

DOI: 10.12357/cjea.20240832

CSTR: 32371.14.cjea.20240832

王鸣腾, 曾冲, 李帅, 蔡迦铭, 楚静雅, 周明远, 王宜伦, 苗玉红, 李刚, 刘雪峰, 李岚涛. 不同发酵方式猪粪堆肥配施化肥对夏玉米土壤理化特性及 NH_3 挥发影响研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(8): 1492–1505

WANG M T, ZENG C, LI S, CAI J M, CHU J Y, ZHOU M Y, WANG Y L, MIAO Y H, LI G, LIU X F, LI L T. Effects of combined application of swine manure compost fermented by different methods with chemical fertilizer on soil physicochemical properties and NH_3 volatilization of summer maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2025, 33(8): 1492–1505

不同发酵方式猪粪堆肥配施化肥对夏玉米土壤理化特性及 NH_3 挥发影响研究*

王鸣腾¹, 曾冲¹, 李帅¹, 蔡迦铭¹, 楚静雅¹, 周明远¹, 王宜伦¹, 苗玉红¹,
李刚², 刘雪峰^{3**}, 李岚涛^{1**}

(1. 河南农业大学资源与环境学院 郑州 450046; 2. 河南农业大学机电工程学院 郑州 450046;

3. 郸城县农业农村局 郸城 477150)

摘要: 研究不同发酵方式猪粪堆肥配施化肥对夏玉米产量、肥料利用率、土壤理化性质、团聚体稳定性、酶活性和 NH_3 挥发损失的影响, 可为华北平原农田玉米合理施肥及土壤培肥与地力提升提供支撑。2023年于河南省原阳县河南农业大学科教园区布置不同发酵方式猪粪堆肥配施化肥田间试验(有机肥: 化肥=25%: 75%), 共设不施肥(CK)、单施化肥(T1)、自然堆肥+化肥(T2)、水调控槽式堆肥+化肥(T3)、酸调控槽式堆肥+化肥(T4)和槽式堆肥+化肥(T5)6个处理。分别于夏玉米播种前、拔节期、大喇叭口期、灌浆期和成熟期采集0~20 cm耕层土壤样品, 测试分析土壤pH、铵态氮、硝态氮、速效磷、速效钾、有机质含量及土壤容重, 脲酶、酸性磷酸酶和脱氢酶活性, 团聚体分布特征和碳氮比, NH_3 挥发动态与累积效应, 并于夏玉米成熟期测定产量、计算肥料利用率。结果表明, 与CK和T1相比, 猪粪堆肥配施化肥可提高夏玉米产量, 处理间以T4最高, 产量分别显著增加39.90%和15.71%; 此外, 猪粪堆肥配施化肥均可有效提高土壤速效养分及有机质含量, 降低土壤pH及容重, 且以T4效果最佳。与T1相比, T4处理成熟期0.25~2 mm、 ≥ 2 mm土壤团聚体分布比例及各粒级团聚体碳氮比分别平均增加45.40%、67.11%和26.47%。土壤脲酶、酸性磷酸酶和脱氢酶活性以T4最高, 较T1于各时期平均增幅分别为26.77%、24.89%和26.15%。此外, 猪粪堆肥配施化肥可有效降低土壤 NH_3 挥发通量峰值与累积量, 且以T4减排效应最佳, 比T1分别平均降低29.66%和40.18%。与T1相比, T4处理氮肥、磷肥和钾肥利用率分别提升17.28%、56.64%和25.19%。综上所述, 酸调控槽式堆肥与化肥以25%: 75%比例配施可有效提高夏玉米产量及土壤养分含量, 改善土壤团聚体结构及碳氮比, 增强土壤酶活性, 降低土壤氮素挥发损失, 提高肥料利用水平。该结果可为华北平原化肥减施增效及土壤地力提升提供理论与实践参考。

关键词: 夏玉米; 猪粪堆肥; 发酵方式; 猪粪堆肥配施化肥; 土壤理化性质; 团聚体; 酶活性; NH_3 挥发

中图分类号: S143

* 国家重点研发计划项目(2021YFD1700900)、河南省本科高校青年骨干教师培养计划项目(2024GGJS027)和河南农业大学大学生创新训练计划项目(202410466071)资助

** 通信作者: 刘雪峰, 从事土壤培肥与地力提升技术研究, E-mail: 2216842411@qq.com; 李岚涛, 从事作物营养与高效施肥技术研究, E-mail: lilantao@henau.edu.cn

王鸣腾, 从事作物营养与高效施肥技术研究。E-mail: Wmingteng@163.com

收稿日期: 2024-12-21 接受日期: 2025-04-07

* This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2021YFD1700900), the Young Backbone Teachers Program of University in Henan Province (2024GGJS027), and the College Students Innovation and Entrepreneurship Training Program of Henan Agricultural University (202410466071).

** Corresponding authors: LIU Xuefeng, E-mail: 2216842411@qq.com; LI Lantao, E-mail: lilantao@henau.edu.cn
Received Dec. 21, 2024; accepted Apr. 7, 2025

Effects of combined application of swine manure compost fermented by different methods with chemical fertilizer on soil physicochemical properties and NH_3 volatilization of summer maize^{*}

WANG Mingteng¹, ZENG Chong¹, LI Shuai¹, CAI Jiaming¹, CHU Jingya¹, ZHOU Mingyuan¹, WANG Yilun¹,
MIAO Yuhong¹, LI Gang², LIU Xuefeng^{3**}, LI Lantao^{1**}

(1. College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China; 2. College of Mechanical & Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China; 3. Agriculture and Rural Bureau of Dancheng, Dancheng 477150, China)

Abstract: This study investigated the effects of swine manure composts from different fermentation methods combined with chemical fertilizers on summer maize yield, fertilizer use rate, soil physicochemical properties, aggregate stability, enzymes activities, and NH_3 volatilization loss, with the aim of providing theoretical support for rational fertilization and soil fertility improvement in maize fields of the North China Plain. In 2023, a field experiment using swine manure composts fermented with different methods combined with chemical fertilizers (organic fertilizer : chemical fertilizer = 25% : 75%) was conducted in maize field at the Science & Education Park of the Henan Agricultural University in Yuanyang County, Henan Province. Six treatments were established: no fertilization (CK), single application of chemical fertilizer (T1), natural composting + chemical fertilizer (T2), water-regulated trough composting + chemical fertilizer (T3), acid-regulated trough composting + chemical fertilizer (T4), and trough composting + chemical fertilizer (T5). Soil samples from 0–20 cm depth were collected at five growth stages of maize: pre-sowing, jointing, bell mouth, filling, and maturity. The analysed indexes included soil pH, contents of ammonium N, nitrate N, available P, available K, organic matter, as well as soil bulk density, enzymes (urease, acid phosphatase, and dehydrogenase) activities, aggregate distribution characteristics and C/N ratio, and NH_3 flux dynamics. Maize yield and fertilizer use rate were determined at maturity. The results showed that, compared with CK and T1, compost-chemical fertilizer combinations increased maize yield, with T4 showing the highest yield (39.90% and 15.71% increase, respectively). All compost treatments enhanced soil available nutrients and organic matter contents while reducing pH and bulk density, with T4 exhibiting optimal effects. Compared to T1, T4 increased 0.25–2 mm and ≥ 2 mm aggregates proportions by 45.40% and 67.11%, respectively, with 26.47% higher aggregate C/N ratio at maturity. Soil enzymes activities peaked in T4, showing 26.77%, 24.89%, and 26.15% increases in urease, acid phosphatase and dehydrogenase activities versus T1. Compost treatments reduced the peak NH_3 flux and cumulative emissions, with T4 showing the maximum reduction (29.66% and 40.18% lower than T1). T4 improved N, P, and K use rates by 17.28%, 56.64%, and 25.19%, respectively, compared with T1. In conclusion, application of acid-regulated trough compost combined with chemical fertilizers at a 25 : 75 ratio effectively enhanced maize productivity, soil nutrients contents, aggregates structure and C/N ratio, and enzymes activities. It also reduced N loss and improved fertilizer use rate. The results provide both theoretical and practical guidance for sustainable intensification of cropland in the North China Plain.

Keywords: summer maize; swine manure composting; fermentation method; combined application of swine manure compost and chemical fertilizer; soil physicochemical properties; aggregates; enzyme activity; NH_3 volatilization

玉米 (*Zea mays*) 是我国总产量第一的粮食作物, 年产量超过 2.89 亿 t, 占我国粮食作物总产量的 41.54%, 是重要的食品和工业原料, 对保障我国粮食安全具有重要战略意义^[1]。目前, 我国农田长期过量单一施用化肥造成农业面源污染和耕地质量下降问题尤为突出, 而合理的有机无机配施则被广泛认为是化肥控施增效及耕地质量提升的有效技术手段^[2]。研究表明, 华北平原农田普遍存在不合理施肥问题, 年平均施氮量高达 430 kg·hm⁻²^[3]。吴良泉等^[4]研究指出, 我国玉米氮肥推荐用量为 181 kg·hm⁻²。赵亚南等^[5]基于河南省测土配方施肥项目“3414”多年多点试验结果分析显示, 河南省玉米最高产量和经济最佳施氮量分别为 202.5 和 172.8 kg·hm⁻², 全省玉米节氮潜力为 30.0%。长期过量不合理施肥不仅造成

土壤酸化、板结、养分失衡以及肥料利用率低等一系列问题^[6], 同时过量的氮素极易通过气态挥发和淋溶等途径进入环境, 加剧农业面源污染^[7-8]。因此, 探寻科学、绿色、高效的施肥技术, 对优化玉米施肥管理策略, 促进玉米健康生长及农业可持续发展和生态环境良性循环具有重要意义。

《“十四五”循环经济发展规划》中指出, 要大力发展循环经济, 推动农作物秸秆、畜禽粪便等资源化利用^[9]。统计显示, 2023 年我国生猪出栏头数达 7.27 亿头^[1], 粪尿年产量巨大。猪粪中含有丰富的营养与有机物质, 同时也含有沙门氏菌 (*Salmonella* spp.)、大肠杆菌 (*Escherichia coli*) 等大量病原体 and 铜、镉等重金属, 直接还田后粪便中抗生素、重金属和有害微生物于土壤中不断积累繁殖, 影响土壤质量

及作物养分吸收利用^[10],对环境安全与人体健康造成不利影响。槽式发酵堆肥法具有可控性强、产物质量高、环保效益显著等特点^[11],是现代农业废弃物处理的有效方式。猪粪腐熟发酵后含有丰富营养元素、有机质与有益微生物,可有效提高土壤肥力和酶活性,改善土壤结构和促进养分转化等^[12-13]。前人研究表明^[14-18],粪肥肥料化后可为土壤提供充裕的氮、磷、钾等营养元素,同时为土壤微生物快速繁殖提供丰富碳源,活化土壤养分,提高作物养分利用效率。此外,适宜的有机肥配施化肥可减少土壤养分流失,改善土壤理化性质,增强土壤养分转化供给能力^[19]。另有研究指出,与单施化肥相比,有机肥和无机肥配施能促进土壤团聚体形成,提高土壤团聚体稳定性^[20-23],改善土壤结构及孔隙状况等^[24]。在温室气体排放方面,杨清龙等^[25]和张奇等^[26]研究表明,与单施化肥相比,有机无机配施可显著降低土壤 NH_3 挥发损失,提高氮素供应水平,保障夏玉米高产稳产。因此,促进猪粪资源化利用、提高化肥利用率以及农作物产量和品质已成为华北平原农业绿色可持续发展面对的亟待解决的关键科学问题。

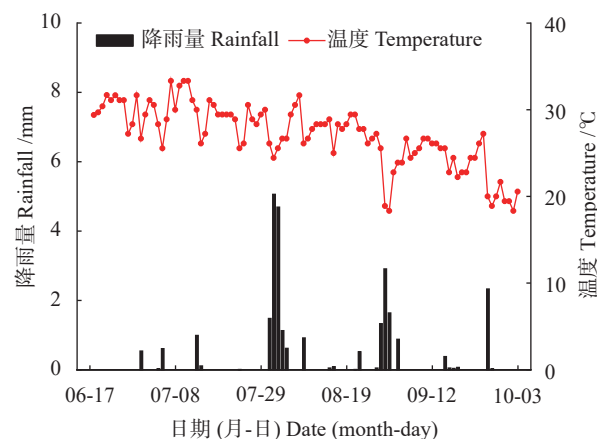
目前,国内外均出现好氧堆肥产物 pH 较高的现象。pH 过高会促进堆肥过程 NH_3 挥发,抑制微生物和酶的生物活性,降低有机物分解速率,最终影响堆肥肥效^[27]。研究表明,硫酸能降低猪粪堆肥 pH,促进氮固定^[28],同时添加酸性化合物过磷酸钙也可减少气态氮损失^[29]。成志远等^[30]研究表明,pH 影响堆肥前期元素矿化作用及后期腐殖化过程。分析发现,目前国内外有关化肥有机肥配施的作物生长发育、生理生态、产量与品质及土壤肥力效应报道相对较多。而深入分析不同发酵方式猪粪堆肥与化肥合理配施对土壤理化特性、酶活性、团聚体稳定性及 NH_3 挥发动态变化的研究则相对较少。不同发酵工艺会显著影响堆肥的理化性质^[31-32]:自然堆肥依赖环境条件易导致氮素损失,而使用水、酸性物质调控槽式堆肥可通过湿度、pH 控制加速腐殖化、抑制脲酶活性、减少 NH_3 挥发等,这些差异可能导致配施化肥时产生不同的土壤响应机制。基于此,本文采用不同发酵方式的有机肥(自然堆肥、水调控槽式堆肥、酸调控槽式堆肥、槽式堆肥)配施化肥夏玉米田间

小区试验,系统研究了不同发酵方式猪粪堆肥与化肥配施下夏玉米的土壤肥力、团聚体组成特征、酶活性及 NH_3 挥发损失的变化,以期为该地区夏玉米科学施肥及综合地力提升提供技术方案。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

2023 年 6—10 月于河南农业大学原阳科教园区(35°11'N,113°95'E)布置不同发酵方式有机肥与化肥配施夏玉米田间试验。供试土壤为砂质潮土,0~20 cm 耕层土壤基础理化性质为: pH 8.18、有机质 16.46 g·kg⁻¹、铵态氮 7.49 mg·kg⁻¹、硝态氮 16.02 mg·kg⁻¹、速效磷 36.44 mg·kg⁻¹ 和速效钾 112 mg·kg⁻¹。夏玉米生育期降雨和温度状况如图 1 所示。



图中气温为当日平均气温。The temperature is the daily average temperature.

图 1 研究区夏玉米生育期气温及降水情况

Fig. 1 Temperature and rainfall during the growth period of summer maize in the study area

1.2 试验设计

供试玉米品种为‘浚单 1718’。有机肥发酵原料为固液分离后的新鲜猪粪和小麦秸秆,其理化性状见表 1,共发酵 22 d。主要发酵方式分别为:1)自然堆肥:猪粪堆成条垛状发酵,肥堆长 10 m,宽 2.5 m,高 1.2 m。2)槽式堆肥:整个槽中堆肥长 40 m(分 3 部分,每部分长度为 10 m,设置 5 m 缓冲区),宽 20 m,高 2.5 m;每隔 24 h 进行一次抛翻处理。常规槽式堆肥为堆肥抛翻前后未处理。3)水调控槽式堆肥则在堆肥抛翻后用喷雾器将水喷洒到堆肥堆的表层,喷

表 1 堆肥用新鲜猪粪和小麦秸秆理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of fresh swine manure and wheat straws used for compost

原料 Material	pH	全氮 Total N / %	全磷 Total P / %	全钾 Total K / %	含水率 Moisture content / %	有机质 Organic matter / %
猪粪 Swine manure	7.92	0.97	1.02	1.51	75.36	72.65
小麦秸秆 Wheat straw	6.74	0.65	0.04	2.24	12.28	91.21

洒量为 $2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$; 4) 酸调控槽式堆肥在堆肥抛翻后用喷雾器将 $0.005 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 稀醋酸喷洒到堆肥堆的表层, 喷洒酸量为 $2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

试验共设 6 个处理, 分别为不施肥 (CK)、单施化肥 (T1)、自然堆肥+化肥 (T2)、水调控槽式堆肥+化肥 (T3)、酸调控槽式堆肥+化肥 (T4)、槽式堆肥+化肥 (T5)。各种发酵方式的猪粪腐熟后理化性状如表 2 所示。

夏玉米氮 (N)、磷 (P_2O_5)、钾 (K_2O) 用量分别为

210 、 60 和 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。采用猪粪堆肥替代 25% 化肥方式配施 (以氮替代为主, 兼顾磷和钾养分)。供试氮、磷、钾肥分别为普通尿素 (含 N 46%)、磷酸二铵 (含 P_2O_5 42%、含 N 15%) 和氯化钾 (含 K_2O 60%), 同堆肥按比例混合后作为基肥于播种前一次性施用。小区面积为 36 m^2 ($3.6 \text{ m} \times 10 \text{ m}$), 3 次重复, 随机区组排列。玉米于 2023 年 6 月 17 日播种, 10 月 3 日收获, 播种密度为 $67\,500 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。田间管理按照当地农民习惯进行。

表 2 不同发酵方式猪粪堆肥的理化性状

Table 2 Physical and chemical properties of swine manure composts fermented with different methods

发酵方式 Fermentation method	pH	全氮 Total N /%	全磷 Total P /%	全钾 Total K /%	含水率 Moisture content /%	有机质 Organic matter /%
自然堆肥 Natural composting	7.91	1.00	0.90	2.10	43.63	36.79
水调控槽式堆肥 Water-regulated trough composting	7.68	1.04	1.00	3.00	34.21	32.88
酸调控槽式堆肥 Acid-regulated trough composting	7.43	1.10	1.88	3.09	34.13	32.04
槽式堆肥 Trough composting	7.81	1.02	1.16	2.77	32.59	34.56

1.3 测定项目与方法

1.3.1 夏玉米产量测定

玉米收获期每个小区收获中间 2 行, 共 30 穗, 晒干后脱粒并称重 a (kg), 测定玉米籽粒实际含水量 w (%), 以 14% 含水量折算作为产量, 公式如下:

$$\text{夏玉米籽粒产量} = a \times \frac{100 - w}{86} \quad (1)$$

1.3.2 土壤及有机肥料样品采集与分析

土壤样品采集及养分测定: 在夏玉米拔节期 (V6)、大喇叭口期 (V12)、灌浆期 (R3) 和成熟期 (R6) 采用“五点取样法”采集各小区 0~20 cm 土层土壤样品, 混匀后采用电极法 (土水比 1:2.5) 测定土壤 pH, 重铬酸钾容量-外加加热法测定有机质含量, KCl 浸提-靛酚蓝比色法测定铵态氮含量, KCl 浸提-双波长比色法测定硝态氮含量, NaHCO_3 浸提-钼蓝比色法测定速效磷含量, NH_4OAC 浸提-火焰光度计法测定速效钾含量^[33]。

土壤容重: 分别于上述时期采用环刀法采集各小区 3 个点位 0~20 cm 土层土壤, 送至实验室后使用酒精燃烧法测定干土质量, 计算土壤容重。公式如下:

$$\rho = \frac{(m_2 - m_1) \times w}{V} \quad (2)$$

式中: ρ 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); m_2 为环刀及鲜土质量 (g); m_1 为环刀质量 (g); V 为环刀容积 (cm^3); w 为土壤含水量 (%)。

土壤水稳性团聚体^[34]: 于上述生育期在各小区按照“S”取样法采集 0~20 cm 土壤样品。去除土壤表面枯枝落叶后, 用不锈钢铁锹沿垂直方向铲出 20 cm 深

原状土体, 修整土壤使其形似立方体, 并置于塑料盒中, 带回实验室。将土样沿原有自然缝隙掰开, 用筛网 (10 mm) 去除根系、石头等, 在室温下避光自然风干。采用湿筛法对土壤团聚体进行筛分。称量 100 g 风干土样, 在水中浸泡 10 min 后, 放入套筛 (粒径分别为 2、0.25 和 0.053 mm), 将套筛置于盛水的水桶中上下振荡 10 min ($30 \text{ 次} \cdot \text{min}^{-1}$), 上下振幅为 3 cm。筛分结束后, 取出每层筛并将筛上土壤冲入培养皿中, 放入烘箱中 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒质量, 称质量后分别记为超大团聚体 ($\geq 2 \text{ mm}$)、大团聚体 (0.25~2 mm)、微团聚体 (0.053~0.25 mm) 和粉黏粒 ($\leq 0.053 \text{ mm}$)。采用凯氏定氮法测定各粒级团聚体全氮含量, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 容量-外加加热法测定各粒级团聚体有机质含量^[33]。

土壤酶活性: 于上述生育期采用与土壤水稳性团聚体同样的方法采取新鲜土壤样品, 采用靛酚蓝比色法测定脲酶活性, 磷酸苯二钠比色法测定磷酸酶活性, 2,3,5-三苯基四唑氯化物 (TTC) 分光光度法测定脱氢酶活性^[19]。

在堆肥开始前和堆肥完熟期采用五点取样法采集肥料样品: 在各个点位采集全层 (0~60 cm) 样品, 混匀后带回实验室。pH 测定: 风干堆肥样品与去离子水按 1:10 比例混匀, 于振荡机上以 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡 1 h, 过滤后滤液用 PHS-3C 型 pH 计测定 pH; 参照《有机肥料》(NY/T 525—2021) 测定其全氮、全磷、全钾和有机质含量; 参照《有机肥料水分的测定》(NY/T 302—1995) 测定其水分含量。

1.3.3 NH_3 挥发

根据赵守强等^[35]的方法改良后测定 NH_3 挥发相

关指标。

气体捕获装置用 PVC 塑料管制成, 内径 15 cm, 高 30 cm。采样时将 PVC 管插入土壤中 12 cm, 分别将两块厚度均为 2 cm、直径为 16 cm 的海绵均匀浸以 15 mL 的磷酸甘油溶液 (50 mL 5% 磷酸+ 40 mL 4% 丙三醇, 定容至 1000 mL) 后, 置于 PVC 塑料管中, 下层的海绵距地面 9.5 cm, 上层的海绵距顶部 3 cm, 两海绵之间距离约为 3 cm。

土壤挥发 NH_3 的捕获于施肥后的当天开始, 在各小区随机放置 3 个 NH_3 挥发捕获装置, 次日早晨 8:00 取样。取样时, 将通气装置下层的海绵取出, 迅速按小区分别装入塑料袋中, 密封; 同时换上另一块刚浸过磷酸甘油溶液的海绵。上层海绵视其干湿情况 3~7 d 更换一次。施肥后第 1 周, 每天取样 1 次; 第 2~3 周, 视 NH_3 挥发排放量, 每 1~3 d 取样 1 次, 以后取样间隔可延长到 7 d, 直至监测不到 NH_3 挥发为止, 约 30 d。雨天停止采样。

NH_3 挥发通量 (F , $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) 计算公式如下:

$$F = \frac{M}{A \times D} \times 0.01 \quad (3)$$

式中: M 为通气法单个装置平均每次测得的 NH_3 量 ($\text{NH}_3\text{-N}$, mg); A 为捕获装置的横截面积 (m^2); D 为每次连续捕获时间 (d)。

NH_3 挥发积累量计算公式如下:

$$\text{AAN} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{F_{i+1} + F_i}{2} \right) \times (t_{i+1} - t_i) \quad (4)$$

式中: AAN 为 NH_3 挥发积累量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); F_{i+1} 和 F_i 为第 $i+1$ 次和第 i 次测定时 NH_3 挥发通量; $t_{i+1}-t_i$ 为第 i 次取样到第 $i+1$ 次取样的间隔天数 (d)。

NH_3 挥发强度 (EI, $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$) 和挥发损失因子 (EF, %, 占施氮量的比例) 计算公式如下:

$$\text{EI} = \frac{\text{AAN}}{Y} \quad (5)$$

$$\text{EF} = \frac{\text{AAN}_N - \text{AAN}_0}{S_N} \times 100\% \quad (6)$$

式中: Y 为产量 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$); AAN_N 和 AAN_0 分别为施氮处理和不施氮处理的累积排放量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); S_N 为施氮量 ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。

1.3.4 肥料利用率

肥料利用率(%) = (施肥区地上部养分积累量 - 不施肥区地上部养分积累量) / 施肥量 $\times 100\%$ (7)

式中: 养分积累量和施肥量单位均为 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

1.4 数据处理与分析

数据基础处理与分析采用 Excel 2021 软件, 采用 IBM SPSS Statistics 22.0 进行方差分析和显著性检验 (LSD 法), 采用 Origin Pro 2024 绘图。

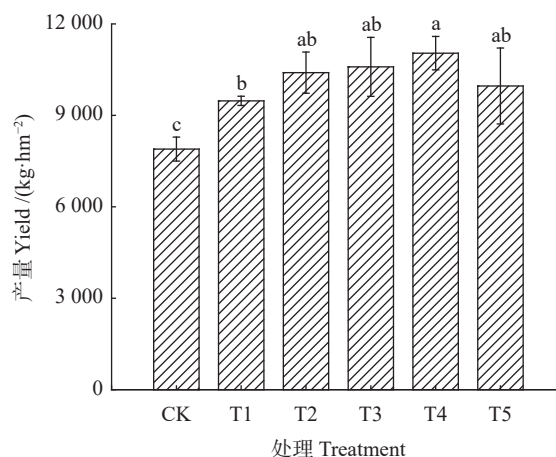
2 结果与分析

2.1 不同发酵方式猪粪堆肥配施化肥对夏玉米籽粒产量的影响

猪粪堆肥与化肥配施可显著提高夏玉米籽粒产量 (图 2)。与不施肥 (CK) 相比, 施肥处理 (T1-T5) 产量平均提高 10.03% ($P<0.05$)。不同发酵方式猪粪堆肥与化肥配施处理中, 以 T4 (酸调控槽式堆肥+化肥) 表现最优, 产量为 $11\,041\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 比 CK 和 T1 分别显著增加 39.90% 和 15.71% ($P<0.05$)。

2.2 不同发酵方式猪粪堆肥配施化肥对土壤养分含量的影响

不同施肥处理对土壤养分含量影响显著 (表 3)。各处理土壤 pH 随夏玉米生育期推进呈先升高后降低趋势。成熟期 (R6), 相较于 CK, T1 土壤 pH 下降 2.48%; T2-T5 土壤 pH 下降 0.12%~3.31%。与 T1 相比, T2、T3 和 T5 土壤 pH 提高 0.97%~2.42%, T4 则降低 0.85%。氮素方面, 土壤中铵态氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 和硝



CK: 不施肥; T1: 单施化肥; T2: 自然堆肥+化肥; T3: 水调控槽式堆肥+化肥; T4: 酸调控槽式堆肥+化肥; T5: 槽式堆肥+化肥。图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。CK: no fertilization; T1: single application of chemical fertilizer; T2: natural composting + chemical fertilizer; T3: water-regulated trough composting + chemical fertilizer; T4: acid-regulated trough composting + chemical fertilizer; T5: trough composting + chemical fertilizer. Different lowercase letters mean significant differences among treatments at $P<0.05$ at level.

图 2 不同发酵方式猪粪堆肥配施化肥对夏玉米籽粒产量的影响^[36]

Fig. 2 Effects of combined application of swine manure composts fermented by different methods with chemical fertilizer on grain yield of summer maize^[36]

表 3 不同发酵方式猪粪堆肥配施化肥对土壤 pH 和养分含量的影响

Table 3 Effects of combined application of swine manure composts fermented by different methods with chemical fertilizer on soil pH and nutrients contents

生育期 Growth stage	处理 Treatment	pH	铵态氮 Ammonium N ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	硝态氮 Nitrate N ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷 Available P ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available K ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有机质 Organic matter ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
拔节期 Jointing stage (V6)	CK	8.40±0.04a	6.44±0.53b	5.77±0.89d	24.57±2.63c	106.60±15.57b	16.33±1.10c
	T1	7.68±0.08c	8.72±0.88a	19.51±3.50bc	31.02±2.50ab	131.88±17.21ab	17.16±0.54bc
	T2	7.90±0.11bc	8.66±1.24a	22.03±2.95b	34.24±2.66a	140.27±22.57a	18.32±1.01ab
	T3	7.92±0.23bc	8.70±0.57a	21.24±2.90b	32.68±5.41ab	135.45±5.25a	18.40±1.26ab
	T4	7.76±0.06bc	9.04±1.01a	27.05±2.06a	37.24±2.70a	149.85±6.30a	18.98±0.82a
	T5	8.00±0.23b	8.15±0.57a	15.52±2.92c	26.76±3.34bc	121.66±14.89ab	17.56±0.58abc
大喇叭口期 Bell mouth stage (V12)	CK	8.65±0.03a	7.56±1.02c	9.53±0.61d	20.77±3.48c	99.88±10.33c	16.56±0.48c
	T1	8.26±0.18c	10.24±0.76ab	20.03±1.97bc	29.78±3.43bc	119.99±4.71ab	17.14±1.08bc
	T2	8.46±0.02b	10.46±0.50ab	22.11±3.19bc	34.25±5.45ab	124.02±18.11ab	18.62±0.41ab
	T3	8.43±0.07bc	10.17±1.24ab	23.52±2.84b	35.95±6.88ab	130.80±7.99a	18.78±1.39a
	T4	8.39±0.09bc	12.12±1.46a	28.96±3.03a	39.23±4.25a	138.19±8.70a	19.15±0.27a
	T5	8.41±0.07bc	8.96±1.40bc	18.52±1.97c	29.24±4.76bc	108.50±5.34bc	18.05±0.53abc
灌浆期 Filling stage (R3)	CK	8.67±0.07a	6.01±0.61bc	10.31±0.87d	15.84±1.62c	86.43±3.55c	14.16±0.63c
	T1	8.37±0.11c	6.55±0.56ab	15.94±0.95c	30.88±3.32b	107.23±19.01bc	17.71±0.28b
	T2	8.56±0.08ab	6.71±0.52ab	19.32±2.34b	30.05±2.04b	105.89±4.65bc	18.61±0.79ab
	T3	8.60±0.09ab	6.35±0.59abc	18.34±1.62bc	30.21±2.50bc	110.53±15.10a	18.51±0.93ab
	T4	8.47±0.08bc	7.15±0.21a	22.54±1.82a	38.18±4.62a	117.37±5.73a	19.25±0.25a
	T5	8.55±0.13abc	5.50±0.67c	15.61±1.21c	22.77±2.14bc	95.16±12.18bc	17.95±0.65b
成熟期 Maturity stage (R6)	CK	8.46±0.04a	4.32±0.66b	14.25±1.31d	7.69±1.14c	89.40±2.60c	16.02±0.64b
	T1	8.25±0.28a	4.96±0.90ab	19.35±1.85bc	14.63±2.40b	109.67±6.39a	16.89±0.75ab
	T2	8.33±0.25a	5.27±0.42ab	22.02±0.59b	12.81±2.02b	109.85±4.04a	18.33±1.15a
	T3	8.39±0.19a	5.48±0.38ab	19.76±2.61bc	19.05±1.33a	116.15±8.91ab	18.57±0.78a
	T4	8.18±0.03a	5.96±0.53a	26.12±1.74a	22.12±2.75a	119.04±4.25a	19.12±1.65a
	T5	8.45±0.11a	4.68±0.79b	18.51±0.59c	14.71±0.82b	93.76±17.24bc	17.74±0.84ab

CK: 不施肥; T1: 单施化肥; T2: 自然堆肥+化肥; T3: 水调控槽式堆肥+化肥; T4: 酸调控槽式堆肥+化肥; T5: 槽式堆肥+化肥。同列同一生育期不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。CK: no fertilization; T1: single application of chemical fertilizer; T2: natural composting + chemical fertilizer; T3: water-regulated trough composting + chemical fertilizer; T4: acid-regulated trough composting + chemical fertilizer; T5: trough composting + chemical fertilizer. Different lowercase letters in the same column for the same growth stage mean significant differences among treatments at $P<0.05$ at level.

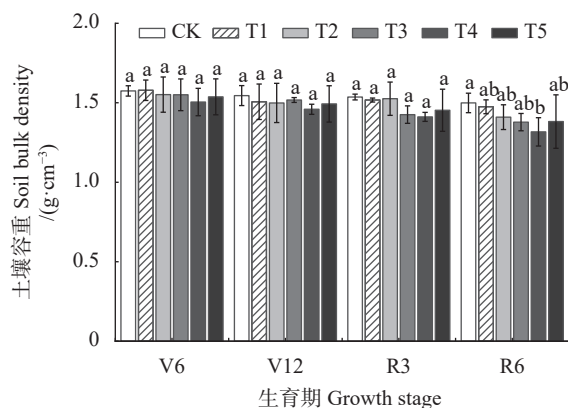
态氮 (NO_3^--N) 含量呈先升高后降低趋势。在 R6 期, T1 土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量较 CK 分别提高 14.81% 和 35.79%; 而与 T1 相比, T2-T4 土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量增幅分别为 6.25%~20.16% 和 2.11%~34.99%, T5 则分别下降 0.28 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.84 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与 CK 相比, 施肥可提高土壤速效磷 (AP)、速效钾 (AK) 和有机质 (SOM) 含量。在 R6 期, 与 CK 相比, T1 分别使 AP、AK 和 SOM 含量提高 90.24%、22.67% 和 5.43%, T2-T5 则分别使其提高 66.58%~187.65%、4.88%~33.15% 和 10.74%~19.35%; 另与 T1 相比, 猪粪堆肥配施化肥处理土壤 AP (T3-T5)、AK (T2-T4) 和 SOM 含量 (T2-T5) 分别提高 0.55%~51.20%、0.16%~8.54% 和 5.03%~13.20%。处理间以 T4 效果最明显, NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、AP、AK 和 SOM 含量分别达到 5.96 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、26.12 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、22.12 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、119.04 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 19.12 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 除 SOM 仅显著高于 CK 外, 其他指标均显著高于 CK 和 T5 ($P<0.05$)。

2.3 不同发酵方式猪粪堆肥配施化肥对土壤容重的影响

土壤容重随玉米生育期整体呈降低趋势 (图 3)。猪粪堆肥与化肥配施处理土壤容重呈下降趋势, 但处理间差异不显著。各生育期综合分析, 与 CK 相比, 施肥处理的土壤容重降幅为 0.69%~13.08%; 与 T1 相比, T2-T5 处理土壤容重降幅 (除 R3 期) 为 0.17%~11.63%。猪粪堆肥配施化肥处理间整体以 T4 容重最小, 拔节期 (V6)、大喇叭口期 (V12)、灌浆期 (R3) 和成熟期 (R6) 分别为 1.50、1.46、1.41 和 1.28 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 且 R6 期显著低于 CK ($P<0.05$)。

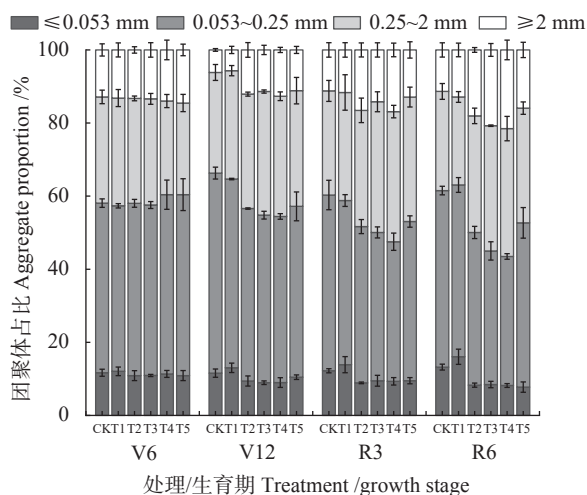
2.4 不同发酵方式猪粪堆肥配施化肥对土壤水稳性团聚体分布特征的影响

由图 4 可知, 各处理均以 0.053~0.25 mm 微团聚体为优势水稳性团聚体, 0.25~2 mm 大团聚体次之, ≤ 0.053 mm 粉黏粒和 ≥ 2 mm 超大团聚体占比较低。随夏玉米生育期推进, CK 和 T1 的 ≥ 2 mm 超大团聚体和 0.25~2 mm 大团聚体占比总体呈降低趋势,



CK: 不施肥; T1: 单施化肥; T2: 自然堆肥+化肥; T3: 水调控槽式堆肥+化肥; T4: 酸调控槽式堆肥+化肥; T5: 槽式堆肥+化肥。V6: 拔节期; V12: 大喇叭口期; R3: 灌浆期; R6: 成熟期。同一生育期不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。CK: no fertilization; T1: single application of chemical fertilizer; T2: natural composting + chemical fertilizer; T3: water-regulated trough composting + chemical fertilizer; T4: acid-regulated trough composting + chemical fertilizer; T5: trough composting + chemical fertilizer. V6: jointing stage; V12: bell mouth stage; R3: filling stage; R6: maturity stage. Different lowercase letters for the same growth stage mean significant differences among different treatments at $P < 0.05$ level.

图 3 不同发酵方式猪粪堆肥配施化肥对土壤容重的影响
Fig. 3 Effects of combined application of swine manure composts fermented by different methods with chemical fertilizer on soil bulk density



CK: 不施肥; T1: 单施化肥; T2: 自然堆肥+化肥; T3: 水调控槽式堆肥+化肥; T4: 酸调控槽式堆肥+化肥; T5: 槽式堆肥+化肥。V6: 拔节期; V12: 大喇叭口期; R3: 灌浆期; R6: 成熟期。CK: no fertilization; T1: single application of chemical fertilizer; T2: natural composting + chemical fertilizer; T3: water-regulated trough composting + chemical fertilizer; T4: acid-regulated trough composting + chemical fertilizer; T5: trough composting + chemical fertilizer. V6: jointing stage; V12: bell mouth stage; R3: filling stage; R6: maturity stage.

图 4 不同发酵方式猪粪堆肥配施化肥对土壤水稳性团聚体分布特征的影响

Fig. 4 Effects of combined application of swine manure composts fermented by different methods with chemical fertilizer on the distribution characteristics of soil water-stable aggregates

0.053~0.25 mm 微团聚体和 ≤ 0.053 mm 粉黏粒占比总体呈增加趋势; T2-T5 相反, 其 ≥ 2 mm 超大团聚体和 0.25~2 mm 大团聚体占比呈增加趋势, 0.053~0.25 mm 微团聚体和 ≤ 0.053 mm 粉黏粒占比呈降低趋势。在成熟期 (R6), 与 T1 相比, 猪粪堆肥配施化肥处理 (T2-T5) ≥ 2 mm 超大团聚体和 0.25~2 mm 大团聚占比分别平均增加 48.03% 和 37.69%, 而 0.053~0.25 mm 微团聚体和 ≤ 0.053 mm 粉黏粒分别平均降低 15.67% 和 49.14%; 其中, T4 处理 ≥ 2 mm 超大团聚体和 0.25~2 mm 大团聚体较 T1 分别增加 67.11% 和 45.40%, 0.053~0.25 mm 微团聚体和 ≤ 0.053 mm 粉黏粒分别降低 24.89% 和 48.97%。T4 为 4 种猪粪堆肥配施化肥处理中改善土壤水稳性团粒结构的优势处理。

2.5 不同发酵方式猪粪堆肥配施化肥对各粒级土壤团聚体碳氮比的影响

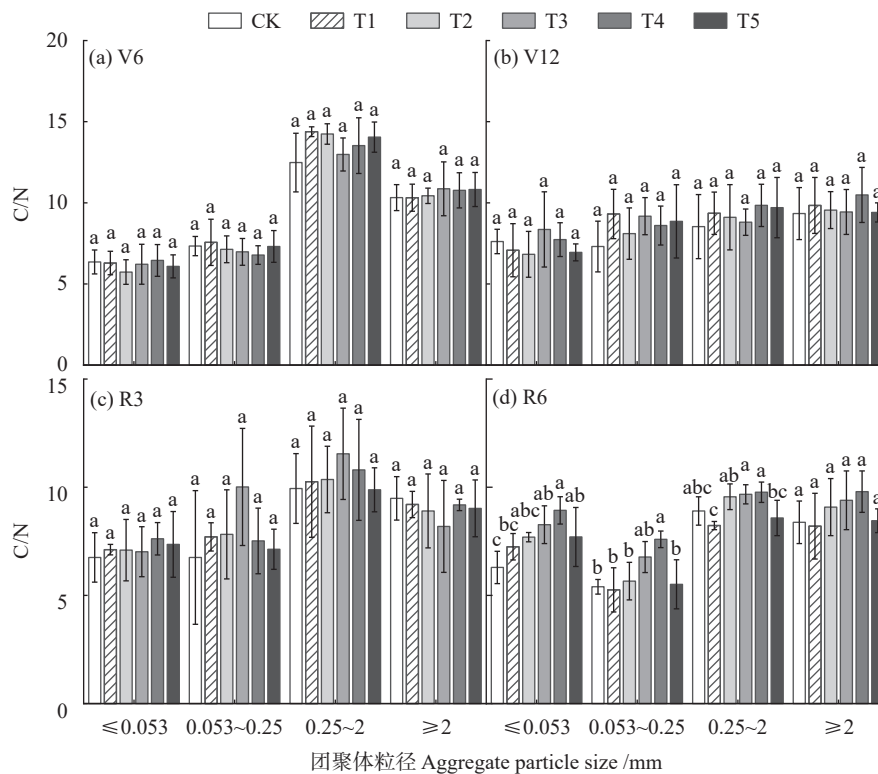
猪粪堆肥与化肥配施可以提高土壤碳氮比 (图 5)。在夏玉米 4 个生育期, 各处理各粒级团聚体的碳氮比均以 0.25~2 mm 大团聚体最高。在成熟期 (R6), 与 T1 相比, 猪粪堆肥与化肥配施处理 (T2-T5) 提高各粒级团聚体碳氮比, ≤ 0.053 mm 粉黏粒、0.053~0.25 mm 微团聚体、0.25~2 mm 大团聚体、 ≥ 2 mm 超大团聚体的碳氮比分别平均提高 11.95%、14.19%、21.51% 和 12.42%; 以 T4 效果最优, ≤ 0.053 mm 粉黏粒、0.053~0.25 mm 微团聚体、0.25~2 mm 大团聚体和 ≥ 2 mm 超大团聚体的碳氮比平均增幅分别为 26.47%; T4 处理较其余处理 (T2、T3、T5) ≤ 0.053 mm 粉黏粒、0.053~0.25 mm 微团聚体、0.25~2 mm 大团聚体和 ≥ 2 mm 超大团聚体的碳氮比平均增幅分别为 13.23%、26.92%、5.38% 和 9.13%。

2.6 不同发酵方式猪粪堆肥配施化肥对土壤酶活性的影响

土壤脲酶、酸性磷酸酶和脱氢酶活性受施肥处理影响显著 (表 4)。处理间, T4 的上述土壤酶活性最高。与 CK 相比, T1 的脲酶、酸性磷酸酶和脱氢酶活性分别增加 42.98%~67.59%、21.37%~70.35% 和 12.87%~96.62%。而相比于 T1, T2-T5 土壤酶活性总体则进一步提升, 其中以 T4 处理相对最高, 增幅分别为 6.55%~49.00%、11.39%~39.97% 和 22.90%~28.49%, 平均分别增加 26.77%、24.89% 和 26.15%。

2.7 不同发酵方式猪粪堆肥配施化肥对土壤 NH_3 挥发的影响

如图 6 所示, 不同处理 NH_3 挥发通量的变化趋势整体一致, 施肥处理 NH_3 挥发通量处于较高水平。



CK: 不施肥; T1: 单施化肥; T2: 自然堆肥+化肥; T3: 水调控槽式堆肥+化肥; T4: 酸调控槽式堆肥+化肥; T5: 槽式堆肥+化肥。V6: 拔节期; V12: 大喇叭口期; R3: 灌浆期; R6: 成熟期。同粒径不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。CK: no fertilization; T1: single application of chemical fertilizer; T2: natural composting + chemical fertilizer; T3: water-regulated trough composting + chemical fertilizer; T4: acid-regulated trough composting + chemical fertilizer; T5: trough composting + chemical fertilizer. V6: jointing stage; V12: bell mouth stage; R3: filling stage; R6: maturity stage. Different lowercase letters for the same particle size mean significant differences among different treatments at $P<0.05$ level.

图 5 不同发酵方式猪粪堆肥配施化肥对土壤水稳性团聚体碳氮比 (C/N) 的影响

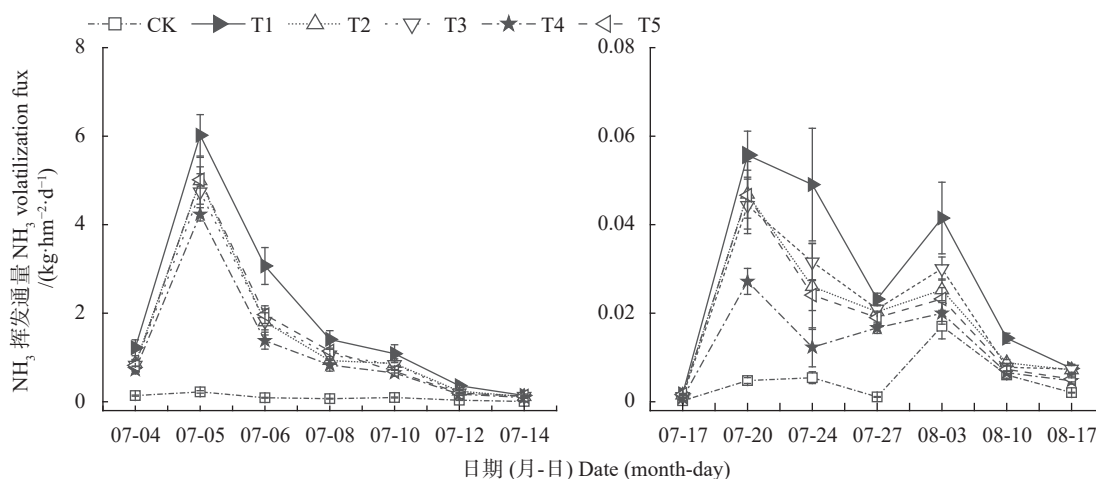
Fig. 5 Effects of combined application of swine manure composts fermented by different methods with chemical fertilizer on the carbon to nitrogen ratios (C/N) of soil water-stable aggregates

表 4 不同发酵方式猪粪堆肥配施化肥对土壤酶活性的影响

Table 4 Effect of combined application of swine manure composts fermented by different methods with chemical fertilizer on soil enzymes activities $\text{IU}\cdot\text{L}^{-1}$

生育期 Growth stage	处理 Treatment	脲酶 Urease	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	脱氢酶 Dehydrogenase
拔节期 Jointing stage (V6)	CK	444.65±23.89d	26.25±1.38d	24.28±3.06e
	T1	745.18±34.11c	41.97±2.11c	47.74±2.59c
	T2	758.74±34.58c	44.78±2.26c	52.82±3.34bc
	T3	881.05±38.61b	48.86±2.49ab	56.42±3.52ab
	T4	1110.24±46.36a	51.64±2.64a	61.34±3.77a
	T5	875.74±38.44b	45.85±2.30bc	41.27±2.78d
大喇叭口期 Bell mouth stage (V12)	CK	591.51±17.31c	34.57±0.60c	47.24±0.67d
	T1	845.72±20.61b	41.96±0.44b	53.32±2.79c
	T2	815.81±28.94b	42.48±0.57b	58.67±1.26b
	T3	852.85±25.86b	42.45±0.66b	63.89±1.02a
	T4	901.18±23.64a	46.74±2.33a	65.54±1.54a
	T5	817.05±7.79b	42.2±0.88b	59.80±2.17b
灌浆期 Filling stage (R3)	CK	683.38±28.70d	21.28±0.97d	42.81±1.68d
	T1	986.15±93.72c	36.25±0.70c	49.95±1.21c
	T2	1089.23±18.24b	37.54±0.59c	57.14±1.44b
	T3	1157.04±34.97ab	44.36±0.42b	59.14±2.93ab
	T4	1230.14±18.94a	50.74±2.71a	63.57±3.10a
	T5	917.48±24.80c	45.48±1.01b	51.73±4.29c

CK: 不施肥; T1: 单施化肥; T2: 自然堆肥+化肥; T3: 水调控槽式堆肥+化肥; T4: 酸调控槽式堆肥+化肥; T5: 槽式堆肥+化肥。同列同一生育期不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。CK: no fertilization; T1: single application of chemical fertilizer; T2: natural composting + chemical fertilizer; T3: water-regulated trough composting + chemical fertilizer; T4: acid-regulated trough composting + chemical fertilizer; T5: trough composting + chemical fertilizer. Different lowercase letters in the same column for the same growth stage mean significant differences among different treatments at $P<0.05$ level.



CK: 不施肥; T1: 单施化肥; T2: 自然堆肥+化肥; T3: 水调控槽式堆肥+化肥; T4: 酸调控槽式堆肥+化肥; T5: 槽式堆肥+化肥。CK: no fertilization; T1: single application of chemical fertilizer; T2: natural composting + chemical fertilizer; T3: water-regulated trough composting + chemical fertilizer; T4: acid-regulated trough composting + chemical fertilizer; T5: trough composting + chemical fertilizer.

图 6 不同发酵方式猪粪堆肥配施化肥对土壤 NH_3 挥发通量的影响

Fig. 6 Effects of combined application of swine manure composts fermented by different methods with chemical fertilizer on soil NH_3 volatilization flux

CK、T1 的 NH_3 挥发通量分别为 $0.020\sim 0.223$ 和 $0.008\sim 6.021 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 猪粪堆肥与化肥配施处理 (T2-T5) 的 NH_3 挥发通量为 $0.005\sim 4.992 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 以 T4 抑制 NH_3 挥发的效果最佳, 挥发通量为 $0.001\sim 4.230 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。各处理峰值均出现在施肥后第 3 天 (7 月 5 日), 施肥处理中峰值最高的为 T1 ($6.021 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), 最低的为 T4 ($4.230 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), 此时各猪粪堆肥配施化肥处理的土壤 NH_3 挥发通量较 T1 降低 $16.68\%\sim 29.66\%$ 。从第 4 天 (7 月 6 日) 开始, 各处理 NH_3 挥发通量呈下降趋势, 第 8 天 (7 月 10 日) 下降速率缓和随后再次快速下降, 第 15 天 (7 月 17 日) NH_3 挥发通量因降雨降至最低, 各处理通量均在 $0.020 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 以下, 随后在第 18 天 (7 月 20 日) 再次迅速升高至最大, 随后各处理 NH_3 挥发通量随生育期推进呈降低-升高-降低趋势, T4 的 NH_3 挥发通量始终低于其他施肥处理。

与单施化肥处理 (T1) 相比, 猪粪堆肥配施化肥处理 (T2-T5) 显著降低了 NH_3 挥发累积量 (AAN)、挥发强度 (EI) 和损失因子 (EF) ($P<0.05$) (表 5)。与 T1 相比, T2-T5 处理 AAN 降低 $26.12\%\sim 40.18\%$; 以 T4 效果最佳, 较 T1 降低 $6.26 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 降幅为 40.18% 。猪粪堆肥配施化肥处理 (T2-T5) 对 EI、EF 的影响与 NH_3 挥发累积量相同。与 T1 相比, T2-T5 的 NH_3 挥发强度和损失因子降幅分别为 $29.70\%\sim 48.48\%$ 和 $27.80\%\sim 42.70\%$, 猪粪堆肥配施化肥处理中以 T4 的 EI、EF 最低, 分别为 $0.85 \text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 、 3.73% 。

表 5 不同发酵方式猪粪堆肥配施化肥对土壤 NH_3 挥发损失的影响

Table 5 Effects of combined application of swine manure composts fermented by different methods with chemical fertilizer on soil NH_3 volatilization loss

处理 Treatment	挥发累积量 Cumulative volatilization /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	挥发强度 Volatilization intensity /($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$)	挥发损失因子 Volatilization loss factor /%
CK	$0.94\pm 0.05\text{d}$	$0.12\pm 0.00\text{d}$	
T1	$15.58\pm 1.34\text{a}$	$1.65\pm 0.15\text{a}$	$6.51\pm 0.59\text{a}$
T2	$11.51\pm 0.63\text{b}$	$1.11\pm 0.05\text{b}$	$4.70\pm 0.28\text{b}$
T3	$11.28\pm 0.14\text{b}$	$1.07\pm 0.09\text{b}$	$4.60\pm 0.06\text{b}$
T4	$9.32\pm 0.24\text{c}$	$0.85\pm 0.06\text{c}$	$3.73\pm 0.11\text{c}$
T5	$11.42\pm 0.55\text{b}$	$1.16\pm 0.11\text{b}$	$4.66\pm 0.24\text{b}$

CK: 不施肥; T1: 单施化肥; T2: 自然堆肥+化肥; T3: 水调控槽式堆肥+化肥; T4: 酸调控槽式堆肥+化肥; T5: 槽式堆肥+化肥。同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。CK: no fertilization; T1: single application of chemical fertilizer; T2: natural composting + chemical fertilizer; T3: water-regulated trough composting + chemical fertilizer; T4: acid-regulated trough composting + chemical fertilizer; T5: trough composting + chemical fertilizer. Different lowercase letters in the same column mean significant differences among different treatments at $P<0.05$ level.

2.8 不同发酵方式猪粪堆肥配施化肥对夏玉米肥料利用率的影响

猪粪堆肥配施化肥可有效提高夏玉米氮、磷、钾肥料利用率 (表 6)。与 T1 相比, 猪粪堆肥配施化肥处理 (T2-T5) 的氮、磷、钾肥利用率分别提高 $2.50\%\sim 17.28\%$ 、 $19.51\%\sim 56.64\%$ 、 $12.72\%\sim 25.19\%$; 其中以 T4 效果最明显, 氮、磷、钾肥利用率分别较 T1 分别提高 17.28% 、 56.64% 、 25.19% 。

表 6 不同发酵方式猪粪堆肥配施化肥对夏玉米肥料利用率的影响

Table 6 Effects of combined application of swine manure composts fermented by different methods with chemical fertilizer on fertilizers utilization rates of summer maize %

处理 Treatment	氮肥利用率 N fertilizer use rate	磷肥利用率 P fertilizer use rate	钾肥利用率 K fertilizer use rate
T1	30.44±1.85b	14.31±2.30b	44.42±7.90a
T2	33.43±3.78ab	18.24±2.53ab	50.07±8.39a
T3	33.75±2.55ab	21.03±3.69a	53.18±6.87a
T4	35.70±1.16a	22.40±0.24a	55.61±11.70a
T5	31.20±2.86ab	17.09±4.52ab	50.48±8.18a

T1: 单施化肥; T2: 自然堆肥+化肥; T3: 水调控槽式堆肥+化肥; T4: 酸调控槽式堆肥+化肥; T5: 槽式堆肥+化肥。同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。T1: single application of chemical fertilizer; T2: natural composting + chemical fertilizer; T3: water-regulated trough composting + chemical fertilizer; T4: acid-regulated trough composting + chemical fertilizer; T5: trough composting + chemical fertilizer. Different lowercase letters in the same column mean significant differences among different treatments at $P<0.05$ level.

3 讨论

有机无机配施可通过多途径协同改善土壤质量, 不仅可直接提升速效养分含量及供肥强度^[37], 还可调控土壤理化性质, 优化作物生长环境。本研究显示, 与单施化肥相比, 不同发酵方式猪粪堆肥配施化肥能提高土壤养分含量和作物产量。该结果与徐明岗等^[38]和刘海鑫等^[39]的研究结论相一致。有机肥施用后增效机制主要体现在两方面: 一是其富含的有机质及营养元素(如氮、磷、钾)通过矿化分解直接提升土壤养分库容; 二是分解过程中产生的有机酸(如乙酸、腐殖酸)可活化土壤中固定的磷酸盐、钾盐等矿物态养分。此外, 有机肥输入能显著扩大土壤有机氮库, 提高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量, 从而增强土壤持续供氮能力, 精准匹配作物需肥规律^[40]。土壤 pH 过高或过低均不利于培肥土壤和作物生长。本文结果显示, 与 CK 相比, 施肥处理(T1-T5)均降低了土壤 pH, 使土壤酸碱度更偏向中性, 施肥处理间大部分情况下 T1 下降幅度最大, T4 次之。这与唐继伟等^[41]研究结果相似。土壤容重是衡量土壤质量的重要指标, 其对土壤透气性、入渗性能、持水能力、溶质迁移特征以及土壤抗侵蚀能力均有显著影响^[42]。李娜等^[43]研究显示有机物料还田可显著降低耕层容重。本研究中猪粪堆肥与化肥配施较单施化肥土壤容重平均降低 7.65% (成熟期)。对于上述土壤指标, 猪粪堆肥与化肥配施处理间均以 T4 效果最佳, 其对应的夏玉米产量亦达最高值 ($11\,041\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 原因可能为猪粪发酵过程添加醋酸降低堆肥 pH, 继而减少堆肥发酵养分损失, 提高微生物量和酶活性, 加快有机物料分解, 故与其他猪粪堆肥与化肥配施处理相

比, 其土壤 pH 降低幅度最大, 明显降低土壤容重。此外, 土壤有机酸含量提高可活化并增加土壤速效养分。醋酸调控不仅通过酸化作用直接活化养分, 其介导的氮素形态转化、腐殖质组分优化及微生物-植物互作效应共同构建了“缓释供肥-抗病促根-增效提质”的协同机制。本研究显示土壤容重随夏玉米生长呈递减趋势, 这可能与采样前的灌水与降雨有关, 灌溉水、雨水接连扰动土壤原有结构, 土壤水分过剩, 导致颗粒间相互挤压, 土壤紧实度增加, 进而导致土壤容重短期增大。

团聚体是土壤基本单元, 影响土壤肥力与结构。本文结果显示, 与 T1 相比, 不同发酵方式猪粪堆肥配施化肥大部分情况下增加了土壤 $\geq 0.25\text{ mm}$ 团聚体占比, 降低了 $<0.25\text{ mm}$ 团聚体占比。这与张平良等^[44]研究结果一致。有机质是土壤团聚体形成的重要胶结物质, 且有机肥富含有机质, 可提高土壤颗粒间黏结力, 促进小团聚体向大团聚体转化, 增加土壤 $\geq 0.25\text{ mm}$ 团聚体占比, 改善土壤结构。此外, 施用有机肥能提高土壤微生物量、细菌分泌物和真菌菌丝的黏结力, 利于大团聚体的形成和稳定性^[45-46]。碳氮比可以反映土壤养分循环和有机质特性, 常作为一个重要参考指标^[47]。土壤酶活性是土壤养分(氮、磷和其他养分)转化能力的重要标志^[48]。土壤脲酶可将尿素分解为 NH_3 和 CO_2 , 反映土壤供氮能力; 土壤酸性磷酸酶能催化土壤有机磷矿化, 是评价土壤磷素生物转化方向与强度的指标; 土壤脱氢酶是反映土壤微生物活性和功能多样性的重要指标。本文结果显示, T2-T5 具有提高各粒级团聚体碳氮比, 提高土壤脲酶、酸性磷酸酶和脱氢酶活性的效果, 这与前人^[47-50]研究结果相似。团聚体碳氮比较高表示有机质分解较慢, 氮含量相对较低, 微生物可利用碳源增加^[51]; 同时有机肥可改善土壤结构、通气性, 因而酶活性明显提高。夏玉米作为禾本科 (Gramineae) 作物, 较高的碳氮比使有机物矿化速率减慢, 引起微生物群落对氮素的消耗, 有机无机配施可在提供并保持无机氮素的同时改善土壤物理性状、提高酶活性继而加速有机养分可利用化, 满足夏玉米氮素需求。猪粪堆肥与化肥配施处理间提高团聚体碳氮比和酶活性总体以 T4 效果最显著, 原因可能为醋酸调控后的猪粪碱性降低, 加速了猪粪中抗生素降解, 降低其对微生物群落的抑制作用。同时, 醋酸可能促进堆肥中腐殖酸(尤其是胡敏酸)合成, 其胶结作用强于富里酸, 更有利于大团聚体形成。另外, 醋酸环境可能筛选出具有高效分解能力的微生物如纤维素

降解菌、固氮菌,促进有机质腐殖化,并分泌更多胞外聚合物,增强团聚体稳定性^[52]。

普通肥料施入农田后会通过 NH_3 挥发、反硝化作用等途径损失,肥料种类是影响 NH_3 挥发的重要因素^[53]。本文结果显示,与单施化肥相比,不同发酵方式猪粪堆肥与化肥配施可降低 NH_3 挥发通量及挥发累积量,这与前人研究结果一致,有机肥替代化肥(25% : 75%)能降低 NH_3 挥发累积量 33.35%~52.94%^[54-55]。尿素进入土壤后,在脲酶作用下分解为 NH_4^+ ,一部分被土壤胶体吸附,另一部分进入土壤溶液与氢氧根结合后以 NH_3 形式挥发;有机肥中大量有机氮则需长时间矿化分解才能参与 NH_3 挥发过程,同时有机肥分解会产生有机酸和腐殖质,抑制 NH_3 挥发。此外,有机无机配施可增加土壤持水量,降低土壤溶液 NH_4^+ 浓度,从而降低 NH_3 挥发损失。本文中猪粪堆肥与化肥配施处理以 T4 抑制 NH_3 挥发效果最佳,原因是 T4 在堆肥过程中始终保持适宜的 pH (6.7~7.3),使微生物有适宜的活动环境,极大加快堆肥腐熟速率并提高堆肥有机质含量^[56],相较于其他猪粪堆肥配施化肥处理更易增加土壤有机胶体数量,继而提高土壤对 NH_3 挥发底物的吸附固定能力,减少 NH_3 挥发速率和挥发累积量。本文中,猪粪堆肥与化肥配施可提高肥料利用率。猪粪堆肥配施化肥可提升土壤脲酶、磷酸酶活性,加速养分转化,促进玉米根系吸收土壤中速效养分。猪粪堆肥配施化肥处理间以 T4 效果最优,原因可能为醋酸作为信号分子诱导玉米根系分泌有机阴离子,进一步活化根际难溶性养分,形成“根系-微生物-养分”正向反馈循环;较低 pH 环境(与 T2、T3、T5 相比)激活 H^+ -ATP 酶活性,驱动根细胞膜质子泵,形成跨膜电化学梯度,促进了 NH_4^+ 、 K^+ 等阳离子通过通道蛋白高效内流。

生猪主要以玉米、豆粕等为食物,其粪便通常含有大量粗蛋白、有机质等物质,猪粪发酵方式通常直接影响堆肥腐熟度、养分保留率和 NH_3 挥发等关键指标。不恰当发酵方式可能导致堆体 pH 升高,引发 NH_3 大量挥发,造成氮素损失,同时抑制微生物和酶活性;还可导致初期堆体温度下降,无法通过高温杀死病原菌等,从而导致施入土壤后作物利用率不高或引起病害。添加化学物料控制堆体 pH 操作简便、成本低,具有重要的实用价值^[57]。Wang 等^[58]发现在猪粪堆肥发酵过程中添加沸石和生物炭混合物可减少 NH_3 和温室气体排放。Yuan 等^[59]和成志远等^[60]发现在堆料中添加过磷酸钙可有效减少 NH_3 排放,提高最终产品养分含量。不同于赵旭等^[61]通

过添加 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硫酸调控羊粪堆肥过程,本研究使用有机弱酸醋酸调控猪粪堆肥,系统研究了不同发酵方式猪粪堆肥配施化肥对夏玉米土壤理化特性的影响,发现相较于普通槽式堆肥和自然堆肥,酸调控槽式堆肥与化肥配施可明显抑制土壤 NH_3 挥发损失,增强酶活性,提高养分含量,为夏玉米养分吸收转运提供良好外在环境,因而夏玉米产量与肥料利用率较高。猪粪或其他畜禽粪便年产量巨大,合理发酵施入农田是避免环境污染和培肥土壤的重要措施之一。对于堆肥来讲,如果可以寻找简便处理手段进行高效高质量堆肥发酵,结合畜禽粪便理化性质等特点,研发具有针对性的粪污处理技术,不仅可消除环境风险,还可建立可持续发展的农业系统。本试验为多年定位试验的第一年,目前“有机酸→pH→微生物功能→养分转化→作物吸收”级联机制尚未得到充分验证,醋酸调控猪粪堆肥对土壤原有微生物群落等的影响还需进一步探究。

4 结论

与单施化肥相比,醋酸调控槽式猪粪堆肥与化肥按 25% : 75% 配施可提高土壤养分水平及酶活性,改善土壤物理性质,提高 $\geq 0.25 \text{ mm}$ 团聚体占比及各粒级团聚体碳氮比,抑制氮肥以 NH_3 形式挥发损失,并使夏玉米产量提高 15.71%。综合来说,醋酸调控槽式猪粪堆肥配施化肥有利于华北平原土壤肥力及质量提升,可为该地区 NH_3 减排、面源污染调控及夏玉米科学施肥和化肥减施增效提供理论依据。

参考文献 References

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴. 2024 (总第 43 期)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook. 2024, (No. 43)[M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2024
- [2] 陈贵, 张红梅, 沈亚强, 等. 猪粪与牛粪有机肥对水稻产量、养分利用和土壤肥力的影响[J]. 土壤, 2018, 50(1): 59-65
CHEN G, ZHANG H M, SHEN Y Q, et al. Application effects of swine and cow manures on rice yield, nutrient uptakes and use efficiencies and soil fertility[J]. Soils, 2018, 50(1): 59-65
- [3] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783-795
JU X T, GU B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(4): 783-795
- [4] 吴良泉, 武良, 崔振岭, 等. 中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 802-817
WU L Q, WU L, CUI Z L, et al. Basic NPK fertilizer recommendation and fertilizer formula for maize production regions in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(4):

- 802-817
- [5] 赵亚南, 徐霞, 黄玉芳, 等. 河南省小麦、玉米氮肥需求及节氮潜力[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(14): 2747-2757
ZHAO Y N, XU X, HUANG Y F, et al. Nitrogen requirement and saving potential for wheat and maize in Henan Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(14): 2747-2757
- [6] 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
XIAO Q, WU S, LIU Y, et al. Effects of different combinations of organic nutrients and chemical fertilizers on wheat yield, nitrogen use efficiency, and soil fertility[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(10): 2291-2300
- [7] 李凡, 李江叶, 郝晋珉, 等. 华北平原长期施肥和耕作对土壤氮挥发的影响[J]. *土壤通报*, 2018, 49(6): 1405-1414
LI F, LI J Y, HAO J M, et al. Effects of long-term fertilization and tillage on soil ammonia volatilization in North China Plain[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(6): 1405-1414
- [8] LV M R, LI Z P, CHE Y P, et al. Soil organic C, nutrients, microbial biomass, and grain yield of rice (*Oryza sativa* L.) after 18 years of fertilizer application to an infertile paddy soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(7): 777-783
- [9] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委关于印发“十四五”循环经济发展规划的通知[EB/OL]. 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2021(2021-07-01)[2023-11-16]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/07/content_5623077.html
National Development and Reform Commission. Notice of the National Development and Reform Commission on the issuance of the “14th Five-Year Plan” Circular Economy Development Plan[EB/OL]. National Development and Reform Commission, 2021(2021-07-01)[2023-11-16]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/07/content_5623077.html
- [10] 陈方可, 张世文, 梁玉伟, 等. 不同腐熟度有机肥对麦玉米轮作系统土壤肥力及作物产量的影响[J]. *西南农业学报*, 2023, 36(12): 2631-2639
CHEN F K, ZHANG S W, LIANG Y W, et al. Effects of organic fertilizers with different maturity on soil fertility and crop yield in wheat-maize rotation systems[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 36(12): 2631-2639
- [11] 张东东, 韩光辉, 于鹏. 槽式污泥好氧发酵工艺路线的比较与选择[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(12): 53-56
ZHANG D D, HAN G H, YU P. Comparison and selection of process routes for trough sludge aerobic fermentation[J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(12): 53-56
- [12] LI P, WU M C, KANG G D, et al. Soil quality response to organic amendments on dryland red soil in subtropical China[J]. *Geoderma*, 2020, 373: 114416
- [13] 吴浩玮, 孙小洪, 梁博文, 等. 我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(6): 1168-1176
WU H W, SUN X Q, LIANG B W, et al. Analysis of livestock and poultry manure pollution in China and its treatment and resource utilization[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6): 1168-1176
- [14] 杜文婷, 雷肖肖, 卢慧宇, 等. 氮肥减量施用对我国三大粮食作物产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(24): 4863-4878
DU W T, LEI X X, LU H Y, et al. Effects of reducing nitrogen application rate on the yields of three major cereals in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(24): 4863-4878
- [15] 张文学, 王少先, 金伟, 等. 有机无机氮肥比例对稻田土壤肥力和作物产量的短期效应[J]. *植物营养与肥科学报*, 2023, 29(7): 1300-1312
ZHANG W X, WANG S X, JIN W, et al. Short-term effects of organic to chemical nitrogen proportion on paddy soil fertility and double rice yield[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(7): 1300-1312
- [16] 陈浩宁, 周怀平, 文永莉, 等. 长期不同施肥下褐土养分及酶活性的生态化学计量特征[J]. *植物营养与肥科学报*, 2022, 28(6): 972-983
CHEN H N, ZHOU H P, WEN Y L, et al. Ecological stoichiometric characteristics of soil nutrients and eco-enzymatic activities under different long-term fertilizations in a cinnamon soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(6): 972-983
- [17] KHALIQ A, KALEEM ABBASI M. Improvements in the physical and chemical characteristics of degraded soils supplemented with organic-inorganic amendments in the Himalayan region of Kashmir, Pakistan[J]. *Catena*, 2015, 126: 209-219
- [18] 孙万春, 周家昊, 俞巧钢, 等. 豆渣、猪粪有机肥施用水水平对梨产量品质及土壤肥力的影响[J]. *果树学报*, 2022, 39(9): 1628-1638
SUN W C, ZHOU J H, YU Q G, et al. Effects of different application rates of organic fertilizers derived from soybean residue and pig manure on yield, quality of pear and soil fertility[J]. *Journal of Fruit Science*, 2022, 39(9): 1628-1638
- [19] FU Q, LAI J L, JI X H, et al. Alterations of the rhizosphere soil microbial community composition and metabolite profiles of *Zea mays* by polyethylene-particles of different molecular weights[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 423: 127062
- [20] GUO Z C, ZHANG Z B, ZHOU H, et al. Long-term animal manure application promoted biological binding agents but not soil aggregation in a Vertisol[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 180: 232-237
- [21] 张秀芝, 李强, 高洪军, 等. 长期施肥对黑土水稳性团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(6): 1214-1223
ZHANG X Z, LI Q, GAO H J, et al. Effects of long-term fertilization on the stability of black soil water stable aggregates and the distribution of organic carbon[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(6): 1214-1223
- [22] 王宪玲, 赵志远, 马艳婷, 等. 基于 CT 扫描技术研究有机无机肥长期配施对土壤物理特征的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2020, 26(9): 1647-1655
WANG X L, ZHAO Z Y, MA Y T, et al. Study on the effects of long-term application of chemical fertilizer combined with manure on soil physical properties of apple orchard based on CT scanning technology[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(9): 1647-1655
- [23] 吴梦琴, 曹凑贵, 刘天奇, 等. 长期有机无机氮肥配施对玉米-豇豆复种土壤团聚体碳含量和官能团分子结构的影响[J]. *土壤学报*, 2023, 60(6): 1822-1831
WU M Q, CAO C G, LIU T Q, et al. Effect of long-term organic and inorganic nitrogen fertilization on carbon content and

- molecular structure of functional groups in soil aggregates in maize-cowpea cropping systems[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(6): 1822–1831
- [24] 安娜, 高纪超, 韩雅棋, 等. 施粪肥对人参栽培土壤理化性质和真菌群落结构的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2019, 41(6): 695–706
- AN N, GAO J C, HAN Y Q, et al. Effects of manure application on soil physicochemical properties and fungal community structure in ginseng-planted soil[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2019, 41(6): 695–706
- [25] 杨清龙, 刘鹏, 董树亭, 等. 有机无机肥配施对夏玉米氮素气态损失及籽粒产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(13): 2476–2488
- YANG Q L, LIU P, DONG S T, et al. Effects of combined application of manure and chemical fertilizers on loss of gaseous nitrogen and yield of summer maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(13): 2476–2488
- [26] 张奇, 徐娅玲, 姚莉, 等. 有机无机肥配施对川中紫色土丘陵区稻田氨挥发的影响[J]. 四川农业大学学报, 2021, 39(4): 518–523, 548
- ZHANG Q, XU Y L, YAO L, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on ammonia volatilization from purple paddy field in the hilly area of central Sichuan[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2021, 39(4): 518–523, 548
- [27] 胡雨彤, 时连辉, 刘登民, 等. 添加硫酸对牛粪堆肥过程及其养分变化的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2014, 20(3): 718–725
- HU Y T, SHI L H, LIU D M, et al. Effects of adding sulphuric acid on composting process of cattle manure and changes of main nutrients[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(3): 718–725
- [28] 李冰, 王昌全, 江连强, 等. 化学改良剂对稻草猪粪堆肥氨气释放规律及其腐熟进程的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(4): 1653–1661
- LI B, WANG C Q, JIANG L Q, et al. Effect of chemical amendments on NH_3 emissions and compost maturity during co-composting of pig manure and straw[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1653–1661
- [29] 李丹阳, 李想艳, 李国学, 等. 添加剂对猪粪秸秆堆肥的氮素损失控制效果[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(S2): 260–267
- LI D Y, LI S Y, LI G X, et al. Effects of additive on nitrogen loss during composting of pig manure and corn straw[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(S2): 260–267
- [30] 成志远, 邱慧珍, 苏杨琴, 等. 不同 pH 值对牛粪-小麦秸秆好氧堆肥过程中碳转化特征及腐熟度的影响[J]. *热带农业工程*, 2024, 48(1): 125–135
- CHENG Z Y, QIU H Z, SU Y Q, et al. Effects of different pH on carbon conversion characteristics and maturity during aerobic composting of cattle manure-wheat straw[J]. *Tropical Agricultural Engineering*, 2024, 48(1): 125–135
- [31] 时涛, 孙文涛, 唐晶, 等. 有机固废好氧发酵堆肥技术研究进展[J]. *现代化工*, 2024, 44(S2): 62–67
- SHI S, SUN W T, TANG J, et al. Research progress in solid organic wastes aerobic fermentation composting technology[J]. *Modern Chemical Industry*, 2024, 44(S2): 62–67
- [32] DUAN J Y, WU S H, CHEN Y G, et al. Influence of Chinese herbal plants on greenhouse gas emissions from pig manure composting and fermentation[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2024, 194: 105882–105890
- [33] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000
- BAO S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [34] CAMBARDELLA C A, ELLIOTT E T. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions[J]. *Geoderma*, 1993, 56(1/4): 449–457
- [35] 赵守强, 刘源, 刘春成, 等. 不同粪肥与黄腐酸配施对设施菜地 NH_3 挥发及蔬菜产量的影响[J]. *节水灌溉*, 2024(5): 1–9
- ZHAO S Q, LIU Y, LIU C C, et al. Effects of different manures in combination with fulvic acid on NH_3 volatilization and vegetable yield in greenhouse soil[J]. *Water Saving Irrigation*, 2024(5): 1–9
- [36] 王鸣腾, 曾冲, 杨东霞, 等. 不同发酵方式有机肥配施化肥对夏玉米产量、光温及养分吸收积累特性的影响[J/OL]. *农业资源与环境学报*, 2024: 1–17[2025-02-20]. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0342>
- WANG M T, ZENG C, YANG D X, et al. Effects of various fermentation methods for organic fertilizer combined with chemical fertilizer on the yield, light-temperature, and nutrient absorption and accumulation characteristics of summer maize[J/OL]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024: 1–17[2025-02-20]. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0342>
- [37] 刘亚军, 逯昀, 王文静, 等. 有机肥与土壤调理剂对连作甘薯生长发育及土壤肥力的影响[J]. *作物杂志*, 2024(3): 168–174
- LIU Y J, LU Y, WANG W J, et al. Effects of organic fertilizer and soil conditioner on the growth and development of continuous cropping sweet potato and soil fertility[J]. *Crops*, 2024(3): 168–174
- [38] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(10): 3133–3139
- XU M G, LI D C, LI J M, et al. Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and yield of rice in Hunan of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(10): 3133–3139
- [39] 刘海鑫, 何建清, 徐东, 等. 化肥减量配施园林废弃物堆肥对玉米生长和土壤肥力的影响[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(6): 256–264
- LIU H X, HE J Q, XU D, et al. Impacts of fertilizer reduction combined with garden waste compost on maize growth and soil fertility[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(6): 256–264
- [40] 宇万太, 姜子绍, 马强, 等. 施用有机肥对土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2009, 15(5): 1057–1064
- YU W T, JIANG Z S, MA Q, et al. Effects of application of manure on soil fertility[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(5): 1057–1064
- [41] 唐继伟, 李娟, 车升国, 等. 长期单施不同量化肥和有机肥后盐化潮土 pH 和 EC 的变化[J]. *植物营养与肥科学报*, 2019, 25(8): 1300–1307
- TANG J W, LI J, CHE S G, et al. Changes in pH and EC of salinized fluvo-aquic soil after long-term application of chemical or organic fertilizers[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(8): 1300–1307
- [42] 于冬雪, 贾小旭, 黄来明, 等. 黄土区不同土层土壤容重空间变异与模拟[J]. *土壤学报*, 2019, 56(1): 55–64

- YU D X, JIA X X, HUANG L M, et al. Spatial variation of soil bulk density in different soil layers in the loess area and simulation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1): 55–64
- [43] 李娜, 龙静泓, 韩晓增, 等. 短期翻耕和有机物还田对东北暗棕壤物理性质和玉米产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(12): 99–107
- LI N, LONG J H, HAN X Z, et al. Effects of short-term plowing and organic amendments on soil physical properties and maize yield in dark brown soil in Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(12): 99–107
- [44] 张平良, 刘晓伟, 曾骏, 等. 长期施用有机肥对西北半干旱区小麦土壤团聚体分布及其有机碳的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2024(4): 1–8
- ZHANG P L, LIU X W, ZENG J, et al. Effects of long-term organic manure application on the distribution and organic carbon content of soil aggregates in wheat field of northwest semi-arid region[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024(4): 1–8
- [45] WANG J, SHA Z, QIN Q, et al. Soil aggregate-associated organic nitrogen pools, enzyme activities, and microbial community fertilized with food waste-derived organic fertilizer[J]. *Applied Soil Ecology*, 2024, 202: 105580–105593
- [46] TIAN L, WANG Y, JIN D, et al. The application of biochar and organic fertilizer substitution regulates the diversities of habitat specialist bacterial communities within soil aggregates in proso millet farmland[J]. *Biochar*, 2025, 7(1): 6
- [47] 祁琛, 吴林甲, 闫秋艳, 等. 夏闲期复播绿肥对旱地麦田土壤团聚体碳氮含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(4): 304–312
- QI C, WU L J, YAN Q Y, et al. Effects of green manure application on soil organic carbon and nitrogen content among aggregates fractions in dryland wheat fields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(4): 304–312
- [48] BARAM S, WEINSTEIN M, EVANS J F, et al. Drip irrigation with nanobubble oxygenated treated wastewater improves soil aeration[J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 291: 110550
- [49] 张英, 武淑霞, 雷秋良, 等. 不同类型粪肥还田对土壤酶活性及微生物群落的影响[J]. *土壤*, 2022, 54(6): 1175–1184
- ZHANG Y, WU S X, LEI Q L, et al. Effects of different manures on soil enzyme activity and microbial community[J]. *Soils*, 2022, 54(6): 1175–1184
- [50] 周东兴, 李欣, 宁玉翠, 等. 蚯蚓粪配施化肥对稻田土壤性状和酶活的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2021, 52(2): 25–35
- ZHOU D X, LI X, NING Y C, et al. Effect of chemical fertilizer combined with vermicompost on soil characters and enzyme activity in paddy fields[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2021, 52(2): 25–35
- [51] SCHIPPER L A, SPARLING G P. Accumulation of soil organic C and change in C : N ratio after establishment of pastures on reverted scrubland in New Zealand[J]. *Biogeochemistry*, 2011, 104(1): 49–58
- [52] 吕汉强, 胡发龙, 于爱忠, 等. 荒漠绿洲区不同绿肥还田方式下玉米农田土壤团聚体微结构特征[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(6): 952–964
- LYU H Q, HU F L, YU A Z, et al. Microstructure characteristics of soil aggregates of maize farmland under different utilization patterns of green manure in a desert oasis area[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(6): 952–964
- [53] 万雪薇, 丁紫娟, 聂江文, 等. 不同施肥方式对再生稻田氨挥发及氮肥利用率的影响[J]. *南方农业学报*, 2023, 54(12): 3550–3560
- WAN X W, DING Z J, NIE J W, et al. Effects of different fertilizer application methods on ammonia volatilization and nitrogen fertilizer utilization rate in regenerating rice fields[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2023, 54(12): 3550–3560
- [54] 李燕青, 温延臣, 林治安, 等. 不同有机肥与化肥配施对作物产量及农田氮肥气态损失的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(11): 1835–1846
- LI Y Q, WEN Y C, LIN Z A, et al. Effect of different manures combined with chemical fertilizer on yields of crops and gaseous N loss in farmland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(11): 1835–1846
- [55] 张怡彬, 李俊改, 王震, 等. 有机替代下华北平原旱地农田氨挥发的年际减排特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(1): 1–11
- ZHANG Y B, LI J G, WANG Z, et al. Substitution of chemical fertilizer with organic manure reduces ammonia volatilization in maize farmland in North China Plain[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(1): 1–11
- [56] JIANG J S, HUANG Y M, LIU X L, et al. The effects of apple pomace, bentonite and calcium superphosphate on swine manure aerobic composting[J]. *Waste Management*, 2014, 34(9): 1595–1602
- [57] 安婧, 丁子明, 高程程, 等. 畜禽粪便污染的环境风险与资源化处理技术分析[J]. *环境科学*, 2023, 44(8): 4764–4774
- AN J, DING Z M, GAO C C, et al. Analysis of the environmental risk of livestock manure pollution and resource treatment technology[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(8): 4764–4774
- [58] WANG Q, AWASTHI M K, REN X N, et al. Combining biochar, zeolite and wood vinegar for composting of pig manure: The effect on greenhouse gas emission and nitrogen conservation[J]. *Waste Management*, 2018, 74: 221–230
- [59] YUAN J, LI Y, CHEN S L, et al. Effects of phosphogypsum, superphosphate, and dicyandiamide on gaseous emission and compost quality during sewage sludge composting[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 270: 368–376
- [60] 成志远, 邱慧珍, 苏杨琴, 等. 添加剂对堆肥温室气体排放和碳素转化的影响[J]. *环境科学与技术*, 2023, 46(9): 167–177
- CHENG Z Y, QIU H Z, SU Y Q, et al. Effects of adding superphosphate and sulfuric acid on carbon greenhouse gas emissions and carbon conversion during aerobic composting process[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 46(9): 167–177
- [61] 赵旭, 车宗贤, 李娟, 等. 添加硫酸对羊粪堆肥进程及氮素损失的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(8): 231–238
- ZHAO X, CHE Z X, LI J, et al. Effects of sulfuric acid addition on sheep manure composting process and nitrogen loss[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(8): 231–238