



利用污水处理厂驱动海洋碳汇：碱化增汇技术的机遇与挑战

童星宇², 胡晨¹, 孟雅冰^{1,3*}, 焦念志^{1,2*}

1. 厦门大学碳中和创新研究中心, 福建省海洋碳汇重点实验室, 厦门 361005

2. 厦门大学海洋与地球学院, 海洋生物地球化学全国重点实验室, 厦门 361005

3. 四川天府新区厦大创新研究院, 成都 610213

* 联系人, E-mail: mengyb@xmu.edu.cn; jiao@xmu.edu.cn

2025-07-31 收稿, 2025-10-28 修回, 2025-12-19 接受, 2026-01-07 网络版发表

海洋负排放(ONCE)国际大科学计划和国家自然科学基金(42376148, 42188102)资助

摘要 在全球碳中和战略背景下, 如何以城市污水处理厂为关键节点, 驱动大气CO₂向海洋碳汇定向转移, 已成为一项极具潜力的前沿科学议题. 其中, “污水碱化增汇技术(WAE)”作为核心策略, 依托厂内独特的生物地球化学条件, 通过高效溶解碱性物质来提升尾水总碱度, 进而增强其在海洋环境中的碳封存潜力. 本文系统梳理了该领域的最新研究进展, 重点分析了碱化增汇与主流生物脱氮工艺(硝化-反硝化、厌氧氨氧化)之间的耦合机制及其微生物生态效应. 在此基础上, 系统比较了“源头减排”与“末端增汇”两种碱化剂投加策略的优缺点, 并结合“灰碳”(即尾水中的惰性溶解有机碳)概念, 阐述了其作为一类新型碳汇途径的前景, 同时评估了沉淀产物的资源化利用潜力. 尽管该技术兼具强化除磷等协同效益, 其实际应用仍面临次生矿物沉淀、潜在生态风险及监测、报告与核查(MRV)体系不完善等关键挑战. 未来研究应聚焦于开展大规模工程验证、多维度综合效益评估及跨学科深度融合, 以推动该技术走向成熟、安全的工程应用.

关键词 污水碱化增汇, 海洋负排放, 生物过程调控, 灰碳

人类社会正面临气候变化的严峻挑战, 为实现《巴黎协定》设定的将全球平均气温升幅控制在2°C以内、并努力限制在1.5°C以内的温控目标, 单纯依赖能源结构的低碳转型已显不足. 大规模部署二氧化碳移除(carbon dioxide removal, CDR)技术, 即“负排放”技术, 已成为国际社会实现碳中和的普遍共识与必要手段^[1,2]. 在众多CDR技术路径中, 海洋碱化增汇(ocean alkalinity enhancement, OAE)因其巨大的理论固碳潜力(可达千亿吨级)、长周期的储存稳定性(超过10000年)以及相对较低的理论成本, 被广泛视为最有前景的海洋负排放技术(ocean negative carbon emissions, ONCE)之一^[3]. OAE的基本原理是向海洋添加碱性物

质(如硅酸盐矿物、氢氧化物等), 通过化学反应消耗海水中的氢离子或直接增加碱度, 从而提升海水对大气CO₂的吸收容量, 并将溶解的CO₂转化为碳酸氢根(HCO₃⁻)和碳酸根(CO₃²⁻)等稳定的无机碳形态.

然而, 传统的OAE实施方案(如直接向海洋播撒矿物粉末)面临着一系列工程与生态挑战, 如矿物在天然海水中的溶解速率缓慢、可能对透光层生态系统造成物理遮蔽、监测核查的极度困难等. 在此背景下, 城市污水处理厂(wastewater treatment plants, WWTPs)作为人类水循环的关键节点, 其角色正经历着深刻的重塑. 传统上, WWTPs被视为高能耗的温室气体排放源^[4,5], 其碳排放主要包括因电力消耗产生的间接排放, 以及

引用格式: 童星宇, 胡晨, 孟雅冰, 等. 利用污水处理厂驱动海洋碳汇: 碱化增汇技术的机遇与挑战. 科学通报

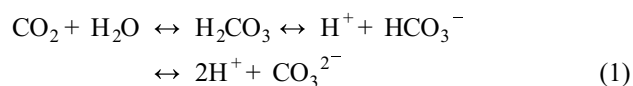
Tong X, Hu C, Meng Y, et al. Utilizing wastewater treatment plants to enhance ocean carbon sequestration: opportunities and challenges of alkalinity enhancement technology (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: 10.1360/CSB-2025-5312

在生物处理过程直接释放的 CO_2 、 CH_4 和 N_2O ^[6]。然而,其覆盖全球的庞大规模(全球数万座设施)、巨大的水通量以及独特的生物地球化学环境,为气候治理提供了新的机遇^[7,8]。

近年来,一种旨在重塑WWTPs功能的新理念——“污水碱化增汇”(wastewater alkalinity enhancement, WAE)逐渐兴起。该技术通过在污水处理流程中加入碱性物质,利用污水独特的理化性质加速其溶解,并将所产生的碱度随尾水输送至海洋,最终实现OAE^[9]。该理念有望将WWTPs从传统的“碳源”转变为能够高效生产并输送碱度的海洋碳汇系统,从而推动污水处理领域实现范式转换^[10]。该技术路径标志着污水处理正从单纯的末端治理,向“过程资源化-气候协同减缓”的综合模式转型,通过将负排放功能与污染控制相耦合,有望重新定义WWTPs的经济与环境价值。本文旨在系统评述当前围绕WAE开展的生物过程调控研究进展,分析其碳汇潜力与新增途径,并评估其规模化应用面临的挑战与机遇。

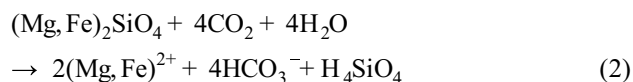
1 污水碱化增汇的基本化学原理

OAE技术通过人为增加海水碱度,驱动海水碳酸盐体系平衡向更有利于大气 CO_2 吸收的方向移动,将水中溶解的 CO_2 转化为更稳定的 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 离子,从而增强海洋对大气 CO_2 的吸收^[3]。该过程主要遵循以下化学平衡:



经此转化,这些以溶解无机碳形式固定的碳,可通过海洋环流输送至深海,在水体中长久停留或以沉积物的形式在海底埋藏,从而实现长达上万年的稳定封存^[3,11]。

将OAE的应用场景迁移至WWTPs具备显著的场域优势。WWTPs内部,尤其是好氧生物处理单元,为碱性物质的溶解提供了极为有利的环境:微生物对有机物的矿化与发酵产生大量 CO_2 和有机酸,导致水体呈现低pH、高 $p\text{CO}_2$ (尾水通常超过10000 μatm ,远高于大气~420 μatm)的特性^[12~14]。此类条件可显著促进碱性矿物的化学风化(图1)。实验室研究表明,橄榄石在好氧污水环境中的溶解动力学显著增强,其速率是海水环境的约20倍^[15],这使得在WWTPs有限的水力停留时间内实现尾水碱度的有效提升(如超过10 mmol kg^{-1})成为可能。以橄榄石为例,其与 CO_2 反应的基本过程如下:



式(2)表明,每溶解1 mol橄榄石,理论上可固定4 mol CO_2 ^[16]。然而在实际应用中,净碱度增益通常低于理论值。其主要原因在于矿物溶解过程中可能形成钝化层,显著抑制反应速率^[17]。这些钝化层主要由去质子化表面复合物、再聚合的硅酸,以及碳酸钙(CaCO_3)、铁氧化物、氢氧化物等次生矿物相构成,它们覆盖橄榄石颗粒表面,降低其有效反应面积,阻碍溶解反应持续进行^[17,18]。此外,部分次生矿物(如 CaCO_3)的形成过程本身会直接消耗水体碱度,进一步降低实际碱度增益。因此,在工程设计与碳汇效益评估中,必

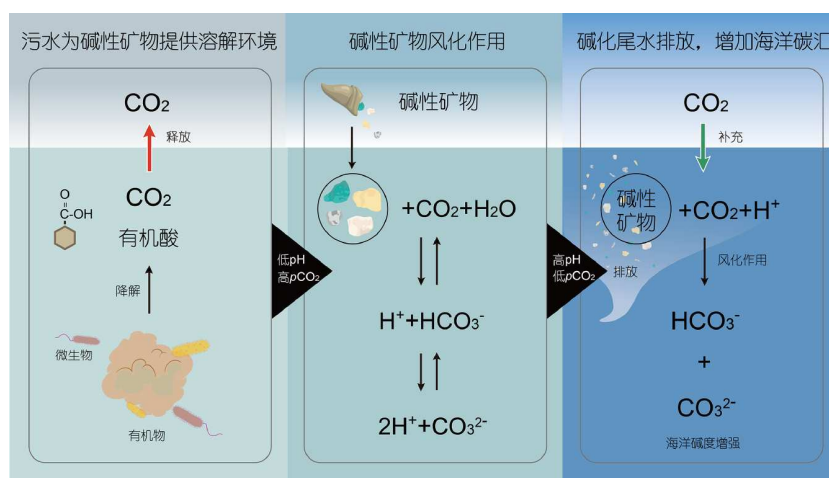


图1 WAE的基本原理

Figure 1 Fundamental principle of WAE

须纳入对这一“效率衰减因子”的考量。

在碱性材料的选择上, WAE目前的研究与实践主要集中于硅酸盐矿物与氢氧化物两类。其中, 橄榄石作为天然硅酸盐矿物的代表, 因其溶解机制相对简单、自然风化速率较高, 常作为实验室研究的主要对象^[15,19]。橄榄石的优势在于原料来源广泛、成本较低, 且其反应过程本质上是对自然地质作用的模拟与加速, 产物广泛参与生物地球化学过程, 环境相容性较好^[20]; 然而, 其在真实污水环境中的反应动力学仍偏慢, 效率提升受限。相比之下, 氢氧化镁作为氢氧化物的典型, 具有反应速率快、单位质量碱度产率高的特点, 且其溶解释放的 Mg^{2+} 可抑制 $CaCO_3$ 沉淀^[21], 加之在污水pH调节中已有成熟应用经验^[22], 已成为当前早期工程示范中更常选用的材料^[23]。但其应用也面临一定的挑战, 主要包括生产成本相对较高, 以及在充分扩散前的次生矿物沉淀风险等。因此, WAE的碱性材料选择需在溶解效率、成本和环境风险之间进行权衡(表1)。

近年来, 对WAE技术的探索已从单纯的化学过程模拟, 拓展至对污水处理过程与海洋环境的综合评估。一项研究通过构建WWTPs与近岸海洋水动力-生物地球化学-碳酸盐化学的耦合模型框架, 系统评估了碱度投加对碳减排的影响, 该模型预测, 在生物处理阶段上游投加约 2.7 mmol L^{-1} 碱度(以 $CaCO_3$ 计, 约合 270 mg L^{-1}), 可将一座近岸污水处理厂的年 CO_2 直接排放量从6456吨大幅削减至20.2吨, 近乎实现从碳源到碳汇的转化^[33]。另一项模型研究推测, 在全球范围内实施WAE, 可以实现每年 $18.8 \pm 6.0 \text{ Tg}$ 的 CO_2 固定, 这一水平与全球红树林系统的有机碳埋藏效率相当^[15]。在工程实践方面, 尽管大规模、以碳封存为核心目标的WAE工程应用尚处于早期阶段, 但已出现具有示范意义的现场验证, 一项在英国某污水处理厂开展的现场中试表明, 向尾水中添加氢氧化镁悬浊液可使尾水中的 CO_2 浓度降低74%, pH提升0.4个单位, 固碳效率达到

$0.73 \text{ mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$ 碱度, 为WAE的可行性提供了直接的现实依据^[23]。

2 污水碱化增汇的生物过程调控

将碱性物质引入WWTPs, 构成了对WWTPs内复杂微生物生态系统的深度非生物胁迫(abiotic stress)与扰动。为协同实现污染物去除与碳汇功能, 必须精准调控两大核心环节: 首先是维持对碱度变化高度敏感的生物脱氮工艺的稳定运行, 这涵盖了传统硝化-反硝化与新型的短程硝化-厌氧氨氧化(partial nitrification-anammox, PN/A)工艺, 该过程主导了系统的氮元素转化与碱度动态(表2)。其次, 是引导由此引发的微生物群落结构与功能演替, 使其朝有利于污染物降解与碳封存的方向发展。

2.1 污水碱化增汇与生物脱氮的耦合调控

生物脱氮工艺的稳定运行高度依赖系统的碱度平衡。在传统硝化-反硝化工艺中, 这一平衡具有高度的脆弱性; 由氨氧化细菌(ammonia-oxidizing bacteria, AOB)和亚硝酸盐氧化细菌(nitrite-oxidizing bacteria, NOB)介导的硝化反应是典型的碱度消耗过程。理论上, 每氧化 1 g 氨氮(NH_4^+-N)会消耗 7.14 g 碱度(以 $CaCO_3$ 计), 导致系统pH下降^[34-36], 进而抑制硝化活性(最适pH 7.5~8.5)。尽管后续反硝化过程能回补部分碱度(每还原 1 g 硝态氮回补约 3.57 g 碱度, 以 $CaCO_3$ 计^[37]), 但其回收量通常不足硝化消耗量的一半, 尤其在处理低碳氮比或低碱度废水时, 成为制约系统高效运行的瓶颈。

同样, 厌氧氨氧化(anaerobic ammonium oxidation, Anammox)及其衍生的PN/A工艺也面临类似的碱度约束, 该工艺虽具有低能耗优势, 但其整体碱度收支仍为净消耗^[38,39]。其中, 短程硝化(PN)步骤($NH_4^+ \rightarrow NO_2^-$)消耗大量碱度, 而后续的Anammox反应本身对碱度影响微弱, 导致整个PN/A系统仍需依赖充足的进水碱度或

表1 用于污水碱化增汇的主要碱性材料对比

Table 1 Comparison of main alkaline materials used for WAE

碱性材料	溶解原理	在污水中的相对溶解速率	理论 CO_2 封存效率($\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$)	相对成本	主要协同效益	主要环境与操作风险	关键参考文献
橄榄石	矿物风化	高	~4	低	除磷、提供硅营养物	痕量重金属(Ni, Cr等)释放	[16,24,25]
玄武岩	矿物风化	中等	变量, 低于橄榄石	低	除磷、提供多种微量元素	痕量重金属(Co、Zn、Cu、Mn等)释放	[26-28]
氢氧化镁	化学中和反应	极高	~2	中等	pH缓冲、除磷	次生矿物沉淀	[23,29,30]
熟石灰	化学中和反应	极高	~2	中等	pH缓冲、除磷	次生矿物沉淀、强碱操作危险	[31,32]

表 2 碱度对关键生物脱氮过程的影响总结

Table 2 Summary of the effects of alkalinity on key biological denitrification processes

过程	最佳pH范围	碱度化学计量 (mg CaCO ₃ mg ⁻¹ N)	关键微生物类群	高碱度/pH影响	与WAE的协同作用
硝化	7.0~8.0	-7.14(消耗)	<i>Nitrosomonas</i> , <i>Nitrobacter</i>	当pH>8.5~9.0时开始受到抑制	WAE提供必需的碱度, 将pH稳定在最佳区间, 有望节约化学药剂成本
反硝化	7.0~9.5	+3.57(产生)	异养菌(如 <i>Pseudomonas</i>)	通常耐受性较好, 但极端pH(>9.0)可能抑制并导致NO ₂ ⁻ 积累	WAE有助于维持一个对硝化和反硝化均有利的稳定pH环境, 保障总氮去除效率
Anammox (PN/A工艺)	7.0~7.5	净消耗(因前置的部分硝化过程)	<i>Candidatus Brocadia</i> , <i>Ca. Kuenenia</i> , <i>Ca. Jettenia</i>	对pH波动高度敏感, 偏离最适范围易导致活性下降甚至系统崩溃	WAE为PN/A工艺提供了至关重要的碱度缓冲, 是保障其稳定运行、防止酸冲击导致系统失效的关键协同技术

外部碱源投加以维持pH稳定(Anammox菌最适pH 7.0~8.0).

WAE技术的核心价值在于可以有效解决上述工艺共有的碱度失衡问题. 通过向系统中可控地投加碱性物质, WAE能在硝化或短程硝化阶段原位持续补充被消耗的碱度, 有效缓冲pH下降, 为核心功能菌群(如硝化菌、Anammox菌)创造并维持最佳活性环境. 这种“硝化耗碱-WAE补碱”的耦合机制, 在保障脱氮效率的同时, 可显著降低系统对外源商业碱剂的依赖, 从而实现运营成本(operational expenditure, OPEX)的节约.

2.2 微生物群落响应与功能演替

碱度增加作为一种强选择压力, 会重塑WWTPs内的微生物群落结构与功能. 基因组研究表明, 碱性环境(如投加石灰导致pH≥11.9)会显著富集耐碱菌群, 特别是放线菌门(Actinobacteria)和变形菌门(Proteobacteria)^[40]. 这类群落演替可能伴随着功能转变, 例如富集的产酸菌能强化复杂有机物的水解, 产生更多挥发性脂肪酸(volatile fatty acids, VFAs)^[40].

值得注意的是, 这一生物-化学过程存在复杂的双向反馈: 一方面, 微生物产生的有机酸可加速碱性矿物溶解; 另一方面, 溶解带来的碱度和离子强度提升反过来可能影响产酸菌的代谢活性及酶活性^[41~43]. 这种“有机酸生成-矿物溶解-环境碱化”之间的非线性定量关系及其对总碳通量的净影响, 目前尚不完全清晰, 是未来实现WAE精准调控需要重点解析的科学问题. 此外, 碱性环境可能会筛选出能够高效转化溶解有机碳(dissolved organic carbon, DOC)为更稳定形态(即下文中的“灰碳”)的功能菌群(如类似海洋SAR202的类群^[44,45]), 从而在无机固碳之外, 开辟有机碳汇的新维度^[46].

3 碳汇效率与新增汇途径

3.1 “源头减排”与“末端增汇”的动态优化

基于模型的模拟研究揭示了两种不同的碱度投加策略: 上游投加(upstream addition, UpAdd): 在生物处理单元(如好氧池)内部或其之前投加碱性物质. 该策略利用微生物呼吸产生的高浓度CO₂与碱性物质直接反应, 实现“源头减排”^[15,33]. 下游投加(downstream addition, DnAdd): 在生物处理之后、尾水排放之前投加碱性物质. 该策略旨在最大化外排尾水的碱度, 以增强其进入海洋后的CO₂吸收能力, 实现“末端增汇”^[23,33].

这两种策略在碳汇效益、工程可行性和环境风险之间存在关键权衡(表3). UpAdd策略能显著降低WWTPs的CO₂直接排放, 但由于部分碱性物质在厂内消耗, 削弱了下游海洋增汇潜力. 此外, 在日益严格的出水水质标准监管背景下, 对主体生化工艺的介入式改造面临较大的工程风险与监管阻力, 实施难度较大. 相比之下, DnAdd策略不影响WWTPs的CO₂排放, 而是通过提升尾水碱度增加海洋碳汇. 该策略因不干扰核心处理工艺, 在工程实施上更具可行性与灵活性, 但高剂量投加易使出水pH超标并引发次生矿物沉淀. 基于模型的综合评估显示, 在所有测试投加量范围内, UpAdd策略的CO₂总移除量(厂内减排+海洋吸收)比DnAdd策略高出约30%, 且更易将出水pH控制在排放限值内, 展现出更优的增汇潜力^[33]. 尽管如此, 该结论受限于模型假设边界; 在工程实践中, DnAdd策略凭借其“零干扰”特性, 对于工艺稳定性敏感或改造空间受限的存量污水厂而言, 更具落地可行性. 因此, 策略选择需基于具体项目的碳汇目标、处理工艺稳定性、出水标准及成本效益进行综合研判.

3.2 被忽视的污水碳汇“灰碳”

近期研究提出了“灰碳”(gray carbon)的概念,旨在重新评估WWTPs尾水中有机组分的潜在碳汇功能。“灰碳”被定义为源自污水处理过程、排入海洋后能抵抗生物降解并长期留存的惰性溶解有机碳(recalcitrant dissolved organic carbon, RDOC)^[46,47]。由于其复杂的化学结构与生物惰性,“灰碳”难以被微生物快速分解利用。随尾水进入海洋环境后,这类RDOC可形成一个长期稳定的碳汇^[48],从而在陆地“绿碳”与海洋“蓝碳”之间建立起一座独特的桥梁。值得关注的是,提升污水碱度可能会改变微生物群落的代谢活动,影响DOC向RDOC的转化路径和效率。这使得WAE技术有望从一个单纯的“加碱”技术,升华为旨在实现“无机-有机双重碳汇”的复杂生物地球化学工程(图2)。未来WAE研究的

一个核心方向,应是探索如何在确保出水总有机负荷(如化学需氧量, chemical oxygen demand, COD与总有机碳, total organic carbon, TOC)稳定达标的前提下,通过精准调控运行参数,主动引导微生物群落的代谢路径,以实现无机增汇和有机增汇的协同最优化。

4 挑战、协同效益与未来展望

WAE技术前景广阔,但规模化应用仍需克服一系列挑战,而其带来的多重协同效益也为该技术的实际落地提供了动力(图3)。

挑战与风险主要包括: (1) 次生矿物沉淀风险: 过度碱化(尤其在DnAdd策略中)可能会导致文石过饱和度($\Omega_{aragonite}$)升高,当超过某一临界阈值时(如在海洋环境中通常 >12),可能引发 CaCO_3 沉淀,从而消耗碱度,

表 3 上游与下游碱度投加策略对比

Table 3 Comparison of upstream and downstream alkalinity addition strategies

投加策略	投加点	对WWTPs的CO ₂ 排放影响	对海洋CO ₂ 吸收影响	总净CO ₂ 移除效率	出水pH影响	次生矿物沉淀风险	主要增汇机制
上游投加	生物处理单元内或之前	显著减少或消除	吸收潜力降低	更高(约高30%)	通常在排放限值内	较低	源头减排为主,末端增汇为辅
下游投加	最终出水排放前	无影响	吸收潜力最大化	较低	易超出排放限值	较高	末端增汇

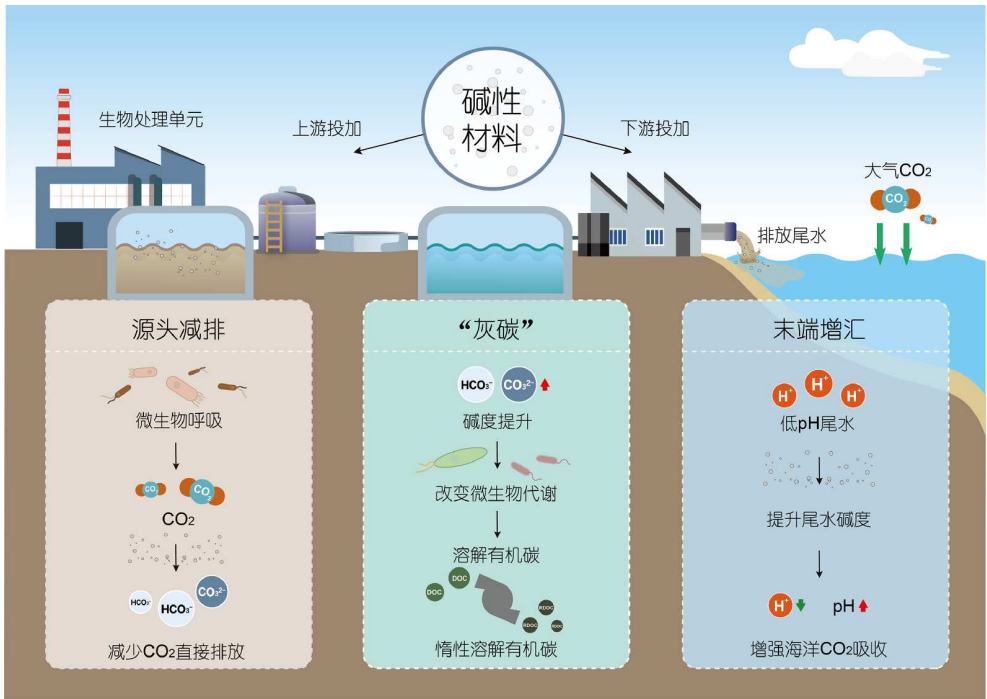


图 2 不同的碱度投加策略及增汇新途径

Figure 2 Different alkalinity addition strategies and novel carbon sequestration pathways

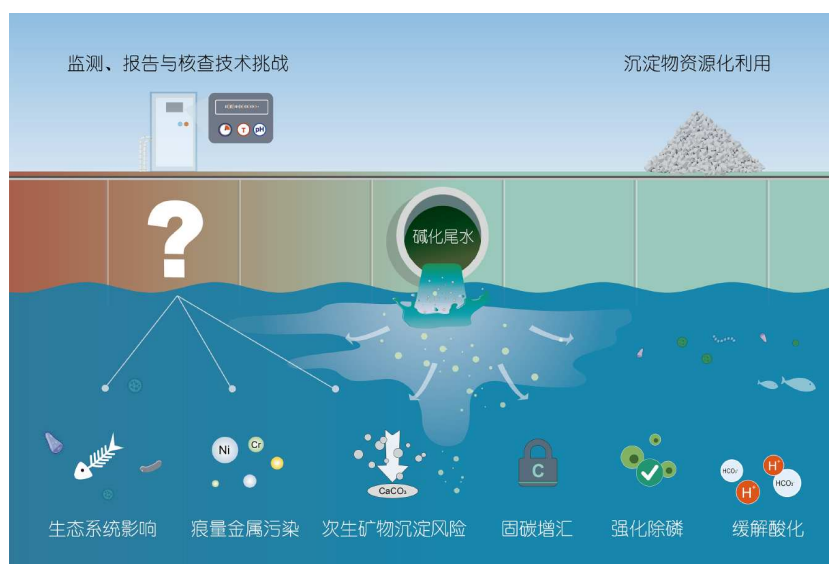


图3 WAE技术的正面效益及风险挑战

Figure 3 Benefits, risks and challenges of WAE technology

降低净碳汇效益^[32,33]。尤需警惕的是,污水中富含的胶体及有机大分子可作为异相成核位点(heterogeneous nucleation sites),即使文石过饱和度较低(如 $\Omega_{\text{aragonite}} \approx 7$),也可能触发“失控性沉淀”现象:即沉淀一旦触发,反应将呈现自催化特征,在远低于初始成核阈值的过饱和度下持续进行,直至达到新的热力学平衡。例如,一项向海水中添加熟石灰的研究发现,在 $\Omega_{\text{aragonite}}$ 约为7时便发生了“失控性沉淀”,导致系统每投加1 mol碱度所对应的 CO_2 吸收量从0.8 mol急剧下降至0.1 mol^[32]。在此情况下,沉淀所消耗的碱度甚至可能超过投加量,致使WAE从预期的碳汇逆转为潜在碳源,该风险在DnAdd策略中尤为突出。(2) 痕量金属污染:使用橄榄石等天然矿物时,需警惕伴生重金属(如Ni、Cr)的溶出风险^[49]。然而,一项为期四年的大规模田间试验表明,在玄武岩增强风化过程中,与对照组相比,作物籽粒与土壤交换性离子库中的痕量金属含量均未出现显著积累。该结果证实,通过选用高纯度、低重金属含量的矿物(如来源受控的玄武岩或橄榄石),能够有效控制相关的环境风险^[26]。(3) 生态系统影响:高碱度尾水对受纳水体(尤其是近岸河口)生态系统的长期影响尚不明确,尽管有现场试验表明碱性尾水在排海口数米范围内即可被快速稀释^[23],从而显著减弱其局部生态影响,但长期、大范围排放的累积效应仍需谨慎评估。(4) 监测、报告与核查(monitoring, reporting, and verification, MRV):建立覆盖全生命周期、准确可靠的MRV体系

是所有CDR技术商业化的基石,也是WAE面临的核心挑战。

WAE技术可带来显著的协同效益,包括:(1) 强化除磷,有助于满足日益严格的排放标准;(2) 缓解近岸水体酸化,保护敏感的海洋生态系统^[50];(3) 节约运营成本,替代昂贵的商业碱剂。

此外,基于循环经济理念,WAE过程衍生的富矿沉淀物具备显著的资源化增值潜力。虽然次生矿物沉淀在当前被视为负面效应,但若能对该过程进行调控,产生的富含钙、镁、磷的矿物沉淀理论上可作为建材辅料或土壤改良剂。已有研究证实,将普通污水污泥应用于水泥或砖块制造具备可行性^[51~53]。将WAE产生的特定矿物沉淀进行资源化利用,值得未来深入探索。除了沉淀物的直接利用,WAE与关联系统的协同增效也备受关注。例如,最新研究提出将基于碳酸氢盐培养的微藻系统与WAE相耦合:一方面利用微藻培养产生的高碱度废液作为WAE的优质碱源;另一方面,收获的高附加值微藻产品能创造经济收益,从而构建一个兼具碳封存、污染治理与资源产出的集成技术体系^[54]。这为WAE技术的多元化发展提供了新思路。

WAE的成功推广是一项复杂的社会-技术系统工程。未来的研究重点应聚焦于:(1) 开展更大规模、更长周期的现场试验,全面评估其生态环境影响;(2) 深入探究“灰碳”的形成机制及其与WAE的耦合关系;(3) 开发标准化、低成本、高精度的MRV技术体系;(4) 开

展全面的技术经济分析(techno-economic analysis, TEA)和生命周期评价(life cycle assessment, LCA); (5) 运用多组学工具揭示关键微生物在高碱度胁迫下的适应机制。此外, 公众的理解与接受、健全的治理框架以及稳定的碳市场, 是推动该技术从科学验证走向规模化应用不可或缺的支撑要素。

5 结论

将污水处理厂改造为驱动海洋碳汇工程化平台的研究已取得突破性进展, WAE技术作为核心路径, 其科学性与可行性已得到初步验证。研究表明, WWTPs独特的生物地球化学环境克服了矿物自然风化的动力学瓶颈, 将其溶解速率提升一个数量级以上, 为高效增汇奠定了理论基础。WAE的成功实施并非单纯的化学投

加过程, 而是涉及化学、生物与工程多重因素的系统性调控。其核心在于, 如何在保障WWTPs核心工艺(如生物脱氮)稳定运行的前提下最大化碳封存效率, 并充分利用其协同效益。在技术路径上, “上游投加”策略在总净CO₂移除效率上表现出优势, 而“下游投加”策略则更具现实可行性。此外, “灰碳”概念的提出为WAE开辟了实现“无机-有机双重增汇”的新维度。尽管该技术面临MRV体系构建、“失控性沉淀”等环境风险管控和治理框架缺失等挑战, 但其带来的强化除磷、节约成本等协同效益, 以及在碳汇核算与交易框架下的潜在经济价值, 共同展现出广阔的应用前景。未来, WAE技术的成熟与推广亟需科学界、产业界与政策界的深度产学研用协同, 通过大规模实证研究与多维度评估, 共同推动这一潜力巨大的气候解决方案走向成熟。

致谢 感谢厦门大学碳中和创新研究中心谢杰镇高级工程师对文章质量提升所作的贡献。

参考文献

- Gidden M J, Gasser T, Grassi G, et al. Aligning climate scenarios to emissions inventories shifts global benchmarks. *Nature*, 2023, 624: 102–108
- Jiao N Z. The global ocean negative carbon emissions contributes to building a community with a shared future for mankind (in Chinese). *Sci Technol Rev*, 2025, 43: 1–2 [焦念志. 海洋负排放国际大科学计划助力人类命运共同体建设. *科技导报*, 2025, 43: 1–2]
- Renforth P, Henderson G. Assessing ocean alkalinity for carbon sequestration. *Rev Geophys*, 2017, 55: 636–674
- Ranieri E, D'onghia G, Ranieri F, et al. Performance of wastewater treatment plants in emission of greenhouse gases. *Bioresource Tech*, 2024, 404: 130897
- Bani Shahabadi M, Yerushalmi L, Haghighat F. Impact of process design on greenhouse gas (GHG) generation by wastewater treatment plants. *Water Res*, 2009, 43: 2679–2687
- Zhang X Y, Zhang M, Liu Y. One step further to closed water loop: reclamation of municipal wastewater to high-grade product water (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 1358–1367 [张晓媛, 张萌, 刘雨. 通向闭路水循环的未来市政污水处理新模式. *科学通报*, 2020, 65: 1358–1367]
- Lu L, Guest J S, Peters C A, et al. Wastewater treatment for carbon capture and utilization. *Nat Sustain*, 2018, 1: 750–758
- Cheng S W, Wang P F, Zhou Q X. Treatment and remediation of micro-polluted complex water based on carbon neutrality (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2024, 69: 2789–2803 [程思雯, 王鹏飞, 周启星. 基于碳中和的微污染复杂水体治理与修复. *科学通报*, 2024, 69: 2789–2803]
- Cai W J, Jiao N. Wastewater alkalinity addition as a novel approach for ocean negative carbon emissions. *Innovation*, 2022, 3: 100272
- Jiao N Z, Luo T W, Liu J H, et al. Ocean negative carbon emissions in the context of Earth system science (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2023, 38: 1294–1305 [焦念志, 骆庭伟, 刘纪化, 等. 海洋负排放——基于地球系统科学思维的海洋科技变革. *中国科学院院刊*, 2023, 38: 1294–1305]
- Li S Z, Liu L J, Suo Y H, et al. Carbon Tectonics: a new paradigm for Earth system science (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 309–338 [李三忠, 刘丽军, 索艳慧, 等. 碳构造: 一个地球系统科学新范式. *科学通报*, 2023, 68: 309–338]
- Cao X, Xu Y J, Long G, et al. Dissolved carbon in effluent of wastewater treatment plants and its potential impacts in the receiving karst river. *Environ Res*, 2024, 251: 118570
- Liu X Y, Yang X F, Li Y X, et al. Variations in dissolved inorganic carbon species in effluents from large-scale municipal wastewater treatment plants (Qingdao, China) and their potential impacts on coastal acidification. *Environ Sci Pollut Res*, 2019, 26: 15019–15027
- Yoon T K, Jin H, Begum M S, et al. CO₂ outgassing from an urbanized river system fueled by wastewater treatment plant effluents. *Environ Sci Technol*, 2017, 51: 10459–10467
- Zheng L, Hu Y, Su B, et al. The potential of wastewater treatment on carbon storage through ocean alkalinity enhancement. *Sci Adv*, 2025, 11: eads0313

- 16 Montserrat F, Renforth P, Hartmann J, et al. Olivine dissolution in seawater: implications for CO₂ sequestration through enhanced weathering in coastal environments. *Environ Sci Technol*, 2017, 51: 3960–3972
- 17 Fuhr M, Geilert S, Schmidt M, et al. Kinetics of olivine weathering in seawater: an experimental study. *Front Clim*, 2022, 4: 831587
- 18 Oelkers E H, Declercq J, Saldi G D, et al. Olivine dissolution rates: a critical review. *Chem Geol*, 2018, 500: 1–19
- 19 Chen L C. Study on the dissolution kinetics of olivine in seawater and its potential carbon sink enhancement in offshore waters (in Chinese). Master Thesis. Jinan: Shandong University, 2023 [陈立朝. 橄榄石在海水中溶解动力学及其近海增汇潜力研究. 硕士学位论文. 济南: 山东大学, 2023]
- 20 Yuan P, Liu D. Mineral-enhanced biological pump—A strategy based on mineral-microbe interactions for increasing carbon sink in water (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2022, 67: 924–932 [袁鹏, 刘冬. 矿物增效的生物泵: 基于矿物-微生物作用的水体CO₂增汇策略. 科学通报, 2022, 67: 924–932]
- 21 Pan Y, Li Y, Ma Q, et al. The role of Mg²⁺ in inhibiting CaCO₃ precipitation from seawater. *Mar Chem*, 2021, 237: 104036
- 22 Cen X, Duan H, Hu Z, et al. Multifaceted benefits of magnesium hydroxide dosing in sewer systems: impacts on downstream wastewater treatment processes. *Water Res*, 2023, 247: 120788
- 23 Kitidis V, Rackley S A, Burt W J, et al. Magnesium hydroxide addition reduces aqueous carbon dioxide in wastewater discharged to the ocean. *Commun Earth Environ*, 2024, 5: 354
- 24 Vandeginste V, Lim C, Ji Y. Exploratory review on environmental aspects of enhanced weathering as a carbon dioxide removal method. *Minerals*, 2024, 14: 75
- 25 Geerts L J J, Hylén A, Meysman F J R. Review and syntheses: ocean alkalinity enhancement and carbon dioxide removal through marine enhanced rock weathering using olivine. *Biogeosciences*, 2025, 22: 355–384
- 26 Beerling D J, Epihov D Z, Kantola I B, et al. Enhanced weathering in the US Corn Belt delivers carbon removal with agronomic benefits. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2024, 121: e2319436121
- 27 Romano P, Brusca L, Liotta M. Element mobility during basalt-water-CO₂ interaction: observations in natural systems vs. laboratory experiments and implication for carbon storage. *Geochem Trans*, 2024, 25: 4
- 28 Fakhraee M, Li Z J, Planavsky N, et al. A biogeochemical model of mineral-based ocean alkalinity enhancement: impacts on the biological pump and ocean carbon uptake. *Environ Res Lett*, 2023, 18: 044047
- 29 Yang B, Leonard J, Langdon C. Seawater alkalinity enhancement with magnesium hydroxide and its implication for carbon dioxide removal. *Mar Chem*, 2023, 253: 104251
- 30 Moras C A, Cyronak T, Bach L T, et al. Effects of grain size and seawater salinity on magnesium hydroxide dissolution and secondary calcium carbonate precipitation kinetics: implications for ocean alkalinity enhancement. *Biogeosciences*, 2024, 21: 3463–3475
- 31 Renforth P, Jenkins B G, Kruger T. Engineering challenges of ocean liming. *Energy*, 2013, 60: 442–452
- 32 Moras C A, Bach L T, Cyronak T, et al. Ocean alkalinity enhancement—avoiding runaway CaCO₃ precipitation during quick and hydrated lime dissolution. *Biogeosciences*, 2022, 19: 3537–3557
- 33 Li M, Chen Y, Doyle R, et al. Wastewater alkalinity enhancement for carbon emission reduction and marine CO₂ removal. *Environ Res Lett*, 2025, 20: 044041
- 34 Gyawali S, Janka E, Dinamarca C. Enhanced nitrification of high-ammonium reject water in lab-scale sequencing batch reactors (SBRs). *Water*, 2025, 17: 1344
- 35 Faskol A S, Racovițeanu G. Effect of DO, alkalinity and pH on nitrification using three different sunken materials types in biological aerated filter BAFs. *IOP Conf Ser-Earth Environ Sci*, 2021, 664: 012079
- 36 Castrillo M, Díez-Montero R, Esteban-García A L, et al. Mass transfer enhancement and improved nitrification in MABR through specific membrane configuration. *Water Res*, 2019, 152: 1–11
- 37 Li W, Shan X Y, Wang Z Y, et al. Effect of self-alkalization on nitrite accumulation in a high-rate denitrification system: performance, microflora and enzymatic activities. *Water Res*, 2016, 88: 758–765
- 38 McCullough K, Klaus S, Parsons M, et al. Advancing the understanding of mainstream shortcut nitrogen removal: resource efficiency, carbon redirection, and plant capacity. *Environ Sci-Water Res Technol*, 2022, 8: 2398–2410
- 39 Hu Z, Liu T, Wang Z, et al. Toward energy neutrality: novel wastewater treatment incorporating acidophilic ammonia oxidation. *Environ Sci Technol*, 2023, 57: 4522–4532
- 40 Nascimento A L, Souza A J, Andrade P A M, et al. Sewage sludge microbial structures and relations to their sources, treatments, and chemical attributes. *Front Microbiol*, 2018, 9: 1
- 41 Lazo D E, Dyer L G, Alorro R D. Silicate, phosphate and carbonate mineral dissolution behaviour in the presence of organic acids: a review. *Miner Eng*, 2017, 100: 115–12
- 42 Dong H L, Huang L Q, Zhao L D, et al. A critical review of mineral–microbe interaction and co-evolution: mechanisms and applications. *Natl Sci Rev*, 2022, 9: nwac128

- 43 Qin D N, Tan X T, Zhao X, et al. Biological neutralization of bauxite residue with fermented waste sludge and bio-acid, and the microbial ecological restoration. [Chem Eng J](#), 2023, 474: 145758
- 44 He C, Fucich D, Sosa A, et al. Deep metagenomic sequencing unveils novel SAR202 lineages and their vertical adaptation in the ocean. [Commun Biol](#), 2024, 7: 853
- 45 Saw J H W, Nunoura T, Hirai M, et al. Pangenomics analysis reveals diversification of enzyme families and niche specialization in globally abundant SAR202 bacteria. [mBio](#), 2020, 11: e02975–19
- 46 Meng Y, Du X, Jiao N. “Gray Carbon” in sewage treatment plants: a neglected carbon sink. [Ocean-Land-Atmos Res](#), 2024, 3: 0060
- 47 Cai R H, Jiao N Z. Microbial carbon pump shapes chemical signatures of refractory dissolved organic carbon in ocean water column. *Sci China Earth Sci*, 2024, 67: 2408–2410 [蔡阮鸿, 焦念志. 微生物碳泵对海洋惰性溶解有机碳化学性质的影响. *中国科学: 地球科学*, 2024, 54: 2443–2444]
- 48 Lv Z Q, Shan X T, Xiao X L, et al. Excessive greenhouse gas emissions from wastewater treatment plants by using the chemical oxygen demand standard (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2022, 65: 87–95 [吕宗青, 单晓雨, 肖喜林, 等. 遵从现行化学需氧量标准导致污水处理过程中产生过量温室气体排放. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52: 144–153]
- 49 Huang B R, Zhou Z, Chua H Q, et al. A review of ocean alkalinity enhancement technology and outlook of synergistic application pathways (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2025, 40: 68–81 [黄宝蓉, 周哲, 褚华强, 等. 海水碱度提升技术综述及协同实施路径展望. *地球科学进展*, 2025, 40: 68–81]
- 50 Meng Y, Jiao N. Revisiting wastewater pH standards: a policy lever for mitigating coastal acidification and enhancing blue carbon. [Innovation](#), 2025, 6: 101003
- 51 Mahutjane T C, Tchadjé L N, Sithole T N. The feasibility of utilizing sewage sludge as a source of aluminosilicate to synthesise geopolymer cement. [J Mater Res Tech](#), 2023, 25: 3314–3323
- 52 Ospanov K, Andraka D, Kuldeeva E, et al. Utilization of sewage sludge in the sustainable manufacturing of ceramic bricks. [Sustainability](#), 2025, 17: 6431
- 53 Rusănescu C O, Voicu G, Paraschiv G, et al. Recovery of sewage sludge in the cement industry. [Energies](#), 2022, 15: 2664
- 54 Zhu C, Hu C, Liu J, et al. Integrating bicarbonate-based microalgal production with alkaline sewage for ocean negative carbon emissions. [Trends Biotechnol](#), 2024, 42: 1592–1600

Summary for “利用污水处理厂驱动海洋碳汇：碱化增汇技术的机遇与挑战”

Utilizing wastewater treatment plants to enhance ocean carbon sequestration: opportunities and challenges of alkalinity enhancement technology

Xingyu Tong², Chen Hu¹, Yabing Meng^{1,3*} & Nianzhi Jiao^{1,2*}

¹ Carbon Neutral Innovation Research Center, Fujian Key Laboratory of Marine Carbon Sequestration, Xiamen University, Xiamen 361005, China

² College of Ocean and Earth Sciences, State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China

³ Sichuan Institute of Xiamen University, Chengdu 610213, China

* Corresponding authors, E-mail: mengyb@xmu.edu.cn; jiao@xmu.edu.cn

Under the pressing mandate of the global carbon neutrality strategy, the repurposing of municipal wastewater treatment plants (WWTPs) from traditional emission sources into pivotal nodes for carbon dioxide removal (CDR) represents a frontier in environmental science and engineering. This review provides a comprehensive synthesis of wastewater alkalinity enhancement (WAE), an emerging technology designed to utilize WWTPs as engines for driving atmospheric CO₂ into stable oceanic carbon sinks.

WAE fundamentally relies on the unique biogeochemical environment within WWTPs—characterized by high partial pressures of CO₂ ($p\text{CO}_2$) and relatively low pH generated by microbial respiration. These conditions create a thermodynamically favorable reactor for the rapid dissolution of alkaline materials, such as silicate minerals (e.g., olivine) or industrial hydroxides. The subsequent elevation of effluent total alkalinity, upon discharge into coastal zones, shifts the marine carbonate equilibrium, facilitating the conversion of dissolved CO₂ into stable bicarbonate (HCO₃⁻) and carbonate (CO₃²⁻) ions, thereby enhancing the ocean's capacity for long-term carbon storage.

A critical dimension of WAE implementation is its seamless integration with core biological treatment processes. This review systematically analyzes the coupling mechanisms between alkalinity enhancement and biological nitrogen removal, specifically focusing on nitrification–denitrification and anaerobic ammonium oxidation (anammox) pathways. Nitrification is an alkalinity-consuming process that often results in system acidification and process instability. We elucidate how WAE serves as an *in situ* “chemical buffer”, replenishing consumed alkalinity to maintain optimal pH conditions for sensitive functional microbes (e.g., nitrifiers and anammox bacteria). This synergy not only stabilizes treatment performance but also reduces the reliance on external chemical dosing, effectively harmonizing pollution control with carbon sequestration.

From an engineering perspective, we provide a comparative evaluation of two primary deployment strategies: upstream addition (UpAdd) and downstream addition (DnAdd). UpAdd, which involves dosing alkaline agents directly into biological reactors, favors “source reduction” by capturing biogenic CO₂ before it is vented to the atmosphere. Model-based analyses suggest that this approach yields higher net carbon removal efficiency. Conversely, DnAdd, which targets the final effluent, aims at “terminal sink enhancement” by maximizing alkalinity export to the ocean. While DnAdd offers greater operational flexibility and minimal interference with existing biological processes, it has a greater risk of inducing “runaway precipitation” of calcium carbonate in receiving waters, which could negate carbon sink benefits.

Moving beyond the inorganic carbon cycle, this review incorporates the novel concept of “gray carbon”—defined as the recalcitrant dissolved organic carbon (RDOC) in wastewater effluents. We discuss the potential of WAE to influence the microbial carbon pump (MCP) effect, thereby modulating the transformation of labile organic matter into inert “gray carbon” that persists in the ocean for millennia. This perspective expands WAE into a dual-pathway technology capable of enhancing both inorganic and organic marine carbon sinks.

Despite its promise, the large-scale deployment of WAE faces significant hurdles, including the management of secondary mineral precipitation, the potential ecological toxicity of trace metals released from mineral weathering, and the lack of robust monitoring, reporting, and verification (MRV) frameworks. However, the technology also offers substantial co-benefits, such as enhanced phosphorus removal, mitigation of coastal acidification, and the potential for resource recovery from mineral precipitates. Future research priorities must focus on large-scale pilot demonstrations, comprehensive life-cycle assessments (LCAs), and the development of standardized MRV protocols. Through interdisciplinary collaboration, WAE has the potential to develop into a safe, scalable, and cost-effective component of the global portfolio for ocean-based negative carbon emissions.

wastewater alkalinity enhancement, ocean negative carbons (ONCE), biological process regulation, gray carbon

doi: [10.1360/CSB-2025-5312](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5312)