

超高温堆肥提高土壤养分有效性和水稻产量的机理

曹云¹, 黄红英^{1*}, 吴华山¹, 徐跃定¹, 陈应江²

(1 江苏省农业科学院循环农业研究中心/农业农村部种养结合重点实验室/江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心, 江苏南京 210014; 2 江苏沿海地区农业科学研究所, 江苏盐城 224002)

摘要:【目的】超高温堆肥发酵时间短, 铵态氮和有机酸含量均较高, 但发酵产物腐熟不完全。研究超高温堆肥施入土壤后对作物生长和产量的影响, 为其安全有效使用提供科学依据。【方法】采用两季盆栽试验, 设置了不施氮肥对照(N0)、单施化肥(CF)和等氮条件下分别以20%普通有机肥氮(CvC)、发酵原料氮(FRM)、超高温堆肥产物氮(HTC)与80%无机氮配施共5个处理。调查了水稻长势, 收获期测产, 并取样分析了氮磷钾吸收量, 同时测定了土壤中速效氮磷钾养分和微生物活性。【结果】HTC处理水稻产量、分蘖数、穗粒数、植株吸氮量和氮素回收率均最高, 2016、2017年HTC处理籽粒产量分别比CF处理提高了25.8%、32.8%, 比CvC处理提高了22.4%、16.5%, 水稻穗粒数分别比CvC提高了26.8%、37.5% ($P < 0.05$)。2016、2017年HTC处理总钾累积量分别比CvC高出45.5%、33.9% ($P < 0.05$)。两年试验中, CvC和HTC处理的水稻氮素回收率显著高于CF处理, HTC处理又高于CvC处理(2016年达显著水平)。水稻收获后, HTC处理的土壤有机碳、矿质氮含量显著高于CvC处理, 而CvC处理的土壤有效磷含量显著高于HTC处理。HTC处理土壤有机质中可溶性有机碳如挥发性有机酸、游离氨基酸等含量明显高于CvC处理, 因而土壤AWCD值最高, 微生物活性最强。CvC处理土壤微生物对碳水化合物、胺类的利用率较高, HTC处理的对羧酸、氨基酸类利用率较高。回归分析表明, 水稻产量与土壤电导率、土壤有机碳含量、土壤全氮含量及AWCD值呈显著的正相关关系; 相关分析表明, 土壤矿质氮含量、植株钾累计吸收量均与土壤全氮含量及AWCD值呈显著正相关关系。【结论】尽管超高温堆肥在物料腐熟程度上不如普通有机肥, 但该工艺处理时间短, 温度高, 在确保杀灭有害微生物的同时, 保留了较高的碳和氮含量。在20% N替代水平下, 施用超高温堆肥对水稻产量和氮素回收率的提升效果优于普通有机肥, 这与提高水稻钾吸收利用量、土壤矿质氮含量与微生物活性有关。

关键词: 超高温堆肥; 水稻; 氮素利用率; BIOLOG; 有机肥

Mechanisms of hyperthermophilic compost application in improving soil nutrient availability and rice yield

CAO Yun¹, HUANG Hong-ying^{1*}, WU Hua-shan¹, XU Yue-ding¹, CHEN Ying-jiang²

(1 Recycle Agricultural Research Center, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop and Livestock Integrated Farming, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, Nanjing, Jiangsu 210014, China; 2 Institute of Agricultural Sciences in the Coastal District of Jiangsu Province, Yancheng 224002, China)

Abstract: 【Objectives】Due to short fermentation time, the hyperthermophilic compost (HTC) is rich in nitrogen and small organic compounds. The effect of HTC application on the growth and yield of rice was studied for the safe and effective use of HTC. 【Methods】Two seasons of pot experiment were conducted using rice as tested crop. Five treatments were designed, including: zero-nitrogen control (N0); 100% chemical fertilizer (CF); and replacing 20% of the chemical N with conventional compost (CvC), raw fermented material (FRM) and hyperthermophilic compost (HTC). The growth, yield of rice, nutrient uptake and use efficiency and soil fertility

收稿日期: 2019-02-28 接受日期: 2019-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701340); 国家重点研发项目(2016YFD0201206); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07202004); 江苏省农业自主创新项目(CX(18)3016)。

联系方式: 曹云 E-mail: youngtsao66@126.com; * 通信作者 黄红英 Tel: 025-84390243, E-mail: sfmicrolab@163.com

were measured after harvest of rice. **【 Results 】** Rice in HTC treatment had the highest grain yield, tiller number, grain number per ear, grain N uptake and N recovery efficiency. In 2016 and 2017, the rice grain yields in HTC were 25.8% and 32.8% higher than those in CF, and 22.4% and 16.5% higher than those in CvC. The number of grains per ear in HTC was 26.8% and 37.5% higher than that in CvC in 2016 and 2017; total K uptake in HTC was 45.5% and 33.9% higher than that in CvC in 2016 and 2017, respectively. The N recovery efficiency in both HTC and CvC treatments was significantly higher than that in CF, and that in HTC was significantly higher than in CvC in 2016. After rice harvest, the soil organic C content of HTC treatment was 14.4%–42.3% higher than CK and 4.12%–26.2% higher than CvC, respectively. HTC improved significantly soil organic C and mineral N than CvC, while the CvC was more conducive to maintaining higher soil available P content. The content of soluble organic C such as volatile organic acids and free amino acids in HTC was significantly higher than that of CvC, so the HTC treated soil had the highest average well color development (AWCD) and the strongest microbial activity. CvC treatment increased the utilization of carbohydrates and amines, while and the utilization of carboxylic acids and amino acids were enhanced by HTC treatment. There was a significant positive relationship between rice yield and soil EC, organic C, total N contents and AWCD values. Soil mineral N and plant K accumulation were significantly and positively correlated with soil total N and AWCD values. **【 Conclusions 】** Although the HTC is less matured than CvC, the time needed in the process is significantly shortened and the temperature is higher to ensure more efficient disinfection of harmful microorganisms. At the 20% N replacement level, the application of HTC is more efficient to enhance rice yield and nitrogen recovery efficiency compared to CvC, which should be related to increased potassium utilization of rice and higher retention of soil mineral nitrogen and microbial activity.

Key words: hyperthermophilic composting; rice, nitrogen recovery efficiency; BIOLOG; compost;

近年来, 随着我国规模化养殖业的迅速发展, 畜禽粪便产生量激增^[1]。据统计, 2010 年全国畜禽粪便排放总量为 22.35 亿 t^[2]。堆肥是实现畜禽粪便资源化的主要途径之一。目前, 我国畜禽粪便有机肥利用率不足 50%^[3]。但由于传统堆肥工艺腐熟周期长、效率低, 碳氮损失率高, 导致堆肥产品品质下降^[4]。超高温 (最高发酵温度 > 85℃) 快速堆肥是近年来兴起的一种新型堆肥工艺^[5], 能在 16~24 h 内实现畜禽粪便的无害化和袋装化, 极大地提高有机废弃物的处理效率。相对于常规堆肥, 全程超高温快速堆肥工艺尽管存在一次性设备成本投入量高、能源消耗大等缺陷, 但由于其能提高堆肥厂单位面积产能, 有效节省土地面积, 提高堆肥产品质量^[6-7], 因而综合成本并不高。Yu 等^[8]采用城市污泥进行超高温堆肥的研究表明, 就处理 1 t 新鲜污泥而言, 超高温堆肥和传统堆肥所需的场地面积分别为 45、80 m², 综合处理成本比传统堆肥少 30~35 元/t。Huang 等^[9]研究表明, 超高温堆肥脲酶、蛋白酶活性降低, 有机氮氨化作用减弱, 因而堆肥过程的氨挥发损失显著降低, 超高温堆肥产物氮含量比常规堆肥高出 31.6%。但由于超高温快速发酵时间短, 相对于常规堆肥其发酵产物腐熟度较低, 铵态氮和有机酸含量

均较高。将其作为一种有机物料施入土壤, 是否对作物生长、产量产生不利影响? 这仍然缺乏试验数据的支撑。

水稻是我国种植面积最大的粮食作物, 水稻总产量达到我国粮食总产量的 1/3 以上^[10]。然而, 近年来我国水稻生产过程中普遍存在养分投入高、利用率低、损失量大等不合理现象^[11], 太湖地区水稻氮素利用率不足 40%。因此, 水稻合理施肥也是农业生产和环境保护研究中的重要问题。氮肥施用量和施入形式对水稻产量及氮素利用影响显著。相关研究表明, 有机无机氮配施有利于作物增产和氮素利用率增加, 对于减少氮素损失带来的环境负荷、改善土壤环境具有重要意义^[12-13]。魏静等^[14]研究表明, 有机肥配施 0.8 倍无机氮肥时, 水稻氮素农学效率、氮肥吸收利用率和氮肥贡献率达到最大。王玉雯等^[15]研究发现, 用 20% 有机氮替代无机氮更有利于花后植株氮累积对籽粒的贡献率, 水稻氮肥利用率提高 70.0%~137.6%。前人关于有机无机氮配合施用对水稻氮素吸收利用率的影响研究多以畜禽粪便、农作物秸秆或传统工艺生产的堆肥产品为主, 而超高温堆肥与普通有机肥理化性状存在较大差异, 施入土壤后对作物氮素利用率以及土壤肥力的影响如何尚

缺乏深入而细致的研究。本研究采用两季盆栽试验方法, 通过与无机氮肥配施, 分析不同有机物料对水稻产量、氮素利用率及土壤理化性状的影响, 为超高温发酵产物的稻田应用提供理论和技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

盆栽试验于 2016 年 6—10 月、2017 年 6—10 月, 在江苏省农业科学院遮阴网室进行, 自然光照, 温度 25~35℃。供试水稻品种为南粳 9108, 供试土壤为马肝土, 0—20 cm 土层的理化性状: 有机质 19.81 g/kg、全氮 0.66 g/kg、碱解氮 172 mg/kg、有效磷 76.9 mg/kg、速效钾 132 mg/kg、铵态氮 13.4 mg/kg、硝态氮 108 mg/kg、pH 7.6。

发酵原料新鲜猪粪取自江苏省农业科学院六合动物科学基地, 稻壳粉购自南京市溧水区天宇农产品有限公司。发酵原料 (10 kg 新鲜猪粪 + 2 kg 稻壳粉) 调节含水率为 55%~60%, 在自制的超高温堆肥反应器中, 待物料温度上升至 85℃ 后, 继续高温发酵 24 h 后得到超高温堆肥^[16]。普通有机肥取自江苏省农业科学院六合动物科学基地, 发酵原料为畜禽粪便和作物秸秆、发酵床垫料等。盆栽试验所用各种有机物料基本理化性状见表 1。

1.2 试验设计

在前期试验的基础上, 本研究盆栽试验设 5 个

处理, 分别为不施氮肥 (N0); 100% 化肥氮 (CF); 80% 化肥氮 + 20% 普通有机肥氮 (CvC); 80% 化肥氮 + 20% 发酵原料氮 (FRM); 80% 化肥氮 + 20% 超高温堆肥氮 (HTC)。每个处理重复 10 次, 每桶装土 20 kg, 人工移栽水稻幼苗 3 株。施肥量均为 N 240 kg/hm² (除 N0 外)、P₂O₅ 60 kg/hm² 和 K₂O 180 kg/hm², 各处理氮肥 (尿素) 按基肥 40%、分蘖肥 25%、穗肥 35% 的比例分 3 次施用, 磷肥 (磷酸二氢钾)、钾肥 (硫酸钾) 和有机物料均一次性做基肥施入。水稻移栽后第 1 个月采用浅水灌溉, 田面水高度约 5 cm, 第 2 个月进行两次人工灌溉、排水模拟烤田, 至收割前 2 周进行间隙灌溉。其他田间管理按照水稻常规栽培技术进行。

1.3 测定项目与方法

水稻分别于 2016 年 6 月 5 日、2017 年 6 月 1 日移栽, 于 2016 年 11 月 2 日、2017 年 10 月 31 日试验结束, 分蘖期记录水稻植株的高度、分蘖数。

测产和考种: 水稻成熟后选取 5 株有代表性的水稻人工脱粒后晒干, 测定籽粒产量并考种。除种子外的地上部分植株样品经 105℃ 杀青 30 min, 70℃ 烘至恒重, 计算干物质累积量。

植株氮、磷、钾含量测定: 将水稻植株样品磨碎、过筛、H₂SO₄-H₂O₂ 消煮后, 分别采用凯氏定氮法、钼锑抗比色法、火焰光度计法测定水稻茎叶和籽粒中氮、磷、钾养分含量, 并计算氮、磷、钾养

表 1 有机物料相关理化性质

Table 1 Properties of the tested raw materials and composts

有机物料 Materials and composts	粪大肠菌群菌值 Fecal coliform bacteria value	水分 Moisture (%)	pH	电导率 EC (μS/cm)	总有机碳 Total organic carbon (g/kg)	总氮 Total N (g/kg)	总磷 Total P (g/kg)	总钾 Total K (g/kg)
发酵原料 Feedstock	0.04	65.14	7.17	127.1	396.4	30.50	16.1	10.40
超高温堆肥 Hyperthermophilic compost	0.40	45.97	6.41	216.3	368.3	29.70	28.3	12.70
普通有机肥 Conventional compost	0.40	31.60	8.21	309.5	406.1	20.06	15.7	9.81

有机物料 Materials and composts	可溶性有机碳 Dissolved organic carbon (g/kg)	总挥发性有机酸 Total volatile organic acid (g/kg)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N (g/kg)	游离氨基酸 Free amino acid (g/kg)	腐殖质碳 Humus C (g/kg)	胡敏酸碳 Humic C (g/kg)	富里酸碳 Fulvic C (g/kg)
发酵原料 Feedstocks	39.40	2.12	3.85	0.31	112.0	27.0	68.0
超高温堆肥 Hyperthermophilic compost	48.40	3.35	5.41	1.19	143.0	33.0	116.0
普通有机肥 Conventional compost	4.05	0.30	0.98	0.89	105.6	96.7	18.9

分累积量^[17]。

水稻光合特性采用便携式光合仪 (Li6400) 进行测定^[18]。选取分蘖期水稻完全展开叶片, 于晴朗无风日 9:00–16:00 测定其光合特性参数, 每株水稻测定 3 次。

试验结束后, 倒扣盆钵以取出完整作物植株, 并将地上和地下部分分开, 地上部分样品的获取以盆钵为单位, 晾干捆扎后装袋备用; 分离黏附在水稻根系的大块土壤后, 将每个地下部分样品分别套在 100 目 (孔径 0.15 mm) 的筛网袋中, 浸泡 12 h, 冲洗至根系表面无可见土壤颗粒, 并小心挑出根系, 收集筛网袋中散落的土壤, 作为根系土壤样品, 用于土壤各指标的测定。土壤的理化性质依照《土壤农化分析方法》^[17]来测定。pH (水土质量比 5 : 1) 采用 pH 计测定, 电导率 EC (水土比 5 : 1) 采用电导率仪进行测定, 有机碳含量采用重铬酸钾容量法测定, 全氮含量采用半微量凯氏法测定; 有效磷含量采用 NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法测定; 速效钾含量采用醋酸铵浸提—火焰光度法测定; 铵态氮采用 KCl 浸提—靛酚蓝吸光度法测定; 硝态氮采用 KCl 浸提—紫外分光光度比色法测定。有机物料理化性质参照《有机肥料 (NY525-2012)》^[19]中的方法测定, 多管发酵法检测粪大肠菌群菌值。

采集水稻收获时的土样进行土壤微生物碳代谢多样性测定。取相当于 10 g 干土重的鲜土, 加入 90 mL 灭过菌的 0.85% NaCl 溶液中, 摇床上震荡 30 min, 将浸提液用无菌水按照 10 倍梯度稀释, 取上清液 (125 μL) 接种到测试板的每个孔中, 将接种好的 Biolog-Eco 板置于 25℃ 下培养, 每隔 24 h 在波长为 590 nm 的 BIOLOG 读数器上 (Biolog, 美国) 读取颜色平均变化值 (AWCD), 试验持续 7 天^[20]。

1.4 数据处理

氮素回收率 = (施氮处理植株氮素积累量 - 不施氮处理植株氮素积累量) / 施氮量 × 100%。

试验数据采用 Excel 和 SPSS 18.0 进行分析和统计, 利用最小显著性差异法 (LSD 法) 进行显著性检验。不同施肥处理土壤微生物群落功能主成分分析采用 Canoco 4.5 软件进行。

2 结果与分析

2.1 超高温堆肥理化性质分析

表 1 中供试有机物料的主要理化性质显示, 与发酵原料相比, 85℃、24 h 超高温堆肥中的铵态

氮、总挥发性有机酸、可溶性有机碳、游离氨基酸、腐殖质碳、总磷、总钾含量分别增加了 44.5%、58.0%、22.8%、283%、27.6%、75.7%、22.1%; 而总有机碳、总氮分别下降了 7.1%、2.6%。此外, 由于发酵时间短, 对照有机肥标准, 超高温堆肥铵态氮、电导率等指标均未达到腐熟, 但大肠菌群数量达到 0.40, 满足了粪便无害化标准^[16]。

2.2 不同施肥处理对水稻植株生长及籽粒产量的影响

从水稻植株生长状况来看, 2016、2017 年 4 个施肥处理间株高没有显著差异; HTC 和 CvC 处理的植株分蘖数差异不显著, 二者均显著高于 CF 处理, HTC 处理也显著高于 FRM 处理, FRM 处理与 CF 处理没有显著差异。就籽粒产量而言, 2016 年 HTC 处理产量显著高于 CF 处理, 2017 年 HTC 处理产量显著高于 CF 和 FRM 处理, 与 CvC 处理差异不显著。2016、2017 年 HTC 处理水稻籽粒产量分别比 CF 处理提高了 25.8%、32.8%, 比 CvC 处理提高了 22.4%、16.5%; 而 CvC 处理与 FRM 和 CF 处理差异也不显著。这表明 HTC 促进水稻生长和产量的效果好于发酵原料和普通有机肥, 而配施普通有机肥的效果与化肥相当 (表 2)。

从水稻产量构成 (表 3) 可以看出, 各施氮肥处理的单株穗数和百粒重无显著差异, 但 HTC 处理的穗粒数显著高于 CvC 和 FRM 处理, 也高于 CF 处理 (尤其是 2017 年), 水稻穗粒数 HTC 处理分别比 CvC 处理提高 26.8% (2016 年)、37.5% (2017 年) ($P < 0.05$); 而 CvC 和 FRM 处理与 CF 处理没有显著差异。说明超高温堆肥处理比普通有机肥和发酵原料能有效提高穗粒数, 最终显著提高产量。

表 4 表明, 与不施氮相比, 有机无机氮混合施用显著提高了水稻光合速率、气孔导度、蒸腾速率, 但不同施氮处理间没有显著差异。

2.3 不同施肥处理对水稻氮磷钾含量、养分积累量及氮素回收率的影响

表 5 显示, 3 个有机无机肥配施处理籽粒中含氮量与 CF 处理差异不显著, 植株中含氮量显著高于 CF 处理 (2017 年), HTC 处理又高于甚至显著高于 FRM 和 CvC 处理 (2016 年); 以 HTC 处理籽粒含磷量最高, 2017 年与其他处理的差异达到显著水平, 而 CvC 处理籽粒和植株中含磷量与 CF 处理相当; 籽粒钾含量各处理间无显著差异, 但 HTC 处理植株中钾含量显著高于 CF 和 CvC 处理。这表明超高温

表 2 2016、2017 年不同施肥处理水稻植株生长指标及产量

Table 2 Plant growth indexes and yield of rice under different fertilization treatments in 2016 and 2017

处理 Treatment	株高 Plant height (cm)		每穴分蘖数 Tiller number per hole		产量 Yield (g/plant)	
	2016	2017	2016	2017	2016	2017
N0	69.0 ± 4.9 b	70.2 ± 1.9 b	6.3 ± 1.9 d	5.0 ± 3.3 c	19.2 ± 6.6 c	18.7 ± 3.0 c
CF	76.2 ± 3.9 a	77.2 ± 4.1 ab	9.4 ± 0.9 cd	12.2 ± 1.1 b	36.5 ± 6.2 b	33.2 ± 6.4 b
CvC	75.6 ± 3.1 ab	76.0 ± 4.2 ab	13.6 ± 3.7 ab	14.2 ± 1.5 a	37.3 ± 1.9 ab	38.0 ± 4.7 ab
FRM	75.6 ± 5.1 ab	76.2 ± 4.4 ab	10.6 ± 2.7 bc	11.8 ± 2.5 b	35.1 ± 2.2 b	33.6 ± 2.3 b
HTC	77.6 ± 5.7 a	78.0 ± 6.6 a	15.8 ± 3.3 a	14.8 ± 1.3 a	45.9 ± 8.2 a	44.1 ± 4.1 a

注 (Note): N0—不施氮肥对照 Zero-N control; CF—100% 化肥氮 100% chemical fertilizer; CvC—80% 化肥氮 + 20% 普通有机氮肥 Replacing 20% of the chemical N with conventional compost; FRM—80% 化肥氮 + 20% 发酵原料氮 Replacing 20% of the chemical N with fermented raw materials; HTC—80% 化肥氮 + 20% 超高温堆肥氮 Replacing 20% of the chemical N with hyperthermophilic compost. 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in a column mean significant difference among treatments ($P < 0.05$).

表 3 不同施肥处理水稻籽粒产量构成

Table 3 Grain yield components of rice under different fertilization treatments

处理 Treatment	每株穗数 Ear number per plant		穗粒数 Grain number per ear		百粒重 100-grain weight (g)	
	2016	2017	2016	2017	2016	2017
N0	4 ± 2 b	3 ± 2 b	98 ± 26 b	92 ± 24 b	2.31 ± 0.08 a	2.26 ± 0.06 a
CF	11 ± 2 a	10 ± 2 a	123 ± 17 ab	119 ± 15 b	2.34 ± 0.07 a	2.38 ± 0.05 a
CvC	11 ± 3 a	11 ± 3 a	112 ± 13 b	96 ± 21 b	2.45 ± 0.09 a	2.43 ± 0.04 a
FRM	12 ± 3 a	11 ± 2 a	111 ± 16 b	109 ± 30 b	2.38 ± 0.08 a	2.40 ± 0.05 a
HTC	13 ± 3 a	13 ± 4 a	142 ± 22 a	132 ± 20 a	2.46 ± 0.09 a	2.36 ± 0.06 a

注 (Note): N0—不施氮肥对照 Zero-N control; CF—100% 化肥氮 100% chemical fertilizer; CvC—80% 化肥氮 + 20% 普通有机氮肥 Replacing 20% of the chemical N with conventional compost; FRM—80% 化肥氮 + 20% 发酵原料氮 Replacing 20% of the chemical N with fermented raw materials; HTC—80% 化肥氮 + 20% 超高温堆肥氮 Replacing 20% of the chemical N with hyperthermophilic compost. 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in a column mean significant difference among treatments ($P < 0.05$).

表 4 不同施肥处理水稻分蘖期叶片光合特性

Table 4 Photosynthetic properties of rice leaves at tillering stage under different fertilization treatments

处理 Treatment	光合速率 P_n [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	气孔导度 G_s [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	胞间 CO_2 浓度 C_i ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	蒸腾速率 T_r [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]
N0	6.22 ± 1.0 b	0.15 ± 0.02 b	382.2 ± 12.1 a	2.18 ± 0.5 b
CF	8.25 ± 1.8 ab	0.25 ± 0.07 ab	379.6 ± 13.3 a	3.24 ± 0.5 ab
CvC	9.53 ± 1.8 a	0.34 ± 0.10 a	384.6 ± 23.2 a	3.75 ± 1.0 a
FRM	10.41 ± 1.3 a	0.31 ± 0.09 a	375.6 ± 19.1 a	3.74 ± 0.9 a
HTC	9.60 ± 0.7 a	0.30 ± 0.06 a	386.2 ± 15.6 a	3.68 ± 0.9 a

注 (Note): N0—不施氮肥对照 Zero-N control; CF—100% 化肥氮 100% chemical fertilizer; CvC—80% 化肥氮 + 20% 普通有机氮肥 Replacing 20% of the chemical N with conventional compost; FRM—80% 化肥氮 + 20% 发酵原料氮 Replacing 20% of the chemical N with fermented raw materials; HTC—80% 化肥氮 + 20% 超高温堆肥氮 Replacing 20% of the chemical N with hyperthermophilic compost. 同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters mean significant difference among treatments ($P < 0.05$).

堆肥提高植株氮磷钾养分含量的效果优于普通有机肥, 而施用普通有机肥相对于单施化肥未显示出明显优势。

由表 6 可见, CF、CvC 和 HTC 处理间水稻植株干物质积累无显著差异; CvC 和 HTC 处理氮素积累量相当, 均显著高于 CF 处理; CF、CvC 和 HTC 处

表 5 不同施肥处理下水稻植株中氮、磷、钾养分含量 (g/kg)

Table 5 Effects of different fertilization treatments on contents of N, P, K in the grain and plant of rice

年份 Year	处理 Treatment	籽粒 Grain			植株 Plant		
		N	P	K	N	P	K
2016	N0	17.0 ± 0.77 b	1.41 ± 0.12 b	4.67 ± 0.04 a	9.17 ± 0.98 c	1.13 ± 0.05 a	11.40 ± 0.34 c
	CF	18.1 ± 0.81 ab	1.53 ± 0.08 a	4.61 ± 0.10 a	10.89 ± 1.38 bc	1.07 ± 0.06 a	13.37 ± 0.76 b
	CvC	18.3 ± 2.05 ab	1.38 ± 0.20 b	4.70 ± 0.03 a	11.52 ± 1.02 b	1.11 ± 0.06 a	14.35 ± 1.11 b
	FRM	19.1 ± 1.68 ab	1.45 ± 0.06 a	4.75 ± 0.09 a	11.77 ± 1.33 ab	1.20 ± 0.10 a	13.60 ± 0.58 b
	HTC	19.3 ± 1.55 a	1.55 ± 0.07 a	4.64 ± 0.08 a	12.71 ± 1.02 a	1.21 ± 0.17 a	16.64 ± 0.65 a
2017	N0	12.2 ± 0.09 b	1.08 ± 0.04 bc	4.60 ± 0.04 a	5.10 ± 0.41 c	1.20 ± 0.04 ab	15.98 ± 0.52 b
	CF	13.4 ± 0.04 a	1.02 ± 0.06 bc	4.84 ± 0.10 a	6.81 ± 0.94 b	1.14 ± 0.02 ab	16.00 ± 0.39 b
	CvC	15.4 ± 0.03 a	0.96 ± 0.04 c	4.80 ± 0.03 a	11.31 ± 1.09 a	1.24 ± 0.09 ab	14.66 ± 0.27 b
	FRM	14.2 ± 0.05 a	1.28 ± 0.11 b	4.82 ± 0.09 a	10.17 ± 0.74 a	1.28 ± 0.06 a	17.46 ± 0.64 a
	HTC	13.5 ± 0.09 a	1.56 ± 0.14 a	4.80 ± 0.08 a	11.23 ± 0.63 a	1.07 ± 0.07 b	18.06 ± 0.27 a

注 (Note): N0—不施氮肥对照 Zero-N control; CF—100% 化肥氮 100% chemical fertilizer; CvC—80% 化肥氮 + 20% 普通有机肥氮 Replacing 20% of the chemical N with conventional compost; FRM—80% 化肥氮 + 20% 发酵原料氮 Replacing 20% of the chemical N with fermented raw materials; HTC—80% 化肥氮 + 20% 超高温堆肥氮 Replacing 20% of the chemical N with hyperthermophilic compost. 同列数据后不同字母表示同一年份不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in a column mean significant difference among treatments in the same year ($P < 0.05$).

表 6 不同施肥处理下水稻植株干物质和氮、磷、钾养分累积量及氮素回收率

Table 6 Accumulation of N, P, K and dry biomass in the plants, and nitrogen recovery rate of rice under different fertilization treatments

年份 Year	处理 Treatment	干物质量 (g/pot)	N (g/pot)	P (g/pot)	K (g/pot)	氮素回收率 (%)
		Dry biomass				N recovery rate
2016	N0	177.22 ± 18.29 b	1.77 ± 0.25 c	0.25 ± 0.021 b	1.89 ± 0.19 c	
	CF	257.69 ± 11.66 a	3.07 ± 0.43 b	0.29 ± 0.005 a	3.12 ± 0.09 b	30.0 ± 3.12 c
	CvC	296.52 ± 18.76 a	3.70 ± 0.32 a	0.32 ± 0.020 a	3.39 ± 0.18 b	44.64 ± 4.31 b
	FRM	257.28 ± 20.52 a	3.28 ± 0.32 b	0.32 ± 0.020 a	3.19 ± 0.29 ab	35.00 ± 2.32 c
	HTC	306.15 ± 21.83 a	4.19 ± 0.26 a	0.38 ± 0.030 a	4.54 ± 0.36 a	55.97 ± 3.45 a
2017	N0	179.89 ± 20.28 c	1.13 ± 0.14 c	0.27 ± 0.019 b	2.61 ± 0.19 c	
	CF	260.74 ± 12.46 ab	2.06 ± 0.23 b	0.37 ± 0.008 a	3.67 ± 0.09 b	21.48 ± 4.32 b
	CvC	265.49 ± 16.47 ab	3.15 ± 0.21 a	0.39 ± 0.016 a	3.54 ± 0.18 b	46.67 ± 3.67 a
	FRM	246.49 ± 15.77 b	2.67 ± 0.29 b	0.39 ± 0.013 a	3.91 ± 0.29 ab	35.67 ± 0.56 b
	HTC	288.99 ± 19.89 a	3.36 ± 0.25 a	0.40 ± 0.039 a	4.36 ± 0.36 a	51.68 ± 0.48 a

注 (Note): N0—不施氮肥对照 Zero-N control; CF—100% 化肥氮 100% chemical fertilizer; CvC—80% 化肥氮 + 20% 普通有机肥氮 Replacing 20% of the chemical N with conventional compost; FRM—80% 化肥氮 + 20% 发酵原料氮 Replacing 20% of the chemical N with fermented raw materials; HTC—80% 化肥氮 + 20% 超高温堆肥氮 Replacing 20% of the chemical N with hyperthermophilic compost. 同列数据后不同字母表示同一年份不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in a column mean significant difference among treatments in the same year ($P < 0.05$).

理间磷累积量无显著差异; HTC 处理钾累积量显著高于 CvC、CF 处理, 2016、2017 年 HTC 处理总钾累积量分别比 CvC 处理高 45.5%、33.9% ($P < 0.05$), 而 CvC 与 CF 处理差异不显著; CvC 和 HTC 处理的

氮素回收率显著高于 CF 处理, HTC 处理显著高于 CvC 处理 (2016 年)。说明有机无机肥配施可提高氮素回收率, 超高温堆肥与普通有机肥相比, 能显著提高植株钾吸收量, 因而更有利于增产。

2.4 施用超高温堆肥对土壤养分的影响

表 7 表明, 2016 年 CvC 和 HTC 处理土壤 pH 差异不显著, 而至 2017 年 HTC 明显高于 CvC 处理。与 CF 处理相比, 2016 和 2017 年 HTC 处理明显提高了土壤 EC 值。与 CF 处理相比, HTC 处理显著提高有机碳含量, 效果好于 CvC; CvC 和 HTC 处理土壤全氮含量没有显著差异, 但与 CF 处理相比, HTC 处理可显著提高土壤矿质氮含量, 而 CvC 处理的效果不稳定; CvC 处理土壤有效磷含量显著高于 HTC 和 CF 处理, 这可能与施用前期 HTC 处理中的有机酸活化土壤中的磷, 水稻吸收有效磷量增加有关。4 个施氮肥处理间土壤速效钾含量没有显著差异。说明超高温堆肥由于原料中保存养分较多, 提高土壤有机碳、全氮和矿质氮含量的效果好于普通有机肥, 其中, HTC 处理土壤矿质氮含量比 CvC 处理高 25.8%~58.2%, 而普通有机肥更有利于维持较高的土壤有效磷含量。

2.5 超高温堆肥对土壤微生物群落功能的影响

平均颜色变化率 (AWCD) 表示微生物碳源利用能力, 反映了土壤微生物代谢活性, 其值越高, 土壤中微生物群落代谢活性也就越高。从图 1 看出,

随着培养时间的增加, 各处理 AWCD 值也增加, 但自始至终均以 HTC 处理明显高于其他处理。表明超高温堆肥提高土壤微生物碳源利用能力的效果好于普通有机肥, 这可能与超高温堆肥中较高的可溶性有机碳有关。

从不同施肥处理下土壤微生物对 Biolog Eco 板上的 31 种碳源的相对利用率 (图 2) 可以看出, 两年试验中, 与 CF 处理相比, HTC、FRM、CvC 处理土壤微生物对羧酸类、多聚类、胺类碳源利用能力平均分别提高了 1.02、4.47、2.43 倍。通过 HTC、FRM、CvC 处理间比较可知, CvC 处理增加了土壤微生物对碳水化合物、胺类的利用, HTC 处理的羧酸、氨基酸类利用率较高, FRM 处理的土壤微生物对酚酸类利用率最高。

2.6 不同施肥处理水稻产量与土壤养分及微生物活性的关系

回归分析结果 (表 8) 表明, 水稻产量与土壤电导率、土壤有机碳含量、土壤全氮含量及 AWCD 值呈显著的正相关关系。说明本试验条件下, 水稻产量随土壤电导率、土壤有机碳含量、土壤全氮含量以及微生物活性的增加有增加的趋势。而 Person 相关性分析表明, 土壤矿质氮含量、植株钾累计吸收

表 7 不同施肥处理下水稻收获期土壤 pH、EC 和养分含量

Table 7 Soil pH, EC and nutrient contents at harvest of rice under different fertilization treatments

处理 Treatment	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	有机碳 (g/kg) Organic C	全氮 (g/kg) Total N	矿质氮 (mg/kg) Mineral N	有效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K
2016							
N0	6.62 \pm 0.05 d	115.46 \pm 3.96 d	11.38 \pm 1.09 c	1.04 \pm 0.13 b	19.01 \pm 0.45 c	84.15 \pm 4.11 c	188.13 \pm 1.96 a
CF	6.78 \pm 0.03 c	145.21 \pm 16.29 c	12.13 \pm 0.61 bc	1.10 \pm 0.11 ab	19.12 \pm 1.36 c	82.78 \pm 3.05 c	158.92 \pm 4.32 a
CvC	7.00 \pm 0.01 b	178.93 \pm 12.22 b	13.33 \pm 0.65 ab	1.27 \pm 0.01 a	21.45 \pm 0.45 b	135.16 \pm 1.18 a	152.44 \pm 6.93 a
FRM	7.16 \pm 0.05 a	209.52 \pm 26.48 a	13.63 \pm 0.31 a	1.27 \pm 0.08 a	25.78 \pm 1.42 a	112.23 \pm 7.60 b	161.79 \pm 1.96 a
HTC	6.89 \pm 0.17 bc	212.67 \pm 9.73 a	13.88 \pm 0.13 a	1.26 \pm 0.04 ab	26.99 \pm 1.32 a	90.16 \pm 2.87 c	186.00 \pm 16.09 a
2017							
N0	6.74 \pm 0.07 d	105.58 \pm 1.74 c	10.54 \pm 1.08 c	1.08 \pm 0.05 c	26.18 \pm 1.02 b	81.34 \pm 0.92 c	144.36 \pm 1.43 a
CF	6.89 \pm 0.04 c	109.11 \pm 2.56 c	10.16 \pm 0.53 c	1.20 \pm 0.24 bc	26.78 \pm 1.67 b	81.67 \pm 1.30 c	151.26 \pm 1.52 a
CvC	6.89 \pm 0.02 c	181.75 \pm 2.13 ab	11.46 \pm 0.70 bc	1.46 \pm 0.05 a	30.44 \pm 0.53 b	106 \pm 1.68 a	148.01 \pm 6.80 a
FRM	7.15 \pm 0.01 a	171.15 \pm 3.55 b	13.84 \pm 0.93 ab	1.36 \pm 0.03 ab	27.94 \pm 1.95 b	88.41 \pm 0.77 b	144.97 \pm 2.40 a
HTC	6.99 \pm 0.04 b	191.26 \pm 1.99 a	14.46 \pm 0.58 a	1.47 \pm 0.08 a	48.15 \pm 8.66 a	86.26 \pm 2.82 bc	143.97 \pm 2.09 a

注 (Note): N0—不施氮肥对照 Zero-N control; CF—100% 化肥氮 100% chemical fertilizer; CvC—80% 化肥氮 + 20% 普通有机肥氮 Replacing 20% of the chemical N with conventional compost; FRM—80% 化肥氮 + 20% 发酵原料氮 Replacing 20% of the chemical N with fermented raw materials; HTC—80% 化肥氮 + 20% 超高温堆肥氮 Replacing 20% of the chemical N with hyperthermophilic compost. 同列数据后不同字母表示同一年份不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in a column mean significant difference among treatments in the same year ($P < 0.05$).

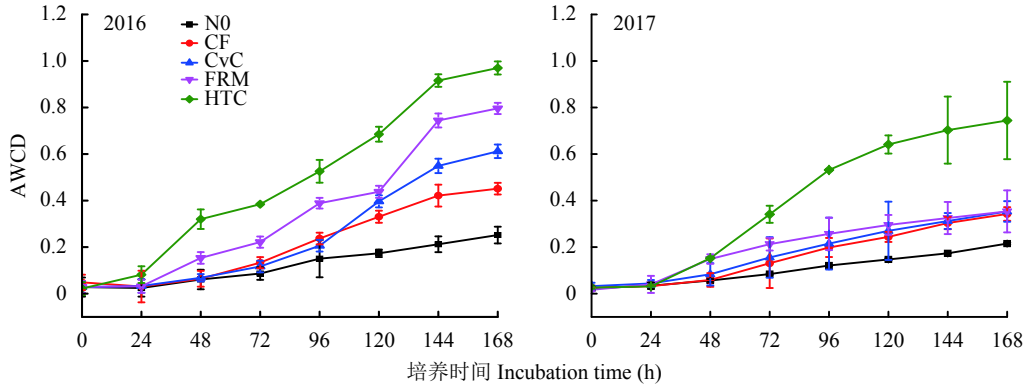


图 1 不同施肥处理下土壤微生物群落颜色平均变化率 (AWCD) 随培养时间的变化

Fig. 1 Dynamics of average well color development (AWCD) of soil microbial community with incubation time under different fertilization treatments

[注 (Note): N0—不施氮肥对照 Zero-N control; CF—100% 化肥氮 100% chemical fertilizer; CvC—80% 化肥氮 + 20% 普通有机肥氮 Replacing 20% of the chemical N with conventional compost; FRM—80% 化肥氮 + 20% 发酵原料氮 Replacing 20% of the chemical N with fermented raw materials; HTC—80% 化肥氮 + 20% 超高温堆肥氮 Replacing 20% of the chemical N with hyperthermophilic compost.]

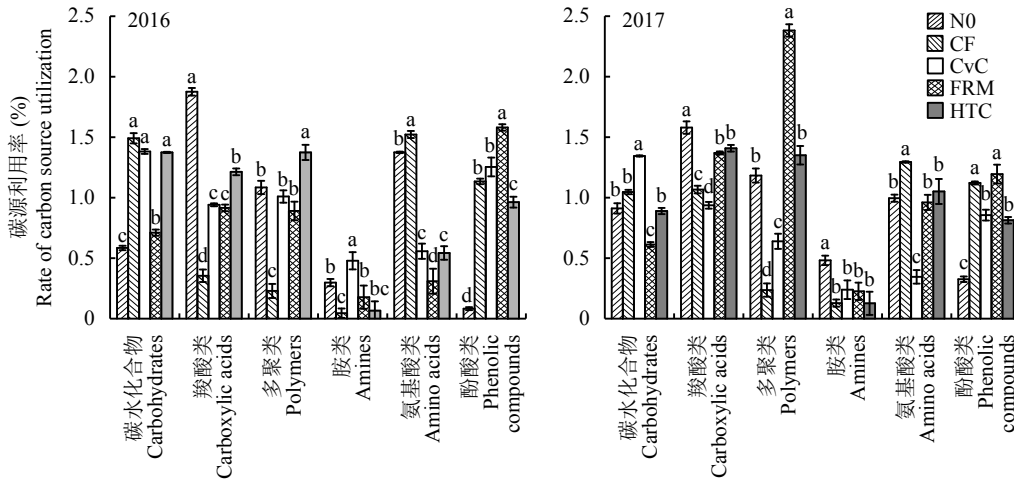


图 2 不同施肥处理土壤培养 120 h 后微生物群落对碳源的利用率

Fig. 2 Carbon source utilization by microbial community in soils under different fertilization treatments after 120 h incubation

[注 (Note): N0—不施氮肥对照 Zero-N control; CF—100% 化肥氮 100% chemical fertilizer; CvC—80% 化肥氮 + 20% 普通有机肥氮 Replacing 20% of the chemical N with conventional compost; FRM—80% 化肥氮 + 20% 发酵原料氮 Replacing 20% of the chemical N with fermented raw materials; HTC—80% 化肥氮 + 20% 超高温堆肥氮 Replacing 20% of the chemical N with hyperthermophilic compost. 柱上不同字母表示同一种碳源类型处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different letters above the bars indicate significant difference among treatments within the same carbon source ($P < 0.05$).]

量均与土壤全氮含量及 AWCD 值有显著正相关关系。由此说明, 超高温堆肥施用可提高微生物活性, 增加土壤矿质氮、有机碳含量, 促进水稻对钾的吸收, 进而有利于增产。

3 讨论

在本研究中, 施用有机氮各处理水稻产量比纯化肥处理均有不同程度地增加 (表 2), 其中配施超高温堆肥增产效果更为明显。这表明有机无机肥配合

施用对水稻增产有促进作用, 这与其他研究者^[21-23]的结论基本一致。Zhang 等^[22]在太湖流域开展了为期 5 年的定位试验, 研究结果表明有机肥和化肥配施的水稻生物学产量和经济效益分别比纯化肥处理提高 11%~13%、4%~5%, 氮素利用率提高 10%。刘红江等^[11]用 25%、50%、75%、100% 有机肥替代化肥, 结果表明配施处理较纯化肥处理水稻产量提高 28.1%~45.9%, 氮素利用率提高 3.9%~69.5%。本试验结果表明, 与纯化肥处理相比, 超高温堆肥或

表 8 不同施肥处理下水稻产量与其他相关指标间的回归关系

Table 8 Regression analysis of rice yield and other soil indexes under different fertilization treatments

因变量 Dependent variable (y)	自变量 Independent variable (x)	回归方程 Regression equation	R ²
水稻产量 Rice yield	土壤电导率 Soil EC	$y = 5.45 + 0.177x$	0.7999 ($P = 0.006$)
	土壤有机碳 Soil organic C	$Y = -14.51 + 3.90x$	0.665 ($P = 0.036$)
	土壤全氮 Soil total N	$y = -18.69 + 42.45x$	0.705 ($P = 0.023$)
	土壤 AWCD 值 Soil AWCD	$y = 19.48 + 40.52x$	0.819 ($P = 0.004$)

普通有机肥等有机物料与化肥配施可以提高水稻茎叶中的养分含量, 有利于水稻植株养分累积。一般而言, 化肥养分释放速率快, 单施化肥可以迅速供给作物生长所必需的养分, 满足农作物的生长需求; 有机肥矿化速度慢, 因此会导致有机无机肥配施处理的作物在试验初期长势弱于单施化肥处理。但与普通有机肥相比, 超高温堆肥含有较多的速效养分(铵态氮), 因此在苗期能显著促进水稻分蘖。此外, 相对于普通有机肥, 超高温堆肥中较高的 NH_4^+ 被土壤中粘土矿物吸附固定, 导致 K^+ 固定量减少, 生物有效性增加, 因而水稻的钾吸收能力增强, 有利于增产^[24]。

氮素形态和施用量是控制水稻分蘖数量、质量及分蘖成穗率的关键因素^[25]。仅施化肥条件下, 由于前期氮素释放速率过快, 氮素供应过量往往导致分蘖后期无效分蘖多, 成穗率下降, 对群体生长不利, 影响水稻产量。Zhang 等^[26]研究表明, 用 25% 的有机氮代替无机氮, 由于有机氮矿化速率慢, 其养分供应与水稻氮素需求更为匹配, 有利于提高氮肥利用率。本试验中, 与普通有机肥或发酵原料相比, 超高温堆肥中铵态氮、游离氨基酸的含量更高(表 1)。有研究表明, 等氮量条件下, 单施氨基酸态氮或与硫酸铵配施处理的水稻干物重、吸氮量均大于纯施硫酸铵处理^[27]。超高温堆肥提高水稻产量与其显著增加有效分蘖数和每株穗数有关。Razavipour 等^[28]和 Hall 等^[29]研究表明, 超高温堆肥比普通尿素的氮素供应更稳定、更高效, 能够增加水稻在营养生长阶段的株高、分蘖数, 提高水稻光合效率, 进一步在生殖生长阶段增加水稻穗数, 提高结实率, 从而增加生物量和产量。本试验结果也显示, 超高温堆肥处理的水稻氮素回收率高于仅施化肥处理, 而普通有机肥和发酵原料处理则低于仅施化肥处理。其原因可能是, 发酵原料施用后在土壤中发酵产生有机酸等有毒有害物质, 容易对苗期水稻根系造成毒害^[30], 而普通有机肥的速效氮和小分子有机酸、氨基酸等含量较低(表 1), 供肥能力特别是生育前期不如超高

温堆肥。而超高温堆肥配施化肥可实现作物需肥时期与肥料供肥性协调一致, 在作物整个生长发育期提供稳定均衡的养分, 因而有效提高水稻的氮素利用率^[31]。

施用超高温堆肥提高水稻氮素利用率还可能与减少土壤氮素损失有关, HTC 处理的土壤矿质氮水平显著高于 CvC 处理。与普通有机肥相比, 超高温堆肥为酸性, 能缓解有机氮施入土壤后氨化作用产生的 pH 增大效应, 从而减少氨挥发损失^[32]; 另外, 有机氮需要一定时间才能矿化并最终转化为硝态氮, 在等施氮量情况下, 与单施化肥相比, 较短时间内不会在土壤中形成过多的速效氮, 减少了矿质氮的淋失, 以及水稻淹水条件下反硝化产生的 N_2O 损失^[33]; 由于发酵时间短, 超高温堆肥比普通有机肥保留了更多的腐殖酸, 腐殖酸富含糖、醛、酚类以及羧基类活性基团, 其吸附并固定 NH_4^+ 的能力更高, 进一步提升了其减少氮素损失的效果^[34]。

超高温堆肥与无机肥配施在增加产量、提高氮素回收率的同时, 可促进土壤微生物繁殖, 改善土壤生物学特性, 进而有利于提高土壤肥力, 这与前期研究^[13, 35]结果一致, 原因可能与 HTC 中较高的可溶性有机碳(DOC)含量为微生物提供充足的碳源和能源。水稻成熟收获后, 有机无机肥配施处理, 尤其是超高温堆肥处理后的土壤全氮、有效磷、速效钾、有机质等养分含量都比化肥处理高, 这说明超高温堆肥与无机氮肥配施处理中有机养分和矿质养分的释放既补充了土壤养分的不足, 还具有持续释放的能力, 因此还能对后茬作物生长提供养分。长期单施化肥氮土壤的微生物碳源利用多样性较低, 偏好糖类^[36], 有机无机肥料配施可以提高土壤微生物多样性和微生物活性。本研究中, CF 处理土壤微生物对碳水化合物类的利用率较高。有机无机氮配施的 3 个处理提高了土壤微生物 AWCD 值, 且对羧酸类、多聚类、胺类碳源利用能力相对于 CF 处理显著提高。这可能与有机物料中含有新型的有机碳, 促使新的微生物种类的产生有关^[37]。施用发酵原料处理

土壤微生物对酚酸类利用率较高,可能是因为水稻种植过程中,发酵原料中的稻壳粉的木质纤维素类在土壤中逐步降解为酚酸,刺激了酚酸代谢微生物的生长。超高温堆肥中含有较多的有机酸和氨基酸,施用该肥料的土壤微生物对羧酸、氨基酸类的利用率较高。超高温堆肥相较普通有机肥含有更高的可溶性有机碳,为土壤微生物提供更多的碳源,因而施用超高温堆肥处理促进了微生物繁殖,增强了微生物群落的代谢活动,提升了土壤微生物的功能多样性,进而加速土壤养分矿化分解,并提高了水稻产量。

4 结论

超高温堆肥符合有机肥中有害微生物限量国家标准,符合《粪便无害化卫生标准(GB 7959-1987)》,但比普通有机肥保留了更多的铵态氮、有机酸、氨基酸。由于超高温堆肥腐熟程度不如普通有机肥,在实际应用中应根据作物需肥特点与土壤性质合理施用。

相对于普通有机肥,超高温堆肥有利于提高水稻钾素吸收量,且超高温堆肥可溶性有机碳,尤其是挥发性有机酸、氨基酸含量明显高于普通有机肥,超高温堆肥处理土壤微生物碳源利用能力和代谢活性均明显高于普通有机肥处理;超高温堆肥较高的腐殖酸有利于固定矿质氮,其稳定供应养分的能力好于普通有机肥,对水稻产量和氮素回收率的提升效果更明显。

参考文献:

- [1] 仇焕广,井月,廖绍攀,蔡亚庆.我国畜禽污染现状与治理政策的有效性分析[J].中国环境科学,2013,33(12):2268-2273.
Qiu H G, Jing Y, Liao S P, Cai Y Q. Environmental pollution of livestock and the effectiveness of different management policies in China[J]. China Environmental Science, 2013, 33(12): 2268-2273.
- [2] 耿维,胡林,崔建宇,等.中国区域畜禽粪便能源潜力及总量控制研究[J].农业工程学报,2013,29(1):171-179.
Geng W, Hu L, Cui J Y, et al. Biogas energy potential for livestock manure and gross control of animal feeding in region level of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(1): 171-179.
- [3] 卢洪秀,孙昭军.畜禽粪便处理的可持续发展研究[J].农业灾害研究,2012,2(5):40-43.
Lu H X, Sun Z J. Study on the sustainable development of animal manure treatment[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2012, 2(5): 40-43.
- [4] 席北斗.有机固体废物管理与资源化技术[M].北京:国防工业出版社,2006.141-146.
- Xi B D. Organic solid waste management and utilization technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. 141-146.
- [5] Yamada T, Miyauchi K, Ueda H, et al. Composting cattle dung wastes by using a hyperthermophilic pre-treatment process: characterization by physicochemical and molecular biological analysis[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2007, 104(5): 408-415.
- [6] 曹云,黄红英,钱玉婷,等.超高温预处理装置及其促进鸡粪稻秸好氧堆肥腐熟效果[J].农业工程学报,2017,33(13):243-250.
Cao Y, Huang H Y, Qian Y T, et al. Hyperthermophilic pretreatment device and its application on improving decomposition effect for chicken manure and rice straw aerobic composting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(13): 243-250.
- [7] 曹云,黄红英,孙金金,等.超高温预处理对猪粪堆肥过程碳氮素转化与损失的影响[J].中国环境科学,2018,38(5):1792-1800.
Cao Y, Huang H Y, Sun J J, et al. Effect of hyperthermophilic pretreatment on transformation and losses of C and N during pig manure composting[J]. China Environmental Science, 2018, 38(5): 1792-1800.
- [8] Yu Z, Tang J, Liao H, et al. The distinctive microbial community improves composting efficiency in a full-scale hyperthermophilic composting plant[J]. Bioresource Technology, 2018, 265: 146-154.
- [9] Huang Y, Li D Y, 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.
- [10] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2013.
National Statistics Bureau of the People's Republic of China. China statistical yearbook[M], Beijing: China Statistics Press, 2013.
- [11] 刘红江,蒋华伟,孙国峰,等.有机-无机肥不同配比比例对水稻氮素吸收利用率的影响[J].中国土壤与肥料,2017,(5):61-66.
Liu H J, Jiang H W, Sun G F, et al. Effect of different organic-inorganic fertilizers combination ratio on nitrogen use efficiency of rice[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2017, (5): 61-66.
- [12] 周江明.有机-无机肥配施对水稻产量、品质及氮素吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(1):234-240.
Zhou J M. Effect of combined application of organic and mineral fertilizers on yield, quality and nitrogen uptake of rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2012, 18(1): 234-240.
- [13] 解开治,徐培智,蒋瑞萍,等.有机无机肥配施提升冷浸田土壤氮转化相关微生物丰度和水稻产量[J].植物营养与肥料学报,2016,22(5):1267-1277.
Xie K Z, Xu P Z, Jiang R P, et al. Combined application of inorganic and organic fertilizers improve rice yield and the abundance of soil nitrogen-cycling microbes in cold waterlogged paddy fields[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2016, 22(5): 1267-1277.
- [14] 魏静,郭树芳,翟丽梅,等.有机无机肥配施对水稻氮素利用率与氮流失风险的影响[J].土壤,2018,50(5):874-880.
Wei J, Guo S F, Zhai L M, et al. Effects of combined application of organic manure and different levels of chemical fertilizers on nitrogen

- use efficiency and nitrogen loss risk in rice growing system[J]. *Soils*, 2018, 50(5): 874–880.
- [15] 王玉雯, 郭九信, 孔亚丽, 等. 氮肥优化管理协同实现水稻高产和氮肥高效[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(5): 1157–1166.
Wang Y W, Guo J X, Kong Y L, *et al.* Nitrogen optimize management achieves high grain yield and enhances nitrogen use efficiency of rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(5): 1157–1166.
- [16] 曹云, 黄红英, 吴华山, 等. 畜禽粪便超高温堆肥产理化性质及其对小白菜生长的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(12): 251–257.
Cao Y, Huang H Y, Wu H S, *et al.* Physico-chemical properties of hyperthermophilic composting from livestock manures and its effects on growth of Chinese cabbage[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(12): 251–257.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [18] 张辉, 朱绿丹, 安霞, 等. 水分和钾肥耦合对甘薯光合特性和水分利用效率的影响[J]. *江苏农业学报*, 2016, 32(6): 1294–1301.
Zhang H, Zhu L D, An X, *et al.* Effects of water coupled with K on the photosynthetic characteristics of sweet potato and its water use efficiency[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 32(6): 1294–1301.
- [19] NY525-2012. 有机肥料[S].
NY525-2012. Organic fertilizer[S].
- [20] Cao Y, Wang J D, Wu H S, *et al.* Soil chemical and microbial responses to biogas slurry amendment and its effect on fusarium wilt suppression[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 107: 116–123.
- [21] Amanullah K, Hidayatullah A. Influence of organic and inorganic nitrogen on grain yield and yield components of hybrid rice in northwestern Pakistan[J]. *Rice Science*, 2016, 23: 326–333.
- [22] Zhang M, Yao Y, Tian Y H, *et al.* Increasing yield and N use efficiency with organic fertilizer in Chinese intensive rice cropping systems[J]. *Field Crops Research*, 2018, 227: 102–109.
- [23] Ding W, Xu X, He P, *et al.* Improving yield and nitrogen use efficiency through alternative fertilization options for rice in China: A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2018, 227: 11–18.
- [24] 燕金香, 李福明, 徐春梅, 等. 水稻氮钾吸收的交互作用研究[J]. *中国稻米*, 2017, 23(2): 1–4.
Yan J X, Li F M, Xu C M, *et al.* Study on interactions between N and K absorption in rice[J]. *China Rice*, 2017, 23(2): 1–4.
- [25] Hou W, Khan M R, Zhang J L, *et al.* Nitrogen rate and plant density interaction enhances radiation interception, yield and nitrogen use efficiency of mechanically transplanted rice[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 269: 183–189.
- [26] Zhang S, Shen T L, Yang Y C, *et al.* Controlled-release urea reduced nitrogen leaching and improved nitrogen use efficiency and yield of direct-seeded rice[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 220: 191–197.
- [27] 吴良欢, 陶勤南. 水稻氨基酸态氮营养效应及其机理研究[J]. *土壤学报*, 2000, 37(4): 464–473.
Wu L H, Tao Q N. Effects of amino acid-N on rice nitrogen nutrition and its mechanism[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(4): 464–473.
- [28] Razavipour T, Moghaddam S S, Doaei S, *et al.* Azolla (*Azolla filiculoides*) compost improves grain yield of rice (*Oryza sativa* L.) under different irrigation regimes[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 209: 1–10.
- [29] Hall D J M, Bell R W. Biochar and compost increase crop yields but the effect is short term on sandplain soils of Western Australia[J]. *Pedosphere*, 2015, 25: 720–728.
- [30] Irshad M, Eneji A E, Hussain Z, *et al.* Chemical characterization of fresh and composted livestock manures[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, 13(1): 115–121.
- [31] Naher U A, Ahmed M N, Sarkar M I U, *et al.* Fertilizer management strategies for sustainable rice production[A]. Chandran S, Unni M R, Thomas S. Organic farming[M]. Sawston Cambridge: Woodhead Publishing, 2019. 251–267.
- [32] Huang S, Lv W, Bloszies S, *et al.* Effects of fertilizer management practices on yield-scaled ammonia emissions from croplands in China: a meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2016, 192: 118–125.
- [33] Xue L, Yu Y, Yang L. Maintaining yields and reducing nitrogen loss in rice-wheat rotation system in Taihu Lake region with proper fertilizer management[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9: 115–124.
- [34] Agyarko-Mintah E, Cowie A, Zwieten L V, *et al.* Biochar lowers ammonia emission and improves nitrogen retention in poultry litter composting[J]. *Waste Management*, 2017, 61: 129–137.
- [35] Mi W H, Sun Y, Xia S, *et al.* Effect of inorganic fertilizers with organic amendments on soil chemical properties and rice yield in a low-productivity paddy soil[J]. *Geoderma*, 2018, 320: 23–29.
- [36] 李猛, 张恩平, 张淑红, 等. 长期不同施肥设施菜地土壤酶活性与微生物碳源利用特征比较[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 44–53.
Li M, Zhang E P, Zhang S H, *et al.* Comparison of soil enzyme activities and microbial C metabolism in installed vegetable fields under long-term different fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(1): 44–53.
- [37] 何翠翠, 李贵春, 尹昌斌, 张洋. 有机肥氮投入比例对土壤微生物碳源利用特征的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(2): 383–393.
He C C, Li G C, Yin C B, Zhang Y. Effect of manure N input ratios on the utilization of different soil microbial carbon sources[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(2): 383–393.