

卢昕宇, 陈丹艳, 宁运旺, 等. 水肥耦合对稻田氨挥发及水稻产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(5): 1211-1219.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.05.007

水肥耦合对稻田氨挥发及水稻产量的影响

卢昕宇^{1,2}, 陈丹艳³, 宁运旺², 张 辉², 汪吉东², 冯渊圆², 邵孝候¹, 张永春²

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014; 3. 金陵科技学院园艺园林学院, 江苏 南京 210038)

摘要: 水分、施肥管理是减少稻田氨挥发损失的重要农业管理措施, 然而目前关于水肥耦合对于稻田氮素气态损失影响的研究还较少。本研究采用常规灌溉(W1: 干湿交替灌溉)、节水灌溉(W2: 全生育期湿润无明显水)与不同施氮量(N1: 常规施氮, 353.86 kg/hm²; N2: 减施 20% 氮肥, 283.09 kg/hm²) 相互耦合, 设 W1N1、W1N2、W2N1 和 W2N2 共 4 个处理, 通过盆栽试验对水稻不同生育期的氨挥发通量、土壤铵态氮含量以及水稻产量进行观测。结果表明, W1N1、W1N2、W2N1、W2N2 的氨挥发总量分别为 66.07 kg/hm²、47.70 kg/hm²、43.45 kg/hm²、34.42 kg/hm²。相同施氮量下, 节水灌溉可降低 27.84%~34.24% 的总氨挥发累积量, 其中在基肥施用后和分蘖肥施用后可分别降低 8.00%~61.40% 和 47.03%~76.82% 的稻田氨挥发。在节水灌溉条件下, 减施 20.00% 氮肥处理可减少 20.78% 的总氨挥发累积量。此外, W1N2、W2N2 处理的氨挥发累积量及单位产量氨挥发量表现出较低水平, 说明减氮耦合常规灌溉或者节水灌溉处理均可对稻田氨挥发起到很好的缓解作用。结构方程模型分析结果也表明, 氮肥施用量是直接影响稻田氨挥发量的重要因素, 从而间接影响水稻产量。但是, W2N1、W2N2 处理均存在引起水稻显著减产和籽粒含氮量降低的风险。综合考虑各处理对减少氨挥发损失和水稻稳产的影响, 本研究中干湿交替灌溉耦合减氮处理(W1N2)是一种较高效的稻田水肥管理方式。

关键词: 水分管理; 减氮; 水肥耦合; 氨挥发; 产量

中图分类号: S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)05-1211-09

Effects of water and fertilizer coupling on ammonia volatilization and rice yield in paddy fields

LU Xin-yu^{1,2}, CHEN Dan-yan³, NING Yun-wang², ZHANG Hui², WANG Ji-dong², FENG Yuan-yuan², SHAO Xiao-hou¹, ZHANG Yong-chun²

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. College of Horticulture, Jinling Institute of Technology, Nanjing 210038, China)

Abstract: Water and fertilizer managements are important agricultural management measures to reduce ammonia volatilization loss in paddy fields. However, there are few studies on the effects of water and fertilizer coupling on gaseous nitrogen loss in paddy fields. In this study, conventional irrigation (W1: dry-wet alternation) and water-saving irrigation (W2: wet and unseen water in the whole growth period) were coupled with different nitrogen application rates (N1: conventional nitrogen application, 353.86 kg/hm²; N2: nitrogen reduction by 20%, 283.09 kg/hm²). Four treatments (W1N1, W1N2, W2N1 and W2N2) were set up to observe the ammonia volatilization

收稿日期: 2021-12-01

基金项目: 江苏省科技计划重点研发(现代农业)项目(BE2019378); 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(20)2003]; 水稻生物学国家重点实验室开放课题(20210404); 金陵科技学院高层次人才科研启动项目(jit-b-201914)

作者简介: 卢昕宇(1996-), 女, 山西朔州人, 硕士研究生, 主要从事土壤改良与地力提升等研究。(E-mail) Xinyu_673028@163.com

通讯作者: 张永春, (E-mail) yczhang1966@sina.com

flux, soil ammonium nitrogen content and rice yield at different growth stages of rice by pot experiment. The results showed that the total ammonia volatilization of W1N1, W1N2, W2N1 and W2N2 was 66.07 kg/hm², 47.70 kg/hm², 43.45 kg/hm² and 34.42 kg/hm², respectively. Under the same nitrogen application rate, water-saving irrigation could reduce ammonia volatilization in paddy fields by 8.00%–61.40% and 47.03%–76.82% after the application of base fertilizer and tillering fertilizer, respectively, and reduce the total ammonia volatilization accumulation by 27.84%–34.24%. Under the condition of water-saving irrigation, the total ammonia volatilization accumulation could be reduced by 20.78% in N2 treatment. In addition, the accumulation of ammonia volatilization and ammonia volatilization per unit yield of W1N2 and W2N2 showed low levels, indicating that nitrogen reduction coupled with conventional irrigation or water-saving irrigation could alleviate ammonia volatilization in paddy fields. In addition, the results of structural equation model showed that the nitrogen application rate was an important factor that directly affecting the ammonia volatilization in paddy field, thus indirectly affecting the rice yield. However, W2N1 and W2N2 had the risk of reducing rice yield and grain nitrogen content. Considering the effects of various treatments on reducing ammonia volatilization loss and stable yield of rice, dry-wet alternate irrigation coupled with nitrogen reduction (W1N2) is a more efficient way of water and fertilizer management in paddy field.

Key words: water management; nitrogen reduction; water and fertilizer coupling; ammonia volatilization; yield

氨气是大气中大量存在的碱性气体,其挥发会造成大气环境污染,并且可能通过干湿沉降进入陆地生态系统,进而引发土壤酸化,造成水体富营养化^[1-2]。农田是农业源氨排放的重要场所。中国大部分农田,尤其是小规模稻田,施肥方式以撒施为主。大量撒施的氮肥较易损失^[3-5],作物的氮素利用率仅为30%~40%^[4],其余大部分氮素以氨气的形式直接挥发^[6-7]。有研究结果表明,以氨气形式挥发的氮素约占稻田总反应性氮素损失的10%~50%^[8-9],且多发生在施肥后7 d左右^[10]。此外,撒施很容易引起氮肥施用过量,当前氮肥过度施用量为10%~30%^[11]。氨减排是当前中国控制氮素污染的主要手段之一,通过进行合理的农业管理减少农业源活性氮的排放已越来越迫切。

水分、施肥管理是减少稻田氨挥发的重要农业管理措施。早在2015年,《农业部关于打好农业面源污染防治攻坚战实施意见》中明确指出“一控两减”——控制农业用水量、减少化肥和农药的使用量,同时制定的“到2020年化肥‘零增长’计划”^[12]等,均表明探究节水灌溉和减量施肥对稻田氨挥发以及水稻产量的影响具有实际意义。目前关于水分或施肥管理影响土壤氨挥发的研究较为广泛。例如,部分学者认为氨挥发对土壤水分的敏感性较高,增加土壤含水量可降低氨挥发^[13]。同时,也有研究结果表明水稻田面不积水可以有效减少氨挥发^[14]。此外,已有研究通过模型证明,氨挥发主要受氮肥投入总量的控制^[15]。通过改进施肥方案,全球农田氨气排放量可减少将近3/4^[16]。吕金岭

等^[17]研究发现,通过适度减少施氮量既可以减少土壤中的氮素残留,又能有效降低由氨挥发造成的气态损失。然而,目前与氨挥发相关的研究主要针对单一的水分因素或者单一的施肥因素,关于水肥耦合对稻田土壤氨挥发影响的研究较少,并且符合氨减排战略需求的合理节水减氮肥模式还未有报道。因此,本研究拟将常规灌溉(干湿交替)、节水灌溉(全生育期无明水)的水分管理方式,分别与常规施氮肥、减施20%氮肥的施肥处理相结合,并进行水稻全生育期的观测,探究不同水氮耦合对稻田氨挥发及水稻产量的影响,以期在稳产条件下减少水稻栽培中的氮素损失提供合适的水氮耦合模式。

1 材料与方法

1.1 土柱试验设计

盆栽土柱试验于2020年7–11月在江苏省农业科学院本部温室(118°52'E, 32°2'N)进行。试验盆体由PVC管制成,深度为0.5 m,直径为0.3 m。每个土柱内装有35 kg经过网筛筛选后的稻田土壤,其中20 kg土壤作为底土在土柱内压实,另外15 kg土壤与相应处理的肥料混匀填入土柱作为表土,之后灌水至试验设置的田间持水量。供试土壤取自江苏省农业科学院本部稻菜轮作田块,取土前该田块已空置两年,取土深度0~60 cm(118°52'E, 32°1'N)。土壤基本性质如下:pH值为7.52(土:水=1.0:2.5,质量比),全氮含量为0.96 mg/kg,有机质含量为14.58 g/kg,速效钾含量为92.00 mg/kg,有效磷含量为20.02 mg/kg,碱解氮含量为48.22 mg/kg。栽植的水稻品

种为南粳 46 号,水稻幼苗于 2020 年 7 月 4 日进行移栽并于 2020 年 11 月 21 日收获。

1.2 试验处理

试验共设置 4 个处理:(1)干湿交替灌溉+常规施氮(W1N1);(2)干湿交替灌溉+减施 20%氮肥(W1N2);(3)全生育期湿润无明水灌溉+常规施氮(W2N1);(4)全生育期湿润无明水灌溉+减施 20%氮肥(W2N2)。每个处理重复 3 次。具体的水肥管理措施见表 1。

干湿交替灌溉(W1)为移植到返青保持 3.0~3.5 cm 田面水,分蘖期保持 2.0~3.0 cm 田面水,当分蘖数达到计划分蘖数的 80% 时进行晒田。穗肥施用后的 7 d 内以及扬花期,均保持 3.0 cm 田面水;扬花后田面水自然落干至土壤表层湿润状态且维持 2~3 d 后再进行灌水,如此反复直至水稻黄熟期,收获前 10 d 断水。节水灌溉(W2)为全生育期稻田土壤表层保持湿润无明水状态,收获前 10 d 断水。水稻基肥、蘖肥和穗肥分别在 2020 年 7 月 4 日、2020 年 7 月 15 日和 2020 年 8 月 20 日以 4:3:3 的比例进行施用。氮肥处理分为 2 类,其中 N1 为常规施氮处理,即基肥施用 239.920 0 kg/hm² (1 盆 1.695 0 g)中颗粒尿素(46% N)、173.040 0 kg/hm² (1 盆 1.222 5 g)磷酸氢二胺(18% N,46% P₂O₅)、132.700 0 kg/hm² (1 盆 0.937 5 g)氯化钾(60% K₂O),蘖肥和穗肥分别施用 230.790 0 kg/hm² (1 盆 1.630 5 g)中颗粒尿素(46% N);N2 处理为减施 20%氮肥处理,基肥施用 178.560 0 kg/hm² (1 盆 1.261 5 g)中颗粒尿素(46% N)、173.040 0 kg/hm² (1 盆 1.222 5 g)磷酸氢二胺(18% N,46% P₂O₅)和 132.700 0 kg/hm² (1 盆 0.937 5 g)氯化钾(60% K₂O),蘖肥和穗肥则分别施用 184.500 0 kg/hm² (1 盆 1.303 5 g)中颗粒尿素(46% N)。

表 1 水肥管理策略

Table 1 Water and fertilizer management strategy

处理	水分管理方式	氮肥(N) (kg/hm ²)	钾肥(K ₂ O) (kg/hm ²)	磷肥(P ₂ O ₅) (kg/hm ²)
W1N1	干湿交替灌溉	353.86	79.62	79.60
W1N2	干湿交替灌溉	283.09	79.62	79.60
W2N1	节水灌溉	353.86	79.62	79.60
W2N2	节水灌溉	283.09	79.62	79.60

W1N1:干湿交替灌溉+常规施氮;W1N2:干湿交替灌溉+减施 20%氮肥;W2N1:节水灌溉+常规施氮;W2N2:节水灌溉+减施 20%氮肥。氮、磷、钾施加量根据肥料配比换算而得。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 氨挥发量 采用密闭室间歇抽气-硼酸吸收法测定氨挥发^[18],密闭室为半径 5 cm 的有机玻璃圆筒,顶部留有进气孔和采气孔,进气孔与 2 m 通气管连通,采气孔与真空泵相连。每次施肥后 7 d 内连续测定,采集时间为上午 08:00-10:00、下午 13:00-15:00。使用 0.02 mol/L 1/2H₂SO₄对洗瓶内定量装入的 80 ml 硼酸吸收液进行滴定确定 NH₃吸收量。NH₃的累积挥发量为观测期间日挥发量之和^[19]。氨挥发通量计算公式为:

$$F = V \times 10^{-3} \times C \times 0.014 \times \frac{10^4}{\pi \times r^2} \times 6$$

式中: F 为氨挥发通量[kg/(hm²·d)]; V 为测定所用硫酸的体积(ml); 10^{-3} 为体积转换系数; C 为滴定用硫酸的标定浓度(mol/L);0.014 为氮原子的相对原子质量(kg/mol); 10^4 为面积转换系数; r 为气室的半径(m);6 为 24 h 与日氨挥发收集时间 4 h 的比值。

1.3.2 土壤 NH₄⁺-N 含量 新鲜土样分别于基肥施用后第 8 d 以及蘖肥和穗肥施用后第 7 d 进行采集,并储存至 -20 ℃ 冰柜中冷冻保存。土壤 NH₄⁺-N 含量采用 KCl 浸提-靛酚蓝比色法测定^[20]。将新鲜土壤样品用 2 mol/L KCl 溶液以 1:10 (质量体积比)的比例浸提,使用流动分析仪(Skalar 公司产品)测试浸提液铵态氮浓度。

1.3.3 水稻产量 水稻成熟后,考察每个处理水稻总粒数、千粒质量,计算水稻产量。

$$Y = \frac{TG \times TSW \times 667 \times 15}{1\ 000 \times 1\ 000 \times 1\ 000 \times \pi \times r^2}$$

其中, Y 为单个处理水稻产量(t/hm²); TG 为单个处理稻谷总粒数(粒); TSW 为风干稻谷千粒质量(g); r 为土柱半径(m),统一规格 0.15 m;667 和 15 为面积转换系数,1 000 为质量转换系数。

1.3.4 籽粒含氮量 籽粒含氮量采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮蒸馏法测定^[20]。消煮所得液体定容后用凯氏定氮仪进行蒸馏定氮,使用 0.01 mol/L (1/2 H₂SO₄) 标准溶液滴定,计算含氮量。

1.4 数据处理与分析

所有数据采用 Excel 2010 整理,SPSS 20.0 进行 Pearson 分析和 Duncan's 多重比较,并对水分、氮肥进行单因素和双因素方差分析,显著性水平为 $P < 0.05$ 。采用 SPSS 20.0 软件进行统计学分析,同时,

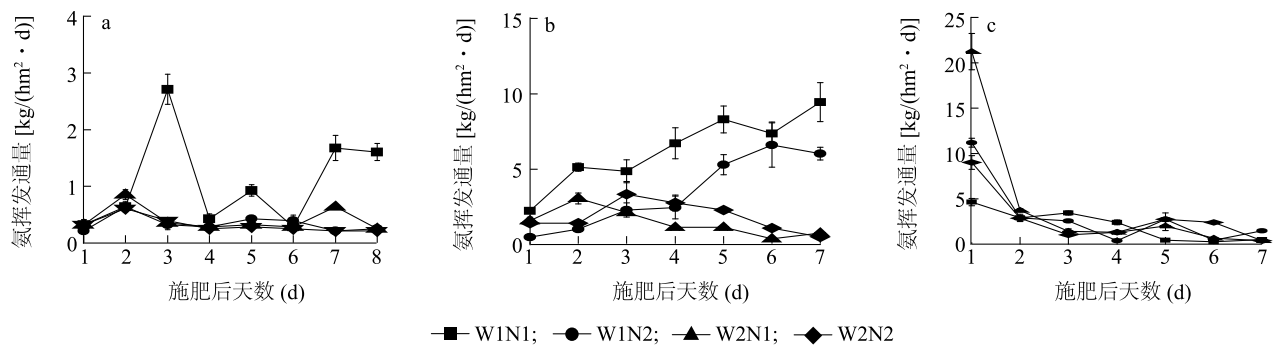
使用 Amos 24.0 软件进行结构方程模型分析。

2 结果与分析

2.1 不同水氮耦合处理对稻田氨挥发通量变化的影响

图 1 显示,各处理不同时期施肥后首日的稻田氨挥发通量均为穗肥施用后最大,基肥施用后最小。在基肥施用后,W1N1 处理的氨挥发通量在施肥后的第 3 d 达到峰值,为 2.71 [kg/(hm²·d)],然后波动变化,其余各处理均在施肥后的第 2 d 达到峰值。分蘖

肥施用后 W2N1、W2N2 处理的氨挥发通量在施肥后第 2~3 d 达到峰值,此后逐渐下降。W1N1、W1N2 处理的氨挥发通量整体呈现上升趋势。穗肥施用后,4 个处理的氨挥发通量在施肥后的第 1 d 为最高值,4 个峰值的大小表现为 W2N1 [20.81 kg/(hm²·d)] > W1N2 [10.97 kg/(hm²·d)] > W2N2 [8.83 kg/(hm²·d)] > W1N1 [4.55 kg/(hm²·d)],在穗肥施用后第 2 d 所有处理的氨挥发通量迅速下降,之后波动变化。W1N1、W2N1、W2N2 的氨挥发通量在穗肥施用后第 7 d 趋近于 0。



a:基肥;b:分蘖肥;c:穗肥。W1N1、W1N2、W2N1、W2N2 见表 1。

图 1 不同水氮耦合处理下各期肥料施用后稻田氨挥发通量变化

Fig.1 Changes of ammonia volatilization flux in paddy fields after fertilizer application in different stages under different water and nitrogen coupling treatments

2.2 不同水氮耦合处理对稻田氨挥发累积量的影响

表 2 显示,W1N1、W1N2 处理下,均以施用分蘖肥后氨挥发累积量最大,W2N1、W2N2 处理则以施用穗肥后氨挥发累积量最多,所有处理氨挥发累积量均在施用基肥后最少。在施用基肥后,W1N1 处理氨挥发累积量最高,为 8.60 kg/hm²,显著高于其他处理 ($P<0.05$),W2N2 处理氨挥发累积量最少,仅为 2.53 kg/hm²,但与 W1N2、W2N1 处理间差异不显著 ($P>0.05$)。在施用分蘖肥后,W1N1 处理下氨挥发累积量仍最高 (43.18 kg/hm²),显著高于其他处理 ($P<0.05$)。W2N1、W2N2 处理在施用分蘖肥后氨挥发累积量分别为 10.01 kg/hm² 和 12.56 kg/hm²,显著低于其他处理 ($P<0.05$)。在施用穗肥后则是 W2N1 处理氨挥发累积量最多,为 30.12 kg/hm²,分别为 W1N1、W1N2、W2N2 处理的 2.11 倍、1.42 倍和 1.56 倍。对于 3 次施肥后氨挥发总量来说,W1N1 处理氨挥发总累积量最多,为 66.07 kg/hm²。相比于 W1N1 处理,W1N2、W2N1、W2N2 处理的氨挥发总累积量分别显著降低 27.80%、

34.24% 和 47.90% ($P<0.05$)。

此外,通过方差分析发现,灌溉处理 (W) 对各次施肥后及总的氨挥发累积量影响极为显著 ($P<0.01$)。氮肥管理 (N) 显著影响基肥施用后、分蘖肥施用后以及 3 次施肥后总氨挥发累积量 ($P<0.05$)。水氮耦合处理 (W×N) 对各次施肥后氨挥发累积量及总氨挥发累积量呈现极显著的交互影响 ($P<0.01$)。

2.3 不同水氮耦合处理对单位产量稻田氨挥发的影响

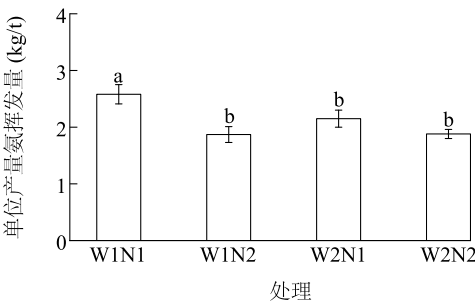
图 2 显示,W1N1 处理的单位产量氨挥发量最高,为 2.58 kg/t,W2N1 处理次之,W1N2 处理最低。同一灌溉处理下,N1 处理的单位产量氨挥发量均高于 N2 处理,其中 W1N1 处理显著高于 W1N2 处理 ($P<0.05$),W2N1 处理与 W2N2 处理间则差异不显著 ($P>0.05$)。N1 处理下,W2 处理的单位产量氨挥发量显著低于 W1 处理 ($P<0.05$);N2 处理下,W2N2 处理的单位产量氨挥发量高于 W1N2 处理,但差异不显著 ($P>0.05$)。

表 2 不同水氮耦合处理下氨挥发累积量 (kg/hm²)

Table 2 Accumulation of ammonia volatilization under different water-nitrogen coupling treatments (kg/hm²)

处理	氨挥发累积量 (kg/hm ²)			
	基肥施用后	分蘖肥施用后	穗肥施用后	总累积量
W1N1	8.60±0.66a	43.18±1.97a	14.29±0.64c	66.07±2.05a
W1N2	2.75±0.10b	23.71±3.35b	21.24±0.60b	47.70±3.47b
W2N1	3.32±0.15b	10.01±0.42c	30.12±2.70a	43.45±2.93b
W2N2	2.53±0.18b	12.56±1.01c	19.33±1.16b	34.42±1.23c

W1N1、W1N2、W2N1、W2N2 见表 1。同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。



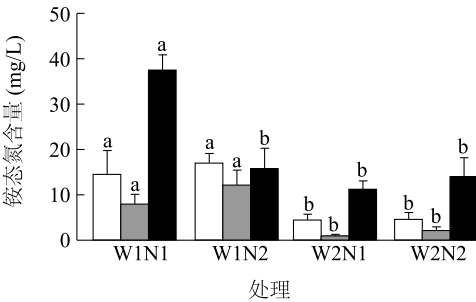
W1N1、W1N2、W2N1、W2N2 见表 1。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

图 2 不同水氮耦合处理下单位产量氨挥发量

Fig.2 Ammonia volatilization per unit yield under different water-nitrogen coupling treatments

2.4 不同水氮耦合处理下土壤铵态氮含量的动态变化

图 3 显示,在施用基肥、分蘖肥后,相同灌溉处理下不同施氮处理间土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量没有显著差异 ($P>0.05$)。N1 处理下,W1 处理土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著高于 W2 处理 ($P<0.05$)。在施用基肥和分蘖肥后,W1N2 处理的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最大,分别为 16.90 mg/L 和 12.12 mg/L,W2N1 处理的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最小,分别为 4.30 mg/L 和 0.88 mg/L。施用穗肥后 W1N1 处理的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量 (37.45 mg/L) 显著高于其他处理 ($P<0.05$),其他处理间差异不显著 ($P>0.05$),W2N1 处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最低,为 11.14 mg/L。W1N1、W2N1、W2N2 处理均以施用穗肥后土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最高,施用基肥后次之,施用分蘖肥后最低。值得注意的是,W1N2 处理在施用基肥后土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最高,施用分蘖肥后最低。方差分析结果表明,灌溉处理 (W) 极显著影响各次施肥后的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量 ($P<0.01$),氮肥管理 (N) 及水氮耦合处理 (W×N) 仅在施用穗肥后对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量呈现极显著的交互影响 ($P<0.01$),对其他施肥后土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量无显著影响 ($P>0.05$)。



□ 基肥施用后; ■ 分蘖肥施用后; ■ 穗肥施用后

W1N1、W1N2、W2N1、W2N2 见表 1。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

图 3 不同水氮耦合处理下土壤铵态氮含量

Fig.3 Soil ammonium nitrogen content under different water-nitrogen coupling treatments

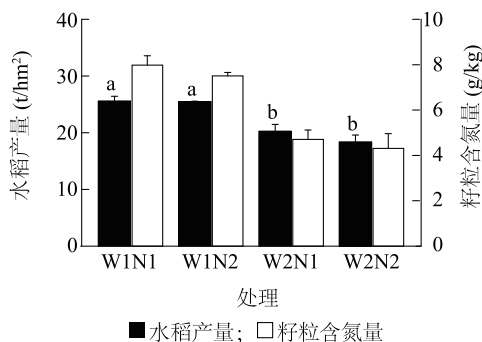
2.5 不同水氮耦合处理对水稻产量和籽粒含氮量的影响

结果 (图 4) 表明,各处理间的水稻产量大小关系为 W1N1 (25.56 t/hm²) > W1N2 (25.47 t/hm²) > W2N1 (20.25 t/hm²) > W2N2 (18.35 t/hm²)。W1N1 处理的籽粒含氮量最高,为 7.98 g/kg,W1N2 处理 (7.50 g/kg) 次之,均显著高于 W2N1 处理 (4.71 g/kg) 和 W2N2 处理 (4.31 g/kg) ($P<0.05$)。相同灌溉处理下,N1 处理的水稻产量和籽粒含氮量均高于 N2 处理,但两者间差异不显著 ($P>0.05$);相同施肥处理下,W1 处理的水稻产量和籽粒含氮量则显著高于 W2 处理 ($P<0.05$)。

2.6 不同水氮耦合处理对水稻生长性状的影响

表 3 显示,W1N1 处理的水稻每盆总粒数最多,W2N2 处理最少。相同水分处理下,N1 处理水稻每盆总粒数均高于 N2 处理,但处理间差异不显著 ($P>0.05$);相同施氮处理下,W1 处理水稻每盆总粒数均显著高于 W2 处理 ($P<0.05$)。各处理间的千粒质量大小关系为 W1N2 (33.13 g) > W1N1 (32.22 g) > W2N1 (30.95 g) > W2N2 (30.88 g),W1 处理的千粒质量显著高于 W2

处理。W1N2 处理的株高显著高于 W2N1 处理和 W2N2 处理($P<0.05$),与 W1N1 处理差异不显著($P>0.05$)。



W1N1、W1N2、W2N1、W2N2 见表 1。不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

图 4 不同水氮耦合处理的水稻产量和籽粒含氮量

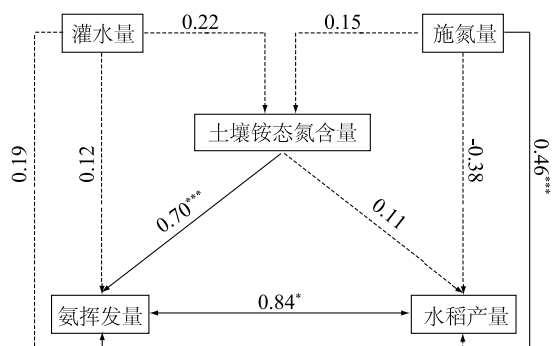
Fig.4 Rice yield and grain nitrogen content under different water and nitrogen coupling treatments

表 3 不同水氮耦合处理下水稻生长性状

Table 3 Growth characteristics of rice under different water and nitrogen coupling treatments

处理	单位面积穗数 (穗, 1 m ²)	每穗粒数 (粒)	千粒质量 (g)	每盆总粒数 (×10 ³ 粒)	株高 (m)
W1N1	543±11.66a	146±9.48a	32.22±0.38a	5.553±0.25a	1.13±0.03ab
W1N2	533±13.47a	144±4.81a	33.13±0.54a	5.381±0.09a	1.14±0.05a
W2N1	557±80.81a	119±11.57b	30.95±0.20b	4.579±0.30b	1.07±0.01b
W2N2	486±20.20a	123±12.07b	30.88±0.40b	4.159±0.29b	1.02±0.02b

W1N1、W1N2、W2N1、W2N2 见表 1。同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)



*** 和 * 分别表示影响极显著($P<0.001$)、显著($P<0.05$)。

图 5 灌水量和施氮量与各指标间的关联分析

Fig.5 Correlation analysis between irrigation amount, nitrogen application rate and each index

3 讨论

3.1 水氮耦合对稻田氨挥发的影响

本研究中节水、减氮及其互作处理在施用基肥

2.7 施氮量、灌水量与稻田氨挥发及水稻产量相关指标间的关联分析

为了研究水氮耦合处理对稻田氨挥发和水稻产量的影响,采用结构方程模型来分析灌水量以及施氮量与氨挥发量等多个响应因子之间的因果关系。图 5 显示,结构方程拟合效果良好[假设检验 p 值大于 0.05,拟合度指数(GFI)=1.00]。结果表明,灌水量与土壤铵态氮含量、氨挥发量、水稻产量均呈正相关,但相关性并不显著($P>0.05$);施氮量与土壤铵态氮含量呈正相关,与水稻产量呈负相关,与氨挥发量则呈极显著正相关($r=0.46, P<0.001$)。此外,土壤铵态氮含量与氨挥发量呈极显著正相关($r=0.70, P<0.001$),与水稻产量则呈正相关。氨挥发量与水稻产量呈显著正相关($r=0.84, P<0.05$)。

后和施用分蘖肥后均可显著减少稻田氨挥发。与常规水肥处理相比,节水、减氮及其互作处理在施用基肥后氨挥发通量日变化幅度较小且氨挥发通量偏低,累积量也低于常规处理。在施用分蘖肥后则是节水及节水减氮互作处理的氨挥发累积量显著低于常规处理和减氮处理。节水处理可以极大地降低氨挥发量,其原因可能是由于灌溉水多的时候,稻田水淹还原状态下氮素以铵态氮为主,而在水分较少情况下,则以硝态氮为主,也就是说此阶段节水处理可能降低了氨挥发,但是可能增加了硝化作用。与施用基肥后相比,施用分蘖肥后氨挥发通量日变化幅度整体增大,累积量也有所增加,但施用分蘖肥后各处理土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量低于施用基肥后。这可能是因为基肥拌入土中施用,氮素溶于土壤水后增加了土壤中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量,但转化为 NH_3 释放则需要一定时间。基肥的氮素经历吸收、转化和损失后,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量降低,蘖肥又采用土壤表面撒施氮肥

的方式,氮素溶于田面水后易转化为 NH_3 释放,致使此时土壤固持的氮素含量相对减少。因此,整体趋势体现为施用基肥后土壤氮挥发通量偏低,施用分蘖肥后氮挥发累积量较施用基肥后增多而土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量降低,这与张富林等^[21]和金树权等^[22]的研究结果一致。

在水稻生长后期,节水、减氮对于氮挥发的影响具有差异。结果表明,施用穗肥后各处理氮挥发通量均是在施肥后第 1 d 达到峰值,后迅速下降。同时,常规水氮处理(W1N1)的土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著高于其他 3 个处理。此时水稻正处于生长中后期,根系发达,具有较强的吸收性,对养分的需求量也更为明显,土壤中需储备大量 NH_4^+ 作为养分供植株直接吸收^[23],因此尿素撒施后可能以 NH_4^+ 形式大量被土壤胶体固定^[24]。在灌溉方式方面,常规的干湿交替灌溉处理(W1)下在施用穗肥后水稻土壤处于高田间持水量状态(有田面水),尿素施用后更容易被水解,气态损失相对较低。节水处理(W2)由于田间持水量的减少(田面无明水),尿素水解过程得以减缓,氮损失主要集中在后期^[25]。施氮量方面,常规处理(N1)施氮量更多,因此常规水肥处理在 4 个处理中施用穗肥后土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最高,氮挥发量则为最低。

此外,灌溉处理对各次施肥后土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的影响极为显著,说明水稻全生育期的灌溉处理对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的累积至关重要,且施用基肥后灌水对于土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的影响可能会持续至分蘖期。干湿交替灌溉(W1)条件下土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在施用基肥和分蘖肥后显著高于全生育期湿润无明水灌溉处理(W2),这可能主要与田面水有关。一方面,在上述 2 次施肥后对水稻进行适度的淹水处理有助于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在土壤环境中的固持。另一方面,非淹水状态下土壤表层可以保持良好的通气性,可能会促进土壤硝化反应的进行,降低土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量,这与魏永霞等^[26]的观点相同。

3.2 水氮耦合对水稻产量的影响

水氮耦合对水稻生长起到至关重要的作用,其中株高和分蘖是影响水稻株型和产量的核心要素。吴宗钊等^[27]的研究结果表明,氮肥水平对水稻株高的影响较大,株高随着施氮量的增大而增大。本研究结果表明,相同的干湿交替灌溉条件下,减施 20%氮肥处理的株高更高,但两者间差异不显著。

全生育期湿润无明水灌溉的 2 个处理中,则是常规施氮处理的株高高于减氮处理,两者差异也不显著。相同的施氮水平下,干湿交替灌溉处理的株高均高于全生育期无明水灌溉处理,其中常规施氮的 2 个处理间差异不显著,而减氮的 2 个处理间差异显著。朱文新等^[28]认为,随着灌水量的减少,水稻株高会显著降低,水分胁迫对水稻株高影响明显,但是各氮素处理之间差异不显著。本研究结果与前人研究结果不完全一致,且差别主要出现在处理间的差异是否显著方面,其原因可能是水氮互作机制不完全相同。刘路广等^[29]的研究结果表明,不同水肥处理下分蘖数差异主要由灌水差异引起,节水灌溉会降低水稻分蘖,施氮量减少也会在一定程度上影响水稻分蘖。而本研究结果表明,单一的节水(W2N1)处理下水稻分蘖有所增加,有效穗数随之升高,但是每穗粒数显著降低,从而导致减产。节水减氮互作(W2N2)处理下水稻减产则是由于有效穗数和每穗粒数同时减少导致的。说明水稻的分蘖数及有效穗数对不同水分处理的响应比较明显。杨丞等^[30]发现,在相同灌溉条件下,施氮量减少会致使水稻分蘖数降低,有效穗数随之降低,进而影响产量。本研究也得出与前人一致的结论。

灌水量和施氮量是影响地上部干物质积累以及有效穗数增加和结实期养分向籽粒转移的关键因子^[31-33]。徐一兰等^[34]研究发现,干湿交替灌溉可以在一定程度改善稻田土壤生态环境并提高水稻产量。杨晓龙等^[35]的研究结果表明,在水稻孕穗期若土壤缺水造成干旱胁迫,会抑制水稻颖花的发育、阻碍细胞的减数分裂,从而降低穗粒数和每穗实粒数,使结实率降低从而造成水稻减产。本研究结果表明,节水灌溉处理水稻产量以及籽粒含氮量均显著低于常规灌溉处理,说明在水稻孕穗过程中植株需水量大且气温高水分蒸发快,该种节水灌溉方式可能对水稻生长造成了一定的干旱胁迫,从而引发水稻减产。施用穗肥后,节水灌溉处理下氮素一方面以气态形式在施肥后第 1 d 大量损失,降低水稻对养分的吸收。结合每次施肥后氮挥发通量以及土壤铵态氮含量变化规律可知,在本研究中氮素的气态损失可能是造成节水灌溉处理下水稻产量及籽粒含氮量显著降低的主要因素。此外,我们发现在本试验条件下减氮处理对于水稻产量无显著影响,相较于 N1 处理,N2 处理施氮量减少,但是水稻产量并

无显著下降,说明减氮与稳产并不冲突,因此,水分管理可能是影响水稻产量和籽粒含氮量的主导因素。

4 结 论

与干湿交替灌溉相比,全生育期无明水湿润灌溉在基肥施用后和分蘖肥施用后可分别降低 8.00%~61.40% 和 47.03%~76.82% 的稻田氨挥发累积量,且可降低 27.84%~34.24% 的总氨挥发累积量。在节水灌溉条件下,减氮处理相对于常规施氮处理减少了 20.78% 的总氨挥发累积量。与干湿交替灌溉+常规施氮处理相比,节水灌溉+常规施氮处理和节水灌溉+减施 20% 氮肥处理分别使水稻产量减少 20.77% 和 28.21%,并且使籽粒含氮量降低 40.98% 和 45.99%。

氮肥施用量是决定稻田氨挥发量的直接影响因素,同时也是影响收获期水稻产量高低的间接因素。干湿交替灌溉作为施肥后保持淹水状态的常规水分处理,更有利于 NH_4^+ 积累,其土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 储备量更大,为水稻后期生长提供了更好的营养转化基础。但是同时需要考虑其是否增加了其他途径的氮损失。

从有效减少稻田氨挥发损失及保证水稻稳产等方面综合考虑,干湿交替耦合减氮处理(W1N2)是本研究较为高效的一种稻田水肥管理方式,但是这一减排稳产效果的持续性有待在未来的研究中进一步探索。

参考文献:

- [1] WANG H H, HEGAZY A M, JIANG X, et al. Suppression of ammonia volatilization from rice-wheat rotation fields amended with controlled-release urea and urea[J]. *Soil Fertility and Crop Nutrition*, 2016, 3:108.
- [2] HE Y P, ZHANG J Y, YANG S H, et al. Effect of controlled drainage on nitrogen losses from controlled irrigation paddy fields through subsurface drainage and ammonia volatilization after fertilization[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 221(20):231-237.
- [3] CHEN L, LIU X, HUA Z, et al. Comparison of nitrogen loss weight in ammonia volatilization, runoff, and leaching between common and slow-release fertilizer in paddy field[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2021, 232:132.
- [4] SONG C N, JIAO Y, YANG W Z, et al. Research progress on the influence of irrigation methods on ammonia volatilization in farmland[J]. *Earth and Environmental Science*, 2021, 647:12170.
- [5] 王磊,董树亭,刘鹏,等.水氮互作对冬小麦田氨挥发损失和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(6):1919-1927.
- [6] 肖其亮,朱坚,彭华,等.稻田氨挥发损失及减排技术研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(1):16-25.
- [7] RAHMAN N S, YUNUS R, ISHAK C F, et al. Laboratory evaluation on ammonia volatilization from coated urea fertilizers[J]. *Soil Science and Plant Analysis*, 2018, 49(6):717-724.
- [8] LIAN Z M, OUYANG W, LIU H B, et al. Ammonia volatilization modeling optimization for rice watersheds under climatic differences[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 767:144710.
- [9] 侯朋福,薛利祥,俞映惊,等.缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果[J]. *环境科学*, 2017, 38(12):5326-5332.
- [10] 蒋一飞,巴闯,王丹蕾,等.控释氮肥减量配施对土壤氨挥发和 N_2O 排放的影响[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(1):159-165.
- [11] XU J, LIU B, WANG H, et al. Ammonia volatilization and nitrogen leaching following top-dressing of urea from water-saving irrigated rice field: impact of two-split surge irrigation[J]. *Paddy and Water Environment*, 2019, 17: 45-51.
- [12] JIN S Q, ZHOU F. Zero growth of chemical fertilizer and pesticide use: China's objectives, progress and challenges[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2018, 9(S1):50-58.
- [13] 廖霞,刘德燕,陈增明,等.田间老化生物质炭对潮土氨挥发的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(6):1326-1336.
- [14] 陈振华,陈利军,武志杰,等.辽河下游平原不同水分条件下稻田氨挥发[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(12):2771-2776.
- [15] XU X R, OUYANG X, GU Y N, et al. Climate change may interact with nitrogen fertilizer management leading to different ammonia loss in China's croplands[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(24):6525-6535.
- [16] ZHAN X Y, ADALIBIEKE W, CUI X Q, et al. Improved estimates of ammonia emissions from global croplands. [J]. *Environmental Science and Technology*, 2021, 55(2): 1329-1338.
- [17] 吕金岭,王小非,骆晓声,等.减氮条件下砂壤质潮土区小麦-玉米轮作体系氨挥发特征及排放系数[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(2):346-359.
- [18] 周伟,田玉华,曹彦圣,等.两种氨挥发测定方法的比较研究[J]. *土壤学报*, 2011, 48(5):1090-1095.
- [19] 汪军,王德建,张刚,等.麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氨挥发特性比较[J]. *环境科学*, 2013, 34(1): 27-33.
- [20] 鲍士旦. *土壤农化分析* [M]. 3 版.北京:中国农业出版社, 2000.
- [21] 张富林,刘冬碧,范先鹏,等.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[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(5):858-866.
- [22] 金树权,陈若霞,汪峰,等.不同氮肥运筹模式对稻田田面水氮浓度和水稻产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(1): 242-248.

- [23] 俞巧钢,胡若兰,叶 静,等. 增效剂对稻田田面水氮素转化及水稻产量的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6):288-292.
- [24] 王晓琪,姚媛媛,陈宝成,等. 淹水条件硝态氮和铵态氮配施对水稻生长与土壤养分的影响[J]. 土壤, 2020, 52(2):254-261.
- [25] TIAN C, ZHOU X, DING Z, et al. Controlled-release N fertilizer to mitigate ammonia volatilization from double-cropping rice[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2021, 119(1):123-137.
- [26] 魏永霞,冀俊超,刘 慧,等. 水分管理对旱直播稻温室气体排放与土壤无机氮的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11):305-314.
- [27] 吴宗钊,原保忠. 水肥耦合对水稻生长、产量及氮素利用效率的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(4):199-207, 215.
- [28] 朱文新,孙继颖,高聚林,等. 深松和灌水次数对春玉米耗水特性及产量的影响[J]. 玉米科学, 2016, 24(5):75-82.
- [29] 刘路广,陈 扬,吴 瑕,等. 不同水肥综合调控模式下水稻生长特征、水肥利用率及氮磷流失规律[J]. 中国农村水利水电, 2020(12):67-72,76.
- [30] 杨 丞,汪 洋,张万洋,等. 灌溉模式与施氮量互作对水稻茎蘖产量形成的影响[J]. 中国水稻科学, 2021, 35(2):155-165.
- [31] 陈 曦,江贇伟,丁 洁,等. 生物炭施用对节水灌溉稻田土壤氮素含量及脲酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(19):268-274.
- [32] 王 煜,俞双恩,丁继辉,等. 基于熵权 TOPSIS 模型评价不同施氮水平下水稻灌排模式[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(7):720-725.
- [33] 邵士梅,马丙菊,常雨晴,等. 水氮互作对水稻产量形成的影响研究进展[J]. 中国稻米, 2019, 25(3):21-25.
- [34] 徐一兰,刘唐兴,付爱斌. 不同灌溉方式对双季稻植株生理特性和干物质积累及产量的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(5):106-115.
- [35] 杨晓龙,汪本福,李 阳,等. 干旱胁迫对水稻农艺特性和产量的影响综述[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(S1):39-43.

(责任编辑:蒋永忠)