

周 舟,王 俊,张杏雨,等. 有机肥对水稻产量和温室气体排放影响的研究进展[J]. 江苏农业科学,2024,52(6):19–25.
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2024.06.003

有机肥对水稻产量和温室气体排放影响的研究进展

周 舟,王 俊,张杏雨,刘立军

(扬州大学农学院/江苏省作物遗传生理重点实验室/江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心,江苏扬州 225009)

摘要:水稻是我国最主要的粮食作物,稻田是农业温室气体重要排放源。在水稻种植和研究中,有机肥因其有机质含量高、养分全面、肥效稳定等特性被广泛应用。有机肥能够改善稻田土壤的理化性质,改变土壤微生物的活性和群落结构,进而直接或间接影响稻田温室的气体排放。然而,有机肥种类繁多,不同类型有机肥对稻田土壤的作用机理及影响温室气体排放的机制存在一定的复杂性。本文以有机肥对土壤理化性质的影响为出发点,系统综述有机肥对水稻根系、地上部生长、产量及其构成因素的影响,阐述有机肥通过改变土壤碳氮比以及土壤产甲烷菌、甲烷氧化菌等微生物活性等途径,直接或间接影响稻田甲烷和氧化亚氮排放的生理机制,并阐述不同类型有机肥对稻田甲烷、氧化亚氮排放的影响。结合国内外研究进展,对不同类型有机肥增减排稻田甲烷、氧化亚氮能力的文献进行梳理,提出未来有机肥对水稻生产和稻田温室气体排放关系的研究方向,以期为更好地揭示有机肥对水稻产量形成、稻田温室气体排放的作用机制及为稻田温室气体减排提供理论依据。

关键词:有机肥;水稻;产量;温室气体;微生物活性;生理机制;研究进展

中图分类号:S511.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002–1302(2024)06–019–06

我国是水稻种植大国,水稻种植面积约为 $3.01 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[1]。在水稻生产过程中需要消耗大量的肥料资源。近年来,随着化肥用量的增加,土壤中有有机质含量迅速提高,水稻产量也得到了显著提高。然而过量或长期施用无机化肥,会导致土壤有机质存量下降,影响土壤微生物的活性,破坏土壤肥力^[2]。与普通无机肥相比,有机肥能够改善土壤肥力,调控土壤与肥料养分的释放强度和速率,提高作物的氮肥利用率,使作物在各生育阶段得到稳定持续的均衡养分供给,从而促进作物生长,提高作物结实率和产量^[3]。

近年来全球气候变暖问题愈发严峻,甲烷(CH_4)、氧化亚氮(N_2O)等温室气体的浓度不断上升。稻田作为农田温室气体的主要排放源,其 CH_4 、 N_2O 的排放总量高于其他谷物种植系统^[4],约占全球农业生产活动 CH_4 、 N_2O 排放总量的15%、11%^[5],对全球温室效应的影响不言而喻。化肥的过量施用,使得产甲烷细菌、甲烷氧化细菌大量繁

殖,硝化反应等一系列反应增加^[6–7],导致 CH_4 、 N_2O 的排放量增多。已有大量研究表明,有机肥替代化肥施用,在一定程度上能够减少温室气体排放。我国有机肥资源丰富,种类多样,对水稻生长的影响不尽相同。鉴于此,本文综述有机肥对水稻产量形成和稻田温室气体排放的影响,以期为水稻高效高产栽培和稻田温室气体减排提供理论与实践依据。

1 有机肥概念及分类

有机肥是指主要来源于植物和(或)动物,经过发酵腐熟的含碳有机物料,其功能是改善土壤肥力、为植物提供营养、提高作物品质^[8]。根据有机肥的原料来源和生产方式,可将其分为农家有机肥、商品有机肥两大类。

1.1 农家有机肥

农家有机肥是指人畜排泄物以及动植物残体等有机物经过腐熟、发酵、沤制而形成的一种缓效肥料。农家有机肥种类繁多,主要分为粪尿肥、堆沤肥、绿肥、杂肥(表1)。

1.2 商品有机肥

商品有机肥是指以人畜粪便、动植物残体等有机物料为主要原料,经过一系列物理、生物、化学技术处理,去除对农作物有害的物质后达到国家标准

收稿日期:2023–03–24

基金项目:国家自然科学基金(编号:32071947、31871557)。

作者简介:周 舟(1999—),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要从事水稻栽培生理研究。E-mail:1924227671@qq.com。

通信作者:刘立军,博士,教授,博士生导师,主要从事作物栽培生理与作物营养管理。E-mail:ljliu@yzu.edu.cn。

表 1 有机肥种类、主要原料及其养分构成和使用阶段

种类	主要原料	养分构成	使用阶段	文献
粪尿肥	人畜粪尿等	有机质、氮、磷、钾、纤维素、蛋白质等	基肥、追肥	[9]
堆沤肥	杂草、秸秆、沼渣、泥土等	有机质、氮、磷、钾等	基肥	[10]
绿肥	紫云英、黑麦草、油菜等	有机质、氮、磷、钾等	基肥	[11]
杂肥	污泥、油粕、腐殖酸等	有机质、氮、磷、钾、钙、纤维素、蛋白质等	基肥、追肥	[12]

的有机肥料^[8]。商品有机肥主要由表 1 中 1 种或多种资源为原料加工生产而来。按照成分划分,商品有机肥目前主要分为生物有机肥、精制有机肥、有机无机复混肥 3 类。

2 有机肥对土壤理化性质的影响

土壤理化性质是衡量土壤肥力的重要指标。土壤的 pH 值、孔隙度、容重、保水性能、硬度、团聚体结构等性状直接影响水稻的生长发育和产量形成^[13]。Rendana 等研究发现,与施化肥处理相比,施有机肥处理的土壤 pH 值显著提高,说明施用有机肥可以缓解长期施用化肥造成的土壤酸化问题^[14]。施用有机肥,能够增加土壤孔隙度,降低土壤容重,改善土壤腐殖质。柳开楼等对不同土层深度稻田土壤的团聚体进行研究,发现有机肥能够显著提高 0~20 cm 土层土壤中各团聚体的质量百分比和平均质量直径,团聚体结构的稳定性显著提高,从而促进土壤磷素的供给^[15]。有机肥对土壤化学性质的影响主要表现为土壤有机质、铵态氮、磷、钾等含量的增加,进而调节土壤的碳氮比^[16]。严建立等使用不同调理剂对低丘新垦耕地土壤的物理性状进行改良,结果显示,商品有机肥、水稻秸秆、紫云英可明显提高土壤的有机碳含量^[17]。然而,有机肥可能存在重金属含量超标^[18],引发土壤重金属污染,例如畜禽粪便就是我国南方地区土壤重金属的主要来源^[19]。夏文建等对长期施用化肥、有机肥 2 种处理下稻田土壤的重金属有效性进行研究,发现有机肥虽然提高了土壤的重金属总量,但降低了有效态重金属含量,从而降低了重金属活性^[20]。

3 有机肥对水稻生长和产量形成的影响

施用有机肥能够促进水稻根系的生长,这是因为施用有机肥之后,土壤通透性增强,水稻根系得以纵深发展,吸收更多养分,根系活性提高。赵红霞等的研究表明,与施化肥相比,施有机肥能够提高根系氧化力,从而提高水稻的抗逆能力^[21]。

Perdani 等对早稻施用生物有机肥,结果显示,与化肥处理相比,有机肥处理的水稻须根大量增加,根系体积增大,水稻根系对养分的吸收利用效率得到提高^[22]。此外,有机肥富含胡敏酸、富里酸等物质,可促进作物根系呼吸,最终促进水稻根系生长^[23]。

有机肥对水稻地上部生长发育的影响,主要表现在对群体质量指标的影响上。与常规施肥相比,施用有机肥能够促进水稻分蘖,增加叶面积指数,从而提高群体光合生产能力,增强光合产物的同化能力,促进干物质积累^[24]。怀宝东等研究发现,水稻分蘖末期之后,有机肥处理的分蘖数、净光合速率、蒸腾速率、地上部干重、叶面积、叶长宽比等指标均得到提高,而在分蘖末期之前则低于常规施肥处理;可能是因为一次性施用全量有机肥会导致肥效释放量过大,从而对植株生长发育产生抑制作用^[25]。此外,有机肥分解时能够产出大量 CO₂,促进水稻光合作用,显著增加水稻叶片的 SPAD 值,从而促进水稻碳水化合物的累积^[26]。

合理施用有机肥是增加水稻有效穗数、穗粒数等产量构成因素的有效手段^[27]。施用有机肥能够增加土壤的有机质、全氮、有效磷含量,促进水稻对土壤养分的吸收利用,从而提高水稻产量。戴竞雄等探究长期施肥对水稻养分吸收利用的影响时发现,与不施肥相比,施用有机肥能够增加水稻的每穗粒数,且籽粒产量增幅达到 61.1%~97.7%^[28]。有机肥和无机肥配施情况下,水稻产量能够进一步增加。杨胜玲等将有机肥与无机肥配施,结果表明,水稻地上部氮素总积累量显著增加,且氮素转运量对籽粒的贡献率提高,有利于养分向籽粒转运,从而提高水稻粒重,促进水稻产量增加^[29]。一般而言,有机肥中的养分释放速率较慢,前期养分供应较少,不能满足产量对养分的需求,而在后期养分释放相对较多,能够有效提高水稻的成穗率^[30]。但当有机肥完全替代化肥施用,则会导致水稻抽穗期延长,最终造成作物产量降低^[31]。因此有机肥的施用量应当保持在适宜范围内。

4 有机肥施用对稻田 CH_4 排放的影响

4.1 有机肥对 CH_4 排放的影响机制与途径

4.1.1 通过向土壤提供产 CH_4 前体影响 CH_4 排放

有机质降解为产甲烷菌提供了丰富的前体物质^[32]。前人的研究表明,以乙酸为底物的微生物甲烷合成途径是 CH_4 产生的主要途径^[33-35],即乙酸盐途径: $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$ 。且有机肥施入后被土壤中的厌氧细菌逐步降解为简单的糖类、醇、有机酸等小分子化合物,为乙酸盐途径提供大量的反应底物,最后产甲烷菌将这些前体物质转化成 CH_4 。吴家梅等研究发现,施猪粪处理与施化肥处理无显著差异,施猪粪处理的 CH_4 排放量相较于其他有机肥最低,其原因可能是猪粪中的有机碳主要以大分子形式存在,前期无法为产甲烷菌提供足够的产甲烷基质^[36]。许多研究认为,与其他类型有机肥相比,秸秆直接还田对 CH_4 排放的影响最大且 CH_4 排放量最多,可能是因为秸秆直接还田时腐熟程度低,含有大量可供土壤微生物利用的有机物,为产甲烷菌提供了大量前体物质,从而提高土壤 CH_4 的产生和排放能力^[1,37-38]。

4.1.2 通过改善土壤理化性质影响土壤微生物活性而影响 CH_4 排放 有机肥中有机质含量高,含有丰富的活性官能团,具有较强的氧化还原能力,降解后土壤氧化还原电位下降^[39],导致土壤 pH 值升高;而有机质具有强大的缓冲能力,能够调节土壤反应,促使土壤酸碱度趋于中性且保水能力提高,利于增强产甲烷菌的活性,并降低甲烷氧化菌的活性^[32]。然而, CH_4 排放量是由产甲烷菌、甲烷氧化菌共同决定的,利于产甲烷菌的同时可能抑制甲烷氧化菌的活性。甲烷氧化菌活性受土壤含水量影响^[40]。苏秦等在研究有机培肥对土壤水分的影响时发现,与不施牛粪处理相比,施牛粪处理的土壤贮水量增加 15% 左右,土壤持水能力的提高增加造成含氧量降低,从而使产甲烷菌活性增强而甲烷氧

化菌活性降低,最终导致 CH_4 进一步产生与排放^[41]。此外,有机肥富含氮、磷、钾等大量元素以及铁、钴、镍、铜、锌等微量元素^[42],这些元素的输入也会通过影响微生物的活性而影响土壤甲烷的产生与氧化^[43],进而影响土壤 CH_4 的排放。

4.2 不同有机肥对 CH_4 排放量的影响

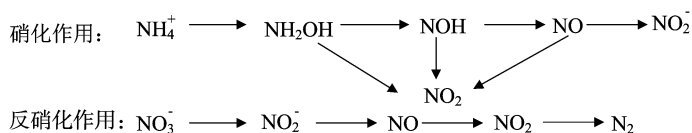
大量研究表明, CH_4 的排放量受有机肥类型的影响较大,且不同类型有机肥处理下, CH_4 的排放量不同。吴家梅等在等碳有机肥施入的情况下,发现稻草处理的 CH_4 排放量最大,而猪粪处理与化肥处理的 CH_4 排放量无显著差异,鸡粪处理的 CH_4 排放量最小,可能是因为鸡粪的铵态氮含量较高,对 CH_4 的产生起到了强烈的抑制作用^[36,44]。与之相似,邹建文等研究发现,与化肥处理相比, CH_4 的季节排放总量从高到低依次为菜饼处理、秸秆处理、化肥处理、牛厩肥处理、猪厩肥处理^[45]。陈美慈等在盆栽条件下研究了紫云英和沼渣肥对产甲烷菌数量和 CH_4 排放量的影响,结果表明,绿肥的 CH_4 排放量大于沼渣肥^[46]。对前人研究进行总结,有机肥类型对 CH_4 排放量的影响总体表现为堆沤肥 > 绿肥 > 杂肥 > 粪肥,其中油粕类杂肥的 CH_4 排放量最高,其次为秸秆堆沤肥,沼渣堆沤肥的 CH_4 排放量最小。有机肥种类对 CH_4 排放的影响机制十分复杂,也有许多学者认为有机肥的施用可以减少 CH_4 的排放。如沼渣经堆肥制沼气后,其中可供土壤微生物利用的有机物已基本消耗殆尽,施用后 CH_4 排放增量大大减少。因而有机肥类型对 CH_4 排放的影响有待进一步研究。

5 有机肥施用对 N_2O 排放的影响

5.1 有机肥对 N_2O 排放的影响机制与途径

5.1.1 通过调节土壤 C/N 直接影响 N_2O 的排放

稻田土壤 N_2O 的排放主要来自于硝化与反硝化过程^[47],过程分别如下^[48]。



有机肥以 NH_4^+ 、 NO_3^- 这 2 种形式提供大量的无机氮,从而增加 N_2O 的排放量。如动物粪便向土壤提供大量的 NH_4^+ ,直接影响硝化群落的结构;施用后,肥料中的有效氮矿化也会逐渐释放 NH_4^+ ^[49],进

而调节土壤 C/N。有机肥的 C/N 与 N_2O 产生量呈正相关性;有机碳是反硝化基质,高 C/N 有机物料的有机碳含量高,因而硝化作用与反硝化作用更加活跃, N_2O 的产生量也随之更高。Wu 等将不同有

机肥与化肥配施,结果发现,猪粪、鸡粪、稻草与化肥配施均会降低稻田 N_2O 的排放量,表现为猪粪、鸡粪 > 稻草,可能是因为稻草的 C/N 大,猪粪和鸡粪的 C/N 小,稻草易于固定中的土壤有效氮,从而减少 N_2O 的排放;而猪粪和稻草则相反,易于矿化分解释放有效氮,从而增加 N_2O 排放量^[50]。Chen 等在研究作物残渣改良剂对土壤的 N_2O 排放影响时发现,与未改良对照剂相比,作物残渣改良剂通常会增加土壤的 N_2O 排放;效应大小与作物残留物的 C/N 呈显著负相关;当作物残体的 C/N < 45 时,作物残体改良对土壤 N_2O 排放产生显著的正效应;C/N 为 45 ~ 100 时,产生轻微的正效应;C/N > 100 时,产生轻微的负效应^[51]。Chadwick 等进一步研究发现,当 C/N 为 30 左右时,有利于 N_2O 的排放^[52]。

5.1.2 通过影响土壤微生物活性间接影响 N_2O 的排放 有机肥提供不稳定的碳化合物,增加异养反硝化微生物的活性,并触发 N_2O 的排放^[53-56]。Shi 等在研究有机肥投入对氮循环功能微生物群落结构的影响时发现,异养细菌、硝化细菌同时存在的条件下,异养细菌的多样性与有机碳源复杂程度呈正相关,且土壤有机碳不仅是反硝化过程中非常重要的电子供体,也是异养细菌重要的能量来源^[57]。农田土壤中的 NH_4^+ 在硝化微生物的作用下转变为 NO_3^- ,施入有机肥提高了土壤有机碳含量,而 C/N 较高时,异养细菌生长更快且会与硝化细菌竞争有效氮,硝态氮含量增加,从而间接导致 N_2O 排放量的增加^[58-59]。

5.1.3 有机肥对 N_2O 排放量的影响 稻田 N_2O 的排放不仅受到外源 C、N 供应水平的影响,而且与有机肥料的种类有关。由于有机肥种类繁多,因此前人的研究结果不尽相同。在众多有机肥类型中,秸秆具有低氮量、高 C/N 的性质,能够显著降低土壤 N_2O 的排放,因而有关秸秆还田的研究最为普遍。卜容燕等研究发现,秸秆还田后,稻田中 N_2O 周年累积排放量显著降低 25.32%^[60]。魏宗辉等的研究显示,绿肥处理的早稻、晚稻 N_2O 排放量分别降低 69.1%、7.3%,蚕沙处理的早稻、晚稻 N_2O 排放量分别降低 86.3%、67.2%^[61]。肖倩等研究发现,水稻在不同有机肥处理下, N_2O 排放量表现为尿素 > 人粪、鸡粪 > 猪粪 > 不施氮肥、牛粪,其原因是不同种类的有机肥供氮能力存在差异^[62]。近 10 年研究(表 2)表明,有机肥施入能够减少稻田 N_2O 的排放,但对 CH_4 的影响存在争议,可能是由于其制

备原料、腐熟程度以及气候等因素不同,故对稻田温室气体的排放效应各不相同。

表 2 不同类型的有机肥对稻田温室气体排放的影响

有机肥种类	主要原料	CH_4 排放率 (%)	N_2O 排放率 (%)	文献
粪尿肥	鸡粪	+49.3 ~ +142.2	-26.6 ~ -43.5	[36]
	牛粪	+45.6	-13.4	[63]
	猪粪	+37.0 ~ 51.0	-4.89 ~ -7.09	[64]
堆沤肥	秸秆	+250 ~ +340	-5 ~ -31.4	[60]
	沼液、沼渣	-28	-74 ~ -79	[65]
绿肥	紫云英	+37.88	-7.3	[66]
	黑麦草	+116.73	-17.97 ~ -34.39	[66]
杂肥	城市污泥	+66.14	-35.7 ~ -42.9	[67-68]

注:“-”表示降低,“+”表示增加。

6 研究展望

提高水稻产量、促进稻田温室气体减排,对我国环境保护和农业可持续发展有着极为重要的意义。有机肥的施用对稻田温室气体排放、水稻产量等影响已有一定的研究成果,但由于有机肥种类繁多,对温室气体排放的影响机制十分复杂,目前仍存在许多争议。针对目前研究中存在的主要问题,今后应加强以下几个方面的研究。

6.1 有机肥对水稻根系形态生理的影响

笔者所在课题组关于水稻根系形态生理与稻田甲烷排放关系的初步研究表明,根系形态生理指标如水稻根干重、根长、根系氧化力、根系分泌物等与孕穗期稻田 CH_4 的排放通量均呈极显著负相关,水稻根系分泌物中的琥珀酸、柠檬酸、苹果酸可促进根际土壤甲烷氧化菌的丰度与活性,降低外源碳输入,减少产甲烷基质,从而减少 CH_4 的产生^[69-70]。目前针对有机肥对水稻根系形态生理影响的研究较少,仅有部分研究表明,有机肥能够提高根系氧化力,富含促进根系生长的胡敏酸、富里酸等物质,因而有机肥对水稻根系分泌物的影响亟待研究,对温室气体减排具有重要意义。

6.2 有机肥对根际、非根际土壤微环境的影响

施用有机肥能够激活土壤中的有益菌群,提高硝酸还原酶的活性,提高土壤微生物量氮含量,同时显著提高土壤微生物量碳和微生物的生长速率,从而影响外源碳氮的代谢能力。而根际和非根际土壤中根系分泌物的差异,导致微生物的碳源利用效率对有机肥的响应特征不同,因而对温室气体排

放的影响存在差异。目前这方面的研究还比较少,以后应进行更加有针对性和必要性的研究。

6.3 生物有机肥对土壤性状和温室气体排放的影响

近年来,随着研究者对土壤微生物的深入研究,一些土壤碳循环、氮循环相关功能性细菌如固氮菌、溶磷菌等逐渐被认识,生物有机肥中含有 150 多种此类有益微生物,有益微生物进入土壤后与土壤中微生物形成相互间的共生增殖关系,抑制有害菌生长并转化为有益菌,有益菌在生长繁殖过程中产生大量的代谢产物,促使有机物分解转化,从而产生多种营养和刺激性物质,改善土壤的物理、化学、生物特性,直接或间接影响作物生长和温室气体排放^[71-73]。但整体来看,功能性微生物仍处于探究阶段,生物有机肥对土壤性状和温室气体影响的研究极少,因此,在后续的研究中应系统地对其进行分析与探讨。

参考文献:

- [1]徐春春,纪 龙,陈中督,等. 中国水稻生产、市场与进出口贸易的回顾与展望[J]. 中国稻米,2021,27(4):17-21.
- [2]王 科,李 浩,张 成,等. 化肥过量施用的危害及防治措施[J]. 四川农业科技,2017(9):33-35.
- [3]Ye L,Zhao X,Bao E,et al. Bio-organic fertilizer with reduced rates of chemical fertilization improves soil fertility and enhances tomato yield and quality[J]. Scientific Reports,2020,10:177.
- [4]Linquist B,van Groenigen K J,Adviento-Borbe M A,et al. An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops[J]. Global Change Biology,2012,18(1):194-209.
- [5]于海洋,张广斌,马 静,等. 稻田 CH₄ 和 N₂O 排放对大气 CO₂ 浓度升高响应的研究进展[J]. 土壤,2021,53(3):458-467.
- [6]Ma J,Li X L,Xu H,et al. Effects of nitrogen fertiliser and wheat straw application on CH₄ and N₂O emissions from a paddy rice field[J]. Soil Research,2007,45(5):359.
- [7]马艳芹,钱晨晨,孙丹平,等. 施氮水平对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(增刊2):128-134.
- [8]农业农村部种植业管理司. 有机肥料:NY/T 525—2021[S]. 北京:中国农业出版社,2021.
- [9]沈其荣. 土壤肥料学通论[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
- [10]方华舟,项智锋. 水稻秸秆堆沤肥对优质水稻品质的影响[J]. 中国稻米,2018,24(6):26-29.
- [11]吕本春,付利波,湛方栋,等. 绿肥作物矿化分解对土壤镉有效性的影响研究进展[J]. 农业资源与环境学报,2021,38(3):431-441.
- [12]徐秋桐,孔樟良,章明奎. 不同有机废弃物改良新复垦耕地的综合效果评价[J]. 应用生态学报,2016,27(2):567-576.
- [13]于 博,徐松鹤,任 琴,等. 秸秆还田研究进展及内蒙古玉米秸秆深翻还田现状[J]. 作物杂志,2022(2):6-15.
- [14]Rendana M,Ildris W M R,Abd Rahim S,et al. Effects of organic amendment on heavy metal and macronutrient contents in paddy soil[J]. Sains Malaysiana,2022,51(2):379-388.
- [15]柳开楼,都江雪,邹 磊,等. 长期施肥对不同深度稻田土壤团聚体磷素分配的影响[J]. 农业资源与环境学报,2022,39(6):1115-1123.
- [16]王小波,吴 翔,郭雪琦,等. 黑水虻虫粪对水稻生长及土壤理化性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(10):1874-1882.
- [17]严建立,章明奎,王道泽. 不同调理剂改良低丘新垦耕地土壤物理性状的效果[J]. 中国农学通报,2021,37(2):67-73.
- [18]穆虹宇,庄 重,李彦明,等. 我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析[J]. 环境科学,2020,41(2):986-996.
- [19]Peng H,Chen Y L,Weng L P,et al. Comparisons of heavy metal input inventory in agricultural soils in North and South China: a review[J]. Science of the Total Environment,2019,660:776-786.
- [20]夏文建,张丽芳,刘增兵,等. 长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响[J]. 环境科学,2021,42(5):2469-2479.
- [21]赵红霞,屠启澍. 有机肥对水稻根际微区养分的影响[J]. 西南农业大学学报,1992,14(1):82-85.
- [22]Perdani A Y,Dewi T K,Widowati T,et al. Utilization of bio organic fertilizers for increasing upland rice production [C]// IOP Conference Series (Earth and Environmental Science). Wuhan, 2019.
- [23]徐基胜,赵炳梓,张佳宝. 长期施有机肥和化肥对潮土胡敏酸结构特征的影响[J]. 土壤学报,2017,54(3):647-656.
- [24]叶文培,谢小立,王凯荣,等. 不同时期秸秆还田对水稻生长发育及产量的影响[J]. 中国水稻科学,2008,22(1):65-70.
- [25]怀宝东,隋文志,闫凤超,等. 施用有机肥对寒区水稻生长发育和产量的影响[J]. 现代化农业,2018(8):17-19.
- [26]唐海明,程爱武,徐一兰,等. 长期有机无机肥配施对双季稻区水稻干物质积累及产量的影响[J]. 农业现代化研究,2015,36(6):1091-1098.
- [27]方华舟,项智锋. 水稻秸秆堆沤肥对优质水稻产量及质量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2019(1):62-70.
- [28]戴竞雄,王 飞. 长期施肥对南方黄泥田水稻养分吸收利用的影响[J]. 中国土壤与肥料,2020(6):189-196.
- [29]杨胜玲,黄兴成,刘彦伶,等. 长期有机肥无机肥配施对水稻氮素吸收、转运及产量的影响[J]. 中国稻米,2021,27(6):63-68.
- [30]马凡凡,邢素林,甘曼琴,等. 有机肥替代化肥对水稻产量、土壤肥力及农田氮磷流失的影响[J]. 作物杂志,2019(5):89-96.
- [31]谢慧敏,吴 可,刘文奇,等. 海藻肥与微生物菌剂部分替代化肥对水稻产量及其构成因素的影响[J]. 作物杂志,2022(1):161-166.
- [32]沈仕洲,王 风,薛长亮,等. 施用有机肥对农田温室气体排放影响研究进展[J]. 中国土壤与肥料,2015(6):1-8.
- [33]Conrad R,Klose M,Noll M,et al. Soil type links microbial colonization of rice roots to methane emission[J]. Global Change Biology,2008,14(3):657-669.

- [34] Alpana S, Vishwakarma P, Adhya T K, et al. Molecular ecological perspective of methanogenic archaeal community in rice agroecosystem[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 596/597:136 – 146.
- [35] Conrad R. Contribution of hydrogen to methane production and control of hydrogen concentrations in methanogenic soils and sediments[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 1999, 28(3):193 – 202.
- [36] 吴家梅, 纪雄辉, 彭 华, 等. 不同有机肥对稻田温室气体排放及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(4):162 – 169.
- [37] 霍莲杰, 纪雄辉, 吴家梅, 等. 有机肥施用对稻田甲烷排放的影响及模拟研究[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(10):2084 – 2092.
- [38] 李 琳, 胡立峰, 陈 阜, 等. 长期不同施肥类型对稻田甲烷和氧化亚氮排放速率的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006(增刊2):707 – 710.
- [39] 陈袁波, 邓思宇, 余 珂, 等. 泥炭沼泽湿地土壤分解过程中可溶性有机质氧化还原能力变化特征及其影响机制[J]. *生态学报*, 2020, 40(24):8948 – 8957.
- [40] 丁维新, 蔡祖聪. 土壤甲烷氧化菌及水分状况对其活性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2003(1):100 – 103.
- [41] 苏 秦, 贾志宽, 韩清芳, 等. 宁南旱区有机培肥对土壤水分和作物生产力影响的研究[J]. *植物营养与肥科学报*, 2009, 15(6):1466 – 1469.
- [42] 张万钦, 吴树彪, 郎乾乾, 等. 微量元素对沼气厌氧发酵的影响[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(10):1 – 11.
- [43] Nykänen H, Vasander H, Huttunen J T, et al. Effect of experimental nitrogen load on methane and nitrous oxide fluxes on ombrotrophic boreal peatland[J]. *Plant and Soil*, 2002, 242(1):147 – 155.
- [44] 万运帆, 李玉娥, 高清竹, 等. 不同农业措施下冬小麦田 N_2O 排放通量的特征[J]. *中国农业气象*, 2008(2):130 – 133.
- [45] 邹建文, 黄 耀, 宗良纲, 等. 不同种类有机肥施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合影响[J]. *环境科学*, 2003, 24(4):7 – 12.
- [46] 陈美慈, 闵 航, 赵宇华, 等. 有机肥和无机肥对水稻土产甲烷的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 1998, 4(4):366 – 370.
- [47] Li H, Meng J, Liu Z Q, et al. Effects of biochar on N_2O emission in denitrification pathway from paddy soil: a drying incubation study[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 787:147591.
- [48] 夏仕明, 陈 洁, 蒋玉兰, 等. 稻田 N_2O 排放影响因素与减排研究进展[J]. *中国稻米*, 2017, 23(2):5 – 9.
- [49] Ouyang Y, Norton J M. Short – term nitrogen fertilization affects microbial community composition and nitrogen mineralization functions in an agricultural soil[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2020, 86(5):eo2278 – eo2219.
- [50] Wu J M, Huo L J, Ji X H, et al. Effects of organic manure application on active soil organic carbon and methane emission in paddy soils[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(18):6167 – 6175.
- [51] Chen H H, Li X C, Hu F, et al. Soil nitrous oxide emissions following crop residue addition: a meta – analysis[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(10):2956 – 2964.
- [52] Chadwick D R, Pain B F, Brookman S K E. Nitrous oxide and methane emissions following application of animal manures to grassland[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1):277 – 287.
- [53] Lowrance R, Johnson J C Jr, Newton G L, et al. Denitrification from soils of a year – round forage production system fertilized with liquid dairy manure[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(6):1504 – 1511.
- [54] Zhu X A, Silva L C R, Doane T A, et al. Quantifying the effects of green waste compost application, water content and nitrogen fertilization on nitrous oxide emissions in 10 agricultural soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(3):912 – 918.
- [55] Rodriguez V, de los Angeles Valdez – Perez M, Luna – Guido M, et al. Emission of nitrous oxide and carbon dioxide and dynamics of mineral N in wastewater sludge, vermicompost or inorganic fertilizer amended soil at different water contents: a laboratory study[J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 49:263 – 267.
- [56] Zhang J B, Müller C, Cai Z C. Heterotrophic nitrification of organic N and its contribution to nitrous oxide emissions in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 84:199 – 209.
- [57] Shi Y L, Zhang Q W, Liu X R, et al. Organic manure input and straw cover improved the community structure of nitrogen cycle function microorganism driven by water erosion[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2022, 10(1):129 – 142.
- [58] Das S, Ghosh A, Adhya T K. Nitrous oxide and methane emission from a flooded rice field as influenced by separate and combined application of herbicides bensulfuron methyl and pretilachlor[J]. *Chemosphere*, 2011, 84(1):54 – 62.
- [59] Kindaichi T, Ito T, Okabe S. Ecophysiological interaction between nitrifying bacteria and heterotrophic bacteria in autotrophic nitrifying biofilms as determined by microautoradiography – fluorescence *in situ* hybridization[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, 70(3):1641 – 1650.
- [60] 卜容燕, 李 敏, 韩 上, 等. 有机无机肥配施对双季稻轮作系统产量、温室气体排放和土壤养分的综合效应[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(1):145 – 153.
- [61] 魏宗辉, 胡钧铭, 刘顺翔, 等. 有机资源等氮替代化肥对免耕稻田 N_2O 排放及水稻产量的影响[J]. *中国农业气象*, 2021, 42(7):561 – 571.
- [62] 肖 倩, 武 升, 刘 莹, 等. 不同有机养分替代化肥对小麦产量、氮肥利用率及土壤肥力的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(10):2291 – 2300.
- [63] 石生伟, 李玉娥, 李明德, 等. 不同施肥处理下双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的全年观测研究[J]. *大气科学*, 2011, 35(4):707 – 720.
- [64] 杨 丹, 叶祝弘, 肖 珣, 等. 化肥减量配施有机肥对早稻田温室气体排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(11):2443 – 2450.
- [65] 孙国峰, 郑建初, 陈留根, 等. 猪粪沼液施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放及温室效应的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2012, 17(5):124 – 131.

袁伟涛,张 婷,马翠柳,等. 畜禽粪污堆肥品质的提升策略[J]. 江苏农业科学,2024,52(6):25-35.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.06.004

畜禽粪污堆肥品质的提升策略

袁伟涛¹, 张 婷¹, 马翠柳¹, 王凯英¹, 刘晗璐²

(1. 中国农业科学院特产研究所/特种动物饲养及综合利用创新中心/吉林省特种动物微生物饲料工程研究中心, 吉林长春 130117;

2. 赤峰学院, 内蒙古赤峰 024000)

摘要:好氧堆肥是有机固体废弃物无害化、资源化和减量化的重要技术,是废弃物与土壤碳库间的桥梁。堆肥将废弃物低耗快速的自然降解并转化为肥料,肥料中腐殖质等养分是良好的土壤修复剂和调理剂,可抵消农业活动造成的有机质损失、提升碳的固存并维持土壤功能。然而,堆肥原料的复杂性和可变性是实现有机质快速腐殖化和维持有机肥质量所面对的巨大挑战。总结堆肥有机质的转化原理,综述工艺参数优化的关键环节、多类型添加剂在生产中的应用效果以及新型堆肥技术前景,进而提出以下几点建议:(1)对辅料进行破壁前处理或添加具有高效木质素分解能力的生物制剂,提高纤维类成分的分解,减少堆肥初期有机质快速矿化损失。(2)降低 pH 值可提高体系中 $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$ 的值,减少氨气挥发;提高氧含量和氨氧化细菌生物量,促进氨氧化和硝化作用,避免反硝化和不完全硝化导致的氮损失。(3)添加氧化剂提供充足的氧化还原电位,有效减少含硫有机质降解矿化后 VSCs 的释放。可为有机物高效腐殖化、资源化,减轻环境压力促进农业可持续发展提供参考和依据。

关键词:畜禽粪污;堆肥;物质转化;工艺优化;添加剂

中图分类号:S141.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)06-0025-11

随着集约化养殖的发展,畜禽粪污产量急剧增加,已成为农业面的首要污染源。据统计,2020 年畜牧业粪污量已达到 38 亿 $\text{t}^{[1]}$ 。周海宾等认为,我国 89.44% 的规模化养殖场普遍采用堆肥处理固体粪便,其中采用简易堆沤处理的高达 85.90%^[2]。

畜禽粪便中的营养物质、病原体、重金属以及药物残留,若不能妥善处理,则会造成严重的环境污染,甚至还会引发安全事故^[3]。粪便作为碳氮资源库,在堆肥过程中释放的大量 CH_4 、 CO_2 、 N_2O 等温室气体,既会造成环境污染,又会降低堆肥品质^[4-5]。粪便中含有多种致病菌和寄生虫虫卵,具有引发疾病传播的风险^[6-7]。好氧堆肥能有效杀死粪便中的致病菌,提高土壤中腐生菌的比例^[8]。堆肥在氨氧化细菌、硝化细菌等需氧微生物合成代谢作用下,将纤维素、蛋白质等大分子有机质转化为结构更稳定的可溶性腐殖质,如真菌在木质纤维素的降解中发挥关键作用、厚壁菌门参与可溶性有机

收稿日期:2023-08-23

基金项目:河北省科学技术项目(编号:21327308D);吉林省科技发展计划(编号:20200301019RQ)。

作者简介:袁伟涛(1998—),男,河南周口人,硕士研究生,从事特种经济动物微生态营养与调控研究。E-mail:2627783817@qq.com。

通信作者:刘晗璐,博士,研究员,从事特种经济动物微生态营养与调控研究。E-mail:liuhanlu@caas.cn。

[66] 聂江文,王幼娟,田 媛,等. 紫云英与化学氮肥配施对双季稻田 CH_4 与 N_2O 排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2018,24(3):676-684.

[67] Kitamura R, Sugiyama C, Yasuda K, et al. Effects of three types of organic fertilizers on greenhouse gas emissions in a grassland on andosol in southern Hokkaido, Japan[J]. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2021, 5:649613.

[68] 苗 茜,黄 琼,朱小莉,等. 有机肥等氮替代化肥对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 生态环境学报,2020,29(4):740-747.

[69] 李思宇,夏仕明,汪 浩,等. 水稻根系形态生理与稻田甲烷排放的关系研究[C]//2018 中国作物学会学术年会. 扬州,

2018:1.

[70] 陈 云,李思宇,杨建昌,等. 水稻根系形态生理与稻田甲烷排放关系的初步研究[C]//2019 年中国作物学会学术年会. 杭州,2019:1.

[71] 刘少文,殷 敏,褚 光,等. 土壤氮激发效应及其微生物机理研究进展[J]. 中国水稻科学,2019,33(4):303-312.

[72] 库永丽,徐国益,赵 骅,等. 微生物肥料对猕猴桃高齡果园土壤改良和果实品质的影响[J]. 应用生态学报,2018,29(8):2532-2540.

[73] 石奇海,徐永清,陈蒂薇,等. EM 生物有机肥不同施肥模式对马铃薯原种生产的影响[J]. 中国瓜菜,2020,33(9):39-