

华北平原有机肥替代化肥条件下“粮-饲”轮作系统氮素表观平衡研究

李硕, 李晓欣, 赵善丽, 郝曼, 柏兆海, 马林

引用本文:

李硕, 李晓欣, 赵善丽, 等. 华北平原有机肥替代化肥条件下“粮-饲”轮作系统氮素表观平衡研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(3): 609-620.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0968>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长期配施有机肥对宁夏引黄灌区水稻产量和稻田氮素淋失及平衡特征的影响

刘汝亮, 张爱平, 李友宏, 王芳, 赵天成, 陈晨, 洪瑜

农业环境科学学报. 2015, 34(5): 947-954 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.05.018>

不同施肥管理模式下农田氮素淋失及水氮利用效率模拟分析

梁浩, 胡克林, 李保国

农业环境科学学报. 2015(7): 1317-1325 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.07.013>

渭北旱地麦田配施有机肥减量施氮的作用效果

张昊青, 于昕阳, 翟丙年, 金忠宇, 马臣, 王朝辉

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 124-133 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0827>

洱海流域典型农区不同施肥处理下稻田氨挥发变化特征

吴凡, 张克强, 谢坤, 王风, 王瑞琦, 尹高飞, 沈仕洲

农业环境科学学报. 2019, 38(8): 1735-1742 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1621>

长期施用有机肥对潮土土壤肥力及硝态氮运移规律的影响

李彦, 孙翠平, 井永苹, 罗加法, 张英鹏, 仲子文, 孙明, 薄录吉, 刘兆辉

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1386-1394 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0316>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李硕, 李晓欣, 赵善丽, 等. 华北平原有机肥替代化肥条件下“粮-饲”轮作系统氮素表观平衡研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(3): 609–620.

LI Shuo, LI Xiao-xin, ZHAO Shan-li, et al. Apparent nitrogen balance in different crop rotation systems when substituting mineral fertilizers with manure in the North China Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(3): 609–620.



开放科学 OSID

华北平原有机肥替代化肥条件下“粮-饲”轮作系统氮素表观平衡研究

李硕^{1,2}, 李晓欣¹, 赵善丽^{1,3}, 郝曼¹, 柏兆海¹, 马林^{1,3*}

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/河北省土壤生态学重点实验室/中国科学院农业水资源重点实验室, 石家庄 050022; 2. 河北大学生命科学学院/生命科学与绿色发展研究院, 河北 保定 071002; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为揭示有机肥替代化肥条件下华北平原不同轮作体系土壤-作物系统氮素表观平衡, 布置田间试验, 定量研究了不同施肥方式[化肥表施(C)、固态粪肥表施替代50%化肥氮(S)、液态粪肥注射施用替代50%化肥氮(L)]和不同轮作方式[籽粒玉米-小麦(T1)、青贮玉米/缸豆间作-填闲黑麦草(T2)、甜高粱-黑麦草(T3)、青贮玉米-黑麦草(T4)、高丹草-黑麦草(T5)]对作物地上部生物量及其氮携出量、0~200 cm土壤剖面硝态氮残留和土壤-作物系统氮表观损失的影响。结果表明:与轮作方式T1相比, T5夏秋季作物地上部生物量及其氮携出量提高幅度最大, 其次为T3和T4, 而T2却有所降低; 各轮作方式冬春季地上部生物量较T1均有所降低, 而对其氮携出量无明显影响。与施肥方式C相比, S和L可显著降低夏秋季作物地上部生物量及其氮携出量, 降幅均小于15%, 而对冬春季作物地上部生物量及其氮携出量无显著影响。与轮作方式T1相比, T3和T5可显著增加周年作物氮总输出量, 且显著降低0~200 cm土层无机氮残留量和系统氮表观损失; 与施肥方式C相比, S和L可显著降低周年作物氮总输出量和0~200 cm土层无机氮残留量, 增加系统氮表观损失。研究表明, 在华北平原农牧生产区, 以养殖产生的固态和液态粪肥替代50%化肥氮条件下, 甜高粱-黑麦草和高丹草-黑麦草轮作是氮肥偏生产力高、表观损失低的轮作方式。

关键词:粮饲轮作; 有机肥; 地上部生物量; 氮携出量; 氮素表观损失

中图分类号: S344.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)03-0609-12 doi:10.11654/jaes.2020-0968

Apparent nitrogen balance in different crop rotation systems when substituting mineral fertilizers with manure in the North China Plain

LI Shuo^{1,2}, LI Xiao-xin¹, ZHAO Shan-li^{1,3}, HAO Man¹, BAI Zhao-hai¹, MA Lin^{1,3*}

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences/Hebei Key Laboratory of Agricultural Water-saving, Shijiazhuang 050022, China; 2. School of Life Sciences, Institute of Life Sciences and Green Development, Hebei University, Baoding 071002, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: We aimed to explore the apparent N balance in different forage and crop rotation systems when substituting mineral fertilizer with solid and liquid manure in the North China Plain. To achieve this, we measured the aboveground biomass and N uptake, residual amounts of inorganic N in the 0~200 cm soil profile, and apparent N loss in the soil (0~100 cm)-crop system. Several forage crop rotation

收稿日期: 2020-08-17 录用日期: 2020-11-19

作者简介: 李硕(1987—), 男, 河北衡水人, 博士后, 主要研究方向为农业生态学与养分资源管理。E-mail: muzishiye9011@163.com

*通信作者: 马林 E-mail: malin1979@sjiam.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(31801943, 31872403); 国家重点研发计划项目(2018YFC0213300); 中国科学院科技服务网络计划(STS)项目(KFJ-ST5-ZDTP-053); 河北省杰出青年基金项目(D2017503023); 河北省现代农业产业技术体系奶牛产业创新团队项目(HBCT2018120206)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31801943, 31872403); National Key R&D Program of China(2018YFC0213300); STS Project of the Chinese Academy of Sciences(KFJ-ST5-ZDTP-053); The Distinguished Young Scientists Project of Natural Science Foundation of Hebei(D2017503023); The Hebei Dairy Cattle Innovation Team of Modern Agro-industry Technology Research System(HBCT2018120206)

systems [grain maize-wheat (T1), silage corn/cowpea intercropping-catch ryegrass (T2), sweet sorghum-ryegrass (T3), silage corn-ryegrass (T4), sorghum hybrid sudangrass-ryegrass (T5)] were studied, substituting 50% of the chemical fertilizer-N (C) with solid manure (S) or liquid manure (L) in the North China Plain. The increases in aboveground biomass and N uptake in the summer-autumn (Sum-Aut) periods were larger under T5, followed by T3, than under T1; however, the highest yields of aboveground biomasses were under T1 in the winter-spring (Win-Spr) periods. Compared with the application of mineral fertilizer NPK (C), the S and L applications significantly reduced the aboveground biomass and N uptake to less than 15% in the Sum-Aut periods but had no significant effects in the Win-Spr periods. Compared with the T1, the T3 and T5 significantly increased crop N harvest and, thus, reduced the residual amounts of inorganic N in the 0~200 cm soil profile and apparent N loss in the soil (0~100 cm)-crop system. Substitution of S and L significantly reduced crop N harvest and residual amounts of inorganic N in the 0~200 cm soil profile, thus, significantly increasing the apparent N loss in the crop-soil system. Therefore, the substitution of 50% of the mineral-N with solid or liquid manure in the agriculture of sweet sorghum-ryegrass and sorghum hybrid sudangrass-ryegrass is conducive to sustainable agriculture and animal husbandry in the North China Plain.

Keywords: crop-forage rotation; manure; aboveground biomass; nitrogen uptake; apparent nitrogen loss

华北平原作为我国粮食和畜禽产品的主产区,其粮食和肉蛋奶产量分别占全国总产量的34.4%和37.0%^[1]。集约化玉米-小麦轮作体系产量不断提高的同时,耕地利用强度高、水肥资源投入量大、耕地质量下降快、盈余养分和温室气体大量排放等严重危害生态环境安全^[2-3]。规模化畜禽生产快速发展导致饲料严重依赖外地引进、农牧分离问题凸显、畜禽粪尿循环利用率下降^[4-6]。近年来,在玉米-小麦轮作体系中采用的农田养分增产提效技术提高了作物产量和养分利用效率^[7-8],但未充分考虑养殖产生的固液粪肥的合理施用。因此,构建农牧(种养)结合的“粮-饲”轮作体系,筛选固液粪肥科学施用方法已经成为华北平原农牧业绿色发展的关键。

根据畜禽饲料养分需求设计轮作体系能缓解我国畜禽生产对进口饲料的过度依赖,亦能大幅降低农牧生产中的氮素损失及其对环境的危害^[9-10]。在华北平原进行集约化“粮-饲”轮作种植能够在有限水、热等资源条件下获取更多的优质饲草,有利于规模化畜禽的可持续生产^[10-11]。随着我国“粮改饲”政策的实施,区域种植结构将大幅改变^[11]。黑麦草、甜高粱和高丹草具有较高的饲料营养价值,多用于规模化的“粮-饲”轮作高效生产^[12-13]。目前,我国在饲草方面的研究,主要侧重于饲草光能利用效率的改善及其干物质和粗蛋白产量的提高^[14-15],但是缺少不同“粮-饲”轮作系统氮素平衡的研究。

加强畜禽生产中的粪尿管理,促进粪尿养分高效利用,能够降低环境污染风险。研究发现合理施用固液粪肥可提高土壤碳、氮储量,并减少养分环境流失^[16];陶晓婷等^[17]发现,在小麦越冬期补灌60~120 m³·hm⁻²的猪场肥水即可满足穗期30~60 kg N·hm⁻²化肥的氮素营养需求;也有研究表明,在常规施氮水平

(225 kg N·hm⁻²)下,固态猪粪、鸡粪单施均可获得与化肥处理相当的小麦、玉米产量,且小麦产量随牛粪与化肥配施比例的提高而有所提升^[18]。Zhang等^[19]经Meta分析发现旱作生产中粪肥替代部分化肥可增加6.6%的作物产量,同时减少农田NH₃和N₂O排放,有利于农业的可持续生产。有机、无机肥料配施亦可提高水稻、大麦及其他经济作物产量^[20-22]。目前针对固态/液态粪肥施用的研究主要侧重于单一作物的农业生产^[17-22],对“粮-饲”轮作方式下的施用增产及其环境效应的研究很少。

本文依托中国科学院栾城农业生态试验站的粮-饲轮作试验平台,探讨了不同“粮-饲”轮作方式(籽粒玉米-小麦、青贮玉米/豇豆间作-填闲黑麦草、甜高粱-黑麦草、青贮玉米-黑麦草、高丹草-黑麦草)和不同施肥方式(化肥表施、固态粪肥替代50%化肥表施、液态粪肥替代50%化肥注射施用)对植物地上部生物量及其氮携出量、土壤硝态氮残留量和土壤氮素表现平衡的影响,为丰富该地区“粮-饲”轮作方式、加强畜禽粪肥农田合理利用、促进农牧可持续生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于太行山山前平原的中国科学院栾城农业生态试验站农牧轮作长期定位试验基地(37°53' N, 114°40' E, 海拔50.1 m)。该试验区属于典型暖温带半干旱季风气候,年均气温12.51℃,年均降水量536 mm,其中70%集中在7—9月,年均蒸散量850 mm,年均日照时长2 340 h,年均无霜期206 d,年均有效积温4 665℃。土壤类型为褐土类灰黄土种。耕层(0~20 cm)土壤质地为粉砂壤土,其中砂粒、粉粒和黏

粒含量分别为13.8%、66.3%和19.9%。耕层土壤有机碳和速效氮、速效磷、有效钾含量分别为 $7.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 92.0 、 9.5 、 $295.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验在2017—2018年期间开展,采用完全随机区组设计,包括2个因素:(1)轮作方式,即籽粒玉米-小麦(T1)、青贮玉米/豇豆间作-填闲黑麦草(T2)、甜高粱-黑麦草(T3)、青贮玉米-黑麦草(T4)和高丹草-黑麦草(T5);(2)施肥方式,即化肥表施(C)、固态粪肥表施替代50%化肥氮(S,简称:固态粪肥表施)和液态粪肥注射施用替代50%化肥氮(L,简称:液态粪肥注射)。试验共15个处理,每个处理设4个重复,各处理小区面积为 90 m^2 ($6 \text{ m} \times 15 \text{ m}$),小区之间保护带宽1 m。籽粒玉米、青贮玉米、豇豆于6月初播种,10月初收获,品种分别为郑单958、远缘1号和天佑一号,其中T1和T4处理玉米行间距均为60 cm,T2处理玉米行间距为75 cm;甜高粱和高丹草于6月初播种,7月底和10月初各刈割一次,品种分别为F438和冀草2号,其中甜高粱行间距为40 cm,高丹草行间距为20 cm;小麦于10月初播种,次年6月初收获,品种为石新633,行间距为20 cm;黑麦草于10月初播种,次年4月中旬和6月初各刈割一次,品种为冬牧70,行间距为20 cm。籽粒玉米-小麦轮作方式在玉米和小麦收获后,秸秆全部粉碎还田。试验用粪肥取自河北省石家庄市栾城区典型集约化牛场,经固液分离后分别用于田间,固态和液态粪肥理化性质如表1所示。

夏秋季作物生长期施肥量为 $300 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $180 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $180 \text{ kg K}_2\text{O} \cdot \text{hm}^{-2}$,冬春季作物生长期施肥量为 $240 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $120 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $120 \text{ kg K}_2\text{O} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中磷、钾肥以基肥形式一次性施用于作物播种前,氮肥分基肥和追肥两次施用,基追比为1:1。籽粒玉米和青贮玉米追肥期为大喇叭口期,小麦追肥期为拔节期,其他作物追肥期为第一次刈割期,人工表施追肥后立即灌溉。基肥按照等氮原则施

表1 新鲜固态和液态粪肥理化特性

Table 1 Physical and chemical characteristics of fresh solid and liquid farm manure

项目 Items	固态粪肥 Solid manure	液态粪肥 Liquid manure
全氮 Total nitrogen/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	12.2	4.2
铵态氮 Ammonium nitrogen/($\text{g N} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.5	3.5
速效磷 Available phosphorus/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	15.5	2.4
有效钾 Available potassium/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	8.2	5.0

用,固态和液态粪肥的磷、钾不足时以化肥补足,化肥和固态粪肥采用人工撒施,随后旋耕入土;液态粪肥则由课题组研制的专用机具(肥水注射机具)注射到5~10 cm土层;化肥选用尿素(N,46%)、过磷酸钙(P_2O_5 ,12%)和硫酸钾(K_2O ,53%)。玉米苗期、拔节期、大喇叭口期,以及小麦苗期、分蘖期、拔节期各灌水1次,每次灌水量约 $500 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,采用畦灌方式。由于甜高粱和高丹草第一次刈割正处于玉米大喇叭口期,因此甜高粱、高丹草和玉米灌溉时期、方式和灌溉量保持一致;黑麦草前两次灌溉与小麦保持一致,而第3次安排在刈割期;在4月中旬填闲黑麦草小区不进行刈割和灌溉操作。根据田间病虫害状况及时施用农药,进行防治。其他田间管理措施保持一致。

1.3 样品采集与氮素测定

1.3.1 土壤样品采集与测定

作物收获后,每个小区随机选取一个样点,采集0~200 cm土层土样,层间距20 cm,测定土壤含水量和 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N含量。土壤含水量采用烘干法测定;土壤 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N测定是将新鲜土样混匀后过2 mm筛,然后用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl溶液浸提(水土比5:1)过滤,流动分析仪(OI,美国)测定。

1.3.2 植株样品采集与测定

在作物收获或刈割期,每个小区随机采集 2 m^2 ($2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$)植株样品,风干,脱粒。小麦、甜高粱、高丹草和黑麦草植株样品分籽粒和秸秆称质量,而玉米样品分籽粒、玉米穗轴和秸秆3部分称质量,然后以采样面积折算生物量。取部分植株样品烘干、粉碎,用浓 $\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}_2$ 消解,采用凯氏定氮法测定植株样品的氮含量。

1.4 数据计算与统计分析

本研究探讨一个完整轮作周期内农田土壤氮素表观平衡,其中农田土壤氮输入指化肥和畜禽粪肥所带入的氮素,未考虑种子、沉降和灌溉等形式的氮输入;氮输出指作物通过收获或刈割移出农田的氮总量(地上部氮携出量-秸秆还田氮量),未考虑淋溶流失、氨挥发、反硝化等途径氮损失。参考司东霞等^[23]的方法计算周年作物氮肥偏生产力和0~200 cm土层氮素表观平衡参数:

$$\text{氮肥偏生产力}(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}) = \frac{\text{施氮区产量}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})}{\text{施氮量}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})} \quad (1)$$

$$\text{土壤无机氮累积量}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{土层厚度}(\text{cm}) \times \text{土壤容重}(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}) \times \text{土壤无机氮含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) / 10 \quad (2)$$

氮表观损失($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)=[氮输入($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)+土壤起始无机氮累积量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)]-[氮输出量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)+土壤无机氮残留累积量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)] (3)

式中,无机氮包括土壤 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N。0~200 cm土体各层(以20 cm计)土壤容重分别为1.27、1.47、1.40、1.41、1.49、1.56、1.59、1.55、1.48、1.46 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

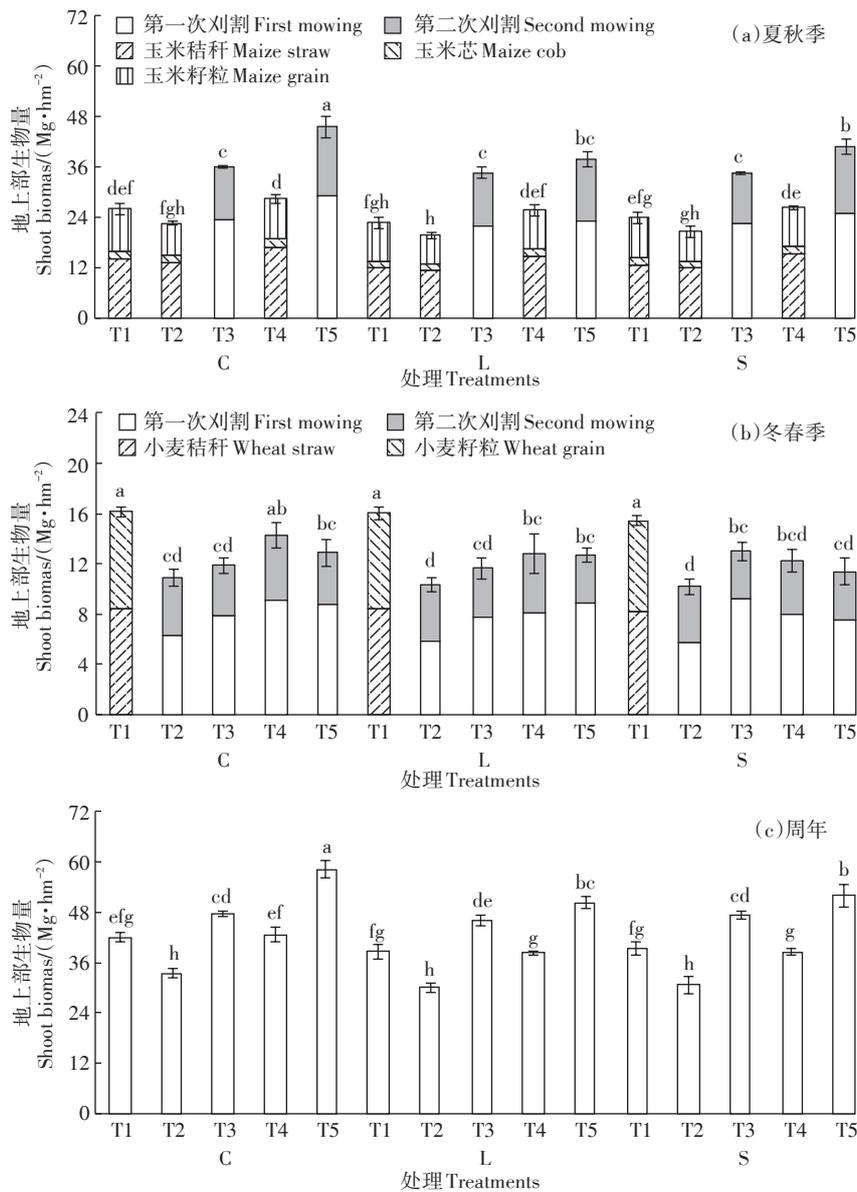
试验数据绘图和统计分析分别采用Excel 2010和DPS 7.05统计软件进行,Duncan多重比较和T检验分析不同处理的影响差异,多因素方差分析因素间的

交互效应,差异显著性水平为0.05。

2 结果与分析

2.1 不同处理地上部生物量

在夏秋季(图1a),T5×C处理地上部生物量最高($45.4\text{ Mg}\cdot\text{hm}^{-2}$),显著高于其他处理。针对3种施肥方式整体而言,轮作方式T3、T4和T5地上部生物量较T1分别增加44.8%、10.9%和71.0%,T2地上部生物量较T1降低13.3%;针对5种轮作体系整体而言,固态粪肥表施和液态粪肥注射处理地上部生物量较



同一生长期不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同

Different lowercase letters at the same period indicate significant differences among treatments at $P<0.05$. The same below

图1 不同轮作和施肥方式下作物地上部生物量

Figure 1 Biomass production under different rotation systems and fertilization management practices during periods of Sum-Aut (a), Win-Spr (b) and the whole rotation cycle (c)

化肥表施分别显著降低7.4%和11.0%。在冬春季(图1b),T1×C处理地上部生物量最高(16.1 Mg·hm⁻²),显著高于除T4×C、T1×L和T1×S外的其他处理;轮作方式T2、T3、T4和T5地上部生物量较T1分别显著降低34.0%、23.4%、17.4%和22.5%,而施肥方式及其与轮作方式的交互作用对地上部生物量却无明显影响。如图1c所示,周年地上部生物量T5×C处理最高(58.2 Mg·hm⁻²);轮作方式T3和T5较T1分别显著增加17.7%和33.9%,而T2较T1却显著降低21.5%;固态粪肥表施和液态粪肥注射处理地上部生物量与化肥表施相比显著降低7.3%和9.2%。

2.2 地上部氮携出量与偏生产力

在夏秋季(图2a),地上部氮携出量与其地上部生物量趋势一致,T5×C处理最高(476.6 kg·hm⁻²);与T1相比,轮作方式T5和T3地上部氮携出量分别显著增加141.2%和125.6%,而T2却降低19.6%;与化肥表施相比,固态粪肥表施和液态粪肥注射处理地上部氮携出量分别显著降低12.6%和15.0%。在冬春季(图2b),T1×C处理地上部氮携出量最高(225.1 kg·hm⁻²);轮作方式T2地上部氮携出量较T1显著降低20.2%,而施肥方式及其与轮作方式的交互作用对地上部氮携出量均无明显影响。从图2c可知,周年地上部

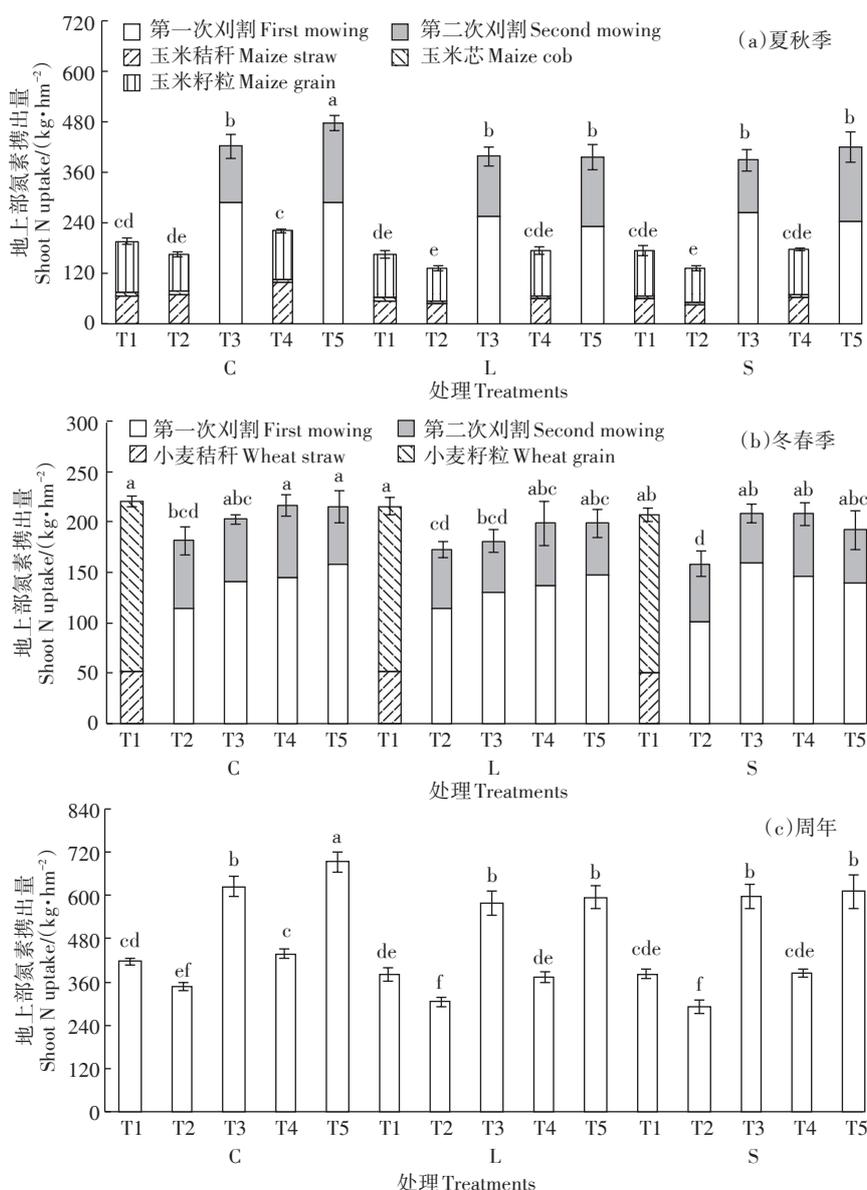


图2 不同轮作和施肥方式下作物地上部氮携出量

Figure 2 N uptake under different rotation systems and fertilization management practices during periods of Sum-Aut(a), Win-Spr(b) and the whole rotation cycle (c)

氮携出量 T5×C 处理最高(691.8 kg·hm⁻²);与 T1 相比,轮作方式 T3 和 T5 显著增加 52.8% 和 61.0%,而 T2 却显著降低 20.0%;与化肥表施相比,固态粪肥表施和液态粪肥注射处理显著降低 10.0% 和 11.4%。

在夏秋季(图 3a), T5×C 处理作物氮肥偏生产力最高(151.3 kg·kg⁻¹),显著高于其他处理;与 T1 相比,轮作方式 T2、T4、T3 和 T5 的作物氮肥偏生产力分别显著提高 118.1%、264.4%、179.3%、330.4%;与化肥表施相比,固态粪肥表施和液态粪肥注射处理作物氮肥偏生产力分别显著降低 7.6% 和 11.1%。在冬春季(图 3b), T4×C 处理作物氮肥偏生产力最高(59.5 kg·kg⁻¹),与 T5×C、T4×L、T5×L、T3×S 和 T4×S 均无显著差异,而显著高于其他处理;与 T1 相比,轮作方式 T3、

T4 和 T5 作物氮肥偏生产力分别显著提高 61.5%、74.1% 和 63.4%,而施肥方式及其与轮作方式的交互作用对作物氮肥偏生产力却无明显影响。从图 3c 可知,周年作物氮肥偏生产力, T5×C 处理最高(107.9 kg·kg⁻¹),而 T1×L 处理最低(30.9 kg·kg⁻¹),且后者显著低于除 T1×C 和 T1×S 外的其他各处理;轮作方式 T2、T4、T3 和 T5 较 T1 分别显著提高 119.8%、132.9%、175.1% 和 212.9%;固态粪肥表施和液态粪肥注射处理较化肥表施分别显著降低 7.4% 和 9.6%。

2.3 土壤 NO₃-N 残留量

在夏秋季作物收获期(图 4a~图 4c),随土壤深度增加,各处理土壤 NO₃-N 含量在 0~40 cm 土层均呈先降低后稳定的趋势,而在 40~200 cm 各土层均保持相

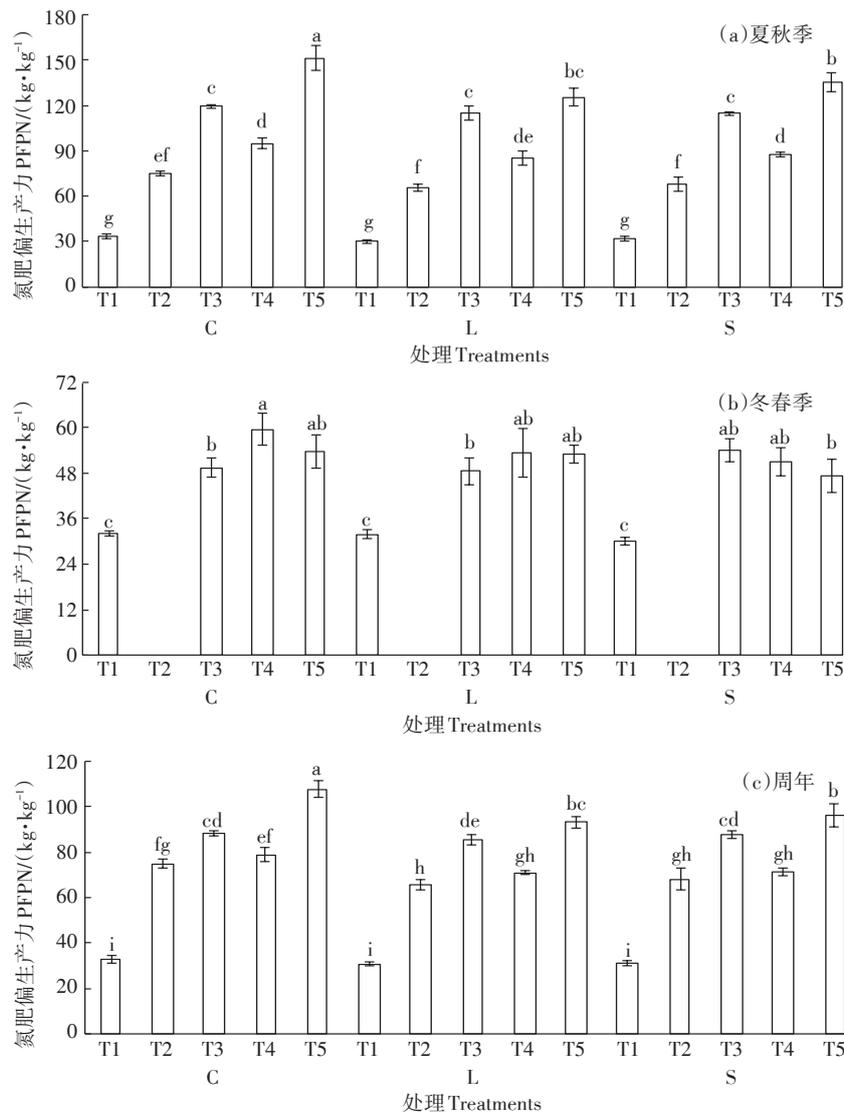


图 3 不同轮作和施肥方式下作物氮肥偏生产力

Figure 3 Partial factor productivity of N(PFPN) under different rotation systems and fertilization management practices during periods of Sum-Aut(a), Win-Spr(b) and the whole rotation cycle(c)

对稳定的趋势;在冬春季作物收获期(图4d~图4f),随土壤深度增加,各处理土壤 NO_3^- -N含量在0~40 cm土层均呈先降低后稳定的趋势,而在40~200 cm各土层均保持相对稳定的趋势。在夏秋季作物收获期(图5a),与T1相比,轮作方式T4、T3和T5的0~200 cm土层 NO_3^- -N残留量分别显著降低 16.8%、33.9%和 43.5%,而T2和T1之间无显著差异;与化肥表施相比,固态粪肥表施和液态粪肥注射处理0~200 cm土层 NO_3^- -N残留量分别显著降低 20.9%和 16.1%。在冬春季作物收获期(图5b),轮作方式T2、T3和T5的0~200 cm土层 NO_3^- -N残留量较T1分别显著降低 22.3%、28.4%和 40.1%,而T4与T1之间无显著差异;与化肥表施相比,固态粪肥表施和液态粪肥注射处理

0~200 cm土层 NO_3^- -N残留量分别显著降低 34.4%和 22.2%。

2.4 氮素表现平衡

从表2可以看出,在夏秋季,与T1相比,轮作方式T2、T3、T4和T5作物氮输出量分别显著增加 21.9% ($25.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、241.1% ($258.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、62.0% ($72.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和 265.8% ($312.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),而T2却显著降低 49.0% ($137.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);与化肥表施相比,固态粪肥表施和液态粪肥注射处理作物氮输出量显著降低 12.9% ($36.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和 14.4% ($440.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。在冬春季,T2将地上部生物量全部还田,无生物量移除农田,其作物氮输出量视为0;与T1相比,轮作方式T3、T4和T5冬春季作物氮输出量分别显著增加 20.7%、

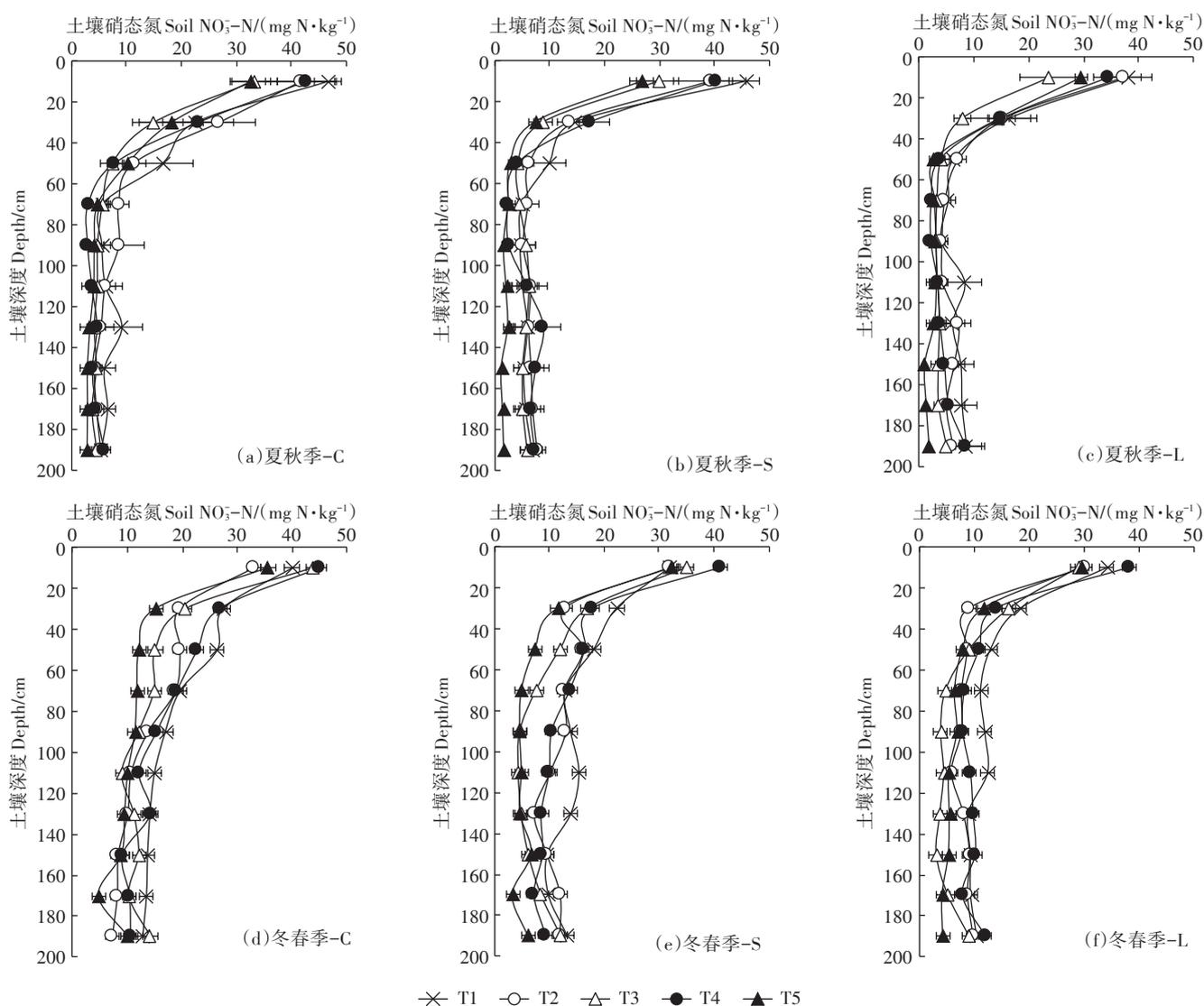


图4 不同轮作和施肥方式下作物收获后土壤硝态氮剖面分布

Figure 4 Effects of different rotation systems and fertilization management practices on distribution of soil nitrate nitrogen (NO_3^- -N) after harvest during periods of Sum-Aut (a~c) and Win-Spr (d~f)

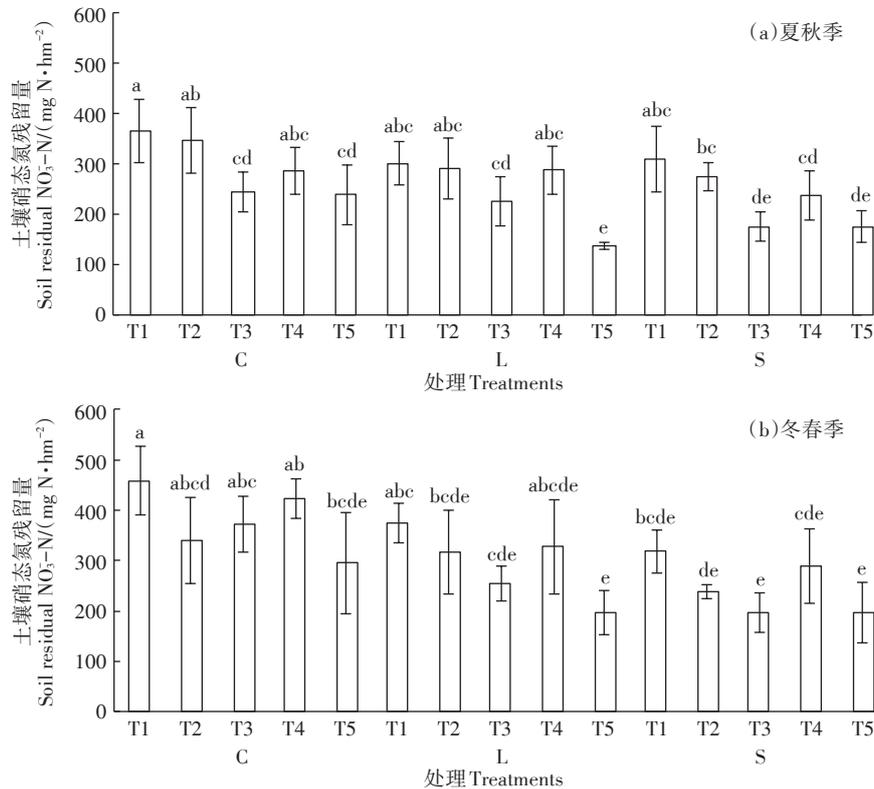


图5 不同轮作和施肥方式下作物移除后土壤剖面(0~200 cm)硝态氮残留量

Figure 5 Effects of different rotation systems and fertilization management practices on residual amounts of soil nitrate nitrogen(NO_3^- -N) after harvest during periods of Sum-Aut(a) and Win-Spr(b)

27.0%和23.4%,且T3、T4和T5之间无显著差异。与T1相比,轮作方式T3、T4和T5周年作物氮总输出量显著增加113.3%、41.6%和124.8%,而T2却降低49.0%;与化肥表施相比,固态粪肥表施和液态粪肥注射处理显著降低9.9%和12.0%。

由表2可知,与T1相比,轮作方式T2、T3和T5土壤残留无机氮显著降低20.6%、24.2%和36.8%,而T4与T1之间无显著差异;与化肥表施相比,固态粪肥表施和液态粪肥注射处理的土壤残留无机氮显著降低31.5%和20.6%。在化肥表施中,轮作方式T3和T5土壤氮表观损失小于0,而其他各处理均大于0。与T1相比,轮作方式T3、T4和T5土壤氮表观损失分别显著降低81.5%(218.8 kg·hm⁻²)、30.8%(82.7 kg·hm⁻²)和74.1%(199.1 kg·hm⁻²),而T2却增加10.0%(26.9 kg·hm⁻²);与化肥表施相比,固态粪肥表施和液态粪肥注射处理的氮表观损失显著增加281.0%(173.1 kg·hm⁻²)和265.9%(163.8 kg·hm⁻²)。

3 讨论

3.1 不同轮作方式的农田土壤氮素表观平衡

高丹草-黑麦草轮作方式(T5)周年地上部生物

量最高,其次为甜高粱-黑麦草(T3)和籽粒玉米-小麦轮作方式(T1),而0~200 cm土层无机氮残留量和系统氮表观损失却具有相反趋势。本研究中夏秋季轮作方式T2较大的行间距造成玉米株数降低,进而导致其地上部生物量显著低于T1;冬春季轮作方式T2实行不施肥的填闲黑麦草操作,进而导致其生物量亦小于T1。尽管冬春季T3、T4和T5轮作方式黑麦草刈割两次,但其地上部生物量仍显著低于T1,表明黑麦草干物质生产潜力低于小麦,这与杨羚等^[11]和石鹏飞等^[24]研究结果一致。然而,夏秋季T3、T4和T5轮作方式地上部生物量显著高于T1,表明青贮玉米、甜高粱和高丹草的干物质生产潜力明显高于籽粒玉米,这与Lyons等^[12]和Samarappuli等^[13]研究结果一致。在夏秋季高丹草地上部生物量最高,其次为甜高粱和青贮玉米,这一现象可归因于作物根系结构的不同^[13]。研究表明,甜高粱根系可向下延伸至1.6~2.0 m,而玉米根系在土壤分布较浅,主要集中于0~30 cm土层^[25-26]。因此,与玉米相比,甜高粱能够吸收利用深层土壤中的水分和养分,进而生产较多生物量^[27]。本研究中无论是夏秋季还是冬春季,轮作方式T1在0~200 cm土层的NO₃-N残留量均显著高于其他轮作方

表2 不同轮作和施肥方式对作物-土壤氮素表观平衡的影响

Table 2 Effects of different rotation system and fertilization management practices on apparent N balance in crop-soil systems

处理 Treatments		起始无机氮 Initial Nmin/ (kg·hm ⁻²)	氮输入 N input/(kg·hm ⁻²)			作物氮输出 Crop N output/(kg·hm ⁻²)			残留无机氮 Residual Nmin/ (kg·hm ⁻²)	氮表观损失 Apparent N loss/ (kg·hm ⁻²)
施肥方式 Fertilization	轮作方式 Rotation modes		化肥 Mineral fertilizer	畜禽粪肥 Manure	合计 Total	夏秋季 Sum-Aut	冬春季 Win-Spr	合计 Total		
C	T1	423.0	540		540	128.3±4.7ef	169.6±5.1cde	297.9±3.6e	489.3±67.3a	175.8±66.3defg
	T2	423.0	300		300	165.5±5.4de	0	165.5±5.4f	371.2±85.6abcd	186.3±86.1cdefg
	T3	423.0	540		540	421.7±27.6b	202.9±4.5ab	624.6±27.1b	408.4±57.6abc	-70.0±66.3h
	T4	423.0	540		540	221.5±4.7c	216.9±10.8a	438.4±12.6c	456.0±38.8ab	68.6±35.0gh
	T5	423.0	540		540	476.6±28.1a	215.1±16.1a	691.8±28.8a	323.8±98.8abcd	-52.6±97.7h
L	T1	423.0	270	270	540	109.8±4.4f	164.2±6.5de	274.1±9.5e	400.9±36.0abcd	288.0±38.9abcd
	T2	423.0	150	150	300	132.0±4.7def	0	132.0±4.7f	344.4±81.6abcd	378.6±81.6a
	T3	423.0	270	270	540	397.9±22.8b	181.2±11.4bcde	579.0±33.4b	293.1±36.1bcd	90.9±53.6fg
	T4	423.0	270	270	540	174.3±7.9cde	198.7±22.3abc	373.0±15.8d	358.2±92.5abcd	231.8±79.5bcdefg
	T5	423.0	270	270	540	395.6±28.7b	198.7±13.5abc	594.3±32.5b	230.9±42.8d	137.8±41.2efg
S	T1	423.0	270	270	540	114.9±4.0f	157.2±5.2e	272.1±8.0e	348.7±41.9abcd	342.1±39.0ab
	T2	423.0	150	150	300	132.8±6.1def	0	132.8±6.1f	268.3±13.8cd	321.9±19.4abc
	T3	423.0	270	270	540	388.4±26.7b	208.6±9.0ab	597.0±35.0b	237.4±41.0cd	128.6±29.8efg
	T4	423.0	270	270	540	176.1±3.3cd	208.1±11.2ab	384.2±11.2cd	321.3±72.5abcd	257.6±71.1abede
	T5	423.0	270	270	540	419.3±35.1b	192.1±19.2abcd	611.4±46.8b	228.1±56.2d	123.5±67.8efg
F 值及显著性 F value and significance										
施肥方式 Fertilization mode(F)						19.41**	2.05	20.15**	16.31**	78.27**
轮作方式 Rotation mode(R)						220.84**	9.86**	317.20**	4.46**	62.19**
F×R						0.58	0.63	0.60	0.20	0.24

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$);** $P<0.01$ 。

Note: Different lowercase letters within the same column indicate significant differences among treatments at $P<0.05$; ** $P<0.01$.

式,而轮作方式 T5 和 T3 在 0~200 cm 土层的 NO₃-N 残留量却显著低于其他轮作方式,表明轮作方式 T5 和 T3 更利于作物吸收土壤无机氮,特别是 NO₃-N。轮作方式 T5 和 T3 地上部氮携出量较 T1 显著增加 141.2% 和 125.6%,表明甜高粱和高丹草能够显著提高粗蛋白产量,利于农牧可持续生产。研究表明,作为青贮玉米的替代作物,甜高粱生长周期短,对养分和农药需求低,蛋白和糖类携出量高,能够在较为干旱和贫瘠的土壤上正常生长^[28],已成为一种具有巨大发展潜力的饲用作物^[15,28-29]。本研究结果表明,高丹草的地上部生物量和氮携出量均高于甜高粱,是由于高丹草作为甜高粱和苏丹草的杂交品种具有更强的耐瘠和抗旱能力,而强大的再生能力使得其生物产量高于甜高粱^[30-31]。冬春季轮作方式 T3、T4 和 T5 地上部氮携出量与 T1 之间无显著差异,表明冬春季种植黑麦草可提供较多粗饲料。就周年氮肥偏生产力和作物氮总输出量而言,轮作方式 T5 和 T3 显著高于其他轮作体系,表明甜高粱-黑麦草和高丹草-黑麦草两种轮作方式,特别是后者,可提供的粗饲料最多,更

利于华北地区农牧业的可持续发展。就氮表观损失而言,在化肥表施中,轮作方式 T3 和 T5 土壤氮表观损失小于 0,其原因在于:夏秋季 T3 和 T5 处理甜高粱和高丹草具有较高生物量,氮素携出量高于化肥施用量,作物需要吸收土壤累积氮,以满足自身生长所需;未考虑土壤氮的矿化、大气干湿沉降以及灌溉输入氮;未考虑作物根茬等还田部分的植株残体氮归还,一定程度上低估了氮的投入。该现象表明,在甜高粱-黑麦草和高丹草-黑麦草两种轮作体系中,化肥表施不能满足夏秋季植株快速生长的需要,需适当增加化肥投入量。

3.2 不同有机肥施用方式的农田土壤氮素表观平衡

与化肥表施相比,固态粪肥表施和液态粪肥注射处理周年地上部生物量分别降低 7.3% 和 9.2%,0~200 cm 土层无机氮残留量显著降低 31.5% 和 20.6%,系统氮表观损失较大。本研究中,与化肥表施相比,固态粪肥表施和液态粪肥注射显著降低夏秋季地上部生物量,而对冬春季地上部生物量无明显影响。这一结果与李燕青等^[18]和林治安等^[32]在华北平原籽粒

玉米-小麦轮作农田施用化肥和粪肥后作物产量趋势大致相同,即试验前期化肥处理的作物产量高于粪肥处理,而随着试验期的延长,粪肥处理的生物量达到甚至超过化肥处理的生物量。Zhang等^[19]发现旱作生产中粪肥替代部分化肥可使作物产量提高6.6%,而粪肥完全替代化肥时作物产量却降低9.6%,这主要是由于所施肥料的养分时效性,化肥所提供的矿质氮可供作物直接吸收利用,而固态粪肥所供给的有机氮需要经过矿化缓慢释放,因此具有较强的后效性^[17,33]。液态粪肥用于基肥,与作物生长对养分的需求不匹配,经固液分离后的液态粪肥 $\text{NH}_4\text{-N}$ 高达 $3.5\text{ g N}\cdot\text{kg}^{-1}$,在碱性土壤中易以 NH_3 形式排放到大气中,不利于作物后期生长^[34]。李硕等^[35]在华北平原的研究表明猪场液态粪肥农田注射施用亦可显著提高作物产量,其原因在于液态粪肥注射施用有助于 $\text{NH}_4\text{-N}$ 被土壤吸附固定,便于后期矿化和作物吸收利用。尽管固液粪肥在短期可能降低作物产量,但其长期与化肥配施可提高作物产量^[32],主要是由于:固液粪肥具有一定的培肥作用,且含有作物生长所需的氮磷钾及中微量元素,能够更好地促进作物生长;土壤微生物能够对其有机养分起到一定的调节作用,使其更能匹配作物生长对养分的需求规律^[18]。本研究中,固液粪肥农田施用之所以未能提高作物产量,可能是由于试验期限较短,固液粪肥培肥效果尚未显现;本研究各处理施用肥料量均高,且在作物生长期均实行2次施肥,氮素供应基本符合作物生长需求规律。因此,固液粪肥对作物氮素吸收利用及其生长状况的效应尚需在长期定位试验中进行验证和深入研究。

农田土壤中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的分布取决于氮肥形态、施氮量和轮作方式等因素^[36]。研究表明,土壤胶体对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的吸附能力比较弱,过量施氮容易引发土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 大量累积,对地下水的安全造成潜在威胁^[35]。在本研究中,无论是夏秋季还是冬春季,收获期 $\text{NO}_3\text{-N}$ 多集中于0~40 cm土层,原因在于研究期内没有大的降雨和灌溉将水和养分向深层次土壤淋溶。与化肥表施相比,夏秋季和冬春季收获期固态粪肥表施和液态粪肥注射处理0~200 cm土层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 残留量均显著降低,表明固液粪肥农田施用可有效降低土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 残留量。固态粪肥所含氮养分主要以有机形态存在于土壤中,只有经缓慢矿化才能将其转变为无机氮,进而被作物吸收利用,因此降低了无机氮在土壤中残留淋失风险^[18]。液态粪肥氮养分主要以 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的形式存在,其在碱性土壤中易以 NH_3 形式挥发损失,可

降低土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 残留量^[34]。液态粪肥中有机活性物质能够在一定程度上协调氮供应,对土壤氮残留和淋失具有制约效应^[37-39]。然而,李硕等^[35]、杜会英等^[37]和杨军等^[39]却发现,等氮条件下液态粪肥处理土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 残留量高于化肥施用处理,且过量施用液态粪肥亦可在80~100 cm土层残留大量 $\text{NO}_3\text{-N}$ 。

本研究中夏秋季固态粪肥表施和液态粪肥注射处理地上部氮携出量较化肥表施处理显著降低12.6%和15.0%,表明固态粪肥表施和液态粪肥注射下粗蛋白产量有所降低,而冬春季固液粪肥各轮作方式下地上部氮携出量均不受施肥方式的影响。综合夏秋季和冬春季,固态粪肥表施和液态粪肥注射处理周年作物氮肥偏生产力较化肥表施仅降低7.4%和9.6%,周年作物氮总输出量亦仅降低12.0%和9.9%,表明固液粪肥可在一定程度上替代部分化肥。土壤氮素表观平衡反映农田土壤氮输入和输出之间的动态平衡,可表征氨挥发、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失等的潜在危害,亦可衡量农田氮养分状况^[23-24,39]。本研究氮输入主要来自化肥和固液粪肥,未考虑作物种子、前茬作物残体、灌溉、大气沉降以及试验期间土壤有机氮的矿化。研究中,固态粪肥表施和液态粪肥注射施用下周年作物氮总输出量和土壤残留无机氮较化肥表施均显著降低,表明固态粪肥表施和液态粪肥注射施用能降低土壤残留氮量和淋失风险。在华北平原地下水位持续降低的状况下,向农田施用液态粪肥能够为种子发芽及其前期生长提供急需的水分供给,可在一定程度上节省农田水消耗,降低生产成本,提高种植经济收益,亦可在一定程度上缓解规模化养殖场养殖废水处置难题,利于农牧业可持续发展。因此,在农业生产中,应加大固液粪肥农田施力度,特别是液态粪肥注射施用。

3.3 华北平原不同轮作系统和施肥方式的养分管理策略

华北平原,特别是河北省农田生产体系在1980—2015年期间氮素年均输入量远超作物输出氮量,畜牧体系畜禽粪尿氮素年均产生量由 $2.18\times 10^5\text{ Mg}$ 增加到 $1.15\times 10^6\text{ Mg}$,而畜牧粪尿氮素还田率由70.4%降至30.2%^[40]。可见华北平原农田生产与畜禽生产之间养分循环严重脱节,需要充分利用本地饲料资源,提高畜禽固液粪肥农田施用比例,才能有效解决因“农牧分离”而引发的“高投入、低效率、高污染”的生产问题。在本研究中,轮作方式T5和T3土壤残留无机氮和系统氮表观损失较T1显著降低,且0~200 cm土层

的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 残留量明显低于起始无机氮累积量(0~200 cm),表明轮作方式T3和T5在 $540\text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的施氮量下仍消耗了大量土壤无机氮,进而在一定程度上降低土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 残留量。Li等^[41]研究表明,在籽粒玉米-小麦轮作方式下,通过采用固态粪肥替代50%化肥表施和液态粪肥替代50%化肥注射施用两种固液粪肥施用方式可显著降低农业生产潜在环境危害,并能提高经济效益和生态效益。综合考虑轮作和施肥方式,本研究周年作物氮总输出量在CT3、LT3、LT5、ST3和LT5各处理间无显著差异,且与CT5差距均小于 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,表明采用甜高粱-黑麦草和高丹草-黑麦草两种轮作方式生产的同时,选用固态粪肥表施替代50%化肥氮和液态粪肥注射施用替代50%化肥氮两种有机肥施用方式是系统生产力最高且环境效应最佳的绿色种养一体化生产模式。

4 结论

(1)与籽粒玉米-小麦轮作相比,高丹草-黑麦草轮作显著提高了周年地上部生物量,且增幅最高,0~200 cm土层无机氮残留量和系统氮表观损失降幅最大,其次为甜高粱-黑麦草轮作方式。

(2)与化肥表施相比,固态粪肥表施和液态粪肥注射处理周年地上部生物量分别降低了7.3%和9.2%,0~200 cm土层无机氮残留量降低了31.5%和20.6%,氮表观损失增加。

(3)在固态粪肥替代50%化肥和液态粪肥注射施用替代50%化肥的施肥方式下,发展甜高粱-黑麦草和高丹草-黑麦草两种轮作方式,有望成为华北平原生产力较高且环境效应较佳的绿色种养一体化生产模式。

参考文献:

[1] 石鹏飞,郑媛媛,赵平,等. 华北平原种养一体规模化农场氮素流动特征及利用效率——以河北津龙循环农业园区为例[J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1281-1288. SHI Peng-fei, ZHENG Yuan-yuan, ZHAO Ping, et al. Nitrogen flow characteristic and use efficiency in mixed crop-livestock system in North China Plain: Hebei Jinlong circular agriculture farm as an example[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(4): 1281-1288.

[2] Xia L, Lam S K, Chen D, et al. Can knowledge-based N management produce more staple grain with lower greenhouse gas emission and reactive nitrogen pollution? A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(5): 1917-1925.

[3] Zhai L, Xu P, Zhang Z, et al. Improvements in grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize by optimizing tillage practice and nitro-

gen application rate[J]. *Agronomy Journal*, 2019, 111: 666-676.

[4] Bai Z H, Ma L, Qenema O, et al. Nitrogen and phosphorus use efficiencies in dairy production in China[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(4): 990-1001.

[5] 吴根义,廖新伟,贺德春,等. 我国畜禽养殖污染防治现状及对策[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(7): 1261-1264. WU Gen-yi, LIAO Xin-di, HE De-chun, et al. Current situation and countermeasures of livestock industry pollution control in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(7): 1261-1264.

[6] 杨飞,杨世琦,诸云强,等. 中国近30年畜禽养殖量及其耕地氮污染负荷分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 1-11. YANG Fei, YANG Shi-qi, ZHU Yun-qiang, et al. Analysis on livestock and poultry production and nitrogen pollution load of cultivated land during last 30 years in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(5): 1-11.

[7] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. *Nature*, 2014, 514: 486-489.

[8] Cui Z L, Zhang H Y, Chen X P, et al. Pursuing sustainable productivity with millions of smallholder farmers[J]. *Nature*, 2018, 555: 363-366.

[9] Zhao Z Q, Bai Z H, Wei S, et al. Modeling farm nutrient flows in the North China Plain to reduce nutrient losses[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2017, 108(2): 231-244.

[10] Bai Z H, Ma W Q, Ma L, et al. China's livestock transition: Driving forces, impacts, and consequences[J]. *Science Advances*, 2018, 4(7): eaar8534.

[11] 杨玲,廖文华,高志岭,等. 不同饲粮轮作模式生物质、粗蛋白生产潜力和氨排放研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 312-320. YANG Ling, LIAO Wen-hua, GAO Zhi-ling, et al. Production potentials of biomass and crude protein, and ammonia volatilizations under different forage-crop rotations[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(2): 312-320.

[12] Lyons S E, Ketterings Q M, Godwin G S, et al. Double-cropping with forage sorghum and forage triticale in New York[J]. *Agronomy Journal*, 2019, 111(6): 3374-3382.

[13] Samarappuli D, Berti M T. Intercropping forage sorghum with maize is a promising alternative to maize silage for biogas production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 194: 515-524.

[14] 李婧,李玲玲,张立健,等. 氮肥用量对粮饲兼用玉米产量和饲用品质形成的影响[J]. 草业科学, 2015, 32(3): 442-449. LI Jing, LI Ling-ling, ZHANG Li-jian, et al. Effects of nitrogen application on yield and forage quality of grain and forage maize[J]. *Pratacultural Science*, 2015, 32(3): 442-449.

[15] Tang C C, Yang X L, Xie G H. Establishing sustainable sweet sorghum-based cropping systems for forage and bioenergy feedstock in North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2018, 227: 144-154.

[16] Owen J J, Parton W J, Silver W L. Long-term impacts of manure amendments on carbon and greenhouse gas dynamics of rangelands[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(12): 4533-4547.

[17] 陶晓婷,朱正杰,高威,等. 规模化猪场处理废水与化肥配施对小麦氮素吸收利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 555-561. TAO Xiao-ting, ZHU Zheng-jie, GAO Wei, et al. Nitrogen uptake and utilization in wheat as influenced by pig slurry from large-scale pig farm[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3): 555-561.

- [18] 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 Yan-qing, WEN Yan-chen, LIN Zhi-an, et al. Effect of different manures combined with chemical fertilizer on yields of crops and gaseous N loss in farmland[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2019, 25(11): 1835-1846.
- [19] 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.
- [20] Montemayor E, Bonmatí A, Torrellas M, et al. Environmental accounting of closed-loop maize production scenarios: Manure as fertilizer and inclusion of catch crops[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2019, 146: 395-404.
- [21] Carr P M, Cavigelli M A, Darby H, et al. Green and animal manure use in organic field crop systems[J]. *Agronomy Journal*, 2020, 112: 648-674.
- [22] Qaswar M, Jing H, Ahmed W, et al. Yield sustainability, soil organic carbon sequestration and nutrients balance under long-term combined application of manure and inorganic fertilizers in acidic paddy soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 198: 104569.
- [23] 司东霞, 崔振岭, 陈新平, 等. 不同控释氮肥对夏玉米同化物积累及氮平衡的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1745-1751. SI Dong-xia, CUI Zhen-ling, CHEN Xin-ping, et al. Effects of controlled release nitrogen fertilizer application on dry matter accumulation and nitrogen balance of summer maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(6): 1745-1751.
- [24] 石鹏飞, 杨东玉, 郑媛媛, 等. 华北平原粮饲复合种植模式[J]. 草业科学, 2015, 32(12): 2107-2113. SHI Peng-fei, YANG Dong-yu, ZHENG Yuan-yuan, et al. Study on compound cropping systems of food and forage in North China Plain[J]. *Pratacultural Science*, 2015, 32(12): 2107-2113.
- [25] Stone L R, Goodrum D E, Jaafar M N. Rooting front and water depletion depths in grain sorghum and sunflower[J]. *Agronomy Journal*, 2001, 93: 1105-1110.
- [26] Himmelbauer M, Loiskandl W, Rousseva S. Spatial root distribution and water uptake of maize grown on field with subsoil compaction[J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2010, 58(3): 163-174.
- [27] Amaducci S, Colauzzi M, Battini F, et al. Effect of irrigation and nitrogen fertilization on the production of biogas from maize and sorghum in a water limited environment[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 76: 54-65.
- [28] Hassan M U, Chattha M U, Barbanti L, et al. Combined cultivar and harvest time to enhance biomass and methane yield in sorghum under warm dry conditions in Pakistan[J]. *Industrial Crops and Products*, 2019, 132: 84-91.
- [29] Leite P S S, Botelho T T, Ribeiro P C O, et al. Intrapopulation recurrent selection in sweet sorghum for improving sugar yield[J]. *Industrial Crops and Products*, 2020, 143: 111910.
- [30] 吕鑫, 平俊爱, 杜志宏, 等. 不同施肥量和种植密度对高丹草‘晋草4号’农艺性状和光合指数的影响[J]. 2019, 9(9): 55-60. LÜ Xin, PING Jun-ai, DU Zhi-hong, et al. Fertilizer amount and planting density: Effect on agronomic characters and photosynthetic indexes of ‘Jincao 4’[J]. *Journal of Agriculture*, 2019, 9(9): 55-60.
- [31] Lu X P, Yun J F, Gao C P. Quantitative trait loci analysis of economically important traits in *Sorghum bicolor* × *S. sudanense* hybrid[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2011, 91(1): 81-90.
- [32] 林治安, 赵秉强, 袁亮, 等. 长期定位施肥对土壤养分与作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2809-2819. LIN Zhi-an, ZHAO Bing-qiang, YUAN Liang, et al. Effects of organic manure and fertilizers long-term located application on soil fertility and crop yield[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(8): 2809-2819.
- [33] Gai X, Liu H, Liu J, et al. Contrasting impacts of long-term application of manure and crop straw on residual nitrate-N along the soil profile in the North China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 2251-2259.
- [34] Martines A M, Nogueira M A, Santos C A, et al. Ammonia volatilization in soil treated with tannery sludge[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(12): 4690-4696.
- [35] 李硕, 王选, 张西群, 等. 猪场肥水施用对玉米-小麦农田氨排放、氮素利用与表观平衡的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(10): 1502-1514. LI Shuo, WANG Xuan, ZHANG Xi-qun, et al. Effects of swine slurry application on ammonia emission, nitrogen utilization and apparent balance of a winter wheat-summer maize rotation system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(10): 1502-1514.
- [36] 屈佳伟, 高聚林, 于晓芳, 等. 不同氮效率玉米品种对土壤硝态氮时空分布及农田氮素平衡的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(5): 737-749. QU Jia-wei, GAO Ju-lin, YU Xiao-fang, et al. Effects of maize varieties with different nitrogen efficiencies on temporal and spatial distribution of soil nitrate and field nitrogen balance[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(5): 737-749.
- [37] 杜会英, 冯洁, 郭海刚, 等. 麦季牛场肥水灌溉对冬小麦-夏玉米轮作土壤氮素平衡的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 159-165. DU Hui-ying, FENG Jie, GUO Hai-gang, et al. Effects of dairy effluents irrigation on N balance in soil under winter wheat-summer maize rotation system[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(3): 159-165.
- [38] Martínez E, Maresma A, Biau A, 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.
- [39] 杨军, 张蕾, 张克强, 等. 猪场废水灌溉对潮土硝态氮含量变化的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 35-39. YANG Jun, ZHANG Lei, ZHANG Ke-qiang, et al. Effects of irrigation with piggery wastewater on nitrate nitrogen dynamics in fluvio-aquatic soil[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(5): 35-39.
- [40] 佟丙辛, 张华芳, 高肖贤, 等. 华北平原典型区域农牧系统氮素流动及其环境效应——以河北省为例[J]. 中国农业科学, 2018, 51(3): 442-455. TONG Bing-xin, ZHANG Hua-fang, GAO Xiao-xian, et al. Nitrogen flow and environmental effects of crop-livestock system in typical area of North China Plain: A case study in Hebei Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(3): 442-455.
- [41] Li S, Wu J C, Wang X Q, et al. Economic and environmental sustainability of maize-wheat rotation production when substituting mineral fertilizers with manure in the North China Plain[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 271: 122683.