

基于 Meta 分析研究菌剂添加对堆肥产品中氮含量的影响

王 越¹, 丁晓艳², 王 博³, 薛衔乐¹, 苟洪城^{1,2}, 蒋正波^{1,2},
魏雨泉^{1,2}, 丁国春¹, 李 季^{1,2*}

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 中国农业大学有机循环研究院 (苏州), 苏州 215100;
3. 动物营养与饲料研究所内蒙古自治区农牧业科学院, 呼和浩特 010031)

摘 要: 堆肥技术作为有机废弃物资源化处理的关键技术之一, 因其具有无害化、资源化和减量化作用而备受关注。但在堆肥过程中存在严重的氮素损失问题, 菌剂添加可一定程度上减少氮素损失的影响。该研究综述了菌剂类型、菌剂来源、接种剂量、堆肥原料、堆肥工艺、生产规模对堆肥产品氮素含量 (全氮含量、碳氮比、铵态氮、硝态氮) 和堆肥过程氮素损失 (氨气、氮素损失) 的影响。结果发现: 添加菌剂能够显著提升堆肥产品的全氮 (19.3%)、铵态氮 (40.8%) 和硝态氮 (2.3%) 含量, 减少 NH_3 排放 (-14.9%), 降低 C/N (-37.9%) 和氮素损失 (-29.7%)。菌剂来源是影响堆肥产品氮素保存的关键性因素, 筛选自堆肥环境的土著微生物能够适应堆肥环境, 对全氮含量提升的效应值最高 (16.9%), 更有利于在堆肥过程中发挥固氮减排的作用。值得注意的是, 菌剂添加量并非越多越好, 菌剂添加量 <2% 时对堆肥产品的全氮、碳氮比的影响最显著, 而菌剂添加量 <1% 时, 对堆肥产品中铵态氮含量影响最显著。但由于大多数文献多以纤维素降解菌添加利用为主, 导致堆肥产品中对碳的利用效率高于氮, 因此随着菌剂添加量的增加, 碳氮比显著下降。由于初始碳氮比较低, 导致以家畜粪便作为发酵原料的堆肥产品中, 菌剂添加对其含量的提升效果低于其他发酵原料, 但反应器堆肥是除传统堆肥工艺外, 固氮减排效果最好的堆肥工艺。因此, 添加菌剂可提升堆肥产品中氮素的保存, 且菌剂来源最为重要, 土著菌剂效果最优, 反应器堆肥工艺固氮效果优于条垛和槽式堆肥。

关键词: 堆肥; 菌剂; 固氮减排; 影响因素; Meta 分析

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404136

中图分类号: S126

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-21-0192-10

王越, 丁晓艳, 王博, 等. 基于 Meta 分析研究菌剂添加对堆肥产品中氮含量的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(21): 192-201. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404136 <http://www.tcsae.org>
WANG Yue, DING Xiaoyan, WANG Bo, et al. Effects of adding inoculants on improving the nitrogen content of compost by Meta analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(21): 192-201. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404136 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

随着全球经济迅猛发展, 大量固体废弃物随之产生, 据估算, 到 2025 年, 全球固体废弃物的日均产量将达到 600 多万 t^[1], 其中有机肥废弃物的处理是一大难题。研究发现其合理化、资源化利用, 既能实现对营养元素重吸收^[2], 还能一定程度上减少温室气体^[3]、臭气等二次污染^[4]。堆肥技术作为有机废弃物资源化处理的关键技术之一, 因其具有无害化、资源化和减量化作用而备受关注^[5]。该技术是由微生物介导的生物转化过程^[6-7], 微生物的生长势必会伴随着碳、氮等营养元素的转化与损失^[8], SHAN 等^[9]的研究发现, 堆肥过程中约有 79%~94% 的 NH_3 和 0.2%~9.9% 的 N_2O 排放, 这也导致了堆肥产品中全氮含量的损失, 降低了产品质量, 对环境也

有一定的污染。因此, 堆肥过程中氮素的产生、转化与排放, 一直是研究者们关注的重点。

常用的固氮减排方法有调控堆肥过程^[10-14]、使用添加剂等方式^[15-17]。物理与化学添加剂的使用在固氮减排方面表现优秀, 但因其不可重复利用、成本高的特点, 在工厂化堆肥中鲜少应用。寻求一种可持续的生物添加剂成为近些年的研究热点, 外源菌剂添加则是目前专注的重点之一。然而, 关于菌剂添加效果, 一直都存在着争议。NIGUSSIE 等^[18]通过 Meta 分析发现, 接种微生物菌剂能够显著降低碳含量和碳氮比, 提高全氮、总磷含量及种子发芽指数, 说明接种菌剂能够加快堆肥过程, 促进堆体腐熟, 提高堆肥产品质量, SHAN 等^[9, 19]的研究结果亦是如此。但也有学者认为, 微生物接种剂作用有限, 因为在堆肥原料中已经含有丰富的微生物群落参与碳氮循环^[18], 堆肥过程中环境和微生物种群剧烈变化可能会降低外源微生物的活性^[20], 很难通过控制外源微生物添加剂实现不同堆肥过程中的保氮作用。但更多的研究结果证明, 外源菌剂的添加能够实现固氮减排作用, 但易受多种因素影响, 如接种剂类型^[21], 接种时间^[18, 22], 底物质量, 接种量及堆肥方式^[23-24]等。GAO 等^[25]通过

收稿日期: 2024-04-19 修订日期: 2024-09-26

基金项目: 国家自然科学基金 (32071552; 42307436)

作者简介: 王越, 博士生, 研究方向为有机废弃物资源化利用。

Email: yuew2016@cau.edu.cn

*通信作者: 李季, 教授, 博士生导师, 研究方向为生态工程与有机废弃物资源化利用。Email: lij@cau.edu.cn

在餐厨堆肥过程中添加不同剂量的 VT 菌剂 (0.3%~1.2%) 发现, 接种量为 0.9% 时, 与其他处理相比 N_2O 可减排 17%~54%。不同菌剂类型在堆肥过程中固氮减排作用也存在差异, 如在升温期, 菌剂 VT1020 促进了铵态氮含量的提升, 而在冷却期则促进了硝态氮的提升, 效果均优于 VT1000^[26], 说明 VT1020 菌剂更有利于堆肥过程中氮素转化与保存; 也有研究发现液体菌剂相较于固体菌剂的效果更优^[27]、放线菌类菌剂优于细菌类菌剂, 可将堆体内生物可利用有机氮含量提高约 20%^[28]。当堆肥底物不同时, 添加相同菌株对堆肥过程中的氮素转化也存在差异。在牛粪堆肥中分别添加 *Pleurotus platypus* 和 *Trichoderma viridae* 时, 可使全氮含量增加 2.75%~6.22%, 而添加在压滤泥浆堆肥中, 则使全氮含量增加 1.71%~8.18%^[29]。因此, 菌剂间及环境间的差异, 均会影响堆肥过程的固氮效果。

目前已发表相关 Meta 分析文章的研究对象多集中于物理、化学添加剂的使用效果, 单一发酵物料, 工艺参数改进等, 研究内容多以堆肥过程中木质纤维素的降解、养分转化等为主, 缺乏对菌剂来源、类型、添加量等方面的研究。而单个试验研究的菌剂添加类型、来源都比较固定, 难以比较不同菌剂类型对于堆肥产品中全氮含量的影响。本研究基于近 5a 菌剂添加效果研究热潮, 使用 Meta 分析方法研究对堆肥过程中添加菌剂的固氮减排效果。主要以 3 种菌剂类型、4 种菌剂来源、6 个菌剂添加量范围为研究对象, 研究不同菌剂对堆肥产品中 TN、C/N、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 NH_3 及氮素损失的影响; 分析

不同菌剂在不同发酵原料、堆肥工艺中使用效果的差异。研究结果可为菌剂筛选来源选择、菌剂添加剂量等方面提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 文献检索

本节通过利用 Meta 分析方法, 研究近 5a 已发表文章中关于在堆肥过程中添加菌剂的固氮减排效果。截止到目前为止, 已有大量学者针对该方面进行了探索, 满足 Meta 分析需要的“大数据”要求。本研究数据来源于 Web of Science 的 All databases 数据库, 按照关键词为 “inoculants, compost, nitrogen” + 发表时间 “2019 年 1 月 1 日—2024 年 1 月 30 日” 进行搜索, 共获得相关文献 120 篇。按照以下标准进行筛选: 1) 完整的好氧堆肥过程; 2) 含有空白对照处理, 且试验处理的唯一变量为是否添加菌株/剂; 3) 试验结果中含有添加菌剂后对氮素转化的影响, 至少包含全氮含量、铵态氮含量、硝态氮含量、C/N 中的一个指标; 4) 研究对象为堆肥本身; 5) Meta 分析和综述类文章不属于研究范畴。具体文献筛选步骤可参照图 1。本研究通过以上标准共筛选出 45 篇文献 130 组数据, 其中关于 TN 含量的有 36 篇文献, 111 组数据; C/N 有 29 篇文献, 78 组数据; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量有 19 篇文献, 49 组数据; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量有 17 篇文献, 45 组数据; NH_3 累积排放量有 9 篇文献, 24 组数据; 总氮损失有 8 篇文献, 16 组数据。以上研究指标数据来源均满足文献数量不低于 3 篇, 数据组数量不低于 5 组的分析要求。

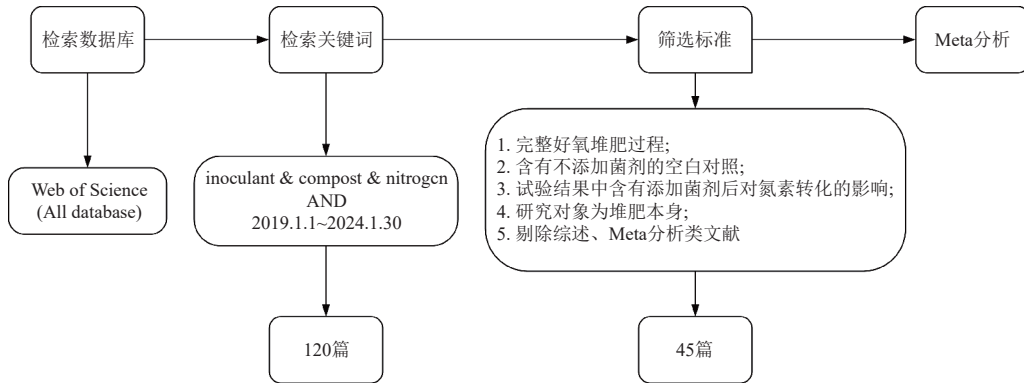


图 1 Meta 分析流程图

Fig.1 Criteria and procedure of selecting studies for the meta-analysis

1.2 数据获取

从符合筛选标准的文献中提取未添加菌剂处理和添加菌剂处理中氮素转化相关指标的所有数据。其中, 表格、文字形式的数据可直接获取; 柱状图数据可借助 Origin 2024 软件的“图像数字化工具”; 折线图数据可使用 GetData Graph Digitizer 进行提取。所提取的定量数据须同时包括样本量、平均数及标准差, 并用 Excel 对数据进行录入、汇总与整理。

提取数据过程中, 对于使用标准误差来表征数据离散程度, 可用式 (1) 进行转换:

$$X_d = X_e \times \sqrt{n} \quad (1)$$

式中 X_d 为标准差, X_e 为标准误差, n 为样本量。

对于未给标准差、标准误差的数据, 标准差可按照平均数的 10% 记录。

1.3 整合分析方法

考虑到案例间存在差异, 本研究采用随机效应模型, 以接种与未接种作为试验组和对照组, 每对样本的效应值按照效应率的自然对数响应比 ($\ln R$) 进行计算^[30], 计算式如下:

$$\ln R = \ln \left(\frac{E}{C} \right) \quad (2)$$

式中 E 与 C 分别表示试验组与对照组（对应氮素指标）的平均值。

使用 Metawin 2.1 软件进行 5 000 次迭代计算平均效应与 95% 置信区间。用 Dersimonian-laird 法计算案例间方差。

1.4 数据分组

由于堆肥原料、发酵工艺、菌剂类型、来源与添加量等不同，接种菌剂对不同条件下的堆肥过程氮素转化的影响存在差异。因此，本研究对获取到的数据按照不同条件进行分组分析讨论。本研究选择了 6 个影响变量：菌剂类型、菌剂来源、接种剂量、堆肥原料、堆肥工艺、生产规模。其中菌剂类型分为 3 类：复杂菌剂、复合菌剂、单一菌剂；菌剂来源分为 4 类：土著菌、外源菌、综合型菌株、自筛菌；接种剂量分为 5 个范围： $<1.0\%$ 、 $\geq 1.0\% \sim 2.0\%$ 、 $\geq 2.0\% \sim 10\%$ 、 $\geq 10\% \sim 20\%$ 和 $>20\%$ ；堆肥原料分为 8 种：污泥、家禽粪便、园林废弃物、家畜粪便、副产品、餐厨、秸秆、其他，其他中主要包括沼渣、藻类及其沉积物等；堆肥工艺分为 6 种：反应器、槽式、条垛、大堆、简易箱式、坑式堆肥；生产规模分为 3 种：实验室规模、中试规模、工厂化规模。

其中，在菌剂类型中，复合菌剂是指已知添加菌株名称且做过菌株拮抗试验后进行复合的菌剂；复杂菌剂则组成复杂，未知菌种组成，如腐熟堆肥返料等。在菌剂来源中，土著菌是指从堆肥中获得且应用于相同堆肥原料中的菌株；外源菌是指从土壤、湖水等其他环境，而非堆肥环境中获取的菌株；综合型菌株是指土著菌及外源菌混合所得；自筛菌是指实验室自己筛选获得，但缺少筛选物料来源信息的菌株。

1.5 响应变量

为比较添加菌剂与否对堆肥过程中氮素转化的影响，尤其是堆肥产品中全氮含量的影响，故本研究选择了 3 类评价指标作为研究对象，分别是基础氮指标：全氮含量（total nitrogen content, TN）、碳氮比（C/N）、氮素损失（the loss of total nitrogen content, TN loss）；无机氮指标：铵态氮（ NH_4^+-N ）含量、硝态氮含量（ NO_3^--N ）；气态氮指标：氨气（ NH_3 ）。选取数据的时间节点因评价指标的不同而有所差异，除氮素损失和氨气为堆肥过程的累积量，其他指标均为好氧堆肥发酵结束时产品中的含量。

1.6 数据分析

使用 Microsoft Excel 2021 完成数据的录入与整理，使用 Metawin 2.1 计算平均效应与 95% 置信区间，使用 Graphpad prism 9.0 绘制森林图、柱状图等，使用 Origin 2024 Pro 进行线性拟合。

2 结果与分析

2.1 添加菌剂对堆肥过程中氮素转化指标影响的总效应

微生物接种被认为是一种清洁、高效的氮减排方法^[31]，添加菌剂能够显著提升堆肥产品的全氮（19.3%）、铵态氮（40.8%）和硝态氮（2.3%）含量，减少 NH_3 的排放

（-14.9%），降低 C/N（-37.9%）和氮素损失（-29.7%），该结果与 NIGUSSIE 等^[18] 的 Meta 分析结果一致。通过计算失安全系数（表 1），发现结论可靠性好^[32]。有研究表明，通过在堆肥过程中添加菌剂，实现了堆体内微生物群落结构的调控，改变氮组分间的转化，最终实现固氮减排的效果^[33]。

表 1 添加菌剂对堆肥过程中氮素转化指标的效应值及可靠性检验

Table 1 Effect size and reliability test of adding inoculants on nitrogen conversion during composting process

评价指标 Evaluation index	下限 Lower limit/%	效应值 Effect size/%	上限 Upper limit/%	样本数 Sample number	失安全系数 Fail-safe number
氨气 NH_3	-18.4	-14.9	-11.4	23	629.1
碳氮比 C/N	-38.1	-37.9	-37.6	78	441 187.2
全氮 TN	19.0	19.3	19.6	111	144 305
铵态氮 NH_4^+-N	40.7	40.8	40.8	44	926 623.7
硝态氮 NO_3^--N	1.9	2.3	2.7	45	2 742.2
氮素损失 Nitrogen loss	-30.2	-29.7	-29.1	16	17 556.5

注：“-”值为 <0 ，说明添加菌剂对该指标具有负效应。

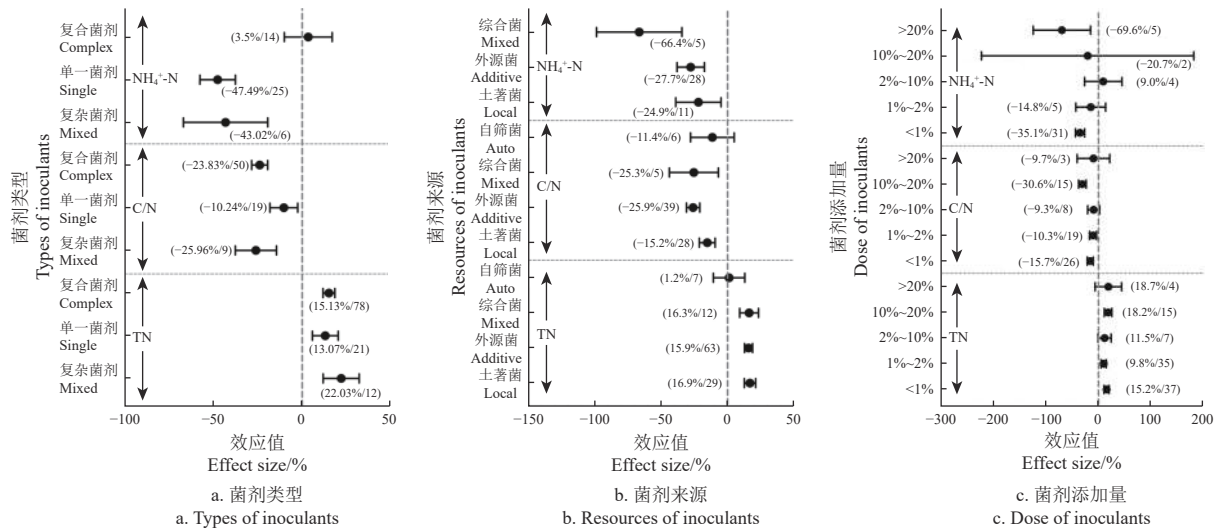
Note: ‘c’ value is <0 , means negative effect on the index by adding inoculants.

通过异质性检验发现，菌剂类型、菌剂添加量、菌剂来源、生产规模均是影响堆肥产品中全氮含量的关键性因素（ $P < 0.01$ ）。菌剂来源和生产规模亦是影响堆肥产品碳氮比的关键性因素（ $P < 0.01$ ）。菌剂添加量、菌剂来源、发酵主原料、堆肥工艺是影响铵态氮含量的关键性因素（ $P < 0.01$ ）。由于硝态氮、氨气和氮素损失样本量少、分散，故无法进行异质性检验。因此，菌剂来源与堆肥产品中全氮含量、碳氮比和铵态氮含量均显著相关，是影响堆肥产品氮素保存的关键性因素之一。

2.2 菌剂类型、来源与添加量对氮含量的影响

2.2.1 菌剂类型

如图 2a 所示，不同类型菌剂能够显著提升堆肥产品中的全氮含量、降低碳氮比，复合菌剂效果优于单一菌剂，且两者混合后的复杂菌剂效果更优，三者对全氮含量提升的效应值分别为 15.1%，13.1% 和 22.0%，对碳氮比的负响应分别为 -23.8%，-10.2% 和 -26.0%。XU 等^[34] 研究发现，单独添加 *Bacillus cohnii* 或 *Bacillus polygoni* 能分别使全氮含量提升 14.51% 和 5.83%，使碳氮比降低 17.15% 和 7.81%；若将两株菌进行复合后，能够使全氮含量提升 17.22%，碳氮比降低 22.61%。除此之外，在本研究中单一菌剂、复杂菌剂能够显著降低堆肥产品中的铵态氮含量，且复杂菌剂优于单一菌剂，但复合菌剂对堆肥产品的铵态氮含量却无显著效应。通过研究 3 种不同菌剂类型对堆肥产品中 TN、C/N 和铵态氮的影响发现，由单一菌株和复合菌剂进行混合使用时，效果最优，说明复杂菌剂的添加联合了单一菌剂和复合菌剂对于碳氮元素的利用，提升了物质利用与转化效率。



注: 括号中数字为“试验数量/效应值”, 圆圈代表平均值; 线段长短代表 95% 置信区间。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为铵态氮含量; C/N 为碳氮比; TN 为全氮含量。
 Note: The value in parentheses represent the numbers of “experimental observations/ effect size”, circles represent the average value; The length of the line represents the 95% confidence interval. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ is ammonium nitrogen content, C/N is carbon-nitrogen ratio, TN is total nitrogen content.

图 2 添加菌剂对全氮含量、碳氮比、铵态氮含量的影响
 Fig.2 Effects on TN, C/N and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content of inoculant addition

2.2.2 菌剂来源

从图 2b 中可以看出, 菌剂来源不同对于堆肥产品中 TN 含量的提升, 对 C/N 和铵态氮含量的消耗均具有显著影响。对全氮含量提升的效应值由高到低依次是土著菌 (16.9%) > 综合菌 (16.3%) > 外源菌 (15.9%), 说明土著微生物对于提升全氮含量的效果更优。土著微生物来源于堆肥环境, 重新接种后能够更好的适应堆肥环境并在该过程中发挥作用。如在鸡粪堆肥中添加土著微生物, 5% 氢氧化细菌, 能够使堆体 TN 含量增加 1.8%, NH_3 减排 88%, 总氮素损失减少 6.75%^[35]; 添加 5% 氢氧化古菌能够使 NH_3 排放减少 82.12%, N_2O 排放减少 48.57%^[36]。ZHAO 等^[37]通过在堆肥过程中添加耐热硝化细菌, 加速了堆体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的转化, 使 NH_3 排放减少 29.7%, 全氮损失减少 10.58%。腐熟返料作为一种特殊的土著菌系, 能够显著提升园林废弃物中的全氮含量 (18.0%~31.3%)^[38]; 周喜荣等^[39]通过在牛粪堆肥过程中添加土著菌剂, 使堆肥产品中的 TN 含量提升了 8.23%~17.59%。不同的是, LI 等^[40]通过在猪粪堆肥过程中添加复合菌剂 (*Acinetobacter pittii*, *Bacillus subtilis* sub sp. *Stercoris*, *Bacillus altitudinis*), 仅能使堆肥产品的 TN 增加 0.3%。张国言等^[41]在兔粪堆肥过程中比较了土著与外源菌剂的效果, 发现土著菌剂通过增加堆体中有机氮和碱解氮含量, 进而增加了全氮含量, 前者有机氮含量较外源菌剂增加了 14%, 碱解氮较后者增加了 41%。因此, 在堆肥过程中添加来源于堆肥环境的土著菌剂更有利于堆体内的氮素保存。

对于碳氮比来说, 添加外源菌剂的效果优于土著和综合性菌剂, 而造成这个原因与文献中所使用菌剂多以枯草芽孢杆菌、链霉菌等纤维素降解菌有关^[27, 28, 32], 因此对于碳素的利用效率高于堆体内土著微生物, 而对氮

素的利用却没土著微生物高。综合性菌剂对堆肥产品中铵态氮含量提升的负效应 (-66.4%) 要远高于外源 (-27.7%) 和土著菌剂 (-21.9%) (图 2b)。堆肥过程中微生物对氮素的利用主要经过氨化过程、硝化过程, 一部分厌氧环境可能会发生反硝化过程^[42]。氨化过程实现了有机氮至铵态氮的转化^[43], 而硝化过程为堆肥过程中氮素损失的主要过程, 该过程实现了铵态氮向硝态氮的转化, 而高 pH 值、高温环境又会消耗铵态氮, 以 NH_3 的形式损失^[4, 44]。添加菌剂加速了铵态氮的转化, 因此使其含量显著下降。但不同的是, 有些研究发现, 添加菌剂增加了 NH_3 的排放, 因添加量不同 (0.3%~1.2%), 使 NH_3 排放量增加了 26%~62%^[25]; 钟珍梅等^[45]添加 EM 菌剂后, 增加了铵态氮和可溶性有机氮的含量, 使硝态氮含量下降, 说明在该研究中的堆体内大多数的铵态氮并未通过硝化作用变成硝态氮。因此, 合适的菌剂添加才能够减少堆肥过程氮素损失, 加速铵态氮向硝态氮或有机氮的转化。

2.2.3 菌剂添加量

菌剂添加量并非越多越好, 菌剂添加量 <2% 时对堆肥产品的全氮、碳氮比的影响最显著, 当菌剂添加量 <1% 时, 对堆肥产品中铵态氮的含量影响最显著 (图 2c)。通过线性拟合发现, 随着菌剂添加量的增加, 整体上堆肥产品中的全氮含量具有增加的趋势, 但菌剂添加量与产品中全氮含量的提升并无显著相关性 ($P > 0.05$), 这说明菌剂添加量不是影响产品全氮含量的关键因素。结合图 2c 中分析是否添加菌剂对全氮含量的影响结果对比发现, 相比于不添加菌剂, 添加菌剂 <2% 时, 会显著提升堆肥产品中的全氮含量。说明了菌剂的添加能够显著提升堆肥产品中的全氮含量, 但其不受菌剂添加量的影响。

从图3中可以看出,随着菌剂添加量的增加,能显著降低堆肥产品中的碳氮比($P=0.038<0.05$),对铵态氮、 NH_3 排放和氮素损失具有负相关性($P>0.05$),对硝态氮具有正相关性,与表1中结论一致,但添加菌

剂对铵态氮、 NH_3 排放和氮素损失的降低效果和对硝态氮的提升效果均不显著,这可能与文献中多集中于以纤维素降解、堆体促腐等加快堆肥进程的功能菌剂添加有关。

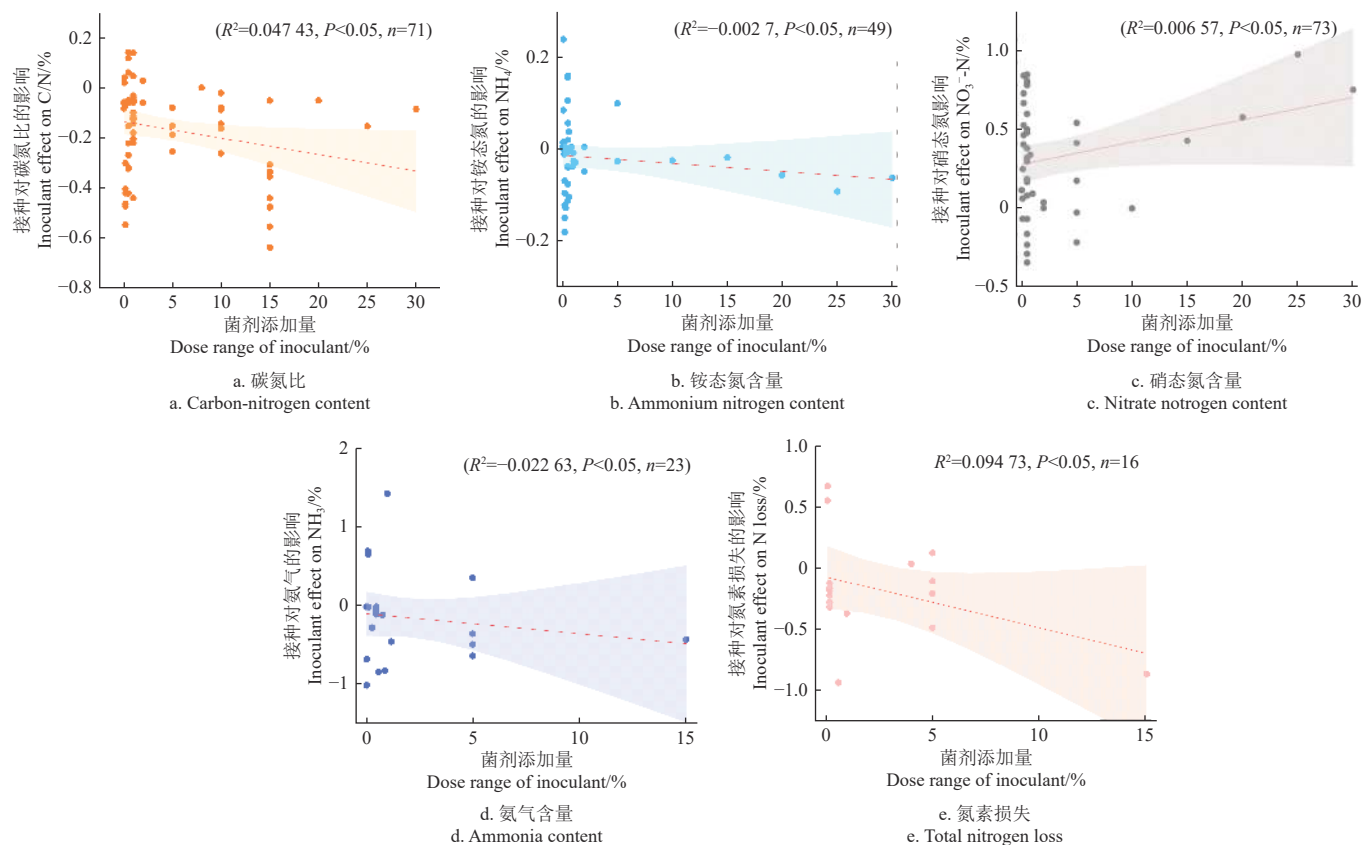


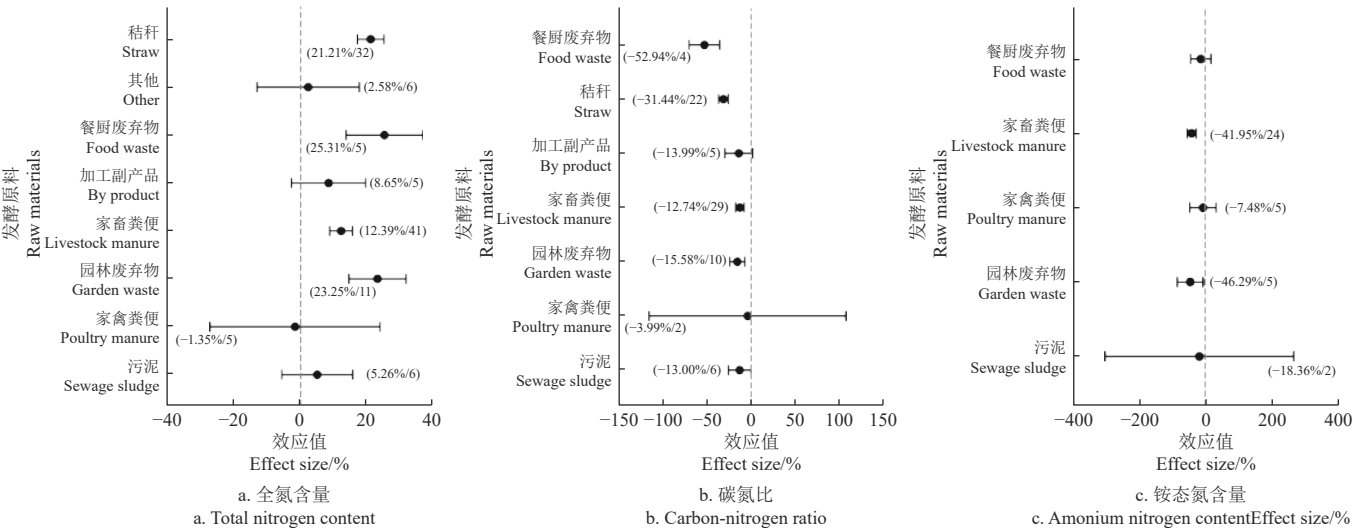
图3 菌剂添加量对C/N、铵态氮、硝态氮、 NH_3 和氮素损失的影响
Fig.3 Dose range of inoculant effects on C/N, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, NH_3 and TN loss

2.3 添加菌剂对不同发酵原料堆肥过程中氮素转化的影响

从图4中发现,近年来关于添加菌剂的研究多集中于使用秸秆、餐厨废弃物、家畜粪便、园林废弃物,而其他发酵原料相对较少。以秸秆、餐厨废弃物、家畜粪便和园艺废弃物为主原料进行堆肥发酵,添加菌剂能够显著提升该堆肥产品中的全氮含量,效应值分别为21.2%、25.3%、12.4%和23.3%(图4a),与其他3种发酵原料相比,添加菌剂对以家畜粪便为发酵原料的堆肥产品的TN含量提升效应值最低,这与家畜粪便的初始碳氮比低于其他3种原料有关(表2),因此在堆肥的高温、高pH环境下更易于造成氮素的损失,不利于氮素保存。贺琪等^[46]研究发现,初始物料C/N越低,有机氮损失越多,铵态氮损失越小,更易造成氮素损失;而C/N越高,即有机质越多,则能够促进铵态氮向有机氮转变,固定更多氮素在堆体中,因此添加菌剂对家畜粪便堆肥产品的铵态氮含量减少的效应低于园林废弃物(图4c),即无更多的铵态氮转化为有机氮,保存在堆肥产品中。但与其他类型原料相比,接种能够显著降低

家畜粪便和园林废弃物的铵态氮含量,说明接种促进了以上两种原料在堆肥过程中的氮素转化。而当发酵主原料为加工副产品、家禽粪便和污泥时,添加菌剂对堆肥产品中全氮含量的提升并无显著效应(图4a)。

除加工副产品和家禽粪便为发酵主原料,在堆肥过程中添加菌剂对碳氮比的降低无显著效应,可能与研究数据较少有关。添加菌剂在其他5种发酵主原料中均能够显著降低堆肥产品的C/N(图4b),且降低程度餐厨废弃物(-52.9%)>秸秆(-31.4%)>园林废弃物(-15.6%)>污泥(-13.0%)>家畜粪便(-12.7%)。从图4c中可以发现,仅以家畜粪便和园林废弃物为发酵主原料生产的堆肥产品,其铵态氮含量因菌剂的添加而显著降低,两者的效应值分别为-42.0%和-46.3%。综上所述,发酵原料是影响肥料产品全氮含量与铵态氮含量的关键。以畜禽粪便为发酵原料生产肥料产品时,产品中的全氮含量最低,与其初始碳氮比最低有关,堆肥过程加速了氮素的消耗。与此同时,添加菌剂能够显著促进对铵态氮的转化效率,因此在堆肥结束时,以畜禽粪便为原料生产的肥料产品的全氮含量最低。



注：括号中数字为“试验数量/效应值”，圆圈代表平均值；线段长短代表 95% 置信区间。
Note: The value in parentheses represent the numbers of “experimental observations/ effect size”, circles represent the average value; The length of the line represents the 95% confidence interval.

图 4 菌剂添加对不同发酵原料 TN、C/N 和铵态氮的影响
Fig.4 Inoculant effects on TN, C/N and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ among different types of raw materials.

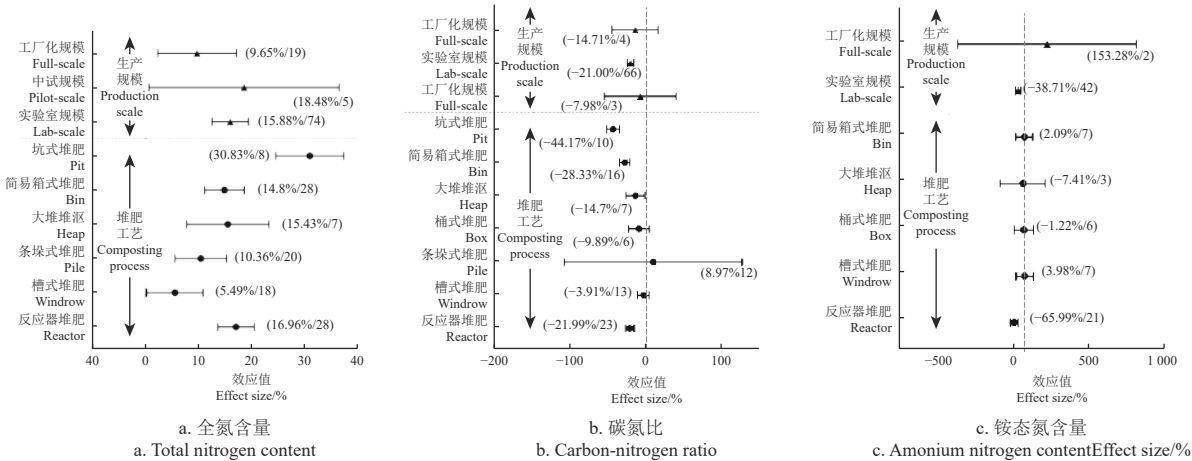
表 2 堆肥过程中不同发酵原料初始及结束时碳氮比含量
Table 2 C/N among different types of raw materials from initial to end during composting process.

发酵主原料 Main raw material	初始碳氮比 C/N ratio (Initial)	结束碳氮比 C/N ratio (End)
秸秆 Straw	32.24±6.51	17.34±4.93
餐厨废弃物 Food waste	30.30±11.99	18.24±2.05
加工副产品 By-product	28.70±0.00	14.18±1.02
家畜粪便 Livestock manure	27.27±4.97	14.95±3.28
园林废弃物 Garden waste	38.58±6.67	14.89±6.12
家禽粪便 Poultry manure	20.79±9.42	13.70±5.94
污泥 Sewage sludge	22.77±9.02	15.16±4.77
其他 Others	26.70±1.33	16.85±3.09

2.4 添加菌剂对不同生产规模与堆肥工艺的氮素转化的影响

2.4.1 生产规模

添加菌剂能够显著提升堆肥产品中的全氮含量，不受堆肥工艺与生产规模的影响，且中试规模>实验室规模>工厂化规模（图 5a）。目前大多数研究集中于实验室规模，占 76.72%，远高于中试（3.45%）和工厂化（19.83%）规模。通过分析发现，在实验室水平开展的菌剂添加试验均能够显著提升堆肥产物的全氮含量，降低碳氮比和铵态氮含量，说明该水平研究更利于控制变量、体现菌剂添加的效果，该结果也与 Cao 等^[47]的研究结果基本一致。添加菌剂对工厂化与中试水平下碳氮比和铵态氮的损耗效果不显著（图 5b, c），但中试和工厂化规模数据量较小，故该结论须进一步验证。



注：括号中数字为“试验数量/效应值”，圆圈代表平均值；线段长短代表 95% 置信区间。
Note: The value in parentheses represent the numbers of “experimental observations/ effect size”, circles represent the average value; The length of the line represents the 95% confidence interval.

图 5 菌剂添加对不同生产规模与堆肥工艺中堆肥产品的 TN、C/N 和铵态氮的影响
Fig.5 Inoculant effect on TN, C/N and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ among different scales of production and composting processes.

2.4.2 堆肥工艺

与条垛、槽式和反应器堆肥工艺相比,坑式、简易箱式和大堆堆沤是较为传统的堆肥工艺。本研究中,除坑式堆肥外,反应器堆肥可使全氮含量显著增加,保氮减损效果显著高于其他堆肥工艺(图 5a),这与反应器堆肥发酵时间短、发酵效率高有关。采用坑式堆肥的发酵原料多以餐厨废弃物、秸秆和园林废弃物为发酵主原料^[48-49],由于其初始碳含量高、添加菌剂均为复合菌剂,且菌剂添加量介于 10%~20%,故其碳素消耗速率明显快于反应器堆肥,因此反应器堆肥对于全氮含量的提升较坑式堆肥低。但上述关于坑式堆肥数据来源于两篇文献,故还需进一步进行结论验证。传统工艺中的坑式、简易箱式堆肥对堆肥产品中碳氮比损耗的负效应最高,其次为反应器堆肥和大堆堆沤。添加菌剂对经过条垛式和槽式堆肥生产的产品中碳氮比含量无显著影响(图 5b)。从图 5c 中发现,除反应器堆肥外,添加菌剂对经过其他工艺生产堆肥产品的铵态氮含量无显著影响。

2.5 堆肥过程中固氮减排的生物强化策略建议

堆肥过程是一个复杂的微生物介导的生物转化过程。通过文献 Meta 分析发现,菌剂的类型与来源是影响堆肥产品氮含量的关键因素,复杂菌剂添加是将复合菌剂与单一菌剂联合使用的方式,虽然其氮素留存效果较好,优于单一菌剂和复合菌剂,但从效应值来看,其作用效果并非是两种类型菌剂作用效果的简单加和,联合使用的效果是否有所衰减,菌株是否存在拮抗,均需进一步研究。土著微生物菌剂筛选富集自堆肥环境,重新接种后更有利于提升堆肥产品中的氮含量,降低氮素损失,这是因为土著微生物菌剂的添加,提升了堆体内功能微生物丰度,一定程度上避免了外源微生物添加易受到土著微生物的拮抗和攻击,能更快和最大化的发挥作用,从而实现营养物质的转化和氮素的保存。但从目前的文献调研结果发现,研究中所添加的菌剂多以纤维素降解、堆体促腐等加快堆肥进程的功能微生物为主,耐热硝化细菌等固氮微生物菌剂的应用案例较少,间接导致了添加菌剂对碳氮比的降低的效应值大于对全氮含量提升的效应值。因此,堆肥过程控制的目标性将直接决定菌剂的选择与应用。

发酵原料、生产规模与堆肥工艺也一定程度上会影响菌剂应用效果。秸秆、园林废弃物富含木质纤维素类物质,畜禽粪便、污泥的氮含量均较高,因此在进行以上物料堆肥时,除了要进行物料配比外,还需要考虑添加菌种的适应性,是否能够充分利用发酵底物,从而实现氮素的快速转化与固定。生产规模与堆肥工艺作为客观因素,也需要调控至合适工艺参数以满足目标菌株的生存与繁殖。因此,本研究通过 Meta 分析,明确了功能菌剂的筛选来源,通过了菌剂复配实现了菌剂功能的最大化发挥,为堆肥过程中固氮减排提供技术支撑。

3 结 论

1) 添加菌剂对堆肥产品中氮素保存具有显著正效应,菌剂来源与菌剂类型是影响堆肥产品氮素保存的关键性因素之一,土著微生物对提升堆肥产品中的全氮含量效果最优(16.9%, $P < 0.05$);复合菌剂显著提升了产品中的全氮含量(15.1%, $P < 0.05$),降低碳氮比(-23.8%, $P < 0.05$),单一菌剂对铵态氮的转化效果更优(-47.5%, $P < 0.05$)。

2) 发酵原料是影响肥料产品全氮含量的关键因素之一。家畜粪便生产的肥料产品全氮含量最低(2.49%),但在其堆肥初始阶段接种可显著提升肥料产品全氮含量(12.4%, $P < 0.05$),降低铵态氮含量(-42.0%, $P < 0.05$),促进其转化,从而实现氮素的保存。由于初始 C/N 较低,添加菌剂对以家畜粪便为发酵主原料生产的堆肥产品中全氮含量(12.4%)的提升效果低于其他发酵原料(21.2%~25.3%)。

3) 反应器是除传统堆沤技术外,保氮减损效果最好的堆肥工艺,但其多以实验室水平研究为主,使菌剂能够较好的发挥作用。但对于全氮含量而言,其不受生产规模和堆肥工艺的影响。

综上,可通过选择菌剂类型、来源、原料组成及堆肥工艺来提升堆肥产品的氮含量。

[参 考 文 献]

- [1] AWASTHI M K, SARSAIYA S, WANG Q, et al. Mitigation of global warming potential for cleaner composting[J]. *Biosynthetic Technology and Environmental Challenges*, 2018: 271-305.
- [2] 乔如陆, 刘佳琪, 孙玉鑫, 等. 厨余堆肥污染气体减排的工艺参数优化[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(14): 223-231. QIAO Rulu, LIU Jiaqi, SUN Yuxin, et al. Optimization of process parameters for reducing gas emission from kitchen waste compost[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering of the CASE*, 2023, 39(14): 223-231. (in Chinese with English abstract)
- [3] SANCHEZ A, ARTOLA A, FONT X, et al. Greenhouse gas from organic waste composting: emissions and measurement[J]. *CO₂ sequestration, biofuels and depollution*, 2015: 33-70.
- [4] ZHANG Z, LIU D, QIAO Y, et al. Mitigation of carbon and nitrogen losses during pig manure composting: A meta-analysis[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 783: 147103.
- [5] 薛晶晶, 李彦明, 常瑞雪, 等. 厨余与园林废物共堆肥过程氮素转化及损失[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(10): 192-197. XUE Jingjing, LI Yanming, CHANG Ruixue, et al. Nitrogen transformation and loss during co-composting of kitchen and garden wastes[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering of the CASE*, 2021, 37(10): 192-197.

- (in Chinese with English abstract)
- [6] 施童, 陈杰, 元传仁, 等. 农林废弃物对厨余垃圾堆肥腐殖化的影响与微生物驱动机制[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(13): 191-201.
- SHI Tong, CHEN Jie, QI Chuanren, et al. Effects of agricultural and forestry wastes on humification and its microbially driven mechanisms in kitchen waste composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering of the CASE*, 2023, 39(13): 191-201. (in Chinese with English abstract)
- [7] 尹子铭, 杨燕, 唐若兰, 等. 秸秆对猪粪静态兼性堆肥无害化和腐熟度的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(7): 218-226.
- YIN Ziming, YANG Yan, TANG Ruolan, et al. Effects of maize stove on the harmlessness and maturity during the static facultative composting of pig manure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering of the CASE*, 2023, 39(7): 218-226. (in Chinese with English abstract)
- [8] MAYER B K, BAKER L A, BOYER T H, et al. Total value of phosphorus recovery[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(13): 6606-6620.
- [9] SHAN G, LI W, GAO Y, et al. Additives for reducing nitrogen loss during composting: A review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 307: 127308.
- [10] CHAN M T, SELVAM A, WONG J W C. Reducing nitrogen loss and salinity during 'struvite' food waste composting by zeolite amendment[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 200: 838-844.
- [11] YANG Y, AWASTHI M K, DU W, et al. Compost supplementation with nitrogen loss and greenhouse gas emissions during pig manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 297: 122435.
- [12] YANG Y, AWASTHI M K, WU L, et al. Microbial driving mechanism of biochar and bean dregs on NH_3 and N_2O emissions during composting[J]. *Bioresource Technology*, 2020, 315: 123829.
- [13] ZHU L, YANG H, ZHAO Y, et al. Biochar combined with montmorillonite amendments increase bioavailable organic nitrogen and reduce nitrogen loss during composting[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 294: 122224.
- [14] LI W, WU C, WANG K, et al. Nitrogen loss reduction by adding sucrose and beet pulp in sewage sludge composting[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 124: 297-303.
- [15] LI Y, LUO W, LI G, et al. Performance of phosphogypsum and calcium magnesium phosphate fertilizer for nitrogen conservation in pig manure composting[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 250: 53-59.
- [16] ZHAO B, WANG Y, MA L, et al. Adding an appropriate proportion of phosphogypsum ensured rice husk and urea composting to promote the compost as substrate utilization[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 344: 126301.
- [17] ZHANG J, CHEN G, SUN H, et al. Straw biochar hastens organic matter degradation and produces nutrient-rich compost[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 200: 876-883.
- [18] NIGUSSIE A, DUME B, AHMED M, et al. Effect of microbial inoculation on nutrient turnover and lignocellulose degradation during composting: A meta-analysis[J]. *Waste Management*, 2021, 125: 220-234.
- [19] OUDART D, ROBIN P, PAILLAT J M, et al. Modelling nitrogen and carbon interactions in composting of animal manure in naturally aerated piles[J]. *Waste Management*, 2015, 46: 588-598.
- [20] FENG C L, ZENG G M, HUANG D L, et al. Effect of ligninolytic enzymes on lignin degradation and carbon utilization during lignocellulosic waste composting[J]. *Process Biochemistry*, 2011, 46(7): 1515-1520.
- [21] CHEN C Y, MEI H C, CHENG C Y, et al. Enhancing the conversion of organic waste into biofertilizer with thermophilic bacteria[J]. *Environmental Engineering Science*, 2012, 29(7): 726-730.
- [22] ZHANG J, ZENG G, CHEN Y, et al. Impact of Phanerochaete chrysosporium inoculation on indigenous bacterial communities during agricultural waste composting[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013, 97: 3159-3169.
- [23] MUPONDI L T, MNKENI P N S, BRUTSCH M O. The effects of goat manure, sewage sludge and effective microorganisms on the composting of pine bark[J]. *Compost science & utilization*, 2006, 14(3): 201-210.
- [24] TACCARI M, STRINGINI M, COMITINI F, et al. Effect of Phanerochaete chrysosporium inoculation during maturation of co-composted agricultural wastes mixed with olive mill wastewater[J]. *Waste Management*, 2009, 29(5): 1615-1621.
- [25] GAO X, XU Z, LI Y, et al. Bacterial dynamics for gaseous emission and humification in bio-augmented composting of kitchen waste[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 801: 149640.
- [26] LI H, TAN L, LIU W, et al. Unraveling the effect of added microbial inoculants on ammonia emissions during co-composting of kitchen waste and sawdust: Core microorganisms and functional genes[J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 874: 162522.
- [27] 赵啸林, 刘朝斌, 耿增超, 等. 菌剂和辅料对核桃青皮堆肥进程及腐熟度的影响[J]. *西北林学院学报*, 2023, 38(2): 153-159, 216.
- ZHAO Xiaolin, LIU Chaobin, GENG Zengchao, et al. Effects of Bacterial Agents and Excipients on Composting Process and Maturity of Walnut Green Peel[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2023, 38(2): 153-159. (in Chinese with English abstract)
- [28] ZHANG Y, WEI Z, GUO J, et al. Resource utilization of mink manure: functional microbial inoculation to elevate the bioavailability of organic nitrogen during composting[J].

- [Bioresource Technology](#), 2022, 353: 127149.
- [29] PRASHIJA K V, PARTHASARATHI K. Integrated system of managing and utilizing lignocellulosic wastes: composting and vermicomposting with microbial inoculants[J]. [African Journal of Biological Sciences](#), 2020, 2(2): 40-57.
- [30] HEDGES L V, GUREVITCH J, CURTIS P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. [Ecology](#), 1999, 80(4): 1150-1156.
- [31] LI S, LI J, YUAN J, et al. The influences of inoculants from municipal sludge and solid waste on compost stability, maturity and enzyme activities during chicken manure composting[J]. [Environmental technology](#), 2017, 38(13/14): 1770-1778.
- [32] ROSENTHAL R. The file drawer problem and tolerance for null results[J]. [Psychological bulletin](#), 1979, 86(3): 638-641.
- [33] ZHAO M, LIU D, ZHOU J, et al. Ammonium stress promotes the conversion to organic nitrogen and reduces nitrogen loss based on restructuring of bacterial communities during sludge composting[J]. [Bioresource Technology](#), 2022, 360: 127547.
- [34] XU Z M, LI R H, LIU T, et al. Effect of inoculation with newly isolated thermotolerant ammonia-oxidizing bacteria on nitrogen conversion and microbial community during cattle manure composting[J]. [Journal of Environmental Management](#), 2022, 317: 115474.
- [35] ZHANG Y, ZHAO Y, CHEN Y, et al. A regulating method for reducing nitrogen loss based on enriched ammonia-oxidizing bacteria during composting[J]. [Bioresource Technology](#), 2016, 221: 276-283.
- [36] XIE K, JIA X, XU P, et al. Improved composting of poultry feces via supplementation with ammonia oxidizing archaea[J]. [Bioresource Technology](#), 2012, 120: 70-77.
- [37] ZHAO Y, LI W, CHEN L, et al. Effect of enriched thermotolerant nitrifying bacteria inoculation on reducing nitrogen loss during sewage sludge composting[J]. [Bioresource Technology](#), 2020, 311: 123461.
- [38] YANG W, ZHANG L. Addition of mature compost improves the composting of green waste[J]. [Bioresource Technology](#), 2022, 350: 126927.
- [39] 周喜荣, 张丽萍, 蒋鹏, 等. 牛粪与秸秆类废弃物配比好氧发酵新工艺对堆肥效果的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(6): 75-83.
ZHOU Xirong, ZHANG Liping, JIANG Peng, et al. Effect of new process of aerobic fermentation of cow manure and straw waste on composting[J]. [Agricultural Research in the Arid Areas](#), 2020, 38(6): 75-83. (in Chinese with English abstract)
- [40] LI C, LI H, YAO T, et al. Microbial inoculation influences bacterial community succession and physicochemical characteristics during pig manure composting with corn straw[J]. [Bioresource Technology](#), 2019, 289: 121653.
- [41] 张国言, 董元杰, 孙桂阳, 等. 复合菌剂对兔粪堆肥碳氮转化与损失的影响[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(11): 153-165.
ZHANG Guoyan, DONG Yuanjie, SUN Guiyang, et al. Effects of compound bacterial inoculant on the conversion and loss of carbon and nitrogen during rabbit manure composting[J]. [Journal of China Agricultural University](#), 2022, 27(11): 153-165. (in Chinese with English abstract)
- [42] STEINER C, DAS K C, MELEAR N, et al. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar[J]. [Journal of environmental quality](#), 2010, 39(4): 1236-1242.
- [43] HUANG Y, LI D, WANG L, et al. Decreased enzyme activities, ammonification rate and ammonifiers contribute to higher nitrogen retention in hyperthermophilic pretreatment composting[J]. [Bioresource technology](#), 2019, 272: 521-528.
- [44] BERNAL M P, ALBURQUERQUE J A, MORAL R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review[J]. [Bioresource Technology](#), 2009, 100(22): 5444-5453.
- [45] 钟珍梅, 陆蒸, 林忠宁, 等. 菌剂作用下牛床垫料发酵过程可溶性碳氮变化[J]. 福建农业学报, 2021, 36(11): 1373-1379.
ZHONG Zhenmei, LU Zheng, LIN Zhongning, et al. Change on Soluble Carbon and Nitrogen in Cow Bed Material during Composting[J]. [Fujian Journal of Agricultural Sciences](#), 2021, 36(11): 1373-1379. (in Chinese with English abstract)
- [46] 贺琪, 李国学, 张亚宁, 等. 高温堆肥过程中的氮素损失及其变化规律[J]. 农业环境科学学报, 2005(1): 169-173.
HE Qi, LI Guoxue, ZHANG Yaning, et al. N Loss and Its Characteristics During High Temperature Composting[J]. [Journal of Agro-Environment Science](#), 2005(1): 169-173. (in Chinese with English abstract)
- [47] CAO Y, WANG X, BAI Z, et al. Mitigation of ammonia, nitrous oxide and methane emissions during solid waste composting with different additives: a meta-analysis[J]. [Journal of Cleaner Production](#), 2019, 235: 626-635.
- [48] KAUR A, KATYAL P. Microbial interventions for composting of organic and lignocellulose waste[J]. [Applied Biochemistry and Microbiology](#), 2021, 57: 127-132.
- [49] SHUKLA L, LANDE S, PARRAY R, et al. Recycling flower waste to humus rich compost using effective microbial consortium and mechanical intervention[J]. [Indian Journal of Agricultural Sciences](#), 2019, 89(7): 1200-1206.

Effects of adding inoculants on improving the nitrogen content of compost by Meta analysis

WANG Yue¹, DING Xiaoyan², WANG Bo³, XUE Xianle¹, GOU Hongcheng^{1,2}, JIANG Zhengbo^{1,2},
WEI Yuquan^{1,2}, DING Guochun¹, LI Ji^{1,2}✉

(1. College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing, 100193, China; 2. Organic Recycling Institute (Suzhou) of China Agricultural University, Suzhou 215100, China; 3. Inner Mongolia Academy of Agriculture & Animal Husbandry Sciences, Institute of Animal Nutrition and Feed, Hohhot 01003, China)

Abstract: Composting has been recognized as a pivotal technology for the resourceful management of organic waste. Much attention has also gained, due to its harmlessness, resourcefulness, and reduction of carbon emission. However, there is a serious and vast amount of nitrogen (a critical nutrient) loss during composting. Fortunately, microbial agents can be incorporated to mitigate this nitrogen loss. This research aims to delve into the various influencing factors on the nitrogen content (total nitrogen content, carbon-nitrogen ratio, ammonium nitrogen, and nitrate nitrogen) and loss (ammonia emission, and total nitrogen loss) during composting, including the type and source of microbial agents, the dosage of inoculation, the composting materials, the composting modes, and the scale of production. The results found that the inoculants added significantly enhanced the total nitrogen (19.34%), ammonium nitrogen (40.77%), and nitrate nitrogen (2.30%) content, while there was a decrease in the emission of ammonia (-14.91%), decreasing C/N (-37.87%) and the total nitrogen loss (-29.68%) at the same time. The microbial inoculants were also dominant in the preservation of nitrogen within the compost. Local inoculants (namely indigenous agents) were selected to be extracted from the composting environment. There was remarkable adaptivity in the same and complex environment. The best performance was achieved in improving the total nitrogen content of the compost (16.9%), compared with the other three types of inoculants. It was more favorable for nitrogen fixation and emission reduction in the composting process. In the addition of microbial agents at a rate of less than 2%, there was the most pronounced effect on the total nitrogen content and C/N ratio of the composts. This approach was contrary to the common belief that the higher quantities of microbial agents always yielded better performance. Interestingly, there was the most significant impact on the increase in ammonium nitrogen content, when the addition rate was less than 1%. Since cellulose was preferred to degrade microorganisms, the addition of inoculants accelerated the degradation of organic matter rather than nitrogen. Therefore, the content of organic matter was much lower than that of the total nitrogen in the compost. In addition, the C/N ratio was significantly reduced with the increasing dose range of inoculants. Much emphasis was also put on the type of composting raw materials. Materials with an initially low C/N ratio, such as poultry and livestock manure, failed to effectively respond to the addition of microbial agents for nitrogen fixation as other materials. Thus the inoculants added shared less effect on the total nitrogen content of compost than other types of raw materials. Furthermore, reactor composting was identified as an exceptional approach for nitrogen fixation and loss reduction. The best performance was achieved to conserve the nitrogen in compost with the exception of traditional composting. Therefore, the microbial agents in composting significantly enhanced the nitrogen content of the final product. The resources of the inoculant, especially local inoculants, shared the best effect on nitrogen conservation. The reactor was also the best way for composting than the conventional pile and windrow process.

Keywords: composting; inoculants; nitrogen conservation; influencing factor; Meta analysis