

液体牛粪肥配施化肥对寒地玉米氮素利用与农田氮平衡的影响

姜佰文, 刘俊辉, 吴雪冰, 朱凤博, 迟海航, 段佳慧, 刘丽红, 邵 慧

(东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 以集约化奶牛养殖场的厌氧发酵液体牛粪肥为试验材料, 探究液体牛粪肥不同还田量配施化肥对寒地春玉米产量、氮素利用、农田氮素表现平衡的影响, 为液体牛粪肥还田利用提供合理方案。田间试验在等氮量(纯氮 200 kg/hm²)投入条件下设 6 个处理: 不施肥处理(F0)、单施化肥处理(CK)、液体牛粪肥与化肥配施处理, 用量分别为 30、60、90、120 t/hm²(FL30、FL60、FL90、FL120), 磷、钾用量保持一致。结果表明, 与 CK 处理相比, 液体牛粪肥配施化肥显著提高玉米子粒产量, 增幅达 15.7% ~ 23.6%; 配施牛粪肥处理显著提高氮肥回收利用率、氮肥生理利用率、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力, 增幅分别达 5.2% ~ 22.5%、17.1% ~ 36.5%、44.5% ~ 61.4%、16.7% ~ 23.3%。液体牛粪肥还田量为 60 t/hm² 处理表现最优, 可有效降低农田氮素表现损失, 降低 0 ~ 200 cm 土层无机氮残留量。

关键词: 玉米; 液体牛粪肥; 氮素利用率; 农田氮平衡; 子粒产量

中图分类号: S513.062

文献标识码: A

Effects of Dairy Cattle Slurry Combined with Chemical Fertilizer on Nitrogen Use Efficiency and Cropland Nitrogen Balance of Maize in Cold Region

JIANG Bai-wen, LIU Jun-hui, WU Xue-bing, ZHU Feng-bo, CHI Hai-hang,

DUAN Jia-hui, LIU Li-hong, SHAO Hui

(College of Resources and Environmental Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Intensive dairy farm-derived anaerobically fermented cattle slurry application effects on spring maize productivity and nitrogen dynamics were investigated in cold regions under equivalent N input (200 kg/ha). Six treatments with different levels of dairy cattle slurry addition were adopted: No fertilization treatment (F0); Chemical fertilizer only (CK); Combining application of chemical fertilizer and dairy cattle slurry treatment, i.e., dairy cattle slurry returning farmland quantity of 30, 60, 90, and 120 t/ha, which were abbreviated as FL30, FL60, FL90, and FL120, respectively. The same amount of phosphorus and potassium is used. The main results are as follows: in comparison with CK treatment, combination of dairy cattle slurry and chemical fertilizer significantly increased maize grain yield, with an increase of 15.7%–23.6% in grain yield under each dairy cattle slurry treatment; Under the combined application of dairy cattle slurry and chemical fertilizer, the recovery efficiency of applied nitrogen, physiological efficiency of applied nitrogen, agronomic efficiency of applied nitrogen, partial factor productivity from applied nitrogen of maize significantly improved, with increase of 5.2%–22.5%, 17.1%–36.5%, 44.5%–61.4%, 16.7%–23.3%, respectively. The best performance was achieved when the dairy cattle slurry was returned to the field at a quantity of 60 t/ha. It can reduce the residual inorganic nitrogen in the 0–200 cm soil layer.

Key words: Maize; Dairy cattle slurry; Nitrogen use efficiency; Cropland nitrogen balance; Grain yield

录用日期: 2024-04-12

基金项目: 东北农业大学学术骨干项目(20YJXG13)、农业农村部东北平原农业绿色低碳重点实验室开放课题(LCGANE12)、黑土地保护与利用科技创新工程专项(XDA28100200)

作者简介: 姜佰文(1970–), 男, 黑龙江克山人, 教授, 博士生导师, 从事养分管理研究。E-mail: jbwneau@163.com

邵 慧为本文通信作者。E-mail: shaohuineau@neau.edu.cn

近年来,伴随肉蛋奶等蛋白产品的需求增加,畜禽养殖业集约化发展,种养分离加剧。《畜禽养殖业污染物排放标准》估算,目前,我国年产畜禽粪污达41.32亿t,其中,粪污含氮、磷、钾养分总量达6.735万t,畜禽粪污还田比例不足20%^[1]。促进畜禽粪污无害化处理与科学还田是推进种养循环与农业绿色发展的重要途径。

黑龙江省是奶牛养殖大省,2021年奶牛存栏109.7万头^[2]。黑龙江省也是玉米种植大省,种植面积与总产均位居全国首位^[3],每年化肥用量达230万t左右。促进奶牛粪污无害化还田是实现化肥减施的有效手段。集约化养牛场的粪、尿及圈舍冲刷污水经囊式厌氧发酵后的液体牛粪施用技术已在欧美地区得到广泛应用。目前,针对寒地黑土区春玉米开展发酵液体牛粪肥与化肥配施还田的研究尚缺乏报道,尤其是考虑到发酵牛粪肥形态特殊性(含水量 \geq 85%),确定适宜的还田用量对提高玉米氮素利用、减少农田氮损失至关重要。

本研究在保证总氮投入量一致情况下,田间设置不同的液体牛粪肥还田梯度,即液体牛粪肥与化肥氮配施比例不同,探究其对春玉米子粒产量、氮素吸收转运与分配、农田氮素表观平衡的影响,评估液体牛粪肥还田效果,在此基础上确定适宜寒地黑土区春玉米最佳还田用量,为田间推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2022年5-10月在黑龙江省哈尔滨市农业科学院玉米研究基地(126°28'26"E,45°51'30"N,海拔120 m)开展。该地区为温带半湿润季风气候,地势平坦,供试土壤类型为草甸黑土(半淋溶土纲)。播前耕层(0~20 cm)土壤的基本性状为有机质25.94 g/kg,全氮1.64 g/kg,碱解氮102.0 mg/kg,速效磷30.2 mg/kg,速效钾129.4 mg/kg,pH值(水:土=2.5:1)为6.0。玉米生育期降雨量513.1 mm,有效积温1424.2 °C·d。

1.2 试验设计

前一季玉米收获后,进行深翻、起垄作业,次年春季采用人工开沟灌入覆土方式进行液体牛粪还田作业。试验用液体牛粪肥为奶牛场粪、尿及圈舍冲洗污水经密闭存储囊式厌氧发酵后的固、液混合物,养分含量包括总氮0.30%(N)、总磷0.08%(P₂O₅)、有效钾0.25%(K₂O),含水率 \geq 85%,密度为1.04 kg/L³。根据土壤养分管理办法^[4],确定肥料总投入量分别为

200 kg/hm² (N)、100 kg/hm² (P₂O₅)、80 kg/hm² (K₂O)。

试验共设6个处理,采用完全随机区组设计,3次重复,小区之间有1 m的隔离带,并在1 m土层内用聚乙烯防水材料隔离。依据施肥罐体容量及作业距离确定液体牛粪肥还田梯度30、60、90、120 t/hm² (分别用FL30、FL60、FL90、FL120表示)。参照液体粪肥施用指导方法^[5],采用注入式施用液体牛粪,24 h内覆土。按照液体牛粪氮有效性系数为55%、磷有效性系数为80%计算粪肥带入的养分量,其余部分以化肥补足。另设农民习惯施肥处理(CK)、不施肥处理(F0)。前述小区均位于长期定位监测点,各处理已经连续开展多年,不施氮小区氮消耗严重。供试化肥分别为聚合网包膜控释尿素,可满足植株全生育期对养分需求,重过磷酸钙和氯化钾。化肥与液体牛粪肥均作为基肥,播前一次性开沟施入。供试玉米品种为垦沃1号,人工播种,密度为60 000株/hm²,参照当地农民习惯进行机械整地、田间除草与防虫管理。

1.3 样品采集与测定

在玉米大喇叭口期(V12)、吐丝期(R1)、成熟期(R6)采集植株样品。每个小区选取长势均匀、具有代表性的两株植株,V12、R1时期植株进行茎叶分离,R6时期样品进行茎、叶、子粒分离。105 °C杀青30 min,然后65 °C烘干至恒重,称重,粉碎、过筛、研磨。采用H₂SO₄-H₂O₂联合消煮,连续流动分析仪(AA3、天津中通科技发展有限公司)测定植株全氮。

在玉米播前、成熟期采集土壤样品,每个小区株间、行间进行多点位取样,每层深度20 cm,深度共计200 cm,将相同深度土壤样品充分混合、装入自封袋,冰块保鲜,立即带回实验室,烘干法测定土壤含水量。采用1 mL/L KCl溶液浸提,采用连续流动分析仪测定土壤硝态氮、铵态氮含量。

成熟期测产,各小区中间位置20 m²全部收获,记录总穗数为N,称重G;从中选取10个均匀玉米穗,测定穗粒数、百粒重;称10穗总鲜重G1,脱粒后称10穗子粒鲜重G2,测定子粒含水量W,W=(子粒鲜重-子粒烘干重)/子粒鲜重,并记录测产行玉米的总株数、双穗数、空秆数等情况。根据公式计算出每公顷子粒产量(折合为14%含水量): $Y = G \times G2(1 - W) / G1 / 20 \times 10\ 000 / (1 - 14\%)^{[6]}$ 。

1.4 指标计算

玉米氮素积累量=单株生物量 \times 单株氮素含量 \times 种植密度;

营养器官氮素转运量=吐丝期营养器官氮素积累量-成熟期营养器官氮素积累量;

氮素转运效率=营养器官氮素转运量/吐丝期营养器官氮素积累量×100%;

花后氮素同化量=成熟期子粒氮素积累量-营养器官氮素转运量;

氮素转运对子粒氮的贡献率=营养器官氮素转运量/成熟期子粒氮素积累量×100%;

氮素收获指数=成熟期子粒氮素积累量/成熟期地上部氮素积累量;

氮素利用效率=子粒产量/地上部氮素积累量;

氮肥回收利用率=(施肥区地上部氮素积累量-不施肥区地上部氮素积累量)/施氮量×100%;

氮肥生理利用率=(施肥区子粒产量-不施肥区子粒产量)/(成熟期施肥区地上部氮素积累量-成熟期不施肥地上部氮素积累量);

氮肥农学利用率=(施肥区子粒产量-不施肥区子粒产量)/施氮量;

氮肥偏生产力=施肥区子粒产量/施氮量;

土壤无机氮量=硝态氮量+铵态氮量;

农田氮表观平衡土壤计算范围是0~100 cm土层,氮平衡计算指标^[7]:

当季土壤氮素矿化量=不施肥区玉米地上部吸氮量+不施肥区收获后土壤无机氮量(N_{min})-不施肥区播前无机氮量(N_{min});

总氮输入=播前无机氮量+施氮量+土壤氮素矿化量;

土壤氮素表观损失量=总氮输入量-成熟期地上部吸氮量-收获后土壤残留无机氮量(N_{min});

氮盈余量=土壤氮素表观损失量+收获后土壤残留无机氮量(N_{min})。

1.5 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2019(Microsoft公司)处理数据,采用SPSS 25.0软件(IBM公司)进行统计分析,显著性检验在0.05水平进行,采用Origin 2021软件(Origin Lab公司)作图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对玉米子粒产量的影响

与单施化肥处理(CK)相比,液体牛粪肥替代化肥处理提高玉米子粒产量,增幅达15.7%~23.6%,不同液体牛粪肥处理间差异不显著。其中,FL120处理玉米子粒产量达最高,为15.7 t/hm²。分析子粒产量构成,与F0处理相比,施肥显著提高穗粒数;与CK处理相比,施用液体牛粪肥处理提高百粒重。液体牛粪肥替代化肥还田可有效保证子粒产量,具有增产潜力(表1)。

表1 不同施肥处理的玉米子粒产量及产量构成因素

Table 1 Grain yield and yield components of maize under various fertilization modes

处理 Treatment	产量(t/hm ²) Grain yield	收获穗数(穗/hm ²) Harvest ears	穗粒数(粒) Kernel number	百粒重(g) 100-grain weight
F0	8.0 c	53 333 b	485 b	26.6 c
CK	12.7 b	55 897 ab	618 a	29.5 b
FL30	14.7 a	57 436 a	630 a	36.0 a
FL60	15.1 a	55 897 ab	673 a	36.8 a
FL90	15.6 a	54 872 ab	676 a	36.1 a
FL120	15.7 a	53 333 b	678 a	37.3 a

注:同列数据后不同字母表示处理间在5%水平差异显著。下表同。

Note: Values followed by different letters represent significant differences among treatments($P<0.05$). The same below.

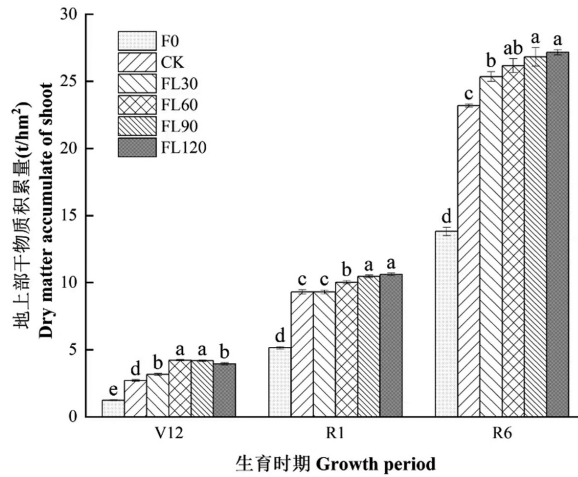
2.2 不同施肥处理对玉米地上部生物量的影响

随着玉米生育时期的推进,玉米干物质积累量逐渐增加。与F0处理相比,施肥处理促进地上部干物质积累增加。其中,液体牛粪肥还田处理在各生育时期干物质积累量显著高于CK处理。随着液体牛粪肥替代量增加,地上部干物质积累量增加,FL120处理达最高,为24.5 t/hm²。成熟期,与CK处理相比,FL30、FL60、FPL90、FL120处理干物质积累量增幅为4.3%、8.4%、9.7%、12.3%(图2)。

与F0处理相比,施肥处理显著提高茎秆、叶片、子粒干物质积累量。与CK处理相比,随着液体牛粪肥替代量增加,器官干物质积累量增加,FL60、FL90、FL120处理叶片和茎秆干物质积累量分别提高3.6%~9.1%、4.5%~10.7%、7.5%~12.7%。液体牛粪肥替代化肥通过增加玉米干物质积累来提高玉米子粒产量。

2.3 不同施肥处理对植株氮素积累的影响

分析不同生育时期的玉米地上部氮素积累量显



注:同列不同小写字母表示同一品种内不同处理在5%水平差异显著。下图同。

Note: Values followed by different small letters within a column under the same hybrid treatment were significantly different at the 0.05 probability level.

The same below.

图1 不同施肥处理玉米地上部干物质累积动态

Fig.1 The dynamic of maize shoot dry matter accumulation under different fertilization methods

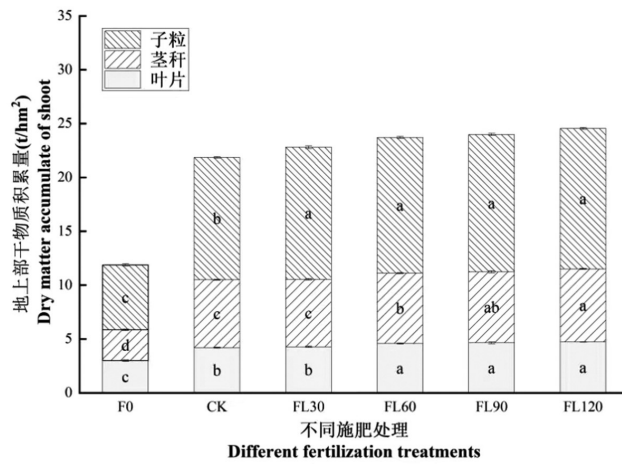


图2 不同施肥处理玉米成熟期地上部干物质累积分配

Fig.2 The accumulation and allocation of shoot dry matter under different fertilization methods

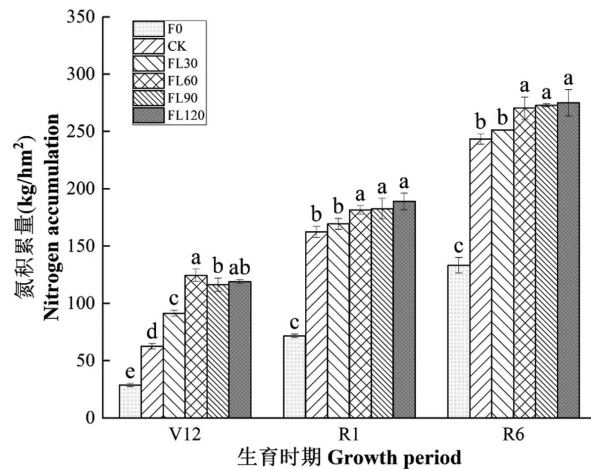


图3 不同施肥处理玉米地上部氮素累积动态

Fig.3 The dynamic of shoot nitrogen accumulation under different fertilization methods

示,施用液体牛粪肥会显著促进植株地上部氮素累积。V12期,与CK处理相比,FL30、FL60、FL90、FL120处理玉米地上部氮素累积量分别增加29.6、59.0、51.8、52.5 kg/hm², FL60处理的植株氮素累积量最高,为122.8 kg/hm²;R1期,与CK处理相比,FL30、FL60、FL90、FL120处理的玉米地上部氮素累积量分别增加7.0、19.2、20.2、26.6 kg/hm², FL120处理的植株氮素累积量最高,达188.9 kg/hm²;R6期,与CK处理相比,FL30、FL60、FL90、FL120处理的玉米地上部氮素累积量分别提高7.9、27.0、29.5、31.5 kg/hm², FL120处理的植株氮素累积量最高,为274.9 kg/hm²;R1、R6两个时期,CK处理与FL30处

理的玉米地上部氮素累积量差异不显著,FL60、FL90、FL120处理间的玉米地上部氮素累积量差异不显著(图3)。

进一步分析成熟期玉米叶片、茎秆、子粒氮素累积情况表明,与CK处理相比,FL30处理变幅不显著,FL60、FL90、FL120处理的各器官氮素累积均显著提高。其中,FL120处理的叶片、茎秆氮素累积量最高,分别为63.2、43.1 kg/hm²,增幅达15.2%、15.0%;FL90处理的子粒氮素累积量最高,为170.4 kg/hm²,增幅达12.8%。施用液体牛粪肥可显著影响玉米营养器官氮素分配(图4)。

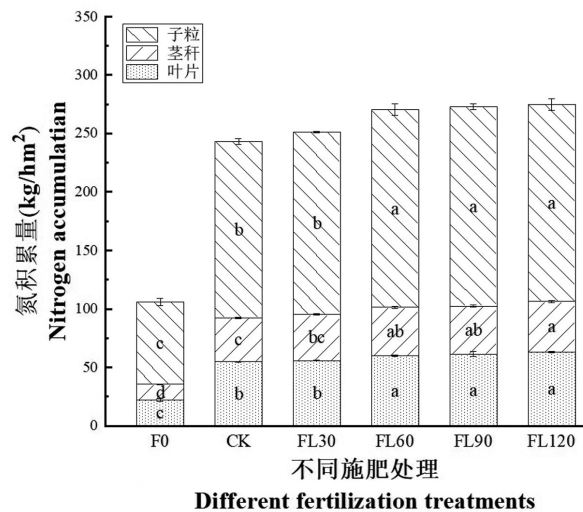


图4 不同施肥处理玉米成熟期地上部氮素累积分配

Fig.4 Nitrogen accumulation and distribution of maize shoot under different fertilization methods

2.4 不同施肥处理对植株氮素转运效率和氮效率的影响

与CK处理相比,施用液体牛粪肥处理促进营养器官氮素向子粒转运。从转运量看,FL30、FL60、FL90、FL120处理下氮素转运量分别提高12.4%、23.1%、23.8%、24.7%;从氮素转运效率及对子粒氮

的贡献率看,FL30与FL60处理下氮素转运效率最高,与CK处理相比提高1.1%。从花后氮素同化量看,FL90处理最高,比CK处理提高11.5%。从氮素转运对子粒贡献率看,与CK处理相比,施用液体牛粪肥处理提高12.2%~17.5%。即适量液体牛粪肥还田促进氮素从营养器官向子粒转运(表2)。

表2 不同施肥处理下氮素转运及其对子粒贡献率

Table 2 Nitrogen transport and contribution to grain under different fertilization methods

处 理 Treatment	营养器官氮素转移量 (kg/hm ²) Nitrogen translocation amount	氮素转运效率(%) Nitrogen translocation efficiency	花后氮素同化量(kg/hm ²) Assimilating amount of nitrogen after anthesis	氮素转运对子粒贡献率 (%) Nitrogen contribution proportion
F0	36.1 c	50.3 a	61.5 b	37.2 b
CK	69.3 b	46.5 a	81.1 a	44.1 ab
FL30	77.9 a	47.0 a	81.1 a	50.2 a
FL60	85.3 a	47.0 a	89.0 a	49.9 a
FL90	85.8 a	46.6 a	90.4 a	49.5 a
FL120	86.4 a	45.5 a	86.0 a	51.8 a

各施肥处理氮素收获指数与氮素利用率无显著差异。与CK相比,液体牛粪肥还田处理下氮肥回收效率、氮肥生理利用率、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力均显著提高,增幅分别为5.2%~22.5%、17.1%~36.5%、44.5%~61.4%、16.7%~23.3%;FL60、FL90、FL120处理间的氮肥回收利用率、氮肥偏生产力无显著差异。与此同时,随着液体牛粪肥

还田量增加,玉米氮肥生理利用率、氮肥农学利用率均有提高。即液体牛粪肥适量还田有助于提高玉米氮肥回收利用率、氮肥生理利用率,并可通过提高子粒产量实现氮肥农学利用率与氮肥偏生产力的提高。由于子粒氮积累量与子粒生物量的协同增加,最终子粒氮含量并未发生显著变化(表3)。

表3 不同施肥处理对氮效率的影响

Table 3 Effects of nitrogen efficiency under different fertilization methods

处 理 Treatment	氮素收获指数 Nitrogen harvest index	氮素利用率(%) Efficiency of absorbed nitrogen	氮肥回收利用率(%) Recovery efficiency of applied nitrogen	氮肥生理利用率 Physiological efficiency of applied nitrogen	氮肥农学利用率 Agronomic efficiency of applied nitrogen	氮肥偏生产力 Partial factor productivity from applied nitrogen
F0	0.73 a	62.7 a	—	—	—	—
CK	0.62 b	46.7 b	55.1 b	45.7 b	23.6 b	63.5 c
FL30	0.62 b	48.8 b	58.0 b	62.4 a	34.2 a	74.1 b
FL60	0.62 b	46.6 b	68.6 a	53.5 ab	35.4 a	75.3 a
FL90	0.62 b	46.7 b	69.8 a	57.5 a	38.1 a	77.9 a
FL120	0.61 b	47.5 b	70.8 a	55.7 ab	35.5 a	78.3 a

2.5 不同施肥处理对玉米收获后土壤无机氮残留的影响

施肥量增加显著提高收获后玉米农田土壤的无机氮残留。其中,0~100 cm土壤无机氮残留量随着深度增加呈下降趋势,100~200 cm土层土壤无机氮残留量随着土层深度增加而提高。不同处理下0~60 cm土层无机氮残留量表现为FL30处理最高,为107.0 kg/hm²;其次为FL60、FL90、FL120处理,且3个处理间无显著差异。各施肥处理在60~200 cm

土层的无机氮残留最高值和最低值分别对应CK和FL60处理,分别为69.1、57.1 kg/hm²,且相较各液体牛粪肥处理,CK处理的土壤无机氮残留量增幅为11.1~17.4%。从0~200 cm深度土壤无机氮残留总量看,FL30、FL120、FL90处理较高,其次是CK处理,最低为FL60处理。液体牛粪肥适量还田并不会造成土壤无机氮残留量的增加,但一次性大量施用存在污染风险。

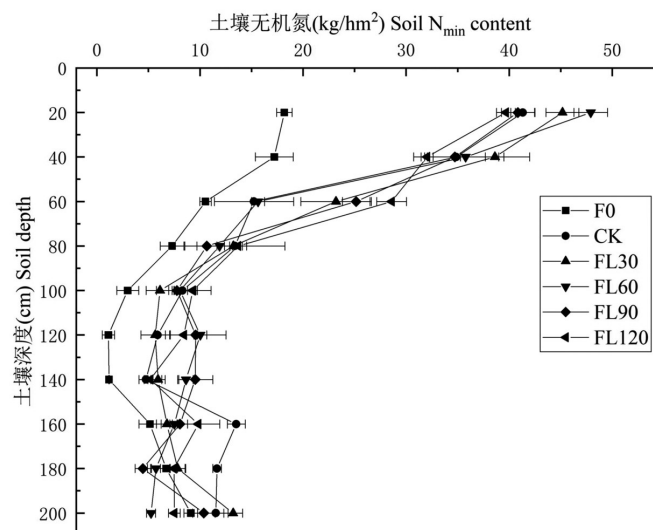


图5 玉米收获后0~200 cm土层剖面土壤无机氮的动态变化

Fig.5 Changes of soil inorganic nitrogen in 0-200 cm soil profile after maize harvest

2.6 不同施肥处理对土壤氮素表观盈亏量的影响

从玉米生育期内土壤有机氮矿化看,其矿化量占总输入氮量的比例为23.0%~53.5%。从氮素表观损失看,CK处理最高,且显著高于FL60、FL90、

FL120处理,提高幅度分别达63.1%、59.8%、72.7%。从氮素盈余看,CK处理最高,与FL30处理氮素盈余相近(表4)。

表4 不同施氮量下玉米全生育期氮素平衡

Table 4 Nitrogen balance during the whole growth period of maize under different nitrogen application rate kg/hm²

项目 Item	处理 Treatment					
	F0	CK	FL30	FL60	FL90	FL120
氮输入 施氮量	0.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0
播前 N _{min}	88.0 b	140.4 a	127.7 a	119.8 ab	124.9 a	120.1 ab
矿化氮	101.4	101.4	101.4	101.4	101.4	101.4
总输入	189.4	441.8	429.1	421.2	426.3	421.5
氮输出 作物携出(地上部)	133.2	243.4 b	251.3 b	270.4 a	272.8 a	274.9 a
残留	56.2 b	113.1 a	126.4 a	119.3 a	119.2 a	123.3 a
表观损失	0.0	85.3 a	51.4 ab	31.5 b	34.3 b	23.3 b
氮盈余	56.2	198.4	177.8	150.8	153.5	146.6

3 结论与讨论

本研究发现,与化肥一次性基施处理相比,液体牛粪肥与化肥配施可显著提高玉米子粒产量,增幅为15.7%~23.6%。同时,促进玉米氮肥回收利用率、氮肥农学利用率、氮肥生理利用率、氮肥偏生产力,增幅分别为5.2%~22.5%、17.1%~36.5%、44.5%~61.4%、16.7%~23.3%。在等氮量(纯氮200 kg/hm²)投入条件下,适量液体牛粪肥还田,可有效降低农田氮素表观损失,降低0~200 cm土层无机氮残留量。液体牛粪肥还田量为60 t/hm²处理下表现最优,可作为黑龙江省寒地黑土区玉米农田液体牛粪肥量的推荐施用量,其结果还需要多年定位试验进行验证。

液体牛粪肥还田可有效提高玉米子粒产量。张越等^[8]研究表明,在化肥量(750 kg/hm²)统一基础上,增施150、300、450 kg/hm²的生物有机肥,玉米增产幅度为18.3%~34.1%。于天一等^[9]研究表明,在总氮投入300 kg/hm²时,70%的猪粪替代化肥处理与纯施化肥处理相比玉米子粒产量平均提高40.8%。Martínez等^[10]研究表明,玉米产量随着猪场废水灌溉量的增加而提高,且当猪场废水灌溉带入量为纯氮200 kg/hm²时玉米产量最高。冯洁等^[11]研究表明,与化肥一次性基施相比,投入纯氮477 kg/hm²的奶牛场粪污沼液可显著提高玉米子粒产量。施用液体牛粪肥处理的增产物质基础在于大幅提高地上部干物质累积,增加的干物质累积显著提高产量构成因子(百粒重、穗粒数)。唐海明等^[12]研究表明,配施有机

肥增加玉米行粒数、穗粒数和百粒质量等指标,从而获得高产。与此同时,液体牛粪肥还田有利于提高花后氮素同化量,提高玉米子粒氮素积累,适量还田会促进营养器官氮素向子粒转运。其中,花后氮素同化量对玉米产量最终形成有着重要作用。本试验中,与化肥一次性基施(CK)相比,成熟期各液体牛粪肥处理的子粒氮素积累量显著增加,而且各液体牛粪肥处理的氮素转移量显著提高。目前,有许多研究表明,施用有机肥能促进玉米对氮素的吸收和转运。Silvia Bachmann^[13]等在沼液还田的研究中发现,玉米植株对氮的吸收量提高25%。谢军等^[14]研究表明,通过8年定位试验研究发现,与化肥处理相比鸡粪替代50%化肥氮处理下的玉米子粒氮累积量增加7.0%。高洪军等^[15]研究表明,农家肥配合化肥可以提高氮素转运效率。液体牛粪肥还田比例较高时,其氮素转运效率大幅降低,液体牛粪肥还田量达120 t/hm²时,牛粪带入氮量占总氮投入的90%以上,基本不用补施化肥,此时营养器官的氮素转运效率最低,田间测定叶片持绿期较长,叶片的相对叶绿素含量较高,具有贪青晚熟风险。高素玲等^[16]研究表明,在等施氮量投入一致下,氮肥后移处理与一次施肥处理相比显著提高了玉米花后叶片叶绿素含量,液体牛粪肥作为有机肥其养分具有缓效性,可能在花后又供应了一定的氮素^[17],延长叶片持绿期。从氮收获指数(即氮素在植株营养器官与生殖器官间的分配)看,各施肥处理下该值无显著差异。与化肥一次性基施相比,随着液体牛粪肥还田量的增加,营

养器官的氮素累积量大幅增加,一定程度有利于延长花后光合有效期,促进花后氮素的同化与子粒产量的增加。由于子粒氮素累积量与玉米子粒产量均同步增加,最终氮素向子粒的分配比例与子粒氮含量并未发生显著变化。因此,未来液体牛粪肥还田场景下应注意协调子粒氮含量与子粒产量,尤其在种养循环体系下,增加子粒氮浓度有利于提高饲料品质。

液体牛粪肥还田可显著提高氮肥回收利用率、氮肥生理利用率、氮肥农学利用率、氮肥偏生产力。Dobermann等^[18]研究认为,氮肥偏生产力一般在40~80 kg/kg,大于60 kg/kg表明氮素管理较好或施肥量较低。本研究表明,各施肥处理氮肥偏生产力均在此范围内且均大于60 kg/kg,施用液体牛粪肥处理显著高于化肥一次性基施处理。吕凤莲等^[19]针对冬小麦-夏玉米轮作体系牛粪替代50%、75%化肥氮处理的氮肥农学效率显著高于化肥一次性基施处理,且在75%替代处理下氮肥偏生产力显著提高,幅度达9.7%。液体牛粪肥还田下氮肥利用率的提高在于液体牛粪肥有机氮含量较高,田间矿化需要一定的时间,可满足玉米全生育期对氮素的需求^[20-21],同时促进玉米根系生长,提高玉米对肥料氮的吸收及利用。

维持农田土壤氮平衡,降低收获后土壤无机氮残留是降低施肥对环境的重要途径。一般认为,0~100 cm土层中的矿质氮能被玉米根系直接吸收利用,100 cm土层以下矿质氮难以被作物吸收,最终会通过降雨、灌溉等方式被淋洗产生损失,或通过深层反硝化作用脱氮,造成氮素损失^[22]。考虑到液体牛粪肥含水量大($\geq 85\%$),氮素在土壤的移动性强,因此,本试验测定0~200 cm土层的无机氮含量。液体牛粪肥适量还田不会造成玉米成熟期0~100 cm土层无机氮量的大量累积,一次性大量施用液体牛粪肥,FL120处理会造成0~200 cm土层无机氮累积量大幅增加。受液体牛粪肥形态影响,还田尤其注意用量合理,减少土壤无机氮残留,降低对环境的影响。本研究表明,液体牛粪肥适量还田有利于维持玉米生育期内的氮素表现平衡。本研究表明,化肥一次性基施(CK)处理下农田氮盈余与氮素表现损失均显著提高,且增幅比例达39.7%~72.7%。针对施肥处理下的氮素损失途径及比例已有大量报道^[23-25]。因此,建议在液体牛粪肥还田下应尤其注意氮素的损失,注重优化施肥技术阻控氮素损失。受到降雨、温度等气象因素影响,氮素损失在年际差异较大,需要多年连续监测以验证试验

结果。

参考文献:

- [1] 畜禽养殖业污染物排放标准(GB18596-2001)//四川省环境科学学会固废处理专委会,国家城市污水处理及资源化工程技术研究中心,德国艾伯特基金会(Friedrich-Ebert-Stiftung)[C]. 中德循环经济理念促进固体废物资源化(论文集),2007.
- [2] 刘玉和,杜国喜.《黑龙江统计年鉴—2022》.黑龙江统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2022:39-67.
- [3] 付凌晖,刘爱华.《中国统计年鉴—2022》.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2022:58-85.
- [4] CUI Z, CHEN X, MIAO Y, et al. On-farm evaluation of the improved soil N_{min} -based nitrogen management for summer maize in North China Plain[J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(3): 517-525.
- [5] Calculating manure application rates[EB]. UMN Extension.
- [6] 伍大利.滴灌施肥对春玉米产量、养分水分利用效率及根系分布的影响[D].北京:中国农业大学,2018.
- [7] 巨晓棠,刘学军,张福锁.冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J].*中国农业科学*,2002,35(11):1361-1368. JU X T, LIU X J, ZHANG F S. Research on nitrogen fertilizer effect and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Chinese Agricultural Science*, 2002, 35 (11): 1361-1368. (in Chinese)
- [8] 张越,王创云,邓妍,等.不同施肥处理对玉米光合特性及产量形成的影响[J].*山西农业科学*,2015,43(4):430-433,438. ZHANG Y, WANG C Y, DEN G Y, et al. Effects of different fertilization treatments on photosynthetic characteristics and yield formation of maize[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2015, 43(4): 430-433, 438. (in Chinese)
- [9] 于天一,逢焕成,李玉义,等.红壤旱地长期施肥对春玉米光合特性和产量的影响[J].*中国农业大学学报*,2013,18(2):17-21. YU T Y, PANG H C, LI Y Y, et al. Effects of long-term fertilization on photosynthetic characteristics and yield of spring maize in upland red soil[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2013, 18(2): 17-21. (in Chinese)
- [10] MARTÍNEZ E, MARESMA A, BIAUA, et al. Long-term effects of pig slurry combined with mineral nitrogen on maize in a Mediterranean irrigated environment[J]. *Field Crops Research*, 2017, 214: 341-349.
- [11] 冯洁.沼液农用对土壤和小麦-玉米系统氮平衡的影响[D].北京:中国农业科学院,2017.
- [12] 唐海明,汤文光,殷玉梁,等.南方丘陵红壤旱地不同施肥模式对春玉米生物学特性及产量的影响[J].*玉米科学*,2013,21(4):107-111. TANG H M, TANG W G, YIN Y L, et al. Effects of different fertilization modes on biological characteristics and yield of spring maize in hilly red soil upland in southern China[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2013, 21(4): 107-111. (in Chinese)
- [13] SEBASTIAN H, SILVIA B, MARINA F J, et al. Biogas digestates affect crop P uptake and soil microbial community composition Biogas digestates affect crop P uptake and soil microbial community composition[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 542: 1144-1154.
- [14] 谢军,赵亚南,陈轩敬,等.有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量

- 和氮素吸收利用效率[J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3934-3943.
- XIE J, ZHAO Y N, CHEN X J, et al. Nitrogen of organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer improve maize yield and nitrogen uptake and utilization efficiency[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(20): 3934-3943. (in Chinese)
- [15] 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 long-term organic-inorganic compound application on nitrogen absorption and utilization of spring maize and soil inorganic nitrogen under equal nitrogen conditions[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(2): 318-325. (in Chinese)
- [16] 高素玲, 刘松涛, 杨青华, 等. 氮肥减量后移对玉米冠层生理性状和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(24): 114-118.
- GAO S L, LIU S T, YANG Q H, et al. Effect of Reducing and postponing nitrogen fertilization on the yield and canopy physiological properties of corn[J]. Chinese Journal of Agronomy, 2013, 29(24): 114-118. (in Chinese)
- [17] 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(1): 83-90.
- XU Y C, SHEN Q R, RAN W. Effect of long-term no tillage and organic fertilizer application on soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus[J]. Journal of Soil Science, 2002(1): 83-90. (in Chinese)
- [18] DOBERMANN A, DAWE D, ROETTER R P, et al. Reversal of rice yield decline in a long-term continuous cropping experiment [J]. Agronomy Journal, 2000, 92: 633-643.
- [19] 吕凤莲. 冬小麦/夏玉米轮作体系有机无机肥配施的农学和环境效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [20] 何浩, 张宇彤, 危常州, 等. 不同有机替代减肥方式对玉米生长及土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 281-287.
- HE H, ZHANG Y T, WEI C Z, et al. Effects of different organic substitution reducing fertilizer patterns on maize growth and soil fertility[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5): 281-287. (in Chinese)
- [21] 魏文良, 刘路, 仇恒浩. 有机无机肥配施对我国主要粮食作物产量和化肥利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(8): 1384-1394.
- WEI W L, LIU L, QIU H H. Effects of different organic resources application combined with chemical fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of main grain crops in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(8): 1384-1394. (in Chinese)
- [22] 刘学军, 巨晓棠, 张福锁. 减量施氮对冬小麦-夏玉米种植体系中氮利用与平衡的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 458-462.
- LIU X J, JU X T, ZHANG F S. Effect of reduced N application on N utilization and balance in winter wheat-summer maize cropping system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(3): 458-462. (in Chinese)
- [23] 兰唱. 氮调控对东北黑土春玉米农田活性氮损失的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2022.
- [24] 周炜, 孙国峰, 王鑫, 等. 沼液与有机肥配施条件下氮损失风险的研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1743-1750.
- ZHOU W, SUN G F, WANG X, et al. Research on nitrogen loss risk under the condition of combined application of biogas slurry and organic fertilizer[J]. Journal of Agricultural Environmental Science, 2019, 38(8): 1743-1750. (in Chinese)
- [25] 焉莉, 王寅, 冯国忠, 等. 不同施肥管理对东北黑土区氮损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(9): 1816-1823.
- YAN L, WANG Y, FENG G Z, et al. The impact of different fertilization management on nitrogen loss in black soil areas of Northeast China[J]. Journal of Agricultural Environmental Science, 2016, 35(9): 1816-1823. (in Chinese)

(责任编辑: 姜媛媛)