

胡中泽, 衣政伟, 杨大柳, 等. 氮肥减施与花生秸秆还田对麦田土壤氮挥发、氮肥利用率及产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(6): 1492-1499.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.06.006

氮肥减施与花生秸秆还田对麦田土壤氮挥发、氮肥利用率及产量的影响

胡中泽¹, 衣政伟¹, 杨大柳¹, 王安¹, 陈留根², 张岳芳², 王显¹

(1. 江苏省农业科学院泰州农业科学研究所, 江苏 泰州 225300; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室, 江苏 南京 210014)

摘要: 氮肥减施与秸秆还田是现阶段广泛采用的农业措施,但其对农田环境和作物产量的综合影响尚不清楚。通过设置大田试验,研究2种花生秸秆还田方式(秸秆还田、不还田)和4种施氮水平[常规施氮(施氮量为240 kg/hm²)、氮肥减量20%(施氮量为192 kg/hm²)、氮肥减量40%(施氮量为144 kg/hm²)、不施氮肥]对麦田土壤中氮挥发损失、氮肥利用率以及产量的影响。结果表明,麦季主要是在施肥后2周内监测到明显的氮挥发现象,麦田土壤中氮挥发日通量的峰值均在施肥后的第2 d出现。在不同处理下,麦季氮总挥发量为10.77~29.79 kg/hm²;与常规施氮处理相比,氮肥减量20%处理使氮总挥发量降低23.60%~24.08%,氮肥减量40%处理使氮总挥发量降低43.24%~44.51%;秸秆还田对氮挥发影响不大。结果还表明,不同处理的氮肥利用率为29.07%~48.96%,与常规施氮处理相比,氮肥减量20%处理使氮肥利用率降低6.10%~13.73%,氮肥减量40%处理使氮肥利用率降低23.94%~24.20%;与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理使氮肥的平均利用率提高了6.23~10.61个百分点。不同处理的小麦产量为3.49~7.95 t/hm²,且小麦产量随着施氮量的减少而显著降低,但氮肥减量20%并配合秸秆还田处理的产量与秸秆不还田常规施氮量处理间的差异不大,与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理平均增产7.66%。由此可见,合理的氮肥用量及秸秆还田能够兼顾农田环境和作物产量,与秸秆不还田常规施氮处理(240 kg/hm²)相比,秸秆还田并配合麦季化学氮肥减量20%处理可以在获得小麦高产的同时提高氮肥利用率并减少麦田土壤中氮的挥发量。

关键词: 氮挥发; 氮肥利用率; 小麦; 产量; 氮肥减施; 秸秆还田

中图分类号: S512.106.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2022)06-1492-08

Effects of nitrogen reduction and peanut straw returning on ammonia volatilization, nitrogen use efficiency and grain yield in wheat field

HU Zhong-ze¹, YI Zheng-wei¹, YANG Da-liu¹, WANG An¹, CHEN Liu-gen², ZHANG Yue-fang², WANG Xian¹

(1. Taizhou Institute of Agricultural Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Taizhou 225300, China; 2. Key Lab of Agro-environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

收稿日期: 2022-02-21

基金项目: 泰州市科技支撑计划(农业)项目(YN202129); 国家重点研发计划项目(2016YFD0300206); 泰州市“凤城英才计划”青年科技人才托举工程资助培养项目

作者简介: 胡中泽(1987-), 男, 江苏兴化人, 硕士, 助理研究员, 从事大田作物研究等工作。(E-mail) huzhongze@126.com

通讯作者: 王显, (E-mail) 351993859@qq.com

Abstract: Nitrogen fertilizer reduction and straw returning are commonly used measures in crop production, but their comprehensive impact on the environment and yield is not clear. A field experiment was conducted in Taizhou, Jiangsu province, to study the effects of two pea-

nut straw returning methods (straw returning and no straw returning) and four nitrogen (N) application levels (conventional N application, 240 kg/hm²; N reduction by 20%, 192 kg/hm²; N reduction by 40%, 144 kg/hm² and no N application, 0 kg/hm²) on ammonia volatilization loss, nitrogen use efficiency and wheat yield. The results showed that in wheat season, obvious ammonia volatilization was detected within two weeks after fertilization, and the daily flux peak of ammonia volatilization appeared on the second day after fertilization. The total amount of ammonia volatilization loss in different treatments ranged from 10.77 kg/hm² to 29.79 kg/hm². Compared with conventional N application treatment, the total amount of ammonia volatilization reduced by 23.60%–24.08% under the treatment of N reduction by 20%, and decreased by 43.24%–44.51% under the treatment of N reduction by 40%. Straw incorporation had little effect on ammonia volatilization. The N use efficiency in different treatments ranged from 29.07% to 48.96%. Compared with the conventional N application treatment, the N use efficiency was reduced by 6.10%–13.73% and 23.94%–24.20% under the treatment of N reduction by 20% and the treatment of N reduction by 40%, respectively. The wheat yield under different treatments ranged from 3.49 t/hm² to 7.95 t/hm². On average, the straw incorporation treatments increased the N use efficiency by 6.23–10.61 percentage points compared with no straw incorporation treatments. Wheat yield decreased significantly with the decrease of N application rate, but there was little difference between the treatment of nitrogen reduction by 20% under straw incorporation and the treatment of conventional N application rate. Compared with no straw incorporation treatment, the wheat yield under straw incorporation treatments increased by 7.66% on average. It can be seen that reasonable amount of N fertilizer and straw incorporation can give consideration to crop yield and farmland environment. Compared with conventional N application (240 kg/hm²) treatment without straw returning, chemical N fertilizer reduction by 20% under straw incorporation can obtain high yield of wheat, improve N use efficiency and reduce ammonia volatilization in wheat field.

Key words: ammonia volatilization; nitrogen use efficiency; wheat; yield; nitrogen reduction; straw returning

小麦是长江下游经济发达区重要的粮食作物。氮肥的合理施用是保证小麦高产稳产的关键,但是过多地施用氮肥不仅难以实现小麦增产,还会降低氮肥利用率,甚至会带来一系列环境污染问题^[1-3]。氨挥发是氮肥损失的主要途径,对生态系统中的氮循环至关重要,可能通过改变地球的辐射收支对全球气候产生影响,另外,大气中的 NH₃ 通过干湿沉降回到地面水体中,也会造成水体富营养化等环境问题^[4-5]。

农田氨挥发除受气候条件、土壤特性影响外,还受到农艺措施(如氮肥运筹、秸秆还田等)的影响^[5-9]。山楠等^[7]研究发现,随着施氮量的减少,小麦季土壤中氨的总挥发量从 21.2 kg/hm² 减少到 4.4 kg/hm²,损失率从 7.9% 降低到 4.4%。吕金岭等^[8]通过优化施氮,将小麦季土壤中氨的挥发量从 12.0 kg/hm² 降低到 6.8 kg/hm²,氮肥利用率从 35.2% 提高到 48.3%。秸秆还田也可以减少土壤中氨的挥发量,俞巧钢等^[9]的研究结果表明,秸秆还田后的稻田土壤中氨的挥发量比单施化肥处理减少了 29.9%~54.7%。

秸秆还田可以培肥地力,增加土壤碳汇,有利于农业的可持续发展^[10]。有研究发现,花生秸秆还田能增加土壤中的氮素含量,降低后茬冬小麦施氮量,提高氮肥利用率^[11],花生秸秆还田使夏花生-冬小

麦系统的年产量提高了 5%~13%^[12],但是花生秸秆还田后对农田土壤中氨挥发的影响鲜见报道。本研究综合分析氮肥减施与花生秸秆还田对麦田土壤中氨挥发、氮肥利用率及小麦产量的影响,以期在确保小麦高产的前提下,减少麦田土壤中氨的挥发量,同时提高氮肥利用率,为小麦合理施肥和资源高效利用提供依据。

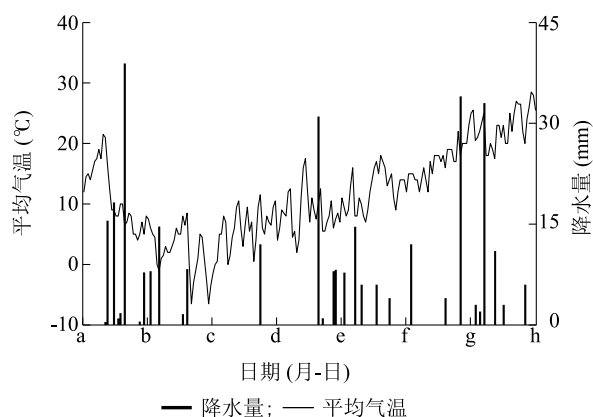
1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2020 年 11 月至 2021 年 6 月在江苏省农业科学院泰州农业科学研究所本部基地(119°59'38" E, 32°32'23" N)进行。该地区海拔 2 m,属亚热带季风性气候,年平均降水量 1 051 mm,年均气温 14.5 °C,年日照时长 2 235 h,无霜期 219 d。试验期间的天气情况见图 1。试验田土壤类型为沙壤土,土壤有机质含量为 18.3 g/kg,全氮含量为 1.1 g/kg,速效氮、速效磷、速效钾含量分别为 80.2 mg/kg、10.7 mg/kg、150.9 mg/kg,pH 值为 7.1。分别于 2020 年 11 月 16 日、2021 年 3 月 5 日施肥。

1.2 试验设计

采用双因素裂区试验,以花生秸秆还田为主区,设秸秆还田(3.0 t/hm²,碳氮比 26.97)和不还田 2 种



a: 11-10; b: 12-10; c: 01-09; d: 02-08; e: 03-10; f: 04-09; g: 05-09; h: 06-08。

图 1 试验期间的气温及降水量

Fig.1 Air temperature and precipitation during wheat season

方式;以氮肥用量为裂区,设常规施氮(240 kg/hm^2)、氮肥减量 20% (192 kg/hm^2)、氮肥减量 40% (144 kg/hm^2) 和不施氮肥 4 个施氮水平。共组成 8 个处理:秸秆不还田+常规施氮(N100)、秸秆不还田+减氮 20%(N80)、秸秆不还田+减氮 40%(N60)、秸秆不还田+不施氮肥(N0)、秸秆还田+常规施氮(SN100)、秸秆还田+减氮 20%(SN80)、秸秆还田+减氮 40%(SN60)、秸秆还田+不施氮肥(SN0)。小区面积 12 m^2 ,试验重复 3 次,共 24 个小区。供试冬小麦品种为弱筋宁麦 13 号,2020 年 11 月 15 日进行人工条播,行距 25 cm ,基本苗数为每公顷 3.00×10^6 株,2021 年 6 月 2 日收获。氮肥按基肥:拔节肥=6:4 施用,磷肥(P_2O_5 90 kg/hm^2)一次性基施,钾肥(K_2O 90 kg/hm^2)按基肥、拔节肥等量施用。基肥在播种当天施用,拔节肥在 2021 年 3 月 5 日施用。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 麦田土壤中氮挥发量的测定 本研究采用间歇密闭室抽气法^[13]收集麦田土壤中挥发的氨,装置购自中国科学院南京土壤研究所。麦季播种后,将 1 个连接 2 根乳胶管的圆柱形有机玻璃空气交换室(内径 25 cm 、高度 15 cm)嵌入表层土壤 $5 \sim 7 \text{ cm}$,其中 1 根乳胶管用于进气,连接 1 根高度为 2.5 m 的中空聚氯乙烯(PVC)管,另 1 根乳胶管用于收集挥发到空气交换室中的氨气,与装有 2% 硼酸吸收液的玻璃烧瓶相连。空气流量由真空泵、节流阀共同控制,确保交换室内 1 min 换气 $10 \sim 15$ 次。抽气时段为 08:00–10:00、14:00–16:00,取样完成后将样品带回实验室,用稀硫酸滴定并计算麦田土壤中

氮挥发的日通量。

1.3.2 籽粒产量及氮素含量的测定 小麦成熟后,各小区收获 1 m^2 籽粒,换算为含水量为 13% 的籽粒产量。在各小区选取一行连续取样 15 株,于 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 杀青 1 h 后,于 $75 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒质量。用凯氏定氮法测定全氮含量。

1.3.3 氨挥发和氮肥利用率的计算 氨挥发损失率、氨挥发排放系数、氨挥发排放强度、氮素收获指数和氮肥利用率的计算公式如下:

$$\text{氨挥发损失率} = \text{氨挥发排放总量} / \text{化学氮肥施用量} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{氨挥发排放系数} = (\text{施氮区的氨挥发量} - \text{不施氮区的氨挥发量}) / \text{施氮量} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{氨挥发排放强度} (\text{kg/t}) = \text{单位面积的氨总挥发量} / \text{单位面积小麦产量} \quad (3)$$

$$\text{氮素收获指数} = \text{籽粒氮素积累量} / \text{植株氮素积累量} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{氮肥利用率} = (\text{施氮区植株氮素积累量} - \text{不施氮区植株氮素积累量}) / \text{施氮量} \times 100\% \quad (5)$$

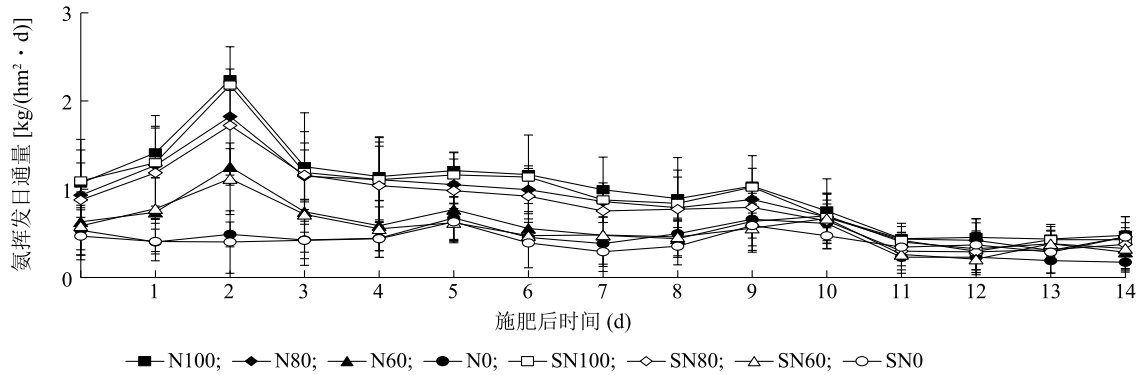
1.4 数据分析

用 Excel 2016 和 SPSS 18.0 进行数据处理、作图及统计分析。

2 结果与分析

2.1 氮肥减施与秸秆还田对麦田土壤中氮挥发的影响

2.1.1 麦田土壤中氮挥发的动态变化 由图 2 可以看出,除不施氮肥的 N0、SN0 处理外,其他处理的麦田土壤中氮挥发日通量的变化在施用基肥后较为相似,呈先上升后降低的趋势,日通量峰值均在施用基肥后的第 2 d 出现。在 N100、N80、N60、SN100、SN80、SN60 处理下,麦田土壤施用基肥后的氨挥发日通量峰值依次为 $2.24 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 、 $1.82 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 、 $1.25 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 、 $2.18 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 、 $1.72 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 、 $1.12 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$,SN100、N100 处理间的氨挥发日通量无明显差异,但均明显高于其他处理,减少施氮量会明显降低氨挥发日通量的峰值,秸秆还田处理对氨挥发日通量峰值的影响不大。麦田土壤中氮挥发的日通量在达到峰值后逐渐减少,施用基肥后,麦田土壤中的氨挥发主要发生在施肥后 2 周内。施用基肥后不同处理的麦田土壤中氮平均挥发日通量差异较大,整体表现为 $\text{N100} > \text{SN100} > \text{N80} > \text{SN80} > \text{N60} > \text{SN60} > \text{N0} > \text{SN0}$ 。



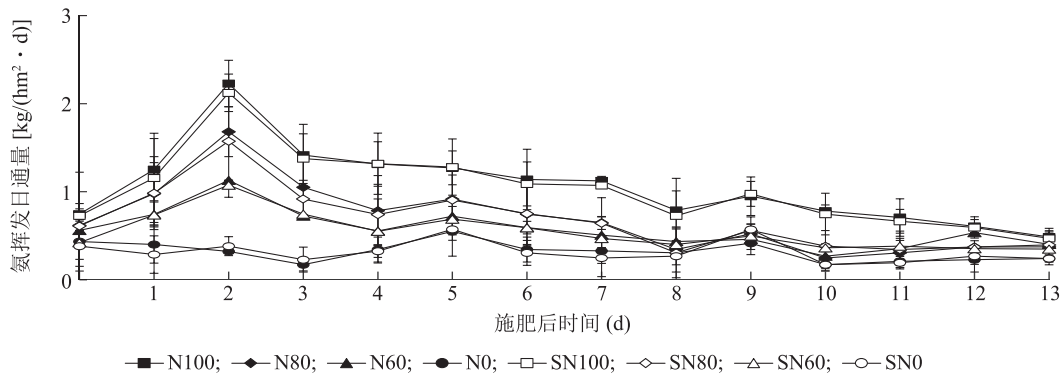
N0: 秸秆不还田不施氮肥; N60: 秸秆不还田减氮 40%; N80: 秸秆不还田减氮 20%; N100: 秸秆不还田常规施氮; SN0: 秸秆还田不施氮肥; SN60: 秸秆还田减氮 40%; SN80: 秸秆还田减氮 20%; SN100: 秸秆还田常规施氮。

图 2 施用基肥后麦田土壤中氨挥发日通量的变化

Fig.2 Changes of daily flux of ammonia volatilization in wheat field under different treatments after application of base fertilizer

由图 3 可知,施用拔节肥后土壤中氨挥发日通量的变化趋势与施用基肥后的变化趋势基本一致:在施肥当天较低,施肥后第 1 d 迅速上升,在施肥后第 2 d 就达到峰值。在相同秸秆还田方式、不同氮肥用量处理间,土壤中氨挥发日通量差异明显;在同一氮肥用量、不同秸秆还田方式处理间,土壤中氨挥发日通量差异不显著。在 N100、N80、N60、SN100、SN80、SN60

处理下,施用拔节肥后的麦田土壤中氨挥发日通量峰值依次为 2.23 kg/(hm²·d)、1.68 kg/(hm²·d)、1.13 kg/(hm²·d)、2.12 kg/(hm²·d)、1.57 kg/(hm²·d)、1.07 kg/(hm²·d)。在氨挥发日通量峰值过后,各处理土壤中的氨挥发日通量逐渐下降,施用拔节肥 13 d 后各处理间基本无差异。



N0: 秸秆不还田不施氮肥; N60: 秸秆不还田减氮 40%; N80: 秸秆不还田减氮 20%; N100: 秸秆不还田常规施氮; SN0: 秸秆还田不施氮肥; SN60: 秸秆还田减氮 40%; SN80: 秸秆还田减氮 20%; SN100: 秸秆还田常规施氮。

图 3 施用拔节肥后麦田土壤中氨挥发日通量的变化

Fig.3 Changes of daily flux of ammonia volatilization in wheat field under different treatments after application of jointing fertilizer

2.1.2 麦田土壤中氮的挥发量 由表 1 可知,各处理在基肥施用后的麦田土壤中氮的挥发量为 6.32~14.98 kg/hm²,拔节肥施用后的麦田土壤中氮的挥发量为 4.45~14.81 kg/hm²,氮肥减施均能减少每次施肥后的麦田土壤中氮的挥发量,除 SN100 处理的拔节肥施用后麦田土壤中氮的挥发量略高于基肥施用后外,拔节肥施用后其他处理的麦田土壤中氮的挥发量都低于基肥施用后。麦田土壤中氮的总挥发

量从大到小排序为 N100 处理 (29.79 kg/hm²)、SN100 处理 (28.49 kg/hm²)、N80 处理 (22.76 kg/hm²)、SN80 处理 (21.63 kg/hm²)、N60 处理 (16.91 kg/hm²)、SN60 处理 (15.81 kg/hm²)、N0 处理 (10.87 kg/hm²) 和 SN0 处理 (10.77 kg/hm²),可以看出,随着施氮量的减少,麦田土壤中氮的总挥发量显著降低。由表 2 的方差分析结果看出,氮肥对麦田土壤中氮的总挥发量有极显著影响,秸秆、秸秆

与氮肥的交互效应对麦田土壤中氨的总挥发量的影响不显著。与常规施氮处理(240 kg/hm²)相比,在秸秆不还田、还田 2 种条件下,氮肥减量 20% 分别使麦田土壤中氨的挥发量减少了 23.60%、24.08%,氮

肥减量 40% 分别使麦田土壤中氨的挥发量减少了 43.24%、44.51%。由此可见,减少氮肥施用量可以降低麦田土壤中氨的总挥发量,而秸秆还田对麦田土壤中氨挥发的影响不大。

表 1 氮肥减施与秸秆还田分别对施用基肥和拔节肥后麦田土壤中氨挥发量的影响

Table 1 Effects of nitrogen reduction and straw returning on ammonia volatilization in wheat field after application of base fertilizer and jointing fertilizer

处理	基肥施用后氨挥发量(kg/hm ²)	基肥施用后占氮排放总量的比例(%)	拔节肥施用后氨挥发量(kg/hm ²)	拔节肥施用后占氮排放总量的比例(%)	氨总挥发量(kg/hm ²)
N100	14.98a	50.29b	14.81a	49.71a	29.79a
N80	13.17bc	57.85a	9.59b	42.15a	22.76b
N60	8.92bc	52.77b	7.99bc	47.23a	16.91c
N0	6.39c	58.85a	4.47c	41.15a	10.87d
SN100	14.17ab	49.74b	14.32a	50.26a	28.49a
SN80	12.14ab	56.12a	9.49b	43.88a	21.63b
SN60	8.19bc	51.78b	7.63bc	48.22a	15.81c
SN0	6.32c	58.70a	4.45c	41.30a	10.77d

同列数据后标有不同字母者表示差异达 0.05 显著水平(最小显著性差异法)。N0: 秸秆不还田不施氮肥; N60: 秸秆不还田减氮 40%; N80: 秸秆不还田减氮 20%; N100: 秸秆不还田常规施氮; SN0: 秸秆还田不施氮肥; SN60: 秸秆还田减氮 40%; SN80: 秸秆还田减氮 20%; SN100: 秸秆还田常规施氮。

表 2 氮肥减施与秸秆还田对麦田土壤中氨挥发、产量和氮素利用率影响的方差分析结果

Table 2 Variance analysis of effects of nitrogen reduction and straw returning on ammonia volatilization, yield and nitrogen use efficiency in wheat field

变异来源	氨挥发总量	氨挥发损失率	氨挥发排放系数	氨挥发排放强度	小麦产量	植株氮素累积量	氮素收获指数	氮肥利用率
氮肥	**	*	**	**	**	**	*	**
秸秆	ns	*	*	*	**	**	**	**
氮肥×秸秆	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	ns

*、** 分别表示在 0.05、0.01 水平影响显著, ns 表示影响不显著。

2.1.3 氨挥发损失率、挥发排放系数及挥发排放强度 氮肥、秸秆对麦田土壤中氨挥发损失率、挥发排放系数及排放强度有显著或极显著影响, 氮肥与秸秆交互效应对麦田土壤中氨挥发损失率、挥发排放系数及挥发排放强度的影响不显著(表 2), 氮肥减施、秸秆还田均可降低麦田土壤中氨挥发损失率、挥发排放系数及挥发排放强度(表 3)。施氮处理的麦田土壤中氨挥发损失率为 10.98%~12.41%, 常规施氮处理(240 kg/hm²)与氮肥减量 20% 处理间的差异未达显著水平, 秸秆还田处理比秸秆不还田处理平均降低麦田土壤中氨挥发损失率达 0.63 个百分点。施氮处理的麦田土壤中氨挥发排放系数为 3.51%~7.89%, 随着施氮量的减少, 氨挥发排放系数显著降低, 与常规施氮处理(240 kg/hm²)相比, 氮

肥减量 20% 处理可使麦田土壤中氨挥发排放系数平均降低 1.72 个百分点, 氮肥减量 40% 处理可使麦田土壤中氨挥发排放系数平均降低 3.79 个百分点; 与秸秆不还田处理相比, 秸秆还田处理可使麦田土壤中氨挥发排放系数平均降低 0.57 个百分点。施氮处理的麦田土壤中氨挥发排放强度为 2.48~3.96 kg/t, 并且随着施氮量的减少, 麦田土壤中氨挥发排放强度显著降低, 与常规施氮处理(240 kg/hm²)相比, 氮肥减量 20% 处理使麦田土壤中氨挥发排放强度平均降低 0.64 kg/t(平均降幅 16.84%), 氮肥减量 40% 处理使麦田土壤中氨挥发排放强度平均降低 1.14 kg/t(平均降幅 30.24%); 与秸秆不还田处理相比, 秸秆还田处理使麦田土壤中氨挥发排放强度平均降低 0.33 kg/t(平均降幅 9.94%)。

表 3 氮肥减施与秸秆还田对麦季麦田土壤中氮挥发排放系数及排放强度的影响

Table 3 Effects of nitrogen reduction and straw returning on the emission factors and intensity of ammonia volatilization

处理	氮挥发损失率 (%)	氮挥发排放系数 (%)	氮挥发排放强度 (kg/t)
N100	12.41a	7.89a	3.96a
N80	11.85ab	6.19b	3.29bc
N60	11.74ab	4.20c	2.78d
N0			
SN100	11.87ab	7.39a	3.58ab
SN80	11.26bc	5.66b	2.98cd
SN60	10.98c	3.51d	2.48e
SN0			

同列数据后标有不同小写字母者表示差异达 0.05 显著水平 (最小显著性差异法)。N0: 秸秆不还田不施氮肥; N60: 秸秆不还田减氮 40%; N80: 秸秆不还田减氮 20%; N100: 秸秆不还田常规施氮; SN0: 秸秆还田不施氮肥; SN60: 秸秆还田减氮 40%; SN80: 秸秆还田减氮 20%; SN100: 秸秆还田常规施氮。

2.2 氮肥减施与秸秆还田对小麦产量及氮肥利用率的影响

由表 4 可以看出,不同处理下成熟期的小麦产量为3.49~7.95 t/hm²。在秸秆还田条件下,小麦产量较不还田条件下平均增加了 7.66%;在秸秆还田、不还田条件下,随着施氮量的减少,小麦产量均呈显著减少的趋势,SN100 处理的小麦产量 (7.95 t/hm²) 最高,显著高于 N100 处理 (7.52 t/hm²), N100 处理与 SN80 处理 (7.25 t/hm²) 间的差异不大。不同处理对小麦成熟期植株氮素累积量的影响大致与产量相同,总体上随着施氮量的减少,植株氮素累积量呈减少趋势。在相同施氮量条件下,与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理均显著提高了成熟期植株氮素累积量,秸秆还田处理的小麦氮素累积量平均提高 20.85%。方差分析结果表明,氮肥、秸秆及其交互效应对小麦产量和成熟期植株氮素累积量均有显著或极显著影响 (表 2)。由此可见,花生秸秆还田可以提高成熟期小麦植株氮素累积量和产量,较高的施氮量是获得小麦高产的关键,在氮肥减量 20%处理 (N80 处理) 下小麦显著减产,氮肥减量 20%配合秸秆还田能获得较高的小麦产量。

氮肥与秸秆处理对氮素收获指数和氮肥利用率均有显著或极显著影响 (表 2)。由表 4 可以看出,随着施氮量的减少,氮素收获指数有提高的趋势,与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理平均使氮素收

获指数提高 4.3 个百分点。在不同处理下,氮肥的利用率为29.07%~48.96%,随着施氮量的减少,氮肥利用率呈下降趋势,与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理可使氮肥利用率提高6.23~10.61 个百分点。由此可见,高的施氮量可以获得较高的氮肥利用率,但是减少了氮素在籽粒中分配量,而花生秸秆还田处理在提高氮肥利用率的同时也促进了氮素在籽粒中积累。

表 4 氮肥减施与秸秆还田对成熟期小麦产量和氮肥利用率的影响
Table 4 Effects of nitrogen reduction and straw returning on wheat yield and nitrogen use efficiency at maturity stage

处理	小麦产量 (t/hm ²)	植株氮素累积量 (kg/hm ²)	氮素收获指数 (%)	氮肥利用率 (%)
N100	7.52b	127.81b	78.90e	38.35c
N80	6.92c	104.89c	80.66de	36.01c
N60	6.08d	77.63d	81.15cde	29.07d
N0	3.49f	35.76f	82.39bc	—
SN100	7.95a	159.01a	82.93abc	48.96a
SN80	7.25bc	122.60b	86.13ab	42.24b
SN60	6.53d	95.14c	86.99a	37.24c
SN0	4.12e	41.51e	84.15abc	—

同列数据后标有不同小写字母者表示差异达 0.05 显著水平 (最小显著性差异法)。N0: 秸秆不还田不施氮肥; N60: 秸秆不还田减氮 40%; N80: 秸秆不还田减氮 20%; N100: 秸秆不还田常规施氮; SN0: 秸秆还田不施氮肥; SN60: 秸秆还田减氮 40%; SN80: 秸秆还田减氮 20%; SN100: 秸秆还田常规施氮。

3 讨论

3.1 氮肥减施与秸秆还田对麦田土壤中氮挥发的影响

本研究结果显示,麦季麦田土壤中氮的总挥发量为10.77~29.79 kg/hm²,高于刘红梅等^[14]在天津西青的监测结果 (5.35~8.92 kg/hm²)、山楠等^[7]在北京房山的监测结果 (3.01~21.20 kg/hm²)、邓美华等^[15]在江苏常熟的监测结果 (0.80~19.86 kg/hm²) 以及王秀斌等^[16]在河北衡水的监测结果 (8.01~24.92 kg/hm²),明显低于郑凤霞等^[17]在山东泰安得到的最高 52.84 kg/hm²的监测结果。氮挥发量不同的原因可能是土壤类型、施氮水平及类型等不同,另外,试验期间田间气象条件也是重要的影响因素,如郑凤霞等^[17]测得,同一处理在不同年份麦季氮挥发量最大相差 19.69 kg/hm²。本研究结果显示,与花生秸秆不还田处理相比,花生秸秆还田处

理的氮总挥发量减少了 0.10~1.30 kg/hm²,同一施氮条件下,与秸秆不还田处理相比,秸秆还田处理的氮挥发减排量有增加趋势,但差异未达显著水平,说明秸秆还田不是影响氮挥发的主要因素,这与吕宏菲等^[18]的研究结果一致。本研究结果再次证明,氮肥施用量是影响氮挥发的重要因素^[4-5]。与常规施氮处理(240 kg/hm²)相比,减少 20% 氮肥用量可以降低 6.86~7.03 kg/hm² 氮总挥发量,减少 40% 氮肥用量可以降低 12.68~12.88 kg/hm² 氮总挥发量。降低施氮量可有效减少麦田土壤中的氮挥发量,相应的氮挥发损失率、氮挥发排放系数和氮挥发排放强度亦呈降低趋势,这与前人的结论^[8,14-17]基本一致。在本研究中,除 SN100 处理的拔节肥施用后氮挥发量略高于基肥施用后外,其他处理的拔节肥施用后氮挥发量都低于基肥施用后,可能与前期施氮量多及前茬收获后残留在土壤中的氮素有关。从整个麦季来看,施肥处理主要是在施肥后 2 周内监测到有明显的氮挥发发现象,并且每次均在施肥后第 2 d 出现氮挥发日通量峰值,这可能与本研究所用土壤的性质及试验期间的降雨有关。本研究中的土壤类型为沙壤土,黏粒含量较低,吸附土壤中铵根离子的能力较弱,另外,施肥前后均有明显降雨过程,土壤含水量相对较高,有利于尿素类氮肥吸水后快速水解成铵态氮,这 2 个因素的叠加可能提升施肥后的氮挥发强度。由此可见,降低每次施肥后的氮挥发量,对于小麦全生育期氮的挥发减排具有重要意义,从已有的研究结果来看,氮肥深施和施用缓释肥均能有效减少小麦不同生育时期的氮挥发量^[19-20]。

3.2 氮肥减施与秸秆还田对小麦产量和氮肥利用率的影响

增施氮肥能促进作物生长发育并获得高产,但过量施肥会影响作物的高产稳产^[21-26],并对环境带来一系列负面影响,因此,农田化肥减量化施用技术已经成为当前的研究热点^[2-3]。本研究中,随着施氮量的减少,小麦产量显著降低,说明当前小麦生产中较高的施氮量是获得高产的关键,这和之前的研究结论^[27]一致。本研究中氮肥减量 20% 并配合秸秆还田能获得与常规施氮量秸秆不还田相当的小麦产量,说明将化学氮肥直接减量的单一措施会导致产量明显下降,必须配合其他措施方可保证小麦产量的稳定。秸秆还田可为农田土壤提供氮、磷、钾等养分,为作物高产稳产创造条件,因此在大多数长期试

验中秸秆还田均有良好的增产表现^[28],但是在短期试验中秸秆还田对产量的影响不确定,这可能是由于新鲜秸秆具有较高的碳氮比,其在腐解过程中对土壤和肥料氮起到短期固定作用^[29],以及腐解释放的植物毒素(如有机酸和还原物质)影响到作物前期的生长^[30]。在本研究中,还田的花生秸秆碳氮比较低(*C/N* 为 26.97),且还田量不大(3.0 t/hm²),可能对前期小麦生长的负面作用较小,花生秸秆还田最终使小麦产量平均增加 7.66%,这与 Zhang 等^[12]在华北平原对花生-冬小麦轮作系统的研究结果一致。本试验中,在施氮量为 144~240 kg/hm² 的条件下,不同处理的氮肥利用率为 29.07%~48.96%,随着施氮量的减少,氮肥利用率呈下降趋势。刘红江等^[27]、张铭等^[31]分别对 210~300 kg/hm²、135~405 kg/hm² 施氮量下小麦氮肥利用率的研究发现,随施氮量的增加,氮肥利用率呈先增后减的趋势,说明适量增施氮肥有利于提高小麦氮肥利用率。本研究结果还显示,花生秸秆还田处理平均比秸秆不还田处理使氮肥利用率提高 6.23~10.61 个百分点,可能是花生秸秆还田明显提高了小麦氮素累积能力以及提高了氮素在籽粒中的分配比例,也可能是小麦植株吸收利用了花生秸秆腐解后的氮素,提高了成熟期植株氮素累积量,进而提高了氮肥利用率,其机制有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 张福锁,崔振岭,王激清,等.中国土壤和植物养分管理现状与改进策略[J].植物学通报,2007,24(6):687-694.
- [2] 季诗域,王旭东,石思博,等.稻秆还田与化肥配施对稻茬麦田土壤肥力和小麦产量的影响[J].江苏农业学报,2020,36(5):1181-1188.
- [3] 毛伟,曾洪玉,李文西,等.不同土壤肥力下有机氮部分替代化学氮对小麦产量构成及土壤养分的影响[J].江苏农业学报,2020,36(5):1189-1196.
- [4] TI C P, XIA L L, CHANG S X, et al. Potential for mitigating global agricultural ammonia emission: a meta-analysis[J]. Environmental Pollution, 2019, 245:141-148.
- [5] 卢丽丽,吴根义.农田氨排放影响因素研究进展[J].中国农业大学学报,2019,24(1):149-162.
- [6] 胡中泽,衣政伟,王安,等.紫云英不同时期还田部分替代化肥对氨挥发及水稻产量的影响[J].江苏农业学报,2021,37(5):1160-1166.
- [7] 山楠,赵同科,毕晓庆,等.不同施氮水平下小麦田氨挥发规律研究[J].农业环境科学学报,2014,33(9):1858-1865.
- [8] 吕金岭,王小非,李太魁.不同施肥方式下砂姜黑土冬小麦-夏

- 玉米轮作农田氮挥发特征及排放系数[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(12): 1869-1879.
- [9] 俞巧钢,叶 静,符建荣,等. 不同有机物料还田对稻田氮挥发和水稻产量的影响[J]. 浙江农业科学, 2011(4): 908-909, 913.
- [10] 赵 懿,杜建军,张振华,等. 秸秆还田方式对土壤有机质积累与转化影响的研究进展[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(6): 1614-1622.
- [11] 张 凯. 华北平原禾豆复种水氮利用与氮转移研究——以小麦-花生复种为例[D]. 北京:中国农业大学, 2017.
- [12] ZHANG K, WANG X Q, LI Y Y, et al. Peanut residue incorporation benefits crop yield, nitrogen yield, and water use efficiency of summer peanut-winter wheat systems[J]. Field Crops Research, 2022, 279: 108463.
- [13] ZHAO X, ZHOU Y, WANG S Q, et al. Nitrogen balance in a highly fertilized rice-wheat double-cropping system in southern China[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76: 1068-1078.
- [14] 刘红梅,庞凤梅,赖 欣,等. 供氮水平和有机无机配施对麦田土壤氮挥发的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(12): 7119-7122, 7249.
- [15] 邓美华,尹 斌,张绍林,等. 不同施氮量和施氮方式对稻田氮挥发损失的影响[J]. 土壤, 2006, 38(3): 263-269.
- [16] 王秀斌,周 卫,梁国庆,等. 优化施肥条件下华北冬小麦/夏玉米轮作体系的土壤氮挥发[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 344-351.
- [17] 郑凤霞,董树亭,刘 鹏,等. 长期有机无机肥配施对冬小麦籽粒产量及氮挥发损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 567-577.
- [18] 吕宏菲,马星霞,杨改河,等. 秸秆还田对关中地区麦玉复种体系土壤氮排放的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(4): 513-522.
- [19] 曹 兵,李新慧,张 琳,等. 冬小麦不同基肥施用方式对土壤氮挥发的影响[J]. 华北农学报, 2001, 16(2): 83-86.
- [20] 胡瞿瞿,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.
- [21] 马 畅,吕小红,王 宇,等. 滨海稻区不同施氮量下梗稻产量与品质的关系[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(24): 70-75.
- [22] 陈桂芬,黄雁飞,刘 斌,等. 广西稻区不同水稻品种对氮肥施用量的响应差异[J]. 南方农业学报, 2021, 52(1): 137-144.
- [23] 顺 圣,毛 伟,李文西. 有机肥等氮量替代化肥对水稻产量、土壤理化性状及细菌群落的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(24): 90-94.
- [24] 冯浩原,尹光华,马宁宁,等. 不同降水年型地下滴灌追氮对玉米产量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(12): 1250-1256.
- [25] 顾颖慧,刘虹丹,刘文成,等. 硫包衣缓释肥施用方式调控红皮强筋小麦产量、品质及氮效率的特征分析[J]. 南方农业学报, 2021, 52(9): 2382-2390.
- [26] 勉有明,苗芳芳,吴鹏年,等. 施氮量对扬黄灌区土壤水分、温度、碳氮及玉米产量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(9): 950-958.
- [27] 刘红江,殷跃军,郭 智,等. 硝化抑制剂对小麦产量和氮素吸收利用的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(2): 443-449.
- [28] 王海候,沈明星,陆长婴,等. 不同秸秆还田模式对稻麦两熟农田稻季甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(4): 758-763.
- [29] HUANG S, ZENG Y J, WU J F, et al. Effect of crop residue retention on rice yield in China: a meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2013, 154: 188-194.
- [30] TANAKA F, NISHIDA M. Inhibitory effects of aromatic acid on nitrogen uptake and transport in rice (*Oryza sativa* L.) plants cultured on hydroponics[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1998, 44: 691-694.
- [31] 张 铭,蒋 达,缪瑞林,等. 不同土壤肥力条件下施氮量对稻茬小麦氮素吸收利用及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(1): 135-140.

(责任编辑:徐 艳)