

微生物群落功能提升的“自上而下”与“自下而上”策略研究综述

樊艳茹 陈阔 刘和铭 张灿 吕鹏翼

河北科技大学环境科学与工程学院, 河北石家庄, 050018;

摘要: 微生物群落在环境治理、农业生产、生物能源等领域具有重要的应用价值。提升微生物群落的功能性已成为当前微生物工程研究的核心课题之一。本文系统梳理了当前主流的两种策略——“自下而上”和“自上而下”，探讨其在微生物群落构建与优化中的原理、实施路径与适用场景。通过对比分析两种策略的优势与局限性，提出未来可行的策略融合与应用方向，为高效、可控的微生物群落构建提供理论支撑与实践指导。

关键词: 微生物群落；自上而下策略；自下而上策略；合成生态学；定向进化；功能优化

DOI: 10.69979/3041-0673.25.11.015

引言

微生物群落广泛存在于自然界和人工系统中，参与有机物降解、元素循环、污染物转化等多种关键生态过程。在环境工程、生物冶金、废水处理以及工业发酵等应用场景中，构建具备特定功能的微生物群落成为提升系统效率和稳定性的有效手段。随着生物技术与生态学的发展，微生物群落的功能优化成为当前研究的热点之一。

微生物群落的优化不仅依赖于个体微生物的功能调控，也离不开群落间相互作用的合理调节。当前，提升微生物群落功能的研究方法主要集中在“自上而下”与“自下而上”两大策略中。本文将对这两种策略的原理、实施路径、优势和局限性进行系统分析，并探讨它们在微生物群落功能优化中的应用前景。

菌群群落机能的提升可通过两种宏观策略实现，分别是“自下而上”以及“自上而下”两种策略。在“自下而上”的策略中，微生物群落可借助一组工程物种构建，其中每个物种均经过优化以执行特定活动，从而促进群落整体功能的发挥。这种策略的核心思想是通过对单个微生物物种进行精准的基因编辑或优化，使其能够高效地完成特定任务，例如分解复杂有机物、合成关键化学物质等。然而，此策略的实施依赖于对微生物间相互作用及其对群落功能贡献机制的深入理解。微生物在自然环境中的相互作用极其复杂，包括共生、竞争、捕食等多种关系，这些关系对群落功能的实现至关重要。因此，要成功地应用“自下而上”的策略，需要深入探讨这些相互作用机制，以及每个微生物物种在群落中的

具体角色和贡献。然而，目前我们对这些机制的理解尚不完全，这使得该策略在实际应用中面临一定的挑战。相对地，在“自上而下”的策略中，通过人工选择和定向进化，可以改善群落功能。这种策略不依赖于对单个微生物物种的详细了解，而是将整个微生物群落作为一个整体来进行优化。通过设定特定的选择条件，例如改变环境条件或提供特定的营养物质，科学家们可以促使微生物群落朝着更高效的功能方向发展。在这一过程中，适应能力强的微生物物种会逐渐占据优势，而不适应的物种则会被淘汰。经过多轮的筛选和进化，最终可以得到一个功能更为优越的微生物群落。值得注意的是，该方法无需对群落功能产生的机制有深刻理解，但通过比较进化的群落与原始群落，可以揭示群落功能的进化机制。这种方法为研究微生物群落的复杂性和功能性提供了新的视角。总的来说，这两种策略各有优劣。“自下而上”的策略更注重对微生物个体的精确控制，但需要深入理解微生物间的相互作用；“自上而下”的策略则更注重群落整体的优化，但无法提供对单个物种功能的详细解释。在实际应用中，可以根据具体的研究目标和条件选择适合的策略，或者将两者结合起来，以实现更全面和深入的菌群群落机能提升^[1-7]。

1 微生物群落功能提升策略概述

微生物群落功能提升的目标通常是增强群落在特定环境或条件下的代谢能力、物质转化能力或生态功能。为了实现这些目标，研究人员提出了多种策略，其中“自上而下”和“自下而上”是两种主流的方式。每种

策略基于不同的理论框架和技术方法，具有各自的特点和应用范围。

1.1 自下而上策略

“自下而上”策略来源于合成生物学与系统生物学理论，强调通过对单个微生物的设计与优化，逐步构建具备特定功能的微生物群落。这一策略的核心是在微生物个体层面进行优化，如基因编辑、代谢途径重构等，然后通过精确的组合与协同作用，构建出能够实现目标功能的群落。

1.1.1 自下而上策略的实施步骤

在微生物功能优化的过程中，首先需要明确并分解功能目标。通过深入理解微生物代谢过程，能够清晰地确定所需实现的功能，并将其分解为更为细化的子目标，从而为后续的工程设计奠定基础；其次，微生物的选择与工程改造至关重要。根据设定的目标功能，选取适宜的微生物种类，并利用先进的基因编辑技术，对其代谢路径进行优化，以提高其效率和特定功能的表达能力；随后，通过合理的微生物组合与群落组建，可以进一步提升系统的稳定性与功能性。通过精心搭配不同物种，利用它们的互补代谢能力和相互作用，构建一个稳定、高效的微生物群落，以达到预期的功能效果；最后，生态位的调控与优化是确保微生物群落长期稳定运行的关键。通过调节培养基条件、环境因子等，可以优化微生物群落的生态位分配，提升群落成员之间的协同效应，确保群落能够在动态环境下持续发挥作用。

1.1.2 优势与挑战

该策略的优势在于其较高的可控性，能够精确设计微生物的功能和代谢路径，尤其适用于需要精细调控的场景，如特定代谢产物的生产或污染物的去除。然而，这种方法也面临一定的挑战。首先，微生物之间的相互作用极为复杂，且难以预测，可能导致系统的不可预见性。其次，微生物群落的生态适应性较差，可能无法在动态变化的环境中稳定生长与发挥作用，从而影响其长期稳定性和有效性。

1.2 自上而下策略

“自上而下”策略来源于演化生态学的理论框架，强调通过自然选择的方式对整个群落进行优化。该策略通过设定特定的环境条件或选择压力，促使群落内的微生物在自然演化过程中逐步表现出所需的功能。

1.2.1 自上而下策略的实施步骤

在群落构建的过程中，首先需要选择初始的微生物群落。通常可以直接从环境样本中获取，或通过人工混合不同微生物群体，以构建一个多样化的初始群落。这为后续的进化与选择提供了基础；接下来，选择压力的设置至关重要。通过为群落施加特定的选择压力，如改变营养成分、氧气浓度、温度等环境因素，可以促使微生物群落在适应这些条件的过程中进行筛选，从而强化具备目标功能的微生物种类；在演化与富集阶段，通过连续传代和培养，能够筛选出那些在特定条件下表现出目标功能的微生物，并逐步富集这些优良种群，使其在群落中占据主导地位；最后，功能评估与筛选是确保群落优化的关键步骤。定期对群落的功能表现进行评估，并通过严格的筛选过程，选出最优的群体，以确保群落能够高效且稳定地实现预期目标。

1.2.2 优势与挑战

该方法的优势在于操作简便，特别适合复杂自然环境中的微生物群落。通过模拟自然选择的过程，不需要对群落的具体组成有深入了解，便能实现群落的优化；然而，这一方法也面临一些挑战。首先，功能提升的过程缺乏可控性，且其结果往往不可预测，可能导致预期目标无法顺利达成。其次，群落中哪些物种主导某一特定功能往往难以明确，这使得在优化和控制群落功能时，存在较大的不确定性。

2 策略对比与选择

通过对“自下而上”与“自上而下”两种策略的分析，我们可以发现，它们各具优势与局限。选择哪种策略应根据具体的研究目标与实际需求来决定。

自下而上策略与自上而下策略在理论基础、控制粒度、优势、局限和适用场景上有显著的差异。自下而上策略依托合成生物学和系统生物学，注重微生物个体和基因层面的精细控制，其优势在于高精度和可控性，能够精确设计和优化功能。然而，这种方法的局限性在于微生物之间的相互作用复杂，且生态适应性较差，通常适用于实验室控制系统和高值产品合成等精细化应用。相比之下，自上而下策略基于演化生态学和环境微生物学，侧重于群落整体层面的控制，能够模拟自然选择过程，操作简便且适应复杂环境，广泛应用于污水处理等实际工程场景。然而，它的可控性较低，且群落中哪些物种主导特定功能的机制不够明确，限制了其在某些精

确要求下的应用效果。

3 策略融合与未来发展

随着微生物学、合成生物学和生态学的进步，“自上而下”与“自下而上”策略的融合逐渐成为研究热点。未来，研究者可以在初期利用“自下而上”设计合适的微生物群落，并结合“自上而下”的演化筛选进行多代优化，从而获得更加稳定和高效的微生物群落。

3.1 融合策略的应用前景

多组学集成：结合宏基因组学、转录组学、代谢组学等技术，深入理解微生物间的相互作用和功能表现，为群落优化提供更精确的依据。

人工智能与计算模型：通过机器学习与计算模拟技术，优化微生物群落的设计与演化路径，提高微生物群落功能优化的效率与可控性。

跨学科合作：结合生物学、化学、工程学等多学科的知识，推动微生物群落在实际工程应用中的落地与发展。

4 结论

微生物群落功能提升是一个复杂且充满挑战的过程，涉及到微生物个体、群落间相互作用以及环境因子的综合调控。本文回顾了“自下而上”与“自上而下”两种主要策略，并对其优缺点进行了详细对比。在实际应用中，应根据具体需求选择或结合这两种策略，推动微生物群落的功能优化。未来，随着新技术的不断发展，微生物群落的功能提升将会更加精准、可控，并广泛应用于环境治理、工业生产等各个领域。

参考文献

- [1] ZIEGLER M, SENECA F O, YUM L K, et al. Bacterial community dynamics are linked to patterns of coral heat tolerance[J]. *Nat Commun*, 2017, 8: 14213.
- [2] THOMAS J L, ROWLAND-CHANDLER J, SHOU W. Artificial selection of microbial communities: what have we learnt and how can we improve?[J]. *Curr Opin Microbiol*, 2024, 77: 102400.
- [3] LIU X, SALLES J F. Drivers and consequences of microbial community coalescence [J]. *ISME J*, 2024, 18(1).
- [4] JING J, GARBEVA P, RAAIJMAKERS J M, et al. Strategies for tailoring functional microbial synthetic communities [J]. *ISME J*, 2024, 18(1).
- [5] PENG X, WANG S, WANG M, et al. Metabolic interdependencies in thermophilic communities are revealed using co-occurrence and complementarity networks[J]. *Nat Commun*, 2024, 15(1): 8166.
- [6] HE Y, YUN H, PENG L, et al. Deciphering the potential role of quorum quenching in efficient aerobic denitrification driven by a synthetic microbial community[J]. *Water Res*, 2024, 251: 121162.
- [7] HE Y, YUN H, PENG L, et al. Synthetic microbial community maintains the functional stability of aerobic denitrification under environmental disturbances: Insight into the mechanism of interspecific division of labor[J]. *Water Res*, 2025, 277: 123270.