

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.22328

氮肥运筹对黄土高原春玉米产量形成和氮代谢的调控效应

高 钰¹, 闫耀廷^{2*}, 赵 刚³, 张文伟¹, 豆丽萍¹, 李可夫¹, 宋展树², 高 丽²

(1. 庆阳市农业科学研究院, 甘肃 庆阳 745000; 2. 庆阳市农业技术推广中心, 甘肃 庆阳 745000;
3. 甘肃省农业科学院旱地农业研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 为明确黄土高原旱地春玉米减肥增效的科学生产模式, 采用完全随机裂区试验设计, 以氮肥梯度 (N1: 225 kg/hm²; N2: 275 kg/hm²; N3: 325 kg/hm²) 为主区, 在播种前、大喇叭口期追肥分别占总施氮量的 20%、40% 条件下, 以氮肥后移比例 (传统追肥 M1: 拔节期 40%; 氮肥后移 10% M2: 拔节期 30%+ 开花后 10 d 10%; 氮肥后移 20% M3: 拔节期 20%+ 开花后 10 d 20%; 氮肥后移 30% M4: 拔节期 10%+ 开花后 10 d 30%) 为副区, 测定玉米不同生育阶段硝酸还原酶 (NR) 活性、花期和成熟期茎秆叶片氮含量变化、花后氮素转运特征和籽粒产量。结果表明: M4 处理显著增加了拔节期之后玉米叶片 NR 活性, 同一氮肥运筹模式下, 中氮 (N2) 提高了灌浆期及灌浆期之后玉米叶片 NR 活性, 高氮 (N3) 反而抑制 NR 活性。氮肥后移提高了花期、成熟期玉米茎秆叶片氮含量, 成熟期 N3 处理下氮肥后移处理 M2、M3、M4 较传统追肥 M1 处理分别高 10.1%、14.7% 和 23.5%。同一施氮水平下, 氮肥后移比例越大, 玉米茎秆氮素转运量、转运率和对籽粒的贡献率越高, 而 N2 水平下, M4 处理显著增加了叶片对籽粒的贡献率。N2 和 N3 水平下 M4 处理籽粒产量无显著差异, 但 N2 处理纯利润显著高于 N3 处理。施氮 275 kg/hm² 且氮肥后移 30% (拔节期追肥 27.5 kg/hm²+ 开花后 10 d 追肥 82.5 kg/hm²) 有利于玉米增产, 促进农户增收。

关键词: 氮肥运筹; 春玉米; 氮含量; 氮素转运; 籽粒产量

玉米是中国主要粮食作物之一^[1], 在我国的经济发展中占有非常重要的地位, 种植方式、播种密度和施肥量及施肥方式对玉米产量均有很大的影响^[2], 同时玉米又是需肥量较大的作物, 合理施肥对其高产也十分重要^[1]。在农业生产中, 选择适宜分次施用氮肥是实现玉米稳产高产的重要途径之一。在播种前、拔节期或大喇叭口期追氮的基础上, 在抽雄吐丝期或开花期再次追施氮肥, 不仅能保证玉米生长中期的肥力供应, 而且能够协调玉米生长后期阶段需肥与土壤供肥的关系^[3]。从而解决玉米生育后期氮素匮乏的问题^[4], 最终提高玉米产量、改善品质和提高氮肥利用效率^[5]。研究表明, 当施肥总量既定时, 增加施肥次数有利于

提高玉米的饲用营养价值^[6]。玉米生产中, 如果后期追肥不足, 容易导致叶绿素含量下降, 引起玉米叶片早衰, 导致减产^[7]。但在总施氮量一定的条件下, 氮肥后移和有机肥替代能很好地协调玉米生长后期氮素供应不足这一问题^[8]。与氮肥一次性基施相比, 分次追施或氮肥后移不仅影响玉米光合特性, 而且可提高籽粒灌浆速率, 最终表现出增产^[1]。

氮素的吸收及利用与玉米体内氮代谢及氮代谢相关酶有密切关系^[9]。氮代谢直接或间接地对光合作用整个环节产生影响, 增施氮肥能够增加氮代谢关键酶的活性, 促进其酶促反应, 提高参与氮代谢过程中间物质的含量^[10], 而影响氮代谢的相关酶主要有硝酸还原酶 (NR)、亚硝酸还原酶 (NiR)、谷氨酰胺合成酶 (GS)、谷氨酸合酶 (GOGAT) 等^[9]。NO₃⁻ 在植物体内先还原成 NH₄⁺, 最后才能转化为植物体可直接利用的有机物谷氨酰胺^[11], 而将 NO₃⁻ 还原成 NH₄⁺ 这一代谢过程需要 NR 和 NiR 参与完成, NR 与 NiR 在氮代谢中以偶联调节的形式对氮代谢进行调节^[12]。施用氮肥可显著

收稿日期: 2022-05-26; 录用日期: 2023-01-03

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFD19007); 农业农村部耕地质量提升与化肥减量增效项目。

作者简介: 高钰 (1968-), 高级农艺师, 大专, 主要从事农作物品种选育与推广。E-mail: 283278969@qq.com。

通讯作者: 闫耀廷, E-mail: 304668348@qq.com。

调节玉米植株的氮代谢, 提高内肽酶和氨肽酶活性, 氮肥不足和过量会抑制 NR 活性^[13]。郭萍等^[14]研究表明, 施氮显著提高了玉米叶片氮代谢关键酶 (GOGAT 和 GS) 活性。Wang 等^[15]认为, 285 mg/hm² 施氮量处理与 195 mg/hm² 施氮量处理相比, 小麦旗叶 NR 活性无明显差异。

前人对于玉米氮肥后移的研究, 多集中于氮肥后移对玉米干物质积累^[1]、籽粒产量、氮素吸收利用^[6]和耗水特性^[16]等方面, 对于氮代谢酶的研究, 主要集中于不同施氮量、不同氮素形态配比^[14]、禾豆间作^[9]等对玉米氮代谢酶的影响。而关于不同施氮梯度结合氮肥后移对春玉米影响的研究较少, 特别是不同氮肥梯度下氮肥后移对氮代谢酶的调控效应方面的研究少有报道。因此, 本研究通过连续两年试验, 在特定施氮量条件下, 将传统一次性追施氮肥施肥中部分拔节肥移至开花期追施, 研究氮肥后移对春玉米叶片 NR 活性、不同器官氮含量和籽粒产量的影响, 明确氮肥

后移的可行性及其后移比重, 为玉米氮素营养诊断、提高氮肥利用效率和降低氮素损失提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验于 2018—2019 年每年 4—9 月在甘肃省庆阳市镇原县 (35° 30' N, 107° 29' E) 进行, 该区地处陇中黄土高原丘陵沟壑区, 海拔 1772.3 m, 年均气温 8.3℃, 无霜期 155 d, ≥ 10℃ 的有效活动积温 2664℃ 左右, 多年年均降水量 500 mm 左右。土壤属黄绵土, 0 ~ 200 cm 土层平均土壤容重为 1.23 g/cm³。试验地 0 ~ 30 cm 土层土壤基本理化性状为: 全氮 0.98 g/kg, 碱解氮 89.1 mg/kg, 有效磷 12.8 mg/kg, 速效钾 233.1 mg/kg, 有机质 11.4 g/kg, pH 值 7.4, 田间持水量 21.8%, 玉米生育期降水量和平均气温如图 1 所示。

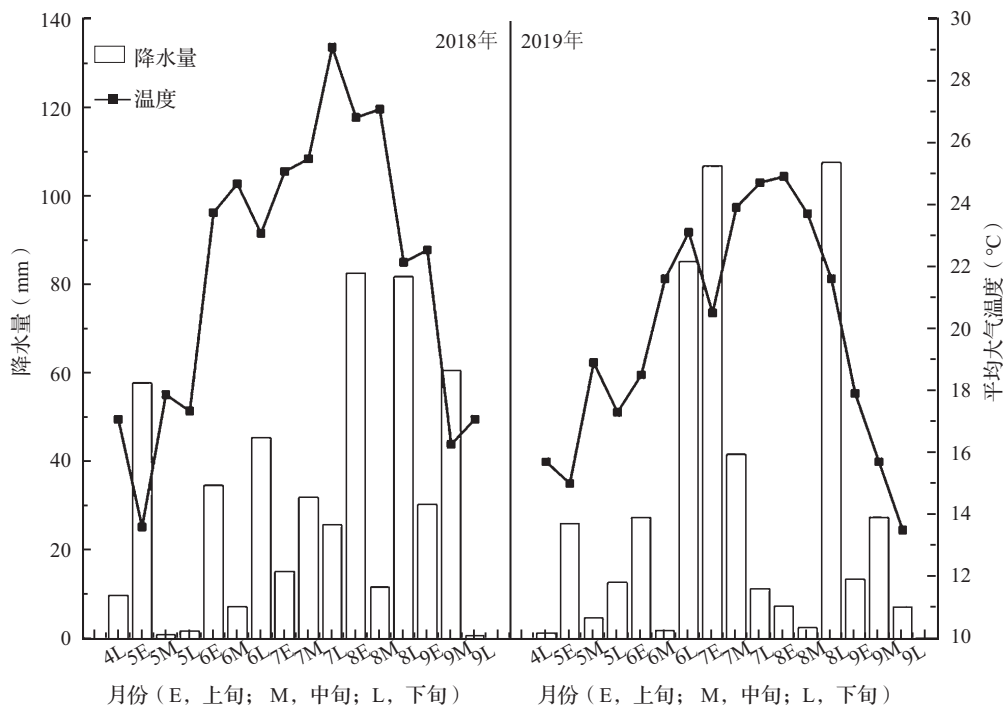
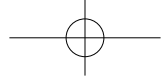


图 1 玉米生育期降水量和大气平均温度

1.2 试验设计

试验以‘先玉 335’玉米品种为供试材料, 采用裂区试验设计, 以氮肥梯度为主区, 以拔节期和开花后 10 d 氮肥追肥量为副区。设

置 N1 (225 kg/hm²)、N2 (275 kg/hm²)、N3 (325 kg/hm²) 3 个施氮量, 基肥、大喇叭口期施肥量分别占总施氮量的 20%、40%; 设置 4 个不同追肥量: M1—拔节期 40% (传统追肥)、M2—拔节



期 30%+ 开花后 10 d 10% (氮肥后移 10%)、M3-拔节期 20%+ 开花后 10 d 20% (氮肥后移 20%)、M4-拔节期 10%+ 开花后 10 d 30% (氮肥后移 30%)。氮肥品种为尿素 (N 46%)。施磷 (P_2O_5) 150 kg/hm², 磷肥品种为过磷酸钙 (P_2O_5 16%)。

试验采用全膜双垄沟播技术, 大垄宽 70 cm, 小垄宽 40 cm, 大、小垄间自然形成播种沟, 沟内打孔点播, 株距 25 cm, 种植密度 75000 株/hm²。试验小区长 6 m、宽 5 m, 小区面积 30 m²。2018 年 4 月 27 日播种, 9 月 26 日收获, 生育期 153 d; 2019 年 4 月 25 日播种, 9 月 29 日收获, 生育期 157 d。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 硝酸还原酶活性测定

在玉米主要生育时期 (苗期、拔节期、大喇叭口期、开花期、灌浆期和成熟期) 采集玉米功能叶, 开花之前主要采集生长中心叶片, 花期开始采集棒三叶, 田间用锡箔纸包裹好叶片, 装入液氮罐中保存, 带回实验室采用邹琦^[17]的方法测定 NR 活性, 单位: $\mu\text{g}/(\text{gFW} \cdot \text{h})$ 。

1.3.2 地上部氮含量

分别于苗期、拔节期、大喇叭口期、开花期、灌浆期和成熟期, 每小区选取标记的相似株 5 株, 取其地上部分, 于 105℃ 烘箱中杀青 30min, 而后将温度降至 80℃ 烘干至恒重, 分别称取叶片、茎、苞叶和穗的干物质量。通过粉碎机粉碎, 混匀, 采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消化, 以半微量凯氏定氮法测定植株各器官氮含量^[18], 各指标计算公式如下^[19]:

$$\text{各器官氮素积累量} = \text{各器官干物质量} \times \text{各器官含氮率}$$

$$\text{各器官氮素转运量} = \text{各器官初花期氮素积累量} - \text{各器官成熟期氮素积累量}$$

$$\text{各器官氮素转运率}(\%) = \frac{\text{各器官氮素转运量}}{\text{各器官初花期氮素积累量}} \times 100$$

$$\begin{aligned} \text{各器官转运氮素对籽粒的贡献率}(\%) \\ = \frac{\text{各器官氮素转运量}}{\text{成熟期籽粒氮素积累量}} \times 100 \end{aligned}$$

1.3.3 籽粒产量测定

收获时按小区单打单收, 晒干后称取玉米籽粒质量, 测得小区实际产量。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 和 SPSS 24.0 对数据进行统计分析。采用一般线性模型单变量法进行方差分析和

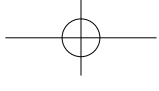
多重比较 ($\alpha=0.05$)。利用 Excel 2016 作图。图表中数据为平均值 $\pm$ 标准差。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥运筹方式下玉米叶片硝酸还原酶活性动态变化

由图 2 可知, 不同氮肥运筹方式下玉米叶片 NR 活性随生育进程的推进先升高后下降, 氮肥运筹方式对玉米叶片 NR 活性的影响因处理和生育时期而异。苗期, 在同一施氮水平下, 不同氮肥运筹方式仅影响 2019 年 NR 活性, N1 水平下, M1 较 M3 和 M4 分别高 82.4% 和 76.2% ($P<0.05$); N2 水平下, M1 较 M2、M3 和 M4 分别高 22.9%、27.6% 和 32.6%。在同一 M 水平下, 2018 年 NR 活性随施氮量的增加先升高后下降, 2019 年在 M2、M4 和 M3 水平下, 随施氮量的增加而增加。拔节期, M1 玉米叶片 NR 活性最高。在同一追肥比例下, NR 活性 2018 年随施氮量的增加先升高后下降, N2 较 N1 和 N3 平均高 51.8% 和 40.9%, 2019 年在 M2、M3 和 M4 水平下, 随施氮量的增加而增加, N3 较 N1 和 N2 平均高 19.6% 和 8.9%。

大喇叭口期, 两个生长季各不同氮处理下 NR 活性均表现出 M4 最高, M3 次之, M1 最低 (2018 年 N1M1 除外)。2018 年 M3 处理下, NR 活性随施氮量的增加先升高后下降, 而 M4 处理下, NR 活性随施氮量的增加而增加。2019 年同一 M 水平下, NR 活性随施氮量的增加而增加, N3 较 N1、N2 分别高 16.0%、6.1% (M1), 14.4%、3.3% (M2), 15.2%、5.7% (M3), 14.3%、4.6% (M4)。开花期, 与 M1 处理相比, 不同氮水平下 M3 和 M4 处理表现出较高的 NR 活性。在同一 M 水平下, 2018 年各处理玉米叶片 NR 活性均随施氮量的增加先升高后下降, 2019 年 M1、M3 和 M4 处理下随施氮量的增加而增加。灌浆期, 2018 年 M2、M3、M4 处理玉米叶片 NR 活性较 M1 分别高出 30.0%、34.1%、49.8% (N1), 22.6%、39.5%、43.8% (N2) 和 13.8%、30.4%、24.5% (N3), 2019 年分别高出 22.7%、32.2%、42.7% (N1), 86.3%、140.8%、137.5% (N2) 和 6.9%、13.6%、23.3% (N3)。在同一 M 水平下, 玉米叶片 NR 活性均随施氮量的增加先升高后下降 (2019 年 M1 随施氮量的增加而增加)。成熟期 M3 和 M4 处理间玉米叶片 NR 活性无显著差异, 但显著高于 M1 和 M2 处理。在同一



M 水平下, 2018 年玉米叶片 NR 活性均随施氮量的增加先升高后下降, N2 较 N1、N3 平均高 34.8%、14.5%, 2019 年随施氮量的增加而下降, N3、N2 较 N1 平均低 15.6%、19.0%。

综上所述, 玉米叶片 NR 活性在灌浆期之前, 2018 年随施氮量的增加先升高后下降, N2 处理下 NR 活性最高, 2019 年随施氮量的增加而升高, N3 处理下 NR 活性最高; 灌浆期之后, 玉米叶片

NR 活性随施氮量的增加先升高后下降。而氮肥后移对玉米叶片 NR 活性的影响主要表现在拔节期之后, 大喇叭口期、开花期和灌浆期, 氮肥后移 30% (M4) 处理 NR 活性均最高。可见, 氮肥后移对玉米叶片 NR 活性的影响越到玉米生长发育后期越明显, 且中氮 (N2) 处理提高了灌浆期及灌浆期之后玉米叶片 NR 活性, 高氮 (N3) 处理反而抑制了灌浆期及灌浆期之后玉米叶片 NR 活性。

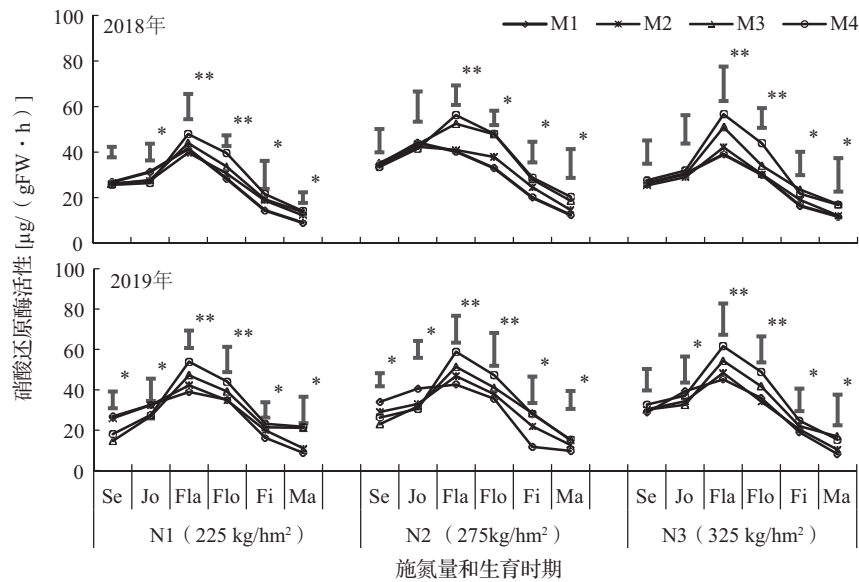


图2 氮肥运筹方式对全膜双垄沟播玉米硝酸还原酶活性的影响

注: Se, 苗期; Jo, 拔节期; Fla, 大喇叭口期; Flo, 开花期; Fi, 灌浆期; Ma, 成熟期。

2.2 不同氮肥运筹方式下玉米茎叶花期、成熟期氮含量变化

由图3可知, 不同氮肥运筹方式下玉米茎、叶的氮含量花期最高, 成熟期最低, 不同氮肥运筹方式下花期、成熟期茎叶氮含量存在差异。

两个生长季花期茎秆氮含量在同一施氮水平下随氮肥后移比例的增加而增加, 在同一氮肥后移比例处理下随施氮量的增加而增加。不同施氮水平下, 氮肥后移处理茎秆氮含量显著高于传统追肥处理。不同追施氮肥比例下, 茎秆氮含量随施氮量的增加而升高, N3 较 N1、N2 平均高 92.8%、19.1% (2018 年) 和 59.0%、7.8% (2019 年)。成熟期, N1 水平下, M3 处理茎秆氮含量最高, 较 M1 处理高 23.8% (2018 年) 和 6.0% (2019 年); N2 水平下, M4 处理茎秆氮含量最高, 较 M1 处理高 59.3% (2018 年) 和 45.4% (2019 年); N3 水平下, 氮肥后移处理茎秆氮含量高于传统追肥处理。在 M1、

M2、M3 处理下, 茎秆氮含量随施氮量的增加而升高; M4 处理下, 随施氮量的增加而升高。

对于叶片氮含量, 花期两个生长季均表现为在同一施氮水平下随氮肥后移比例的增加而增加, 在同一氮肥后移比例处理下随施氮量的增加而增加。花期, 与 M1 处理相比, M4 处理显著提高了叶片氮含量。成熟期, 2018 年氮肥后移较传统追肥处理叶片氮含量高 22.3% ~ 41.7% (N1)、12.8% ~ 36.0% (N2) 和 23.9% ~ 34.6% (N3); 2019 年除 N1 处理外, 氮肥后移处理叶片氮含量显著高于传统追施氮肥处理。

2.3 不同氮肥运筹方式下玉米茎叶氮素转运量

由表1可知, 氮肥 (N)、氮肥后移比例 (M)、氮肥 × 氮肥后移比例 (N × M) 均能显著影响玉米茎秆、叶片中氮素转运量、转运率以及茎秆和叶片对籽粒中氮素的贡献率。与 M1 处理相比, 不同氮肥水平下 M3、M4 处理显著提高了茎秆氮素

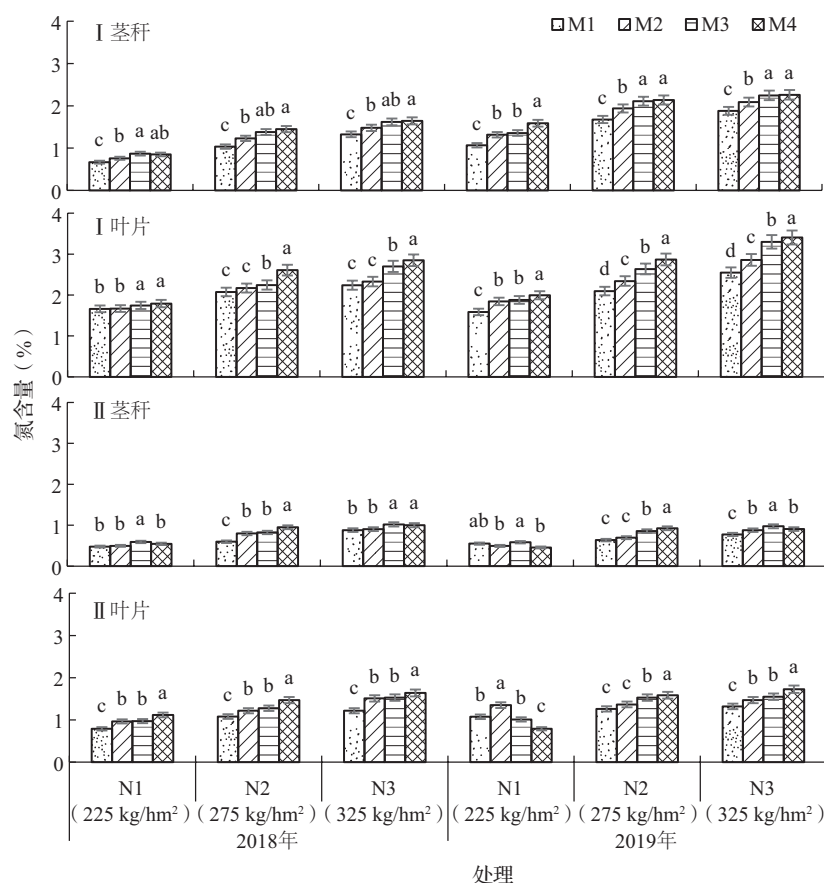


图3 不同氮肥运筹方式下玉米花期、成熟期各器官氮含量

注: I, 花期; II, 成熟期。

转运量。在同一处理下, 两个生长季茎秆氮素转运量均表现出随施氮量的增加而升高, N3 水平显著增加了茎秆氮素转运量。N2 水平下, 氮素转运率随氮肥后移比率的增加而提高, M4 较 M1、M2 分别显著提高 42.2%、20.8% (2018 年) 和 41.8%、36.9% (2019 年)。在 M2 和 M3 处理下, 氮素转运率随施氮量的增加先下降后升高; M4 处理下, 2018 年氮素转运率随施氮量的增加先下降后升高, 而 2019 年随施氮量的增加先升高后下降。就两个生长季平均值而言, 对籽粒中氮素的贡献率表现为 N3>N2>N1、M4>M3>M2>M1, 说明在同一施氮水平下, 氮肥后移比例越大, 玉米茎秆氮素转运量、转运率和对籽粒的贡献率越高。

同一施氮水平下, 除个别处理外, 叶片氮素转运量随氮肥后移比率的增加而增加。与 M1 处理相比, 不同氮肥水平下 M4 处理显著提高了叶片氮素转运量 (2018 年除外)。同一 M 处理下, 叶片

氮素转运量随施氮量的增加而增加, 与 N1 相比, 不同氮肥后移比率下 N2 和 N3 均提高了叶片氮素转运量。与 M1 处理相比, M4 处理显著提高了各氮水平下叶片氮素转运率。2018 年不同施氮水平下, 对籽粒的贡献率随氮肥后移比率的增加而升高; 2019 年 N2、N3 水平下, 随氮肥后移比率的增加先降低后升高。不同氮肥后移处理下, 2018 年 N2 和 N3 较 N1 分别提高 31.8% 和 49.7% (M2)、28.8% 和 31.2% (M3)、34.9% 和 35.6% (M4); 2019 年 N2 较 N3 和 N1 分别提高 47.2% 和 13.3% (M2)、1.5% 和 2.2% (M3)、24.4% 和 8.1% (M4)。低氮和高氮水平下, M3 和 M4 处理间叶片氮素转运量无显著差异; 中氮水平下, M4 处理显著高于其他处理。M4 处理显著增加了叶片对籽粒的贡献率。相比较而言, 叶片中平均氮素转移量较茎秆低 7.04%, 叶片中氮素对籽粒的贡献率较茎秆高 28.71%。



表 1 不同氮肥运筹方式对玉米茎秆和叶片氮素转运量、转运率及其对籽粒中氮素贡献率的影响

年份			茎 秆			叶 片		
			转运量 (g/ 株)	转运率 (%)	贡献率 (%)	转运量 (g/ 株)	转运率 (%)	贡献率 (%)
2018	N1	M1	12.53 ± 1.23d	34.77 ± 5.44bc	25.48 ± 0.58e	15.74 ± 1.34e	36.12 ± 2.25bc	44.67 ± 2.31d
		M2	13.93 ± 0.85d	31.69 ± 3.82c	23.01 ± 1.45e	16.69 ± 2.21e	34.19 ± 3.34c	50.18 ± 1.83d
		M3	21.82 ± 2.37c	38.97 ± 4.11a	37.78 ± 2.22cd	22.15 ± 2.19de	38.30 ± 1.82a	60.45 ± 2.36c
		M4	23.63 ± 1.14c	41.40 ± 1.25a	38.47 ± 1.49cd	23.70 ± 0.88de	38.81 ± 0.94a	71.00 ± 7.14bc
	N2	M1	17.95 ± 0.99cd	26.90 ± 0.94d	21.96 ± 0.83e	32.13 ± 4.46cd	38.67 ± 2.21a	68.10 ± 4.23bc
		M2	25.87 ± 2.33bc	31.65 ± 3.17c	36.96 ± 0.96cd	31.02 ± 2.29cd	35.19 ± 5.61bc	66.16 ± 5.55bc
		M3	31.26 ± 3.12b	32.93 ± 2.09c	40.46 ± 5.44c	38.44 ± 3.33bc	37.86 ± 4.22ab	77.87 ± 4.15b
		M4	40.14 ± 4.92ab	38.24 ± 6.13a	58.86 ± 3.81b	47.78 ± 0.94a	39.46 ± 3.97a	95.75 ± 8.82a
	N3	M1	22.75 ± 3.83c	26.67 ± 1.52d	32.00 ± 4.44d	33.30 ± 4.18c	33.59 ± 4.43c	61.63 ± 5.44c
		M2	33.45 ± 4.11b	33.10 ± 4.23bc	44.70 ± 6.12c	35.26 ± 3.67c	33.21 ± 0.83c	75.10 ± 6.38b
		M3	45.82 ± 5.26a	40.29 ± 6.67a	68.83 ± 5.87a	45.12 ± 4.21ab	34.14 ± 1.17c	79.31 ± 5.11b
		M4	47.55 ± 5.17a	39.60 ± 5.49a	65.56 ± 1.19a	52.81 ± 2.85a	37.00 ± 3.64ab	96.30 ± 3.29a
2019	N1	M1	24.69 ± 0.56f	37.95 ± 2.07c	61.15 ± 2.24d	19.80 ± 1.53e	45.24 ± 4.16b	82.60 ± 4.17bc
		M2	36.64 ± 1.22f	42.56 ± 5.31bc	74.08 ± 6.67c	18.97 ± 2.03e	33.36 ± 2.88e	50.07 ± 3.12d
		M3	44.08 ± 3.84e	44.59 ± 6.22ab	80.47 ± 5.54bc	29.89 ± 1.11d	45.57 ± 1.59b	83.73 ± 5.63b
		M4	57.10 ± 6.91de	47.31 ± 6.06a	89.79 ± 11.22a	34.84 ± 2.25d	48.67 ± 6.22a	94.82 ± 8.94a
	N2	M1	41.79 ± 5.44e	34.20 ± 3.88c	51.98 ± 8.87e	38.28 ± 2.41d	43.29 ± 5.43bc	76.34 ± 2.25c
		M2	51.57 ± 5.83de	35.42 ± 0.68c	54.84 ± 7.13e	42.49 ± 5.66cd	42.43 ± 1.98cd	73.69 ± 1.19c
		M3	72.81 ± 9.16cd	44.37 ± 1.27ab	79.77 ± 6.55bc	57.67 ± 4.15c	45.93 ± 2.23b	84.95 ± 6.94b
		M4	84.89 ± 5.69ab	48.49 ± 7.13a	94.12 ± 10.05a	69.10 ± 6.77b	49.27 ± 3.67a	97.14 ± 11.25a
	N3	M1	60.87 ± 11.33d	44.47 ± 5.44ab	80.10 ± 11.27bc	57.48 ± 6.03c	48.35 ± 4.19a	93.60 ± 8.83a
		M2	70.49 ± 10.05cd	43.69 ± 1.09ab	77.59 ± 3.86bc	54.11 ± 5.44c	39.42 ± 5.24d	65.06 ± 5.16c
		M3	81.46 ± 5.27b	45.66 ± 2.44ab	84.04 ± 9.55ab	77.24 ± 9.99ab	45.38 ± 5.15b	83.08 ± 4.45b
		M4	90.09 ± 3.33a	48.23 ± 5.61a	93.15 ± 4.41a	85.05 ± 6.54a	47.33 ± 4.31ab	89.86 ± 6.66ab
方差分析	年 (Y)	15.9*		22.1**	2.3*	22.6ns	5.7ns	
	N	33.2*	11.2ns	30.6*	9.1**	3.4*	8.5**	
	M	2.9**	5.9*	7.8*	16.4*	15.5*	22.3*	
	Y × N	22.4ns	8.3ns	12.5ns	21.0*	31.7ns	7.7ns	
	Y × M	18.7ns	22.6ns	9.9*	18.8ns	4.9ns	18.2ns	
	N × M	6.9**	15.4*	13.7*	28.4*	15.3*	4.3*	
	Y × N × M	5.2ns	22.3ns	30.6*	11.5ns	27.1ns	25.4ns	

注：同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)；*、**、ns 分别表示 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P>0.05$ 。下同。

2.4 不同氮肥运筹方式对玉米产量及其构成因素的影响

由表 2 可知，N、M 和 $N \times M$ 显著影响玉米穗数、穗粒数和产量， $Y \times M$ 显著影响玉米穗粒数和产量， $Y \times N \times M$ 显著影响玉米穗粒数。不同氮水平下氮肥后移均提高了玉米穗数，提高幅度为

1.7% ~ 13.1%。在 M1、M4 (2018 年) 和 M3、M4 (2019 年) 处理下，玉米穗数随施氮量的增加先升高后下降。在 2018 年 M2 和 M3 处理下，随施氮量的增加而升高；在 2019 年 M1 和 M2 处理下，随施氮量的增加先降低后升高。穗粒数随氮肥后移比例的增大而增加，不同氮水平下 M3、M4 处理显著增

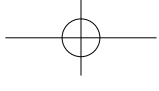
加了穗粒数,增幅为 5.0% ~ 13.5%。玉米穗粒数在 M1 和 M3 处理下,随施氮量的增加而增加,M4 处理下,随施氮量的增加先升高后下降。氮肥后移比率对玉米百粒重无显著影响,但随施氮量的增加而增加,N2 和 N3 较 N1 分别平均高出 10.1%、9.8% (2018 年) 和 4.8%、0.8% (2019 年)。

在同一施氮水平下,玉米籽粒产量随氮肥后移比例的增大而增加,氮肥后移较传统追肥处理高出 505% ~ 21.1% (2018 年) 和 4.5% ~ 36.1% (2019

年)。在 M1、M2 和 M3 处理下,2018 年 N2 籽粒产量较 N1、N3 分别提高 10.9%、7.8% (M1), 8.4%、7.3% (M2) 和 12.7%、11.3% (M3)。2019 年 N2、N3 籽粒产量较 N₁ 分别提高 7.3%、10.0% (M₁), 8.4%、8.5% (M2) 和 15.5%、17.4% (M3); 在 M4 处理下,N2 处理籽粒产量最高。可见,氮肥主要通过增加穗数、穗粒数和百粒重来增产,而氮肥后移比率主要通过增加玉米穗数和穗粒数来增产,且二者耦合效应显著。

表 2 不同氮肥运筹方式对玉米籽粒产量及其构成因子的影响

年份	处理		穗数 (个/hm ²)	穗粒数 (个)	百粒重 (g)	产量 (kg/hm ²)
2018	N1	M1	65442.8 ± 124.6d	548.69 ± 15.54e	28.68 ± 0.67d	5656.30 ± 188.54f
		M2	66546.8 ± 237.8c	555.02 ± 22.31e	29.18 ± 1.54cd	6138.10 ± 213.29e
		M3	66705.8 ± 328.5c	576.12 ± 8.94d	29.95 ± 0.39cd	6324.92 ± 199.61d
		M4	67023.0 ± 166.2bc	600.39 ± 22.37cd	32.46 ± 1.55b	6672.46 ± 125.73c
	N2	M1	65597.3 ± 544.5d	582.18 ± 18.22d	31.66 ± 3.64c	6273.97 ± 223.37de
		M2	68295.2 ± 432.4bc	591.93 ± 20.11cd	33.03 ± 2.58ab	6651.23 ± 259.68c
		M3	70471.4 ± 555.5b	622.57 ± 9.45bc	32.05 ± 5.71b	7127.37 ± 303.44b
		M4	72862.6 ± 333.3a	653.75 ± 12.23a	35.76 ± 2.24a	7235.14 ± 274.19ab
	N3	M1	65546.2 ± 455.6d	583.04 ± 22.45d	30.83 ± 4.19c	5819.27 ± 166.53f
		M2	70070.9 ± 587.4b	611.15 ± 30.04c	31.99 ± 3.22bc	6196.19 ± 202.31de
		M3	71740.6 ± 635.2ab	649.89 ± 28.87a	33.60 ± 1.15ab	6402.42 ± 255.55d
		M4	72548.2 ± 566.6a	651.13 ± 30.12a	35.69 ± 0.94a	7375.55 ± 164.33a
2019	N1	M1	674472.2 ± 230.1d	526.33 ± 15.43e	30.63 ± 1.26b	5151.78 ± 119.92f
		M2	679315.5 ± 412.6d	557.15 ± 16.64d	31.60 ± 3.55b	5467.19 ± 257.76e
		M3	695259.2 ± 553.8cd	602.89 ± 18.88cd	32.36 ± 4.16ab	6016.05 ± 311.52c
		M4	706547.4 ± 514.9c	636.89 ± 22.63bc	33.41 ± 1.67a	6292.11 ± 296.45c
	N2	M1	645457.5 ± 607.8e	610.03 ± 32.11c	32.81 ± 2.24ab	5529.47 ± 220.07de
		M2	668137.6 ± 229.9e	631.88 ± 34.14bc	32.84 ± 1.59ab	5928.88 ± 180.00cd
		M3	722152.6 ± 166.7b	654.69 ± 28.92b	33.85 ± 2.43a	6948.81 ± 305.40b
		M4	730082.3 ± 583.0a	692.69 ± 37.16a	34.64 ± 2.91a	7524.59 ± 188.47a
	N3	M1	663325.3 ± 419.7e	612.47 ± 22.29c	32.98 ± 4.53ab	5667.93 ± 236.59d
		M2	706100.0 ± 558.8c	629.28 ± 18.83c	33.08 ± 2.88a	5932.07 ± 288.64cd
		M3	695375.5 ± 607.1cd	656.44 ± 24.99b	33.28 ± 1.76a	7062.37 ± 329.40b
		M4	715550.4 ± 444.0bc	688.13 ± 25.55a	33.68 ± 3.64a	7546.71 ± 355.66a
方差分析	年 (Y)		323.25ns	67.88ns	3.33ns	67.41ns
	N		544.17*	23.11*	2.99*	55.39*
	M		236.73*	94.33**	1.24ns	43.22**
	Y × N		443.95ns	35.19ns	4.11ns	33.24ns
	Y × M		117.88ns	44.42*	2.63ns	55.11*
	N × M		566.36*	18.84*	0.97ns	22.10*
	Y × N × M		375.55ns	36.55*	1.15ns	43.56ns



2.5 不同氮肥运筹方式下效益分析

由图 4 可知, N2 和 M4 处理下产投比最高。毛收入 2018 年以 N2 处理最高, 较 N1 和 N3 分别显著高出 10.1% 和 5.8%, 2019 年 N2 与 N3 处理间无显著差异, 较 N1 显著高出 13.1% 和 14.3%。N2 处理下纯利润最高, 较 N3 高出 10.8% (2018 年) 和 1.0% (2019 年)。M4 处理下毛收入和纯利润均最高, M1 处理最低。M4 处理纯利润较 M1、M2、M3 分别显著高出 28.5%、16.5%、9.8% (2018 年) 和 45.6%、33.7%、9.1% (2019 年)。就氮肥用量而言, N2 不仅提高了玉米产投比, 而且增加了纯利润, 与 N3 处理相比, 具有减肥增效的作用。就追肥时间而言, M4 处理纯利润显著高于其他处理, 达到 7969.4 元/hm² (2018 年) 和 8009.6 元/hm² (2019 年)。

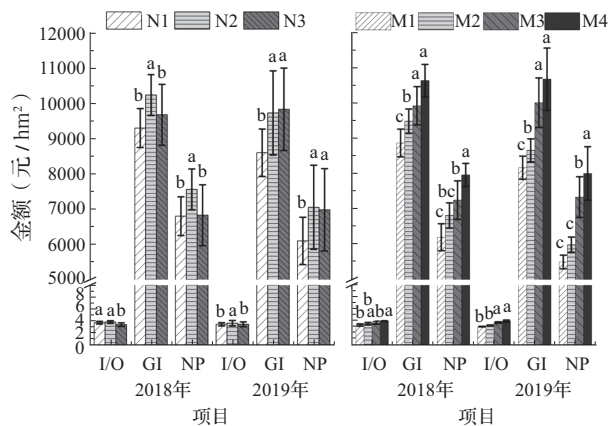


图 4 不同氮肥运筹方式对玉米产投比、毛收入和纯利润的影响

注: I/O, 产投比; GI, 毛收入; NP, 纯利润。

3 讨论

3.1 氮肥运筹下玉米叶片硝酸还原酶活性变化

NR 是 NO₃⁻ 同化的第一个酶, 其活性强弱与植物对氮的利用能力密切相关, 对植物生长发育、产量形成和植物产品的品质形成都有重要影响^[20]。有研究表明当尿素施用量为 180 kg/hm² 时, 拔节期叶片 NR 活性最大^[21]。本研究中, 在灌浆期之前, 2018 年玉米叶片 NR 活性随施氮量的增加先升高后下降, 而 2019 年随施氮量的增加而升高。2018 年 NR 活性变化与前人研究不一致, 因为前人多研究不同施氮梯度下 NR 活性变化, 而本研究还涉及氮

肥后移比例。

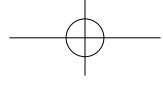
3.2 氮肥运筹下玉米茎秆、叶片氮含量及转运量变化

合理的氮肥运筹模式不仅能满足玉米生长发育需求, 促进氮素吸收, 同时还能提高肥料利用效率, 以达到玉米高产高效目的^[6]。在一定范围内, 植株氮素吸收量和氮含量随施氮量的增加而增大, 继续增加施氮量反而降低植株氮含量^[19]。本试验中, 花期玉米茎秆和叶片氮含量均表现出在同一施氮水平下随氮肥后移比例的增加而增加, 在同一氮肥后移比例处理下随施氮量的增加而增加。苟志文等^[22]研究发现, 玉米分次追施氮肥较拔节期一次性施用氮肥显著提高植株总吸氮量和籽粒吸氮量, 且籽粒吸氮量的提高更加显著。本研究中, N2 水平下氮肥后移 30% 处理氮含量最高, 较传统追肥高 59.3% (2018 年) 和 45.4% (2019 年)。究其原因可能是适当增加氮肥后移比例增加了花期玉米氮代谢关键酶活性, 保证玉米叶片中氮代谢系统的畅通和高效运转, 进而提高玉米对氮素的吸收^[23]。

作物籽粒中的氮素主要来源于两个方面, 一是籽粒形成过程中根系从土壤中的吸收, 另一方面是营养器官中氮素的重新分配, 而营养器官中氮素的重新分配对保证作物生殖生长阶段和生育后期的氮素需要至关重要^[24]。有研究表明, 叶片、茎秆和生殖器官 (如颖片) 中的氮素向籽粒的再分配比率大于 60%, 即使开花后土壤氮素供应充足, 籽粒中也至少有 50% 的氮素来自营养器官^[25]。本研究发现, 同一施氮水平下, 氮肥后移比例越大, 玉米茎秆氮素转运量、转运率和对籽粒的贡献率越高; N2 水平下, 氮肥后移 30% 处理显著增加了叶片对籽粒的贡献率。

3.3 氮肥运筹下玉米籽粒产量变化

合理增施氮肥显著增加作物产量, 但持续增施氮肥对提高产量没有进一步贡献^[26]。N、M 显著影响玉米穗数、穗粒数和产量。2018 年玉米籽粒产量随施氮量的增加先升高后下降, 2019 年随施氮量的增加而增加。两年间变化趋势不一致, 这可能与土壤中氮素留存和降水量有关, N3 施氮量较大, 前茬作物未能充分利用。除氮肥施用量外, 作物生物量、氮素的高积累以及光合产物和氮素向籽粒分配等都影响玉米籽粒产量^[27]。传统追施氮肥使得玉米前期氮素累积过多, 对后期氮素吸收以及转运

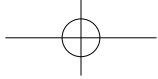


有抑制作用,不利于籽粒灌浆而使产量降低,而适当的延迟氮肥追肥时期,可保证土壤有效氮素持续供应^[22]。

综上所述,等养分条件下氮肥后移,有利于提高玉米灌浆期及灌浆期之后 NR 活性,且氮肥后移比例越大,茎秆氮素转运量、转运率和对籽粒的贡献率越高,氮肥后移 30% 显著增加了叶片对籽粒的贡献率。氮肥主要通过增加穗数、穗粒数和百粒重来增产,而氮肥后移比率主要通过增加玉米穗数和穗粒数来增产,且二者耦合效应显著。可见,适宜的施氮量结合一定比例的氮肥后移措施在实现作物高产与养分资源的高效利用方面具有一定的意义。

参考文献:

- [1] 魏廷邦,胡发龙,赵财,等. 氮肥后移对绿洲灌区玉米干物质积累和产量构成的调控效应[J]. 中国农业科学, 2017, 50(15): 2916-2927.
- [2] 万鹏,杜锦,曹高燚,等. 施钾量对玉米产量及叶片部分酶活性的影响[J]. 玉米科学, 2016, 24(6): 149-154.
- [3] 李二珍,靳存旺,闫洪,等. 氮肥分次施用比例对春玉米光合速率及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(5): 12-16.
- [4] 景立权,赵福成,刘萍,等. 施氮对超高产夏玉米干物质及光合特性的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(2): 317-326.
- [5] 侯云鹏,杨建,尹彩侠,等. 氮肥后移对春玉米产量、氮素吸收利用及土壤氮素供应的影响[J]. 玉米科学, 2019, 27(2): 146-154.
- [6] 张吉旺,王空军,胡昌浩,等. 施氮时期对夏玉米饲用营养价值的影响[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1337-1342.
- [7] 王红丽,张绪成,于显枫,等. 半干旱区氮肥运筹对全膜双垄沟播玉米水肥利用和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(2): 449-458.
- [8] 王进斌,谢军红,李玲玲,等. 氮肥运筹对陇中旱农区玉米光合特性及产量的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(1): 60-69.
- [9] 赵雅姣,刘晓静,童长春,等. 紫花苜蓿||玉米间作对玉米氮代谢相关酶活性的影响[J]. 草原与草坪, 2019, 39(3): 63-71.
- [10] 王彬,王玉波,佟桐,等. 不同施氮模式对玉米光合特性和氮代谢关键酶的影响[J]. 玉米科学, 2020, 28(2): 135-142.
- [11] 越鹏. 甜菜叶片衰老超微结构变化及氮对光合特性调控与 Rubisco 抗体制备[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2010.
- [12] 杜永成,王玉波,范文婷,等. 不同氮素水平对甜菜硝酸还原酶和亚硝酸还原酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 717-723.
- [13] 于寒,孙杨,王丹,等. 膜下滴灌玉米叶片氮素积累及氮代谢酶活性[J]. 分子植物育种, 2018, 16(20): 6855-6860.
- [14] 郭萍,朱从桦,查丽,等. 缓释尿素与普通尿素不同配比对玉米氮代谢酶和氮素利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(6): 99-150.
- [15] Wang D, Yu Z W. Effect of nitrogen application levels on nitrogen assimilation and grain protein components accumulation in strong gluten wheat[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2007, 21(5): 147.
- [16] 滕园园,赵财,柴强,等. 氮肥后移对玉米间作豌豆耗水特性的调控效应[J]. 作物学报, 2016, 42(3): 446-455.
- [17] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [19] 崔政军,刘栋,吴兵,等. 水氮耦合对旱地胡麻产量形成与花后氮素积累转运的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(3): 909-918.
- [20] 李文龙,吕英杰,刘笑鸣,等. 氮肥对不同氮效率玉米氮代谢酶和氮素利用及产量的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(9): 1829-1835.
- [21] 牛巧龙,曹高燚,杜锦,等. 施氮量对玉米产量及叶片部分酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(1): 187-192.
- [22] 苟志文,胡发龙,赵财,等. 氮肥后移满足绿洲灌区全膜覆盖玉米的氮素需求[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 888-895.
- [23] 王宜伦,李潮海,谭金芳,等. 氮肥后移对超高产夏玉米产量及氮素吸收和利用的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(2): 339-347.
- [24] 张振华,宋海星,刘强,等. 油菜生育期氮素的吸收、分配及转运特性[J]. 作物学报, 2010, 36(2): 321-326.
- [25] 杨睿,伍晓明,安蓉,等. 不同基因型油菜氮素利用效率的差异及其与农艺性状和氮营养性状的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 586-596.
- [26] 刘朋召,王旭敏,宁芳,等. 减量施氮对渭北旱地春玉米产量、氮素利用及土壤硝态氮含量的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2621-2629.
- [27] 吕鹏,张吉旺,刘伟,等. 施氮时期对高产夏玉米氮代谢关键酶活性及抗氧化特性的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(6): 1591-1598.



Regulation effects of nitrogen fertilizer management on grain yield formation and nitrogen transportation of spring maize in the Loess Plateau, China

GAO Yu¹, YAN Yao-ting^{2*}, ZHAO Gang³, ZHANG Wen-wei¹, DOU Li-ping¹, LI Ke-fu¹, SONG Zhan-shu², GAO Li²
(1. Qingyang Academy of Agricultural Sciences, Qingyang Gansu 745000; 2. Qingyang Agricultural Technology Extension Center, Qingyang Gansu 745000; 3. Gansu Academy of Agricultural Sciences Institute of Dryland Agriculture, Lanzhou Gansu 730070)

Abstract: A completely random split zone test with nitrogen application level as main plots and nitrogen-fertilizer postponing application ratio as sub-plots was designed to clarify the scientific production mode for reducing fertilizer application and increasing efficiency of spring maize in the dryland of Loess Plateau. Three nitrogen application levels were 225 kg/hm² (N1), 275 kg/hm² (N2) and 325 kg/hm² (N3); sub-plot was nitrogen-fertilizer postponing application ratio, based on base application of 20% nitrogen-fertilizer before sowing and topdressing of 40% nitrogen-fertilizer at the big bell mouth stage, four types of nitrogen-fertilizer postponing application ratio were set up, including M1: traditional nitrogen application, i.e. 40% nitrogen-fertilizer applied at jointing stage; M2: 10% of nitrogen postponing applied, i.e. 30% nitrogen-fertilizer applied at jointing stage and 10% at 10 days after flowering stage; M3: 20% of nitrogen postponing applied, i.e. 20% nitrogen-fertilizer applied at jointing stage and 20% at 10 days after flowering stage; M4: 30% of nitrogen postponing applied, i.e. 10% nitrogen-fertilizer applied at jointing stage and 30% at 10 days after flowering stage. The nitrate reductase (NR) activity in leaves at different growth stages of spring maize, the changes of nitrogen contents of stems and leaves at anthesis and maturity stages, nitrogen transport characteristics after anthesis and grain yield were determined. Results showed that the treatment of M4 significantly increased the activity of NR after jointing in maize leaves, under the same nitrogen fertilizer management mode, medium nitrogen (N2) increased the activity of NR at filling stage and after filling stage of maize leaves, while high nitrogen (N3) inhibited the activity of NR. Nitrogen-fertilizer postponing application increased the nitrogen content of maize stems and leaves at anthesis and maturity stages, nitrogen content of maize leaves in N3 with nitrogen-fertilizer postponing application treatments were 10.1%, 14.7% and 23.5% higher than that of M1, respectively. At the same nitrogen level, the more ratio of nitrogen-fertilizer postponing application, the more nitrogen translocation amount, translocation rate and the contribution rate of nitrogen to grain of spring maize stems, while the treatment of M4 significantly increased the contribution rate of leaves to grains at the N2 level. There was no significant difference in grain yield between N2 and N3 treatments in M4. However, the net profit of N2 treatment was significantly higher than that of N3 treatment. Nitrogen application of 275 kg/hm² and 30% nitrogen fertilizer (27.5 kg/hm² N fertilizer was topdressing at the joining stage + 82.5 kg/hm² at 10 days after flowering) was beneficial to the increase of maize yield and farmers' income.

Key words: nitrogen fertilizer management; spring maize; nitrogen content; nitrogen translocation; grain yield