]。这些OMP包括中性和中等疏水性、中性亲水性、阴离子和阳离子化合物，它们可以通过人们使用药物和个人护理产品、杀虫剂、工业化学品和废物进入水源。观察到模型OMP的去除效率为75%~99%。因此，RBF作为一种自然处理方法与RO工程工艺相结合，可以被认为是对抗大多数新出现的OMP的有力屏障。

为了在输水管网中获得无氯消毒和无消毒剂残留的饮用水，从生产到配水的饮用水供应必须是生物稳定的[52-53]。饮用水质量受处理过的水和分配系统中存在的微生物的负面影响，军团菌等机会病原体对人体健康有害[54]。饮用水的生物稳定性与可生物降解有机碳（biodegradable organic carbon, BDOC）和可同化有机碳（assimi-

lable organic carbon, AOC）浓度有关[55]。这种有机物可以通过RO膜去除，从而降低处理过的水中微生物生长的可能性[56]。我们之前的研究观察到，用OSRO水培养的生物膜中三磷酸腺苷（adenosine triphosphate, ATP）浓度比常规处理的地下水低10倍，而OSRO水中军团菌的生长潜力比常规处理的水低1000倍[57-58]。此项初步研究表明，OSRO可有效限制生物膜和机会病原体的生长，从而确保供应饮用水的生物稳定性。

RO膜的渗透液需要进行再矿化（如钙和镁）和修复（如调节pH值和化学稳定性）后处理，以符合饮用水规定的要求并改善口感[59]。然而，后处理会将有机和无机成分引入RO渗透液，从而为细菌生长提供营养，并可能导致水质恶化[60]。在中试规模的OSRO处理中，包括离子交换、方解石过滤和脱气在内的后处理在RO膜之后进行（图3）。此前的研究发现，虽然RO渗透液的细菌生长潜力（bacterial growth potential, BGP）和养分含量在后处理后有所增加，但与常规处理水（经干砂过滤、曝气、滴滤、软化、快速砂滤、活性炭过滤和紫外线消毒处理）相比，其BGP要低得多[57]。建议对后处理进行改进，例如，使用高纯度方解石和频繁清洁曝气塔，以减少细菌生长，从而减轻对生物稳定性的负面影响。

为了优化OSRO处理中的渗透流量，处理过程采用Optiflux®水处理的RO设计，以最大限度地减少水压损失和膜表面的渗透压差[61]。简而言之，在压力容器中间配备一个中心端口，每侧配备三个元件。进水从两侧通过元件，浓缩物在中心端口收集，然后进入第二阶段，渗透液流过SWM的中心管。Optiflux® RO设计将RO产水率提高了20%。除了提高生产力之外，OSRO还具有成本效益，并且比传统替代方案能耗更低。我们比较了传统处理工艺（即曝气、砂滤、软化、颗粒活性炭过滤、紫外线消毒处理）与同一处理站内OSRO处理产生饮用水的能耗、

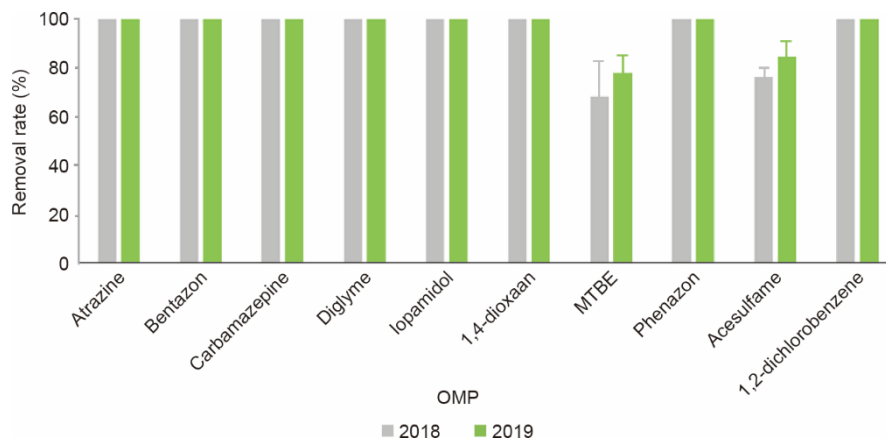


图2. 使用OSRO处理选定的OMP的去除效率。2018年和2019年，在Lek河和OSRO渗透物中测量了OMP浓度。MTBE：甲基叔丁基醚。

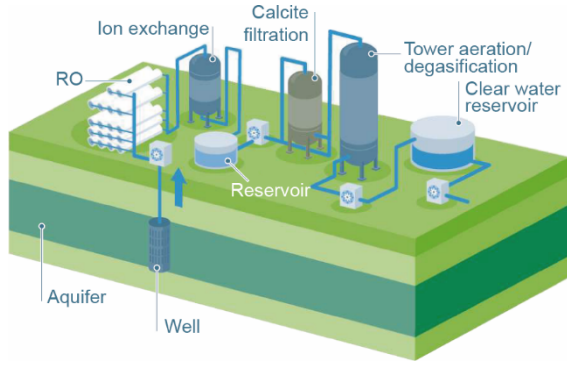


图3. 饮用水处理厂的全规模 OSRO 处理过程。

运营成本和投资成本。如图4所示，OSRO的能耗范围为 $0.57\sim 0.66\text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ ，与传统处理工艺的总能耗（ $0.22\sim 0.73\text{ kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$ ）相当。然而，与传统处理工艺（运营成本和投资成本分别为 $0.41\sim 0.50\text{ 欧元}\cdot\text{m}^{-3}$ 和1800万~2000万欧元）相比，OSRO占地面积小，化学品少，节省了劳动力成本，降低了运营成本（ $0.42\sim 0.43\text{ 欧元}\cdot\text{m}^{-3}$ ）和投资成本（1200万~1400万欧元）。与传统工艺相比，OSRO降低了对空间、化学品、劳动力和能源需求的依赖，是一种可持续的饮用水生产技术。

4. 一步反渗透的适用性和可持续性——人工滤池和可再生能源

然而，RBF只适用于水文地质状况良好的地区，该地区必须具有一条几乎连续不断流动的河流和能够将水渗入河流周围的含水层的能力。为了推广OSRO概念，例如，在无法切实使用RBF的偏远干燥地区供应饮用水时，人工滤池（ABF）是RBF的替代方案。ABF起到了人工补给的作用；当与砂滤系统结合使用时，它可以根据当地可用资源形成简单高效的水处理工艺。雨水、径流和废水等多种水源可以被收集、预处理、补给到地下含水层、储存

和回收。根据当地特定情况，补给采取不同的形式。预处理后的水可以通过井注入密闭含水层，用于含水层储存和回收，也可以通过砂过滤系统注入非密闭含水层，该系统由一个充满沙子（通常是细砂和粗砂的组合）的柱组成，作为过滤介质允许水渗入[62]。因此，补给的水在到达含水层之前，会通过沙子的接触得到净化，从而减少了病原体、有害无机物和有机物以及降低水的浊度。砂渗透净化补给水基本上综合了物理、化学和生物过程。有些大颗粒物无法通过沙子之间的孔隙，可以通过过滤去除。颗粒物也可以在通过沙床的运输过程中被机械去除，并且可以通过静电和分子力附着在沙粒上[63]。由于原水在通过沙床时长时间停留，有机物可以被各种氧化反应分解[64]。污染物可以通过沙床中生长的微生物群落（如细菌、硅藻、原生动物和后生动物）的生物活动被清除、转化和降解。微生物的细胞外聚合物的产生有利于减少原水中的病毒[65]，原水中的细菌可以通过吸附到沙子表面和原生动物的捕食来消除[63]。

除了使用ABF代替预处理外，我们还建议使用替代能源来生产饮用水，以降低传统碳基化石燃料的成本和环境影响。由于可再生能源正成为广受推崇的选择，我们建议将风能与OSRO系统结合以提供饮用水。我们比较了荷兰某地能源结构与风能对饮用水生产链，在气候变化（ CO_2 排放）、酸化（ SO_2 排放）、富营养化（磷含量）、累积能源需求以及传统处理和OSRO处理方案中的人类毒性潜力方面的影响（图5 [66]）。严重的影响主要是由OSRO方案的第二个生产步骤（即RO膜过滤）和传统处理方案的第三个步骤（即软化）造成的，这两个步骤都可以通过用风能代替能源组合而大大降低（ $56\%\sim 92\%$ ）。此外，在从能源组合转变为风能后，研究观察到OSRO方案的 CO_2 、 SO_2 和磷的排放、能源消耗及毒性低于传统方案中观察到的结果。这是因为后者更多地依赖于化学品，特

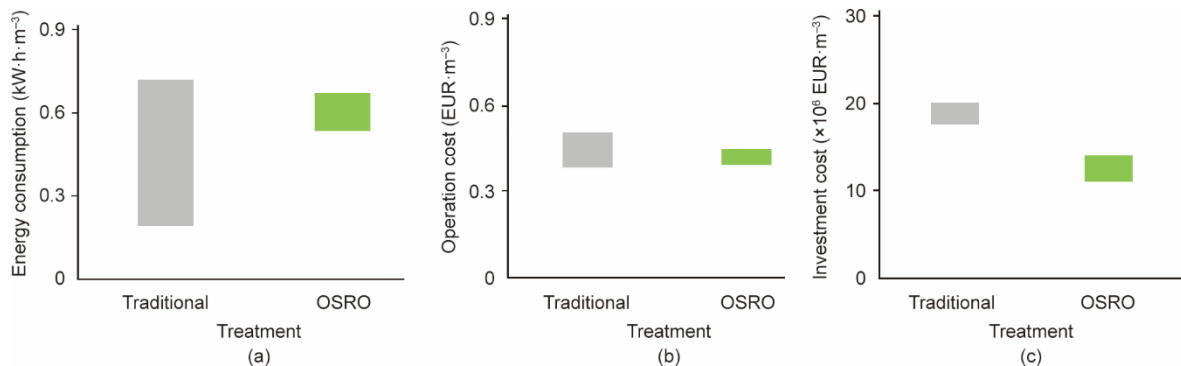


图4. 传统处理工艺与OSRO处理之间能源消耗 (a)、运营成本 (b) 和投资成本 (c) 的比较。处理厂位于Oasen Drinkwater的饮用水处理站内。传统的处理工艺包括干砂过滤、曝气、滴滤、软化、快速砂滤、活性炭过滤、紫外线消毒和水库储存。OSRO处理过程包括RBF提取、RO膜过滤、离子交换、方解石过滤、脱气和水库储存。

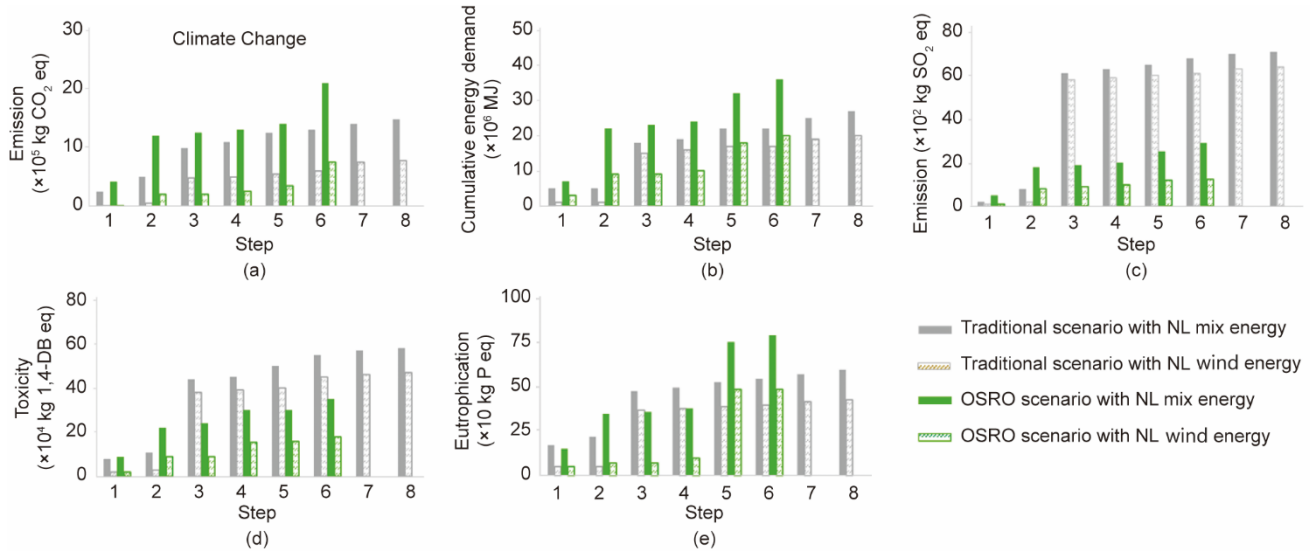


图5. 使用两种能源[荷兰(NL)能源组合和风能]的两种生产方案(OSRO和传统处理)之间的比较。评估的影响包括生产 $2.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 饮用水对气候变化(CO_2 排放)(a)、酸化(SO_2 排放)(b)、富营养化(磷含量)(c)、累积能源需求(d)和人体毒性[1,4-二氯苯(DB)毒性]潜值(e)的影响。NL能源组合包括87.28%的化石燃料、7.77%的风能、1.25%的太阳能、0.1%的水电和3.6%的核能。传统方案的1~8步是:干砂过滤、曝气、滴滤、软化、快速砂滤、活性炭过滤、紫外线消毒、水库储存。OSRO方案的1~6步是:RBF提取、RO膜过滤、离子交换、方解石过滤、脱气、储层储存。Eq: 当量。

特别是NaOH的生产需要大量的能源消耗。总的来说,与使用传统能源组合的传统饮用水处理工艺相比,利用风能实施的OSRO概念更具可持续性和可再生性。

5. 观点——闭合水循环

地表水和地下水经过净化后被用于城市、农业和工业用水,最终作为废水处理。收集到的废水经进一步处理,达到排入地表水或回灌地下蓄水层的要求后,可被重新使用,以生产饮用水。此外,雨水、暴雨水和高流量洪水可以储存在地下水基流中,以便通过管理含水层补给来增加生活和工业用水。其结果是形成一个闭合的水循环,在这个水循环中,水从源头开始再循环到源头,以满足不断增长的用水需求并减少水资源浪费[67]。从技术效率、财务可行性、资源再利用性和环境相关性的角度来看,建议未来的水处理侧重于通过整合取水质量(取决于用途)和废水排放处理来形成闭合水循环(图6)。

OSRO概念结合了人工砂滤和RO,是集中式和分散式供水系统中水回收和再利用解决方案的一个例子。OSRO可大规模用于城市供水,小规模用于区域供水,甚至可以个人规模使用。从可持续水资源管理和确保充足供水的角度来看,基于OSRO的分散式供水系统比社区或家庭层面的其他选择更具成本效益,因为其在中央输送、处理能力和饮用水运输方面的成本较低[68]。比如在当地收集和

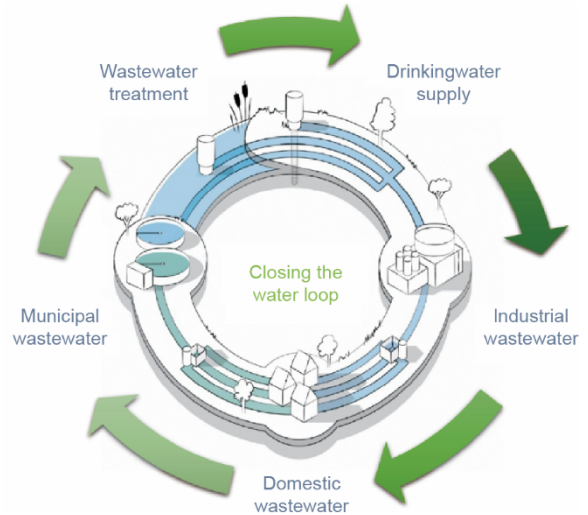


图6. 闭合水循环的概念示意图。城市、生活、农业和工业废水经过收集和进一步处理,以达到排放到地表水或回灌地下含水层的要求,然后可以被重新利用生产饮用水。其结果是一个闭合的水循环,水从源头经过循环回到源头。

理,然后使用膜过滤(如UF/RO)对其进行纯化,并使用 UV-O_3 进一步消毒。净化后的水供给使用,经RO膜过滤的浓缩液被反复处理。此外,分散处理可以与雨水收集相结合,以便处理雨水和暴雨。这对于缺水地区尤其有利,在这些地区,当集中式供水系统被隔离的情况下,分散处理可以提供替代水源。

随着全球人口的增长和超大规模城市化、严重的河流污染的出现以及对饮用水质量的高要求,需要新的饮用水生产来源和技术[5]。地下水储量被严重过度开采,特别

是在人口稠密的地区，而河水质量在未来几年内不太可能得到改善。OSRO 概念可以应用于有地表水但质量不足以用于生产饮用水的地区。此外，OSRO 概念已足够稳健，它为水文系统的变化做好了准备，例如，应对由于气候变化[69]导致的即将到来的微咸水或海水入侵，以及作为饮用水生物安全自然而有效的屏障，防止水传播病毒暴发等紧急情况[70]。我们鼓励对自然过程和工程系统的结合进行持续探索 and 关注，以便使用更可持续和可再生的方式生产、回收和再利用水源。

致谢

感谢国家重点研发计划(2018YFE0204100)和国家自然科学基金国际合作与交流基金(51820105011)的支持。

Compliance with ethics guidelines

Yujia Zhai, Gang Liu, and Walter G.J. van der Meer declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Deletic A, Wang H. Water pollution control for sustainable development. *Engineering* 2019;5(5):839–40.
- [2] Suwaileh W, Pathak N, Shon H, Hilal N. Forward osmosis membranes and processes: a comprehensive review of research trends and future outlook. *Desalination* 2020;485:e114455.
- [3] Peña-Guzmán C, Ulloa-Sánchez S, Mora K, Helena-Bustos R, Lopez-Barrera E, Alvarez J, et al. Emerging pollutants in the urban water cycle in Latin America: a review of the current literature. *J Environ Manage* 2019;237:408–23.
- [4] Farré MI, Pérez S, Kantiani L, Barceló D. Fate and toxicity of emerging pollutants, their metabolites and transformation products in the aquatic environment. *Trends Analyt Chem* 2008;27(11):991–1007.
- [5] Teodosiu C, Gilca AF, Barjoveanu G, Fiore S. Emerging pollutants removal through advanced drinking water treatment: a review on processes and environmental performances assessment. *J Cleaner Prod* 2018;197(Pt 1):1210–21.
- [6] Sun M, Arevalo E, Strynar M, Lindstrom A, Richardson M, Kearns B, et al. Legacy and emerging perfluoroalkyl substances are important drinking water contaminants in the Cape Fear River Watershed of North Carolina. *Environ Sci Technol Lett* 2016;3(12):415–9.
- [7] Houtman CJ, Kroesbergen J, Lekkerkerker-Teunissen K, van der Hoek JP. Human health risk assessment of the mixture of pharmaceuticals in Dutch drinking water and its sources based on frequent monitoring data. *Sci Total Environ* 2014;496:54–62.
- [8] Liu G, Lut MC, Verberk JQJC, Van Dijk JC. A comparison of additional treatment processes to limit particle accumulation and microbial growth during drinking water distribution. *Water Res* 2013;47(8):2719–28.
- [9] Sharma BM, Bečanová J, Scheringer M, Sharma A, Bharat GK, Whitehead PG, et al. Health and ecological risk assessment of emerging contaminants (pharmaceuticals, personal care products, and artificial sweeteners) in surface and groundwater (drinking water) in the Ganges River Basin. *India Sci Total Environ* 2019;646:1459–67.
- [10] Sillanpää M, Ncibi MC, Matilainen A. Advanced oxidation processes for the removal of natural organic matter from drinking water sources: a comprehensive review. *J Environ Manage* 2018;208:56–76.
- [11] Mayer BK, Daugherty E, Abbaszadegan M. Evaluation of the relationship between bulk organic precursors and disinfection byproduct formation for advanced oxidation processes. *Chemosphere* 2015;121:39–46.
- [12] Arena N, Lee J, Clift R. Life cycle assessment of activated carbon production from coconut shells. *J Cleaner Prod* 2016;125:68–77.
- [13] Qi C, Chang NB. Integrated carbon footprint and cost evaluation of a drinking water infrastructure system for screening expansion alternatives. *J Cleaner Prod* 2013;60:170–81.
- [14] Zawadzka J, Gallagher E, Smith H, Corstanje R. Ecosystem services from combined natural and engineered water and wastewater treatment systems: going beyond water quality enhancement. *Ecol Eng X* 2019;2:e100006.
- [15] Hallé C, Huck PM, Peldszus S, Haberkamp J, Jekel M. Assessing the performance of biological filtration as pretreatment to low pressure membranes for drinking water. *Environ Sci Technol* 2009;43(10):3878–84.
- [16] Eckert P, Irmscher R. Over 130 years of experience with riverbank filtration in Düsseldorf, Germany. *J Water Supply Res Technol* 2006;55(4):283–91.
- [17] Ray C. Worldwide potential of riverbank filtration. *Clean Technol Environ Policy* 2008;10(3):223–5.
- [18] Lee JH, Hamm SY, Cheong JY, Kim HS, Ko EJ, Lee KS, et al. Characterizing riverbank-filtered water and river water qualities at a site in the lower Nakdong River basin, Republic of Korea. *J Hydrol* 2009;376(1–2):209–20.
- [19] Sandhu C, Grischek T, Kumar P, Ray C. Potential for riverbank filtration in India. *Clean Technol Environ Policy* 2011;13(2):295–316.
- [20] Hamdan AM, Sensoy MM, Mansour MS. Evaluating the effectiveness of bank infiltration process in new Aswan City, Egypt. *Arab J Geosci* 2013;6(11):4155–65.
- [21] Freitas DA, Cabral JJSP, Paiva ALR, Molica RJR. Application of bank filtration technology for water quality improvement in a warm climate: a case study at Beberibe River in Brazil. *J Water Supply Res Technol* 2012;61(5):319–30.
- [22] Ahmed AKA, Marhaba TF. Review on river bank filtration as an in situ water treatment process. *Clean Technol Environ Policy* 2017;19(2):349–59.
- [23] Hoppe-Jones C, Oldham G, Drewes JE. Attenuation of total organic carbon and unregulated trace organic chemicals in U.S. riverbank filtration systems. *Water Res* 2010;44(15):4643–59.
- [24] Derx J, Blaschke AP, Blöschl G. Three-dimensional flow patterns at the river–aquifer interface—a case study at the Danube. *Adv Water Resour* 2010;33(11):1375–87.
- [25] Hu B, Teng Y, Zhai Y, Zuo R, Li J, Chen H. Riverbank filtration in China: a review and perspective. *J Hydrol* 2016;541(Pt B):914–27.
- [26] Oberleitner D, Schulz W, Bergmann A, Achten C. Impact of seasonality, redox conditions, travel distances and initial concentrations on micropollutant removal during riverbank filtration at four sites. *Chemosphere* 2020; 250: 126255.
- [27] Kennes-Veiga DM, Gonzalez-Gil L, Carballa M, Lema JM. The organic loading rate affects organic micropollutants’ cometabolic biotransformation kinetics under heterotrophic conditions in activated sludge. *Water Res* 2021; 189:116587.
- [28] Sahu RL, Dash RR, Pradhan PK, Das P. Effect of hydrogeological factors on removal of turbidity during river bank filtration: laboratory and field studies. *Groundwater Sustainable Dev* 2019;9:100229.
- [29] D’Alessio M, Grischek T, Ray C. Water crisis: bank filtration and aquifer storage recharge systems as possible alternatives. *J Hazard Toxic Radioact Waste* 2018;22(4):e04018028.
- [30] Bertelkamp C, Reungoat J, Cornelissen ER, Singhal N, Reynisson J, Cabo AJ, et al. Sorption and biodegradation of organic micropollutants during river bank filtration: a laboratory column study. *Water Res* 2014;52:231–41.
- [31] Albergamo V, Blankert B, Cornelissen ER, Hof B, Knibbe WJ, van der Meer W, et al. Removal of polar organic micropollutants by pilot-scale reverse osmosis drinking water treatment. *Water Res* 2019;148:535–45.
- [32] Fritzmann C, Löwenberg J, Wintgens T, Melin T. State-of-the-art of reverse osmosis desalination. *Desalination* 2007;216(1–3):1–76.
- [33] Qasim M, Badrelzaman M, Darwish NN, Darwish NA, Hilal N. Reverse osmosis desalination: a state-of-the-art review. *Desalination* 2019;459:59–104.
- [34] Grossi LB, Alvim CB, Alvares CMS, Martins MF, Amaral MCS. Purifying surface water contaminated with industrial failure using direct contact membrane distillation. *Separ Purif Technol* 2020;233:e116052.
- [35] Sowgath MT, Mujtaba IM. Design of reverse osmosis process for the purification of river water in the Southern Belt of Bangladesh. *Chem Eng Trans* 2017;61:1159–64.
- [36] Foureaux AFS, Reis EO, Lebron Y, Moreira V, Santos LV, Amaral MS, et al. Rejection of pharmaceutical compounds from surface water by nanofiltration

- and reverse osmosis. *Separ Purif Technol* 2019;212:171–9.
- [37] Albergamo V, Blankert B, van der Meer WGJ, de Voogt P, Cornelissen ER. Removal of polar organic micropollutants by mixed-matrix reverse osmosis membranes. *Desalination* 2020;479:e114337.
- [38] Malaeb L, Ayoub GM. Reverse osmosis technology for water treatment: state of the art review. *Desalination* 2011;267(1):1–8.
- [39] Okamoto Y, Lienhard JH. How RO membrane permeability and other performance factors affect process cost and energy use: a review. *Desalination* 2019;470:e114064.
- [40] Manickam SS, Gelb J, McCutcheon JR. Pore structure characterization of asymmetric membranes: non-destructive characterization of porosity and tortuosity. *J Membr Sci* 2014;454:549–54.
- [41] Wijmans JG, Baker RW. The solution–diffusion model: a review. *J Membr Sci* 1995;107(1–2):1–21.
- [42] Kimura K, Amy G, Drewes J, Watanabe Y. Adsorption of hydrophobic compounds onto NF/RO membranes: an artifact leading to overestimation of rejection. *J Membr Sci* 2003;221(1–2):89–101.
- [43] Verliefe ARD, Cornelissen ER, Heijman SGJ, Verberk JQJC, Amy GL, Van der Bruggen B, et al. The role of electrostatic interactions on the rejection of organic solutes in aqueous solutions with nanofiltration. *J Membr Sci* 2008;322(1):52–66.
- [44] Verliefe ARD, Cornelissen ER, Heijman SGJ, Hoek EMV, Amy GL, Bruggen BVD, et al. Influence of solute-membrane affinity on rejection of uncharged organic solutes by nanofiltration membranes. *Environ Sci Technol* 2009;43(7):2400–6.
- [45] Shen M, Keten S, Lueptow RM. Rejection mechanisms for contaminants in polyamide reverse osmosis membranes. *J Membr Sci* 2016;509:36–47.
- [46] Dolan D, Gros M, Rodriguez-Mozaz S, Moreno J, Comas J, Rodriguez-Roda I, et al. Removal of emerging contaminants from municipal wastewater with an integrated membrane system, MBR-RO. *J Hazard Mater* 2012;239–240:64–9.
- [47] Al-Karaghoul A, Kazmerski LL. Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. *Renewable Sustainable Energy Rev* 2013;24:343–56.
- [48] Farhat NM, Vrouwenvelder JS, Van Loosdrecht MCM, Bucs SS, Staal M. Effect of water temperature on biofouling development in reverse osmosis membrane systems. *Water Res* 2016;103:149–59.
- [49] Bagheri M, Mirbagheri SA. Critical review of fouling mitigation strategies in membrane bioreactors treating water and wastewater. *Bioresour Technol* 2018;258:318–34.
- [50] Sadeddin K, Naser A, Firas A. Removal of turbidity and suspended solids by electro-coagulation to improve feed water quality of reverse osmosis plant. *Desalination* 2011;268(1–3):204–7.
- [51] Albergamo V, Escher BI, Schymanski EL, Helmus R, Dingemans MML, Cornelissen ER, et al. Evaluation of reverse osmosis drinking water treatment of riverbank filtrate using bioanalytical tools and non-target screening. *Environ Sci Water Res Technol* 2020;6(1):103–16.
- [52] Liu G, Tao Yu, Zhang Ya, Lut M, Knibbe WJ, van der Wielen P, et al. Hotspots for selected metal elements and microbes accumulation and the corresponding water quality deterioration potential in an unchlorinated drinking water distribution system. *Water Res* 2017;124:435–45.
- [53] Liu G, Zhang Ya, Knibbe WJ, Feng C, Liu W, Medema G, et al. Potential impacts of changing supply-water quality on drinking water distribution: a review. *Water Res* 2017;116:135–48.
- [54] van der Kooij D, Veenendaal HR, Scheffer WJH. Biofilm formation and multiplication of *Legionella* in a model warm water system with pipes of copper, stainless steel and cross-linked polyethylene. *Water Res* 2005;39(13):2789–98.
- [55] Escobar IC, Randall AA. Assimilable organic carbon (AOC) and biodegradable dissolved organic carbon (BDOC): complementary measurements. *Water Res* 2001;35(18):4444–54.
- [56] Radjenović J, Petrović M, Ventura F, Barceló D. Rejection of pharmaceuticals in nanofiltration and reverse osmosis membrane drinking water treatment. *Water Res* 2008;42(14):3601–10.
- [57] Sousi M, Liu G, Salinas-Rodriguez SG, Chen L, Dusseldorp J, Wessels P, et al. Multi-parametric assessment of biological stability of drinking water produced from groundwater: reverse osmosis vs. conventional treatment. *Water Res* 2020;186:116317.
- [58] Learbuch KLG, Lut MC, Liu G, Smidt H, van der Wielen PWJJ. *Legionella* growth potential of drinking water produced by a reverse osmosis pilot plant. *Water Res* 2019;157:55–63.
- [59] Vingerhoeds MH, Nijenhuis-de Vries MA, Ruepert N, van der Laan H, Bredie WLP, Kremer S. Sensory quality of drinking water produced by reverse osmosis membrane filtration followed by remineralisation. *Water Res* 2016;94:42–51.
- [60] Sousi M, Liu G, Salinas-Rodriguez SG, Knezev A, Blankert B, Schippers JC, et al. Further developing the bacterial growth potential method for ultra-pure drinking water produced by remineralization of reverse osmosis permeate. *Water Res* 2018;145:687–96.
- [61] Van der Meer WGJ, van Paassen JAM, Riemersma MC, van Ekkendonk FHJ. Optiflux®: from innovation to realisation. *Desalination* 2003;157(1–3):159–65.
- [62] Dillon P, Toze S, Page D, Vanderzalm J, Bekele E, Sidhu J, et al. Managed aquifer recharge: rediscovering nature as a leading edge technology. *Water Sci Technol* 2010;62(10):2338–45.
- [63] Verma S, Daverey A, Sharma A. Slow sand filtration for water and wastewater treatment—a review. *Environ Technol Rev* 2017;6(1):47–58.
- [64] Zheng X, Ernst M, Jekel M. Pilot-scale investigation on the removal of organic foulants in secondary effluent by slow sand filtration prior to ultrafiltration. *Water Res* 2010;44(10):3203–13.
- [65] Elliott MA, DiGiano FA, Sobsey MD. Virus attenuation by microbial mechanisms during the idle time of a household slow sand filter. *Water Res* 2011;45(14):4092–102.
- [66] Zijp MC, van der Laan H. Life cycle analysis of a new drinking water production process schemes. Report. Bilthoven: National Institute for Public Health and the Environment; 2015. Report No.: RIVM Letter report 2015-0209.
- [67] Tran NH, Gin KH. Occurrence and removal of pharmaceuticals, hormones, personal care products, and endocrine disruptors in a full-scale water reclamation plant. *Sci Total Environ* 2017;599–600:1503–16.
- [68] Peter-Varbanets M, Zurbrugg C, Swartz C, Pronk W. Decentralized systems for potable water and the potential of membrane technology. *Water Res* 2009;43(2):245–65.
- [69] Malek P, Ortiz JM, Schulte-Herbruggen HMA. Decentralized desalination of brackish water using an electro dialysis system directly powered by wind energy. *Desalination* 2016;377:54–64.
- [70] Liu G, Qu J, Rose JB, Medema GJ. Roadmap for managing SARS-CoV-2 and other viruses in the water environment for public health. *Engineering*. In press.