

Integrative analysis of the effects of chemical nitrogen fertilizer application on bacterial community diversity in farmland soil in China

Qian Sun Lihua Guo

Agricultural and Rural Affairs Bureau of Ningyang County, Shandong Province, Tai'an, Shandong, 271000, China

Abstract

Soil bacterial community diversity serves as a critical indicator for maintaining soil ecosystem health and functionality, significantly influencing nutrient cycling, pollutant degradation, and crop health. While excessive application of chemical nitrogen fertilizers has become one of the primary sources of agricultural pollution in China, its impact on soil bacterial diversity remains poorly understood. This study employed an integrated analysis approach to systematically evaluate the effects of chemical nitrogen fertilizer application on soil bacterial diversity in Chinese farmland ecosystems. By synthesizing data from 60 studies encompassing 403 datasets, we conducted comprehensive analyses of key diversity metrics including OTU (operational taxonomic unit) richness, Shannon index, Chao's index, and Simpson index.

Keywords

chemical nitrogen fertilizer; farmland; bacterial diversity; Meta-analysis

化学氮肥施用对中国农田土壤细菌群落多样性影响的整合分析

孙倩 郭丽华

山东省宁阳县农业农村局, 中国·山东 泰安 271400

摘要

土壤细菌群落多样性是维持土壤生态系统健康和功能的关键指标, 对土壤养分循环、污染物降解、作物健康等具有重要影响。目前化学氮肥的过量施用已经成为中国农业污染的主要来源之一, 但其对农田土壤细菌群落多样性的影响尚缺乏系统认识。本研究利用整合分析的方法对中国农田生态系统田间观测资料进行数据集成与分析, 系统评估了化学氮肥施用对中国农田土壤细菌群落多样性的影响。研究共纳入60篇文献的403组数据, 对OTU(物种丰富度)、Shannon、Chao1和Simpson指数等细菌群落多样性指标进行了系统性解析。

关键词

化学氮肥; 农田; 细菌多样性; Meta分析

1 引言

现代农业体系中, 氮素营养调控是作物高产的重要保障措施, 但其不合理施用导致的土壤微生物失衡越来越多的引起学界关注。这种高强度人为干预不仅改变着土壤理化性质, 更深刻改变着微生物群落的演替轨迹。深入探索化学氮肥施用对中国农田土壤细菌群落多样性的影响, 既是修复退化土壤生态的关键切入点, 也是构建环境友好型施肥体系的重要科学依据。

2 研究背景与意义

2.1 氮素输入对土壤微环境的扰动效应

统计数据显示, 中国单位面积氮肥施用量比世界平均水平高出 40% 以上, 过量氮素在土壤中的迁移和转化导致了一系列环境影响。研究表明, 长期施用氮肥对土壤微生物群落结构和功能的影响较大, 且这些影响具有地理特异性。在黑土和风沙土中, 风沙土施用氮肥对行间微生物的总体影响大于黑土, 且施肥量越大, 影响越大。

2.2 国内外研究进展

保持稳定的土壤微生物群落结构对于保持土壤生产潜力和整体土壤健康至关重要。各种氮添加策略会引起土壤理化性质的变化, 这些变化与微生物群落结构和部分微生物丰度的变化相关, 从而显示出碳和氮利用效率的差异。形成合

【作者简介】孙倩(1986-), 女, 中国山东泰安人, 本科, 助理农艺师, 从事农学研究。

适的微生物群落结构可以提高氮肥利用率,提高产量,同时减少氮肥施肥。然而,长期过量和不合理地施用氮肥会破坏农业土壤中的微生物群落结构,阻碍土壤生态系统的发展。国内外研究表明,过量氮肥施用可显著降低农田土壤细菌多样性。研究表明,单施氮肥显著降低土壤微生物的多样性并改变其群落结构,多样性下降与氮肥导致的土壤酸化和有机质改变密切相关。氮肥过量施用不仅降低了细菌多样性,还显著改变了细菌群落的组成。研究表明,施氮肥会增加富营养型细菌(如变形菌门和拟杆菌门)的相对丰度,降低贫营养型细菌的丰度。长期施用氮肥对土壤细菌多样性的影响更为显著。

2.3 研究目标、内容及技术路线

本研究旨在通过整合分析化学氮肥施用对中国农田土壤细菌群落多样性影响的研究成果,揭示中国农田土壤细菌群落多样性对化学氮肥施用的响应强度,明确施氮的合理方式和生态风险。采用 Meta 分析方法,定量分析化学氮肥施用对中国农田土壤细菌群落 α 多样性(OTU 丰富度、Shannon、Chao1 和 Simpson 指数)的总体影响。探讨化学氮肥施用下,不同环境因素(如土壤 pH、降雨量、氮肥类型等)对中国农田土壤细菌群落 α 多样性的影响。

3 材料与方法

3.1 数据来源

本研究通过整合中英文文献资源(包括 Web of Science、知网),系统检索相关农田生态系统研究文献。文献检索关键词为“(氮肥 OR 化学氮肥 OR Nitrogen fertilizer) AND (土壤微生物多样性 OR 细菌群落 OR soil microbial diversity)”,同时限定研究区域为中国农田。

3.2 数据分析

本研究通过对相关文献进行数据的筛选、收集,基于 MetaWin 2.1 分析平台构建综合数据库,利用 Graphpad prism 进行数据可视化,以评估化学氮肥施用对中国农田土壤微生物群落多样性的影响。

4 结果与分析

4.1 化学氮肥施用对中国农田土壤细菌群落多样性的影响

研究选取了土壤细菌群落 OTU 丰富度和土壤细菌群落 3 个常用 α 多样性指标(Shannon、Chao1 和 Simpson),共纳入 403 个研究样本。Meta 分析结果显示,土壤细菌 OTU 在化学氮肥施用下的平均效应值为(-0.12, 95% CI: -0.31~0.06),呈现负效应,但变化不显著,这表明化学氮肥施用具有降低中国农田土壤细菌群落 OTU 丰富度的趋势。化学氮肥施用下,土壤细菌 Shannon 指数的平均效应值为(0.002, 95% CI: -0.01~0.01),呈正效应,但其变化不显著;土壤细菌 Chao1 指数和 Simpson 指数的平均效应值分别为(0.04, 95% CI: 0.02~0.07)和(0.03, 95% CI: 0.003~0.07),两者的 95% CI 均大于 0,这表明化学氮肥施用可显著增加

中国农田土壤 Chao1 和 Simpson 指数^[1]。

4.2 不同土壤 pH 条件下化学氮肥施用对中国农田细菌群落多样性的影响

化学氮肥施用下,中国农田细菌群落 OTU 丰富度在酸性土壤中呈正效应(0.03, 95% CI: -0.48~0.48),在碱性土壤中呈负效应(-0.02, 95% CI: -0.34~0.31),其效应均不显著,且不同 pH 组间差异也不显著;细菌 Chao1 指数在酸性土壤(0.03, 95% CI: -0.01~0.08)和碱性土壤(0.02, 95% CI: -0.02~0.06)中均呈正效应,效应均不显著,但不同 pH 组间差异显著;Shannon 指数在酸性土壤中呈负效应(-0.01, 95% CI: -0.03~0.005),在碱性土壤中也呈现负效应(-0.001, 95% CI: -0.01~0.01),二者均不显著,且不同 pH 组间差异不显著;Simpson 指数在酸性土壤(0.02, 95% CI: -0.06~0.09)和碱性土壤(0.01, 95% CI: -0.03~0.04)中均呈正效应且不显著,且不同 pH 组间差异不显著。从四个指标来看,其在酸性土壤和碱性土壤的效应值差异不大。中国农田土壤细菌群落 Chao1 指数在酸性土壤中的效应值略高于碱性土壤,但差别很小;Shannon 指数几乎没有变化;OTU 丰富度的置信区间最宽,说明数据变异最大。以上数据表明,化学氮肥施用对土壤细菌群落多样性的影响与土壤 pH 的相关性并不显著。此外,由于样本量不足,特别是 OTU 和 Simpson 指数,导致结果不稳定,置信区间很宽。未来研究需要增加样本量,特别是酸性条件下的数据^[2]。

4.3 不同降雨量条件下化学氮肥施用对中国农田细菌群落多样性的影响

在低降雨量地区,化学氮肥施用对中国农田土壤 OTU 丰富度的影响呈正向,但未达到显著性(0.003, 95% CI: -0.21~0.31);在中降雨量地区,化学氮肥施用对中国农田土壤细菌 OTU 丰富度的影响呈负向,但未达到显著性(-0.008, 95% CI: -0.46~0.44);在高降雨量地区,化学氮肥施用对中国农田细菌土壤 OTU 丰富度的影响同样呈负向,但未达到显著性(-0.25, 95% CI: -0.74~0.02)。不同降雨量组间差异不显著。在低降雨量地区,化学氮肥施用对中国农田土壤细菌 Shannon 指数的影响呈负向,但未达到显著性(-0.005, 95% CI: -0.02~0.01);在中降雨量地区,化学氮肥施用对中国农田土壤细菌 Shannon 指数的影响为 0.00(95% CI: -0.02~0.02);在高降雨量地区,化学氮肥施用对中国农田土壤细菌 Shannon 指数的影响呈正向,但未达到显著性(0.02, 95% CI: -0.008~0.04)。不同降雨量组间差异不显著。在低降雨量地区,化学氮肥施用对中国农田土壤细菌 Chao1 指数的影响呈负向,但未达到显著性(-0.02, 95% CI: -0.07~0.02);在中降雨量地区,化学氮肥施用对中国农田土壤细菌群落 Chao1 指数的影响呈正向,但未达到显著性(0.03, 95% CI: -0.02~0.07);在高降雨量地区,中国农田土壤细菌 Chao1 指数显著增加(0.09, 95% CI: 0.02~0.16)。不同降雨量组间差异显著。在低降雨量地区,化学氮肥施用对中国农田土壤细菌 Simpson 指数的影响呈正向,但未达到显著性(0.01, 95% CI: -0.09~0.11);在

中降雨量地区,化学氮肥施用对中国农田土壤细菌 Simpson 指数的影响同样呈正向,但未达到显著性(0.02, 95%CI: -0.04~0.07);在高降雨量地区,化学氮肥施用对中国农田土壤细菌 Simpson 指数的影响呈正向,但未达到显著性(0.05, 95%CI: -0.06~0.17)。不同降雨量组间差异不显著。从以上数据可以看出:在中等降雨量地区,施用化学氮肥对中国农田土壤细菌 OTU 的影响不显著,趋势偏负,对细菌 Chao1、Simpson 指数的影响也不显著,趋势呈正向的原因可能是该降雨条件下化学氮肥施用减少了稀有物种数量,但优势物种数量保持稳定以及群落结构具有弹性。干旱区对各项指标影响都较小,而多雨地区由于样本数量较少,仍需更多研究^[3]。

4.4 不同氮肥类型下化学氮肥施用对中国农田细菌群落多样性的影响

施用尿素对中国农田土壤细菌群落的 OTU 丰富度呈负效应(-0.01, 95%CI: -0.22~0.17),其影响不显著;施用复合肥显著降低了细菌 OTU 丰富度(-1.91, 95%CI: -3.44~0.38)。不同化学氮肥类型组间异质性显著。尿素与复合肥施用对于中国农田土壤细菌 Shannon 指数的影响都在零效应附近,尿素呈正效应(0.0009, 95%CI: -0.009~0.01)而复合肥呈负效应(-0.003, 95%CI: -0.05~0.05),二者均不显著。不同化学氮肥类型组间差异不显著。尿素施用显著提升了中国农田土壤细菌 Chao1 指数(0.04, 95%CI: 0.02~0.07),而复合肥施用的影响呈负向,但未达显著性(-0.04, 95%CI: -0.14~0.07)。不同化学氮肥类型组间差异不显著。尿素施用对中国农田土壤细菌群落的 Simpson 指数表现出轻微的负效应(-0.003, 95%CI: -0.006~0.007),变化均不显著,而复合肥施用使中国农田土壤细菌 Simpson 显著下降(-0.16, 95%CI: -0.25~0.08)。不同化学氮肥类型组间异质性显著。施用复合肥可显著降低农田土壤细菌 OTU 丰富度、Simpson 指数可能与多养分导致的盐分积累或微生物竞争失衡有关。施用复合肥对中国农田土壤细菌 Shannon、Chao1 的影响不显著,但趋势偏负,需警惕长期施用的潜在风险;而施用尿素则表现出一定的温和性,其对中国农田土壤细菌 OTU、Shannon 和 Simpson 指数均无显著影响,且可能轻微促进稀有物种(Chao1 指数正效应),适合作为短期氮源,但长期单施尿素需关注土壤酸化风险。尿素缓慢释放减少群落冲击,促进部分菌群但不破坏整体结构,维持群落功能稳定性;而复合肥抑制敏感菌种并刺激特定功能菌群增殖进而导致群落结构重组。但复合肥样本量普遍不足,因此实验结果缺乏代表性^[4]。

4.5 相关性分析

土壤细菌 Shannon 指数与化学氮肥施用量呈负相关,即化学氮肥施用量增加时,中国农田土壤细菌 Shannon 指数可能降低,但关联性较弱,相关性不显著。土壤细菌 Shannon 指数与试验时长呈显著的正相关关系,即随着试验年限增加,中国农田土壤细菌 Shannon 指数呈上升趋势,这表明长期试验可能减少环境扰动,促进土壤微生物群落的稳

定与多样性积累。土壤细菌 Shannon 指数与年降雨量呈显著负相关,即年降雨量增加时,中国农田土壤细菌 Shannon 指数呈显著下降趋势。土壤细菌的 Shannon 指数与年均温呈现显著负相关,即年均温升高时,中国农田土壤细菌 Shannon 指数呈显著下降趋势。

5 结语

尿素对土壤细菌 OTU 丰富度影响不大,在增加物种丰富度的同时,还能保持香农指数的稳定,所以在氮肥管理策略方面,尿素被优先推荐使用。在干旱地区,应结合滴灌技术,少量多次施肥,减少对微生物的干扰。在中等降雨量地区,减少施肥量,以避免因土壤细菌群落 OTU 丰富度显著降低而导致的群落结构单一化;在降雨量较多的地区,由于缺乏持续采样,建议优先监测氮肥对群落的长期影响。在本研究中,一些处理组的样本量不足,特别是在施用复合肥和降雨量大的地区,这影响了结果的可靠性。此外,数据主要基于 α 多样性指数,不能反映 β 多样性和功能多样性的变化。基于本研究的结果和局限性,建议今后的研究应增加施用复合肥与高降雨量地区的样本,进行长期观测,分析环境因素(如温度、土壤结构等)之间的相互作用。结果表明,化学氮肥施用下,中国农田土壤细菌群落 Chao1 指数和 Simpson 指数均呈显著的正效应,OTU 丰富度呈现负向趋势但变化不显著,Shannon 指数呈正向趋势,其变化也不显著。化学氮肥施用对中国农田土壤细菌群落多样性的影响与土壤 pH 的相关性并不显著。干旱地区施用化学氮肥对土壤细菌群落多样性的各项指标影响均较小,中等降雨量地区施用化学氮肥对 OTU 的影响不显著,趋势偏负,对 Chao1、Simpson 指数的影响也不显著,呈正向趋势。对于 OTU、Shannon、Simpson 而言,这三项指标并不会因为降雨量的不同而存在显著差异,而 Chao1 指数在不同降雨量地区的组间差异性显著。尿素对细菌群落的影响较为温和,而复合肥的作用效果更为剧烈,会显著降低 OTU、Simpson 指数。本研究将为科学评估化学氮肥施用对中国农田生态系统的影响、制定合理的农业管理措施提供理论依据。

参考文献

- [1] 王光华,胡晓婧,于镇华,等.施肥对中国黑土农田土壤微生物群落多样性影响的研究及展望[J].土壤与作物,2024,13(2):127-139.
- [2] 王钊,张冰,董思奇,等.长期施用氮肥对黑土和风沙土根际微生物群落结构及功能的影响[J].中国农业科学,2025,58(03):520-537.
- [3] 贺世龙,叶贺,赵宇,等.沿黄灌区盐碱地不同盐生植物根际土壤细菌群落特征和生态功能预测[J].生态学报,2025,45(05):2141-2151.
- [4] He M Y, Li D X, Peng S, et al. Reduced soil ecosystem multifunctionality is associated with altered complexity of the bacterial-fungal interkingdom network under salinization pressure[J]. Environmental Research, 2025, 269: 120863.