

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

引用本文:

赵自超, 付龙云, 李彦, 等. 牛场粪水施用对华北小麦/玉米产量及氮损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2544–2550.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1161>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

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, 翟中藏, 肖能武, 杨柳, 刘福元, 杜会英, 杜连柱, 张克强

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2551–2558 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1033>

不同深施肥方式对稻田氨挥发及水稻产量的影响

周平遥, 张震, 王华, 肖智华, 徐华勤, 汪久翔

农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2683–2691 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0441>

田间老化生物质炭对潮土氨挥发的影响

廖霞, 刘德燕, 陈增明, 何铁虎, 牛玉慧, 丁维新

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1326–1336 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1414>

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

赵自超, 付龙云, 李彦, 等. 牛场粪水施用对华北小麦/玉米产量及氮损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11): 2544–2550.

ZHAO Z C, FU L Y, LI Y, et al. Effects of the application of cattle farm slurry on wheat/maize yield and soil nitrogen loss in northern China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11): 2544–2550.



开放科学 OSID

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^{1,2}, 付龙云¹, 李彦^{1,3}, 姚利^{1,2}, 田忠红⁴, 井永苹¹, 仲子文¹, 王艳芹^{1,3*}

(1. 山东省农业科学院农业资源与环境研究所, 济南 250100; 2. 农业农村部废弃物基质化利用重点实验室, 济南 250100; 3. 农业农村部黄淮海平原农业环境重点实验室, 济南 250100; 4. 山东银香伟业集团有限公司, 山东 菏泽 274400)

摘要:为探讨牛场粪水施用对作物产量、氮素利用率和氮素损失的影响,本研究以小麦和玉米为研究对象,在华北地区进行了田间试验,以不施氮肥为对照(CK),遵循等氮量原则,设置4个氮肥处理:常规化肥(撒施,CF)、粪水化肥配施(化肥撒施,粪水浇灌,CSF)、粪水浇灌(CS)和粪水深施(CSD)。结果表明:施氮肥处理相比不施氮肥显著增加了作物产量和氮素损失。相比常规化肥处理,施用粪水处理不会降低小麦籽粒和青贮玉米产量,且施用粪水能提高作物氮素利用率,CSD处理的效果最好。相比CF处理,CSF和CS处理不管在小麦季还是在玉米季都会增加氨挥发量,在小麦季分别增加了5.6%和27.1%,在玉米季分别增加了7.8%和14.7%。CSD处理相比CF处理则会降低氨挥发量,小麦季和玉米季分别减少了15.3%和12.6%。不管在小麦季还是在玉米季,相比化肥处理,施用粪水都能显著降低氮淋失量;与CF处理相比,CSF、CS和CSD处理的小麦季的氮淋失量分别减少了38.5%、66.7%和35.8%,玉米季的氮淋失量分别减少了22.6%、39.2%和57.8%。研究表明,粪水深施是华北地区在保证作物产量的情况下,提高氮素利用率和降低氮素损失的有效措施。

关键词:牛场粪水;小麦;玉米;产量;氮损失

中图分类号:S513;S512.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2021)11-2544-07 **doi:**10.11654/jaes.2021-1161

Effects of the application of cattle farm slurry on wheat/maize yield and soil nitrogen loss in northern China

ZHAO Zichao^{1,2}, FU Longyun¹, LI Yan^{1,3}, YAO Li^{1,2}, TIAN Zhonghong⁴, JING Yongping¹, ZHONG Ziwen¹, WANG Yanqin^{1,3*}

(1. Institute of Agricultural Resource and Environment, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China; 2. Key Laboratory of Wastes Matrix Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jinan 250100, China; 3. Key Laboratory of Agro-Environment of Huang-Huai-Hai Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jinan 250100, China; 4. Shandong Yinxiang Weiye Group Co., Ltd, Heze 274400, China)

Abstract: The present study aimed to better understand the effects of applying cattle farm slurry on crop yield, nitrogen (N) use efficiency, and N loss. A field experiment consisting of one treatment without N fertilizer and four treatments with N fertilizer was conducted, including CF: farmer's conventional N fertilizer input (broadcast application), CSF: substitution of half the amount of N fertilizer with cattle farm slurry (broadcast application), CS: substitution of the total amount of N fertilizer with cattle farm slurry (broadcast application), and CSD: substitution of the total amount of N fertilizer with cattle farm slurry (deep application). Compared to the conventional chemical fertilizer treatment, the application of cattle farm slurry did not reduce the yield of wheat grain and silage maize, and increased the nitrogen use efficiency (NUE) of crops. The effect of the CSD treatment was the best. Compared to the CF treatment, the CSF and CS treatments

收稿日期:2021-10-09 录用日期:2021-10-11

作者简介:赵自超(1987—),男,山东莘县人,博士,助理研究员,主要从事废弃物资源化利用研究。E-mail:2008zzc@163.com

*通信作者:王艳芹 E-mail:hjwyq2018@163.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0800105);山东省农业科学院农业科技创新工程项目(CXGC2021A43)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2018YFD0800105); The Agricultural Scientific and Technological Innovation Project of Shandong Academy of Agricultural Sciences (CXGC2021A43)

increased the ammonia volatilization by 5.6% and 27.1% in the wheat season, and by 7.8% and 14.7% in the maize season, respectively. Compared to the CF treatment, the CSD treatment decreased ammonia volatilization by 15.3% and 12.6% in the wheat and maize seasons, respectively. CSF, CS, and CSD treatments decreased nitrogen leaching loss by 38.5%, 66.7%, and 35.8% in the wheat season, and 22.6%, 39.2%, and 57.8% in the maize season, respectively, compared to that of the CF treatment. Consequently, the deep application of cattle farm slurry is the optimum choice to improve nitrogen use efficiency and reduce nitrogen loss to ensure crop yield in northern China.

Keywords: cattle farm slurry; wheat; maize; yield; nitrogen loss

随着我国经济的迅速发展,人民生活质量日渐提高,对牛奶的需求量越来越大,估计2050年我国牛奶需求量将是2010年的3.2倍^[1]。奶牛养殖业发展水平的高低是畜牧业甚至是整个农业发展水平的一个重要标志^[2]。近年来,农业结构调整和农业产业化的推进使奶牛规模化养殖得到了迅速发展,在解决农村剩余劳动力转化、增加农民收入、满足人民生活需要等方面发挥了重要作用。但奶牛养殖过程中产生的大量粪污难以处理,尤其是污水处理已成为奶牛场的主要难题^[3-4]。据统计,存栏4 000头奶牛的奶牛场,每日的污水产生量约为300 t左右,若处理不当,将会对环境造成二次污染^[5-6]。奶牛场污水污染物浓度高,达标排放处理难且成本高(每吨污水25元左右),因此,将粪水厌氧发酵储存后进行农田利用成为了替代选择。

华北平原是我国重要的粮食产区之一,当地农民投入了大量的化肥和灌溉水确保作物生产,随之产生了氮淋溶、氨挥发、水资源短缺等环境问题。冬小麦-夏玉米轮作体系是华北地区主要的粮食种植方式,而华北地区的降雨量无法满足该种植方式对水分的需求,为维持粮食作物的高产,大量地下水资源被消耗,造成该区地下水位持续下降^[7-8]。水资源短缺与环境污染问题严重制约着华北地区农业的可持续发展。对于华北地区来说,开展粪水农田灌溉可以有效缓解水资源供需的矛盾,粪水富含氮、磷、钾元素和有机质物质,是一种良好的有机肥,其可以替代一定量的化肥施用于农田^[9-11]。粪水还田是一种降低成本、节约资源和减少环境污染的有效方式。在华北地区,粪水施用到农田后对作物产量、氮素利用及损失(氮淋洗、氨挥发)的具体影响还不清楚。

为此,本研究以华北地区典型冬小麦-夏玉米轮作农田为研究对象,对规模化奶牛场粪水施用条件下的作物产量、氮素利用率及氮素损失进行研究,以期为规模化奶牛场的粪污资源化利用和制定减少氮素损失策略提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究于2019年6月—2020年6月在山东省曹县某奶牛养殖废弃物循环利用示范基地内进行。该地区属于黄河冲积平原,气候为典型的暖温带大陆性季风气候,四季分明,光照充裕,年日照时数2 147 h,年平均气温14.3 ℃,年平均降水量678 mm。种植模式为冬小麦-夏玉米轮作,6月—9月为夏玉米生育期,10月—次年6月为冬小麦生育期。供试土壤为潮土,其0~20 cm土层基础理化性状如下:pH值为7.74,有机质含量为15.1 g·kg⁻¹,全氮含量为1.06 g·kg⁻¹,速效磷含量为6.3 mg·kg⁻¹,速效钾含量为322 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,共设5个处理,分别为:不施氮肥(CK)、常规化肥(全部化肥,撒施,CF)、粪水化肥配施(粪水等氮代替50%化肥,化肥撒施,粪水浇灌,CSF)、粪水浇灌(粪水等氮代替100%化肥,浇灌,CS)、粪水深施(粪水等氮代替100%化肥,深施,CSD)。每处理重复3次,每小区长9 m,宽6 m。

试验用小麦品种为济麦22,玉米品种为豫青贮23。养分设计以氮含量为标准计算,小麦季和玉米季均按照210 kg·hm⁻²氮施用量为一个单位计算粪水的投入量,小麦季磷(P₂O₅)、钾(K₂O)用量分别为105 kg·hm⁻²和90 kg·hm⁻²,玉米季磷(P₂O₅)、钾(K₂O)用量分别为75 kg·hm⁻²和105 kg·hm⁻²。氮肥基追比为1:1,磷钾肥全部作为基肥使用。粪水取自基地所在的奶牛场,是粪污经过固液分离后,进入黑膜贮存池内发酵6个月得到的液体,含固率2%~5%,养分含量见表1。施用过程中,粪水中磷钾不足的用化学肥料补齐。氮肥为尿素(含氮量为46%),磷肥为重磷酸钙(含P₂O₅ 46%),钾肥为硫酸钾(含K₂O 50%)。小麦季和玉米季各施肥2次,灌溉2次,每次75 mm(清水+粪水),粪水浇灌时随灌溉水施用,深施采用埋沟法进行,深度15 cm。虫草防治根据当地农民习惯进行。

表1 供试粪水养分特征

Table 1 Nutrient properties of the tested slurry

项目 Item	pH	氮含量 N/%	磷含量 P ₂ O ₅ /%	钾含量 K ₂ O/%
数值 Value	8.0~8.05	0.09~0.12	0.03~0.05	0.10~0.14

1.3 样品采集与测定

青贮玉米收获时,每小区取3个9 m²样方进行测产,直接称质量,以鲜质量计算产量,风干后测定氮含量。冬小麦收获时,每小区取3个3 m²样方进行测产,风干后称质量,计算籽粒和秸秆产量,并测定氮含量。用H₂SO₄-H₂O₂消煮-凯氏定氮法测定所有处理小麦籽粒、秸秆和玉米秸秆中的全氮含量^[12]。氮素利用率采用以下公式计算^[13]:

氮素利用率(NUE)=(施氮肥处理的氮素吸收量-不施肥处理的氮素吸收量)/氮肥施用量×100%

土壤氨挥发采用通气法采集^[14],土壤淋溶液采用淋溶桶法采集^[12],采集后的样品经过处理后利用自动间断分析仪(Smartchem 200)测定铵态氮和硝态氮含量^[15],从而计算土壤氨挥发量和氮淋洗量。氨挥发系数和氮淋失率采用以下公式计算^[14,16]:

氨挥发系数=(施氮肥处理的氨挥发量-不施肥处理的氨挥发量)/氮肥施用量×100%

氮淋失率=(施氮肥处理的氮淋失量-不施肥处理的淋失量)/氮肥施用量×100%

1.4 数据处理与分析

试验数据应用Excel 2016处理和绘图,应用SPSS 22.0进行统计分析。

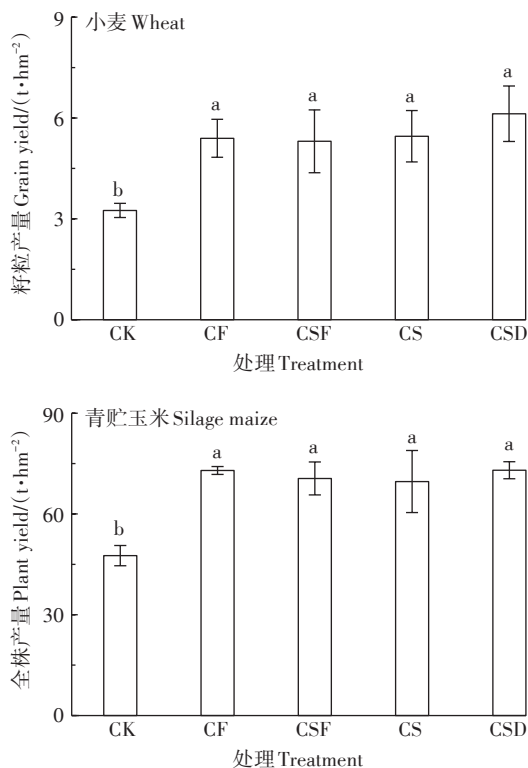
2 结果与分析

2.1 粪水施用对作物产量的影响

从图1可以看出,不施氮处理小麦籽粒和青贮玉米(鲜质量)产量最低。施氮处理中,与CF处理相比,CSF、CS和CSD处理的小麦籽粒产量和青贮玉米产量差异均不显著。CF、CSF、CS和CSD处理的小麦籽粒产量分别为5.40、5.31、5.46 t·hm⁻²和6.13 t·hm⁻²,青贮玉米产量(鲜质量)分别为72.9、70.6、69.7 t·hm⁻²和73.1 t·hm⁻²。牛场粪水部分或全部代替化肥不会显著减少作物产量,且粪水深施能提高作物产量。

2.2 粪水施用对作物氮素利用率的影响

从图2可以看出,4个施肥处理间的小麦季和玉米季NUE差异均不显著。CF、CSF、CS和CSD 4个处理的小麦季NUE分别为39.7%、44.1%、48.0%和



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同

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

图1 不同施肥处理的小麦籽粒和青贮玉米产量

Figure 1 Grain yield of wheat and silage maize under different treatments

50.5%,玉米季NUE分别为36.3%、36.4%、34.0%和39.3%。牛场粪水代替化肥不会降低作物氮素利用率,且施用粪水能提高作物氮素利用率,尤其是在小麦季。

2.3 粪水施用对土壤氨挥发的影响

从图3可以看出,在小麦季,随着浇灌施用粪水量的增加,氨挥发量随之增加;施肥处理中,相比CF处理,CSF和CS处理的氨挥发量分别增加了5.6%和27.1%。由于CSD处理采取了粪水深施措施,其氨挥发量相比CF和CS处理显著降低,分别下降了15.3%和30.0%。CF、CSF、CS和CSD 4个处理的小麦季氨挥发系数分别为4.22%、4.08%、6.86%和2.85%。相比CF和CS处理,CSD处理显著降低了氨挥发系数(图4)。

与小麦季不同的是,在玉米季,4个施氮肥处理间的氨挥发量差异不显著(图3),氨挥发系数差异也不显著(图4)。CF、CSF、CS和CSD 4个处理的玉米季氨挥发系数分别为5.16%、5.70%、6.18%和5.18%。

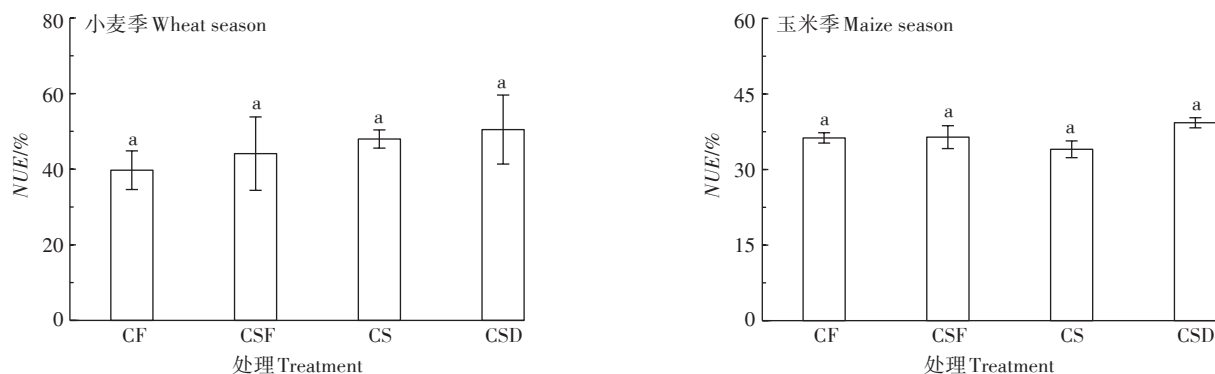


图2 不同施肥处理的小麦季和玉米季氮素利用率

Figure 2 The NUE of wheat season and maize season under different treatments

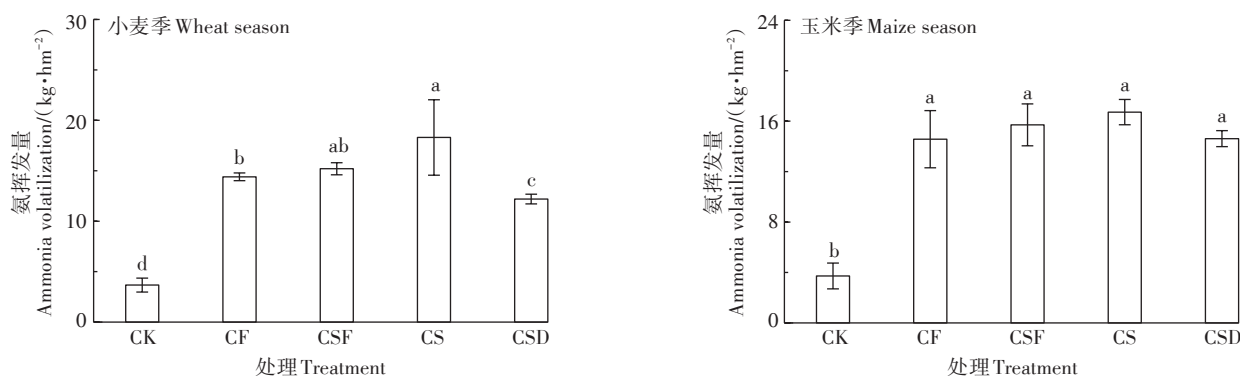


图3 不同施肥处理的小麦季和玉米季氨挥发

Figure 3 Ammonia volatilization of wheat season and maize season under different treatments

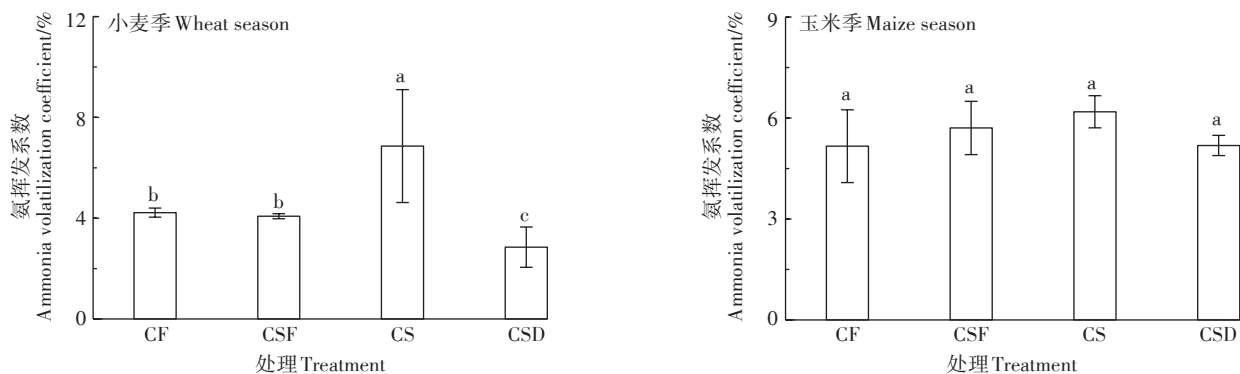


图4 不同施肥处理的小麦季和玉米季氨挥发系数

Figure 4 Ammonia volatilization coefficient of wheat season and maize season under different treatments

CSD处理相比CS处理的氨挥发量和氨挥发系数分别降低了12.6%和1个百分点。

2.4 粪水施用对土壤氮淋失的影响

由图5可以看出,在小麦季,相比施用化肥,施用粪水显著降低了无机氮淋失,也显著降低了氮淋失率(图6),CF、CSF、CS和CSD 4个处理的小麦季氮淋失率分别为9.52%、5.51%、2.55%和5.79%。相比CF处

理,CSF、CS和CSD的氮淋失量分别降低了38.5%、66.7%和35.8%。粪水深施处理(CSD)相比浇灌处理(CS)氮淋失量增加了91.8%。4个施肥处理中,氮淋失以硝态氮为主,占97.8%~99.3%。

与小麦季相同,在玉米季,施用粪水相比施用化肥显著降低了无机氮淋失量(图5)及氮淋失率(图6)。相比CF处理,CSF、CS和CSD的氮淋失量分别降

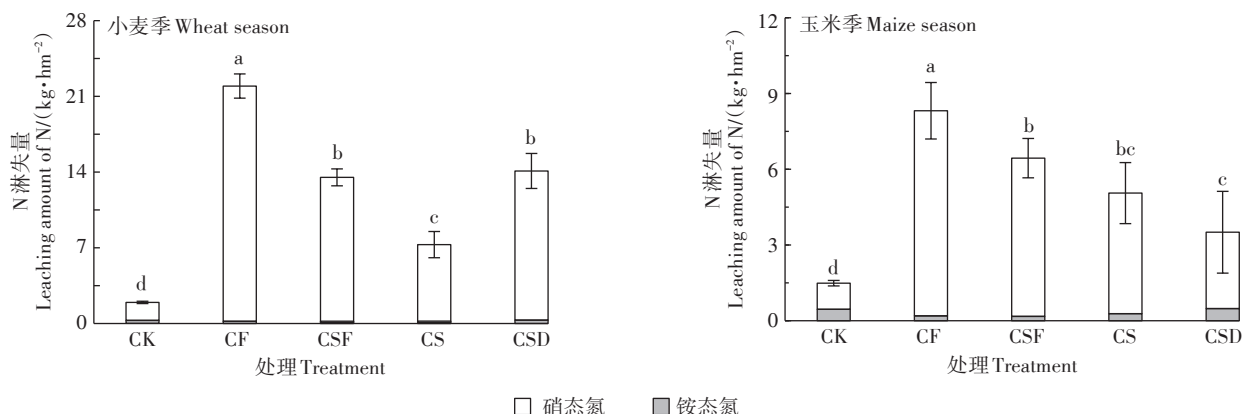


图5 不同施肥处理的小麦季和玉米季氮淋失量

Figure 5 Leaching amount of N in wheat season and maize season under different treatments

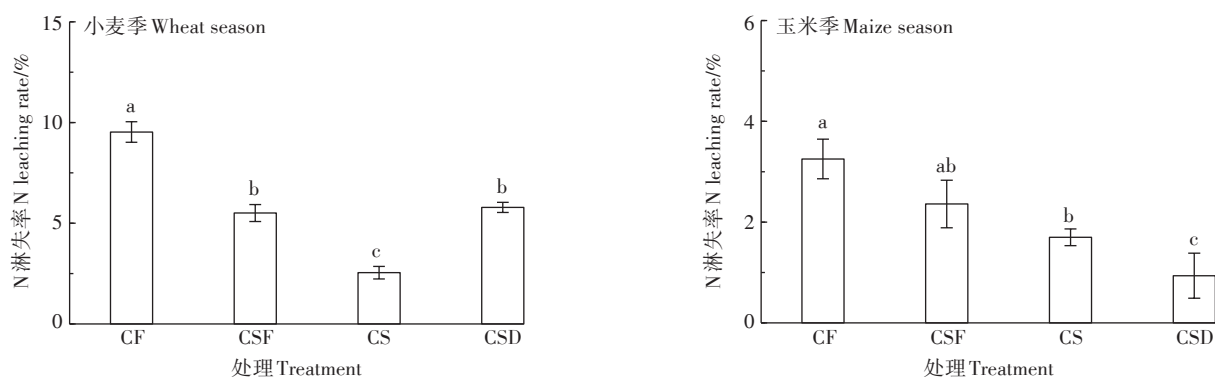


图6 不同施肥处理的小麦季和玉米季氮淋失率

Figure 6 N leaching rate of wheat season and maize season under different treatments

低了22.6%、39.2%和57.8%。在玉米季,氮淋失主要成分也是硝态氮,占86.3%~97.7%。CF、CSF、CS和CSD 4个处理的小麦季氮淋失率分别为3.25%、2.36%、1.70%和0.94%。在玉米季,每个施肥处理的氮淋失量和氮淋失率均低于小麦季。CSD相比CS处理氮淋失量减少了30.7%。

3 讨论

发酵后的粪水不仅含有大量的氮、磷、钾等作物必需大量元素,还含有氨基酸、微量元素和腐植酸等活性物质,能改善土壤状况,刺激作物生长^[17-19]。社会英等^[20]发现牛场粪水与化肥配施对小麦产量有促进作用。郭海刚等^[21]在利用牛场粪水灌溉冬小麦的试验中发现,粪水灌溉与正常施肥相比可以提高冬小麦品质和产量,冬小麦籽粒中蛋白质质量分数和产量分别提高了2.5%~8.3%和4.6%~6.6%。这说明施用粪水能够提高土壤肥力、增加作物产量和改善作物品质^[22]。本研究的结果表明,施用粪水尤其是粪水深施

条件下,相比化肥可以增加小麦籽粒产量及氮素利用率。在玉米季,施用粪水处理青贮玉米产量和氮素利用率有所下降,但各处理间差异不显著。造成以上结果的原因可能是在玉米季温度较高,且试验地是碱性土壤,富含铵离子的粪水施入土壤中,氮素会通过氨挥发等途径损失^[23-24],从而导致氮素利用率低于化肥。但从整个年度来看,常规化肥、粪水配施化肥、粪水浇灌和粪水深施4个处理在等氮量投入条件下的氮素利用率分别为38.0%、40.3%、41.0%和44.9%。这说明施用粪水会增加华北小麦-玉米轮作系统的年度氮素利用率。

土壤氨挥发和氮淋失是华北农田氮素损失的两个主要途径^[12,15]。本研究中,相比施用化肥,浇灌粪水显著增加了小麦季的氨挥发量,但是显著降低了小麦季的氮淋失量;在玉米季,氨挥发量和氮淋失量变化趋势与小麦季的相同,但是各处理间差异不显著。常规化肥、粪水配施化肥、浇灌粪水和粪水深施4个处理的氨挥发量在小麦季占氮损失量(氨挥发量+氮

淋失量)的比例分别为39.6%、52.9%、71.5%和46.4%,而在玉米季的这个比例则是71.5%、63.7%、70.9%和80.7%。因而,在粪水施用过程中,减少氨挥发,尤其是在玉米季是控制氮素损失的有效措施。研究表明,除温度和表面施用等物理因素外,影响粪水施用后土壤氨挥发的最重要因素是pH和氮素的有效性^[25],本研究的土壤pH是7.74,浇灌施用含有大量铵离子的碱性粪水会引起大量氨挥发,而控制粪水施用后土壤氨挥发的有效途径是粪水酸化和粪水深施^[26-27],这也是在小麦季深施粪水会显著降低氨挥发的原因。在玉米季,粪水深施对于降低氨挥发的效果并不好,这可能是玉米季温度过高或深施深度不够的原因,提高深施深度或酸化粪水可能会减少玉米季的氨挥发量。氮素淋失是造成地下水污染和地表水富营养化的重要途径之一^[28]。本研究的结果表明,施用粪水会降低氮淋失,尤其是在小麦季。从整个年度来看,相比常规化肥处理,粪水配施化肥、粪水浇灌和粪水深施3个处理的氮素损失(氨挥发+氮淋失)分别降低了14.2%、20.0%和25.0%。这说明施用粪水会降低华北小麦-玉米轮作系统的氮素损失。

综上所述,施用粪水相比化肥在维持产量的同时,不仅提高了作物氮素利用率,还降低了土壤氮素损失。其中,等氮量替代化肥、粪水深施的效果最好。同时,粪水还能节约灌溉水,经核算,每年每公顷可节省450~467 t的灌溉水。因而,农田施用粪水不仅解决了养殖场粪污处理难的问题,还为农作物生产节约了水肥,是实现华北地区绿色种养循环农业的有效措施。但同时需要注意粪水施入农田中可能会带来N₂O排放量增高和重金属以及抗生素污染等问题^[29-30],需要进一步研究。

4 结论

(1)在同等施氮量条件下,施用牛场粪水不仅不会降低作物产量,还会提高华北小麦-玉米轮作体系年度氮素利用率,粪水配施化肥、粪水浇灌和粪水深施相比常规化肥处理,氮素利用率分别提高了2.3个、3.0个和6.9个百分点。

(2)施用牛场粪水引起的氮素损失主要是氨挥发,尤其是在玉米季,占氮损失(氨挥发+氮淋失)的63.7%~80.7%,采取措施减少粪水施用过程中的氨挥发量,可进一步降低氮素损失造成的环境风险。施用牛场粪水可以通过降低氮淋失而降低氮损失,相比常规化肥处理,粪水配施化肥、粪水浇灌和粪水深施

的年度氮损失量分别降低了14.2%、20.0%和25.0%。

(3)粪水深施是维持作物产量的同时提高氮素利用率和降低氮素损失的有效措施。

参考文献:

- [1] BAI Z H, LEE M R, MA L, et al. Global environmental costs of China's thirst for milk[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(5):2198-2211.
- [2] 樊斌,薛晓聪,李萌,等.中国奶牛养殖生产布局优化研究——基于比较优势的实证分析[J]. *农业现代化研究*, 2020, 41(2):331-340.
- [3] FAN B, XUE X C, LI M, et al. Production layout optimization of dairy farming in China: An empirical analysis based on comparative advantage[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2020, 41(2):331-340.
- [4] 李梦婷,孙迪,牟美睿,等.天津规模化奶牛场粪水运移中氮磷含量变化特征[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(20):27-33.
- [5] LI M T, SUN D, MU M R. Variation characteristics and rules of nitrogen and phosphorus contents throughout the slurry movement from scaled dairy farms in Tianjin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(20):27-33.
- [6] THOMAS B W, HAO X Y. Nitrous oxide emitted from soil receiving anaerobically digested solid cattle manure[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2017, 46(4):741-750.
- [7] ABUBAKER J, ODLARE M, PELL M. Nitrous oxide production from soils amended with biogas residues and cattle slurry[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(4):1046-1058.
- [8] BARAL K R, LABOURIAU R, OLESEN J E, et al. Nitrous oxide emissions and nitrogen use efficiency of manure and digestates applied to spring barley[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2017, 239:188-198.
- [9] GAO B, JU X T, MENG Q F, et al. The impact of alternative cropping systems on global warming potential, grain yield and groundwater use[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 203:46-54.
- [10] YANG T X, LI Y J, GAO J X, et al. Performance of dry anaerobic technology in the co-digestion of rural organic solid wastes in China[J]. *Energy*, 2015, 93:2497-2502.
- [11] 杨涵博,罗艳丽,赵迪,等.养殖肥液不同灌溉强度下硝化-脲酶抑制剂-生物炭联合阻控氮淋溶的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(10):2363-2370.
- [12] YANG H B, LUO Y L, ZHAO D, et al. Nitrification-urease inhibitor-biochar-controlled nitrogen leaching with different biogas slurry irrigation intensities[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10):2363-2370.
- [13] CHEN W L, LIN S C, HUANG C H, et al. Wide-scope screening for pharmaceutically active substances in a leafy vegetable cultivated under biogas slurry irrigation[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 750:141519.
- [14] YIN G F, WANG X F, DU H Y, et al. N₂O and CO₂ emissions, nitrogen use efficiency under biogas slurry irrigation: A field study of two consecutive wheat-maize rotation cycles in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 212:232-240.
- [15] 秦雪超,潘君廷,郭树芳,等.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[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(7):

- 1558–1567. QIN X C, PAN J T, GUO S F, et al. Effects of chemical fertilizer reduction combined with biogas fertilizer on crop yield of wheat–maize rotation and soil nitrogen loss in North China Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(7):1558–1567.
- [13] 杨宪龙, 路永莉, 李茹, 等. 小麦–玉米轮作体系多年定位试验中作物氮肥利用率计算方法探讨[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(12): 3514–3520. YANG X L, LU Y L, LI R, et al. Discussion on the calculation method of nitrogen use efficiency (NIUE) in long-term field experiments under wheat and maize rotation systems[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(12):3514–3520.
- [14] 廖霞, 刘德燕, 陈增明, 等. 田间老熟生物质炭对潮土氮挥发的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(6):1326–1336. LIAO X, LIU D Y, CHEN Z M, et al. Effects of field-aged biochar on NH_3 emissions under wheat–maize rotation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(6):1326–1336.
- [15] 张英鹏, 李洪杰, 刘兆辉, 等. 农田减氮调控施肥对华北潮土区小麦–玉米轮作体系氮素损失的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4):1179–1187. ZHANG Y P, LI H J, LIU Z H, et al. Effect of reducing N and regulated fertilization on N loss from wheat–maize rotation system of farmland in Chao soil region of North China Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4):1179–1187.
- [16] 刘青丽, 邹焱, 李志宏, 等. 雨养烟叶种植田无机氮淋溶特征[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(7):149–156. LIU Q L, ZOU Y, LI Z H, et al. Characteristics of inorganic nitrogen leaching from tobacco fields in rain-fed areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(7):149–156.
- [17] RAHAMAN M A, ZHANG Q W, SHI Y, et al. Biogas slurry application could potentially reduce N_2O emissions and increase crop yield [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 778(2):146269.
- [18] FRANA A, TUCHER S V, SCHMIDHALTER U. Effects of combined application of acidified biogas slurry and chemical fertilizer on crop production and N soil fertility[J]. *European Journal of Agronomy*, 2021, 123:126224.
- [19] JIN Z W, SUN R H, PING L F, et al. Evaluating the key factors of soil fertility and tomato yield with fresh and aged biogas slurry addition through greenhouse experiment[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2021, 17:1–12.
- [20] 杜会英, 冯洁, 张克强, 等. 牛场肥水灌溉对冬小麦产量与氮利用效率及土壤硝态氮的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(2): 536–541. DU H Y, FENG J, ZHANG K Q, et al. Effects of dairy effluents irrigation on yield and nitrogen use efficiency of winter wheat and soil nitrate nitrogen[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(2):536–541.
- [21] 郭海刚, 杜会英, 张克强, 等. 规模化牛场废水灌溉对土壤水分和冬小麦产量品质的影响[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(8):1498–1502. GUO H G, DU H Y, ZHANG K Q, et al. Effects of dairy wastewater irrigation on soil water and the yield and quality of winter wheat[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(8):1498–1502.
- [22] 崔宇星, MUHAMMAD A, 孙吉翠, 等. 沼液与化肥配施对耕层土壤化学性状及玉米产量品质的影响[J]. *山东农业科学*, 2020, 52(5): 77–81. CUI Y X, MUHAMMAD A, SUN J C, et al. Effects of biogas slurry combined with chemical fertilizer on soil chemical properties and corn yield and quality[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2020, 52(5):77–81.
- [23] 张朋月, 丁京涛, 孟海波, 等. 牛粪水酸化贮存过程中氮形态转化的特性研究[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(8):212–218. ZHANG P Y, DING J T, MENG H B, et al. Characteristics of nitrogen transformation in the process of acidification and storage of cow slurry[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(8):212–218.
- [24] WEI Z, WANG X J, YAO R J, et al. Nitrate leaching and NH_3 volatilization during soil reclamation in the Yellow River Delta, China[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 286(8):117330.
- [25] VERDI L, KUIKMAN P J, ORLANDINI S, et al. Does the use of digestate to replace mineral fertilizers have less emissions of N_2O and NH_3 ? [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 269/270:112–118.
- [26] FANGUEIRO D, PEREIRA J L S, MACEDO S, et al. Surface application of acidified cattle slurry compared to slurry injection: Impact on NH_3 , N_2O , CO_2 and CH_4 emissions and crop uptake[J]. *Geoderma*, 2017, 306:160–166.
- [27] 胡腾腾, 董文旭, 王文岩, 等. 华北平原氮肥周年深施对冬小麦–夏玉米轮作体系土壤氮挥发的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(12):1880–1889. HU M M, DONG W X, WANG W Y, et al. The effects of deep application of nitrogen fertilization on ammonia volatilization in a winter wheat/summer maize rotation system in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(12):1880–1889.
- [28] HUANG T, JU X T, YANG H. Nitrate leaching in a winter wheat–summer maize rotation on a calcareous soil as affected by nitrogen and straw management[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7:42247.
- [29] NGUYEN Q V, WU D, KONG X W, et al. Effects of cattle slurry and nitrification inhibitor application on spatial soil O_2 dynamics and N_2O production pathways[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 114: 200–209.
- [30] 王小彬, 闫湘, 李秀英. 畜禽粪污厌氧发酵沼液农用之环境安全风险[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(1):110–139. WANG X B, YAN X, LI X Y. Environmental safety risk for application of anaerobic fermentation biogas slurry from livestock manure in agricultural land in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(1):110–139.