



粪肥增施对水稻产量和氮素利用效率的影响

刘泰, 王洪媛, 杨波, 魏静, 贺鹏程, 王玉龙, 刘宏斌

引用本文:

刘泰,王洪媛,杨波,魏静,贺鹏程,王玉龙,刘宏斌. 粪肥增施对水稻产量和氮素利用效率的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3): 545–555.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0096>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

聚天门冬氨酸尿素对水稻产量及田面水氮素变化的综合影响

王娜, 徐嘉翼, 张鑫, 隋世江, 叶鑫, 牛世伟

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 96–103 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0072>

农艺深施及配施缓控释氮肥对水稻产量及氮素损失的影响

张富林, 刘冬碧, 范先鹏, 夏颖, 张志毅, 程子珍, 吴茂前, 高红兵, 毛波, 孔祥琼

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 858–866 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0171>

控释尿素对春玉米产量、氮效率及氮素平衡的影响

姬景红, 李玉影, 刘双全, 佟玉欣, 任桂林, 李杰, 刘颖, 张明怡

农业资源与环境学报. 2017, 34(2): 153–160 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0231>

增施有机肥对稻田亚耕层土壤的培肥效应

韩上, 武际, 张祥明, 胡鹏, 杨友兵, 李敏, 王慧, 唐杉

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 334–341 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0319>

长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响

蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 吕真真, 冀建华, 冯兆滨, 刘秀梅

农业资源与环境学报. 2021, 38(5): 810–819 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0584>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3): 545-555.

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*, 2022, 39(3): 545-555.



开放科学 OSID

粪肥增施对水稻产量和氮素利用效率的影响

刘泰^{1,2}, 王洪媛^{2*}, 杨波², 魏静³, 贺鹏程³, 王玉龙³, 刘宏斌²

(1. 内蒙古大学生态与环境学院, 蒙古高原生态学与资源利用教育部重点实验室, 内蒙古自治区环境污染控制与废物资源化重点实验室, 呼和浩特 010021; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业农村部面源污染控制重点实验室, 北京 100081; 3. 乌兰察布市农业技术推广站, 内蒙古 乌兰察布 012000)

摘要:为探究不同用量粪肥增施对水稻生产的影响,在等氮施用化肥的基础上开展盆栽试验,通过系统分析水稻产量、氮素利用效率、水稻收获后土壤理化性质等指标,以及水稻叶片叶绿素相对含量(SPAD值)、田面水无机氮素浓度的动态变化特征,对粪肥增施的最佳用量进行了研究。结果表明:在施用尿素(192.8 kg·hm⁻²,以N计)的基础上,增施0.75倍粪肥(相当于增施N 115.1 kg·hm⁻²)的效果最佳,秸秆产量、籽粒产量、穗数、分蘖数、株高、秸秆吸氮量和籽粒吸氮量等指标均达到最高,与单施尿素相比,分别提高36.2%、46.4%、12.1%、16.1%、0.7%、48.5%和56.3%;氮素利用指标(氮素利用率、氮肥贡献率、氮肥农学效率和土壤氮素依存率)得到显著优化($P<0.05$);追施穗肥后田面水中铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)的平均浓度分别下降10.4%和10.3%,表明适量增施粪肥会有效降低田面水中氮素的流失风险。另外,增施粪肥对土壤养分含量具有促进作用,其中土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷和铵态氮含量随粪肥增施量的增加而提高。研究表明,在施用化肥基础上增施0.75倍粪肥,可最大程度实现水稻增产和氮素利用效率的提升,同时降低氮素流失风险。研究结果可为水稻生产中有机无机肥配比比例的确定提供参考。

关键词:氮素利用效率;粪肥;水稻;田面水;有机无机肥配施

中图分类号:S141.2

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)03-0545-11

doi: 10.13254/j.jare.2021.0096

Effect of additional applications of manure on rice crop yield and nitrogen use efficiency

LIU Tai^{1,2}, WANG Hongyuan^{2*}, YANG Bo², WEI Jing³, HE Pengcheng³, WANG Yulong³, LIU Hongbin²

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Ecology and Resource Use of the Mongolian Plateau, Inner Mongolia Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Waste Resource Recycle, School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 2. Key Laboratory of Nonpoint Source Pollution Control, Institute of Agricultural Resource and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Agricultural Technology Extension Station of Ulanqab, Ulanqab 012000, China)

Abstract: We investigated the effects of additional manure application on rice production. To this end, a pot experiment was conducted to systematically explore the optimal additional application rate of manure, by analyzing crop yield and nitrogen use efficiency of rice, chemical and physical properties of the soil after rice harvest, and the changes in the SPAD of leaves and inorganic nitrogen concentration in the surface water. The results showed 0.75 times additional manure application (N content was 115.1 kg·hm⁻²), with urea (N content was 192.8 kg·hm⁻²), presented the best performance. It increased straw yield, grain yield, spike number, tiller number, plant height, nitrogen accumulation of straw, and nitrogen accumulation of grain by 36.2%, 46.4%, 12.1%, 16.1%, 0.7%, 48.5%, and 56.3%, respectively, compared with the single urea application. In addition, the nitrogen use indexes, namely nitrogen use efficiency, nitrogen fertilizer

收稿日期: 2021-02-11 录用日期: 2021-04-02

作者简介: 刘泰(1993—),男,河北衡水人,博士研究生,主要从事重金属污染、盐渍化土壤修复及面源污染防控等研究。

E-mail: liutaikoma@foxmail.com

*通信作者: 王洪媛 E-mail: wanghongyuan@caas.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(31972519)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31972519)

contribution rate, nitrogen fertilizer agronomic efficiency, and soil nitrogen dependency ratio, were optimized simultaneously ($P < 0.05$). After the application of panicle fertilizer, the average concentration of NH_4^+-N and NO_3^--N decreased by 10.4% and 10.3%. This indicated that additional manure application at an appropriate rate enables to reduce the risk of nitrogen loss in the surface water. Furthermore, additional manure application improved the soil nutrient content after rice harvest; the content of organic matter, total nitrogen, alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus, and ammonia nitrogen increased with the application rate. Overall, 0.75 times additional manure application combined with inorganic fertilizer input presented the best performance, by not only mitigating environment damage but also improving grain yield. Our study provides a reference for determining the optimal ratio of organic and inorganic fertilizer in rice production.

Keywords: nitrogen use efficiency; manure; rice; surface water; combination of organic and inorganic fertilizer

水稻是世界上最主要的粮食作物,我国有1/4的耕地用于水稻种植,超过60%的人口以稻米为主食^[1]。作为水稻生长过程中大量需求的元素之一,氮在水稻长势、产量和品质调控方面发挥着重要作用^[2]。在过去,水稻种植过程中氮素的补充主要依赖于化肥施入。施用化肥能有效增加土壤中氮素储备,在一定程度上促进了水稻的生长,水稻产量也获得了大幅提高^[3]。然而,大量施用化肥会导致肥料利用率低,以及大气污染、水体污染、土壤退化等环境问题。另外,由于化肥等生产原料价格的上涨,无节制地施用化肥对农业生产造成了消极的影响^[4-6]。因此,探究合理的水稻施肥方式对我国农业生产具有十分重要的意义。

粪肥中含有丰富的氮、磷、钾等元素以及作物生长所需的各种微量元素。粪肥施入土壤中除了可以为作物生长提供所需养分之外,还可以改善土壤结构,提高土壤有机质含量,增强土壤对水分和养分的固持能力,从而提高农田生产力^[7]。同时,施用粪肥可以缓解肥料投入对环境的危害。LAL^[8]研究发现,增施粪肥可以有效降低土壤中温室气体 CO_2 的排放。赵冬等^[9]发现,粪肥替代化肥施用能有效缓解稻田田面水中的氮、磷流失。与普通化肥相比,粪肥的肥力持续性更强,可以延长养分的释放时间,为后期作物对养分的需求提供保证。因此,粪肥还田已成为农业可持续发展的一条有效途径^[10]。然而,粪肥的单独施用会导致养分释放速率过慢,不能满足水稻在生长过程中特定时间段内的养分需求,最终影响水稻的生长和产量^[11]。化肥和粪肥的配施则可兼顾两者优点,保持土壤养分平衡,在增加作物产量的同时,降低养分流失^[3,12-13]。在现有的研究中,替代部分化肥是粪肥还田施用的主要形式,然而,在不同的研究结论中粪肥的最佳替代比例结果相差较大^[14-20]。例如仅就水稻产量而言,蓝贤瑾等^[19]认为猪粪替代70%尿素氮时产量最高,而陈琨等^[20]研究发现水稻产量最高的处理

中猪粪替代比例为30%。

近年来,我国养殖业发展迅速,满足了全社会不断增长的畜产品需求,但与此同时畜禽粪污带来的环境污染已成为一个不容忽视的问题^[21]。为提高粪肥在农田中的利用率,本研究首次针对水稻开展了在等量无机氮肥施用的基础上增施粪肥的研究。研究采用盆栽试验,通过系统分析增施不同用量粪肥对水稻性状、产量、田面水氮素动态变化以及土壤理化性质等的影响,确定有机氮肥的最佳用量,筛选最适合水稻生产的粪肥施用量,从而最大限度地平衡粪肥消纳量、水稻产量和氮素流失风险三者之间的关系。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用土取自常规农田耕层土壤(0~20 cm),质地为褐潮土,土壤的基本理化性质:pH值8.4,容重 $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,有机质 $14.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $0.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $63.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $0.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $9.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾 $16.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $87.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。鲜土采集后置于阴凉处自然风干,人工挑去植物残体及石块等杂物,过2 mm网筛,混匀后备用。无机氮肥和有机氮肥分别为尿素(含N 46.0%)和风干牛粪(含N 1.5%、 K_2O 1.7%、 P_2O_5 0.8%);磷、钾肥分别为过磷酸钙(含 P_2O_5 16.0%)和氯化钾(含 K_2O 60.0%)。供试水稻品种为中作59。

1.2 试验设计

试验在网室中开展,采用随机区组的排列方式,共设置8个处理,每个处理3个重复。8个处理分别为:①CK;②N;③N+0.25M;④N+0.5M;⑤N+0.75M;⑥N+M;⑦N+1.5M;⑧N+2M。其中CK表示不施氮肥;N为单施尿素 $2.6 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$,折合纯氮为 $1.2 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ (即 $192.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),处于ZHANG等^[22]基于稻田环境影响推荐的氮素最优施用量范围($169 \sim 199 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);M为单施牛粪 $65.4 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$,折合纯氮为 $0.95 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ (即

153.4 kg·hm⁻²);0.25M、0.5M、0.75M、1.5M和2M分别为单施牛粪用量的0.25、0.5、0.75、1.5倍和2倍;所有处理施用等量的磷肥和钾肥(各处理中每种肥料的施用量如表1所示)。牛粪随磷肥与钾肥一起作为底肥一次性施入;尿素作为底肥和两次追肥分三次施入,施肥比例为2:1:1。试验用盆材质为PVC塑料,每盆装土7 kg。盆栽试验开始前(6月13日)将土壤和底肥混匀后一起装入盆中,并加水进行泡田处理。选取长势相对一致的水稻秧苗于6月14日在每盆中各移栽4株,移栽后保持盆中水面深度为5 cm左右,分别于分蘖前期(7月18日)和抽穗前期(8月11日)追施尿素,10月20日收获计产。

表1 不同处理肥料用量(g·盆⁻¹)
Table 1 Fertilizer application rates in different treatments(g·pot⁻¹)

处理 Treatment	无机N Inorganic N	粪肥N Manure N	总N Total N	化肥P ₂ O ₅ Chemical P ₂ O ₅	化肥K ₂ O Chemical K ₂ O
CK	0	0	0	1.3	0.6
N	1.2	0	1.2	1.3	0.6
N+0.25M	1.2	0.2	1.4	1.3	0.6
N+0.5M	1.2	0.4	1.6	1.3	0.6
N+0.75M	1.2	0.7	1.9	1.3	0.6
N+M	1.2	0.9	2.1	1.3	0.6
N+1.5M	1.2	1.4	2.6	1.3	0.6
N+2M	1.2	1.9	3.1	1.3	0.6

1.3 样品采集与测定

叶片叶绿素含量:在分蘖期和穗期,使用便携式叶绿素仪(SPAD-502,日本)每7 d测定一次水稻倒二叶(即7月20日—8月31日)和倒一叶(即8月17日—9月7日)的SPAD值,以SPAD值来表示叶片叶绿素的相对含量。测量时避开叶脉,在叶片的叶基、叶中、叶尖分别选取三个部位,依次重复测定3次,取所有数据的平均值作为该叶片的SPAD值。

田面水无机氮浓度:穗肥追施后,于施肥后的第1、5、9 d和17 d收集盆中田面水。样品采集时,在不扰动水面的条件下用100 mL注射器随机抽取3处盆中水样,混合后带回实验室,混合水样经定量滤纸过滤后,用流动分析仪(AA3,德国;下同)测定铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)浓度。

分蘖数、穗数和株高:在分蘖期和穗期结束后分别统计水稻分蘖数和穗数;在水稻收获前,使用直尺测量水稻株高。

干物质积累和吸氮量:水稻收获后,将水稻籽粒和秸秆于105℃下杀青30 min,75℃下烘干至恒质量后称质量测定水稻籽粒和秸秆产量;使用粉碎机将籽粒和秸秆粉碎,采用H₂SO₄-H₂O₂法消煮粉碎后的植株样品,在全自动凯氏定氮仪(KDY-9830,中国;下同)测定样品全氮含量。

土壤理化指标:水稻收获后,除去杂质并将盆中土壤混合,收集混匀后的土壤。一部分新鲜土壤过筛后,经0.1 mol·L⁻¹ CaCl₂溶液浸提后在流动分析仪上测定其NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量;剩余土壤自然风干,磨细过筛后用于其他指标的检测,其中,土壤经H₂SO₄-催化剂消解前后,均采用全自动凯氏定氮仪测定碱解氮和全氮含量;有效磷采用0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃溶液浸提-流动分析仪的方法测定;速效钾采用1 mol·L⁻¹ CH₃COONH₄溶液浸提-原子吸收仪(ZCA-100,中国)的方法测定;有机质通过H₂SO₄-K₂Cr₂O₇外加热法测定;土壤pH使用pH计(Mettler Toledo Delta 320,中国)测定,其水土比为5:1。

1.4 计算方法

氮素利用相关指标的计算参照魏静等^[10]提供的方法,具体如下:

秸秆(籽粒)吸氮量(N uptake, g·盆⁻¹)=秸秆(籽粒)干质量×秸秆(籽粒)全氮含量 (1)

氮素收获指数(N harvest index, %)=籽粒吸氮量/植株吸氮量×100 (2)

氮素利用率(N use efficiency, %)=(施氮肥处理作物吸氮量-不施氮肥处理作物吸氮量)/施氮量×100 (3)

氮肥贡献率(N contribution rate, %)=(施氮肥处理籽粒产量-不施氮肥处理籽粒产量)/施氮肥处理籽粒产量×100 (4)

土壤氮素依存率(Soil N dependence rate, %)=不施氮肥处理作物吸氮量/施氮肥处理作物吸氮量×100 (5)

氮肥农学效率(N agronomic efficiency, kg·kg⁻¹)=(施氮肥处理籽粒产量-不施氮肥处理籽粒产量)/施氮量 (6)

氮肥偏生产力(Partial factor productivity of N, kg·kg⁻¹)=施氮肥处理籽粒产量/施氮量 (7)

1.5 数据处理与分析

使用Excel 2010软件归纳和处理数据,采用SPSS 19.0软件LSD法对不同施肥处理进行单因素方差分析和差异显著性检验,用Origin 8.5软件做图。

2 结果与分析

2.1 水稻叶片 SPAD 值变化

施用氮肥使水稻叶片的 SPAD 值保持在相对较高的水平,从表 2 中可以看出,在 7 个监测时间内,CK 处理的水稻倒二叶 SPAD 值与其他处理始终存在显著性差异($P<0.05$)。施肥处理之间无明显差异,除 8 月 10 日外,其余时间点内增施粪肥并没有使水稻倒二叶的 SPAD 值产生显著变化。在 8 月 10 日,施氮处理中倒二叶 SPAD 值表现为 $N+0.25M>N>N+0.75M>N+0.5M>N+1.5M>N+2M$,其中 $N+0.25M$ 处理的叶片 SPAD 值最高,但与 N 处理差异未达到显著水平($P>0.05$),在其余施用氮肥的处理中,随着粪肥施用量的增加,倒二叶 SPAD 值整体上呈现出逐渐降低的趋势。表 3 主要展现了穗肥施用后水稻倒一叶 SPAD 值的变化情况,4 组监测数据显示,施用氮肥同样能够显著增加水稻倒一叶 SPAD 值($P<0.05$)。在 8 月 24 日,各粪肥施用量处理对水稻倒一叶 SPAD 值产生了不同的影响,除 $N+0.5M$ 处理 SPAD 值有所降低外,其余增施粪肥的处理叶片 SPAD 值均高于 N 处理,SPAD 数值相差最大的两个处理为 $N+0.5M$ 和 $N+1.5M$,差异达到了显著水平($P<0.05$)。在 8 月 31 日和 9 月 7 日,与只施用尿素的处理相比,增施粪肥能够提高这一时段水稻倒一叶的 SPAD 值。整体来看,粪肥的施用量越大,对叶片 SPAD 值的提升效果越明显。

2.2 田面水中 NH_4^+-N 与 NO_3^-N 浓度的动态变化

图 1 和图 2 分别为不同施肥处理在穗肥(尿素)追施后田面水中 NH_4^+-N 和 NO_3^-N 浓度的动态变化情况,显示了不同施肥处理在 4 个取样时间内 NH_4^+-N 和 NO_3^-N 平均浓度的比较结果。通过对比可以发现,追肥前期 NH_4^+-N 是田面水无机态氮存在的主要形式,

表 3 粪肥增施用量对水稻倒一叶 SPAD 值的影响

Table 3 Effects of manure application rates on SPAD value of rice flag leaf

处理 Treatment	08-17	08-24	08-31	09-07
CK	31.3±2.2b	31.0±2.2c	28.0±0.9c	26.3±1.2b
N	41.6±0.9a	40.0±1.1ab	39.0±0.7b	38.2±0.3a
N+0.25M	41.1±1.3a	40.6±1.3ab	39.6±1.2b	39.5±2.2a
N+0.5M	40.2±1.4a	39.3±1.0b	39.6±0.8b	39.7±1.3a
N+0.75M	40.2±2.0a	40.8±0.9ab	39.0±2.0b	39.2±2.4a
N+M	40.1±1.1a	40.6±1.7ab	40.1±1.6ab	40.4±1.2a
N+1.5M	40.3±1.7a	42.2±0.9a	42.0±0.5a	40.5±0.9a
N+2M	40.6±0.8a	42.0±1.3ab	40.8±0.7ab	40.9±1.1a

其浓度明显高于 NO_3^-N ,随着时间的推移 NO_3^-N 浓度逐渐升高,与 NH_4^+-N 的浓度差异明显缩小。增施粪肥对穗肥追施后田面水 NH_4^+-N 浓度的变化影响较大,从图 1 中可以看出,只施用尿素的 N 处理在穗肥追施后的第 1 天田面水中的 NH_4^+-N 浓度就达到 $1.49\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,为该处理在 4 个取样时间内的最高水平。而对于增施粪肥的处理来说,田面水中的 NH_4^+-N 浓度在穗肥追施后呈现先升高后下降的趋势,均在施肥后的第 5 天达到峰值,第 9 天后恢复到较低的水平。就 NH_4^+-N 的平均浓度而言, $N+0.5M$ 、 $N+M$ 、 $N+1.5M$ 和 $N+2M$ 处理较 N 处理分别增加 20.3%、12.1%、8.7% 和 15.7%,其中与 $N+0.5M$ 、 $N+2M$ 处理的差异达到了显著水平($P<0.05$);与 N 处理相比, $N+0.25M$ 和 $N+0.75M$ 处理的 NH_4^+-N 平均浓度分别降低了 0.8% 和 10.4%,但处理之间的差异并不显著。

从图 2 中可以看出,由于田面水中存在硝化反应,因此各处理田面水中的 NO_3^-N 浓度并没有在追施尿素后快速升高,其中增施粪肥的处理呈先增加后下降的趋势,均在施肥后第 9 天达到峰值。只施用尿素

表 2 粪肥增施用量对水稻倒二叶 SPAD 值的影响

Table 2 Effects of application rates of manure on SPAD value of rice top second leaf

处理 Treatment	07-20	07-27	08-03	08-10	08-17	08-24	08-31
CK	32.4±1.6b	32.6±2.0b	32.5±0.3b	34.5±0.8d	32.9±0.9b	31.1±2.6b	24.0±2.4b
N	42.9±1.3a	41.7±0.3a	37.6±0.8a	39.3±1.1ab	43.4±1.0a	41.9±0.7a	39.2±0.5a
N+0.25M	43.0±1.4a	40.7±1.1a	37.5±1.5a	40.8±0.7a	41.5±2.2a	42.4±1.4a	39.7±1.0a
N+0.5M	42.1±1.8a	41.3±1.0a	37.5±2.8a	38.3±0.4bc	41.2±1.7a	42.4±1.2a	39.6±1.9a
N+0.75M	43.1±1.5a	39.9±1.9a	37.2±0.9a	38.4±1.1bc	41.3±1.2a	41.6±0.9a	40.2±0.7a
N+M	43.3±0.6a	42.6±1.6a	36.8±0.6a	37.1±1.1c	41.5±1.4a	41.0±1.4a	40.5±0.9a
N+1.5M	41.8±1.3a	40.8±0.8a	36.3±1.9a	37.5±1.4bc	41.3±0.7a	41.8±1.5a	41.2±0.5a
N+2M	43.4±0.9a	40.8±2.1a	38.8±1.0a	36.6±0.7c	41.5±1.7a	40.5±0.8a	41.2±2.0a

注:同列数据中不同小写字母表示处理间在 $P<0.05$ 的水平下差异显著。下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level among treatments. The same below.

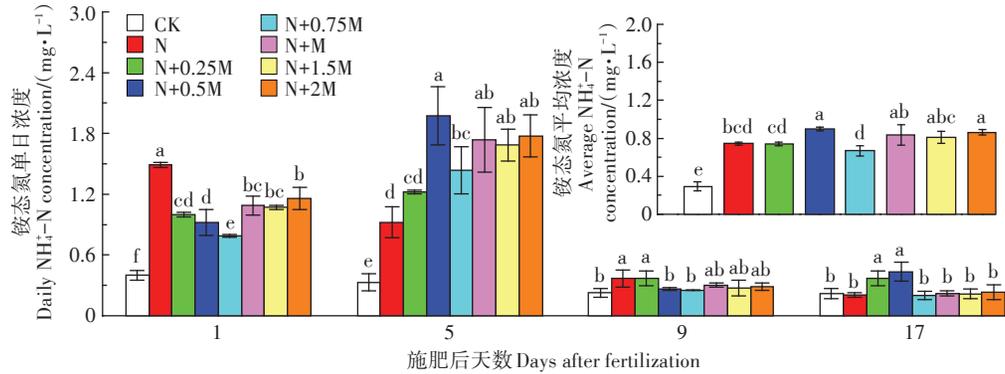


图1 粪肥增施量对穗肥追施后面水铵态氮单日浓度和平均浓度的影响
 Different lower cases in same group indicate significant difference at $P < 0.05$ level among treatments. The same below

Figure 1 Effects of application rates of manure on dynamic and average concentration of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ after application of panicle fertilizer

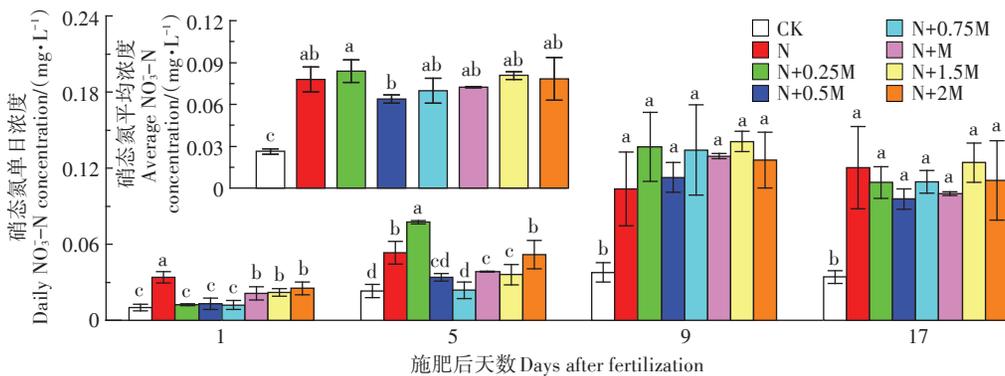


图2 粪肥增施量对穗肥追施后面水硝态氮单日浓度和平均浓度的影响

Figure 2 Effects of application rates of manure on dynamic and average concentration of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ after application of panicle fertilizer

的N处理中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度在4个取样时间内一直保持增加,最大值出现在第17天。施氮处理之间的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度差异主要出现在追肥前期,第1天的数据表明N处理中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度显著高于增施粪肥的处理,在第5天,其 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度依然相对较高,仅次于N+0.25M和N+2M处理,并且显著高于N+0.5M、N+0.75M、N+M和N+1.5M处理。另外, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 平均浓度的比较结果显示:N+0.5M、N+0.75M、N+M和N+2M处理小于N处理,其中N+0.5M处理较N处理下降18.0%。可见,适量增施粪肥可有效降低稻田面水中无机氮流失风险。

2.3 水稻性状、产量及氮素利用指标

与单施尿素N处理相比,增施粪肥后水稻的秸秆产量和籽粒产量均有所提高(表4),并且在N+0.25M、N+0.5M、N+0.75M和N+M处理中差异达到了显著水平($P < 0.05$),其中N+0.75M处理的水稻秸秆产量和籽粒产量达到最大,相比N处理分别提高36.2%和46.4%。随着粪肥施用量的增加,水稻穗数、分蘖数

和株高呈现出先升高后降低的趋势,在粪肥用量较低时,上述三项指标均高于N处理,水稻穗数、分蘖数在N+0.75M处理中达到最大值,较N处理分别显著提高12.1%和16.1%($P < 0.05$),株高则仅次于N+0.25M处理,当粪肥增施量继续增加时,水稻的穗数、分蘖数和株高开始下降,在N+1.5M和N+2M处理中甚至出现了全部低于处理N的情况。增施粪肥不同程度地增加了水稻秸秆和籽粒的吸氮量,但与穗数、分蘖数和株高相似,两者随着粪肥增施量的增加逐渐得到提高,在N+0.75M处理中均达到最大值,较N处理分别显著提高48.5%和56.3%($P < 0.05$),当粪肥增施量继续增加至0.75倍单位用量时,秸秆和籽粒的吸氮量开始逐渐下降,以上结果表明在等量尿素施用的基础上,过量增施粪肥不利于水稻生长。

由表5可知,增施少量的粪肥可以提高水稻对所施氮肥的利用能力,在N+0.25M、N+0.5M和N+0.75M三个处理中,水稻的氮素利用率、氮肥贡献率和氮肥

表4 粪肥增施量对水稻产量、农艺性状和氮素吸收量的影响

Table 4 Effects of application rates of manure on yield, agronomic character and nitrogen accumulation of rice

处理 Treatment	秸秆产量/(g·盆 ⁻¹) Straw yield/ (g·pot ⁻¹)	籽粒产量/(g·盆 ⁻¹) Grain yield/ (g·pot ⁻¹)	穗数 Spike number	分蘖数 Tiller number	株高 Plant height/cm	秸秆吸氮量/(g·盆 ⁻¹) Straw N uptake/ (g·pot ⁻¹)	籽粒吸氮量/(g·盆 ⁻¹) Grain N uptake/ (g·pot ⁻¹)	氮素收获指数 N harvest index/%
CK	12.7±1.5e	12.1±0.8e	9.7±0.6d	14.0±1.7d	80.4±1.6d	0.08±0.01e	0.12±0.02e	61.3±4.0a
N	38.4±1.2d	37.1±1.0d	22.3±0.6b	27.3±0.6bc	94.0±0.7ab	0.33±0.01d	0.48±0.02d	59.1±0.7ab
N+0.25M	46.1±1.5c	46.3±1.3b	23.7±0.6ab	29.3±1.2ab	95.2±0.9a	0.36±0.01cd	0.56±0.05c	61.0±1.5a
N+0.5M	49.5±1.9b	47.2±2.5b	23.3±1.5ab	31.3±1.2a	94.7±1.9a	0.41±0.02b	0.67±0.03b	61.9±2.1a
N+0.75M	52.3±0.8a	54.3±2.2a	25.0±1.0a	31.7±0.6a	94.7±0.6a	0.49±0.02a	0.75±0.03a	60.6±0.3a
N+M	44.9±1.6c	38.1±1.2cd	21.7±1.2bc	31.7±1.5a	93.3±1.9ab	0.37±0.03c	0.46±0.05d	55.2±2.3c
N+1.5M	38.6±2.1d	40.1±1.8c	19.7±1.5c	26.0±2.0c	88.4±1.9c	0.34±0.02cd	0.48±0.01d	58.2±1.5abc
N+2M	40.3±0.9d	37.8±1.3cd	19.7±1.5c	25.7±0.6c	91.5±1.8b	0.34±0.02cd	0.43±0.02d	55.6±0.2bc

农学效率均较N处理有所提高,土壤氮素依存率则有所下降,这表明土壤原有非肥料氮素所起的作用减弱,氮肥的肥效作用增强。当粪肥用量增加到1倍单位用量后,水稻的氮素利用率、氮肥农学效率和氮肥偏生产力下降明显,土壤氮素依存率也低于N处理,说明过多的粪肥投入反而削弱了水稻对氮素的利用能力,最终导致更多氮素的浪费。综合来看,N+0.75M处理下氮素利用效果最佳,其氮素利用率(54.3%)、氮肥贡献率(77.6%)在各处理中最高,土壤氮素依存率最低(16.0%),氮肥农学效率较N处理增加了5.8%。因此,适量增施粪肥有利于改善水稻的氮素利用效果。

2.4 土壤理化性质

投入氮肥能够显著提高土壤中有机的贮备量($P<0.05$),从图3a中可以看出,增施粪肥对土壤有机质含量的提高效果更明显,有机质含量在单施尿素的基础上进一步增加,较N处理增加了15.8%~45.4%,且差异均达到了显著水平($P<0.05$)。土壤全氮的结果与有机质类似(图3b),增施粪肥较单施尿素进一

步为土壤补充了氮素,且粪肥的施用量越大,作用效果越好,当施用量达到0.25倍单位用量时,水稻收获后土壤的氮素水平与不施氮肥相比有了显著提高。碱解氮随着粪肥施用量的增加同样呈现递增的趋势(图3c),N+1.5M和N+2M处理由于粪肥施用量较大,使土壤中碱解氮含量发生显著的变化,二者碱解氮含量较N处理分别增加10.2%和16.7%,而N+0.25M处理碱解氮含量则低于N处理,其余增施粪肥的处理与N处理含量水平相当。与单施尿素相比,增施不同量的粪肥均可增加土壤中有有效磷的含量,整体上施用粪肥处理的有效磷含量随着粪肥用量的增加呈递增趋势(图3d)。粪肥用量对水稻收获后土壤速效钾含量的影响规律不明显,但从图3e中可以看出,在不同的粪肥施用量下土壤速效钾含量均获得提高,其中N+0.5M、N+0.75M和N+2M处理与N处理差异显著,土壤速效钾含量分别增加11.0%、19.3%和16.4%。图3f所示为不同处理下土壤 NH_4^+-N 含量,与土壤有机质、土壤全氮和土壤碱解氮的结果类似,土壤 NH_4^+-N 含量与粪肥的施用量有显著的正相关关系,粪肥用量是造成增

表5 粪肥增施量对水稻氮素利用指标的影响

Table 5 Effects of application rates of manure on nitrogen use indexes of rice

处理 Treatment	氮素利用率 N use efficiency/%	氮肥贡献率 N contribution rate/%	土壤氮素依存率 Soil N dependence rate/%	氮肥农学效率 N agronomic efficiency/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥偏生产力 Partial factor productivity of N/ (kg·kg ⁻¹)
N	51.2±2.9a	67.2±0.9d	24.4±1.1a	20.8±0.8b	30.9±0.8a
N+0.25M	50.3±4.0a	73.8±0.7b	21.5±1.3b	23.7±0.9a	32.2±0.9a
N+0.5M	52.6±1.2a	74.2±1.4b	18.3±0.3c	20.9±1.5b	28.1±1.5b
N+0.75M	54.3±2.6a	77.6±0.9a	16.0±0.7d	22.0±1.2b	28.3±1.2b
N+M	29.1±3.2b	68.1±1.0cd	24.1±2.1a	12.0±0.6c	17.6±0.6c
N+1.5M	23.6±0.6c	69.7±1.4c	24.1±0.5a	10.6±0.7c	15.2±0.7d
N+2M	18.2±1.2d	67.8±1.1cd	25.9±1.3a	8.2±0.4d	12.1±0.4e

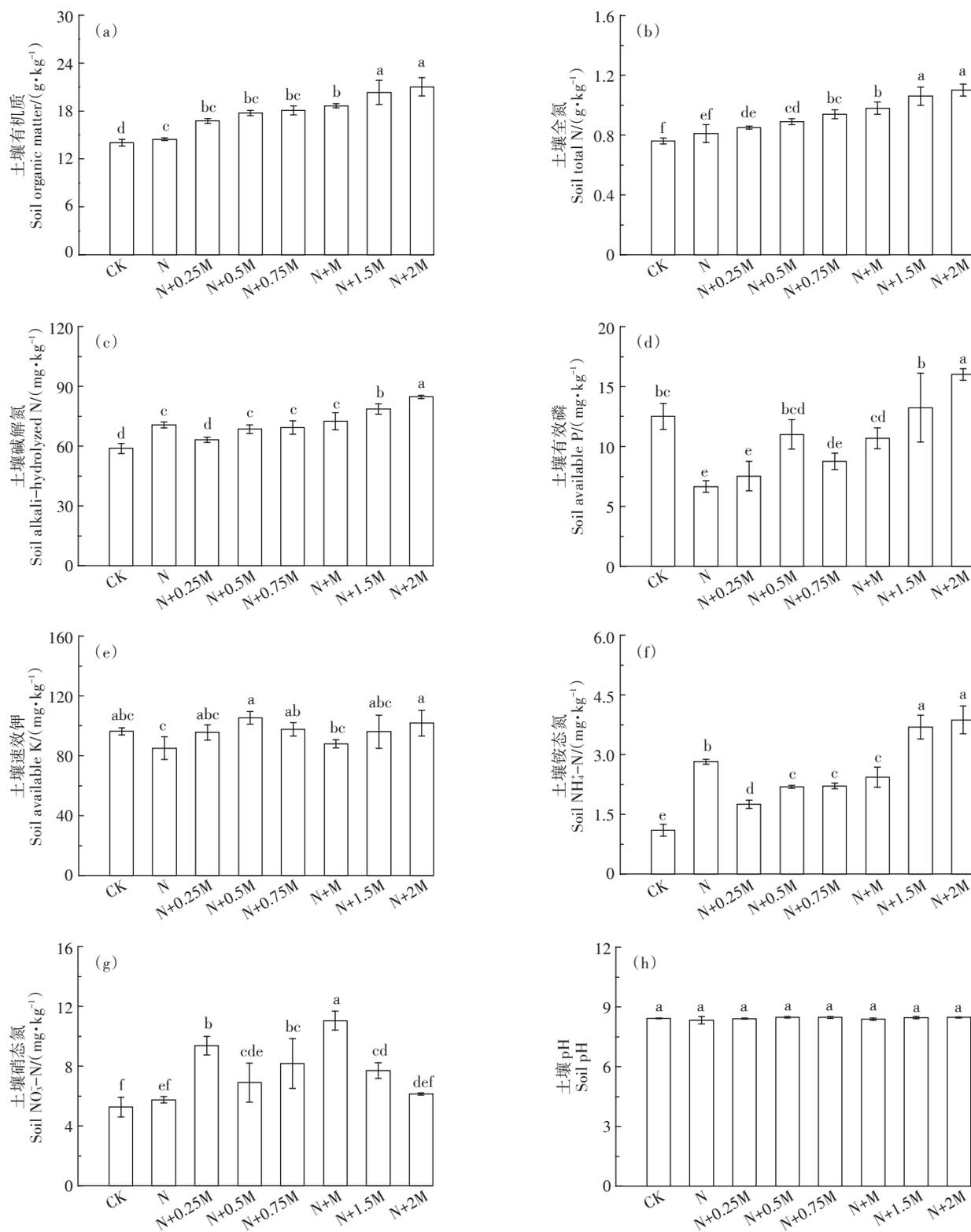


图3 粪肥增施量对水稻收获后部分土壤理化性质的影响

Figure 3 Effects of application rates of manure on some soil physicochemical properties after the harvest of rice

施粪肥处理和单施尿素处理之间差异的主要原因,当粪肥施用量小于或等于1倍单位施用量时,其 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著降低,粪肥施用量大于1倍单位施用量时,其

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著升高。与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 不同,在施用尿素的基础上增施粪肥可以使水稻收获后的土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量更高(图3g),但是增幅与粪肥施用量之间不存在明

显的规律。图3h表明在本研究中不同的氮肥组合类型对土壤pH没有产生实质性影响。

3 讨论

3.1 增施粪肥对水稻叶片SPAD值的影响

叶绿素是植物叶片光合作用能够顺利进行的关键物质,其含量可以反映植物的光合作用能力,并与植物的健康状况、养分供应水平及产量密切相关,SPAD值可以表征植物叶片叶绿素相对含量,由于其方便获取、精确度较高,现已成为评价植物长势的有效手段^[23]。在前人的研究中,叶片的SPAD值可以用来诊断水稻的氮素营养状况,能够间接地反映水稻的氮素供应水平^[24]。陈秋玉等^[25]发现在水稻整个生育期内叶片的SPAD值与茎、叶的含氮量存在极显著的正相关关系,并指出叶片的SPAD值可以用于指导氮肥的施用策略。一般来说,粪肥的矿化速率慢,氮素的释放时间长,能够使土壤在施肥中后期仍保持相对较高的氮素水平。在本研究中,在倒一叶(剑叶)长出之前增施粪肥降低了水稻倒二叶SPAD值,其中粪肥施用量较大的处理在穗肥追施前与单施尿素处理之间的差异显著($P<0.05$),反映出虽然粪肥施用量过高,但这一阶段水稻可利用氮素相对不足,可能会抑制处于营养生长阶段水稻体内的氮素积累。追施穗肥后,增施较多粪肥反而导致水稻倒一叶SPAD值增加(表3),说明水稻穗期以后土壤中植物可直接利用的氮素相对过剩,这一点也体现在水稻收获后对应处理中存在较高的碱解氮含量(图3c),从而导致水稻茎、叶中的氮素含量相对较高,水稻贪青晚熟,不利于生殖生长阶段氮素从茎、叶到籽粒的转移。

3.2 增施粪肥对田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度的影响

研究表明,田面水中氮素含量受到氮肥种类、施氮量、施用方式等多种因素的影响,稻田氮肥追施会使田面水中的氮素浓度急剧升高,而田面水中的氮素含量与通过稻田氨挥发和径流等途径造成的氮素损失直接相关^[26]。因此,控制施肥后田面水中的氮素浓度对降低稻田氮素流失风险具有重要意义。在以往的研究^[27-29]中,粪肥配合无机氮肥施用能够降低稻田田面水中的氮素浓度,但其施用方法多数是以粪肥替代部分无机氮肥(多为尿素),这与本研究在无机氮肥等量施用的基础上增施粪肥的试验方法不同。本研究从平均浓度的角度分析,发现增施粪肥的6个处理对田面水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 平均浓度的影响不一致,这与蔡佳佩等^[3]的研究类似,其在等量尿素基础

上增施不同量粪肥,发现其田面水中总氮和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度与施用纯尿素处理有所不同。本研究中, $\text{N}+0.75\text{M}$ 处理可以同时降低田面水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 平均浓度,是能够降低氮素流失风险的施肥模式。粪肥中氮素的释放依赖于微生物的分解作用,是一个缓慢的过程,其自身分解的同时也为异养微生物提供繁殖和生命活动所需要的能源物质。与单施无机氮肥相比,增施粪肥提高了土壤的碳氮比,增强了微生物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的利用能力,致使更多的有效氮素通过微生物的同化作用被短暂地储存到土壤有机氮库中,进而引发微生物和水稻在施肥初期对氮素的争夺,但是这些被储存的氮素可以被再次矿化转变成植物可吸收的有效氮,最终提高土壤氮矿化速率并增加植物对有效氮素的吸收^[30-31]。水稻收获后土壤有机质含量明显增加(图3a),说明粪肥中的有机物质在水稻整个生育期内还未被完全分解,在尿素追施的过程中,未被分解的粪肥导致土壤的碳氮比仍然较高,氮素相对不足,随着尿素施入对氮素的相对补充,肥料中的氮素率先被异养微生物分解利用,之后才逐渐使多余氮素释放出来。因此,在本研究中增施粪肥改变了尿素追施后田面水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的动态,表现出先增加后下降的趋势。

3.3 增施粪肥对水稻产量和氮素利用的影响

动物粪肥中同时含有矿物质氮和有机态氮,能够补充土壤有机质,改善土壤理化性质,提升稻田土壤肥力,促进水稻根系生长,增加水稻产量和氮累积量^[2,32]。在本研究中,增施牛粪粪肥提高了水稻的秸秆产量和籽粒产量,增幅分别为0.5%~36.2%和1.9%~46.4%,随着粪肥增施量的提高,秸秆产量和籽粒产量表现出先增加后下降的趋势,两者均在 $\text{N}+0.75\text{M}$ 处理达到最高值,这说明针对水稻增产能力来说,粪肥的施用量并不是越高越好,而是在施加剂量范围内存在一个最佳用量,这与已有的研究结果^[33]相一致。与秸秆产量和籽粒产量类似,当粪肥施用量增加到一定数值之后,水稻分蘖数、穗数、株高以及秸秆、籽粒的吸氮量开始下降,甚至会低于不施粪肥的处理。这主要是由于增施过量的粪肥造成微生物与作物争夺养分,使氮素释放滞后,导致水稻前期缺氮;施氮量较高加之粪肥施用造成的氮素延后释放,致使水稻的生殖生长阶段氮素会较多地向茎叶中转移并积累,导致水稻茎叶含氮量过高,贪青晚熟,不利于水稻生产^[33]。在本研究中,叶片SPAD值、追肥后田面水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的变化以及水稻的氮素收获指数也能

够体现这一问题。研究表明,粪肥可以替代部分化学肥料施用,提高水稻的氮素利用能力^[34-36]。在本研究中,增施少量粪肥对氮素利用起到了一定的促进作用,其中N+0.75M处理中水稻氮素的利用能力最佳,表现为氮素利用率、氮肥贡献率最高,土壤氮素依存率最低,氮肥农学效率也高于单施氮肥的处理;高用量粪肥的施入反而产生了消极的作用,氮肥中氮素对水稻产量和吸氮量的贡献比例下降,甚至低于单施尿素的处理,一方面是因为粪肥施用量过大不利于水稻的生长,另一方面则是由于粪肥施用量较大时水稻秸秆和籽粒的产量或吸氮量的提升幅度小于所施肥料中氮素的增加量。

3.4 增施粪肥对土壤理化性质的影响

研究表明,有机肥和无机肥配施可以改善土壤的养分状况,提高土壤的供肥能力^[37]。粪肥是一种常见的有机肥,具有调节土壤的功效,常用于土壤的培肥过程。在本研究中,增施粪肥对土壤各项理化指标的影响并不一致(图3)。韩上等^[38]认为土壤供肥强度受土壤速效养分的影响,供肥容量则取决于土壤的养分库容。在本研究中,粪肥增施既可以提高土壤的供肥强度(有效磷、速效钾和硝态氮)又可以增加土壤的供肥容量(有机质和全氮)。另外,从试验的结果也可以看出,碱解氮与铵态氮的含量随着粪肥增施量的增加而升高,最终超过单施尿素的处理,这种现象一方面表明土壤养分含量与粪肥增施量直接相关,另一方面也说明在水稻生长后期,粪肥用量过高导致土壤中有效态氮的含量维持在较高水平,不利于水稻茎叶向籽粒的氮素转移,再结合SPAD值和田面水无机态氮的结果,可为N+M、N+1.5M和N+2M处理最终较低的籽粒产量和吸氮量提供解释依据。

4 结论

(1)在不改变无机氮肥原有施用量和施用频率的前提下,增施牛粪粪肥提高了水稻秸秆和籽粒产量,并对土壤理化性质产生了积极的影响,其中有机质、全氮、碱解氮、有效磷和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量与粪肥施用量之间存在明显的相关关系。

(2)水稻叶片SPAD值、田面水氮素浓度的动态变化以及氮素利用效率的结果表明,在施用等量无机氮肥的前提下,粪肥配施量不宜过大。

(3)从水稻产量、氮素利用效率和环境影响等角度综合考虑,在施用 $192.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (以纯氮计)无机态

氮(尿素)的基础上配施 $115.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (以纯氮计)有机态氮(牛粪粪肥)为最优施肥方案,可以最大程度实现水稻增产和氮素利用效率提升,同时降低氮素流失风险。

参考文献:

- [1] RAHMAN M M, SHAN J, YANG P, et al. Effects of long-term pig manure application on antibiotics, abundance of antibiotic resistance genes (ARGs), anammox and denitrification rates in paddy soils[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 240: 368-377.
- [2] 刘红江, 陈虞雯, 孙国峰, 等. 有机肥-无机肥不同配施比例对水稻产量和农田养分流失的影响[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(2): 405-412. LIU J H, GHEN Y W, SUN G F, et al. Effects of different organic-inorganic fertilizer combination ratios on rice yield and nutrient loss with surface runoff[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(2): 405-412.
- [3] 蔡佳佩, 朱坚, 彭华, 等. 有机肥施用对田面水氮磷流失风险的影响[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(1): 210-217. CAI J P, ZHU J, PENG H, et al. Effects of organic fertilizer on the risk of nitrogen and phosphorus loss in soil surface water[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(1): 210-217.
- [4] ZHANG M, TIAN Y, ZHAO M, et al. The assessment of nitrate leaching in a rice-wheat rotation system using an improved agronomic practice aimed to increase rice crop yields[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2017, 241: 100-109.
- [5] DAI X L, SONG D L, ZHOU W, et al. Partial substitution of chemical nitrogen with organic nitrogen improves rice yield, soil biochemical indicators and microbial composition in a double rice cropping system in south China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2021, 205: 1-9.
- [6] ESFAHANI A A, NIKNEJAD Y, FALLAH H, et al. Integrated management of organic manures and chemical fertilizers for enhancing paddy yield and the nutrient content of rice cultivars[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2019, 50(1): 1-16.
- [7] GUO Z, ZHANG J, FAN J, et al. Does animal manure application improve soil aggregation? Insights from nine long-term fertilization experiments[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 1029-1037.
- [8] LAL R. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon[J]. *Advances in Agronomy*, 2001, 71: 145-191.
- [9] 赵冬, 颜廷梅, 乔俊, 等. 稻季田面水不同形态氮素变化及氮肥减量研究[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(4): 743-749. ZHAO D, YAN T M, QIAO J, et al. Change of different nitrogen forms in surface water of rice field and reduction of nitrogen fertilizer application in rice season[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(4): 743-749.
- [10] 魏静, 郭树芳, 翟丽梅, 等. 有机无机肥配施对水稻氮素利用率与氮流失风险的影响[J]. *土壤*, 2018, 50(5): 874-880. WEI J, GUO S F, ZHAI L M, et al. Effects of combined application of organic manure and different levels of chemical fertilizers on nitrogen use efficiency and nitrogen loss risk in rice growing system[J]. *Soils*, 2018, 50(5): 874-880.
- [11] 杨丹, 叶祝弘, 肖珣, 等. 化肥减量配施有机肥对早稻田温室气体

- 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2443-2450. YANG D, YE Z H, XIAO X, et al. Effects of chemical fertilizer reduction and organic fertilizer use on the greenhouse gas emissions of early rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11): 2443-2450.
- [12] 张雪丽, 董文怡, 刘勤, 等. 有机肥替代化肥氮对水稻田面水和土壤中氮素含量的影响[J]. 中国农业气象, 2018, 39(4): 256-266. ZHANG X L, DONG W Y, LIU Q, et al. Effects of organic fertilizer substituting chemical nitrogen fertilizer on nitrogen content in the surface water and soil of paddy field in the Erhai Lake basin[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2018, 39(4): 256-266.
- [13] 唐海明, 李超, 肖小平, 等. 有机肥氮投入比例对双季稻田根际土壤微生物生物量碳、氮和微生物熵的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1335-1343. TANG H M, LI C, XIAO X P, et al. Effects of different manure nitrogen input ratio on rhizosphere soil microbial biomass carbon, nitrogen and microbial quotient in double-cropping rice field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1335-1343.
- [14] LIANG X Q, YUAN J L, HE M M, et al. Modeling the fate of fertilizer N in paddy rice systems receiving manure and urea[J]. *Geoderma*, 2014, 228/229: 54-61.
- [15] CUI N X, CAI M, ZHANG X, et al. Runoff loss of nitrogen and phosphorus from a rice paddy field in the east of China: Effects of long-term chemical N fertilizer and organic manure applications[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22: 1-11.
- [16] LIANG X Q, YE S Y, JI J Y, et al. Nitrogen management to reduce yield-scaled global warming potential in rice[J]. *Field Crops Research*, 2013, 146(3): 66-74.
- [17] 张玉平, 刘强, 荣湘民, 等. 不同有机肥与化肥配施对稻田土壤微生物活性的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(6): 1434-1439. ZHANG Y P, LIU Q, RONG X M, et al. Effects of different combinations of organic and chemical fertilizers on soil microbial activity[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(6): 1434-1439.
- [18] 向秀媛, 刘强, 荣湘民, 等. 有机肥和无机肥配施对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2014, 40(1): 72-77. XIANG X Y, LIU Q, RONG X M, et al. Effects of different combined application of organic manures and inorganic fertilizer on yield and N use efficiency of double-rice[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2014, 40(1): 72-77.
- [19] 蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 等. 长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 810-819. LAN X J, LIU Y R, HOU H Q, et al. Effect of long-term organic manure application combined with chemical fertilizers on soil microbial biomass and organic matter structure in red paddy soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(5): 810-819.
- [20] 陈琨, 喻华, 上官宇先, 等. 有机无机肥配施对冬水田水稻产量和耕层土壤性质的影响[J]. 中国稻米, 2020, 26(2): 32-35, 40. CHEN K, YU H, SHANGGUAN Y X, et al. Impacts of organic-inorganic fertilizer application on yield of rice and soil properties in the waterlogged paddy field[J]. *China Rice*, 2020, 26(2): 32-35, 40.
- [21] 卢洪秀, 孙昭军. 畜禽粪便处理的可持续发展研究[J]. 农业灾害研究, 2012, 2(5): 40-43. LU H X, SUN Z J. Study on the sustainable development of animal manure treatment[J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2012, 2(5): 40-43.
- [22] ZHANG D, WANG H Y, PAN J T, et al. Nitrogen application rates need to be reduced for half of the rice paddy fields in China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2018, 265: 8-14.
- [23] 孙玉婷, 杨红云, 孙爱珍, 等. 水稻叶片SPAD值的高光谱估算模型[J]. 南方农业学报, 2020, 51(5): 1062-1069. SUN Y T, YANG H Y, SUN A Z, et al. Hyperspectral estimation model for SPAD value of rice leaves[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2020, 51(5): 1062-1069.
- [24] 俞敏祯, 余凯凯, 费聪, 等. 水稻冠层叶片SPAD数值变化特征及氮素营养诊断[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(5): 950-956. YU M Y, YU K K, FEI C, et al. Characteristics and diagnosis of nitrogen nutrition for rice canopy leaf SPAD value changes[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2019, 36(5): 950-956.
- [25] 陈秋玉, 黄影华, 张华杰, 等. 不同生育期水稻叶片SPAD值与氮素指标相关关系[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(17): 19-24, 27. CHEN Q Y, HUANG Y H, ZHANG H J, et al. Correlation between SPAD value and nitrogen indicators in rice leaves at different growth stages[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2020, 59(17): 19-24, 27.
- [26] 张子璐, 刘峰, 侯庭钰, 等. 我国稻田氮磷流失现状及影响因素研究进展[J]. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3292-3302. ZHANG Z L, LIU F, HOU T Y, et al. Current status of nitrogen and phosphorus losses and related factors in Chinese paddy fields: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(10): 3292-3302.
- [27] 唐丽, 谢勇, 荣湘民, 等. 有机肥不同比例替代化肥氮对水稻产量、氮素吸收与流失风险的影响[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(9): 132-142. TANG L, XIE Y, RONG X M, et al. Effects of different ratios of inorganic-N substituted by manure on rice yield, nitrogen absorption and nitrogen loss risk[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2020, 22(9): 132-142.
- [28] 叶鑫, 张鑫, 隋世江. 有机肥替代化肥氮对稻田田面水氮素浓度动态变化及产量的影响[J/OL]. (2020-09-03). 吉林农业大学学报, doi: 10.13327/j.jjlau.2020.5538. YE X, ZHANG X, SUI S J. Effect of organic fertilizer replacing chemical nitrogen on the dynamic of nitrogen concentration in ponding water and yield of paddy field[J/OL]. (2020-09-03). *Journal of Jilin Agricultural University*, doi: 10.13327/j.jjlau.2020.5538.
- [29] 李冬初, 李菊梅, 徐明岗, 等. 有机无机肥配施对红壤稻田氮素形态及水稻产量的影响[J]. 湖南农业科学, 2004(3): 23-25, 31. LI D C, LI J M, XU M G, et al. Effect of organic manure applied combining with inorganic fertilizer on nitrogen conformation and yield of rice in red soil paddy field[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2004(3): 23-25, 31.
- [30] LUXHΦI J, ELSGAARD L, THOMSEN I K, et al. Effects of long term annual inputs of straw and organic manure on plant N uptake and soil N fluxes[J]. *Soil Use & Management*, 2010, 23(4): 368-373.
- [31] EBRAHYI K N, PATHAK H, KALRA N, et al. Simulation of nitrogen dynamics in soil using info crop model[J]. *Environmental Monitoring*

- & Assessment, 2007, 131(1/2/3):451-465.
- [32] MYINT A K, YAMAKAWA T, ZENMYO T, et al. Effects of organic-manure application on growth, grain yield, and nitrogen, phosphorus, and potassium recoveries of rice, variety manawthukain paddy soils of differing fertility[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2011, 42(4):457-474.
- [33] SINGH D K, PANDEY P C, NANDA G, et al. Long-term effects of inorganic fertilizer and farmyard manure application on productivity, sustainability and profitability of rice-wheat system in Mollisols[J]. *Archives of Agronomy & Soil Science*, 2018, 65(2):139-151.
- [34] 鲁耀雄, 崔新卫, 范海珊, 等. 有机无机肥配施对湖南省晚稻生长、产量及土壤生物学特性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2015(5):50-55. LU Y X, CUI X W, FAN H S, et al. Effects of combined application of manure and chemical fertilizer on the growth and yield of rice and soil biological characters in paddy soils[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2015(5):50-55.
- [35] 李菊梅, 徐明岗, 秦道珠, 等. 有机肥无机肥配施对稻田氨挥发和水稻产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(1):51-56. LI J M, XU M G, QIN D Z, et al. Effects of chemical fertilizers application combined with manure on ammonia volatilization and rice yield in red paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(1):51-56.
- [36] NISHIKAWA T, LI K Z, INOUE H, et al. Effects of the long-term application of anaerobically-digested cattle manure on growth, yield and nitrogen uptake of paddy rice, and soil fertility in warmer region of Japan[J]. *Plant Production Science*, 2012, 15(4):284-292.
- [37] 查燕, 武雪萍, 张会民, 等. 长期有机无机配施黑土土壤有机碳对农田基础地力提升的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23):4649-4659. ZHA Y, WU X P, ZHANG H M, et al. Effects of long-term organic and inorganic fertilization on enhancing soil organic carbon and basic soil productivity in black soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23):4649-4659.
- [38] 韩上, 武际, 张祥明, 等. 增施有机肥对稻田亚耕层土壤的培肥效应[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, 35(4):334-341. HAN S, WU J, ZHANG X M, et al. Effects of increasing application of organic fertilizer on subsoil fertility betterment in paddy field[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(4):334-341.