

有机物料还田对夏玉米田土壤氮素形态、转化及利用的影响

陈琳 杜海伦 刘晴 李腾 张学鹏 李金娜

陈兴琼 隋鹏 刘瑾 陈源泉*

(中国农业大学 农学院,北京 100193)

摘要 为探究不同有机物料还田对土壤氮素转化与利用的影响,通过田间定位试验,在夏玉米季不同生育时期以无机肥(CF)为对照,测定秸秆(ST)、猪粪(PM)和沼渣(BR)3种有机物料等氮量还田处理的土壤全氮、硝态氮、铵态氮以及微生物量氮以及玉米产量等指标,并通过室内培养测定不同物料还田的土壤净氮矿化速率。结果表明:从对土壤总量影响来看,添加3种有机物料均能不同程度地增加土壤全氮含量,成熟期PM、BR和ST处理分别比CF提高16.62%、9.14%和8.60%。从氮素形态来看,PM处理可以提高土壤硝态氮含量,在玉米扬花期和成熟期分别提高37.05%和75.86%;BR处理可以提高土壤铵态氮含量,在整个玉米生育期土壤铵态氮提高16.83%。3种有机物料还田均可提高土壤微生物量氮,ST、PM和BR分别比CF高出15.76%、14.84%和17.85%。从不同有机物料还田的土壤氮矿化速率来看,PM和BR处理可显著提高土壤氮矿化速率,分别比CF高出33.53%和12.93%,ST处理的土壤氮矿化速率最低(0.03~1.06 mg/(kg·d))。就产量与氮肥吸收而言,PM处理玉米产量比ST处理提高8.10%,PM和BR处理氮肥吸收效率均显著高于CF和ST处理。3种有机物料还田均可提高土壤全氮水平,但在土壤氮素形态和氮矿化速率上有差异。在3种有机物料处理中,沼渣处理最有利于增加土壤无机氮含量,猪粪处理对于促进土壤氮矿化效果最佳,秸秆则显著减弱了土壤中氮的矿化速率。综上,猪粪和沼渣还田在提高土壤供氮能力、促进氮矿化与促进氮肥吸收上均显著优于秸秆,猪粪还田有利于提高玉米产量。

关键词 秸秆还田; 猪粪还田; 沼渣还田; 氮形态; 氮矿化

中图分类号 S158

文章编号 1007-4333(2022)07-0001-11

文献标志码 A

Effects of organic materials returning on the form, transformation and utilization of soil nitrogen in summer maize field

CHEN Lin, DU Hailun, LIU Qing, LI Teng, ZHANG Xuepeng, LI Jinna, CHEN Xingqiong,

SUI Peng, LIU Jin, CHEN Yuanquan*

(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract To explore the effects of different organic materials returning to the field on soil nitrogen conversion and utilization, a field positioning experiment was conducted with chemical fertilizer (CF) as the control at different growth stages of summer maize season. The changes of soil total nitrogen, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, microbial biomass nitrogen and maize yield after straw (ST), pig manure (PM) and biogas residue (BR) returning to the field were investigated. The net mineralization rate of soil nitrogen was measured by indoor culturing. The results showed that: Applying three kinds of organic materials could increase soil total nitrogen content in different degrees, and the soil total nitrogen contents in PM, BR and ST treatments were 16.62%, 9.14% and 8.60% higher than CF treatments at maturity stage, respectively. In terms of the nitrogen form, PM treatment could increase soil nitrate nitrogen content by 37.05% and 75.86% at flowering stage and maturity stage, respectively. BR treatment could increase soil

收稿日期: 2021-08-05

基金项目: 国家自然科学基金(31571595)

第一作者: 陈琳,博士研究生,E-mail:chenl_cau@163.com

通讯作者: 陈源泉,教授,主要从事农业生态和宏观农业研究,E-mail:chenyq@cau.edu.cn

ammonium nitrogen content, which increased by 16.83% in the whole maize growth period. All the three kinds of organic materials increased the soil microbial biomass nitrogen, and they were 15.76%, 14.84% and 17.85% higher in ST, PM and BR treatments than in CF treatment on average. In terms of soil nitrogen mineralization rate of different organic materials returning to the field, PM and BR treatments significantly increased the soil nitrogen mineralization rate, which was 33.53% and 12.93% higher than that in CF, respectively. ST treatment had the lowest soil nitrogen mineralization rate (0.03–1.06 mg/(kg·d)). In terms of yield and N uptake, the yield of maize of PM treatment increased by 8.10% compared with ST treatment, and N uptake efficiency of both PM and BR was significantly higher than that of CF and ST. Returning of the three kinds of organic materials to the field all increased soil total nitrogen level, but there were differences in soil nitrogen form and nitrogen mineralization rate. Among the three organic treatments, biogas residue treatment was the most beneficial for increasing soil mineral nitrogen content, pig manure treatment was the best for promoting soil nitrogen mineralization, and straw significantly reduced soil nitrogen mineralization. In conclusion, returning pig manure and biogas residue to the field was superior to straw in improving soil nitrogen supply capacity, promoting nitrogen mineralization and nitrogen uptake, and pig manure returning to the field was beneficial to improve maize yield.

Keywords straw returning; pig manure returning; biogas residue returning; nitrogen form; nitrogen mineralization

氮肥是作物增产的重要保障,中国每年氮肥使用量达 2.69×10^7 t,占世界的 25%^[1]。但中国氮肥利用率普遍偏低,玉米氮肥利用率仅 26.1%,远低于国际水平^[2]。化肥过量或不合理的施用是农业面源污染的重要根源之一^[3]。减少化肥使用、提高肥料利用效率已成为农业环境污染治理的重要研究领域^[3-4]。此外,农业生产产生的大量秸秆和畜禽粪便等有机废弃物由于没有得到合理的资源化利用,也是造成农业面源污染、资源浪费的重要问题^[4]。据估算,我国每年产生的作物秸秆达 7 亿 t 以上^[5],畜禽粪便超过 10 亿 t^[6],通过发展循环农业,促进农业有机废弃物的肥料化循环利用,不仅可以促进农田生态系统固碳减排,还可以替代化肥、减少化肥的过量投入,可以有效减少氮损失,对提高氮肥利用率、降低环境污染具有重要意义^[3,7-9]。

秸秆、猪粪和沼渣等有机物料还田,能增加土壤氮素含量,提高土壤质量,但不同有机物料的组分会影响土壤氮素形态及氮素转化^[10]。在不同有机物料还田对土壤 N 形态的影响方面,有研究表明,秸秆在还田前期能提高土壤铵态氮含量^[8],而闫德智^[11]研究表明,添加秸秆后土壤微生物量氮显著增加,而土壤矿质氮量在 14 d 迅速下降。段鹏鹏等^[12]研究表明,鸡粪配施化肥可有效提高矿质氮含量;李春喜等^[13]研究表明,秸秆、猪粪和沼液均能提高小麦田土壤全氮含量;周元等^[14]研究表明,蚕豆秸秆、油菜秸秆和猪粪均能提高 0~20 cm 土层中全氮和微生物量氮含量,物料还田的土壤全氮和微生物量氮含量分别提高 1.9%~33.0%和 41.5%~98.7%。

在不同有机物料还田对土壤 N 转化的影响方面,闫德智等^[11]研究表明,秸秆添加后,土壤氮矿化速率显著降低。Agomoh 等^[15]研究表明,粪肥可提高土壤的氮矿化能力;但也有研究表明,粪肥施用对土壤的氮矿化没有显著影响^[16]。

综合来看,尽管对不同有机物料还田之后的土壤氮素形态与转化已有相关的研究,但还存在还田物类型研究不全、结果不一致等方面的问题。目前,比较全面的各种物料系统性对比研究尚未见报道。本研究拟通过田间试验与室内培养试验的方法,对秸秆、畜禽粪便和沼渣 3 种目前典型的、且有代表性的有机物料还田后土壤氮素形态、氮矿化与氮肥吸收等指标进行综合分析,旨在探讨不同有机物料对土壤氮素形态转化与利用的影响,以为农业废弃物资源化利用提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于河北省沧州市吴桥县中国农业大学吴桥实验站(37°41' N, 116°37' E)进行。该地区气候为华北平原地区典型的暖温带季风气候,年平均气温为 12.6 °C,年积温(≥ 0 °C)为 4 862.9 °C,年平均降雨量 562 mm。降雨季节性明显,主要分布在 6—8 月份,占到总降雨量的 75%以上。全年光照时长 2 724.8 h,无霜期 201 d。试验初始土壤性质,见表 1。玉米品种选用‘郑单 958’,株行距为 50 cm×30 cm。播种前有机物料还田,均匀还于地表,并旋地镇压。

表1 不同土层土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of different soil layers

土层/cm Soil layer	容重/(g/cm ³) Bulk density	全氮/(g/kg) Total nitrogen	有机质/(g/kg) Organic matter	有效磷/(mg/kg) Available phosphorus	速效钾/(mg/kg) Available potassium
0~10	1.31	1.03	16.07	8.28	198.96
>10~20	1.25	0.89	12.99	7.32	151.94

1.2 试验设计

田间试验于2020年6月进行,试验共4个处理,包括3种有机物料:秸秆(ST)、猪粪(PM)、沼渣(BR),以无机肥(CF)处理为对照。采用随机区组设计,每个处理3次重复,小区面积7 m×5 m=35 m²。作物种植模式采取当地普遍的冬小麦-夏玉米复种轮作模式。所有处理按“总氮量等氮量”原则施肥,即有机物料和无机肥投入的总氮量保持一致。秸秆处理按每年作物的实际秸秆产出全量还田,玉米季还田秸秆为小麦秸秆,根据秸秆还田量和含氮量计算有机氮量;猪粪和沼渣处理均

按照有机氮:无机氮氮素质量比=3:1确定猪粪和沼渣的还田量;3种有机物料还田的处理分别于作物播种前施入;无机肥按基追肥质量比=1:1分别施于每季作物生长的土壤中。N肥用量(每生长季用量)为150 kg/hm²,有机物料按上述基施,无机肥按质量比=1:1的底肥和追肥施入;P肥用量为26 kg/hm²,K肥用量为124 kg/hm²,P、K肥均在播种前和物料一起一次性施入。有机物料碳、氮含量,见表2;具体施肥量,见表3。有机物料均在玉米播前翻耕还田,物料还田前将物料烘干并测定有机物料养分含量。

表2 不同有机物料基本性质

Table 2 Properties of different organic materials

有机物料 Organic material	C/(g/kg)	N/(g/kg)	C/N
秸秆 Straw	370.00	3.80	97.37
猪粪 Pig manure	250.00	25.10	9.96
沼渣 Biogas residue	260.00	19.20	13.54

表3 2020年不同处理具体施肥方案

Table 3 Fertilization schemes for different treatments in 2020

处理 Treatment	有机物料 Organic material		底肥 Base fertilizer			追肥 Top application
	投入量 Application rate	还氮量 Nitrogen application rate	尿素 Urea	磷酸二铵 Phosham	硫酸钾 Potassium sulfate	尿素 Urea
CF	0	0	139	57	248	161
ST	7 474	28.0	201	57	248	40
PM	6 395	112.5	18	57	248	40
BR	7 458	112.5	18	57	248	40

1.3 样品采集及测定

样品采集:分别于玉米季苗期(6月27日)、拔

节期(7月28日)、扬花期(8月14日)和成熟期(10月1日)按“W”形5点取样法对0~20 cm土层进行

土样采集。土样去除植物残根和石砾等杂质后分成2份,一份过2.00 mm筛于4℃下保存用于测定土壤微生物量氮和无机氮,另一份自然风干后粉碎过0.25 mm筛用于土壤全氮的测定。收获时各小区单独收获测产并随机取样3株,粉碎后过0.25 mm筛备用。

氮素形态测定:土壤和植株全氮测定采用凯氏定氮法^[17]。土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 测定采用1 mol/L KCl浸提,滤液用连续流动分析仪测定。土壤微生物量氮(SMBN)采用氯仿熏蒸提取法^[17]测定。

土壤氮素矿化培养:称取玉米季4个时期土壤样品(相当于风干土样60.0 g)放入250 mL培养瓶中,加盖封口并在顶部穿孔以保证氧气供给,黑暗处25℃恒温培养。培养期间用称重补水法保证土壤含水率基本维持在田间持水量的75%。播种期、拔节期、扬花期及收获期所取土样分别于培养0、14 d后破坏性取样,测定土壤硝态氮和铵态氮含量。

1.4 指标计算

土壤氮素净矿化速率计算公式为:

$$\text{NMR} = (C_{(\text{NH}_4^+)_B} + C_{(\text{NO}_3^-)_B} - C_{(\text{NH}_4^+)_A} - C_{(\text{NO}_3^-)_A}) / \Delta T$$

式中:NMR,土壤氮素净矿化速率, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; ΔT ,培养时间,d; $C_{(\text{NH}_4^+)_A}$ 和 $C_{(\text{NO}_3^-)_A}$ 分别表示培养前土壤中铵态氮和硝态氮含量, mg/kg ; $C_{(\text{NH}_4^+)_B}$ 和 $C_{(\text{NO}_3^-)_B}$ 分别表示培养后土壤中铵态氮和硝态氮含量, mg/kg 。

氮肥吸收效率=成熟期植株氮素积累量/施氮量

1.5 数据分析

采用Excel 2019和SPSS 23.0进行数据处理和图像处理。不同处理间差异性采用单因素ANOVA分析,采用LSD多重比较法进行差异显著性分析($P < 0.05$)。

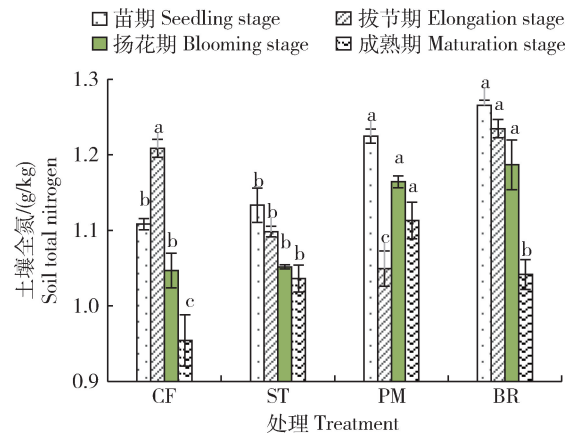
2 结果与分析

2.1 不同有机物料还田对玉米生育期土壤氮素形态的影响

2.1.1 对土壤全氮含量的影响

由图1可知,玉米全生育期内,各处理土壤全氮变化趋势大体一致,总体表现为随玉米生长而降低的趋势,其中CF处理拔节期土壤全氮含量由于追施无机氮肥而略有增加。就不同处理而言,土壤全氮含量因添加氮肥不同而呈现差异,玉米4个生育

期土壤全氮含量表现不同差异水平。ST、PM和BR处理苗期土壤全氮水平分别比CF处理提高2.26%、10.51%和14.20%,其中,CF和ST处理间无显著差异,PM和BR处理均与CF处理间差异达到显著性水平($P < 0.05$)。CF和BR处理拔节期的土壤全氮均显著高于ST处理,也均显著高于PM处理。扬花期PM和BR处理分别比CF处理提高11.22%和13.38%,同时,显著高于ST处理。成熟期3组处理土壤全氮含量相较于对照,分别提高8.60%、16.62%和9.14%。其中PM处理土壤全氮水平(1.11 g/kg)显著高于其他3组处理。



ST, 秸秆配施无机肥;PM, 猪粪配施无机肥;BR, 沼渣配施无机肥;CF, 单施无机肥。不同字母表示同时期不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

ST, straw with chemical fertilizer; PM, pig manure with chemical fertilizer; BR, biogas residue with chemical fertilizer; CF, apply chemical fertilizer only. Different letters indicate significant difference between different treatments in the same period ($P < 0.05$). The same below.

图1 不同处理玉米生育期土壤全氮

Fig. 1 Soil total nitrogen content during maize growth period under different treatments

2.1.2 对土壤无机氮的影响

由图2可知,不同处理间全生育期土壤无机氮含量变化趋势不一致,其中CF和ST处理土壤硝态氮含量呈现“降低-增加-降低”的趋势,PM和BR处理土壤硝态氮含量随玉米生长进程呈现“先增加后降低”的趋势。由于ST和CF处理基肥无机氮肥施入量高,高于PM和BR处理,速效氮肥含量高,苗期CF和ST处理的土壤硝态氮含量分别为25.51和24.55 mg/kg,均显著高于PM和BR处理,PM和BR处理施用等氮量无机氮肥和有机氮肥,苗期PM土壤硝态氮含量显著高于BR处理。拔节期

PM 和 BR 处理土壤硝态氮含量分别比 CF 处理提高 138.17% 和 220.34%，其中 PM 和 BR 处理均显著高于 CF 处理，ST 和 CF 处理间无显著差异，BR 处理显著高于 PM 处理。扬花期 ST 处理的土壤硝态氮含量比 CF 降低 12.24%，PM 和 BR 处理比 CF 处理分别提高 37.05% 和 36.04%。成熟期 ST、PM 和 BR 处理的土壤硝态氮含量分别比 CF 处理提高 55.86%、75.86% 和 73.94%，同时 PM 和 BR 处理的硝态氮含量均显著高于 ST 处理。

土壤铵态氮含量除 CF 处理呈“先降低再增加”趋势外，其他 3 组处理呈“增加-降低-增加”趋势。苗期 CF 处理土壤铵态氮含量分别比 ST 和 PM 处理高 35.17% 和 29.70%。拔节期 PM 和 BR 处理土壤中铵态氮含量分别比 CF 处理高 34.19% 和 23.19%。扬花期 BR 处理土壤铵态氮水平分别比 CF、ST 和 PM 高 51.31%、60.92% 和 35.99%，成熟期不同处理间土壤铵态氮水平无显著差异。

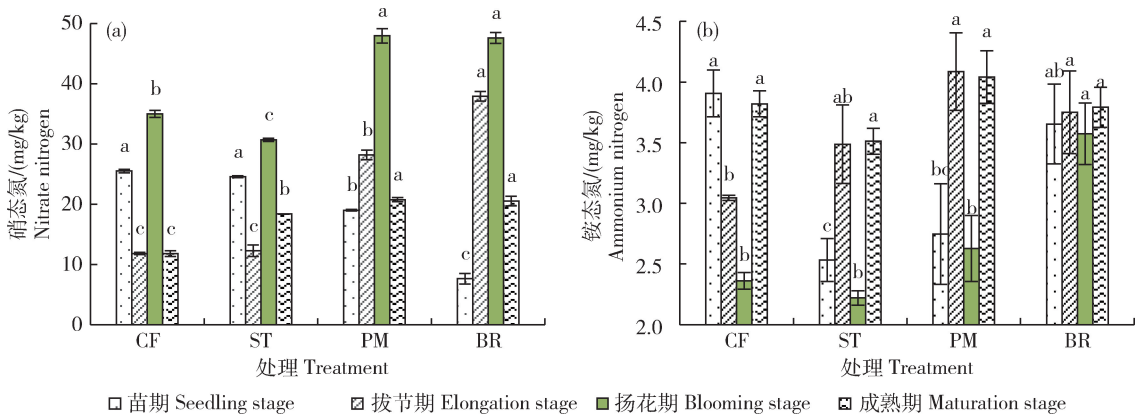


图 2 不同处理下土壤硝态氮(a)和铵态氮(b)含量

Fig. 2 Soil NO₃⁻-N (a) and NH₄⁺-N (b) content under different treatment

2.1.3 对土壤微生物量氮的影响

由图 3 可知，土壤微生物量氮在玉米全生育期内呈下降趋势，施用不同有机物料土壤微生物量氮在各生育期内略有提高。相较于 CF 处理，苗期 ST、PM 和 BR 处理土壤微生物量氮水平分别提高 22.11%、11.97% 和 21.04%。拔节期 PM 和 BR 处理微生物量氮分别比 CF 处理提高 20.92% 和 4.36%，PM 处理显著高于 CF 和 ST 处理。扬花期不同处理间无显著差异。成熟期 ST、PM 和 BR 处理相较于 CF 处理分别提高 29.34%、6.95% 和 35.14%，其中 BR 处理土壤微生物量氮水平达 17.5 mg/kg，显著高于 CF 处理。

2.2 不同有机物料还田下玉米生育期土壤氮矿化速率

由图 4 可知，除 ST 处理外，各处理在玉米不同生育期土壤氮矿化速率整体呈上升趋势，CF 和 PM 处理土壤氮矿化速率在玉米扬花期呈现下降趋势，BR 处理氮矿化速率随玉米生育进程而不断提高。相较于 CF 处理，ST 处理显著降低土壤氮矿化速率，且矿化速率随生育期变化不断地降低，苗期、拔

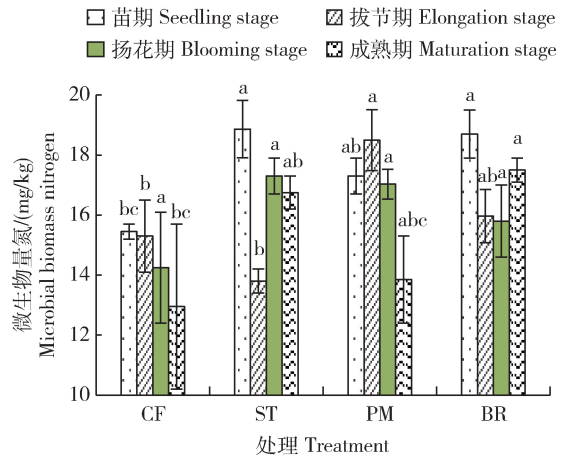


图 3 不同处理下土壤微生物量氮

Fig. 3 Soil microbial biomass nitrogen under different treatment

节期、扬花期和成熟期 4 个时期土壤氮矿化速率分别比 CF 处理降低 67.82%、72.15%、98.85% 和 98.10%，显著低于同时期 CF 处理的土壤氮矿化速率。PM 处理下 4 个生育期土壤氮矿化速率分别比 CF 处理提高 85.74%、1.37%、21.92% 和 25.10%，

其中苗期、扬花期和成熟期土壤氮矿化速率显著高于CF处理同时期水平。与CF处理相比, BR处理除在玉米拔节期土壤氮矿化速率降低40.03%, 在玉米苗期、扬花期和成熟期分别提高70.46%、8.34%和12.94%。

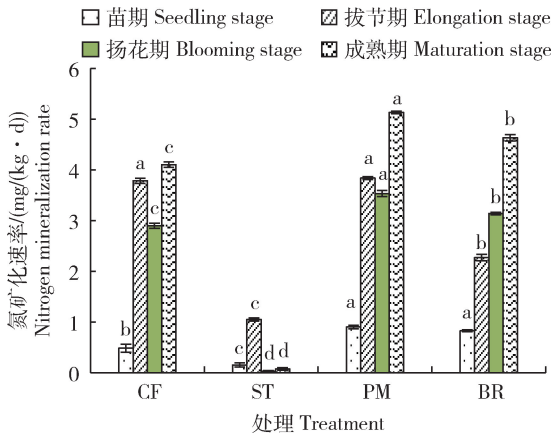


图4 不同处理土壤氮矿化速率

Fig. 4 Soil nitrogen mineralization rate under different treatment

2.3 不同有机物料还田对玉米产量与氮素吸收效率的影响

由图5可知, 4个处理间, PM处理玉米产量最高, 6 853.33 kg/hm², PM处理产量显著高于ST处理(6 340 kg/hm²), CF、ST和BR处理间产量无显著差异。PM、CF和BR处理间产量也无显著差异。PM和BR处理玉米氮肥吸收效率显著高于CF处理, ST与CF处理差异不显著。其中PM处理玉米的氮肥吸收效率最高, 为1.53 kg/kg。

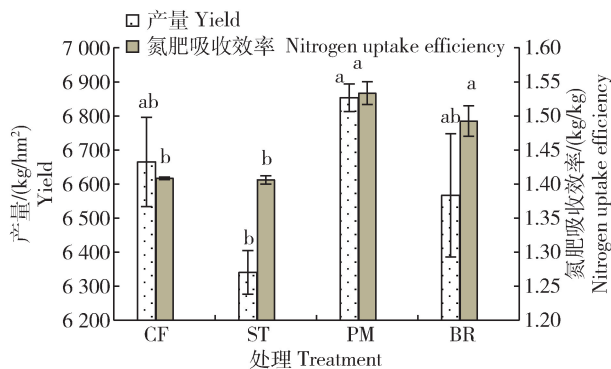


图5 不同处理下玉米产量及氮肥吸收效率

Fig. 5 Maize yield and nitrogen uptake efficiency under different treatments

壤全氮含量, 成熟期平均增幅由高到低为PM(16.62%)>BR(9.14%)>ST(8.60%)。从氮素形态来看, 不同物料还田的差异主要体现在土壤硝态氮和微生物量氮上, 有机物料还田显著提高土壤硝态氮和微生物量氮含量, 成熟期硝态氮增幅由高到低为PM(75.86%)>BR(73.94%)>ST(55.86%), 微生物量氮平均增幅由高到低为BR(35.14%)>ST(29.34%)>PM(6.95%)。通过玉米季土壤氮矿化速率变化, 证明猪粪与沼渣还田促进土壤氮矿化过程, 秸秆还田显著削弱了土壤氮矿化作用。同时, PM增加了玉米产量和氮肥吸收效率, BR处理也提高了玉米季氮肥吸收效率。因此, 不同物料由于特性不同, 还田之后, 土壤氮素形态与转化产生了差异, 猪粪有利于提高土壤全氮含量, 提高了土壤氮矿化速率, 提高土壤硝态氮含量, 为玉米生长提供充足的氮素, 从而提高了产量; 沼渣还田增加了微生物量氮, 也提高了氮肥吸收效率; 秸秆在3种物料中表现较差。

3 讨论

3.1 不同有机物料还田对土壤氮素形态的影响

农田土壤氮素形态与含量受氮肥施用与作物生长的影响^[18], 氮素是作物干物质积累与光合作用的基础, 作物在生长过程中对养分需求逐渐增加, 但由于化肥施用后养分释放较快, 能够满足作物生长前期对养分的需求, 作物生长后期供氮能力下降, 不能满足作物生育后期对养分的需求^[19]。同时, 玉米生育期需氮特点为“前轻后重”, 生育后期植株氮素积累量对玉米产量形成具有决定作用, 土壤供氮不足将导致玉米严重减产, 因此生育后期充足的土壤速效氮水平是玉米获得高产的前提^[20]。此外, 土壤微生物量氮含量不高, 但作为土壤有机养分的重要活性部分, 很大程度上反映微生物数量^[21], 可用于表征土壤有效养分, 是评价土壤肥力的重要指标^[22]。

本研究结果表明, 随着作物的生长与氮素的吸收, 土壤全氮含量逐渐降低, CF处理由于基、追肥质量比为1:1, 追肥量为75 kg/hm², 显著高于其他3组处理, 在拔节期土壤全氮含量略有提高。同时, 成熟期3组有机物料还田处理土壤全氮含量都高于单施无机肥, 这与张建军等^[23]研究结论一致, 因为化肥供氮多为速效氮, 除作物吸收利用以外, 还会以气体形态损失或随径流而损失^[24-25], 从而降低土壤全氮水平。所有处理的玉米扬花期土壤硝态氮水平最

从土壤全氮来看, 有机物料还田均显著增加土

高,原因是扬花期玉米进入生殖生长阶段,主要进行的是氮素内部的转移,根系从土壤中吸收的氮素减少^[26],同时前期追施无机氮肥,促进了作物通过根系的分泌增加土壤有机物,从而增加了微生物活性,促进了土壤中有机的矿化,增加土壤矿质氮的含量^[27]。同时,土壤铵态氮和硝态氮变化趋势相反,这与黄容等^[8]研究结果一致,土壤中硝态氮和铵态氮含量呈现“此消彼长”的趋势,玉米生长季高温,土壤含水量较少,硝化作用强烈,土壤以硝态氮含量为主^[28]。本研究中苗期秸秆处理和无机肥处理施用化肥量均较高,而猪粪和沼渣氮素均以有机形态为主,故苗期CF和ST处理土壤硝态氮含量高于PM处理,也显著高于BR处理,经过作物吸收利用与土壤氮素形态转化,猪粪和沼渣还田促进氮素矿化,导致拔节期土壤硝态氮和铵态氮水平显著提高,PM和BR处理土壤硝态氮水平显著高于CF处理,ST处理土壤硝态氮水平与CF处理无显著差异。随后,氮矿化继续进行,扬花期和成熟期PM和BR处理土壤硝态氮含量都显著高于CF处理,因秸秆的高碳氮比对土壤中氮矿化产生负影响^[29],故扬花期土壤硝态氮含量低于CF处理。

在本研究中,3种有机物料还田都可以提高土壤微生物量氮含量,这与周元等^[14]研究结果一致,有机物料还田后增加微生物生长所需的碳源和氮源,使微生物的同化作用加强^[30]。且有有机物料还田后改善土壤理化性质,从而提高土壤微生物的生物量^[31]。在玉米季4个生育期内,土壤微生物量氮整体呈现下降趋势,这是因为前期土壤温、湿度更适宜土壤微生物的生长与繁殖,有利于氮固定,从而土壤微生物量氮显著高于后期^[32]。同时,有机物料随施用时间推移不断减少,可利用的氮源减少^[33],故相较于苗期,成熟期土壤微生物量氮有所降低。同时,不同有机物料因其成分差异对土壤微生物量氮影响不同。有机物料中碳的分解速率随碳氮比增加而降低,随氮浓度增加而上升^[34],本研究中猪粪还田处理的土壤碳氮比最低,其次是沼渣,秸秆碳氮比最高。低碳氮比的猪粪还田后氮素快速释放,促进根系生长与根系分泌物增加,故前期猪粪处理土壤微生物量氮含量高,后期降低。因秸秆高碳氮比,ST处理在玉米生长后期较拔节期微生物量氮有所提高。这也与周元等^[14]研究结果一致。但是在本研究中,有机物料还田后土壤微生物量氮含量增幅并不大,这可能与高温干旱的气候条件有关。

3.2 不同有机物料还田对土壤氮矿化的影响

有机物料施入农田后影响土壤氮素的矿化过程^[35]。张名豪等^[36]研究认为,高碳氮比的物料,如稻草、秸秆等还田后,会促进土壤氮素向氮固持方向进行转化,土壤氮矿化与无机氮固持方向与速率取决于还田的有机物料碳氮比。本研究中,秸秆碳氮比最高,达97.37,显著高于猪粪和沼渣物料中的碳氮比,导致土壤氮矿化速率显著降低,低于其他3组处理,但转化方向依旧向氮矿化方向进行。其原因是秸秆提供了丰富的碳源,促使微生物大量增殖^[37],使土壤氮矿化速率显著下降。而碳氮比低的猪粪还田后促使土壤氮矿化过程加速进行,从而导致其氮矿化速率显著高于其他3组处理,这与胡立煌等^[38]研究结果一致。同时,沼渣亦为土壤提供了碳、氮源,促使土壤氮矿化速率提高,除拔节期外,其他时期都显著高于CF处理,这与张名豪等^[36]研究结果一致。值得注意的是,拔节期进行追肥,CF处理仅施用无机肥,基追肥质量比为1:1,故追肥量高于有机物料处理,为拔节期土壤补充了氮源,促使土壤中氮矿化过程加速,从而高于ST和BR处理。

同时,在本研究中,土壤氮矿化速率随生育期推进而变化。秸秆处理仅在拔节期追肥补充无机氮肥后,土壤氮矿化速率有所增加,其他时期逐渐降低。这是因为随着土壤中氮素的消耗,碳氮比不断提高,从而导致土壤氮矿化速率降低。本研究还发现,拔节期后添加秸秆处理的土壤氮矿化速率降低,且趋近于零,这是由于秸秆腐解速度主要集中在有机物料还田前90 d,90 d之后腐解速度缓慢^[39],因此不断腐解的小麦秸秆为土壤微生物提供了碳源,提高了土壤碳氮比,降低了土壤氮矿化速率。其他3组处理苗期到成熟期土壤氮矿化速率整体呈增加趋势,可能是因为在前期作物对氮素的吸收利用,土壤中矿质氮减少,导致土壤氮矿化速率相对较慢^[40],后期土壤矿化过程为土壤提供充足的矿质氮,土壤矿化速率逐步提升。土壤中氮矿化过程受多因素影响,除碳氮比外,还有水分、温度以及土壤pH等因素^[36],是否产生影响还需进一步研究。

3.3 不同有机物料还田对玉米产量与氮肥吸收效率的影响

氮肥施用影响作物产量与氮肥吸收利用效率。本研究表明,相较于秸秆还田,猪粪施用可提高玉米产量,同时猪粪和沼渣可显著提高玉米氮肥吸收效率。粪肥对提高作物产量、氮素吸收利用有促进作

用,这与李春喜等^[41]研究结果一致。本研究结果表明,有机、无机配施在一定范围内不仅可以达到增产目的,还可以提高氮肥吸收,降低其对环境的污染,降低土壤板结程度、增加土壤中胶体颗粒。有机物料还田可在提高产量的同时,提高土壤肥力,减少环境污染^[42-43]。

总体上,3种有机物料还田相比于无机肥均增加土壤全氮含量,且显著提高玉米生长所需的氮素。特性不同的有机物料投入对土壤氮素形态与转化影响不一致。3种有机物料中,猪粪在提高土壤全氮含量上表现最佳,且猪粪还田显著提高玉米生育后期土壤氮矿化速率,同时提高了土壤硝态氮含量,玉米具有“喜硝”特性,土壤硝态氮含量对生长发育具有重要意义^[44],猪粪为玉米生长提供了所需的速效氮,满足了玉米的生长需求;沼渣在提高土壤全氮含量上表现不如猪粪,但在提高土壤微生物量氮含量与铵态氮水平上表现更好,微生物量氮是土壤活性氮的重要储备库,是表征土壤肥力的重要指标^[45],施用沼渣可提供给作物良好的活性氮库;秸秆在3种物料中提升效果相对较差。因此,在土壤速效氮含量低的大田选用猪粪还田,可实现无机肥的部分替代,且效果良好。

4 结 论

本试验结果表明,有机物料还田显著改变土壤氮素转化与利用。秸秆、猪粪和沼渣还田后土壤全氮分别提高8.60%、16.62%和9.14%。猪粪和沼渣还田可使土壤氮矿化速率分别提高33.53%和12.93%,促进夏玉米对氮素的吸收,氮肥吸收效率分别提高8.88%和5.97%。在华北平原麦-玉两熟种植模式条件下,猪粪配施无机肥是实现氮素高效利用和玉米高产的最优施氮方式。

参考文献 References

- [1] FAOSTAT. Fertilizers consumption in nutrients[EB/OL]. [2021-07-22]. <http://www.fao.org/faostat/zh/#country/351>
- [2] 张福锁,王激清,张卫峰,崔振岭,马文奇,陈新平,江荣风. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, Cui Z L, Ma W Q, Chen X P, Jiang R F. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924 (in Chinese)
- [3] Liu E K, Yan C R, Mei X R, He W Q, Bing S H, Ding L P, Liu Q, Liu S, Fan T L. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in northwest China[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3-4): 173-180
- [4] 李柘锦,隋鹏,龙攀,严玲玲,王彬彬,陈源泉. 不同有机物料还田对农田系统净温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 111-117
Li Z J, Sui P, Long P, Yan L L, Wang B B, Chen Y Q. Effects of different organic wastes application on net greenhouse gas emission in farmland system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(S2): 111-117 (in Chinese)
- [5] 高忠坡,倪嘉波,李宁宁. 我国农作物秸秆资源量及利用问题研究[J]. 农机化研究, 2022, 44(4): 1-6, 25
Gao Z P, Ni J B, Li N N. Research on the quantity and utilization of crop straw resources in China[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2022, 44(4): 1-6, 25 (in Chinese)
- [6] 姜茜,王瑞波,孙炜琳. 我国畜禽粪便资源化利用潜力分析及对策研究:基于商品有机肥利用角度[J]. 华中农业大学学报:社会科学版, 2018(4): 30-37, 166
Jiang Q, Wang R B, Sun W L. Potential evaluation and countermeasures on livestock manure resource utilization: Based on perspective of commercial organic fertilizer utilization[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University: Social Sciences Edition*, 2018(4): 30-37, 166 (in Chinese)
- [7] 王飞,李清华,何春梅,刘彩玲,黄毅斌. 稻秆与紫云英联合还田提高黄泥田氮素利用率和土壤肥力[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(1): 66-74
Wang F, Li Q H, He C M, Liu C L, Huang Y B. Combined returning of milk vetch and rice straw improves fertilizer nitrogen recovery and fertility of yellow-mud paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(1): 66-74 (in Chinese)
- [8] 黄容,高明,黎嘉成,徐国鑫,王富华,李娇,陈仕奇. 有机物料等氮量施用对紫色土氮形态及温室气体排放的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(21): 4087-4101
Huang R, Gao M, Li J C, Xu G X, Wang F H, Li J, Chen S Q. Effects of combined application of various organic materials and chemical fertilizer on soil nitrogen formation and greenhouse gas emission under equal nitrogen rates from purple soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(21): 4087-4101 (in Chinese)
- [9] 陈源泉,隋鹏,严玲玲,龙攀,李柘锦,王彬彬. 有机物料还田对华北小麦玉米两熟农田土壤有机碳及其组分的影响[J].

- 农业工程学报, 2016, 32(S2): 94-102
- Chen Y Q, Sui P, Yan L L, Long P, Li Z J, Wang B B. Effects of different organic wastes incorporation on soil organic carbon and its fraction under wheat-maize cropping system in North China Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (S2): 94-102 (in Chinese)
- [10] 黄容. 有机替代对菜园土壤温室气体排放和氮转化的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2019
- Huang Q. Effects of organic substitution on greenhouse gas emission and nitrogen transformation in the soil of vegetable field [D]. Chongqing: Southwest University, 2019 (in Chinese)
- [11] 闫德智, 王建建. 添加秸秆对土壤矿质氮量、微生物氮量和氮总矿化速率的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(3): 631-636
- Yan D Z, Wang D J. Nitrogen mineralization of ¹⁵N labeled straw added into the paddy soils in Taihu region[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(3): 631-636 (in Chinese)
- [12] 段鹏鹏, 丛耀辉, 徐文静, 张玉玲, 虞娜, 张玉龙. 氮肥与有机肥配施对设施土壤可溶性氮动态变化的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4717-4727
- Duan P P, Cong Y H, Xu W J, Zhang Y L, Yu N, Zhang Y L. Effect of combined application of nitrogen fertilizer and manure on the dynamic of soil soluble N in greenhouse cultivation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4717-4727 (in Chinese)
- [13] 李春喜, 张令令, 马守臣, 邵云, 陈惠婷, 王敬娣. 有机物料还田对麦田土壤碳氮含量、小麦产量及经济效益的影响[J]. 作物杂志, 2017(2): 145-150
- Li C X, Zhang L L, Ma S C, Shao Y, Chen H T, Wang J R. Effects of organic materials returning on soil carbon and nitrogen contents, yield and economic benefit in wheat[J]. *Crops*, 2017(2): 145-150 (in Chinese)
- [14] 周元, 陈远学, 蒋帆, 胡月秋, 龙玲, 裴丽珍, 李建兵, 徐开未. 玉米地土壤微生物量碳、氮及微生物熵对不同物料还田的响应[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 173-180
- Zhou Y, Chen Y X, Jiang F, Hu Y Q, Long L, Pei L Z, Li J B, Xu K W. Responses of soil microbial biomass carbon, nitrogen and microbial entropy to different materials returned to corn fields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2): 173-180 (in Chinese)
- [15] Agomoh I, Zvomuya F, Hao X Y, Akinremi O O, McAllister T A. Nitrogen mineralization in chernozemic soils amended with manure from cattle fed dried distillers grains with solubles[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2018, 82(1): 167-175
- [16] 王乐云, 田飞飞, 能惠, 郑西来, 辛佳. 不同施肥处理对农田土壤有机氮组分及其矿化的影响[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2019, 49(4): 117-127
- Wang L Y, Tian F F, Neng H, Zheng X L, Xin J. Effects of different fertilizers on organic nitrogen fractions and their mineralization in agricultural soils[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2019, 49(4): 117-127 (in Chinese)
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- Lu R K. *The Analytical Methods for Soil and Agricultural Chemistry* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000 (in Chinese)
- [18] 段赫, 刘目兴, 张海林, 刘秀芸, 张君, 易军. 水耕年限对麦季土壤水-氮动态与小麦产量的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 259-264, 274
- Duan H, Liu M X, Zhang H L, Liu X Y, Zhang J, Yi J. Effects of paddy rice cultivation history on water and nitrogen dynamics during wheat growth period and wheat yield[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(6): 259-264, 274 (in Chinese)
- [19] 刘楚桐, 陈松岭, 金鑫鑫, 徐志强, 叶旭红, 邹洪涛, 张玉龙. 控释氮肥减量配施对土壤氮素调控及夏玉米产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(2): 108-115
- Liu C T, Chen S L, Jin X X, Xu Z Q, Ye X H, Zou H T, Zhang Y L. Effect of reducing and postponing controlled-release nitrogen application on soil nitrogen regulation and summer maize yield[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(2): 108-115 (in Chinese)
- [20] 蒲玮, 吴雅薇, 张岷, 陈谋浩, 刘佳媛, 陈祥, 袁继超, 孔凡磊. 减氮配施氮肥增效剂对土壤速效氮和玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 276-283
- Pu W, Wu Y W, Zhang D, Chen M H, Liu J Y, Chen X, Yuan J C, Kong F L. Effects of nitrogen reduction combined with nitrogen fertilizer synergist on soil available nitrogen and corn yield[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(3): 276-283 (in Chinese)
- [21] 汤宏, 沈健林, 张杨珠, 刘杰云, 王聪. 秸秆还田与水分管理对稻田土壤微生物量碳、氮及溶解性有机碳、氮的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 240-246
- Tang H, Shen J L, Zhang Y Z, Liu J Y, Wang C. Effect of rice straw incorporation and water management on soil microbial biomass carbon, nitrogen and dissolved organic carbon, nitrogen in a rice paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(1): 240-246 (in Chinese)
- [22] 王昂, 戴丹超, 马旭洲, 牟群, 于永清, 吕为群. 稻蟹共作模式对土壤微生物量氮和酶活性的影响[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(1): 76-84
- Wang A, Dai D C, Ma X Z, Mou Q, Yu Y Q, Lv W Q.

- Effects of rice-crab culture system on soil microbial biomass nitrogen and soil enzymes activities[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 35(1): 76-84 (in Chinese)
- [23] 张建军, 樊廷录, 赵刚, 党翼, 王磊, 李尚中, 程万莉. 不同有机物料与部分化肥长期定位配合施用对土壤养分的调控效应[J]. *中国土壤与肥料*, 2018(3): 85-91
- Zhang J J, Fan T L, Zhao G, Dang Y, Wang L, Li S Z, Cheng W L. Effect of long-term fixed application of different material replacing partly chemical nitrogenous fertilizer on soil nutrition in dry land of eastern Gansu Province[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018(3): 85-91 (in Chinese)
- [24] 靳玉婷, 刘运峰, 胡宏祥, 穆静, 高梦瑶, 李先藩, 薛中俊, 龚静静. 持续性秸秆还田配施化肥对油菜-水稻轮作周年氮磷径流损失的影响[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(9): 1937-1951
- Jin Y T, Liu Y F, Hu H X, Mu J, Gao M Y, Li X F, Xue Z J, Gong J J. Effects of continuous straw returning with chemical fertilizer on annual runoff loss of nitrogen and phosphorus in rice-rapeseed rotation [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(9): 1937-1951 (in Chinese)
- [25] Zheng H, Liu Z, Nie X, Zuo J, Wang L. Comparison of active nitrogen loss in four pathways on a sloped peanut field with red soil in China under conventional fertilization conditions[J]. *Sustainability*, 2019, 11(22): 1-16
- [26] 戴嘉璐, 李瑞平, 李聪聪, 鲁耀泽, 邹存菁. 河套灌区节水减肥对玉米不同生育期水分和养分的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 271-277
- Dai J L, Li R P, Li C C, Lu Y Z, Zou C J. Effects of water saving and fertilizer reducing on water and nutrients of maize at different growth stages in the Hetao irrigated area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 271-277 (in Chinese)
- [27] Lemke R L, Vanden Bygaart A J, Campbell C A, Lafond G P, Grant B. Crop residue removal and fertilizer N: Effects on soil organic carbon in a long-term crop rotation experiment on a Udic Boroll[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010, 135(1-2): 42-51
- [28] Chen Q H, Feng Y, Zhang Y P, Zhang Q C, Shamsi I H, Zhang Y S, Lin X Y. Short-Term responses of nitrogen mineralization and microbial community to moisture regimes in greenhouse vegetable soils [J]. *Pedosphere*, 2012, 22(2): 263-272
- [29] 李玲玲, 李书田. 有机肥氮素矿化及影响因素研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3): 749-757
- Li L L, Li S T. A review on nitrogen mineralization of organic manure and affecting factors[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(3): 749-757 (in Chinese)
- [30] 张春霞, 郝明德, 魏孝荣, 王旭刚. 不同农田生态系统土壤微生物生物量碳的变化研究[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(1): 81-83
- Zhang C X, Hao M D, Wei X R, Wang X G. Change of soil microbial biomass carbon in different agroecosystems [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(1): 81-83 (in Chinese)
- [31] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. *土壤学报*, 2002, 39(1): 83-90
- Xu Y C, Shen Q R, Ran W. Effects of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N, and P after sixteen years of cropping [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(1): 83-90 (in Chinese)
- [32] 李世清, 李生秀. 有机物料在维持土壤微生物体氮库中的作用[J]. *生态学报*, 2001, 21(1): 136-142
- Li S Q, Li S X. Effects of organic materials on maintaining soil microbial biomass Nitrogen [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(1): 136-142 (in Chinese)
- [33] Azeez J O, Averbek W V. Nitrogen mineralization potential of three animal manures applied on a sandy clay loam soil [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(14): 5645-5651
- [34] 龙攀, 隋鹏, 高旺盛, 王彬彬, 严玲玲, 邢源, 陈源泉. 不同有机物料还田对农田土壤有机碳以及微生物量碳的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2015, 20(3): 153-160
- Long P, Sui P, Gao W S, Wang B B, Yan L L, Xing Y, Chen Y Q. Effects of agricultural organic wastes incorporation on soil organic carbon and microbial carbon [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(3): 153-160 (in Chinese)
- [35] 周博, 高佳佳, 周建斌. 不同种类有机碳、氮矿化特性研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 366-373
- Zhou B, Gao J J, Zhou J B. Carbon and nitrogen mineralization characteristics of different types of organic manures [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(2): 366-373 (in Chinese)
- [36] 张名豪, 卢吉文, 赵秀兰. 有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响[J]. *环境科学*, 2016, 37(6): 2291-2297
- Zhang M H, Lu J W, Zhao X L. Effect of different organic materials on nitrogen mineralization in two purple soils [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(6): 2291-2297 (in Chinese)
- [37] 李孝刚, 彭曙光, 靳志丽, 周羽, 刘勇军, 周志高, 王兴祥. 有机物料对植烟土壤氮素矿化及微生物性质的影响[J]. *土壤学报*, 2021, 58(1): 225-234
- Li X G, Peng S G, Jin Z L, Zhou Y, Liu Y J, Zhou Z G, Wang X X. Effects of application of organic materials on nitrogen mineralization and microbial properties in tobacco planting soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(1): 225-234 (in Chinese)
- [38] 胡立煌, 史文竹, 项剑, 王良梅, 张焕朝. 生物炭、秸秆和粪肥

- 对滨海盐碱土氮矿化和硝化作用的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(8): 1089-1096
- Hu L H, Shi W Z, Xiang J, Wang G M, Zhang H C. Effects of biochar, straw and manure fertilizer on nitrogen mineralization and nitrification of coastal saline-alkali soil[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(8): 1089-1096 (in Chinese)
- [39] 杨茜雯, 吴景贵, 王雪峰, 李建明, 杨晓庭, 李虎, 谷月, 孙玲. 畜禽粪与玉米秸秆田间原位条带堆腐特征研究[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(6): 46-52
- Yang Q W, Wu J G, Wang X F, Li J M, Yang X T, Li H, Gu Y, Sun L. Study on in situ strip composting characteristics of livestock manure and corn straw in field[J]. *Environmental Science and Technology*, 2020, 43(6): 46-52 (in Chinese)
- [40] 杨蕊, 李裕元, 魏红安, 高茹, 石辉, 吴金水. 畜禽有机肥氮、磷在红壤中的矿化特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 600-607
- Yang R, Li Y Y, Wei H A, Gao R, Shi H, Wu J S. Study on the nitrogen and phosphorus mineralization of livestock and chicken manure in red soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3): 600-607 (in Chinese)
- [41] 李春喜, 刘晴, 邵云, 李斯斯, 李晓波, 翁正鹏. 有机物料还田和减施氮肥对麦-玉周年农田碳氮足迹及经济效益的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 527-536
- Li C X, Liu Q, Shao Y, Li S S, Li X B, Weng Z P. Effects of organic material returning and nitrogen fertilizer reduction on the economic yields and carbon, nitrogen, and water footprints of wheat-maize annual farmland in China [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(4): 527-536 (in Chinese)
- [42] Zhang Y L, Li C H, Wang Y W, Hu Y M, Christie P, Zhang J L, Li X L. Maize yield and soil fertility with combined use of compost and inorganic fertilizers on a calcareous soil on the North China Plain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155 (S1): 85-94
- [43] 张珂珂, 周苏玫, 张嫚, 石珊珊, 尹钧. 减氮补水对小麦高产群体光合性能及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 863-872
- Zhang K K, Zhou S M, Zhang M, Shi S S, Yin J. Effects of reduced nitrogen application and supplemental irrigation on photosynthetic characteristics and grain yield in high-yield populations of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(3): 863-872 (in Chinese)
- [44] 王成, 李昌珍, 廖钰, 袁赫奕, 杨福孙. 氮肥形态对槟榔幼苗全氮含量、土壤有效氮和酶活性的影响[J]. 分子植物育种, 2021, 19(19): 6564-6573
- Wang C, Li C Z, Liao Y, Yuan H Y, Yang F S. Effects of nitrogen forms on total nitrogen content, soil available nitrogen and enzyme activities of *Areca catechu* seedlings[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021, 19(19): 6564-6573 (in Chinese)
- [45] 罗佳琳, 赵亚慧, 于建光, 王宁, 薛利红, 杨林章. 麦秸与氮肥配施对水稻根际区土壤微生物量碳氮的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(9): 1582-1591
- Luo J L, Zhao Y H, Yu J G, Wang N, Xue L H, Yang L Z. Effects of wheat straw and nitrogen fertilizer application on the soil microbial biomass carbon and nitrogen in the rhizosphere of rice[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(9): 1582-1591 (in Chinese)

责任编辑：吕晓梅