

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.19002

## 氮肥运筹对旱作覆膜玉米产量及固碳减排效应研究

颀健辉, 李玲玲\*, 谢军红, 彭正凯, 邓超超, 沈吉成, 王进斌, Eunice Essel

(甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 在黄土高原雨养农业区, 依托布设于 2012 年的定位试验研究氮肥运筹对全膜双垄沟播玉米固碳效应和  $\text{NH}_3$  挥发的影响。采用裂区设计, 主处理施氮水平: 不施氮对照 (N0)、低施氮  $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (N1)、中施氮  $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (N2) 和高施氮  $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (N3); 副处理为施肥时期及比例: 设基肥: 拔节肥 = 1:2 (T1) 和基肥: 拔节肥: 大喇叭口肥 = 1:1:1 (T2)。结果表明: 将  $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  氮肥以基肥: 拔节肥 = 1:2 的比例施用能显著提高全膜双垄沟播玉米的籽粒产量和生物产量, 分别较对照增加 197% 和 131%, 氮肥偏生产力和氮肥农学效率较高施氮水平分别降低 48% 和 47%。氮挥发排放主要集中在追肥后的一周, 穴施追肥后,  $\text{NH}_3$  挥发速率迅速升高, 1 ~ 4 d 内达到峰值, 随后逐渐降低至对照水平, 且施氮水平越高排放峰值越大。高、中、低施氮水平的  $\text{NH}_3$  挥发量较不施氮对照分别增加 6.5、5.9、5.4 倍; T1 处理较 T2 处理显著降低了 37%; N3T2 的  $\text{NH}_3$  挥发量最多, 较其他处理显著增多了 13% ~ 47%。 $\text{NH}_3$  挥发损失率变幅在 13% ~ 60%, 随施氮水平增加而降低, 高、中施氮水平较低施氮水平降低了 59.6% 和 44.6%; 与 T2 相比, T1 处理  $\text{NH}_3$  挥发损失率显著降低了 40.4%, 增加施氮水平和追肥次数潜在增加  $\text{NH}_3$  挥发损失。综上所述, 在黄土高原雨养农业区种植全膜双垄沟播玉米时, 能提高玉米籽粒产量和土壤固碳减排能力的适宜施肥制度为: 施纯氮  $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 全部氮肥按基肥: 拔节肥 = 1:2 的比例施用。

**关键词:** 全膜双垄沟播; 玉米; 氮肥运筹; 籽粒产量; 固碳减排

氮素在作物产量形成中起着重要作用, 合理施用氮肥是提高作物产量的关键因素。目前, 我国氮肥用量高居不下, 占全球用量的 30% 左右, 但肥料利用率却不足 50%<sup>[1-2]</sup>, 增施氮肥成为作物增产的普遍习惯。研究发现, 过量施氮造成硝态氮淋溶, 引起地下水污染、土壤板结等问题, 直接导致氮肥利用率下降<sup>[3]</sup>。同时, 氮肥的不合理施用引起  $\text{NH}_3$  挥发, 造成氮肥损失。Bouwman 等研究证明, 在全球范围内化学氮肥的  $\text{NH}_3$  挥发损失率达 10% ~ 19%<sup>[4]</sup>, 而在发展中国家由于尿素等含氮肥料的广泛使用,  $\text{NH}_3$  挥发损失率更高<sup>[5]</sup>。进入大气中的  $\text{NH}_3$  以干、湿沉降的方式返回陆地生态系统, 虽然可增加土壤有效态氮, 但过量的  $\text{NH}_3$  沉降能够造成森林或水生生态系统的酸化、富营养化及降低物种多样性等一系列环境问题<sup>[6-7]</sup>。

近年来, 玉米生产以高产为主要目标逐渐转变为高产、优质、高效、生态、可持续发展, 如何以较低的生产成本获得较高的生产效益, 提高资源利用效率和劳动生产效率, 增强玉米市场竞争力成为旱作农业可持续发展关键问题<sup>[8-9]</sup>。为了提高氮肥利用效率, 科研人员在氮肥统筹方面做了大量工作, 确定了高效的施氮技术, 其中, 氮肥后移技术对作物产量的影响很大, 而且能降低  $\text{NH}_3$  挥发, 提高作物的氮肥利用率<sup>[10-12]</sup>。但这些研究大多在降雨充沛地区农业生态系统中开展, 在干旱半干旱地区覆膜条件下氮肥  $\text{NH}_3$  挥发损失的研究相对缺乏。而干旱地区占全球陆地总面积 45%, 我国干旱地区大约占国土总面积的 70%<sup>[13-14]</sup>。黄土高原是典型的干旱半干旱大陆季风气候区, 多年平均降水量 200 ~ 600 mm, 生态脆弱、旱灾频发、降水与作物生长季错位等限制了土地生产力的提高<sup>[15-16]</sup>。玉米是该地区主要的粮食作物之一, 全膜双垄沟播技术是主要生产技术, 该技术有效地提高了水分利用效率和土地生产力<sup>[17-18]</sup>。但受高产利益驱动, 普遍存在偏施、重施现象, 因此系统掌握肥料氮在旱作覆膜玉米农田生态系统中  $\text{NH}_3$  挥发损失规律及其对氮肥利用率的影响, 对制定该地区合理的氮肥管理措施具有重要意义。本研究依托位于甘肃农

收稿日期: 2019-01-01; 录用日期: 2019-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31460337, 31660373, 31761143004); 甘肃省教育厅项目 (2017C-12); 十二五国家科技支撑计划项目 (2012BAD14B03, 2015BAD22B04-3)。

作者简介: 颀健辉 (1994-), 男, 甘肃甘谷人, 硕士研究生, 从事旱地与绿洲农作制研究。E-mail: 1164651298@qq.com。

通讯作者: 李玲玲, E-mail: lill@gsau.edu.cn。

业大学定西旱作农业综合实验站始于 2012 年的氮肥定位试验, 生育期采用通气法对陇中旱农区玉米生产系统的土壤 NH<sub>3</sub> 挥发进行了原位观测<sup>[19]</sup>, 研究了氮肥运筹对土壤 NH<sub>3</sub> 挥发规律、玉米产量和氮肥利用效率的影响, 明晰氮肥应用对作物-土壤系统固碳减排效应机制, 为本地区制定合理施肥制度提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试区概况

依托 2012 年在甘肃省定西市李家堡镇的甘肃

农业大学旱作农业综合实验站布设的定位试验, 于 2018 年开展研究。试区属典型黄土高原半干旱丘陵沟壑区, 平均海拔为 2 000 m, 日照时数 2 476.6 h, 年均气温 6.4℃, ≥ 0℃ 积温 2 933℃, ≥ 10℃ 积温 2 238.1℃, 无霜期 141 d。多年平均降水量 390.8 mm, 年蒸发量 1 532 mm, 为黄土高原西部典型的半干旱雨养农业区。试验区土壤为黄绵土, 土质绵软, 土层深厚, 质地均匀, 贮水性能良好。土壤有机质 12.01 g · kg<sup>-1</sup>, 碱解氮 66.3 mg · kg<sup>-1</sup>, 有效磷 19.4 mg · kg<sup>-1</sup>, 速效钾 220.3 mg · kg<sup>-1</sup>, pH 值为 8.36。2018 年 4 ~ 10 月降水如图 1 所示。

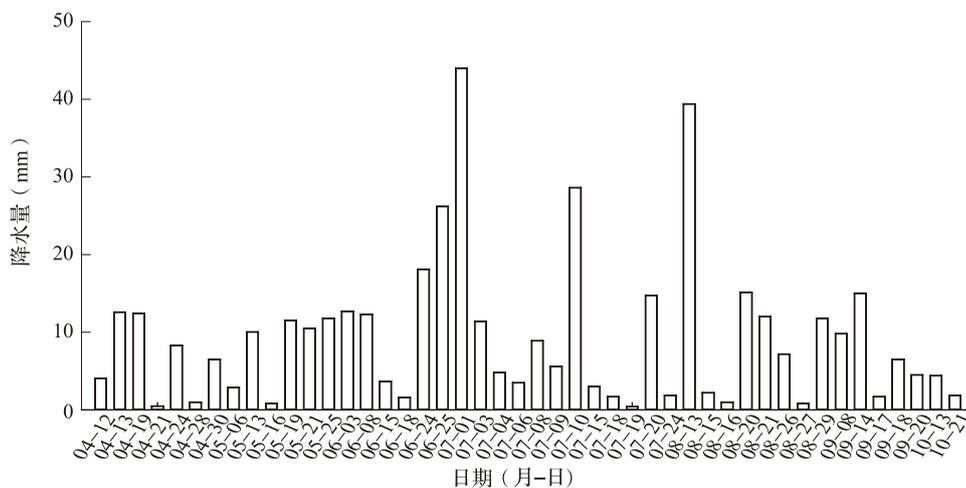


图 1 2018 年 4 ~ 10 月日降水量

### 1.2 试验设计

采用裂区试验设计, 主处理为施氮水平, 设 3 个水平和不施氮对照 (N0), 分别为: 低施氮 100 kg · hm<sup>-2</sup> (N1)、中施氮 200 kg · hm<sup>-2</sup> (N2)、高施氮 300 kg · hm<sup>-2</sup> (N3); 副处理为不同施肥时期及比例, 分别为基肥: 拔节肥 = 1: 2 (T1) 和基肥: 拔节肥: 大喇叭口肥 = 1: 1: 1 (T2)。共 8 个处理, 3 次重复, 总计 24 个小区, 小区面积 35.2 m<sup>2</sup> (4.4 m × 8.0 m)。具体施肥方案如表 1 所示。

表 1 试验期间施氮水平和施肥方式 (kg · hm<sup>-2</sup>)

施氮水平	T1		T2		
	深施基肥	穴施拔节肥	深施基肥	穴施拔节肥	穴施大喇叭肥
N0	0	0	0	0	0
N1	33.33	66.67	33.33	33.33	33.33
N2	66.67	133.33	66.67	66.67	66.67
N3	100	200	100	100	100

参试玉米品种为先玉 335, 密度为 5.25 万株 · hm<sup>-2</sup>, 采用全膜双垄沟播玉米生产技术, 该技术具体内容如下: 包含大小双垄, 总宽 110 cm, 大垄宽为 70 cm、高 10 cm, 小垄宽为 40 cm、高 15 cm, 整地起垄后, 用宽 120 cm、厚 0.01 mm 的超薄膜, 每公顷用量 75 kg, 全地面覆盖。膜与膜间不留空隙, 两幅膜相接处在在大垄中间, 用大垄的土压住地膜, 覆膜时地膜与垄面、垄沟贴紧, 每隔 2 ~ 3 m 横压腰带, 垄沟内每隔 50 cm 左右打渗水孔, 以使降水渗入。

在 4 月 11 日, 揭膜、施入基肥氮和磷肥 (基肥为磷酸氢二铵、过磷酸钙, 施入 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 150 kg · hm<sup>-2</sup>) 后深翻入土, 并及时完成起垄、覆膜作业, 4 月 29 日沟内播种玉米。6 月 26 日和 7 月 18 日分别按试验方案进行穴施追肥 (追肥为氮含量 46% 的尿素), 根据密度确定每穴追肥量, 田间及时拔出杂草、分蘖等, 其他管理同全膜双垄沟播大田玉米种植。

### 1.3 测定项目与方法

#### 1.3.1 产量测定

各小区单独收获,测定与产量构成有关指标以及生物产量和籽粒产量,折算为单位面积产量。相关指标计算如下:

(1) 氮肥农学效率 (NAE) = (施氮区籽粒产量 - 不施氮区籽粒产量) / 施氮水平

(2) 氮肥偏生产力 (NFPF) = 施氮区玉米籽粒产量 / 施用氮肥总量

(3) 收获指数 (HI) = 籽粒产量 / 生物产量

#### 1.3.2 NH<sub>3</sub> 挥发样品采集

NH<sub>3</sub> 挥发测定采用通气法<sup>[19]</sup>,该方法装置简单,条件易控,回收率高达 99.51%,变异系数仅为 0.77%。NH<sub>3</sub> 挥发损失主要集中于前 7 d,累计 NH<sub>3</sub> 挥发量占总量的 88.57% ~ 96.72%。试验所用的通气装置由内径 15 cm、高 12 cm 的聚氯乙烯硬质塑料管制成。测定 NH<sub>3</sub> 挥发前先将两块直径为 16 cm、厚度均为 2 cm 的吸水性较好的海绵均匀浸入 15 mL 的吸收液 (吸收液为磷酸甘油溶液,1 000 mL 溶液中含有 50 mL 磷酸和 40 mL 丙三醇)后,将两层海绵有吸收液的一面朝下置于硬质塑料管中,下层海绵距离地表 5 cm,上层海绵与管顶部相平。

施肥当天按“S”型布设 3 个样点,每个样点上安装 3 个采气装置,安装时,一个装置的中心位于两株玉米种间,另外两个管子分别位于小垄和大垄中央且与第一个管子在同一条直线上。取样时间为 9:00 ~ 11:00。取样时,将通气装置下层的海绵取出,迅速按小区号分别装入塑料袋中密封;同时换上一块刚浸过吸收液的海绵。上层的海绵视其干湿情况 3 ~ 7 d 更换 1 次。更换海绵后将捕获装置重新安放好开始下一次的氨吸收。第 1 周每天取样 1 次;第 2 ~ 3 周每 2 ~ 3 d 取样 1 次,直至捕获不到 NH<sub>3</sub> 挥发为止。把吸收有氨气的海绵放入自封袋带回室内分析,用 1 mol · L<sup>-1</sup> KCl 溶液将海绵完全浸没,室温下振荡 1 h,浸提液过滤后测定铵态氮含量,即为 NH<sub>3</sub> 挥发量。相关计算公式如下:

(1) NH<sub>3</sub> 挥发速率计算公式:  $F = M / (A \times D)$

其中:  $F$  为 NH<sub>3</sub> 挥发速率 (kg · hm<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>),  $M$  为每次 NH<sub>3</sub> 挥发装置测得的铵态氮含量 (kg),  $A$  为捕获装置横截面积 (hm<sup>2</sup>),  $D$  为连续采集的时间 (d)。

(2) NH<sub>3</sub> 挥发总量为每次测得的 NH<sub>3</sub> 挥发量的总和。

(3) 肥料 NH<sub>3</sub> 挥发损失率 = (施氮区挥发量 -

不施氮区挥发量) / 施氮量 × 100%

#### 1.3.3 土壤水分与温度测定

##### (1) 土壤温度

在所有采样小区各安置一套地温计,每次采集气体样品的同时记录地下 5、10、15、20 及 25 cm 处的土壤温度。

##### (2) 土壤体积含水量

每次采气时用土钻取 0 ~ 5、5 ~ 10、10 ~ 30 cm 处土样,用烘干法计算质量含水量,换算为土壤体积分含水量。

### 1.4 数据的处理

采用 Excel 2010 软件进行数据整理与作图,用 SPSS 19.0 对数据进行方差分析和最小显著性检验 (LSD 法)。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮肥运筹对玉米产量和相关指标的影响

从表 2 可知,施氮水平、施氮水平与施肥时期及比例的互作效应显著影响玉米生物产量、籽粒产量、收获指数、氮肥偏生产力 (NFPF) 和氮肥农学效率 (NAE),施肥时期及比例对以上指标无影响。高、中施氮水平间生物产量和籽粒产量差异不显著,但较对照显著提高了 106% 和 176%,较低施氮水平显著提高了 22% 和 19.1%;高、中施氮水平下 HI 分别较对照提高了 50% 和 25%,差异显著;NFPF 和 NAE 随施氮水平增加而降低,与施氮 300 kg · hm<sup>-2</sup> 相比,200 kg · hm<sup>-2</sup> 施氮水平下的 NFPF 和 NAE 提高了 33% 和 26%。处理间,不同施氮时期及比例对同一施氮水平的生物产量、籽粒产量无影响,且中、高施氮水平下,处理 N2T1、N2T2、N3T2 和 N3T1 的生物产量、籽粒产量、收获指数、氮肥偏生产力和农学利用效率差异不显著,因此本着节约成本的原则,黄土高原雨养农业区全膜双垄沟播玉米的施氮制度为,施氮水平 200 kg · hm<sup>-2</sup>,按基肥:拔节肥=1:2 的比例施用,该制度下,玉米的生物产量、籽粒产量分别较对照增加 131% 和 197%,NFPF 和 NAE 较高施氮水平降低 48% 和 47%。

### 2.2 氮肥运筹对 NH<sub>3</sub> 挥发影响

#### 2.2.1 NH<sub>3</sub> 挥发速率

由图 2 可看出,拔节期追肥后,N2T1 和 N3T1 处理 NH<sub>3</sub> 挥发速率在施肥后第 1 d 即达到最高,分别为 3.65 和 3.56 kg · hm<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>,之后随着时间的推进 NH<sub>3</sub> 挥发速率先迅速降低,随后略有回升,

表 2 施肥对玉米产量及氮肥效率的影响

因素	水平	生物产量 (kg · hm <sup>-2</sup> )	籽粒产量 (kg · hm <sup>-2</sup> )	收获指数	氮肥偏生产力 (kg/kg)	氮肥农学效率 (kg/kg)
施氮水平 (N)	N0	13 999.79c	2 649.02c	0.20c	—	—
	N1	23 710.62b	6 139.81b	0.26b	61.40a	39.48a
	N2	28 815.48a	7 315.11a	0.25b	36.58b	23.33b
	N3	27 845.11a	8 242.14a	0.30a	27.47c	18.64b
		*	*	*	*	*
施肥时期及比例 (T)	T1	23 154.08a	6 246.02a	0.26a	43.79a	28.92a
	T2	24 031.42a	5 927.02a	0.24a	39.84a	25.38a
		ns	ns	ns	ns	ns
施氮水平 × 施肥时期及比例 (N × T)	N0T1	12 557.73c	2 635.43d	0.21bc	—	—
	N0T2	15 441.85c	2 662.61d	0.18c	—	—
	N1T1	23 631.44b	6 572.11bc	0.28ab	65.72a	43.07a
	N1T2	23 789.81b	5 707.50c	0.24abc	57.08b	35.88ab
	N2T1	29 056.51a	7 835.19ab	0.27abc	39.18c	26.00bc
	N2T2	28 574.45a	6 795.03bc	0.24abc	33.98cd	20.66c
	N3T1	27 370.65ab	7 941.34ab	0.29a	26.47d	17.69c
	N3T2	28 319.56a	8 542.94a	0.30a	28.48d	19.60c
		*	*	*	*	*

注：不同小写字母和“\*”表示在 0.05 水平差异显著，ns 表示无差异，下同。

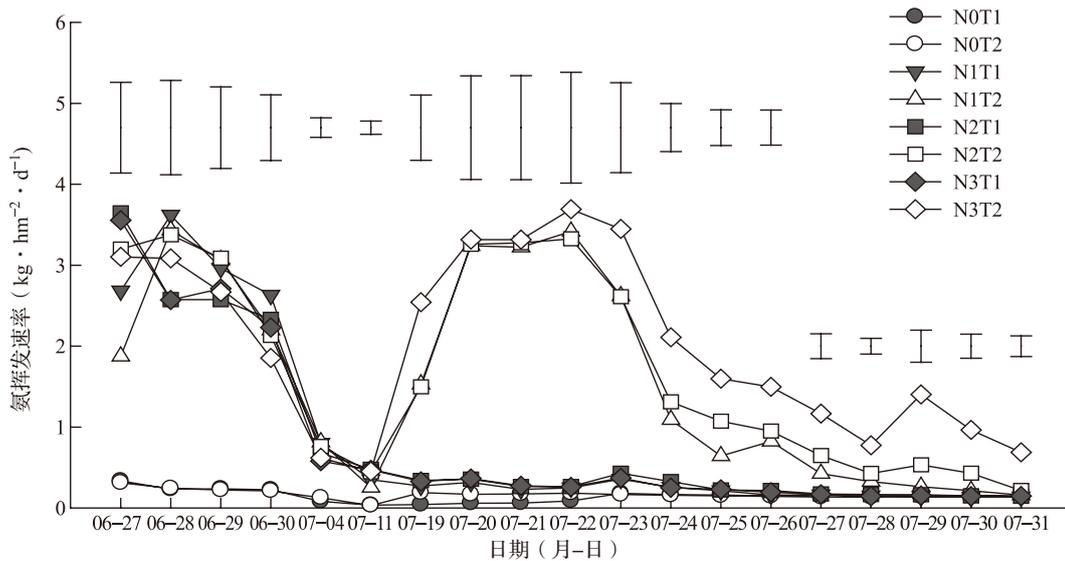


图 2 追肥后 NH<sub>3</sub> 挥发速率动态

最后逐渐降低至对照水平；N1T1 和 N1T2 处理 NH<sub>3</sub> 挥发速率先迅速升高，施肥后第 2 d 达到最高，峰值分别为 3.62 和 3.43 kg · hm<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>，之后随着时间推进逐渐降低至对照水平；N2T2 和 N3T2 处理

NH<sub>3</sub> 挥发速率随着时间推进先缓慢升高，之后逐渐降低至对照水平，施肥处理间 NH<sub>3</sub> 挥发速率差异不显著但与不施肥对照差异显著。大喇叭口期追肥后，施肥处理 NH<sub>3</sub> 挥发速率先升高后降低，施肥后

第 4 d 达到最高, 随后逐渐降低, 在施肥一周后略有回升, 之后降低到对照水平; N3T2 处理 NH<sub>3</sub> 挥发速率明显高于其他处理, 达到排放峰时, 施氮水平越大其峰值也就越大, N3T2 处理 NH<sub>3</sub> 挥发速率峰值达到 3.69 kg · hm<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>。而且氨挥发排放主要集中在施肥后一周内, 遇降雨 NH<sub>3</sub> 挥发速率明显降低。

### 2.2.2 NH<sub>3</sub> 挥发累积量

从图 3 可知, 拔节期施肥后, NH<sub>3</sub> 挥发累积量随着时间的推进逐渐增加, 施肥处理和不施肥对照间差异显著, 由于施肥后出现不同程度的降

水 (总计 106.8 mm), 导致施肥第 3 d 以后 NH<sub>3</sub> 挥发累积量在施肥处理间差异不显著。大喇叭口期施肥后, NH<sub>3</sub> 挥发累积量迅速增加, 施肥一周后缓慢增加, 到施肥后 13 d 左右 NH<sub>3</sub> 挥发累积量基本保持不变, N3T2、N2T2、N1T2 和不施肥处理间差异显著, 从 7 月 24 日 (施肥后第 5 d) 起至测定截止, N3T2 处理较其他处理显著增多, 测定截止时高达 53.3 kg · hm<sup>-2</sup>。拔节期测定截止时 N3T2、N2T2、N1T2 处理的 NH<sub>3</sub> 挥发累积量分别较大喇叭口期降低了 36.6%、5.8% 和 11.7%。

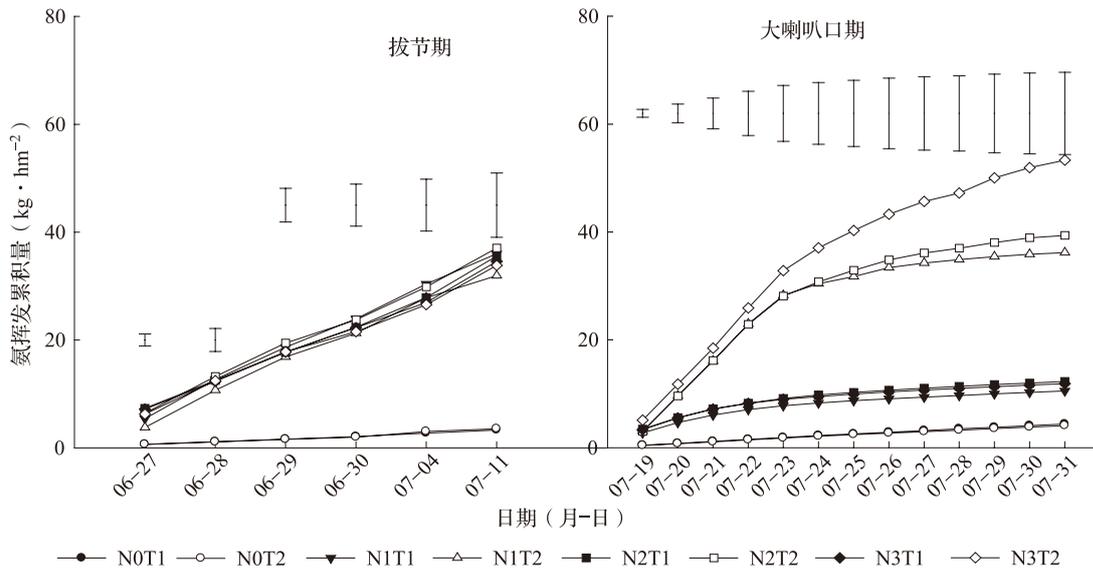


图 3 追肥后 NH<sub>3</sub> 挥发累积量动态

### 2.2.3 NH<sub>3</sub> 挥发量及 NH<sub>3</sub> 挥发损失率

由表 3 可知, 施氮水平、施肥时期和比例及其交互作用显著影响 NH<sub>3</sub> 挥发量。高、中、低施氮水平分别较不施氮对照增加了 6.5、5.9、5.4 倍, 差异显著; T1 处理 NH<sub>3</sub> 挥发量较 T2 处理显著降低了 37%; 处理间的排序为 N3T2>N2T2>N1T2>N2T1>N3T1>N1T1>N0T2> N0T1, N3T2 的 NH<sub>3</sub> 挥发量达到 90.23 kg · hm<sup>-2</sup>, 分别较其他施氮处理显著增多了 13%、23%、44%、46% 和 47%。NH<sub>3</sub> 挥发损失率随施氮水平增加而降低, 高、中施氮水平较低施氮水平降低了 59.6% 和 44.6%, 差异显著; 与 T2 相比, T1 处理 NH<sub>3</sub> 挥发损失率显著降低了 40.4%; 处理间 NH<sub>3</sub> 挥发损失率变幅在 13% ~ 60%, 趋势为: N1T2>N1T1>N2T2> N3T2> N2T1>N3T1, N3T1 处理分别较 N2T1、N3T2、N2T2、N1T1、N1T2 处理降低了 36%、52%、62%、67% 和 79%, 但和 N2T1 处理差异不显著。

表 3 施肥对 NH<sub>3</sub> 挥发量及损失率的影响

因素	水平	氨挥发量 (kg · hm <sup>-2</sup> )	氨挥发损失率 (%)
施氮水平 (N)	N0	9.26d	—
	N1	58.87c	49.61a
	N2	64.24b	27.49b
	N3	69.43a	20.06c
施肥时期及 比例 (T)	T1	39.00b	24.20b
	T2	61.90a	40.57a
施氮水平 × 施肥时期及 比例 (N × T)	N0T1	9.15e	—
	N0T2	9.37e	—
	N1T1	48.09d	38.95b
	N1T2	69.65c	60.28a
	N2T1	50.15d	20.50d
	N2T2	78.33b	34.48b
	N3T1	48.63d	13.16d
	N3T2	90.23a	26.95c

### 2.3 土壤 0 ~ 30 cm 温度和含水量

从图 4 可以看出, 随着土层深度的加深, 土壤温度在拔节期和大喇叭口期都表现为 0 ~ 15 cm 逐渐降低, 20 cm 处略有回升, 随后降低的趋势。不施氮对照的土壤温度在 10 cm 以上明显高于施肥处理, 在相同施肥时期及比例处理下, 拔节期土壤 0 ~ 10 cm 平均温度表现为: N3T2 < N2T2 < N1T2 和 N1T1 < N3T1 < N2T1, 分别较对照降低 20.1%、18.3%、9.5% 和 11.4%、6.8%、11.7%; 大喇叭口期土壤 0 ~ 10 cm 平均温度表现为 N3T2 < N2T2 < N1T2 和

N3T1 < N1T1 < N2T1, 分别较对照降低 19.5%、16%、8% 和 14%、12.6%、4.9%, 土层 20 cm 以下各处理间土壤温度基本无差异。0 ~ 10 cm 的土壤含水量小于 10 ~ 30 cm, 拔节期不同施氮时期及比例下施氮水平间 10 ~ 30 cm 表现为 N3T2 > N0T2 > N1T2 > N2T2 和 N3T1 > N0T1 > N1T1 > N2T1, N3T2 和 N3T1 分别较对照提高了 6.7% 和 2.3%; 大喇叭口期 10 ~ 30 cm 表现为: N3T2 > N1T2 > N0T2 > N2T2 和 N3T1 > N0T1 > N1T1 > N2T1, N3T2 和 N3T1 分别较对照提高了 5.2% 和 2.9%。

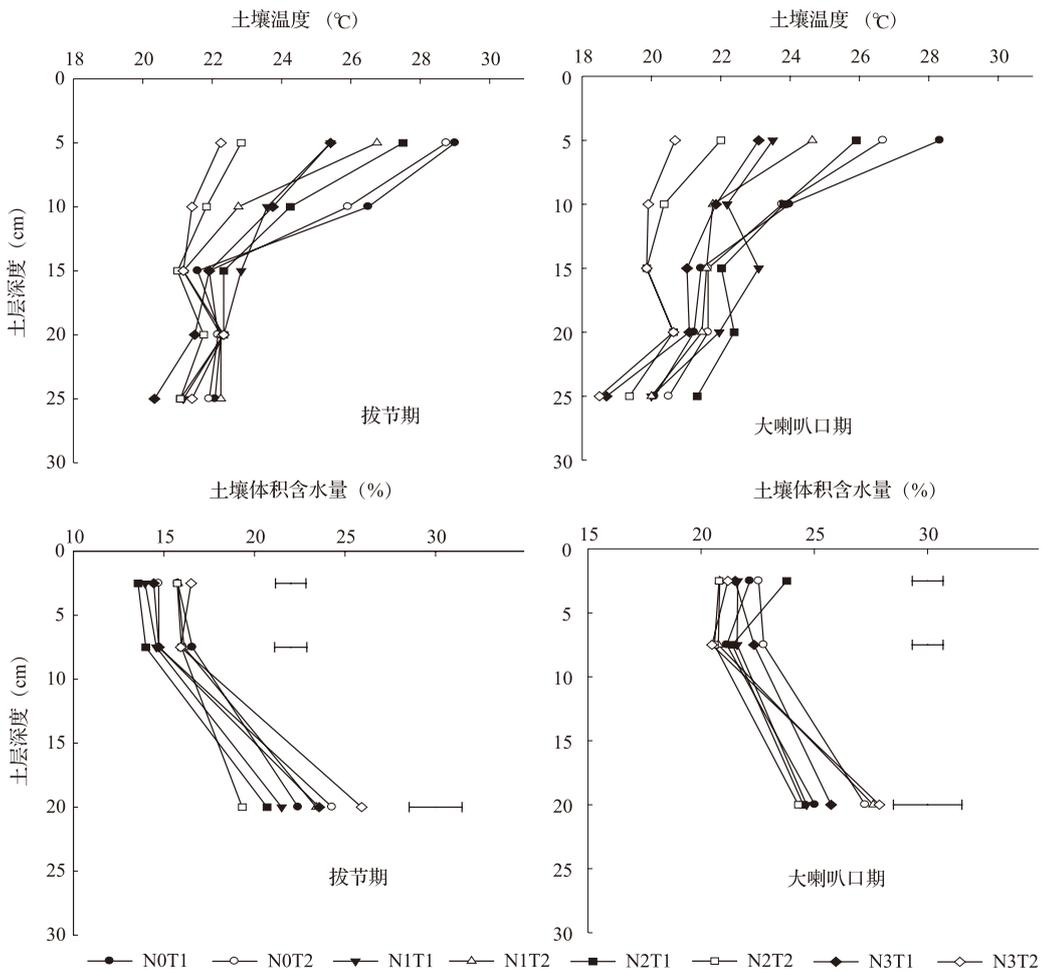


图 4 施氮对 0 ~ 30 cm 土层温度和体积含水量的影响

### 3 讨论

施用氮肥在一定范围内可以显著提高作物产量, 然而产量提升的效果随肥料投入的增多先增加后降低, 过量施氮后, 氮肥利用效率降低<sup>[19-22]</sup>。本试验发现, 增施氮肥能显著提高玉米籽粒产量和生物产量, 但 200 与 300 kg · hm<sup>-2</sup> 施氮水平间差

异不显著, 过多施氮造成了生产成本的增加, 同时降低了氮肥农学效率, 其主要原因是合理的氮肥运筹能有效地促进作物根系发育以及干物质积累与分配, 进而影响籽粒产量氮素超过一定的量, 显著地增加了玉米的生物产量, 但没有同比例的增加籽粒产量, 最终导致氮肥利用效率下降<sup>[23-25]</sup>。不同施肥时期及比例处理下的生物产量、籽粒产量和 NAE

无显著差异, 与前人<sup>[26-27]</sup> 研究结果有一定出入, 其主要原因是黄土高原半干旱区水热是主要限制因子, 氮肥对玉米的增产作用发挥的前提是通过氮素调控玉米适应水分环境, 2018 年降水充足、生育期间没有发生水分胁迫, 过多的降水可能增加氮素的淋失, 同时, 施氮后  $\text{NH}_3$  的挥发也造成植物吸收氮素之前已经损失, 使得玉米最终吸收利用的氮素只是一部分, 这是利用率低的又一重要原因<sup>[3, 19]</sup>。

增加施氮水平与施氮次数增加了  $\text{NH}_3$  挥发损失, 本试验基肥于 4 月 11 日施入后旋耕入土, 之后连续两天降水 16.7 mm, 实验装置收集到的  $\text{NH}_3$  挥发量很少, 一方面是因为基肥为缓效氮肥, 而且经翻耕入土后导致土壤表层  $\text{NH}_3$  挥发底物浓度低, 降低了  $\text{NH}_3$  挥发损失; 另一方面基肥施入后产生的降雨环境, 进一步将肥料水解之后的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  滞留在土壤深层进行硝化反应, 而不能扩散到土壤表层<sup>[9]</sup>, 所以, 深施在一定程度上可以降低氮素肥料  $\text{NH}_3$  挥发损失, 提高肥料利用效率; 玉米穴施追肥后,  $\text{NH}_3$  挥发速率迅速升高, 在 1 ~ 4 d 后达到峰值, 随后逐渐降低, 最后趋于对照。本试验中拔节期施肥后, 由于  $\text{NH}_3$  挥发测定期间出现不同程度的降水 (总计 106.8 mm), 施入的肥料大部分被溶解后流入土壤深层, 导致施氮处理间  $\text{NH}_3$  挥发速率和累积量均不显著; 大喇叭口期追肥后,  $\text{NH}_3$  挥发速率和累积量随施氮量增加逐渐升高, 施用氮肥处理和对照间差异显著, 施肥一周以后氨挥发速率出现回升, 可能是由于之前不同程度的降雨导致农田土壤温度和水分发生变化, 减少了土壤中氮素向  $\text{NH}_3$  挥发底物转化的过程,  $\text{NH}_3$  挥发速率迅速降低, 经过几天的恢复后, 又达到正常挥发水平。研究认为, 土壤水分、大气温度、地温等因素也是影响氨挥发的主要因子<sup>[27-28]</sup>。本研究中, 土壤 0 ~ 10 cm 土层温度随施氮水平的增多而降低, 10 ~ 30 cm 处无差异, 主要原因是增加了施氮量, 地上部分较大的叶面积指数产生遮阴现象, 致使浅层土壤温度差异明显, 较低的土壤温度下氨挥发损失较低, 同时, 拔节期、大喇叭口期良好水分环境一定程度上也降低了氨挥发损失。

#### 4 结论

施氮水平显著影响玉米的生物产量和籽粒产量, 将  $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  氮肥以基肥 : 拔节肥 = 1 : 2 的比例施用的玉米籽粒产量、生物产量与  $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$

的差异不显著, 但较对照显著增加 197% 和 131%, 显著提高了经济产量和固碳效应; 增加施氮水平与追肥次数潜在地增加  $\text{NH}_3$  挥发损失, 使氮肥利用率降低。因此, 在保证土壤较高经济产量和固碳能力的前提下, 使  $\text{NH}_3$  挥发损失保持在合理水平的施氮制度为: 施纯氮  $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 施肥时期和比例为基肥 : 拔节肥 = 1 : 2。

#### 参考文献:

- [1] 李欠欠, 李雨繁, 高强, 等. 传统和优化施氮对春玉米产量、氨挥发及氮平衡的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (3): 571-579.
- [2] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (4): 783-795.
- [3] 张仙梅, 黄高宝, 李玲玲, 等. 覆膜方式对旱作玉米硝态氮时空动态及氮素利用效率的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29 (5): 26-32.
- [4] Bouwman A F, Boumans L, Batjes N H. Estimation of global  $\text{NH}_3$  volatilization loss from synthetic fertilizers and animal manure applied to arable lands and grasslands [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2002, 16 (2): 53-60.
- [5] Martinez-Lagos J, Salazar F, Alfaro M, et al. Ammonia volatilization following dairy slurry application to a permanent grassland on a volcanic soil [J]. Atmospheric Environment, 2013, 80 (5): 226-231.
- [6] 周丽平, 杨俐苹, 自由路, 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.
- [7] 马国胜, 薛吉全, 张仁和, 等. 氮肥运筹对粮饲兼用玉米群体质量与产量的影响 [J]. 草业科学, 2006, (10): 63-67.
- [8] Wang X Z, Liu B, Wu G, et al. Environmental costs and mitigation potential in plastic-greenhouse pepper production system in China: A Life cycle assessment [J]. Agricultural Systems, 2018, 9 (13): 186-194.
- [9] 李少昆, 赵久然, 董树亭, 等. 中国玉米栽培研究进展与展望 [J]. 中国农业科学, 2017, 50 (11): 1941-1959.
- [10] 孟庆平, 张玉权, 常淑娟, 等. 玉米最佳收获期的主要相关性状研究初探 [J]. 玉米科学, 2007, (S1): 117-118, 120.
- [11] 马玉华, 刘兵, 张枝盛, 等. 免耕稻田氮肥运筹对土壤  $\text{NH}_3$  挥发及氮肥利用率的影响 [J]. 生态学报, 2013, 33 (18): 5556-5564.
- [12] 李雨繁, 贾可, 王金艳, 等. 不同类型高氮复混 (合) 肥  $\text{NH}_3$  挥发特性及其对氮素平衡的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21 (3): 615-623.
- [13] 王玉洁. 中国西北干旱区气候变化及典型流域影响适应研究 [D]. 南京: 南京大学, 2017.
- [14] 张艳婷. 人类活动对半干旱区气候变化的影响 [D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [15] Huang G B, Zhang R Z, Li G D, et al. Productivity and

- sustainability of a spring wheat-field pea rotation in a semi-arid environment under conventional and conservation tillage systems [J]. *Field Crop Research*, 2008, 107: 43-55.
- [16] 谢军红, 李玲玲, 张仁陟, 等. 覆膜、沟垄作对旱作农田玉米产量和水分利用的叠加效应 [J]. *作物学报*, 2018, 44 (2): 268-277.
- [17] 王红丽, 张绪成, 宋尚有, 等. 西北黄土高原旱地全膜双垄沟播种植对玉米季节性耗水和产量的调节机制 [J]. *中国农业科学*, 2013, 46 (5): 917-926.
- [18] 黄高宝, 方彦杰, 李玲玲, 等. 旱地全膜双垄沟播玉米高效用水机制研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2010, (6): 116-121.
- [19] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤  $\text{NH}_3$  挥发的原位测定——通气法 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 9 (2): 205-209.
- [20] 黄明, 段有强, 李友军, 等. 不同氮素形态配比对冬小麦氮素积累和利用的影响 [J]. *水土保持学报*, 2013, (6): 290-293, 300.
- [21] 张卫峰, 马林, 黄高强, 等. 中国氮肥发展、贡献和挑战 [J]. *中国农业科学*, 2013, 46 (15): 3161-3171.
- [22] 姜涛. 氮肥运筹对夏玉米产量、品质及植株养分含量的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19 (3): 559-565.
- [23] 闫湘, 金继运, 何萍, 等. 提高肥料利用率技术研究进展 [J]. *中国农业科学*, 2008, 41 (2): 450-459.
- [24] 侯云鹏, 李前, 孔丽丽, 等. 不同缓/控释氮肥对春玉米氮素吸收利用、土壤无机氮变化及氮平衡的影响 [J]. *中国农业科学*, 2018, 51 (20): 3928-3940.
- [25] 武良, 张卫峰, 陈新平, 等. 中国农田氮肥投入和生产效率 [J]. *中国土壤与肥料*, 2016, (4): 76-83.
- [26] 严奉君, 孙永健, 马均, 等. 秸秆覆盖与氮肥运筹对杂交稻根系生长及氮素利用的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21 (1): 23-35.
- [27] 张绪成, 于显枫, 王红丽, 等. 半干旱区减氮增钾、有机肥替代对全膜覆盖沟种种植马铃薯水肥利用和生物量积累的调控 [J]. *中国农业科学*, 2016, 49 (5): 852-864.
- [28] 周静, 崔键, 王国强, 等. 春秋季红壤旱地  $\text{NH}_3$  挥发对氮施用量、气象因子的响应 [J]. *土壤学报*, 2007, 44 (3): 499-507.

### Effects of nitrogen fertilizer management on yield, carbon sequestration and emission reduction of dryland mulched maize

XIE Jian-hui, LI Ling-ling\*, XIE Jun-hong, PENG Zheng-kai, DENG Chao-chao, SHEN Ji-cheng, WANG Jin-bin, Eunice Essel (Gansu Provincial Key Laboratory of Arid land Crop Science, Agronomy Faculty of Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu 730070)

**Abstract:** The effects of nitrogen fertilizer management on carbon sequestration and ammonia volatilization of maize under full film covered with double ridge sowing were studied based on the long-term test set up in 2012 at the loess plateau rainfed farming area. The experiment adopted the split plot design. The main treatments in the study included different nitrogen rates: no fertilization as control (N0), low nitrogen level at  $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (N1), medium nitrogen level at  $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (N2), and high nitrogen level at  $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (N3). The subplot treatments were about the period and proportion of fertilization with base fertilizer: jointing fertilizer=1:2 (T1) and base fertilizer: jointing fertilizer: bellling fertilizer=1:1:1 (T2). The results showed that: The application of  $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  nitrogen fertilizer with the ratio of basal fertilizer: jointing fertilizer=1:2 significantly improved the grain yield and biomass of maize, which increased by 197% and 131% compared with the control, respectively. NFPF and NAE were 48% and 47% lower than those with high nitrogen level. Ammonia volatilization emissions were mainly concentrated in the first week after the application of fertilizer.  $\text{NH}_3$  volatilization rate increased rapidly after fertilizer applied in holes, and reached the highest within 1 ~ 4 days, then gradually decreased, and finally tended to be same level with the control. Moreover, the higher the nitrogen level was, the higher the emission peak was. The volatile quantity of  $\text{NH}_3$  at high, medium and low nitrogen application levels increased by 6.5, 5.9 and 5.4 times compared with the control group without nitrogen application, T1 treatment significantly decreased by 37% compared with T2 treatment. N3T2 had the highest volatilization of  $\text{NH}_3$ , which was significantly increased by 13% ~ 47% compared with other treatments. The volatilization loss rate of  $\text{NH}_3$  ranged from 13% to 60%, which gradually decreased with the increase of nitrogen application level. The nitrogen application levels of high and medium nitrogen were 59.6% and 44.6% lower than those of low nitrogen application level. Compared with T2, the  $\text{NH}_3$  volatilization loss rate of T1 treatment was significantly reduced by 40.4%, and the  $\text{NH}_3$  volatilization loss was potentially increased by increasing nitrogen application level and times of fertilizer application. In conclusion, when planting maize under full film covered with double ridge sowing in the rain-fed farming area of the loess plateau, the suitable fertilization system for improving grain yield and capacity of carbon sequestration and emission reduction is as follows: Nitrogen level is  $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , and all fertilizers are applied according to the ratio of base fertilizer to jointing fertilizer=1:2.

**Key words:** full film covered with double ridge sowing; maize; nitrogen management; grain yield; carbon sequestration and emission reduction