

好氧发酵猪粪部分替代化肥提高夏玉米氮素利用率和土壤肥力

郭校伟¹, 潘军晓¹, 张济世¹, 徐张义¹, 马东立², 崔振岭^{1*}

(1 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2 农业部饲料工业中心, 北京 100193)

摘要: 【目的】化肥及畜禽粪便的不合理施用不仅影响作物增产, 还严重威胁土壤健康和环境安全。探究不同发酵方式猪粪有机肥及有机肥替代化肥的比例对夏玉米氮素吸收及土壤碳、氮含量的影响, 为规模化养猪场粪便快速处理, 及制定其与化肥的适宜配比提供理论依据。【方法】以‘先玉 335’为供试材料, 在中国农业大学丰宁动物试验基地进行田间试验。设置 5 个处理: 不施肥(CK), 100% 化肥氮(CF), 100% 自然堆肥猪粪氮(PM), 100% 好氧发酵猪粪氮(PC), 50% 好氧发酵猪粪氮 + 50% 化肥氮(FM)。分析猪粪不同发酵方式及有机氮替代比例对夏玉米氮素吸收及土壤碳氮的影响。【结果】在等氮条件下, 与 CF 处理相比, FM 处理产量、穗粒数、千粒重均以 FM 处理最高, 其中 FM 处理显著增产 13.2%, PC、PM 处理与 CF 处理差异均不显著。FM 处理玉米氮素积累量最高, 两年平均为 304.6 kg/hm², 较 CF 处理氮素积累量显著提高 15.5%; PC、PM 处理与 CF 处理氮素积累量差异不显著。与 CF 处理相比, FM 处理的氮素当季回收率、氮素农学利用率和偏生产力两年平均分别显著提高 85.9%、59.5% 和 13.2% ($P < 0.05$), PC、PM 处理与 CF 处理之间无显著差异。在玉米拔节期和抽穗期, FM 处理 0—40 cm 土壤无机氮含量均最高, 与 CF 无显著差异; 在成熟期, FM 处理土壤无机氮含量较 CF 处理显著增加 41.8%, 而 PC 和 PM 处理与 CF 处理无显著差异。此外, 施用有机肥可不同程度地增加土壤有机碳和全氮含量, 与 CF 处理相比, PC 和 FM 处理使有机碳含量分别显著提高 13.3% 和 9.8%; FM 处理土壤全氮含量显著提高 33.4%。【结论】在等氮条件下与单施化肥相比, 50% 好氧发酵猪粪氮 + 50% 化肥氮配施不仅显著提高了夏玉米产量和氮素累积吸收量, 还提升了土壤全氮和有机碳含量以及 0—40 cm 土层土壤无机氮含量。单独施用自然堆肥、好氧发酵猪粪及化肥在产量和氮素积累方面没有显著差异, 但可增加土壤全氮和有机碳含量, 有利于土壤培肥, 而施用好氧发酵猪粪的效果又优于施用自然堆肥。

关键词: 有机无机配施; 夏玉米; 氮素利用效率; 有机碳; 无机氮

Partial substitution of chemical fertilizer with aerobic fermented pig manure increases nitrogen use efficiency of summer maize and soil fertility

GUO Xiao-wei¹, PAN Jun-xiao¹, ZHANG Ji-shi¹, XU Zhang-yi¹, MA Dong-li², CUI Zhen-ling^{1*}

(1 College of Resource and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2 Feed Industry Centre, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China)

Abstract: 【Objectives】Unreasonable use of fertilizers and livestock manure not only restricts crop yields, but also seriously threatens soil health and environmental safety. The effects of pig manure composts and its combining application with chemical fertilizer on nitrogen use efficiency and soil fertility were studied, to provide a theoretical basis for the rational use of large-scale pig farm manure. 【Methods】The summer maize cultivar of Xianyu 335 was used as the test material in a field experiment conducted in the Fengning Animal Experimental Base of China Agricultural University. Five treatments included, no fertilization (CK), 100% chemical fertilizer nitrogen (CF), 100%-natural pig manure compost nitrogen (PM), 100% aerobic fermented pig manure nitrogen (PC), 50% aerobic fermented pig manure compost nitrogen + 50% chemical fertilizer nitrogen (FM). The yield

收稿日期: 2019-10-11 接受日期: 2020-01-09

基金项目: 青海省重大科技专项 (2019-NK-A11); 国家重点研发计划 (2017YFD0200107)。

联系方式: 郭校伟 E-mail: wxiaoguo17@163.com; * 通信作者 崔振岭 E-mail: cuizl@cau.edu.cn

and nitrogen uptake of summer maize, and the soil carbon and total nitrogen contents in 0–40 cm soil after harvest were analyzed. 【 **Results** 】 Compared with CF treatment, FM treatment had the highest yield, grain number per ear and 1000-grain weight, and the yield of FM treatment significantly increased by 13.2%. There was no significant difference in yield, grain number per ear and 1000-grain weight among PC, PM and CF treatments. FM treatment had the highest nitrogen accumulation (304.6 kg/hm²) in maize, which was 15.5% higher than that of CF, while PC and PM treatments had no significant difference with CF in N accumulation of maize. Compared with CF treatment, the N recovery rate, N agronomic utilization rate and partial productivity in FM treatment were significantly increased by 85.9%, 59.5% and 13.2%, respectively; while those of PM, PC and CF did not have significant difference. During the key growth period of maize, the inorganic N content in the 0–40 cm soil of FM treatment reached the highest, but did not have significant difference with others. At the maturity stage, the inorganic N content of FM treatment significantly was increased by 41.8%, compared with CF. There was no significant difference in inorganic N content among PC, PM and CF treatments. The application of organic fertilizer increased the soil organic C and total N contents in different degrees. Compared with CF treatment, PC and FM treatments increased the organic C content by 13.3% and 9.8%, respectively and the total soil N content of FM treatment was increased by 33.4% significantly. 【 **Conclusions** 】 Under the same N application rate, compared with single application of chemical fertilizer nitrogen, combined application of organic and inorganic fertilizers (50% aerobic fermented pig manure compost nitrogen + 50% chemical fertilizer nitrogen) could significantly increase summer maize grain yields, N accumulation, and soil total N and organic C contents in 0–40 cm layer. Completely organic nitrogen fertilizer has similar effect in maize yield and nitrogen accumulation with pure chemical fertilizer, but has higher soil total N and organic C contents, and aerobic fermented pig manure compost performs better than natural compost does.

Key words: combining application of chemical and organic fertilizers; summer maize; nitrogen use efficiency; organic carbon; inorganic nitrogen

玉米是我国重要的粮食作物, 2017 年玉米种植面积 0.43 亿公顷, 总产量达到 2.59 亿吨, 占当年粮食总产量的 39.1%, 为国家粮食安全做出了巨大的贡献^[1]。近年来, 化肥对粮食增产的贡献率逐渐降低, 农民不合理的施用化肥, 不仅没有提高作物产量和品质, 反而造成肥料利用率低、土壤结构破坏等问题^[2]。2007 年《第一次全国污染源普查公报》显示, 农业污染源总氮排放量占排放总量的 57.2%, 与种植业相比畜禽养殖造成的环境问题更为突出, 2015 年我国猪粪尿产生量约占畜禽粪便总量的 33.9%, 而资源化利用的比例仅为 47%, 仍有 50% 以上未被处理^[3-4]。李书田等^[5]研究指出, 我国有机肥养分资源约为当年化肥消费量的 1.4 倍, 而农田有机肥养分投入仅占 17.6%, 因此, 将畜禽粪便资源化, 实现种养结合、养分循环, 对粮食增产、环境保护意义重大。

2017 年农业农村部发布《畜禽粪污资源化利用行动方案(2017—2020 年)》来推进有机肥资源利用^[6]。有机肥中含有大量的有机质、中微量元素、微生物和酶等活性物质, 可促进土壤中有机碳氮的分解, 提高土壤有机质和肥力, 并持续供应作物生长期间

所需的养分^[7], 此外有机肥通过改善作物根系和土壤微生物的生存环境, 提高作物氮素吸收, 实现增产^[8]。有机肥虽然养分全面, 但是养分含量低且肥效缓, 单独施用不能满足作物养分需求, 而有机无机肥配施结合了化肥和有机肥优点, 既能培肥地力、持续供应作物养分, 又解决了化肥和粪便使用不合理带来的污染问题^[9]。研究表明, 等氮条件下有机肥替代部分化肥不仅能显著提高作物产量、氮素利用效率^[10-11], 还能够改善土壤团聚体结构和提高土壤有机质含量^[12], 从而促进养分的吸收利用, 实现增产^[13-14]。研究表明, 有机肥替代 50% 化肥较单施化肥能显著增加水稻产量^[15], 还能提高土壤肥力^[16], 也有研究发现, 100% 有机氮替代化肥氮不仅提高玉米产量, 还能提高土壤有机质和全氮含量^[13], 因此, 通过等氮有机替代提高作物产量和提高土壤肥力逐渐成为研究热点。

前人关于有机肥的研究多为在施用化肥的基础上增施不同类型的商品有机肥对作物产量、养分吸收及品质的影响^[17-18], 而在等氮量条件下, 针对玉米关键生育时期养分吸收与土壤氮素供应以及土壤有机碳变化的研究较少, 而且本研究对于种养结合系

统氮素的循环利用意义重大。本研究于 2017 年在中国农业大学丰宁动物试验基地开展, 从饲料配制、猪消化代谢、猪粪有机肥发酵到玉米种植试验, 探究整个循环过程氮素的吸收利用及损失, 作为其中一个重要环节, 本试验利用基地自产猪粪, 采用微生物复合菌剂好氧发酵制得有机肥, 在等氮量条件下, 比较不同猪粪发酵方式及有机氮替代比例对玉米产量、关键生育时期地上部氮素积累及利用效率、土壤无机氮和碳氮的影响, 促进规模化养猪场猪粪资源化利用, 减少环境污染, 提高肥料利用率, 为猪粪有机肥和化肥在玉米上的合理施用提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2017 和 2018 年在河北省丰宁县中国农业大学动物试验基地 (东经 116°36′、北纬 41°0′) 进行, 丰宁满族自治县属于中温带半湿润半干旱大陆性季风型高原山地气候, 年平均气温 0.9℃~6.2℃, 无霜期 110~145 天, 坝上地区有效年积温 1082℃, 坝下地区有效年积温 1489℃, 2017、2018 年玉米生育期降水量分别为 377.6 和 340.0 mm (图 1), 土壤类型为砂壤土, 播前 0—20 cm 土壤的基本理化性质为: 有机碳含量 7.38 g/kg、全氮 0.76 g/kg、有效磷 11.75 mg/kg、速效钾 153.42 mg/kg、pH 8.1。

1.2 试验设计

试验共设 5 个处理: 不施肥 (CK); 100% 化肥氮 (CF); 100% 自然堆肥猪粪氮 (PM); 100% 好氧发酵猪粪氮 (PC); 50% 好氧发酵猪粪氮 + 50% 化肥氮 (FM)。试验小区面积 72 m², 共设 4 次重复, 完全随机排列。本试验所有施肥处理施 N 225 kg/hm²、P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 90 kg/hm², 其中化肥为普通尿素 (46%)、过磷酸钙 (12%) 和硫酸钾 (52%)。本试验涉及的养殖、堆肥和种植过程均全程管理, 有机肥原料为丰宁动物试验基地育肥猪产生的猪粪, 分别采用自然堆肥 (PM, 含 N 2.65%、P₂O₅ 0.65%、K₂O 0.41%) 和与微生物复合菌剂 (VT 菌剂) 好氧发酵 (PC, 含 N 2.76%、P₂O₅ 0.58%、K₂O 0.47%) 后制得有机肥, 有机肥与化肥均在播前一次性均匀撒施, 随即采用旋耕机将肥料均匀混入 0—20 cm 土层中。供试玉米品种为先玉 335, 密度为 75000 株/hm², 采用人工点播, 2017 和 2018 年播种日期分别为 5 月 25 日和 6 月 5 日, 收获日期均为 10 月 1 日, 生长期

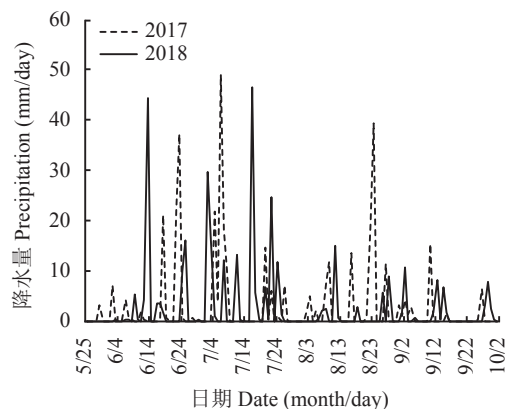


图 1 2017、2018 年玉米生育期降水量

Fig. 1 Precipitation during growing periods of maize in 2017 and 2018

内按照常规操作统一进行田间管理。

1.3 样品采集与测定

在玉米拔节期、抽雄期、乳熟期、成熟期分别测定地上部生物量, 在每个小区中部连续取 3 株长势均匀具有代表性的玉米样品, 将茎、叶、穗分别装进尼龙网袋中, 在 65℃ 下烘干至恒重, 称重并计算生物量, 然后粉碎。采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 半微量凯氏定氮法测定植株全氮; 收获时在每个处理测产区中部取 5.4 m² (3 行 × 3 m) 进行测产, 夏玉米产量换算成 15.5% 水分含量的标准产量。

在播前、拔节期、抽雄期、乳熟期和成熟期, 每个小区随机取 3 个点, 用土钻取深度为 0—60 cm 土壤, 每 20 cm 划分为一个土层, 依次分为 0—20、20—40、40—60 cm, 并将 3 个点土样分层混合。土样采用 0.01 mol/L CaCl₂ 溶液浸提, 然后用流动注射分析仪测定无机氮浓度; 同时采用烘干法测定土壤含水量; 并用环刀法分别测定 0—20、20—40 和 40—60 cm 土层的容重。计算每个土层硝态氮和铵态氮含量并相加得到该土层无机氮含量, 将 3 层土壤无机氮相加得到 0—60 cm 土壤无机氮含量。土壤有机碳和全氮含量采用碳氮分析仪 (MultiN/C3100, 德国 Analytik Jena 公司) 测定。在试验开始之前, 2017 年 3 月份采集了初始土壤样品, 每年玉米收获后均分 3 层采集 0—60 cm 土壤样品。

1.4 计算公式及统计方法

收获指数 (HI, %) = 成熟期玉米籽粒产量/生物量 × 100

氮素积累量 (kg/hm²) = 地上部植株生物量 (秸秆、叶片、籽粒) × 氮素含量;

氮素当季回收率 (RE_N, %) = (收获期施氮区地上

部氮素积累量-收获期不施氮区地上部氮素积累量) / 施氮量 × 100

氮素农学利用率 (AE_N , kg/kg) = (施氮区籽粒产量 - 不施氮区籽粒产量) / 施氮量

氮素偏生产力 (PFN_N , kg/kg) = 施氮区籽粒产量 / 施氮量

每层土壤无机氮含量 (kg/hm^2) = (硝态氮含量 + 铵态氮含量) × 该土层厚度 × 该层土壤容重

所有试验数据采用 Microsoft Excel 2016 软件计算与制图, 用 SAS 软件进行双因素 (年份和施肥处理) 方差分析, 处理间多重比较采用 LSD-test 法 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理玉米产量及构成因素

表 1 结果表明, 试验年份和施肥处理显著影响玉米产量, 年份和施肥处理之间无显著交互作用。年际间相比, 2017 年籽粒平均产量为 $10.7 t/hm^2$, 较 2018 年增加 23.6%, 穗粒数和千粒重同步增加了

7.7% 和 17.7%。与不施肥相比, 各施肥处理两年分别显著增产 22%~42% (2017 年) 和 28%~50% (2018 年)。在等氮量条件下, 以有机无机肥配施处理产量最高, 其次是好氧发酵猪粪氮处理, 自然堆肥处理产量最低。有机无机肥配施较单施化肥产量显著提高 12.4% (2017 年) 和 14.1% (2018 年), 平均提高 13.2%。产量构成因素中, 年份和施肥处理显著影响穗粒数和千粒重, 但年份和施肥处理之间并无交互作用。施肥增产主要归因于玉米千粒重的显著增加, 与不施肥处理相比, 有机无机肥配施千粒重和收获指数分别显著提高 35.0%、19.8% (2017 年) 和 36.4%、24.5% (2018 年), 等氮量条件下, 有机无机肥配施较单施化肥穗粒数、千粒重和收获指数均有所增加, 增幅分别为 2.8%、7.2%、7.4% (2017 年) 和 0.9%、11.6%、2.4% (2018 年)。

2.2 不同施肥处理氮素积累及利用效率

表 2 结果表明, 年份和施肥处理显著影响玉米氮素积累, 但是年份和施肥处理之间并无显著交互作用。与不施肥相比, 施氮显著提高了玉米成熟期的氮素积累量, 在等氮量条件下, 各处理氮素积累

表 1 不同施肥处理玉米产量及构成因素

Table 1 The maize yields and components under different fertilization treatments

年份 Year	处理 Treatment	产量 (t/hm^2) Yield	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 (g) 1000-grain weight	收获指数 (%) Harvest index
2017	CK	8.7 c	528 b	194 c	43.1 c
	CF	10.9 b	561 a	259 b	48.5 abc
	PM	10.6 b	559 a	255 b	46.5 bc
	PC	11.1 ab	571 a	261 ab	48.7 ab
	FM	12.3 a	577 a	282 a	51.4 a
2018	CK	6.7 c	462 b	189 c	42.9 b
	CF	8.8 b	534 a	215 ab	47.9 a
	PM	8.6 b	523 a	208 bc	48.0 ab
	PC	9.0 b	529 a	225 ab	48.4 a
	FM	10.1 a	539 a	241 a	48.9 a
方差分析 ANOVA analysis					
年份 Year (Y)		**	**	**	NS
施肥处理 Fertilization (F)		**	*	**	*
年份 × 施肥处理 (Y × F)		NS	NS	NS	NS

注 (Note): CK—不施肥 No fertilizer; CF—100% 化肥氮 100% chemical fertilizer N; PM—100% 自然堆肥猪粪氮 100% natural pig manure compost N; PC—100% 好氧发酵猪粪氮 100% aerobic fermented pig manure N; FM—50% 好氧发酵猪粪氮 + 50% 化肥氮 50% aerobic fermented pig manure N + 50% chemical fertilizer N. 同列数字后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著 Values followed by different small letters within each column are significantly different among treatments ($P < 0.05$); NS—无显著性差异 No significant difference; *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

表 2 不同施肥处理氮素积累及利用效率

Table 2 N accumulation and utilization under different fertilization treatments

年份 Year	处理 Treatment	氮素积累量 N accumulation (kg/hm ²)	氮素当季回收率 RE _N (%)	氮素农学利用率 AE _N (kg/kg)	氮素偏生产力 PPF _N (kg/kg)
2017	CK	249.6 c			
	CF	295.7 b	20.5 b	10.0 a	48.5 b
	PM	293.6 b	19.5 b	8.5 b	47.0 b
	PC	300.4 b	22.4 ab	10.9 a	49.4 ab
	FM	338.64 a	39.6 a	16.0 a	54.5 a
2018	CK	183.2 c			
	CF	232.1 b	21.8 b	9.3 ab	39.2 b
	PM	222.9 b	17.6 b	8.4 b	38.4 b
	PC	234.0 b	22.6 ab	10.1 ab	40.1 b
	FM	270.6 a	38.8 a	14.8 a	44.8 a
方差分析 ANOVA analysis					
年份 Year (Y)		**	NS	NS	**
施肥处理 Fertilization (F)		**	**	NS	NS
年份 × 施肥处理 (Y × F)		NS	NS	NS	NS

注 (Note): CK—不施肥 No fertilizer; CF—100% 化肥氮 100% chemical fertilizer N; PM—100% 自然堆肥猪粪氮 100% natural pig manure compost N; PC—100% 好氧发酵猪粪氮 100% aerobic fermented pig manure N; FM—50% 好氧发酵猪粪氮 + 50% 化肥氮 50% aerobic fermented pig manure N + 50% chemical fertilizer N. 数值后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著 Values followed by different small letters within each column are significantly different among treatments ($P < 0.05$); NS—无显著性差异 No significant difference; *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

量由高到低依次为有机无机肥配施、好氧发酵、单施化肥和自然堆肥。有机无机肥配施较单施化肥显著提高 14.5% (2017 年) 和 16.5% (2018 年), 平均提高 15.5%; 好氧发酵较单施化肥处理提高 1.5% (2017 年) 和 0.8% (2018 年)。此外, 年份显著影响氮素偏生产力; 施肥处理对氮素当季回收率影响显著, 但年份和施肥处理之间无交互作用。等氮量条件下, 有机肥处理 PC 和 FM 氮素当季回收利用率、农学利用率、偏生产力较单施化肥处理 CF 分别提高 9.4%~93.3%、9.1%~59.8%、1.9%~12.3% (2017 年) 和 3.7%~78.5%、8.8%~59.2%、2.1%~14.1% (2018 年)。有机无机肥配施的氮素当季回收率、农学利用率和偏生产力最高, 其次是好氧发酵, 单施化肥和自然堆肥处理则处于较低水平。

2.3 玉米各生育期不同施肥处理土壤无机氮变化

图 2 结果表明, 从播前到收获, 玉米 0—40 cm 土壤无机氮含量在拔节期最高, 随着生长发育的进行, 无机氮含量呈下降趋势, 成熟期较低。与不施肥相比, 施肥显著提高了玉米各生育时期的土壤

无机氮含量。在等氮量条件下, 有机无机肥配施 (FM) 处理在各生育时期无机氮含量均高于其他施肥处理, 其中抽雄期、乳熟期和成熟期无机氮含量依次增加后降低, 乳熟期无机氮含量较单施化肥 (CF) 处理显著提高 52.4%, 成熟期无机氮含量较其他处理提高 14.0%~41.8%; 猪粪好氧发酵氮处理 (PC) 在拔节期无机氮含量最高, 抽雄期和乳熟期逐渐降低, 乳熟期到成熟期小幅增加, 成熟期无机氮含量较单施化肥 (CF) 和猪粪自然堆肥处理 (PM) 分别提高 24.4% 和 16.7%; 猪粪自然堆肥处理 (PM) 土壤无机氮含量在拔节期和乳熟期均低于其他施肥处理, 成熟期较单施化肥 (CF) 处理提高 6.5%; 单施化肥 (CF) 处理在拔节期无机氮含量较高, 抽雄期和成熟期均低于施用有机肥处理 (PM、PC 和 FM)。

2.4 不同施肥处理对土壤有机碳和全氮含量的影响

图 3(a) 结果表明, 与试验初始值相比, 各处理的有机碳含量均有不同程度的增加, 其中不施肥处理有机碳含量增加 5.5%, 但未达到显著水平, 施肥

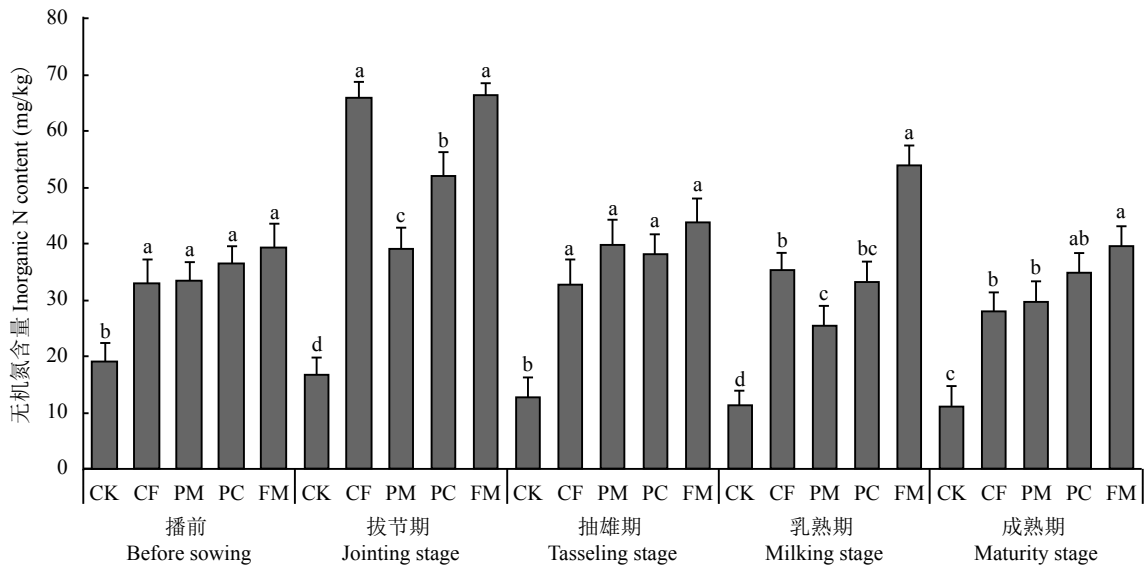


图2 不同施肥处理玉米各生育期0—40 cm土壤无机氮动态变化(2018)

Fig. 2 Inorganic N contents in 0–40 cm soil layer in each growth stage of maize under different fertilization treatments (2018)

[注 (Note) : CK—不施肥 No fertilizer; CF—100% 化肥氮 100% chemical fertilizer N; PM—100% 自然堆肥猪粪氮 100% natural pig manure compost N; PC—100% 好氧发酵猪粪氮 100% aerobic fermented pig manure N; FM—50% 好氧发酵猪粪氮 + 50% 化肥氮 50% aerobic fermented pig manure N + 50% chemical fertilizer N; 方柱上不同小写字母表示同一生育期不同处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著 Different small letters above the bars indicate significant difference among treatments within the same stage ($P < 0.05$).]

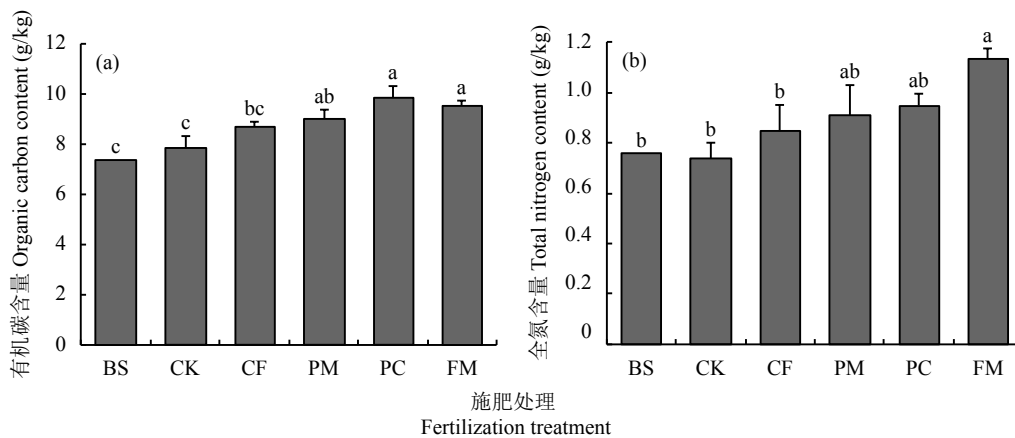


图3 不同施肥处理下土壤有机碳和全氮含量(2018)

Fig. 3 Soil organic carbon and total nitrogen contents under different fertilization treatments (2018)

[注 (Note) : BS—2017 年试验开始前初始土壤 The initial soil before the experiment in 2017; CK—不施肥 No fertilizer; CF—100% 化肥氮 100% chemical fertilizer N; PM—100% 自然堆肥猪粪氮 100% natural pig manure compost N; PC—100% 好氧发酵猪粪氮 100% aerobic fermented pig manure N; FM—50% 好氧发酵猪粪氮 + 50% 化肥氮 50% aerobic fermented pig manure N + 50% chemical fertilizer N; 方柱上不同小写字母表示处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著 Different small letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).]

使有机碳含量增加 17.2%~32.7%。与不施肥处理相比, 各施肥处理有机碳含量增加幅度为 11.1%~25.8%, 其中好氧发酵、有机无机肥配施和自然堆肥处理分别显著增加 25.8%、21.9% 和 14.8%。等氮量条件下, 好氧发酵和有机无机肥配施处理较单施化肥有机碳含量分别显著增加 13.3% 和 9.8%, 自然堆肥较单施化肥处理提高 3.4%, 无显著差异。

图 3(b) 结果表明, 与试验初始值相比, 不施肥土壤全氮含量降低 2.6%, 施肥使土壤全氮含量增加 12.0%~49.3%。与不施肥处理相比, 施肥使土壤全氮含量增加 15.0%~53.4%。在等氮量条件下, 有机无机肥配施土壤全氮含量较单施化肥处理显著增加 33.4%, 好氧发酵和自然堆肥处理分别增加 11.6% 和 7.1%, 好氧发酵和自然堆肥处理无显著差异。

3 讨论

化肥对粮食增产带来巨大贡献的同时, 对作物、土壤和环境带来的负面影响也不容忽视, 而有机氮能通过改善土壤性质, 促进水肥供应, 协调作物地上和地下部位的养分吸收, 实现增产^[17]。Rusinamhodzi 等^[19]研究表明, 长期施用有机肥能通过改善作物的生长环境来提高其产量, 何浩等^[20]也发现有机无机肥配施对玉米产量的提高主要是通过增加穗粒数和千粒重, 而穗粒数和籽粒重主要受花期和灌浆期碳水化合物向籽粒转移量的影响^[21]。本试验为了避免施肥次数和时间不一致对研究结果的影响, 单施化肥 (CF) 处理也采用一次性施肥, 但并非当地农民习惯。本研究结果中, 与单施化肥相比, 有机无机肥配施不仅能大幅增加玉米穗粒数, 还能显著提高其千粒重, 从而使产量显著提升, 与何浩等^[20]研究结果一致。在等氮量条件下, 有机无机肥配施增产效果最好, 其次为好氧发酵、单施化肥和自然堆肥处理, 这是因为化肥肥效快、易被作物吸收但是养分单一且易损失, 而有机肥养分全面但肥效缓慢, 不能满足作物关键生育时期的养分需求^[22], 有机无机配施既满足了前期的养分需求, 又解决了灌浆期养分需求量大问题, 从而提高了产量^[13]。此外, 玉米花期及灌浆期的气候变化对穗粒数和籽粒重影响显著, 这也正是本研究中 2018 年平均产量较 2017 年低 19.1% 的原因, 2018 年玉米抽雄期连续降水 23.1 mm, 造成的低温寡照影响玉米授粉与结实, 且抽雄至灌浆期有效降水 77.3 mm, 较 2017 年的 139.9 mm 明显偏少, 灌浆后期产生大斑病, 这些因素导致穗粒数和籽粒重降低, 最终影响产量^[23]。

氮素吸收是作物产量构成的基础, 作物不仅在生长前期对氮素敏感, 花后氮素的积累同样对作物产量影响显著^[24], 所以满足前期作物氮素吸收并提高花后的氮素积累对产量的提升至关重要。任伟等^[25]研究表明, 施用有机肥能促进夏玉米灌浆后期的群体生长, 有利于灌浆后期养分积累。本研究表明, 等氮量条件下, 各处理成熟期氮素累积量由高到低依次为有机无机肥配施、好氧发酵、单施化肥和自然堆肥, 氮素当季回收利用率、农学利用率和偏生产力均为有机无机肥配施处理最高。主要因为普通尿素的氮素释放较快, 且易损失, 导致作物前期生长过旺, 后期氮素供应不足, 影响光合和灌浆速率^[26], 且不利于氮素吸收累积, 而好氧发酵氮处理虽然产量相对化肥处理较高, 但是有机氮的矿化速率缓

慢, 氮素释放与玉米养分需求不匹配, 造成氮素利用率偏低, 自然堆肥处理可能腐熟不完全, 再次发酵产生高温和有害气体抑制作物生长, 影响氮素的吸收利用。有机无机肥配施中无机氮和有机氮的结合很好的协调了作物生长前后对氮素的需求, 减少氮素损失, 提高氮素的利用效率, 增加氮素积累量^[11]。

土壤无机氮主要包括 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 是植物氮素吸收利用的主要形式, 其含量的丰缺影响着氮素的吸收和产量的高低^[27]。张雪丽等^[28]、高菊生等^[29]研究表明, 有机氮替代化肥氮不仅能提高 0—20 cm 土壤全氮含量, 还能改变 0—40 cm 土壤无机氮形态, 并显著提高土壤无机氮含量, 减少氮素损失。原因在于有机无机肥配施能明显提高土壤硝化能力, 从而增加土壤无机氮含量, 特别是能使土壤表层无机氮含量维持在较高的水平^[30-31], 随着玉米的生长, 约 80% 的根系集中分布在 0—40 cm 土层中^[32], 这更有利于根系对氮素的吸收利用。本研究表明, 施肥能够显著提升玉米关键生育时期 0—40 cm 土壤无机氮的含量, 这与张雪丽等^[28]研究结果一致。拔节期土壤无机氮含量最高, 各处理无机氮含量由高到低依次为有机无机肥配施、单施化肥、好氧发酵、自然堆肥处理, 乳熟期到成熟期, 单施化肥处理无机氮含量降低幅度较大, 成熟期各处理无机氮含量由高到低依次为有机无机肥配施、好氧发酵、自然堆肥和单施化肥处理。单施化肥开花后期土壤表层无机氮供应不足, 而有机无机肥配施处理土壤无机氮一直维持在相对较高的水平, 保证了玉米整个生育时期的氮素需求。这可能是由于有机肥和化肥配施培肥土壤, 增加有机质含量, 改变土壤的理化性状, 提高微生物活性和根系活力, 促进了土壤微生物氮素的吸收及有机氮的矿化, 减少前期无机氮的损失, 从而使无机氮含量得到提升^[31, 33]。

土壤有机碳和全氮是表征土壤肥力、实现农田稳产高产的重要指标^[34]。本研究中, 不施肥处理土壤有机碳含量较试验初始土壤有所升高, 原因是秸秆还田和根系残留增加了土壤表层土壤有机碳, 当土壤有机碳未达到饱和时, 增加外源有机碳投入能在短期内提高土壤有机碳含量^[35]。此外, 单施化肥土壤有机碳含量较初始土壤增加, 因为单施化肥提高土壤前期供肥强度, 通过增加玉米光合产物归还量来提高土壤有机碳, 但是较其他施肥处理偏低, 原因在于施用化肥降低土壤碳氮比, 加速了土壤有机碳的分解矿化, 不利于其在土壤中累积^[36-37]。大量研究

表明,施用有机肥能显著提高土壤有机碳、全氮的含量^[7, 38-39],50%有机肥配施化肥可显著增加有机碳的累积^[16, 40],本研究中各施肥处理较不施肥均不同程度提高了土壤有机碳和全氮的含量,有机无机肥配施较单施化肥显著提高了有机碳和全氮含量,与前人研究结果一致。本研究中好氧发酵氮处理有机碳含量略高于有机无机肥配施处理,可能是因为化肥的投入降低了有机无机肥配施处理的碳氮比,加快了微生物的分解和有机碳的矿化,导致有机碳消耗比好氧发酵氮处理快^[41]。

4 结论

在施氮量 225 kg/hm² 且有机无机氮各占 50% 的条件下,自然猪粪堆肥氮和好氧发酵猪粪氮均可以显著提高夏玉米产量、氮素积累及利用率,显著提升成熟期 0—40 cm 土层土壤无机氮含量,单施好氧发酵猪粪和自然堆肥猪粪(100% 有机氮)在产量和玉米氮素累积量上的效果均与化肥处理相当,但好氧发酵堆肥提升土壤有机碳和全氮含量的效果优于自然堆肥。

参 考 文 献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.
- [2] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 259–273.
Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(2): 259–273.
- [3] 杨帆, 李荣, 崔勇, 等. 我国有机肥料资源利用现状与发展建议[J]. *中国土壤与肥料*, 2010, (4): 77–82.
Yang F, Li R, Cui Y, et al. The current status and development suggestions of organic fertilizer resources utilization in China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010, (4): 77–82.
- [4] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国农业部. 第一次全国污染源普查公报[N]. 2010.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics of People's Republic of China. Bulletin of the first national pollution source census[N]. 2010.
- [5] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(20): 4207–4229.
Li S T, Jin J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. *Scientia Agricultural Sinica*, 2011, 44(20): 4207–4229.
- [6] 池胜碧. 湖北建始县种养结合示范初报[J]. *养殖与饲料*, 2018, (7): 90–91.
- Chi S B. Preliminary report on the combination of planting and breeding in Jianshi County, Hubei Province[J]. *Animals Breeding and Feed*, 2018, (7): 90–91.
- [7] Li J, Wen Y C, Li X H, et al. Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain[J]. *Soil & Tillage Research*, 2018, 175: 281–290.
- [8] Dai H C, Chen Y Q, Yang X L, et al. The effect of different organic materials amendment on soil bacteria communities in barren sandy loam soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(30): 24019–24028.
- [9] 郑凤霞, 董树亭, 刘鹏, 等. 长期有机无机肥配施对冬小麦籽粒产量及氮挥发损失的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(3): 567–577.
Zheng F X, Dong S T, Liu P, et al. Effects of combined application of manure and chemical fertilizers on ammonia volatilization loss and yield of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(3): 567–577.
- [10] Zhang X Y, Fang Q C, Zhang T, et al. Benefits and trade-offs of replacing synthetic fertilizers by animal manures in crop production in China: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2019, 26(2): 888–900.
- [11] 段英华, 徐明岗, 王伯仁, 等. 红壤长期不同施肥对玉米氮肥回收率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(5): 1108–1113.
Duan Y H, Xu M G, Wang B R, et al. Effects of long-term different fertilization on nitrogen recovery efficiency of maize in red soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(5): 1108–1113.
- [12] 温延臣, 张曰东, 袁亮, 等. 商品有机肥替代化肥对作物产量和土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(11): 2136–2142.
Wen Y C, Zhang Y D, Yuan L, et al. Crop yield and soil fertility response to commercial organic fertilizer substituting chemical fertilizer[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(11): 2136–2142.
- [13] 何翠翠, 李贵春, 尹昌斌. 华北冬小麦-夏玉米系统有机态氮替代的产量及肥料效应[J]. *中国土壤与肥料*, 2018, (1): 43–48.
He C C, Li G C, Yin C B. Manure nitrogen substitution in autumn base fertilizer improved grain yields of winter wheat-summer maize system[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2018, (1): 43–48.
- [14] 朱海, 杨劲松, 姚荣江, 等. 有机无机肥配施对滨海盐渍农田土壤盐分及作物氮素利用的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(3): 441–450.
Zhu H, Yang J S, Yao R J, et al. Effects of partial substitution of organic nitrogen for inorganic nitrogen in fertilization on salinity and nitrogen utilization in salinized coastal soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(3): 441–450.
- [15] Subehia S K, Sepehya S, Rana S S, et al. Long-term effect of organic and inorganic fertilizers on rice (*Oryza sativa* L.)-wheat (*Triticum aestivum* L.) yield, and chemical properties of an acidic soil in the western Himalayas[J]. *Experimental Agriculture*, 2013, 49(3):

- 382-394.
- [16] 邢鹏飞,高圣超,马鸣超,等.有机肥替代部分无机肥对华北农田土壤理化特性、酶活性及作物产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2016, (3): 98-104.
- Xing P F, Gao S C, Ma M C, *et al.* Impact of organic manure supplement chemical fertilizer partially on soil nutrition, enzyme activity and crop yield in the North China plain[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2016, (3): 98-104.
- [17] 王艳丽,吴鹏年,李培富,等.有机肥配施氮肥对滴灌春玉米产量及土壤肥力状况的影响[J]. *作物学报*, 2019, 45(8): 1230-1237.
- Wang Y L, Wu P N, Li P F, *et al.* Effects of organic manure combined with nitrogen fertilizer on spring maize yield and soil fertility under drip irrigation[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(8): 1230-1237.
- [18] 罗华,李敏,胡大刚,等.不同有机肥对肥城桃果实产量及品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(4): 955-964.
- Luo H, Li M, Hu D G, *et al.* Effects of organic fertilization on fruit yield and quality of Feicheng peach (*Prunus persica* cv. Feicheng)[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(4): 955-964.
- [19] Rusinamhodzi L, Corbeels M, Zingore S, *et al.* Pushing the envelope? Maize production intensification and the role of cattle manure in recovery of degraded soils in smallholder farming areas of Zimbabwe[J]. *Field Crops Research*, 2013, 147: 40-53.
- [20] 何浩,危常州,李俊华,等.商品有机肥替代部分化肥对玉米生长、产量及土壤肥力的影响[J]. *新疆农业科学*, 2019, 56(2): 325-332.
- He H, Wei C Z, Li J H, *et al.* Effects of commercial organic fertilizer replacing partial chemical fertilizer on maize growth, yield and soil fertility[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2019, 56(2): 325-332.
- [21] 李朝苏,汤永禄,吴春,等.施氮量对四川盆地小麦生长及灌浆的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(4): 873-883.
- Li C S, Tang Y L, Wu C, *et al.* Effect of N rate on growth and grain filling of wheat in Sichuan Basin[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(4): 873-883.
- [22] 奚振邦,王高群,杨佩珍.中国现代农业发展中的有机肥问题[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(12): 1874-1878.
- Xi Z B, Wang Y Q, Yang P Z. The issue on organic manure in developing modern agriculture in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(12): 1874-1878.
- [23] 明博,朱金城,陶洪斌,等.黑龙江流域玉米不同生育阶段气象因子对产量性状的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(4): 919-927.
- Ming B, Zhu J C, Tao H B, *et al.* Effects of meteorological factors at different growth stages on yield traits of maize (*Zea mays* L.) in Heilonggang Basin[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(4): 919-927.
- [24] 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.
- [25] 任伟,赵鑫,黄收兵,等.不同密度下增施有机肥对夏玉米物质生产及产量构成的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(10): 1146-1155.
- Ren W, Zhao X, Huang S B, *et al.* Effects of application of organic fertilizer under different planting densities on dry matter production and yield formation of summer maize[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(10): 1146-1155.
- [26] 吴中伟,樊高琼,王秀芳,等.不同氮肥用量及其生育期分配比例对四川丘陵区带状种植小麦氮素利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(6): 1338-1348.
- Wu Z W, Fan G Q, Wang X F, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer levels and application stages on nitrogen utilization of strip-relay-intercropping wheat in Sichuan hilly areas[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(6): 1338-1348.
- [27] 廖佳元,宋海星,赵东生,等.油菜不同生长期稻田土壤无机氮形态及氮肥利用率对控释氮肥施用的响应[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(1): 158-164.
- Liao J Y, Song H X, Zhao D S, *et al.* Effects of controlled release nitrogen fertilizers on soil inorganic nitrogen forms nitrogen fertilization efficiency at different growth stages of rape[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(1): 158-164.
- [28] 张雪丽,董文怡,刘勤,等.有机肥替代化肥氮对水稻田面水和土壤中氮素含量的影响[J]. *中国农业气象*, 2018, 39(4): 256-266.
- Zhang X L, Dong W Y, Liu Q, *et al.* Effects of organic fertilizer substituting chemical nitrogen fertilizer on nitrogen content in the surface water and soil of paddy field[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(4): 256-266.
- [29] 高菊生,黄晶,董春华,等.长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(2): 314-324.
- Gao J S, Huang J, Dong C H, *et al.* Effects of long-term combined application of organic and chemical fertilizers on rice yield and soil available nutrients[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(2): 314-324.
- [30] 张国娟,濮晓珍,张鹏鹏,等.干旱区棉花秸秆还田和施肥对土壤氮素有效性及根系生物量的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(13): 2624-2634.
- Zhang G J, Pu X Z, Zhang P P, *et al.* Effects of stubble returning to soil and fertilization on soil nitrogen availability and root biomass of cotton in arid region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(13): 2624-2634.
- [31] 高洪军,朱平,彭畅,等.等氮条件下长期有机无机配施对春玉米的氮素吸收利用和土壤无机氮的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 318-325.
- Gao H J, Zhu P, Peng C, *et al.* Effects of partially replacement of inorganic N with organic materials on nitrogen efficiency of spring maize and soil inorganic nitrogen content under the same N input[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(2): 318-325.
- [32] 屈佳伟,高聚林,王志刚,等.不同氮效率玉米根系时空分布与氮素吸收对氮肥的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(5):

- 1212–1221.
- Qu J W, Gao J L, Wang Z G, *et al.* Effect of nitrogen rate on temporal and spatial distribution of roots and nitrogen uptake of maize with genotypes of high or low nitrogen efficiency[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(5): 1212–1221.
- [33] 吕凤莲, 侯苗苗, 张弘弢, 等. 垆土冬小麦-夏玉米轮作体系有机肥替代化肥比例研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(1): 22–32.
- Lü F L, Hou M M, Zhang H T, *et al.* Replacement ratio of chemical fertilizer nitrogen with manure under the winter wheat-summer maize rotation system in Lou soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 22–32.
- [34] 徐明岗, 张旭博, 孙楠, 等. 农田土壤固碳与增产协同效应研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1441–1449.
- Xu M G, Zhang X B, Sun N, *et al.* Advance in research of synergistic effects of soil carbon sequestration on crop yields improvement in croplands[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1441–1449.
- [35] 张莉, 李玉义, 逢焕成, 等. 玉米秸秆颗粒还田对土壤有机碳含量和作物产量的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(2): 160–168.
- Zhang L, Li Y Y, Pang H C, *et al.* Effects of granulated maize straw incorporation on soil organic carbon contents and grain yield[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(2): 160–168.
- [36] 尹云锋, 蔡祖聪. 不同施肥措施对潮土有机碳平衡及固碳潜力的影响[J]. *土壤*, 2006, (6): 745–749.
- Yin Y F, Cai Z C. Effect of fertilization on equilibrium levels of organic carbon and capacities of soil stabilizing organic carbon for fluvo-aquic soil[J]. *Soils*, 2006, (6): 745–749.
- [37] Mandal A, Patra A K, Singh D, *et al.* Effect of long-term application of manure and fertilizer on biological and biochemical activities in soil during crop development stages[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(18): 3585–3592.
- [38] 李双来, 胡诚, 乔艳, 等. 水稻小麦种植模式下长期定位施肥土壤氮的垂直变化及氮储量[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(6): 1334–1337.
- Li S L, Hu C, Qiao Y, *et al.* Vertical variation and storage of soil total nitrogen in long-term fertilizer experiment[J]. *Ecology and Environmental of Sciences*, 2010, 19(6): 1334–1337.
- [39] Chaudhary S, Dheri G S, Brar B S. Long-term effects of NPK fertilizers and organic manures on carbon stabilization and management index under rice-wheat cropping system[J]. *Soil & Tillage Research*, 2017, 166: 59–66.
- [40] 吕真真, 刘秀梅, 仲金凤, 等. 长期施肥对红壤性水稻土有机碳矿化的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(15): 2636–2645.
- Lü Z Z, Liu X M, Zhong J F, *et al.* Effects of long-term fertilization on mineralization of soil organic carbon in red paddy soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(15): 2636–2645.
- [41] 胡乃娟, 韩新忠, 杨敏芳, 等. 秸秆还田对稻麦轮作农田活性有机碳组分含量、酶活性及产量的短期效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 371–377.
- Hu N J, Han X Z, Yang M F, *et al.* Short-term influence of straw return on the contents of soil organic carbon fractions, enzyme activities and crop yields in rice-wheat rotation farmland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(2): 371–377.