

引领微生物再吟物华天宝，重塑天青海蓝 ——“难降解有机物的微生物降解与转化”专刊序言

谢尚县，张晓昱

华中科技大学生命科学与技术学院，环境资源与微生物技术研究所，湖北 武汉 430074

环境难降解有机物通常是指在自然环境中难以被生物分解及利用的有机化合物。大部分难降解有机物含有苯环、杂环、长链烷烃、芳香烃等结构，具有高稳定性、低亲水性、难降解性等特点。这类难降解的有机物主要包括植物光合作用产生的生物质如木质纤维素，及人工合成的异生物质如难降解有机污染物等。

自然界中植物通过光合作用将无机碳固定为有机碳，大部分以木质纤维素超分子形式存在于植物细胞壁中，占据了陆地上约 50% 的碳资源，是陆地碳循环主要的承载者。木质纤维素主要由木质素、纤维素和半纤维素组成，其中木质素以苯丙烷为基本结构单元，通过多种联键尤其是难断裂的 C—C 键、醚键等相连接形成的不定型芳香族高分子多聚体刚性结构，且与半纤维素以共价键紧密结合包裹着纤维素。木质素的刚性结构虽然增加了植物细胞和组织的机械强度，提高植物抵抗外界不良环境的能力，但同时也因木质素结构屏障抗性，不仅成为自然生态系统中地球生物化学循环尤其是碳循环的限速步骤，也是当前利用廉价的木质纤维素生物炼制获取能源、材料及大宗化学品的技术瓶

颈。与之进化而来的自然界微生物只能缓慢分解这类难降解的有机碳为无机碳并释放到环境中，维系着生态系统中的碳循环与能量流动。木质纤维素中纤维素与半纤维素组分虽然能够被绝大多数微生物分解利用但其转化效率受限于木质素结构屏障。有一类微生物如白腐真菌及部分细菌能够解聚与降解植物细胞壁中的木质素解除结构屏障，推动碳素循环与能量流动，由此引起科学家们的持续关注。早期对木质纤维素的研究主要集中在不同生物质木质纤维素高效降解菌种的筛选、鉴定分类以及微生物降解生理生化特性方面。随着分子生物学以及功能组学等技术的发展，木质纤维素降解微生物的分子生物学、纤维素降解代谢调控途径解析、纤维素酶的定向进化、不同自然生态系统纤维素降解微生物组学等方面都取得了突破性进展。由于木质素高分子的复杂性及异质性，相对纤维素与半纤维素，其相关研究要滞后许多。与纤维素降解研究类似，木质素生物解聚早期主要集中在菌株筛选及其生理生化特性研究，并由此发现了多种白腐菌能够有效解聚木质素。1983 年在白腐菌 *Phanerochaete chrysosporium* 中首次分离获得了能

够氧化木质素高分子的木质素降解酶,由此开始了木质素降解酶的研究历程。后续的研究陆续发现了木质素降解酶系统及其辅助酶系统以及如何裂解木质素难降解的价键如 5—5' 和 β -5 键等。迄今为止,对于微生物解聚与降解木质素的研究已经从生物多样性、木质素降解酶系、木质素降解机制、木质素高分子结构表征等研究发展到木质素降解酶的定向进化、降解木质素的组学、功能基因编辑及调控等相关研究,为解除碳循环限速步骤,提高生物质能源、材料及大宗化学品生物转化提供了理论技术支持。

我国每年农林木质纤维素废弃物的总量高达 9 亿吨,常规利用方式为直接焚烧供能或作为造纸等原料,其综合利率较低,且易造成资源浪费与环境污染。由于不可再生资源如石油的日益枯竭及化石燃料带来的二氧化碳排放量剧增及白色污染加剧,深入研究木质纤维素尤其是木质素的解聚及多元化转化机制,挖掘绿色、可持续、低碳循环的生物炼制技术是支撑我国科学发展与经济转型、环境保护和治理以及社会可持续发展的重大战略性需求。基于此,本专刊特别邀请了长期从事木质纤维素降解与转化领域的科学家,就不同生物系统的木质纤维素降解与转化研究前沿、热点科学问题、最新研究思路、研究手段及应用潜力进行综述与展望,如白蚁借助肠道细菌、古细菌、真菌等肠道微生物和原生动物协同降解食物中的木质纤维素,白蚁自身及其肠道原虫、细菌和真菌产生的纤维素酶、木聚糖酶和漆酶等酶的研究概况、烟草废弃物中难降解物质木质素、尼古丁的生物降解研究进展。相关研究为木质纤维素的能源转化和生物仿生设计提供了重要的指导与借鉴价值。尤其是对于最难降解及转化的木质素高分子,科学家们结合当前先进的合成生物学和代谢工程等技术,提出了木质素高效解

聚与多元芳香族化合物“漏斗式”转化的研究策略,为仅次于纤维素储量的木质素高分子多元高值转化提供了新思路。同时本刊科学家们也利用组学等先进手段深入解析了生物质降解与转化过程中微生物群落的演替规律。发现并探究了新型甘露聚糖酶和乙酰酯酶形成的双功能酶的功能,解析了催化域之间高效的协同效应,以及新型甘露聚糖结合模块对双功能酶水解的促进作用。相关研究为木质纤维素生物降解与转化的深入研究及技术应用提供了支撑。

伴随着人类工业化发展,也随之产生了各种人工合成的难降解有机化合物,它们被广泛应用于医药、纺织、食品、农业、化工等行业中。这类人工合成难降解有机化合物大多具有苯环、稠环芳烃、杂环等结构特征,通常具有高毒性、低水溶性,能长时间在环境中存留,并通过生物累积和食物链传递,从而对人体健康与生态环境造成巨大危害。1962 年 Rachel Carson 在其代表作《寂静的春天》中描述了过度使用化学药品和肥料给生态环境所带来的巨大灾难后,引起了人们对人工难降解污染物危害的高度重视。当人工合成的异生物质进入环境空间后,由于环境的压力与自然进化的共同作用,自然界的微生物也演化出了降解这类异生物质的一系列代谢途径,对种类繁多、结构各异的人工合成难降解有机污染物具有一定的适应性与降解能力。科学家从最初的筛选具有一定降解能力的菌株,关键酶的挖掘改造,到基于合成微生物组设计理念的人工复合功能菌群构建,几十年来的诸多研究突破和理念创新奠定了难降解有机污染物生物降解的理论基础。而各国政府于 2001 年最终达成共识并签署了《关于持久性有机污染物(POPs)斯德哥尔摩公约》加速了科学家们对难降解有机污染物的深度研究。比如 Gottfried 等于 2019 年在《自然》

杂志中报道了塑料降解细菌 *Ideonella sakaiensis*201-F6 中高效降解塑料 PET 的关键酶 MHETase 的蛋白结构。2020 年法国图卢兹大学团队在《自然》杂志中报道了他们经过蛋白工程改造后的 PET 水解酶可在 10 h 内将 90% 的 PET 水解成单体。这些研究为微生物对人工难降解污染物的治理甚至资源化利用奠定了坚实的基础。鉴于近年来, 科学家在难降解污染物的微生物处理中不断在新菌株、新功能、新工艺、新机理、新理念等方面的突破, 本特刊特地邀请了国内一批长期从事该领域研究的微生物学家, 就人工难降解污染物的最新研究成果进行了报道与总结。比如本刊中报道了我国科学家最新发现的一株在农用聚乙烯塑料地膜的降解中表现出了良好的降解优势与降解特性的菌株。同时本特刊也回顾了近几年来微生物在降解持久性有机污染物、抗生素、微塑料等方面的发展现状, 总结了微生物针对不

同污染物的代谢途径、代谢机理、趋化及修复研究进展, 以及实际应用中面临的挑战与发展方向, 为微生物的资源化应用于有机污染物降解提供了重要的理论指导。

微生物对难降解有机物的高效降解以及资源化利用已成为目前世界各国高度关注的热点, 充分利用自然资源实现其经济最大化和环境可持续发展已成为经济社会发展的重要战略部署。我们选取了微生物与持久性有机污染物、共生微生物与木质纤维素、木质素的微生物解聚与高值转化等方面的 17 篇文章与大家分享, 深度挖掘微生物资源、探索微生物作用机制, 以期“再吟物华天宝, 重塑天青海蓝”。相信该主题刊的出版有助于为环境微生物学以及生物质资源化利用发展提供新的思路, 推动该领域的深入研究, 扩大我国微生物学在环境与资源降解方面的影响力。

(本文责编: 张晓丽)