



亮点

智能设计微生物特种兵: 工程*Vibrio natriegens*攻克复杂有机污染物协同治理难题

刘丹丹^{1*}, 金宜英^{2*}

1. 中国烟草总公司郑州烟草研究院, 郑州 450001

2. 清华大学环境学院, 北京 100084

* 联系人, E-mail: liudd@ztri.com.cn; jinyi@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2025-10-24; 接受日期: 2025-10-27; 网络版发表日期: 2025-12-11

工业化与城镇化的飞速发展在驱动经济社会进步的同时,也给生态环境带来了严峻挑战.来自石化、制药、农药、印染等行业的复杂有机污染物(complex organic pollutants, COPs),因其结构稳定、毒性强、难降解,已成为全球环境治理的难点^[1].传统物理化学方法,如吸附、氧化、膜分离等虽能部分去除污染物,但普遍存在成本高、能耗大、易产生二次污染等问题^[2].传统生物修复技术虽环境友好,但在应对成分复杂、条件恶劣的工业废水时,常因微生物降解能力有限而效率低下^[3].因此,发展能够高效、稳定、并能协同降解多种COPs的新型生物技术,已成为环境科学与工程领域亟待攻克的关键科学难题与技术瓶颈.

合成生物学作为融合工程学与分子生物学的新兴交叉学科,为环境治理提供了全新路径.通过理性设计、基因编辑与代谢重构,可构建具有高效降解功能的“细胞工厂”^[4].然而,现有研究多聚焦于单一污染物或简单混合体系,难以应对真实环境中多组分、高浓度、高盐等复杂条件,且多基因簇整合、代谢平衡、底盘耐受性等问题仍是技术瓶颈^[5,6].

近期*Nature*杂志发表了来自中国农业科学院深圳农业基因组研究所戴俊彪团队的最新研究成果“Bioremediation of complex organic pollutants by engineered

Vibrio natriegens”^[7].这项研究针对上述挑战,创新性地选择并工程化改造了目前已知生长最快的异养菌之一——海洋细菌*Vibrio natriegens*,并开发了一种高效的多基因簇迭代整合方法(iterative natural transformation based on Vmax with amplified *tfoX* effect, INTIMATE).通过该技术,研究团队成功构建了能够同时高效协同降解五种代表性工业有机污染物(联苯、苯酚、萘、二苯并呋喃和甲苯)的工程菌株VCOD-15.该菌株在模拟高盐工业废水和污染土壤等实际应用场景中展现出卓越的修复潜能.

该研究选择*Vibrio natriegens*(Vmax)作为工程底盘,该菌株具备极短倍增时间(<10 min)与天然高盐耐受性,契合高盐工业废水处理对快速生物量积累与环境适应性的双重要求.然而,其作为非模式微生物,长期缺乏高效遗传操作工具,这制约了其合成生物学开发.为突破这一瓶颈,研究团队通过在Vmax染色体中整合并过表达来自霍乱弧菌的*tfoX*基因,显著提升其外源DNA摄取与整合能力,构建出强化底盘VCOD-2.在此基础上,开发出INTIMATE技术体系,实现五大降解基因簇(总计约43 kb)在预设基因组中性位点的迭代、精准整合.与传统质粒表达或CRISPR编辑相比,该技术不仅避免了质粒丢失与表达不稳定性,还大幅

引用格式: 刘丹丹, 金宜英. 智能设计微生物特种兵: 工程*Vibrio natriegens*攻克复杂有机污染物协同治理难题. 中国科学: 生命科学, 2025, 55: 2650–2652
Liu D D, Jin Y Y. Intelligent design of microbial special forces: engineered *Vibrio natriegens* overcomes the challenge of synergistic remediation of complex organic pollutants (in Chinese). *Sci Sin Vitae*, 2025, 55: 2650–2652, doi: 10.1360/SSV-2025-0343

降低对抗生素依赖, 实现了多位点、大片段基因簇的近似无痕整合, 在编辑通量与系统性上显著优于现有方法. 性能验证表明, 工程菌VCOD-15在48 h内对五种典型污染物展现出广谱降解能力, 联苯去除率达100%, 其他污染物去除率在60.7%~89.9%之间, 中间产物检测证实了代谢通路有效运行. 在模拟高盐工业废水(盐度达102.5 g/L)及活性污泥系统中, VCOD-15的降解效率与环境适应性均优于常用天然降解菌(如*P. putida* B6-2等). 在非灭菌真实废水与污染土壤中, 该菌株仍能维持代谢活性与生态竞争力, 进一步凸显其在实际场景中的应用潜力.

综上所述, Su等人^[7]通过精巧的基因组编辑策略与系统性的代谢工程改造, 成功揭示并验证了一条不同于传统单一菌株或混合菌群修复复杂有机污染物的新路径, 即利用具有极端生长优势的非模式微生物底盘*V. natrieigens*, 通过INTIMATE技术高效迭代整合多个异源复杂降解基因簇, 构建单一工程菌株VCOD-15, 从而实现对多种结构与性质各异的代表性工业有机污染物的高效协同降解与完全矿化, 为复杂有机污染物的生物治理提供了一种极具潜力的活体解决方案, 并显著拓展了合成生物学在环境修复领域的应用边界.

与传统生物修复技术相比, 该研究不再依赖自然界中筛选或驯化的微生物, 而是通过理性设计构建具有多靶点降解能力的工程菌, 突破了天然菌株降解谱窄、效率低、适应性差的应用局限. 同时, 与现有合成生物学策略相比, 该研究实现了从单一污染物-单一菌株到多污染物-单菌协同的范式跨越. 实现了五个大型外源基因簇在基因组中性位点的稳定整合, 避免了

质粒丢失与抗生素依赖, 在编辑规模与系统稳定性方面显著优于现有方法. 最后, 在底盘选择与系统整合层面, 该研究摒弃了传统模式微生物(如大肠杆菌、酵母), 转而开发具有高生长速率与高盐耐受性的*V. natrieigens*作为底盘, 更契合工业废水的真实环境. 其构建的工程菌VCOD-15不仅在降解能力上覆盖多种代表性污染物, 更在模拟废水与污染土壤中展现出优于天然降解菌的适应性与持续性, 体现了从实验室菌株到环境适用型菌株的关键进步. 此外, INTIMATE方法还实现了编辑范式的创新, 为复杂微生物系统的构建提供了可扩展、高效率的编辑平台, 解决了大片段多基因簇迭代整合的行业难题.

戴俊彪研究团队长期致力于合成生物学前沿技术开发、基因组编辑工具创新及其在微生物代谢工程、生物催化与环境生物技术等领域的应用研究. 该团队依托中国农业科学院深圳农业基因组研究所在基因组学、合成生物学及农业环境交叉领域的雄厚实力, 聚焦于利用尖端的生物技术手段解决国家在农业可持续发展和生态环境保护方面的重大需求. 研究团队勇于挑战非模式微生物的遗传改造与应用瓶颈, 注重原创性核心技术的攻关与突破, 并通过多学科交叉融合, 积极推动基础研究成果向解决实际问题的应用技术转化. 这项在*Nature*杂志上发表的重要工作, 是该团队在合成生物学赋能环境治理领域取得的又一项标志性进展, 充分展示了其在该领域的深厚学术积累、卓越创新能力和国际引领潜力, 为我国乃至全球的环境污染治理和生态文明建设事业贡献了宝贵的科学智慧和技术支撑.

参考文献

- 1 Duarte C M, Agusti S, Barbier E, et al. Author correction: rebuilding marine life. *Nature*, 2021, 593: E1–E2
- 2 Johnson A C, Jin X, Nakada N, et al. Learning from the past and considering the future of chemicals in the environment. *Science*, 2020, 367: 384–387
- 3 Dvořák P, Nikel P I, Damborský J, et al. Bioremediation 3.0: engineering pollutant-removing bacteria in the times of systemic biology. *Biotechnol Adv*, 2017, 35: 845–866
- 4 Davy A M, Kildegaard H F, Andersen M R. Cell factory engineering. *Cell Syst*, 2017, 4: 262–275
- 5 Jones E M, Marken J P, Silver P A. Synthetic microbiology in sustainability applications. *Nat Rev Microbiol*, 2024, 22: 345–359
- 6 Weinstock M T, Hesek E D, Wilson C M, et al. *Vibrio natrieigens* as a fast-growing host for molecular biology. *Nat Methods*, 2016, 13: 849–851
- 7 Su C, Cui H, Wang W, et al. Bioremediation of complex organic pollutants by engineered *Vibrio natrieigens*. *Nature*, 2025, 642: 1024–1033

Intelligent design of microbial special forces: engineered *Vibrio natriegens* overcomes the challenge of synergistic remediation of complex organic pollutants

LIU DanDan^{1*} & JIN YiYing^{2*}

¹ China Tobacco Standardization Research Center, Zhengzhou Tobacco Research Institute of CNTC, Zhengzhou 450001, China

² School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

* Corresponding authors, E-mail: liudd@ztri.com.cn; jinyi@mail.tsinghua.edu.cn

doi: [10.1360/SSV-2025-0343](https://doi.org/10.1360/SSV-2025-0343)