

李 祯, 史海滨, 李仙岳, 等. 不同水氮运筹模式对田间土壤氨挥发及春玉米籽粒产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(4): 799–807.

LI Zhen, SHI Hai-bin, LI Xian-yue, et al. Ammonia volatilization in soil and grain yield of the spring maize under different water–nitrogen management regimes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(4): 799–807.

不同水氮运筹模式对田间土壤氨挥发及春玉米籽粒产量的影响

李 祯, 史海滨*, 李仙岳, 闫建文

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘 要: 为了减少氨挥发带来的氮素损失和面源污染, 寻求一种节水、节肥、稳产的水氮运筹模式, 研究分析了氨挥发规律及春玉米籽粒产量对不同水氮运筹模式的响应。试验采用裂区设计, 共 15 个处理。主区为灌水定额, 设置 3 个水平, 分别为 525、750、975 m³·hm⁻²; 副区为施氮量, 设置 5 个水平, 分别为 0、80、160、240、320 kg·hm⁻²。于 2014、2015 年连续两年进行田间试验。采用通气法采集田间氨挥发量, 并计算氨挥发速率、氨挥发损失量及损失率。结果表明: 2014、2015 两年同一处理追肥后的氨挥发速率峰值均大于该处理施入基肥后的氨挥发速率峰值, 追肥后氨挥发速率峰值比施入基肥后的氨挥发速率峰值分别高出 63.31% 和 62.06%。施氮量、灌水定额以及两者的交互作用均对 NH₃-N 损失量具有极显著影响, 三者对田间土壤 NH₃-N 损失量的影响表现为施氮量>灌水定额>两者的交互作用。2014、2015 两年各施氮处理施入基肥后平均 NH₃-N 损失量为 5.71~13.95 kg·hm⁻², 追肥后平均 NH₃-N 损失量为 8.70~18.66 kg·hm⁻²。2014 年各施氮处理 NH₃-N 总损失量为 13.90~32.21 kg·hm⁻², 2015 年各施氮处理 NH₃-N 总损失量为 15.45~32.99 kg·hm⁻²。处理 W2N3(灌水定额 750 m³·hm⁻², 施氮量 240 kg·hm⁻²)既能节水、节肥, 又能保证获得高产, 同时显著地降低了 NH₃-N 损失量, 故推荐该处理为适用于当地的最优水氮运筹模式。

关键词: 水氮运筹模式; 施氮量; 灌水定额; 氨挥发速率; 氨挥发损失量; 春玉米; 籽粒产量

中图分类号: X513 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)04-0799-09 doi:10.11654/jaes.2016-1592

Ammonia volatilization in soil and grain yield of the spring maize under different water–nitrogen management regimes

LI Zhen, SHI Hai-bin*, LI Xian-yue, YAN Jian-wen

(Department of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

Abstract: To alleviate the nitrogen loss and non-point source pollution from ammonia volatilization, this research analyzed the response of ammonia volatilization law and grain yield of spring maize to the different water–nitrogen management regimes. It is needed to seek a kind of water–nitrogen management regime to save water, fertilizer and produce stable yield. A split plot design method is used in the experiment. The main plot was irrigation quota with three levels (525, 750, 975 m³·hm⁻²). The split plot was nitrogen application with five levels (0, 80,

收稿日期: 2016-12-12

作者简介: 李 祯(1989—), 男, 博士生, 内蒙古呼和浩特人, 主要从事节水灌溉及农田生态环境研究。E-mail: 18647387011@163.com

* 通信作者: 史海滨 E-mail: shi_haibin@sohu.com

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51539005); “十三五”国家重点研发计划(2016YFC0400205); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51509132)

Project supported: The Key Program of the National Natural Science Foundation of China(51539005); The National Key Technology Research during the 13th Five-Year Plan Period of China(2016YFC0400205); The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(51509132)

160, 240, 320 kg·hm⁻²). Every irrigation quota had five treatments with different nitrogen application rate. There were fifteen treatments in total. The field experiment was carried out in 2014 and 2015. The venting method is adopted to measure ammonia volatilization in soil and calculate the ammonia volatilization rate, ammonia volatilization loss and loss rate. The results show that the peaks of ammonia volatilization rate after dressing fertilization of the same treatment are larger than the peaks of ammonia volatilization rate after sowing fertilization in the year of 2014 and 2015. The peaks of ammonia volatilization rate after dressing fertilization are 63.31% and 62.06% respectively higher than the peaks of ammonia volatilization rate after sowing fertilization. The nitrogen application, irrigation quota, and the interaction of those two elements all have highly significant influence on ammonia volatilization loss. And the influence of the three factors on ammonia volatilization loss shows is the regime of nitrogen application>irrigation quota>interaction of those two elements. The average ammonia volatilization loss of all nitrogen treatments after sowing fertilization are 5.71~13.95 kg·hm⁻² in the year of 2014 and 2015. The average ammonia volatilization loss of all nitrogen treatments after dressing fertilization are 8.70~18.66 kg·hm⁻² in the year of 2014 and 2015. The total ammonia volatilization loss of all nitrogen treatments are 13.90~32.21 kg·hm⁻² in the year of 2014. The total ammonia volatilization loss of all nitrogen treatments are 15.45~32.99 kg·hm⁻² in the year of 2015. The treatment of W2N3 (W2; 750 m³·hm⁻², N3; 240 kg·hm⁻²) can not only save water and nitrogen but also can obtain high yield. And it can reduce the ammonia volatilization loss significantly. Considering the aspects above, this research recommends the treatment of W2N3 as the best water-nitrogen management regime for experimental district.

Keywords: water-nitrogen management regime; nitrogen application; irrigation quota; ammonia volatilization rate; ammonia volatilization loss; spring maize; grain yield

田间的氮素损失是造成我国农田生态系统中非点源污染的一条重要途径,同时也是导致我国氮肥利用率较低的最直接原因^[1]。而氨挥发是田间土壤氮素气态损失的主要途径之一,我国农田中的氨挥发损失率高达 21%^[2-3]。氨挥发不仅降低了作物对氮肥的吸收利用率,同时对环境也产生了不利影响。滞留在大气中的氨转化为温室气体后不仅危害大气环境,还会引发土壤酸化及水体的富营养化,由此带来的生态环境问题严重影响到农业的可持续发展^[4]。

减少氨挥发损失已成为保证农田生产和生态环境可持续发展的关键性问题。国内外对这一热点问题高度重视,并通过大量试验研究发现,田间土壤氨挥发过程会受到土壤水分^[5]、土壤温度^[6]、土壤 pH 值^[7]等土壤因素以及灌溉管理^[8]、氮肥用量^[9-10]、氮肥种类^[11-13]等农业措施的影响。雷杨莉等^[14]对夏玉米土壤氨挥发研究发现,交替灌溉条件下的氨挥发量为 12.28~33.01 kg·hm⁻²,显著低于常规灌溉处理 54.49 kg·hm⁻² 的氨挥发量;彭世彰等^[15]对稻田氨挥发的研究表明,在控制灌溉的条件下,稻季氨挥发损失总量为 125.27 kg·hm⁻²,占当季施肥量的 31.06%;王东等^[16]研究表明增加氮肥施用量会导致土壤氨挥发速率显著升高。氨挥发损失量一般与施氮量呈线性正相关^[17]。

总体来讲,已有的研究主要集中于灌溉管理或氮肥管理等单因子对氨挥发的影响,涉及不同水氮运筹模式对田间土壤氨挥发影响的研究较为少见,故有待进一步探究。连续两年在河套灌区进行了春玉米田间试验,研究土壤氨挥发对不同水氮运筹模式的响应,为减少氮肥的气态损失、提高氮肥利用率、制定合理的水氮运筹方案、保护农业生态环境提供理论依据和实践方案。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2014、2015 年连续两年在内蒙古自治区磴口县坝楞村试验田进行。该地位于内蒙古河套灌区上游,属于温带大陆性季风气候,海拔 1 048.7 m,年均气温 7.6 ℃,年均降雨量 142.6 mm,年均日照时数 3 206.5 h,无霜期 136~144 d,土壤质地为粉砂壤土,土壤 pH 8.2。试验区耕层初始土壤性质详见表 1,试验区最高气温及最低气温变化见图 1。

1.2 试验设计

供试材料为春玉米西蒙 168。2014、2015 年播种日期分别为 4 月 17 日和 4 月 29 日,收获日期为 9 月 16 日和 9 月 18 日。当地传统施氮量为 320 kg·hm⁻²,

表 1 试验区初始土壤性质

Table 1 Initial soil properties of experimental plots

总氮/g·kg ⁻¹	碱解氮/mg·kg ⁻¹	有效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹	有机质/g·kg ⁻¹	田间持水率/%	凋萎系数/%	电导率/mS·cm ⁻¹
0.76	26.32	11.18	82.39	11.6	23.26	7.36	0.32

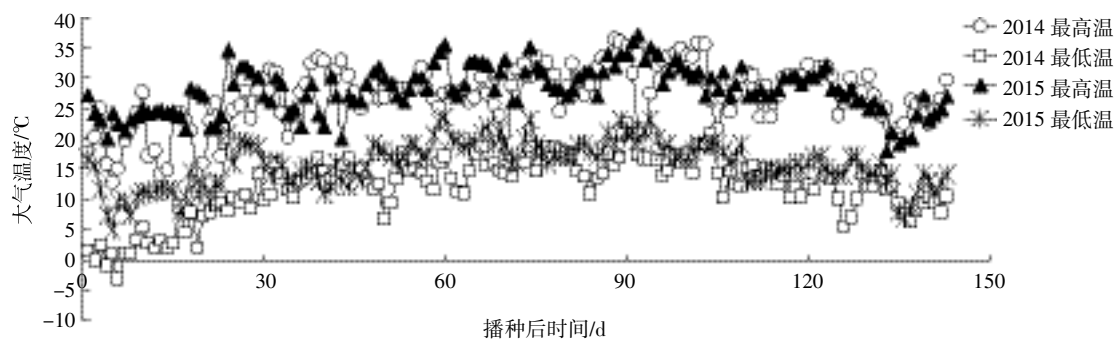


图 1 试验区 2014、2015 年最高气温及最低气温变化

Figure 1 The change of maximum temperature and minimum temperature in 2014 and 2015 in experimental plots

实际灌水定额为 $975\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, 以此作为最高施氮量和最高灌水定额依次设置各个施氮灌水处理。试验采用裂区设计,主区为灌溉量,设置 3 个灌水水平,副区为施氮量,设置 5 个施氮量水平,试验共 15 个处理,3 次重复(表 2)。灌溉时用潜水泵从渠道内抽水进行定量灌溉,灌水量由水表控制。基肥和追肥通过点播器施入土壤,施肥深度约 5 cm,各小区间设有 1 m 宽的隔离带。选用尿素作为氮肥,按 1:1 比例分别于玉米播种期和拔节期灌水前 1 d 施入,磷肥(过磷酸钙)、钾肥(硫酸钾)作为底肥一次性足量施入。

1.3 测定项目及方法

田间土壤氮挥发的采集测定采用通气法^[18]。通气法装置由高 10 cm、内径 15 cm 的聚氯乙烯硬质塑料管

制成,并将两块被均匀浸润过 15 mL 磷酸甘油溶液(50 mL 磷酸+40 mL 丙三醇,定容至 1000 mL)的海绵放置于管中,海绵直径 16 cm、厚 2 cm。上层海绵与管顶部平齐,下层海绵距管底 5 cm,将硬质塑料管插入土壤 1 cm 深处。为防止降雨对测定装置的影响,在各塑料管顶部 20 cm 处支撑起 1 个遮雨顶盖。

田间土壤氮挥发的采集于施入基肥和追肥后的当日,在各小区的不同位置,分别放置 3 个通气法氮捕获装置,次日早晨 8:00 取样。取样时,将通气装置下层海绵取出,迅速装入有对应编号的自封袋内密封。同时换上另一块刚刚浸过磷酸甘油的海绵。上层海绵根据其干湿状况 3~5 d 更换 1 次。把取下的下层海绵剪碎后分别装入 500 mL 塑料瓶,加入 300 mL

表 2 试验处理设计

Table 2 The design of experimental treatments

处理	灌水定额/ $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$			施氮量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	
	拔节期	大喇叭口期	灌浆期	基肥/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	追肥/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$
	2014-06-19	2014-07-08	2014-08-11	2014-04-17	2014-06-18
	2015-06-26	2015-07-17	2015-08-15	2015-04-29	2015-06-25
W1N0	525	525	525	0	0
W1N1	525	525	525	40	40
W1N2	525	525	525	80	80
W1N3	525	525	525	120	120
W1N4	525	525	525	160	160
W2N0	750	750	750	0	0
W2N1	750	750	750	40	40
W2N2	750	750	750	80	80
W2N3	750	750	750	120	120
W2N4	750	750	750	160	160
W3N0	975	975	975	0	0
W3N1	975	975	975	40	40
W3N2	975	975	975	80	80
W3N3	975	975	975	120	120
W3N4	975	975	975	160	160

1.0 mol·L⁻¹的KCl溶液,使海绵完全浸润于溶液之中,振荡1 h后,采用连续流动分析仪(Aquakem 250)测定浸取液中的铵态氮含量。施入基肥及追肥后每日取样1次,直到监测不到氨挥发为止,基本在10 d左右停止取样。两个取样期内无降雨干扰。

土壤氨挥发速率的计算公式为:

$$\text{NH}_3\text{-N}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})=M/(A\times D)\times 10^{-2}$$

式中: M 为通气法单个装置平均每日测得的氨挥发量,mg; A 为装置的横截面积,m²; D 为连续捕获的时间间隔,d。

氨挥发累积损失量=测定时期内每日氨挥发通量之和

氨挥发损失率(%)=(施氮处理氨挥发量-不施氮对照处理氨挥发量)/施氮量×100^[18]。

1.4 数据统计分析

采用Excel 2003 软件进行数据统计及图表绘制,采用SPSS 17.0 软件对试验数据进行方差分析及多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 不同水氮运筹模式对施入基肥和追肥后田间土壤氨挥发速率的影响

因施用基肥后没有灌水,氨挥发通量不受灌水定额的影响,只有施氮水平的影响,并且2014、2015年施用基肥后的氨挥发速率差异不大,故文中只保留了2014年施入基肥后的数据图。如图2、图3所示,2014、2015年施基肥后,不同水氮处理的氨挥发速率变化范围分别为0.01~3.87 kg·hm⁻²·d⁻¹和0.01~3.98 kg·hm⁻²·d⁻¹。而在2014、2015年追肥后,不同水氮处理的氨挥发速率变化范围分别为0.01~6.32 kg·hm⁻²·d⁻¹和0.01~6.45 kg·hm⁻²·d⁻¹。追肥后的田间土壤氨挥发强度明显高于施基肥后的氨挥发强度。2014、2015年追肥后氨挥发速率的最大值比施入基肥后的氨挥发速率最大值分别高出63.31%和62.06%。不同水氮处理在2014、2015年内的氨挥发速率动态变化趋势基本一致,氨挥发速率峰值一般均出现在施肥后的第2~3 d,随后便下降并进入低挥发阶段。施入基肥后,施氮量为N1、N2、N3处理的氨挥发速率均在第2 d出现峰值,而施氮量为N4处理的氨挥发速率在第3 d出现峰值,氨挥发速率随施氮量增加而依次递增;追肥后,不同水氮处理的氨挥发速率均在追肥后第2 d出现峰值,其氨挥发速率随着灌水定额及施氮量的增加也依次递增。

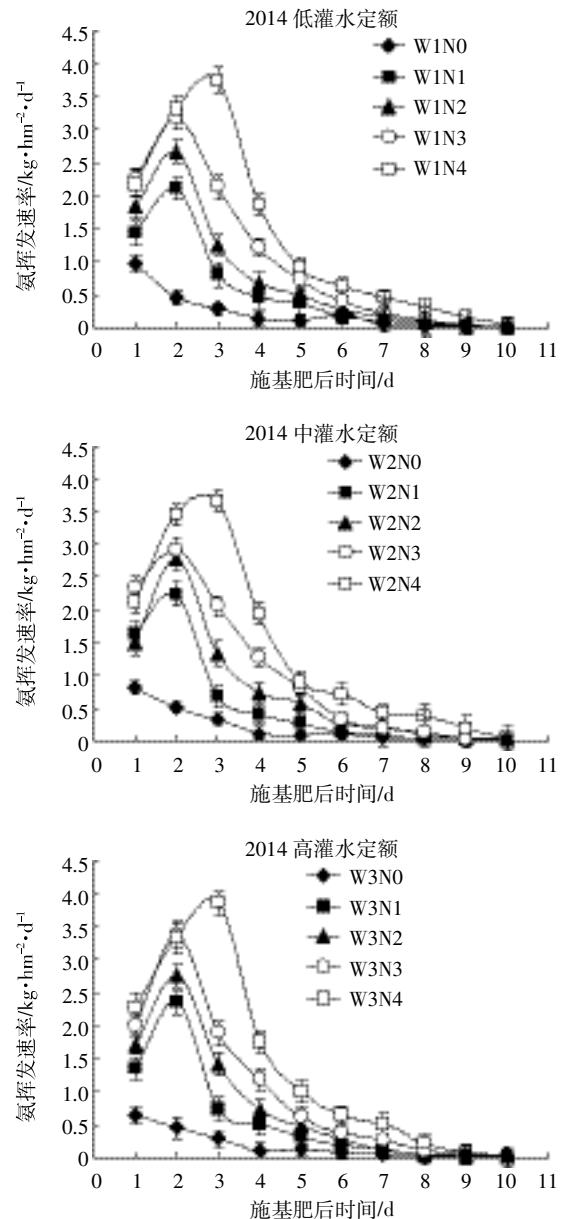


图2 不同水氮运筹模式对施基肥后田间土壤氨挥发速率动态变化的影响

Figure 2 The influence of different water-nitrogen management regimes on dynamic change of ammonia volatilization rate after sowing fertilization in soil

2.2 不同水氮运筹模式对累积氨挥发量及氨挥发损失率的影响

对2014、2015年不同水氮运筹模式田间土壤累计氨挥发损失量进行方差分析,结果见表3。2014、2015年的施氮量、灌水定额以及施氮量×灌水定额的 F 统计量均大于其各自的 F 临界值,并且 $P<0.01$,说明施氮量、灌水定额以及两者的交互作用对氨挥发损失量具有极显著影响。施氮量和灌水定额的 F 统计量

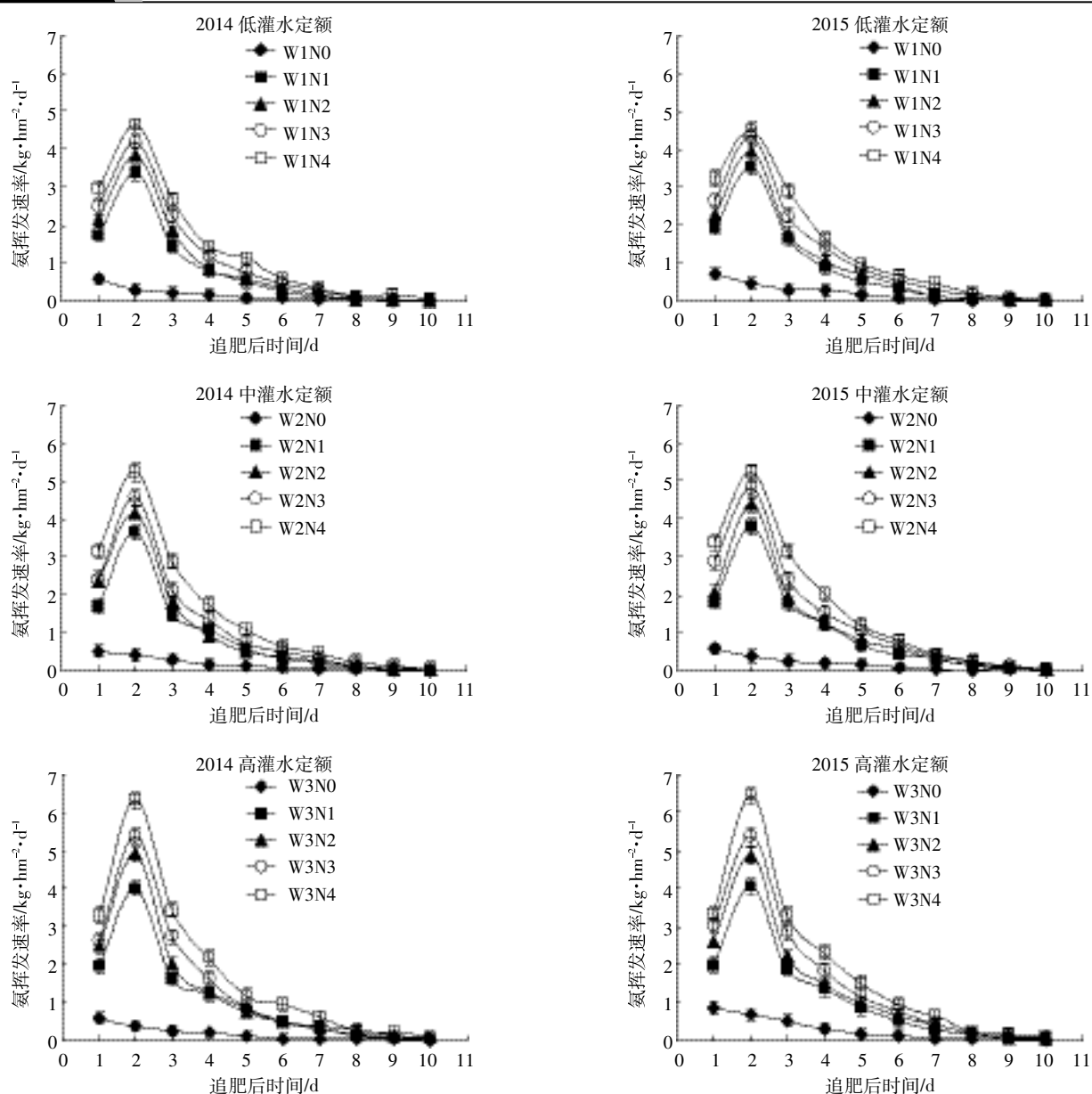


图 3 不同水氮运筹模式对追肥后田间土壤氨挥发速率动态变化的影响

Figure 3 The influence of different water–nitrogen management regimes on dynamic change of ammonia volatilization rate after dressing fertilization in soil

均远大于各自的 F 临界值, 而两者交互作用的 F 统计量仅略大于其 F 临界值, 故施氮量和灌水定额是影响土壤氨挥发损失量的主要因素, 两者的交互作用是影响氨挥发损失量的次要因素。三者对田间土壤氨挥发损失量的影响表现为施氮量 $\times$ 灌水定额 $\times$ 两者的交互作用。

由表 4 中不同施肥时期氨挥发损失量及损失率数据可知, 同一施氮处理追肥期的氨挥发损失量及损失率均大于该处理基肥期的氨挥发损失量及损失率。基肥期与追肥期的氨挥发损失量均随施氮量的增加

而递增, 而氨挥发损失率却随施氮量的增加而递减。追肥期当施氮量一定时, 各处理的氨挥发损失量及损失率均随灌水定额的增加而增加。

由表 5 可见, 当灌水定额一定时, 不同施氮量处理间的氨挥发损失总量呈现极显著差异。2014、2015 年, 当施氮量为 N1、N2、N3 水平时, 中、低灌水定额处理间的氨挥发损失总量差异不显著, 但与高灌水定额处理的氨挥发损失总量均有显著或极显著差异; 当施氮量为 N4 水平时, 3 种不同灌水定额处理间的氨挥发损失总量均有显著或极显著差异。2014、2015 年的

表3 2014、2015年不同水氮运筹模式下氨挥发损失量方差分析

Table 3 The variance analysis for ammonia volatilization loss with different water-nitrogen management regimes in 2014 and 2015

变异来源	SS	df	MS	F	P-value	F crit	显著性
2014	施氮量	3 374.10	4	843.52	1 640.81	1.18×10 ⁻³⁴	**
	灌水定额	45.88	2	22.94	44.63	1.02×10 ⁻⁹	**
	施氮量×灌水定额	18.75	8	2.34	4.56	1.04×10 ⁻³	**
	误差	15.42	30	0.51			
	总变异	3 454.15	44				
2015	施氮量	3 484.84	4	871.21	4 682.31	1.83×10 ⁻⁴¹	**
	灌水定额	40.69	2	20.34	109.34	1.67×10 ⁻¹⁴	**
	施氮量×灌水定额	13.87	6	1.73	9.32	2.34×10 ⁻⁶	**
	误差	5.58	24	0.19			
	总变异	3 544.99	35				

注:**表示不同处理间差异极显著($P<0.01$)。

Note:**Indicates highly significant differences among treatments($P<0.01$).

表4 2014、2015年不同水氮运筹模式下施用基肥和追肥后氨挥发损失量及损失率

Table 4 The ammonia volatilization loss and losing rate with different water-nitrogen management regimes after sowing fertilizer and dressing fertilizer in 2014 and 2015

处理	氨挥发损失量/kg·hm ⁻²				氨挥发损失率/%			
	2014 基肥	2014 追肥	2015 基肥	2015 追肥	2014 基肥	2014 追肥	2015 基肥	2015 追肥
W1N0	2.25±0.19e	1.56±0.35j	2.13±0.17h	2.10±0.21m	—	—	—	—
W1N1	5.55±0.31d	8.35±0.36i	6.41±0.35f	9.04±0.18k	8.25b	16.98c	10.70a	17.35b
W1N2	7.49±0.27c	9.94±0.46g	8.27±0.39d	10.42±0.37j	6.55g	10.48f	7.68cd	10.40ef
W1N3	10.32±0.42b	11.65±0.49e	10.70±0.44b	12.51±0.34g	6.73efg	8.41g	7.14ef	8.68h
W1N4	13.67±0.38a	14.03±0.45c	14.11±0.47a	14.64±0.31d	7.14cdef	7.79h	7.49cde	7.84i
W2N0	2.10±0.42e	1.66±0.11j	2.15±0.24h	1.78±0.17m	—	—	—	—
W2N1	5.56±0.33d	9.15±0.19h	6.32±0.25fg	10.30±0.28j	8.65b	18.73b	10.43a	21.30a
W2N2	7.55±0.35c	10.58±0.47fg	8.55±0.36d	11.71±0.32h	6.81defg	11.15e	8.00c	12.41d
W2N3	10.11±0.61b	12.15±0.49e	9.66±0.31c	14.05±0.41e	6.68fg	8.74g	6.26g	10.23f
W2N4	13.88±0.49a	15.52±0.43b	13.96±0.52a	16.49±0.31b	7.36cd	8.66g	7.38de	9.19g
W3N0	1.85±0.20e	1.73±0.15j	2.19±0.25h	2.83±0.20l	—	—	—	—
W3N1	5.69±0.41d	10.74±0.23f	5.73±0.33g	11.17±0.17i	9.60a	22.53a	8.85b	20.85a
W3N2	7.65±0.34c	12.80±0.55d	7.52±0.32e	13.42±0.29f	7.25cde	13.84d	6.66fg	13.24c
W3N3	9.94±0.39b	14.21±0.47c	10.26±0.36b	15.79±0.42c	6.74efg	10.40f	6.73fg	10.80e
W3N4	13.75±0.49a	18.46±0.20a	14.14±0.44a	18.85±0.26a	7.44c	10.46f	7.47de	10.01f

注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。表6同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences($P<0.05$) among different treatments. The same as table 6.

氨挥发损失总量表现为:当灌水定额一定时,氨挥发损失总量随施氮量增加而递增;当施氮量一定时,氨挥发损失总量随灌水定额的增加而递增。因施氮量增加而产生氨挥发的增幅明显高于由灌水定额增加而产生的氨挥发增幅。2014、2015年的氨挥发损失率整体表现为:当灌水定额一定时,氨挥发损失率随施氮量的增加而递减;当施氮量一定时,氨挥发损失率随灌水定额的增加而递增。

2.3 不同水氮运筹模式对玉米籽粒产量的影响

从表6可以看出,2014、2015年不同水氮运筹模式对春玉米产量及增产率影响各异。当灌水定额一定时,与不施氮的对照处理相比,各施氮处理的玉米籽粒产量均有显著增加,并且籽粒产量随施氮量的增加依次递增。2014、2015年在W1灌水定额下,各施氮处理玉米籽粒产量增幅分别为16.78%~41.43%和9.75%~35.77%;在W2灌水定额下,各施氮处理玉米

籽粒产量增幅为 10.02%~36.28%和 10.45%~34.64%;在 W3 灌水定额下,各施氮处理玉米籽粒产量增幅为 7.02%~27.19%和 6.56%~22.34%。2014 年,当施氮量一定时,W2、W3 灌水定额处理的籽粒产量均与 W1 灌水定额处理的籽粒产量有显著性差异,但 W2 与 W3 处理间的籽粒产量差异不显著。2015 年,当施氮量一定时,不同灌水定额处理间籽粒产量差异均显

著。2014、2015 年当灌水定额一定时,各施氮处理的增产率随施氮量的增加而大幅度升高;而当施氮量一定时,各施氮处理的增产率随灌水定额的增加小幅度降低。两年内 W2N3、W2N4、W3N3、W3N4 为高产处理,它们的籽粒产量均显著高于其他处理,但它们之间籽粒产量差异不显著。这说明当灌水定额达到 750 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、施氮量达到 240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 后,继续增加灌水

表 5 2014、2015 年不同水氮运筹模式下氨挥发损失量及损失率

Table 5 The ammonia volatilization loss and losing rate with different water-nitrogen management regimes in 2014 and 2015

处理	2014 氨挥发损失量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	2014 氨挥发损失率/%	2015 氨挥发损失量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	2015 氨挥发损失率/%
W1N0	3.81±0.43Jj	—	4.23±0.33Hj	—
W1N1	13.90±0.65li	12.61Cc	15.45±0.48Gi	14.03Cc
W1N2	17.43±0.63GHg	8.51EFef	18.69±0.40Fg	9.04Ee
W1N3	21.97±0.75Ee	7.57Ggh	23.21±0.56De	7.91GHgh
W1N4	27.70±0.70Cc	7.47Ggh	28.75±0.62Bc	7.66Hh
W2N0	3.76±0.35Jj	—	3.93±0.33Hj	—
W2N1	14.71±0.63li	13.69Bb	16.62±0.31Ghi	15.86Aa
W2N2	18.13±0.83Gg	8.98Ee	20.26±0.45Efi	10.21Dd
W2N3	22.26±0.73Ee	7.71Ggh	23.71±0.37De	8.24Gfg
W2N4	29.40±0.79Bb	8.01FGfg	30.45±0.38Bb	8.29FGf
W3N0	3.58±0.45Jj	—	5.02±0.47Hj	—
W3N1	16.43±0.60Hh	16.06Aa	16.90±0.37Gh	14.85Bb
W3N2	20.45±0.82Ff	10.54Dd	20.94±0.28Ef	9.95Dd
W3N3	24.15±0.93Dd	8.57EFe	26.05±0.43Cd	8.76Ee
W3N4	32.21±1.10Aa	8.95Ee	32.99±0.54Aa	8.74EFe

注:不同大写字母和小写字母分别表示不同处理间差异极显著($P<0.01$)和显著($P<0.05$)。

Note: Different capital letters and lowercase letters indicate highly significant differences ($P<0.01$) and significant differences ($P<0.05$) among different treatments.

表 6 不同水氮运筹模式对春玉米籽粒产量与增产率的影响

Table 6 The influence of different water-nitrogen management regimes on grain yield of spring maize and rate of grain increase

处理	2014 年籽粒产量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	2014 年增产率/%	2015 年籽粒含量/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	2015 年增产率/%
W1N0	6 388.20h	—	6 558.75f	—
W1N1	7 460.40fg	16.78	7 198.20e	9.75
W1N2	7 897.95e	23.63	7 703.40d	17.45
W1N3	8 688.60bc	36.01	8 428.80c	28.51
W1N4	9 035.10b	41.43	8 905.05b	35.77
W2N0	7 228.95g	—	7 094.40e	—
W2N1	7 953.45de	10.02	7 835.85d	10.45
W2N2	8 451.15c	16.91	8 337.30c	17.52
W2N3	9 851.85a	36.28	9 551.70a	34.64
W2N4	9 744.30a	34.80	9 452.55a	33.24
W3N0	7 797.75ef	—	7 846.65d	—
W3N1	8 344.80cd	7.02	8 361.00c	6.56
W3N2	8 809.65bc	12.98	8 944.50b	13.99
W3N3	9 572.40a	22.76	9 599.70a	22.34
W3N4	9 917.85a	27.19	9 567.30a	21.93

定额及施氮量并未使产量显著增长。

3 讨论

本研究于2014、2015年连续在轻度含盐土壤地块进行田间试验。基肥于春季玉米播种时施入,追肥于拔节期灌水前1 d施入,两次施氮量相同。研究结果表明,同一处理追肥灌水后的氨挥发速率峰值均大于该处理施入基肥后的氨挥发速率峰值,并且追肥后各处理的氨挥发速率均在第2 d出现峰值,随后便迅速进入低挥发阶段。这与周静等^[19]在不同含水量对尿素氨挥发影响的研究结果一致,氨挥发峰值的出现随土壤含水量的增加而提前。产生这种现象的原因一方面是玉米拔节期追肥后立即灌水,土壤含水率迅速升高,试验地耕层平均土壤质量含水率由基肥时期的12.56%增长到19.68%,追施的氮肥也迅速被水解,导致耕层土壤内铵态氮含量升高,为氨挥发提供了充足的物质条件,使氨挥发速率迅速达到峰值,而随着时间的延长,土壤水分被作物吸收或垂向入渗,导致耕层土壤含水率不断降低,硝化作用逐渐增强,大量铵态氮被硝化为硝态氮,使得氨挥发速率逐渐降低。另一方面,施入基肥后10 d的平均气温仅为13.71℃,而追肥期平均气温上升到23.62℃,气温的升高增强了土壤中脲酶活性,进一步加快了氮肥水解,从而提高了土壤中铵态氮浓度,增大氨分压,促进氨挥发过程^[15]。由于施入基肥后并未灌水,且基肥期基温较低,脲酶活性相对较弱,氮肥水解速率缓慢,氨挥发过程的物质条件不足^[20]。故施入基肥后各施氮处理的氨挥发速率整体低于追肥后的氨挥发速率。

施氮量是氨挥发损失量增加的主导因素,它会显著影响土壤的氨挥发过程,减少氮肥施用量可显著降低氨挥发损失量^[21]。本试验中,各施氮处理的氨挥发累计损失量随着施氮量的增加而递增,损失率则随施氮量增加而递减。这是由于增施氮肥的比例大于这部分氮肥所引起的氨挥发损失量。追肥灌水后,同一施氮量的中、高灌水定额处理的氨挥发损失量及损失率均高于其低灌水定额处理。这是由于灌水定额的增加促进了氨挥发损失量,而施氮量不变,故过量灌水会加剧氨挥发损失。当适量减少灌水定额及施氮量后,优化的水氮交互作用可显著降低土壤氨挥发损失量,同时也不会造成减产。这与杨士红等^[22]对不同水氮管理下稻田氨挥发损失特征的研究结果相符,控制灌溉和实地氮肥管理在节水、节肥、稳产的同时,显著降低了氨挥发损失。

4 结论

(1)2014、2015年同一施氮处理追肥后的氨挥发速率峰值均高于施入基肥后的氨挥发速率峰;各施氮处理追肥后平均氨挥发损失量高于各施氮处理施入基肥后的平均氨挥发损失量。

(2)施氮量、灌水定额以及两者的交互作用对田间土壤氨挥发损失总量的影响表现为施氮量>灌水定额>两者的交互作用;各施氮处理的氨挥发损失量表现为随施氮量(灌水定额一定)和灌水定额(施氮量一定)的增加而递增;而各施氮处理氨挥发损失率随施氮量的增加而递减(灌水定额一定),随灌水定额的增加而递增(施氮量一定)。

(3)2014、2015年各施氮处理的玉米籽粒产量增产率随施氮量的增加而大幅提升(灌水定额一定),随灌水定额的增加而小幅降低(施氮量一定)。当灌水定额达到 $750\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 、施氮量达到 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,继续增加灌水量及施氮量,增产效果不显著。

(4)综合各处理氨挥发损失量、损失率、籽粒产量及增产率等指标的表现,灌水定额为 $750\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 、施氮量为 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的水氮优化处理在降低氨挥发损失量的同时,还能实现节水、节肥、稳产的目标。故推荐该处理为适用于当地的最优水氮运筹模式。

参考文献:

- [1] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783.
ZHU Zhao-liang. Research on soil nitrogen in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778-783.
- [2] 巨晓棠, 刘学军, 邹国元, 等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J]. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1493-1499.
JU Xiao-tang, LIU Xue-jun, ZOU Guo-yuan, et al. Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(12): 1493-1499.
- [3] 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, 2012, 19(2): 259-273.
ZHU Zhao-liang, JIN Ji-yun. Fertilizer use and food security in China[J]. *Plant Nutrition Fertilizer Science*, 2012, 19(2): 259-273.
- [4] Asman W A H, Van Jaarsveld J A. A variable resolution transport model applied for NH_x in Europe[J]. *Atmospheric Environment*, 1992, 26(A): 445-464.
- [5] 胡小凤, 王正银, 游媛, 等. 缓释复合肥在不同土壤水分条件下氨挥发特性研究[J]. 环境科学, 2010, 31(8): 1937-1943.
HU Xiao-feng, WANG Zheng-yin, YOU Yuan, et al. Ammonia volatilization of slow release compound fertilizer in different soils water conditions[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(8): 1937-1943.
- [6] 张翀, 李雪倩, 苏芳, 等. 施氮方式及测定方法对紫色土夏玉米氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1194-1201.

- ZHANG Chong, LI Xue-qian, SU Fang, et al. Effects of different fertilization and measurement methods on ammonia volatilization of summer maize in purple soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6):1194-1201.
- [7] 胡小凤, 王正银, 孙倩倩, 等. 缓释复合肥料在不同 pH 值紫色土中氨挥发特性[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6):100-103.
- HU Xiao-feng, WANG Zheng-yin, SUN Qian-qian, et al. Characteristics of ammonia volatilization of slow release compound fertilizer in different pH values of purple soil[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(6):100-103.
- [8] Li H, Liang X L, Chen Y X, et al. Ammonia volatilization from urea in rice fields with zero-drainage water management[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(8):887-894.
- [9] Das P, Sa J H, Kim K H, et al. Effect of fertilizer application on ammonia emission and concentration levels of ammonium, nitrate, and nitrite ions in a rice field[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 154(1):275-282.
- [10] 俞映惊, 薛利红, 杨林章. 太湖地区稻田不同氮肥管理模式氨挥发特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8):1682-1689.
- YU Ying-liang, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang. Ammonia volatilization from paddy fields under different nitrogen schemes in Tai Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(8):1682-1689.
- [11] 赵 斌, 董树亭, 王空军, 等. 控释肥对夏玉米产量及田间氨挥发和氮素利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11):2678-2684.
- ZHAO Bin, DONG Shu-ting, WANG Kong-jun, et al. Effects of controlled release fertilizers on summer maize grain yield, field ammonia volatilization, and fertilizer nitrogen use efficiency[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(11):2678-2684.
- [12] 谢 勇, 荣湘民, 张玉平, 等. 控释氮肥减量施用对春玉米土壤 N_2O 排放和氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3):596-603.
- XIE Yong, RONG Xiang-min, ZHANG Yu-ping, et al. Effects of reduced CRNF applications on N_2O emissions and ammonia volatilization in spring maize soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3):596-603.
- [13] 周丽平, 杨俐苹, 白由路, 等. 不同氮肥缓释化处理对夏玉米田间氨挥发和氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6):1449-1457.
- ZHOU Li-ping, YANG Li-ping, BAI You-lu, et al. Comparison of several slow-released nitrogen fertilizers in ammonia volatilization and nitrogen utilization in summer maize field[J]. *Plant Nutrition Fertilizer Science*, 2016, 22(6):1449-1457.
- [14] 雷杨莉, 王林权, 薛 亮, 等. 交替灌溉施肥对夏玉米土壤氨挥发的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4):41-46.
- LEI Yang-li, WANG Lin-quan, XUE Liang, et al. Effect of alternative irrigation and fertilization on soil ammonia volatilization of summer maize[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(4):41-46.
- [15] 彭世彰, 杨士红, 徐俊增. 节水灌溉稻田氨挥发损失及影响因素[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8):35-39.
- PENG Shi-zhang, YANG Shi-hong, XU Jun-zeng. Ammonia volatilization and its influence factors of paddy field under water-saving irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(8):35-39.
- [16] 王 东, 于振文, 于文明, 等. 施氮水平对高产麦田土壤硝态氮时空变化及氨挥发的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(9):1593-1598.
- WANG Dong, YU Zhen-wen, YU Wen-ming, et al. Effects of nitrogen application level on soil nitrate accumulation and ammonia volatilization in high-yielding wheat field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(9):1593-1598.
- [17] Wang G L, Chen X P, Cui Z L, et al. Estimated reactive nitrogen losses for intensive maize production in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 197:293-300.
- [18] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氨挥发的原位测定: 通气法[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2):205-209.
- WANG Zhao-hui, LIU Xue-jun, JU Xiao-tang, et al. Field in situ determination of ammonia volatilization from soil: Venting method[J]. *Plant Nutrition Fertilizer Science*, 2002, 8(2):205-209.
- [19] 周 静, 崔 键, 王 霞. 红壤不同含水量对尿素氨挥发的影响[J]. 土壤, 2008, 40(6):930-933.
- ZHOU Jing, CUI Jian, WANG Xia, Effects of red soil moisture on ammonia volatilization of urea[J]. *Soils*, 2008, 40(6):930-933.
- [20] 肖 娇, 樊建凌, 叶桂萍, 等. 不同施肥处理下小麦季潮土氨挥发损失及其影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(10):2011-2018.
- XIAO Jiao, FAN Jian-ling, YE Gui-ping, et al. Ammonia volatilization from fluvo-aquic clay soil and its influencing factors during wheat growing season under different fertilization[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(10):2011-2018.
- [21] 李宗新, 王庆成, 刘开昌, 等. 不同施肥模式下夏玉米田间土壤氨挥发规律[J]. 生态学报, 2009, 19(1):307-314.
- LI Zong-xin, WANG Qing-cheng, LIU Kai-chang, et al. Law of field soil ammonia volatilization in summer maize under different fertilizer patterns[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 19(1):307-314.
- [22] 杨士红, 彭世彰, 徐俊增, 等. 不同水氮管理下稻田氨挥发损失特征及模拟[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11):99-104.
- YANG Shi-hong, PENG Shi-zhang, XU Jun-zeng, et al. Characteristics and simulation of ammonia volatilization from paddy fields under different water and nitrogen management[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(11):99-104.