

化肥减施下粪水替代对设施白菜氮利用与土壤氮盈余的影响

程娟, 付莉, 翟中葳, 肖能武, 杨柳, 刘福元, 杜会英, 杜连柱, 张克强

引用本文:

程娟, 付莉, 翟中葳, 等. 化肥减施下粪水替代对设施白菜氮利用与土壤氮盈余的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2551-2558.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1033>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

牛场粪水施用对华北小麦/玉米产量及氮损失的影响

赵自超, 付龙云, 李彦, 姚利, 田忠红, 井永苹, 仲子文, 王艳芹

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2544-2550 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1161>

餐厨粪替代化肥对白菜和西兰花光合、抗氧化性及品质的影响

杨凯, 董青君, 李其胜, 王东升, 焦加国, 胡锋, 李辉信

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 934-942 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1189>

猪场粪水施用对设施白菜及土壤重金属的影响

程娟, 刘沐衡, 肖能武, 杨柳, 杜会英, 杜连柱, 张克强

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2559-2567 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1030>

化肥减量替代对华北平原小麦-玉米轮作产量及氮流失影响

秦雪超, 潘君廷, 郭树芳, 翟丽梅, 王洪媛, 武淑霞, 刘宏斌

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1558-1567 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1364>

氮肥减量配施有机肥对苹果产量品质及土壤生物学特性的影响

杨莉莉, 王永合, 韩稳社, 马林英, 杨乖成, 韩艳云, 同延安

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 631-639 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1160>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

程娟, 付莉, 翟中葳, 等. 化肥减施下粪水替代对设施白菜氮利用与土壤氮盈余的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2551–2558.

CHENG J, FU L, ZHAI Z W, et al. Effects of fertilizer reduction on Chinese cabbage yield and soil nitrogen surplus[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2551–2558.



开放科学 OSID

化肥减施下粪水替代对设施白菜氮利用与土壤氮盈余的影响

程娟¹, 付莉¹, 翟中葳¹, 肖能武², 杨柳², 刘福元³, 杜会英^{1*}, 杜连柱^{1*}, 张克强¹

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 十堰市农业科学院, 湖北 十堰 442000; 3. 新疆农垦科学院畜牧兽医研究所, 新疆 石河子 832000)

摘 要:为促进丹江口水源涵养区绿色发展,提升氮素利用率,控制农业面源污染,利用田间小区试验,研究化肥减施及减施下粪水替代对设施白菜产量、土壤无机氮累积量及氮素盈余的影响。结果表明,化肥减施20%对设施白菜产量影响不显著,相同施氮量下粪水替代白菜产量显著高于化肥减施处理,可以提高白菜对氮的利用能力。土壤硝态氮累积量随种植茬数的增加呈增加趋势,且显著高于土壤铵态氮累积量。化肥减施处理氮素盈余量较常规施肥处理降低了23.38%,化肥减施粪水替代处理氮素盈余量比常规施肥处理降低了29.24%~30.65%,氮素盈余量与土壤有机质含量和土壤硝态氮累积量呈显著正相关。研究表明,化肥减施下粪水替代在保证设施白菜产量的同时,提高了氮素利用率,是降低氮素盈余的有效措施。

关键词:化肥减施;粪水替代;设施白菜;产量;氮素盈余

中图分类号:S634;S626 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)11-2551-08 doi:10.11654/jaes.2021-1033

Effects of fertilizer reduction on Chinese cabbage yield and soil nitrogen surplus

CHENG Juan¹, FU Li¹, ZHAI Zhongwei¹, XIAO Nengwu², YANG Liu², LIU Fuyuan³, DU Huiying^{1*}, DU Lianzhu^{1*}, ZHANG Keqiang¹

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. Shiyan Academy of Agricultural Science, Shiyan 442000, China; 3. Institute of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Shihezi 832000, China)

Abstract: To promote the green development of the Danjiangkou water conservation area, improve nitrogen use efficiency, and control agricultural non-point pollution, the effects of fertilizer reduction on Chinese cabbage yield, soil inorganic nitrogen, and nitrogen balance were studied using a field plot experiment. The results showed that the effect of 20% fertilizer reduction on Chinese cabbage yield was not significant, and there were no significant differences between treatments with pig farm slurry replacing chemical fertilizer and chemical fertilizer reduction at the same N application rate. The accumulation of soil nitrate N increased over the season and was significantly higher than the accumulation of soil ammonia N. Compared with that of conventional fertilization, the N surplus in the chemical fertilizer reduction treatment decreased by 23.38%, whereas that in the pig farm slurry treatment decreased by 29.24%~30.65%. In addition, N surplus was positively correlated with soil organic matter and nitrate N accumulation. In conclusion, chemical fertilizer reduction combined with pig farm slurry is an effective measure for reducing N surplus and increasing N use efficiency while ensuring Chinese cabbage yield.

Keywords: chemical fertilizer reduction; pig farm slurry; Chinese cabbage; yield; N surplus

收稿日期:2021-09-07 录用日期:2021-10-08

作者简介:程娟(1995—),女,河南信阳人,硕士研究生,从事农业废弃物资源化利用研究。E-mail:chengjuan423@163.com
付莉与程娟同等贡献。

*通信作者:杜会英 E-mail:duhuiying@caas.cn, 杜连柱 E-mail:dulianzhu99@163.com

基金项目:兵团重点领域科技攻关计划项目(2019AB028);中国农业科学院科技创新工程协同创新任务(CAAS-XTX2016015);中国农业科学院科技创新工程

Project supported: The XPCC Plans to Tackle Key Science and Technology Problems in Key Areas (2019AB028); Agricultural Science and Technology Innovation Program of CAAS (CAAS-XTX2016015); Science and Technology Innovation Project of Chinese Academy of Agricultural Sciences

随着我国农业种植结构持续优化,蔬菜种植面积连年增长,2019年蔬菜种植面积已达到2 086万 $\text{hm}^{[1]}$,蔬菜产业已成为农业农村经济的支柱产业,设施蔬菜栽培因具有反季节种植、复种指数和经济效益较高等特点发展迅速,目前设施蔬菜种植面积已达370万 $\text{hm}^{[2]}$ 。然而设施蔬菜种植具有高效益的同时,需要大量养分投入以满足设施蔬菜生长,过量施肥问题十分突出,黄绍文等^[3]的研究表明我国蔬菜肥料总用量普遍超量,设施蔬菜施用化肥养分量是农作物的4.1倍,化肥长期高位运行导致土壤中的存量巨大^[4],不仅降低了养分的利用率,而且有随着灌溉和降水进入水体的风险,引起水体富营养化等环境问题^[5],严重制约了设施蔬菜的优质高效生产。丹江口库区长期过度重视农业生产功能,农业面源污染严重,因此,如何优化施肥,减少土壤养分的盈余量,提高蔬菜产量和肥料利用率,对库区设施蔬菜可持续生产具有重要意义。

已有研究表明,适量减少化肥施用量能够保证设施蔬菜产量^[6],提高蔬菜维生素C和蛋白质等含量^[7]。张怀志等^[8]的研究表明,减少农户常规化肥用量40%并施用有机肥,设施番茄产量和氮素吸收量显著增加,氮损失量显著降低,李银坤等^[9]的研究证实,减施氮量25%同时节水30%,可增加设施黄瓜-番茄产量、提高水氮利用效率。然而,过分减氮会降低作物产量、品质及经济效益,应将施氮量控制在目标产量、作物品质 and 经济效益、环境效应与土壤肥力均可接受的合理范围内^[10]。氮素盈余是衡量氮素输入的生产力、环境影响和土壤肥力变化的最有效指标,能够在一定程度上反映投入氮的利用效率^[11],作为氮素管理指标之一被广泛应用。荷兰规定农场氮素盈余量为 $80\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,超过政府限定指标时,农民需要向政府交纳盈余税^[12-13]。CHEN等^[14]建立了氮素盈余与损失之间的经验关系。刘宏元等^[15]得出冬小麦-夏玉米轮作周期氮素盈余量推荐值为 $30\sim 70\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。LIANG等^[16]研究认为,在优化的水氮措施下,双季稻周年氮素盈余量为 $129.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[16]。ZHANG等^[17]建立了我国13种作物体系的氮素盈余指标,单作体系氮素盈余指标平均为 $73\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,双季轮作体系平均为 $160\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

目前关于农田氮素盈余的研究,大多集中在粮食作物上,缺乏化肥减施下粪水替代对设施蔬菜氮素盈余的研究。因此,本研究通过4茬设施白菜田间定位试验,设置不施肥、常规施用化肥、减施化肥和减施下

粪水替代5个处理,研究对设施白菜鲜质量、土壤全氮、无机氮及土壤氮素盈余等的影响,以期为丹江口水源涵养区种养结合提供科学数据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在湖北省十堰市郧阳区谭家湾镇设施大棚内进行,土壤为黄棕壤,试验开始时0~20 cm耕层土壤理化性质为:有机质含量 $6.58\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 7.72,容重 $1.13\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,全氮含量 $0.51\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,硝态氮含量 $40.60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,铵态氮含量 $1.99\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $36.91\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验设置5个处理,分别为:对照处理(CK),白菜生育期内不施用肥料;常规施肥处理(CON),白菜生育期施用蔬菜专用复合肥(18-8-18),N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 351 、 $156\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $351\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,底肥施用量占77%、莲座期追肥施用量占15%、结球期追肥施用量占8%;化肥减施处理(RCF),N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量均较常规减施20%,施用时期与常规施肥处理相同;化肥减施替代处理(RFS23),底肥施用蔬菜专用复合肥,莲座期和结球期追施猪场粪水,替代23%的化肥N、 P_2O_5 和 K_2O 用量,养分施用总量和时期与RCF处理相同;化肥减施替代处理(RFS100),分别替代100%、24%和19%的化肥N、 P_2O_5 和 K_2O 用量,养分施用总量和时期与RCF处理相同。试验小区灌溉采用畦灌。每个处理重复3次,小区面积 6.72 m^2 ,随机区组排列,小区间用PVC板(40 cm宽)隔开。

试验开始于2017年10月,结束于2019年12月,共连续种植4茬白菜,白菜株距为35 cm,行距为40 cm。试验用磷肥为 P_2O_5 (含量12%),钾肥为 K_2O (含量51%)。猪场粪水取自设施大棚上游养殖场,该养殖场年出栏生猪约1万头,猪场粪水经厌氧发酵后贮存在田间贮存池。粪水养分含量常年稳定,理化性质为pH 7.51,总氮含量 $773.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,铵态氮含量 $702.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,总磷含量 $19.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,总钾含量 $746.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.3 样品采集与测定

土壤样品采用“S”形5点取样法,取0~20、20~40 cm土样,同层次混合并装在密封的塑料袋中,用于进一步分析。产量计算采用全部小区称质量计产。每个小区选择具有代表性的5株白菜105℃杀青30 min,70℃下烘干至恒质量,粉碎保存。

有机质采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 外加热法测定,pH、土壤全氮、硝态氮和铵态氮等参考鲍士旦^[18]的方法测定,采用凯氏定氮法测定植物全氮。

氮盈余为氮输入量与作物氮输出量的差值^[17],输入氮包括化肥氮、粪水氮和灌溉带入氮,其中蔬菜生长期间灌溉水携带的氮参考龚世飞等^[19]的数据,其余数据为实测数据,作物氮输出为白菜氮输出。

氮盈余(N surplus, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)=氮输入-白菜氮输出;

氮素利用率(N use efficiency)=(施氮处理白菜地上部吸氮量-对照处理白菜地上部吸氮量)/施氮量 $\times 100\%$;

氮肥贡献率(N contribution rate)^[20]=(施氮处理白菜产量-对照处理白菜产量)/施氮处理白菜产量 $\times 100\%$ 。

1.4 数据处理与分析

采用Excel 2016软件做图,SAS 9.2软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA),采用LSD法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 对设施白菜产量及氮素利用的影响

由表1可知,随着种植茬数的增加,CK处理白菜产量呈现降低趋势。施肥处理4茬白菜产量显著高于CK处理;与CON处理相比,RCF处理4茬白菜产量差异不显著;相同施氮量的3个处理(RCF、RFS23和RFS100)中,粪水替代处理(RFS23、RFS100)白菜产量均高于RCF处理,第一茬和第三茬白菜产量差异达到显著水平,第二茬差异不显著,第四茬RFS23处理白菜产量显著高于RCF处理。适当减施化肥不会显著降低白菜产量,且粪水替代能够提高白菜产量。

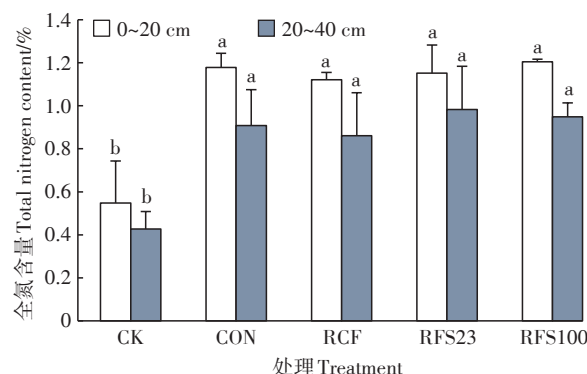
化肥减施下粪水替代可以提高白菜对所施氮的利用能力;从氮素利用率来看,化肥减施20%的RCF处理氮素利用率与CON处理相比未显著降低,RFS23

和RFS100处理之间差异不显著,均显著高于RCF处理;从氮肥贡献率来看,化肥减施替代处理(RFS23、RFS100)氮肥贡献率较化肥施用处理(CON、RCF)有所提高,且RFS23处理显著高于CON处理和RCF处理。

2.2 对土壤氮素的影响

第四茬白菜收获后,土壤全氮含量如图1所示。各处理上层土壤(0~20 cm)全氮含量均高于下层土壤(20~40 cm)。上层土壤(0~20 cm)中,CON、RCF、RFS23和RFS100处理全氮含量显著高于CK处理,且无显著性差异;下层土壤(20~40 cm)不同处理土壤全氮含量变化与0~20 cm土层变化趋势一致,RCF处理土壤全氮含量比CON处理降低了5.2%,未达5%显著水平,2个化肥减施粪水替代处理土壤全氮含量差异不显著。

由图2可知,4茬白菜收获后的土壤铵态氮累积量显著低于硝态氮,且各处理之间的铵态氮累积量无显著性差异。从土壤硝态氮累积量来看,CON处理下,随着种植茬数的增加,土壤硝态氮累积量增加,第



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 indicate significant differences among treatments($P<0.05$). The same below

图1 不同处理土壤全氮含量

Figure 1 Soil total nitrogen of different treatments

表1 化肥减施下粪水替代对白菜产量和氮素利用率的影响

Table 1 Chinese cabbage yield and nitrogen use efficiency of different treatments

处理 Treatment	白菜产量 Yield/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)				氮素利用率 N use efficiency/%	氮肥贡献率 N contribution rate/%
	第一茬 First season	第二茬 Second season	第三茬 Third season	第四茬 Fourth season		
CK	23 622.90 $\pm$ 2 050.11c	20 875.90 $\pm$ 1 190.83b	16 606.90 $\pm$ 465.40c	20 189.46 $\pm$ 745.86c	—	—
CON	62 512.30 $\pm$ 3 228.14b	71 446.75 $\pm$ 2 296.87a	47 478.75 $\pm$ 2 040.99ab	66 516.96 $\pm$ 1 193.64b	16.01 $\pm$ 0.98b	66.82 $\pm$ 1.21bc
RCF	59 378.65 $\pm$ 3 056.47b	63 759.25 $\pm$ 2 006.36a	44 097.30 $\pm$ 1 396.03b	65 803.08 $\pm$ 1 011.03b	19.09 $\pm$ 2.42b	64.69 $\pm$ 1.21c
RFS23	73 280.07 $\pm$ 2 604.68a	73 991.50 $\pm$ 5 303.24a	50 395.3 $\pm$ 2 402.56a	78 452.90 $\pm$ 3 081.86a	26.87 $\pm$ 1.60a	70.06 $\pm$ 1.48a
RFS100	72 636.40 $\pm$ 2 583.00a	71 305.70 $\pm$ 5 959.82a	49 252.35 $\pm$ 555.36a	71 280.40 $\pm$ 3 185.65b	25.11 $\pm$ 2.24a	68.89 $\pm$ 1.30ab

注: 同列中不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences among treatments($P<0.05$).

四茬累积量显著高于第一茬;RCF处理下土壤硝态氮累积量四茬之间差异不显著;RFS23处理下土壤硝态氮累积量第四茬显著高于前3茬;RFS100处理下第三茬土壤硝态氮累积量显著高于前2茬。第一茬白菜收获后,CON处理土壤硝态氮累积量与化肥减施处理(RCF)之间差异不显著,显著高于CK处理和化肥减施粪水替代处理(RFS23和RFS100);第二茬和第三茬白菜收获后,施肥处理土壤硝态氮累积量显著高于CK处理,各施肥处理间差异不显著;第四茬白菜收获后,CON处理土壤硝态氮累积量显著高于RCF处理,与RFS23和RFS100处理间差异不显著。

2.3 对土壤pH和有机质的影响

白菜收获后,0~20 cm 土壤pH值介于7.32~8.07(图3)。第一茬白菜收获后,各处理土壤pH值差异不显著。第二茬白菜收获后,施肥各处理之间pH值差异不显著,但均显著高于对照处理。第三茬白菜收

获后,RFS23和RFS100处理土壤pH值显著高于CK处理,CON处理和RCF处理与CK处理差异不显著。第四茬白菜收获后,各个处理之间土壤pH值均差异不显著。

4茬白菜收获后,土壤有机质含量(0~20 cm)如图4所示。由图可知,施肥增加了0~20 cm土壤有机质含量,在连续4茬的种植中,CON、RCF、RFS23和RFS100处理土壤有机质含量显著高于CK处理,且施肥处理间土壤有机质含量无显著性差异。不同茬次之间土壤有机质变化较小,第一茬施肥处理土壤有机质含量介于11.24~12.80 g·kg⁻¹,第二茬施肥处理土壤有机质含量介于11.91~12.24 g·kg⁻¹,第三茬施肥处理土壤有机质含量介于11.76~12.85 g·kg⁻¹,第四茬施肥处理土壤有机质含量介于12.74~13.69 g·kg⁻¹。

2.4 对土壤氮盈余的影响

0~40 cm 土层土壤-作物氮素平衡见表2,氮素输

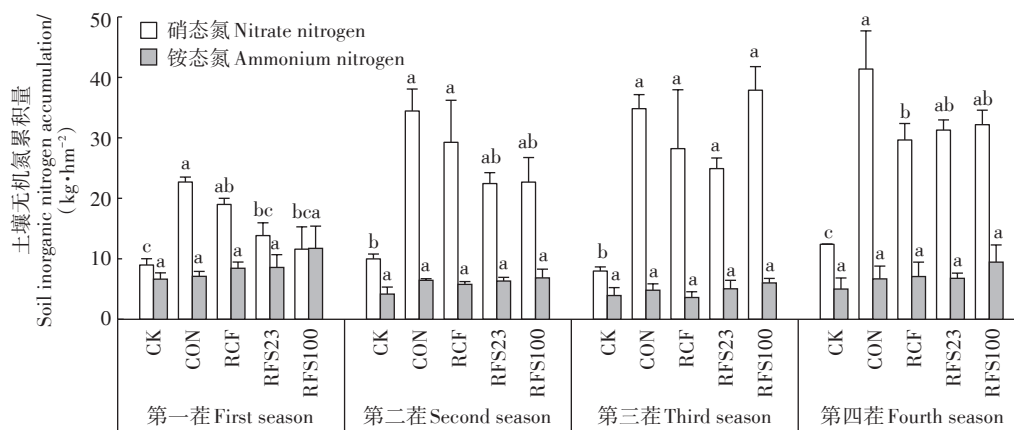


图2 不同处理土壤无机氮累积量

Figure 2 Inorganic nitrogen accumulation of soil of different treatments

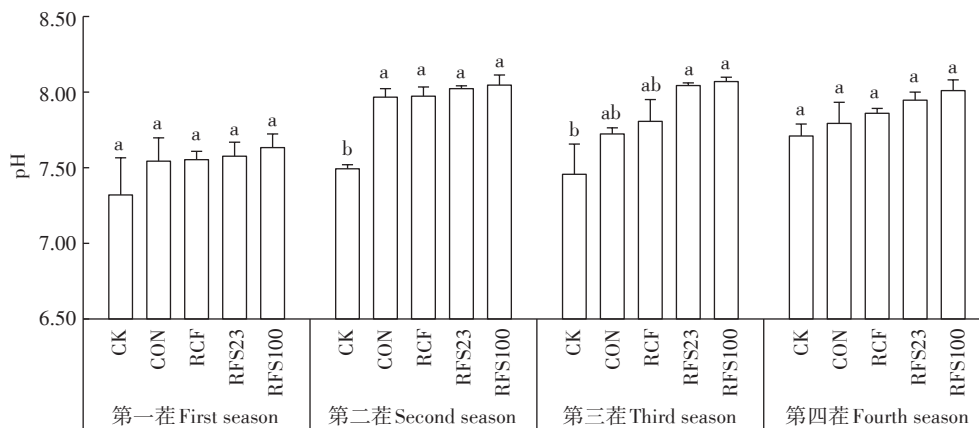


图3 不同处理土壤pH

Figure 3 Soil pH of different treatments

出以白菜收获后地上部氮含量计算,氮素输入中,灌溉氮输入量通过查阅文献获得^[9]。就氮素输出而言,设施白菜地上部氮含量在CK、CON和RCF处理下的变化趋势与产量变化一致,CON和RCF处理间差异不显著,但均显著高于CK处理;两个粪水替代处理白菜地上部氮含量之间差异不显著,但均显著高于化肥施用处理。

氮盈余分析结果显示,施肥各处理的氮盈余显著

高于CK处理,各施肥处理中,RCF处理氮素盈余显著低于CON处理,相同施氮量的3个处理中,RCF处理氮素盈余量显著高于化肥减施粪水替代的2个处理(RFS23和RFS100),化肥减施粪水替代的2个处理氮盈余差异不显著。相关分析表明,土壤氮素盈余量与土壤有机质含量和土壤硝态氮累积量呈显著正相关($r=0.64,r=0.68$,图5)。

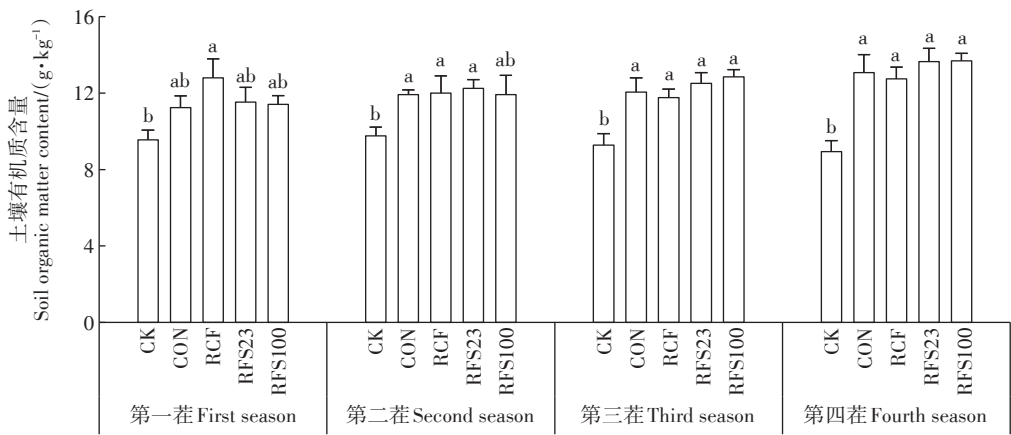


图4 不同处理土壤有机质含量
Figure 4 Soil organic matter content of different treatments

表2 土壤-作物系统氮素养分平衡(kg·hm⁻²)
Table 2 N balance in soil-crop system in Chinese cabbage (kg·hm⁻²)

氮素收支 N budget		CK	CON	RCF	RFS23	RFS100
氮输入 N input	化肥氮 Fertilizer N	0	351	281	216	0
	粪水氮 Pig farm slurry N	0	0	0	65	281
	灌溉 Irrigation N	17.06	17.06	17.06	17.06	17.06
	总输入 Total input	17.06	368.06	298.06	298.06	298.06
氮输出 N output	作物吸收 Crop uptake N	23.53c	79.72b	77.14b	98.11a	94.03a
	氮素盈余 N surplus	-6.47d	288.34a	220.92b	199.95c	204.03c

注:同行中不同字母表示处理间差异达显著水平($P<0.05$)。
Note: Different letters in the same line indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).

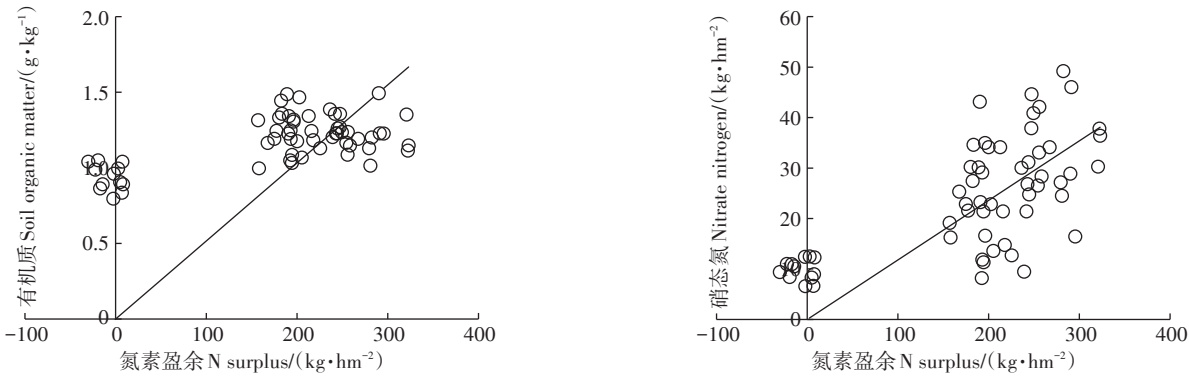


图5 土壤氮素盈余与土壤有机质含量、硝态氮累积量的关系
Figure 5 Relationship between N surplus and soil organic matter content, nitrate nitrogen accumulation

3 讨论

3.1 化肥减施对白菜产量的影响

根据黄绍文等^[3]的研究统计,我国的设施蔬菜施用氮肥量是推荐量的1.9倍,主要露地蔬菜氮肥施用总量是推荐量的2.7倍;魏宗强等^[21]研究发现,大白菜-土壤体系的氮素表观损失随施氮量的增加而显著增加,高施氮量导致高的氮素盈余,过量施肥会对环境产生污染。在一定范围内提高施氮量能提高白菜产量,超过范围则白菜产量不再提高且可能会降低^[22-24],JENSEN等^[25]以寿光市为例指出,将氮肥用量减少50%并结合调节土壤碳氮比和滴灌能显著增加设施蔬菜产量,在安徽巢湖地区减氮施肥15%能显著提高设施番茄产量,均没有降低产量且提高了氮肥利用率。也有研究指出^[26],用粪水替代30%的化肥氮未能显著提高小麦产量,随着粪水替代量的增加,小麦产量呈现先增加后降低的趋势。本研究结果表明,化肥减施20%条件下,白菜产量与常规处理无显著差异;相同施氮量($281\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)条件下,化肥减施粪水氮替代23%和100%,4茬白菜平均产量是化肥处理的1.18倍和1.13倍,同时可以提高白菜对所施氮的利用能力。而相较于化肥,猪场粪水水溶性有机质含量比较高^[27],粪水替代化肥施用能更好地被作物利用从而提高作物产量^[28]。

3.2 化肥减施对土壤硝态氮的影响

施入土壤中的氮大部分硝化成为硝态氮,是作物吸收利用的主要形态^[29],较高的硝态氮含量可促进作物的生长;但高量施氮会导致农田土壤中的氮进入地下水或淋溶到深层土壤,造成水体富营养化、地下水硝酸盐积累等^[30-31],因此,合理减氮是减少土壤硝态氮累积量直接而有效的途径^[32]。田雨等^[33]的研究表明,土壤硝态氮累积量在白菜生长后期较高,减氮处理降低了土壤硝态氮累积量,减少了氮素向下淋失的风险,本研究中,土壤中硝态氮累积量随着种植茬数增多而增加,第四茬白菜收获后,常规施肥处理的土壤硝态氮含量显著高于第一茬;RFS23处理土壤硝态氮累积量第四茬显著高于前3茬;RFS100处理第三茬土壤硝态氮累积量显著高于前2茬,与第四茬差异不显著。BASSO等^[34]的研究表明,长期高量施肥会引起土壤硝态氮积累,进而增加环境污染风险。猪场粪水中含有一定量的有机态养分,施入土壤后存在矿化过程,开始种植时土壤有效养分含量低于化肥处理,随着种植茬数的增加,粪水中富含的腐植酸和生长素

等物质促进土壤胶体和团粒结构形成,加速土壤养分的分解、转化和释放,减少养分尤其是氮素的流失,进而提高了土壤养分的供给水平^[35]。长期施用猪场粪水替代化肥对土壤硝态氮影响需进一步研究。

3.3 化肥减施对土壤氮盈余的影响

研究农田土壤-作物系统氮素平衡状况,可为指导农业生产提供理论基础。ZHU等^[36]指出量化氮盈余有利于提高氮利用率和减少氮损失,当氮素盈余高于作物吸收氮素的20%或输入氮素的17%时,会发生严重的氮素污染。BAI等^[37]认为,肥料氮投入增加,相应的氮盈余显著增加,氮素长期盈余会造成土壤无机氮积累,超出作物吸收部分的氮素会以氮素表观损失和无机氮残留形式损失,损失量与施氮量呈显著正相关。宁建凤等^[38]的研究证明,减少化肥施用量,可降低土壤氮盈余量18%~48%。本研究中,施肥处理氮盈余从大到小依次表现为:CON>RCF>RFS100>RFS23,化肥减施20%条件下,RCF处理较常规施肥处理氮盈余降低23.38%,化肥减施粪水替代处理氮盈余量比常规施肥处理降低了29.24%~30.65%。猪场粪水中的活性有机物质可以促进土壤对铵离子的吸附固定^[39],同时,在硝化细菌的作用下,施入土壤的猪场粪水氮将会转化成硝态氮残留在土壤中,增加土壤中的矿质氮含量^[40]。氮肥科学施用是实现农作物增产提质和减少氮素污染的重要方法^[41],氮盈余是衡量氮素投入及环境影响的有效指标^[11],化肥减施及猪场粪水替代可降低土壤的氮盈余量,降低氮素损失,提高氮素利用率。

4 结论

(1)4茬设施白菜种植过程中,化肥减施20%白菜产量较常规施肥未显著降低。相同减氮20%条件下,粪水氮替代23%和替代100%处理的4茬白菜平均产量是化肥处理的1.18倍和1.13倍。化肥减施下粪水替代可以提高白菜对所施氮的利用能力,化肥减施20%下粪水氮替代23%和替代100%处理的氮利用率均显著高于化肥施用处理,化肥减施20%下粪水氮替代23%处理氮素贡献率显著高于化肥施用的处理。

(2)4茬白菜种植过程中,0~20 cm土壤pH值介于7.32~8.07;施肥增加了土壤有机质的含量。随着种植茬数的增加,0~40 cm土壤硝态氮累积量呈增加趋势,常规施肥氮盈余为 $288.34\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,化肥减施及减施粪水替代处理可以显著降低土壤氮盈余。

(3)综合考虑设施白菜产量、土壤无机氮和氮盈余等指标,丹江口库区可以在减施化肥的条件下进行粪水替代,可进一步提高设施白菜的氮利用率,减少土壤氮盈余量,减少农业面源污染。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 国家数据库[DB/OL].[2021-9-14]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01> National Bureau of Statistics. National database[DB/OL].[2021-9-14]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>
- [2] 李天来, 许勇, 张金霞. 我国设施蔬菜、西甜瓜和食用菌产业发展的现状及趋势[J]. 中国蔬菜, 2019(11):6-9. LI T L, XU Y, ZHANG J X. China's facility vegetable, melon and edible fungus industry development status and trends[J]. *China Vegetables*, 2019(11):6-9.
- [3] 黄绍文, 唐继伟, 李春花, 等. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6):1480-1493. HUANG S W, TANG J W, LI C H, et al. Reducing potential of chemical fertilizers and scientific fertilization countermeasure in vegetable production in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017(6):1480-1493.
- [4] 刘宏斌. 浅谈“十四五”农业面源污染防治[N]. 中国环境报, 2021-04-16(003). LIU H B. Talking about the prevention and control of agricultural non-point source pollution in the "14th Five-Year Plan" [N]. *China Environment Newspaper*, 2021-04-16(003).
- [5] LIU X, ZHANG Y, HAN W, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, 494(7438):459-462.
- [6] 姜慧敏, 张建峰, 杨俊诚, 等. 不同氮肥用量对设施番茄产量、品质和土壤硝态氮累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12):2338-2345. JIANG H M, ZHANG J F, YANG J C, et al. Effects of different treatments of nitrogen fertilizer on yield, quality of tomato and soil NO₃-N accumulation in vegetable-greenhouse[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(12):2338-2345.
- [7] 陆扣萍, 谢寅峰, 闵炬, 等. 不同施氮量对大棚茼蒿根系形态及产量和品质的影响[J]. 土壤, 2011, 43(3):542-547. LU K P, XIE Y F, MIN J, et al. Effects of different nitrogen application on root morphology, yield and quality of lettuce in greenhouse[J]. *Soil*, 2011, 43(3):542-547.
- [8] 张怀志, 唐继伟, 袁硕, 等. 化肥减施对日光温室越冬长茬番茄氮肥利用率及去向的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(7):1295-1302. ZHANG H Z, TANG J W, YUAN S, et al. Effect of fertilizer reduction on nitrogen utilization efficiency and fate during overwinter long-season tomato production in greenhouse[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(7):1295-1302.
- [9] 李银坤, 武雪萍, 武其甫, 等. 水氮用量对设施栽培蔬菜地土壤氨挥发损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4):949-957. LI Y K, WU X P, WU Q F, et al. Effects of irrigation and nitrogen application on ammonia volatilization loss from vegetable fields under greenhouse cultivation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(4):949-957.
- [10] 巨晓棠, 张翀. 论合理施氮的原则和指标[J]. 土壤学报, 2021, 58(1):1-13. JU X T, ZHANG C. The principles and indicators of rational N fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(1):1-13.
- [11] OENEMA O, KROS H, DE VRIES W et al. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: Implications for nutrient management and environmental policies[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 20(1/2):3-16.
- [12] MARJOLEINE C H, DIRK J D B. Perspectives and limitations of the dutch minerals accounting system (MINAS) [J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 20(1/2):25-31.
- [13] OENEMA A, VAN LIERE L, SCHOUmans O, et al. Effects of lowering nitrogen and phosphorus surpluses in agriculture on the quality of groundwater and surface water in the Netherlands[J]. *European Journal of Agronomy*, 2005, 304:289-301.
- [14] CHEN X P, CUI Z L, FAN M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. *Research Gate*, 2014, 514(7523):486-489.
- [15] 刘宏元, 张爱平, 杨世琦, 等. 山东省冬小麦-夏玉米轮作体系土壤氮素盈余指标体系的构建与评价——以德州市为例[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6):1321-1329. LIU H Y, ZHANG A P, YANG S Q, et al. Construction and evaluation of a soil nitrogen surplus index system for the wheat maize rotation system in Shandong Province, China: A case study of Dezhou City[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6):1321-1329.
- [16] LIANG K M, ZHOU X H, HUANG N R, et al. Nitrogen losses and greenhouse gas emissions under different N and water management in a subtropical double-season rice cropping system[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607:46-57.
- [17] ZHANG C, JU X T, POWLSON D, et al. Nitrogen surplus benchmarks for controlling N pollution in the main cropping systems of China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(12):6678-6687.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [19] 龚世飞, 丁武汉, 肖能武, 等. 丹江口水库核心水源区典型流域农业面源污染特征[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(12):2816-2825. GONG S F, DING W H, XIAO N W, et al. Characteristics of agricultural non-point source pollution in typical watershed of core water source area of Danjiangkou reservoir[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(12):2816-2825.
- [20] 刘泰, 王洪媛, 杨波, 等. 粪肥增施对水稻产量和氮素利用效率的影响[J/OL]. 农业资源与环境学报: doi:10.13254/j.jare.2021.0096. LIU T, WANG H Y, YANG B, et al. Effect of additional applications of manure on rice crop yield and nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, doi:10.13254/j.jare.2021.0096.
- [21] 魏宗强, 李吉进, 张杰, 等. 沼肥对大白菜产量和品质的影响及其环境效应[J]. 中国农学通报, 2010, 26(6):168-172. WEI Z Q, LI J J, ZHANG J, et al. Study on the effect of biogas fertilizer on the Chinese cabbage yield, quality and environment[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(6):168-172.
- [22] 罗涛, 王煌平, 张青, 等. 菠菜硝酸盐含量符合安全生产的氮肥用

- 量研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1282-1287. LUO T, WANG H P, ZHANG Q, et al. A study on nitrate content of spinach conforms to the nitrogen fertilizer consumption in safe production[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2010, 16(5): 1282-1287.
- [23] 刘一凡, 王红, 张瑞芳, 等. 不同氮肥施用量对白菜产量及品质的影响[J]. 北方园艺, 2021(10): 35-40. LIU Y F, WANG H, ZHANG R F, et al. Effects of different nitrogen fertilizer Application rates on the yield and quality of Chinese cabbage[J]. *Northern Horticulture*, 2021(10): 35-40.
- [24] 曾彩霞. 氮肥的不同用量对大白菜产量的影响[J]. 耕作与栽培, 2016(4): 43-44. ZENG C X. Effects of different amount nitrogen fertilizer on the yield of Chinese cabbage[J]. *Tillage and Cultivation*, 2016(4): 43-44.
- [25] JENSEN M H, MALTER A J. Protected agriculture: A global review [M]. Washington D.C.: World Bank Publications, 1995: 253.
- [26] 王桂良, 张家宏, 王守红, 等. 沼液替代化肥氮对冬小麦产量、品质及生长发育的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(5): 467-475. WANG G L, ZHANG J H, WANG S H, et al. Effects of chemical fertilizer nitrogen substitution by biogas slurry on yield, quality and growth characteristics of winter wheat[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(5): 467-475.
- [27] 孙海军, 闵炬, 施卫明, 等. 稻麦轮作体系养殖肥水灌溉对产量、氮挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. 土壤, 2015, 47(3): 503-508. SUN H J, MIN J, SHI W M, et al. Effects of fertilizer irrigation on yield, ammonia volatilization and nitrous oxide wheat rotation system [J]. *Soil*, 2015, 47(3): 503-508.
- [28] 杨润, 孙钦平, 赵海燕, 等. 沼液在稻田的精确施用及其环境效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8): 1566-1572. YANG R, SUN Q P, ZHAO H Y, et al. Precision application of biogas slurry and its environmental effects in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(8): 1566-1572.
- [29] GUO L Y, WU G L, LI Y, et al. Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat-maize rotation system in eastern China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 156: 140-147.
- [30] 陈宝明. 施氮对植物生长、硝态氮累积及土壤硝态氮残留的影响[J]. 生态环境, 2016, 15(3): 630-632. CHEN B M. Effect of N supply on plant growth, nitrate accumulation and soil nitrate residue[J]. *Ecological Environment*, 2016, 15(3): 630-632.
- [31] 刘兆辉, 薄录吉, 李彦, 等. 氮肥减量施用技术及其对作物产量和生态环境的影响综述[J]. 中国土壤与肥料, 2016(4): 1-8. LIU Z H, BO L J, LI Y, et al. Summary of nitrogen reduction application technology and its impact on crop yield and ecological environment [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(4): 1-8.
- [32] 毕晓庆, 山楠, 杜连凤, 等. 氮肥用量对设施滴灌栽培番茄产量品质及土壤硝态氮累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(11): 2246-2250. BI X Q, SHAN N, DU L F, et al. Effects of nitrogen rates on tomato yield and quality and soil nitrate accumulation under drip irrigation in solar greenhouse[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(11): 2246-2250.
- [33] 田雨, 李振宇, 徐欣, 等. 减水减肥对露天菜田黑土氮淋溶特征的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(21): 50-55. TIAN Y, LI Z Y, XU X, et al. The effects of reducing irrigation and chemical fertilizers on nitrogen leaching in open-air black soil vegetable field[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(21): 50-55.
- [34] BASSO B, Ritchie J T. Impact of compost, manure and inorganic fertilizer on nitrate leaching and yield for a 6-year maize-alfalfa rotation in Michigan[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2005, 108: 329-341.
- [35] 谢汉友, 董仁杰, 吴树彪, 等. 沼液与化肥配合基施对大棚番茄产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(3): 108-115. XIE H Y, DONG R J, WU S B, et al. Effect of biogas slurry combined with chemical fertilizer on the yield and quality of tomato growth in greenhouse[J]. *Chinese Soil and Fertilizer*, 2018(3): 108-115.
- [36] ZHU X Q, FU W H, KONG X J, et al. Nitrate accumulation in the soil profile is the main fate of surplus nitrogen after land-use change from cereal cultivation to apple orchards on the Loess Plateau[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 319: 107574.
- [37] BAI X L, GAO J J, WANG S C, et al. Excessive nutrient balance surpluses in newly built solar greenhouses over five years leads to high nutrient accumulations in soil[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 288: 1-10.
- [38] 宁建凤, 艾绍英, 李盟军, 等. 化肥减量配合有机替代对赤红壤常年菜地蔬菜生长及土壤氮平衡的影响[J]. 热带作物学报, 2019, 40(5): 1008-1014. NING J F, AI S Y, LI M J, et al. Effects of chemical fertilizer reduction and organic substitution on vegetable growth and soil nitrogen balance in red soil[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2019, 40(5): 1008-1014.
- [39] THOMPSON R B, PAIN B F, REES Y J. Ammonia volatilization from cattle slurry following surface application to grassland[J]. *Plant and Soil*, 2010, 125(1): 119-128.
- [40] 陈效民, 吴华山, 孙静红. 太湖地区农田土壤中铵态氮和硝态氮的时空变异[J]. 环境科学, 2016, 27(6): 1217-1222. CHEN X M, WU H S, SUN J H. Time-spatial variability of ammonium and nitrate in farmland soil of Taihu Lake region[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(6): 1217-1222.
- [41] 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 Fertilizer*, 2013, 19(2): 259-273.