

氮肥基追比例对滴灌春小麦氮代谢及氮肥利用率的影响

王海琪, 黄艺华, 蒋桂英, 刘钰婷, 车子强

(石河子大学农学院, 新疆 石河子 832000)

摘要: 探讨减氮模式下氮肥不同基追比例对滴灌春小麦氮代谢关键酶活性、氮素积累转运、产量及氮肥利用率的影响, 为新疆麦区滴灌春小麦高效生产提供科学依据。以中筋型“新春 6 号”(XC 6)和强筋型“新春 37 号”(XC 37)小麦品种为材料, 设置 0 : 0, 2 : 8, 3 : 7, 4 : 6, 5 : 5 共 5 种氮肥基追比处理, 研究氮肥基追比例对滴灌春小麦氮代谢及氮肥利用率的影响。结果表明: 同一品种下, 随氮肥基追比例的增加, 氮代谢酶活性、氮素积累、氮肥利用率(NUE)、籽粒产量及蛋白质产量均呈现先升高后降低的趋势, 花前氮素转运率、花前氮素贡献率及氮肥生理利用效率(NPE)则呈相反变化, 且同一氮肥基追比例下, 上述指标均表现出 XC 37 高于 XC 6。品种与氮肥基追比互作表现为, 花前氮素转运量、花后氮素积累量、花后氮素贡献率、NUE、氮肥农学利用效率(NAE)、氮肥偏生产量(NPEP)、氮收获指数(NHI)、籽粒产量、蛋白质产量在 3 : 7 处理下分别比其余处理提高了 1.51%~34.93%, 10.62%~83.63%, 4.82%~25.38%, 8.00%~45.11%, 6.97%~19.84%, 2.00%~5.80%, 7.95%~40.38%, 1.44%~84.86%, 4.44%~98.04%。相关分析表明, NUE 与蛋白质产量、籽粒产量、植株氮素积累量、GS、NR 均呈显著正相关。说明在氮肥基追比例为 3 : 7 时, 由于氮代谢酶活性增强, 有利于植株氮素积累, 促进籽粒产量、蛋白质产量及氮素利用率的协同提高。

关键词: 滴灌春小麦; 氮肥基追比例; 氮代谢酶活性; 氮素积累与转运; 氮肥利用率

中图分类号: S512.1; S311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)01-0297-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.01.038

Effects of Base Topdressing Ratio of Nitrogen Fertilizer on Nitrogen Metabolism and Use Efficiency of Spring Wheat Under Drip Irrigation

WANG Haiqi, HUANG Yihua, JIANG Guiying, LIU Yuting, CHE Ziqiang

(College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000)

Abstract: To investigate the effects of different base topdressing rates of nitrogen (N) fertilizer on the activity of key enzymes of N metabolism, N accumulation and transport, yield and N fertilizer utilization in drip irrigated spring wheat under N reduction mode, and to provide a scientific basis for the efficient production of drip irrigation spring wheat in Xinjiang wheat area, with medium gluten Xinchun 6 (XC 6) and strong gluten Xinchun 37 (XC 37) as materials, five nitrogen base topdressing ratios of 0 : 0, 2 : 8, 3 : 7, 4 : 6 and 5 : 5 were set to study the effects of nitrogen base topdressing ratio on nitrogen metabolism and nitrogen use efficiency of spring wheat under drip irrigation. The results showed that, with increasing N fertilizer basal rate, nitrogen metabolism enzyme activity, nitrogen accumulation, nitrogen fertilizer utilization rate (NUE), seed yield and protein yield all tended to increase and then decrease, while pre-flowering nitrogen translocation rate, pre-flowering nitrogen contribution rate, and nitrogen fertilizer physiological utilization efficiency (NPE) showed the opposite trend, and the above parameters were higher in XC 37 than XC 6 at the same N fertilizer basal rate. The interact of variety and N fertilizer basal chase ratio showed that pre-flowering N translocation, post-flowering N accumulation, post-flowering N contribution, NUE, N fertilizer agronomic use efficiency (NAE), N fertilizer partial production (NPEP), N harvest index (NHI), seed yield, and protein yield were increased by 1.51%~34.93%, 10.62%~83.63%, 4.82%~25.38%, 8.00%~45.11%, 6.97%~19.84%, 2.00%~5.80%, 7.95%~40.38%, 1.44%~84.86%, 4.44%~98.04%, respectively, under 3 : 7

收稿日期: 2021-07-28
资助项目: 国家自然科学基金项目(31760346)
第一作者: 王海琪(1996—), 女, 硕士在读研究生, 主要从事作物生理生态研究。E-mail: 1486410951@qq.com
通信作者: 蒋桂英(1967—), 女, 教授, 主要从事作物生理生态研究。E-mail: jgy67@126.com

treatment compared to the rest of the treatments. Correlation analysis showed that NUE was significantly and positively correlated with protein yield, seed yield, plant nitrogen accumulation, GS, and NR. Therefore, a 3 : 7 ratio of nitrogen fertilizer base topdressing could improve plant nitrogen accumulation and promote seed yield, protein yield and nitrogen utilization based on the increase of nitrogen metabolizing enzyme activity.

Keywords: spring wheat with drip irrigation; ratio of basal fertilizer nitrogen to topdressing nitrogen; enzyme activity of nitrogen metabolism; nitrogen accumulation and transport; nitrogen use efficiency

小麦(*Triticum aestivum* L.)是新疆最重要的粮食作物,2020 年全疆小麦种植面积达到 1.62×10^6 hm^2 ,约占粮食作物总播种面积的 48.18%^[1]。通常为追求高产,新疆小麦生产采用高肥高产模式,其中,氮肥占肥料施用总量的 60%~80%左右,氮肥利用率仅为 30%~35%^[2]。过量施氮不仅带来肥料浪费及土壤酸化、氮氧化物排放加剧等环境问题^[3-4],且种植小麦的生产成本不断增加,效益逐年下降。因此,探索协同提高小麦产量与氮肥利用率的技术模式对新疆小麦高效可持续发展具有重要意义。

作物对氮素的吸收、利用受到基因型和环境因素的共同影响。合理的氮肥运筹方式可以促进小麦植株的氮素积累,有利于氮素向籽粒中转运,从而提高小麦产量和氮肥利用率^[5-6]。通常黄淮海麦区适宜的氮肥施用量一般为 270 kg/hm^2 左右,在氮肥基追比为 3 : 7 下可获得最高的籽粒产量和氮肥利用效率^[7];长江中下游流域麦区施氮量一般为 220~250 kg/hm^2 ,在基追肥比例为 6 : 4 时的小麦产量和氮肥利用率高于其余处理^[8]。适宜的施氮量及施氮方式可促进小麦氮素积累与转运,花前氮素积累量可达小麦籽粒氮素含量的 70%,而花后氮素积累量仅占 30%^[9]。当施氮量由 180 kg/hm^2 增加至 240 kg/hm^2 时,可促进强筋小麦植株花前氮素积累量和花后氮素再运转,并提高籽粒蛋白质含量^[10]。硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)、谷氨酸合成酶(GOGAT)等是作物氮素同化的关键酶^[11],籽粒蛋白质含量与 NR、GS 酶活性关系密切,较高的氮代谢酶活性可促进氮素同化、运转,有利于籽粒蛋白质的累积^[12]。一般在施氮量为 0~270 kg/hm^2 范围内,增施氮肥可显著提高 NR、GS、GOGAT 酶活性,促进各器官氮素积累量,最终提高产量和氮素利用率^[13]。马新明等^[14]认为,强筋小麦比中筋、弱筋小麦获得更高的含氮量,从而具有更高的籽粒蛋白质含量。因此,较高的氮代谢酶活性有利于促进氮素的积累与转运及提高籽粒产量和氮肥利用率。

滴灌技术已成为新疆小麦生产的主体栽培技术。前人的研究多集中于施氮量对小麦氮代谢酶活性及氮素积累、分配的影响,而对于减氮模式下,不同氮肥基追比例对滴灌春小麦旗叶和籽粒氮代谢酶活性、氮

素积累分配及氮素利用率的调控效应尚缺乏报道。基于此,本试验选取新疆当地强筋、中筋小麦品种为材料,研究在适宜减氮条件下不同氮肥基追比例对小麦植株氮代谢、产量及氮素利用率的影响,明确氮素向籽粒转运,协调提高产量和氮肥利用率的氮素响应机制,以期新疆麦区滴灌小麦氮肥的高效利用和高产栽培提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于 2020 年 4—7 月在新疆石河子市石河子大学农学院实验站(85°59'E,44°20'N)进行。供试土壤类型为灌溉灰漠土,试验地基础土样土壤农化性状:0—40 cm 土层 pH 7.8,全氮、有机质含量分别为 1.28,28.40 g/kg ;碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为 71.23,15.70,148.00 mg/kg 。2020 年平均气温 6.9~7.4 $^{\circ}\text{C}$,年内最高气温出现在 7—8 月上旬;年均降水量 162.1~193.2 mm,属平水年型,年蒸发量 1 517.1~1 563.2 mm,相对湿度在 54.75%左右,生育期间的气象指标变化见图 1。

1.2 试验设计

采用裂区设计,主区为品种,副区为氮肥基追比例。供试品种为当地主栽品种“新春 6 号”(XC 6,中筋,蛋白质含量 13.50%)和“新春 37 号”(XC 37,强筋,蛋白质含量 16.03%)。全生育期施氮量为 250 kg/hm^2 ,氮肥基追比例为基肥:生育期间追肥处理为 0 : 0(不施氮),2 : 8(基肥 20%+追肥 80%),3 : 7(基肥 30%+追肥 70%),4 : 6(基肥 40%+追肥 60%),5 : 5(基肥 50%+追肥 50%),3 次重复。其中,氮肥由尿素(N=46%)提供, P_2O_5 120 kg/hm^2 ,施入纯氮具体用量见表 1。小区面积为 60 m^2 (12 m $\times$ 5 m),在每个小区地块之间嵌入深度为 100 cm 的防渗膜,以防止养分横向转移。

播期为 2020 年 3 月 28 日,播量为 345 kg/hm^2 。采用“一管四”宽窄行滴灌种植模式,滴灌带行距配置见图 2。滴头之间的距离为 30 cm,滴头流量为 2.6 L/h,滴管直径 16 mm。全生育期灌溉定额为 6 000 m^3/hm^2 ,灌溉水量由水表控制,共灌溉 9 次。其他田间管理措施同大田生产。

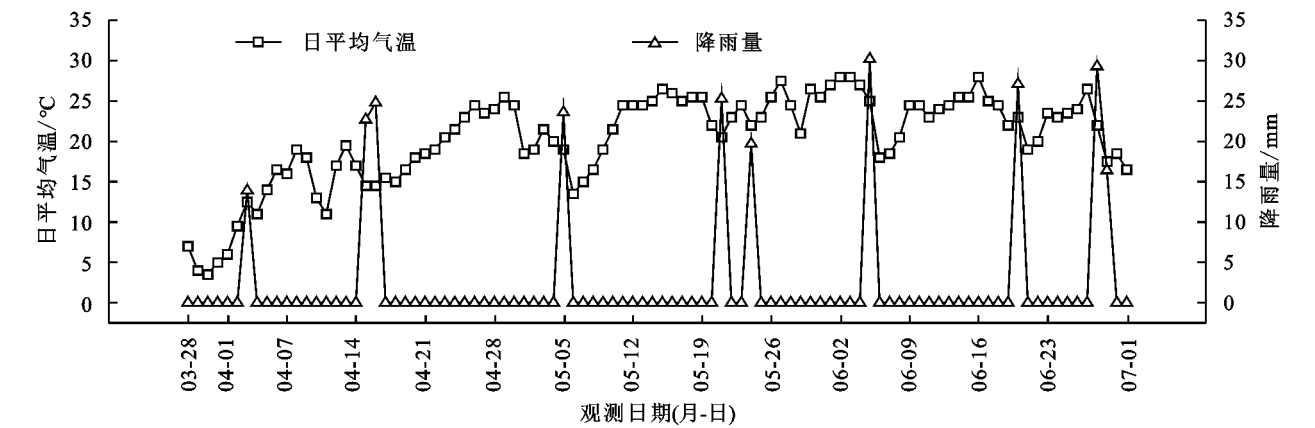


图 1 2020 年小麦生育时期日平均气温及降雨量

表 1 各处理氮肥基肥追肥施用量					
单位: kg/hm ²					
处理	基肥	追肥			
		分蘖期 (20%)	拔节期 (40%)	孕穗期 (20%)	开花期 (20%)
0:0	0	0	0	0	0
2:8	50	40	80	40	40
3:7	75	35	70	35	35
4:6	100	30	60	30	30
5:5	125	25	50	25	25

1.3 测定指标及方法

1.3.1 旗叶、籽粒氮代谢关键酶活性 分别于开花期及花后每 7 天取样直至成熟期,旗叶、籽粒的取样和测

定同步进行,各处理取 30 穗和旗叶30 片。其中一部分立即置于液氮中速冻,置于一80 ℃冰箱中保存。在冰浴条件下研磨,并在 13 000 r/min 离心得到粗酶提取液,用以测定籽粒氮代谢关键酶活性;另一部分烘至恒重,研磨粉碎,用以蛋白质的提取、测定。

硝酸还原酶(NR)测定参考李合生^[15]的方法进行;
谷氨酰胺合成酶(GS)测定参考 Cren 等^[16]方法进行;

谷氨酸合成酶(GOGAT)测定参考 Singh 等^[17]方法进行;

籽粒蛋白质含量^[18] = 成熟期籽粒氮含量 × 5.7

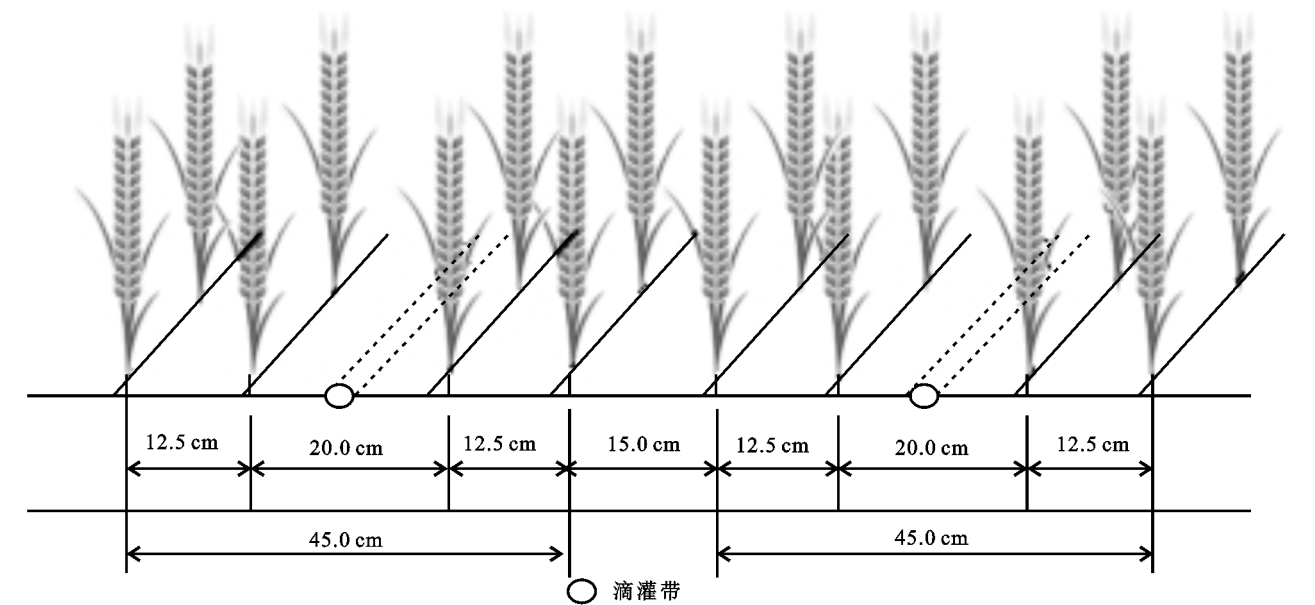


图 2 小麦田间滴灌带配置

1.3.2 氮素积累及转运计算指标 于小麦开花期,选择生长均匀的叶、茎鞘、穗取样并标记挂牌;再于开花期、花后 7,14,21,28,35 天取样,并分部位按叶、茎鞘、穗轴+颖壳和籽粒分装,于 105 ℃杀青,70 ℃烘干,称重。采用半微量凯氏定氮法测定全氮含量。各处理重复 3 次。

氮素积累量^[19] = 全氮含量 × 干物质重
花前氮素转运量 = 开花期积累量 - 成熟期氮素积累量

花前氮素转运率 = 花前氮素转运量 / 开花期氮素积累量 × 100%

花前氮素积累贡献率 = 花前氮素积累量 / 成熟期总氮素积累量

花后氮素积累量 = 成熟期总氮素积累量 - 花前氮素积累量

花后氮素积累贡献率 = 花后氮素积累量 / 成熟期总氮素积累量 × 100%

1.3.3 籽粒产量及蛋白质产量 成熟期,各处理随机选 1 m² 面积的植株进行人工收割脱粒,晒干称重,计算籽粒产量,重复 3 次。

蛋白质产量=籽粒产量×蛋白质含量

1.3.4 氮素利用率计算指标

氮肥利用率^[20] (NUE)=(施氮区吸氮量-无氮区吸氮量)/施氮量×100%

氮肥农学利用率(NAE)=(施氮区籽粒产量-无氮区籽粒产量)/施氮量

氮肥生理利用效率(NPE)=籽粒产量/植株地上部氮素积累量

氮肥偏生产力(NPEP)=施氮区作物产量/施氮量

氮肥收获指数(NHI)=籽粒氮素积累量/成熟期植株氮素积累量

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 22.0 软件进行数据处

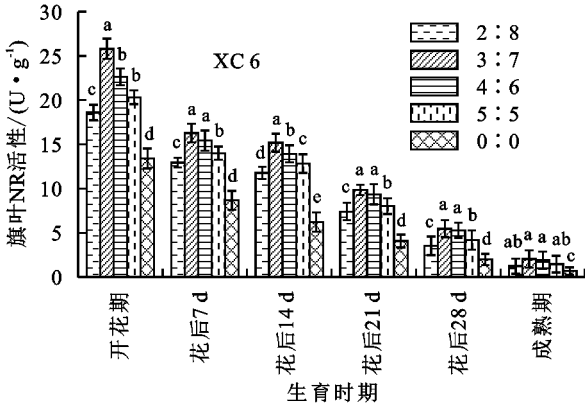


图 3 氮肥基追比例对滴灌春小麦旗叶 NR 活性的影响

由图 4 可知,XC 6 和 XC 37 的籽粒 NR 活性与旗叶 NR 活性变化趋势相同,均在开花期达到峰值。同一时期 2 品种 NR 活性总体表现为 3 : 7 处理最大,且在开花时,籽粒 NR 活性分别为 53.71,55.70 U/g,此时,表现为 XC 37 籽粒 NR 活性较 XC 6 高

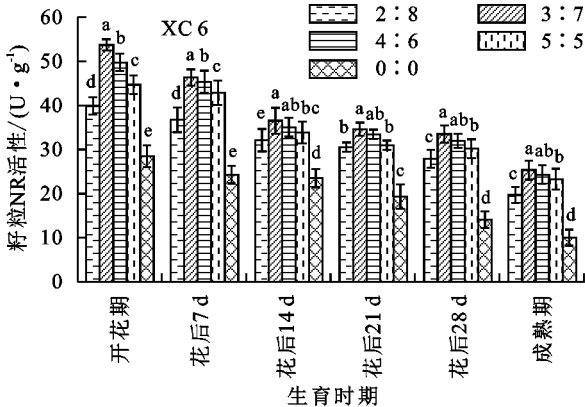


图 4 氮肥基追比例对滴灌春小麦籽粒 NR 活性的影响

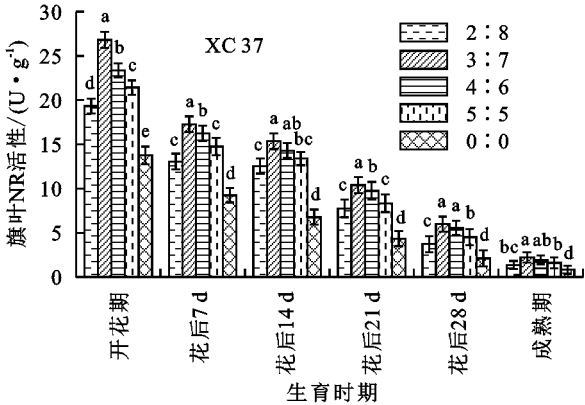
2.1.2 旗叶、籽粒谷氨酰胺合成酶(GS)活性变化 GS是调节氮同化过程的关键酶,XC 6 和 XC 37 旗叶 GS 活性变化均随花后天数增加逐渐减小(图 5),

理,利用 SPSS 22.0 统计软件 LSD 法进行显著性及方差分析,采用 Origin 2018b 软件作图。

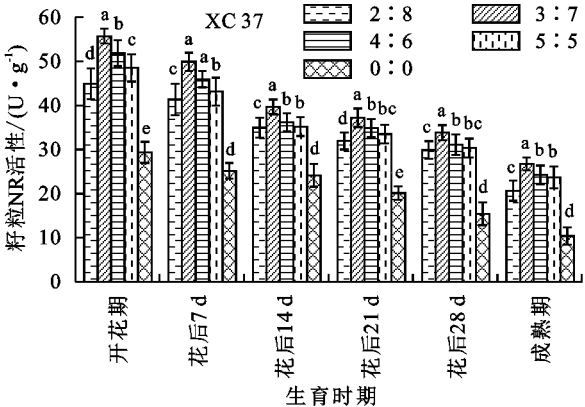
2 结果与分析

2.1 氮肥基追比例对滴灌春小麦旗叶、籽粒氮代谢关键酶影响

2.1.1 旗叶、籽粒硝酸还原酶(NR)活性变化 NR 是植物氮代谢过程中的限速酶,由图 3 可知,XC 6 和 XC 37 旗叶 NR 活性变化均随花后天数增加呈现递减趋势,开花时达到最大,且同一时期 2 个品种 NR 活性均表现为 3 : 7>4 : 6>5 : 5>2 : 8>0 : 0。开花时,在 3 : 7 处理下,XC 6 旗叶 NR 活性为 25.81 U/g,与其他处理差异显著(P<0.05),较其他处理提高 14.05%~92.32%;XC 37 旗叶 NR 活性为 26.81 U/g,显著高于其他处理(P<0.05),分别提高 14.77%~94.84%。此外,开花时,在 3 : 7 处理下,XC 37 号旗叶 NR 活性较 XC 6 号高 3.87%。



3.23%~12.59%,且 XC 6 和 XC 37 的籽粒 NR 活性在 3 : 7 时均与其他处理差异显著(P<0.05),分别提高 7.96%~88.85%,7.47%~89.71%,说明适宜的氮肥基追比例有利于提高小麦旗叶和籽粒中的 NR 活性。



在开花期最大,且随着氮肥基追比例的增加,同一时期内 2 个品种旗叶 GS 活性均表现为 3 : 7>4 : 6>5 : 5>2 : 8>0 : 0。开花时,在 3 : 7 处理下,XC 6

旗叶 GS 活性为 0.87 U/g,与其他处理差异显著 ($P<0.05$),较其他处理提高 1.04%~13.26%;XC 37 旗叶 GS 活性为 0.89 U/g,与其他处理差异也显

著($P<0.05$),较其他处理提高 1.37%~14.18%,此时 2 个品种间,在 3:7 处理下,XC 37 旗叶 GS 活性较 XC 6 高 1.72%。

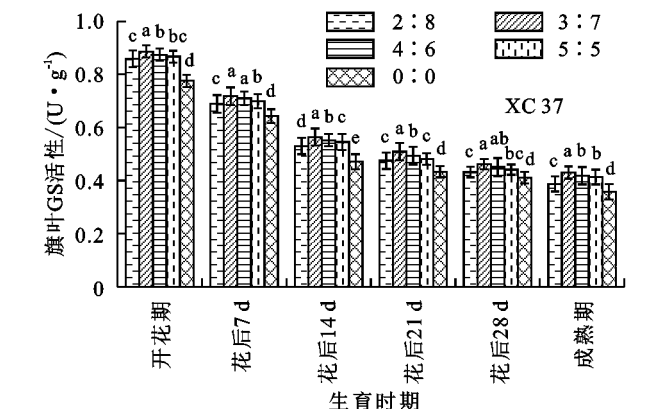
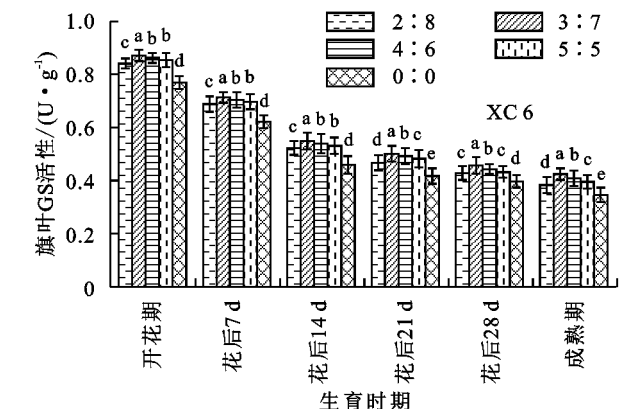


图 5 氮肥基追比例对滴灌春小麦旗叶 GS 活性的影响

与旗叶 GS 活性变化相比,XC 6 和 XC 37 籽粒中 GS 活性呈相似的变化趋势(图 6),均随着花后天数的增加逐渐减小,同一时期内各处理间表现为随基追比例增加而先增后减的趋势,于 3:7 处理表现最大。开花时,在 3:7 处理下 2 个品种籽粒 GS 活性分别为 0.51,0.53 U/g,XC 6 和 XC 37 籽粒 GS 活性均与其他处

理差异显著($P<0.05$),较其他处理分别提高 4.05%~47.28%,3.54%~43.60%。2 个品种间各生育时期 XC 6 籽粒 GS 活性均低于 XC 37,且在 3:7 处理下,开花时 XC 37 籽粒 GS 活性较 XC 6 高 2.53%。说明适宜的氮肥基追比例可促进 NR 和 GS 活性的提高,进而影响小麦对氮素的同化能力。

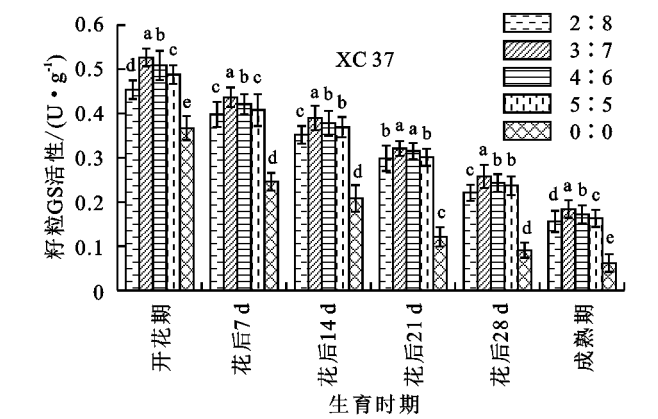
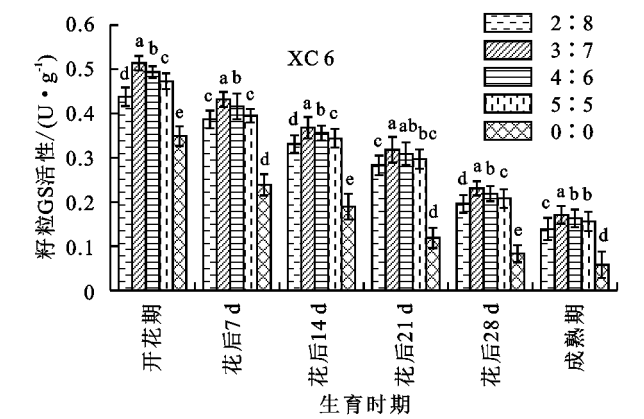


图 6 氮肥基追比例对滴灌春小麦籽粒 GS 活性的影响

2.1.3 旗叶、籽粒谷氨酸合成酶(GOGAT)活性变化 GOGAT 是氮同化中氨基酸合成的关键酶。小麦旗叶 GOGAT 与 NR、GS 活性变化趋势一致,均随花后天数的增加逐渐减小(图 7),于开花期活性最高,同一时期均表现为 3:7>4:6>5:5>2:8>0:0。开花期 3:7 处理下,XC 6 旗叶 GOGAT 活性为 4.32 U/g,与 4:6 处理差异不显著,但显著高于其他处理 ($P<0.05$),较其他处理提高 1.22%~8.18%;XC 37 的旗叶 GOGAT 活性为 4.51 U/g,与其他处理差异显著,较其他处理提高 2.27%~12.49%;开花时 2 个品种相比较,XC 37 的旗叶 GOGAT 活性较 XC 6 高 4.37%。

XC 6 和 XC 37 籽粒 GOGAT 活性均与其他各处理差异显著($P<0.05$),较其他处理分别提高 10.89%~40.64%,10.23%~45.21%,除此之外,2 个品种间,XC 37 籽粒 GOGAT 活性较 XC 6 高 3.56%。

籽粒 GOGAT 活性变化与旗叶变化相似,且不同氮肥基追比例之间表现为 3:7 处理最高,0:0 处理最低(图 8)。开花时在 3:7 处理下,2 个品种 GOGAT 活性最大,分别为 1.41,1.46 U/g,且此时

2.1.4 籽粒蛋白质含量的变化 小麦籽粒蛋白质的形成取决于对氮素的吸收、同化、转运和再利用,是评价小麦品质的重要指标之一。由图 9 可知,XC 6 和 XC 37 的籽粒蛋白质含量均随花后天数增加而增加,成熟时达到高峰;2 个品种同一时期内籽粒蛋白质含量总体表现为 3:7>4:6>5:5>2:8>0:0。成熟时,XC 6 籽粒蛋白质含量在 3:7 处理下为 13.35%,与 4:6 差异不显著,但显著高于其余处理,高出 1.44%~23.61%;XC 37 籽粒蛋白质含量在 3:7 处理下为 15.89%,与其他处理差异显著($P<0.05$),高出 2.25%~30.67%,此时 XC 6 籽粒蛋白质含量较 XC 37 低 15.98%。XC 6、XC 37 的籽

粒蛋白质含量与旗叶和籽粒 NR 活性、GS 活性以及旗叶 GOGAT 活性均存在显著正相关关系(表 2),说明

氮代谢关键酶能够显著影响籽粒蛋白质含量,通过调控氮代谢关键酶活性进而提高籽粒蛋白质含量。

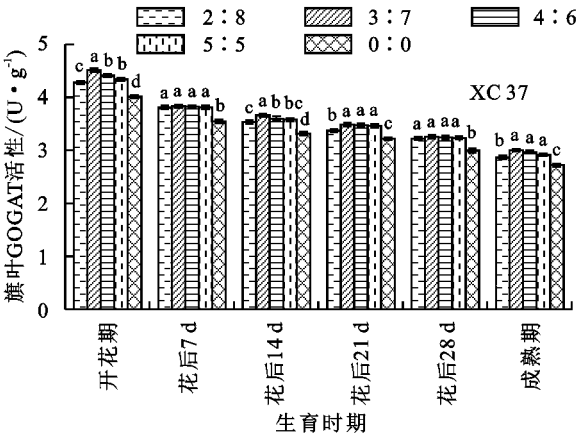
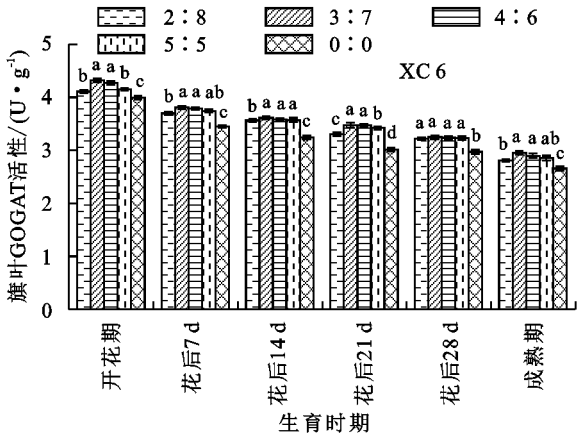


图 7 氮肥基追比例对滴灌春小麦旗叶 GOGAT 活性的影响

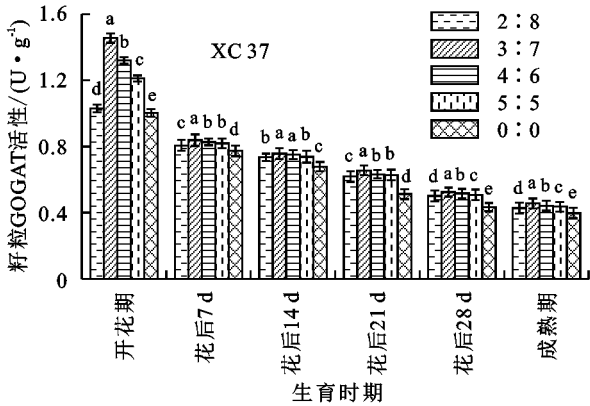
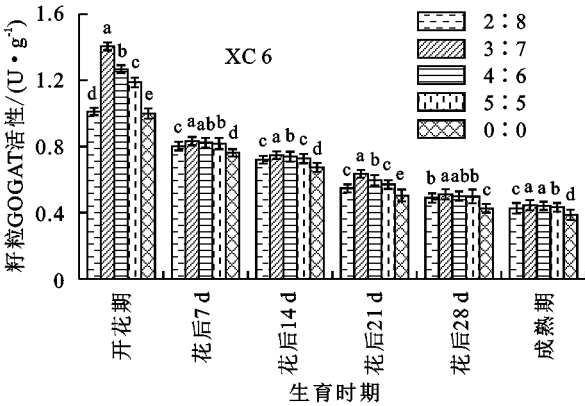


图 8 氮肥基追比例对滴灌春小麦籽粒 GOGAT 活性的影响

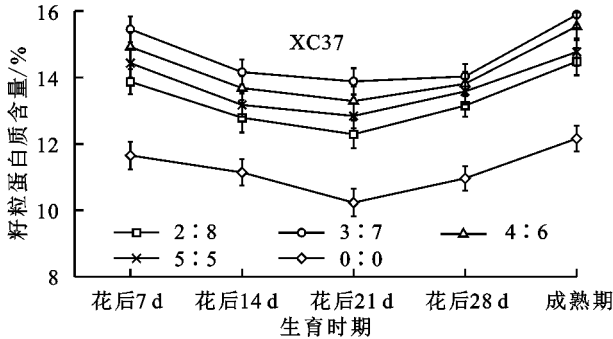
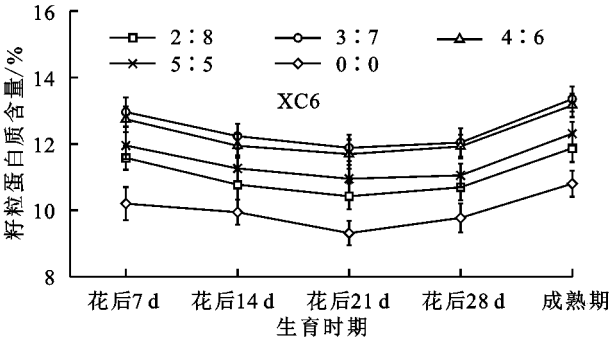


图 9 氮肥基追比例对滴灌春小麦籽粒蛋白质含量的影响

供试品种	NR		GS		GOGAT	
	旗叶	籽粒	旗叶	籽粒	旗叶	籽粒
XC 6	0.966 *	0.985 *	0.976 *	0.973 *	0.982 *	0.895
XC 37	0.945	0.994 *	0.965 *	0.985 *	0.987 *	0.855

注: * 表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

2.2 氮肥基追比例对滴灌春小麦氮素积累及转运影响

2.2.1 各器官氮素积累变化 XC 6 和 XC 37 的旗叶、茎鞘和穗轴+颖壳氮素积累均随着花后天数的增加降低,花后 7 天达最大,而籽粒氮素积累则相反(表 3)。各器官氮素积累变化在同一时期内均表现为 3:7>4:6>5:5>2:8>0:0,花后 7 天时,在 3:7 处理下,XC 6 旗叶、茎鞘和穗轴+颖壳氮素积

累量分别为 64.38,57.86,42.40 kg/hm²,均显著高于其他处理($P<0.05$),分别高 8.05%~64.27%,20.31%~122.81%,7.85%~78.49%;XC 37 旗叶、茎鞘和穗轴+颖壳氮素积累量分别为 69.40,61.49,44.71 kg/hm²,均显著高于其他处理($P<0.05$),分别高 5.41%~65.22%,15.36%~132.14%,8.91%~74.63%。成熟时,在 3:7 处理下,2 个品种籽粒氮素积累量分别为 144.45,153.85 kg/hm²,与其他处理差异显著($P<0.05$),分别高 6.91%~99.68%,6.64%~91.40%。2 个品种间,XC 37 旗叶、茎鞘、穗轴+颖壳和籽粒氮素积累分别较 XC 6 分别高 6.14%~9.25%,7.16%~12.56%,5.66%~11.30%,4.49%~8.37%。

表 3 氮肥基追比例对滴灌春小麦各器官氮素积累的影响							
		单位: kg/hm ²					
供试 品种	部位	处理	花后 7 天	花后 14 天	花后 21 天	花后 28 天	成熟期
XC 6	旗叶	2 : 8	56.07b	45.18c	33.39bc	30.61c	21.19c
		3 : 7	64.38a	55.05a	40.29a	38.75a	28.31a
		4 : 6	59.59b	50.25b	36.67b	36.60a	25.10b
		5 : 5	57.38b	48.18b	35.23b	33.47b	23.23bc
		0 : 0	39.19c	32.03d	25.34d	20.96d	15.93d
	茎鞘	2 : 8	40.58c	37.58c	30.50c	29.08c	20.85c
		3 : 7	57.86a	53.11a	42.27a	37.98a	32.90a
		4 : 6	48.09b	46.21b	39.43b	35.38b	29.36ab
		5 : 5	42.59c	40.26c	35.78b	32.52bc	24.68b
		0 : 0	25.97d	23.86d	20.07d	17.35d	14.20d
	穗轴+颖壳	2 : 8	34.58c	30.72b	22.32c	20.99c	13.32b
		3 : 7	42.40a	37.96a	30.29a	27.03a	19.92a
		4 : 6	39.32b	35.11a	27.05b	24.10b	17.39a
		5 : 5	36.05c	32.16b	23.50c	22.01bc	15.62b
		0 : 0	23.76d	19.52c	17.63d	15.31d	8.70c
	籽粒	2 : 8	47.65c	61.72c	70.54c	101.03c	110.79c
		3 : 7	62.87a	85.68a	90.77a	127.43a	144.45a
		4 : 6	55.86b	77.69b	82.19b	115.11b	135.11a
		5 : 5	51.56b	73.41b	78.67b	110.91c	123.22b
		0 : 0	35.09d	44.66d	54.06d	62.28d	72.34d
	旗叶	2 : 8	59.90c	47.62c	34.57c	32.96c	22.89c
		3 : 7	69.40a	57.79a	45.62a	42.53a	30.30a
		4 : 6	65.83b	55.13a	40.21b	38.91b	27.39b
		5 : 5	61.18c	51.47b	36.61c	35.59bc	24.76bc
		0 : 0	42.00d	35.81d	27.11d	21.73d	18.05d
XC 37	茎鞘	2 : 8	43.62c	39.75b	34.10c	31.89c	25.26c
		3 : 7	61.49a	55.10a	48.82a	42.85a	35.01a
		4 : 6	53.30b	48.55a	42.62b	37.38ab	32.88b
		5 : 5	48.21bc	44.64b	39.48c	35.65b	29.92bc
		0 : 0	26.49d	24.01c	21.83d	19.24d	17.15d
	穗轴+颖壳	2 : 8	37.44c	35.31c	24.11c	21.75c	14.90c
		3 : 7	44.71a	40.73a	32.38a	28.16a	20.53a
		4 : 6	41.05b	39.52b	29.46b	26.85b	18.34ab
		5 : 5	39.12c	37.32b	26.56b	24.17b	16.47b
		0 : 0	25.60d	22.41d	19.89d	17.42d	9.18d
	籽粒	2 : 8	50.87c	67.82c	71.39c	104.94c	119.19c
		3 : 7	65.93a	89.57a	97.23a	132.34a	153.85a
		4 : 6	58.09b	80.70b	88.93b	119.82b	144.28b
		5 : 5	52.69c	77.79b	82.75b	113.19b	131.01c
		0 : 0	36.82d	50.42d	57.25d	66.04d	80.38d

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2.2 植株氮素积累变化 由图 10 可知,2 个品种植株氮素积累随花后天数呈逐渐增加的趋势,于成熟期达到最大,各处理间总体表现为 3 : 7>4 : 6>5 : 5>2 : 8>0 : 0 趋势。成熟时,在 3 : 7 处理下,XC 6 的植株氮素积累量为 215.67 kg/hm²,与其他处理差异显著($P<0.05$),较其他处理提高 9.12%~60.06%;

XC 37 植株氮素积累量为 228.29 kg/hm²,也与其他处理差异显著,高 7.45%~60.50%,且 XC 37 植株氮素积累量在 3 : 7 处理下较 XC 6 高 5.85%。2 个品种蛋白质含量均与旗叶、茎鞘、穗轴+颖壳、籽粒及植株氮素积累之间存在显著性相关关系(表 4),说明可以通过调控氮素积累转运提高籽粒蛋白质含量。

2.2.3 植株氮素转运的变化 随着氮肥基追比例的增加,XC 6 和 XC 37 氮素转运特征相似(表 5),小麦花前氮素转运量、花后氮素积累量及花后氮素贡献率均表现为 3 : 7>4 : 6>5 : 5>2 : 8>0 : 0;而花前氮素转运率及花前氮素贡献率则相反。3 : 7 处理下,2 个品种花前氮素转运量显著高于 2 : 8 和 0 : 0 处理($P<0.05$),较其余各处理提高 1.51%~34.93%。花后氮素积累量、花后氮素贡献率与其余各处理差异显著,分别高 10.62%~83.63%,4.82%~25.38%。XC 37 花前氮素转运量、花后氮素积累量、花后氮素贡献率较 XC 6 分别高 0.51%~6.95%,0.74%~25.06%,2.21%~12.57%。品种和氮肥基追比处理对花前氮素转运量不存在显著的互作效应,但对花前氮素转运率、贡献率、花后氮素积累量和贡献率存在明显的互作效应。

2.3 氮肥基追比例对滴灌春小麦氮肥利用率的影响

2.3.1 氮肥利用率的变化 XC 6 和 XC 37 氮肥利用效率变化趋势一致(表 6),各处理 NUE、NAE、NPFP 及 NHI 均表现为 3 : 7>4 : 6>5 : 5>2 : 8>0 : 0;而 NPE 则相反。在 3 : 7 处理下,2 个品种 NUE、NAE、NPFP 显著高于 5 : 5 和 2 : 8 处理,与 4 : 6 处理差异不显著,分别比其余处理高 8.00%~45.11%,6.97%~19.84%,2.00%~5.80%。NHI 与其余处理差异显著($P<0.05$),高 7.95%~40.38%。2 个品种籽粒产量、蛋白质产量分别为 7 304.45,7 546.17 kg/hm²和 975.14,1 183.20 kg/hm²,均与其余处理差异显著,分别提高 1.44%~52.68%,4.44%~53.59%,2.91%~84.86%,5.36%~98.04%。2 个品种间相比,在 3 : 7 处理下,XC 37 的 NUE、NAE、NPFP、NHI、籽粒产量和蛋白质产量较 XC 6 分别提高 5.64%,4.65%,1.86%,0.69%,3.31%,21.34%。品种和氮肥基追比处理与 NUE、NPE、NHI、籽粒产量和蛋白质产量均存在显著互作效应,与 NAE、NPFP 无显著互作效应,说明适宜的氮肥基追比例可促进小麦对氮素的吸收利用。

2.3.2 氮素利用率与氮代谢指标间的相关关系 相关分析表明(表 7),NUE 与 GY、PY、ENTA、TNAA、GS、NR 呈极显著正相关关系,与 GS 呈显著性正相关关系,GY 与 PY、ENTA、TNAA、NR 呈极显著正相关关系,PY 和 ENTA、TNAA、NR 呈极显

著正相关关系。说明 PY、GY、ENTA、TNAA、GS、NR 的高低影响 NUE 的变化,小麦 GS、NR 酶活性

的提高在一定程度上可促进氮素积累转运,有利于小麦产量及氮素利用率的提高。

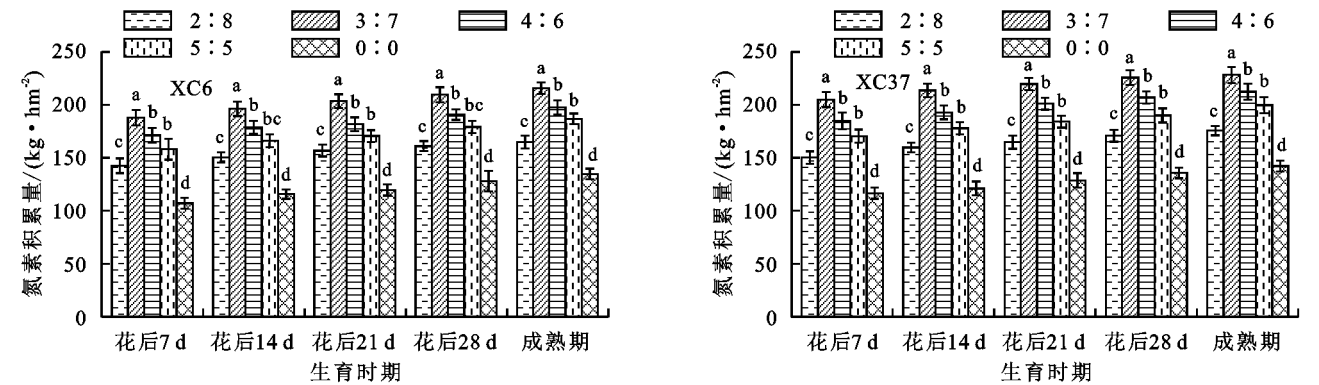


图 10 氮肥基追比例对滴灌春小麦植株氮素积累的影响

表 4 氮素积累转运与蛋白质含量的相关关系

供试品种	旗叶氮素积累量	茎鞘氮素积累量	穗轴+颖壳氮素积累量	籽粒氮素积累量	植株氮素积累量
XC 6	0.880 *	0.934 *	0.948 *	0.966 *	0.967 *
XC 37	0.996 *	0.970 *	0.988 *	0.990 *	0.938 *

表 5 氮肥基追比例对滴灌春小麦氮素转运特性的影响

供试品种	处理	花前氮素			花后氮素	
		转运量(TA)/	转运率	贡献率	积累量(AA)/	贡献率
		(kg·hm ⁻²)	(TR)/%	(CR)/%	(kg·hm ⁻²)	(CR)/%
XC 6	2 : 8	72.85b	58.80b	72.27b	27.95c	27.73b
	3 : 7	77.30a	52.42c	69.99c	33.15a	30.01a
	4 : 6	76.13ab	54.90c	71.08b	30.97b	28.92b
	5 : 5	74.21ab	57.00b	71.89b	29.01c	28.11b
	0 : 0	55.70c	61.60a	77.00a	16.64d	23.00c
XC 37	2 : 8	73.22ab	56.88b	71.65b	28.97c	28.35c
	3 : 7	78.23a	51.24c	68.71c	35.62a	31.29a
	4 : 6	77.08a	53.06bc	70.44b	31.20b	29.56b
	5 : 5	74.67ab	54.73bc	71.19b	31.34b	28.81bc
	0 : 0	59.57c	62.17a	74.11a	20.81d	25.89d
	a(品种)	3.945 *	65.968 *	144.428 *	31.335 *	32.790 *
	F 值	b(处理)	41.778 *	474.637 *	209.416 *	331.113 *
	a×b	1.277ns	16.965 *	16.506 *	3.417 *	19.540 *

注:ns 表示差异不显著。下同。

3 讨论

3.1 氮肥基追比例对滴灌春小麦籽粒氮代谢及其关键酶活性的影响

NR、GS、GOGAT 是参与调节小麦植株氮代谢过程的关键酶^[21]。已有研究^[22]证明,后期追氮能够加速 NR 催化过程,提高小麦旗叶中的 GS 活性,增强同化能力,进而增产。本研究发现,在减氮模式下(250 kg/hm²),花后旗叶和籽粒氮代谢关键酶活性(NR、GS、GOGAT)均随花后天数增加而降低,这与李双双等^[23]的研究结果一致。各处理氮代谢关键酶活性及籽粒蛋白质含量均表现为 3 : 7>4 : 6>5 : 5>2 : 8>0 : 0,且蛋白质含量与籽粒、旗叶 NR、GS 酶活性呈显著性正相关,其中,开花期基追比为 2 : 8 的

籽粒 NR、GS 酶活性显著低于 3 : 7,分别降低了 25.75%,19.39%,导致蛋白质含量降低了 11.45%,说明适当追施氮肥可以提高氮代谢酶活性,有利于籽粒蛋白质含量的积累。而王晓英等^[24]研究认为,当氮肥基追比为 1 : 1 时,拔节期追氮可使籽粒蛋白质含量最高,这可能是由于地域、气候条件差异等原因造成的。籽粒蛋白质含量随着花后天数的增加呈先降低后升高的趋势,且 2 个品种蛋白质含量在各处理下变化趋势一致,进一步研究发现,强筋小麦(XC 37)的籽粒 NR、GS、GOGAT 酶活性分别比中筋小麦(XC 6)高 1.94%~8.97%,4.97%~21.9%,1.15%~3.05%,导致蛋白质含量提高 12.24%~20.33%,说明强筋小麦比中筋小麦对氮素的调控更敏感。可见,北疆麦区在氮肥基追比例为 3 : 7 的模式下,有利于提高强、中筋小麦氮代谢关键酶活性,提升氮素代谢水平,促进籽粒蛋白质的积累和品质的改良。

3.2 氮肥基追比例对滴灌春小麦氮素积累转运的影响

合理的氮肥基追比例能够促进小麦氮素积累及转运。本研究发现,小麦茎鞘、叶片、穗轴+颖壳氮素积累量均随着花后天数增加而逐渐降低;而籽粒及植株氮素积累量则表现相反。其中,强筋(XC 37)和中筋小麦(XC 6)茎鞘、叶片、穗轴+颖壳、籽粒分别占植株氮素积累的 19.75%和 19.35%,20.83%和 20.78%,15.48%和 15.25%,48.97%和 49.71%。各处理器官及植株的氮素积累均表现 3 : 7>4 : 6>5 : 5>2 : 8>0 : 0,且蛋白质含量与各器官及植株的氮素积累量存在显著正相关关系,XC 37 茎鞘、叶片、穗轴+颖壳及植株氮素积累量比 XC 6 分别高 6.14%~9.25%,7.16%~12.56%,5.66%~11.30%,4.49%~8.37%,6.49%~8.46%,说明适宜的氮肥基追比例可促进器官及植株

中氮素含量的积累,尤其是强筋小麦氮素的积累。前人^[25]研究认为,小麦产量与氮素花前转运量呈二次抛物线关系,而与花后积累量呈正相关关系。本研究表明,花前氮素转运量、花后氮素积累量均随氮肥基追比例的增加呈先增后减的趋势,于 3∶7 达到最大值,分别为 78.23,35.62 kg/hm²,而霍中洋等^[26]认为,氮肥基追比例为 4∶6 和 5∶5 处理时植株氮素

积累量达到最高。XC 37 植株氮素积累量、花前氮素转运量、花后氮素积累量和花后氮素贡献率较 XC 6 分别高 6.49%~8.46%,0.51%~6.95%,0.74%~25.06%,2.21%~12.57%,且品种和氮肥基追比处理对花前氮素转运率、花后氮素积累量和贡献率存在明显的互作效应,说明强筋小麦更易受到氮素调控,易促进植株氮素的积累与转运。

表 6 氮肥基追比例对滴灌春小麦氮肥利用率及产量的影响

品种	处理	氮肥利用效率 (NUE)/%	氮肥农学利用 效率(NAE)/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥生理利用 效率(NPE)/ (kg·kg ⁻¹)	氮肥偏生 产力(NPFP)/ (kg·kg ⁻¹)	氮收获指数 (NHI)	籽粒产量/ (kg·hm ⁻²)	蛋白质产量/ (kg·hm ⁻²)
XC 6	2∶8	26.50c	8.10c	30.55a	28.05c	59.73c	6908.25d	820.01b
	3∶7	36.37a	9.68a	26.62b	29.62a	73.92a	7304.45a	975.14a
	4∶6	33.16a	9.27a	27.94b	29.26ab	68.19b	7200.70b	947.61a
	5∶5	30.44b	8.60b	28.26b	28.50bc	63.42c	7034.42c	865.94b
	0∶0	—	—	—	—	51.68d	4784.23e	527.50c
XC 37	2∶8	25.04c	8.43c	33.67a	28.46b	62.43c	7021.31d	1 016.69b
	3∶7	38.42a	10.13a	25.64bc	30.17a	74.43a	7546.17a	1 183.20a
	4∶6	36.09a	9.25b	26.37b	29.36ab	69.23b	7225.61b	1 123.01a
	5∶5	32.21b	8.98b	27.88b	29.07ab	65.87bc	7158.08c	1 057.25b
	0∶0	—	—	—	—	54.00d	4913.33e	597.46c
F 值	a(品种)	24.657 *	2.105ns	0.005ns	51.316 *	1100.516 *	17.241ns	443.690 *
	b(处理)	12923.352 *	1596.926 *	1819.419 *	2521.262 *	3000.939 *	1596.926 *	1 682.717 *
	a×b	44.197 *	1.153ns	10.418 *	0.251ns	37.704 *	1.153 *	31.673 *

表 7 氮代谢指标与氮肥利用率之间的相关分析

参数	NUE	GY	PY	ENTA	TNAA	NR	GS	GOGAT
NUE	1.00							
GY	0.99 **	1.00						
PY	0.92 **	0.92 **	1.00					
ENTA	0.97 **	0.96 **	0.92 **	1.00				
TNAA	0.99 **	0.99 **	0.94 **	0.98 **	1.00			
NR	0.31 **	0.30 **	0.29 **	0.31 **	0.31 **	1.00		
GS	0.23 *	0.23 *	0.22 *	0.23 *	0.23 *	—0.14	1.00	
GOGAT	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	—0.64 **	0.83 **	1.00

注:NUE、PY、GY、ENTA、TNAA、GOGAT、GS、NR 分别为氮肥利用率、蛋白质产量、籽粒产量、花前氮素转运量、花后氮素积累量、谷氨酰胺合成酶、谷氨酰胺合成酶和硝酸还原酶。

3.3 氮肥基追比例对滴灌春小麦氮肥利用率的影响

合理的氮肥运筹能提高作物氮代谢酶活性,有效解决氮素供应和植株吸收协同问题,有利于获取较高的生产力和氮肥利用率^[27]。已有研究^[28]表明,氮素利用效率与作物产量呈正相关关系,生育后期适量施氮有利于提高氮肥利用率。本试验除 NPE 外,其他各指标各处理间均表现为 3∶7>4∶6>5∶5>2∶8>0∶0,与前人^[29-30]的研究结果类似。NUE 随氮肥基追比例的增加出现先增后减的趋势,可能是由于后期追肥过多导致了小麦旺长影响植株生长导致的。基追比 2∶8 因后期过高的氮肥施用,反而会造成 NUE

及 NPFP 下降,从而使得作物减产氮肥浪费。氮素利用率与籽粒产量、蛋白质产量间呈极显著相关,说明北疆麦区在基追比为 3∶7 处理下可延长小麦绿色器官的功能期,有效提高小麦籽粒产量及蛋白质产量,进而提高氮素利用率,一定程度上可减少肥料浪费;而过度的氮肥后移(2∶8)则会延缓各器官贮藏物质向籽粒的运转分配,造成贪青晚熟。本试验在 3∶7 处理下,NUE、NAE、NPFP、NHI、籽粒产量和蛋白质产量 XC 37 较 XC 6 分别高 5.64%,4.65%,1.86%,0.69%,3.31%,21.34%,说明小麦对氮素吸收利用具有基因型差异,强筋型(XC 37)小麦较中筋型(XC 6)

对氮素的调控更敏感。各处理间 XC 37 和 XC 6 小麦氮代谢关键酶活性的变化趋势与籽粒产量基本一致,且品种和氮肥基追比处理对籽粒产量与氮代谢关键酶存在明显的互作效应;同时,小麦氮素利用率也与氮代谢关键酶活性呈显著正相关关系。总体来看,适宜的基追比例(3:7)增加小麦籽粒产量的原因可能是提高氮代谢关键酶活性,以促进小麦对氮素的同化能力,进而增加麦株氮素积累,最终提高籽粒产量和氮肥利用效率。此外,本田间试验虽然只经过 1 个小麦生长季,对于强筋、中筋小麦来说,氮素的积累转运及氮肥利用效率的规律明显,能够反映基追比 3:7 可增强旗叶和籽粒氮代谢酶活性,促进前中期的生长,延缓后期衰老,有利麦株氮素的积累转运,提高籽粒产量和氮肥利用率。当然,这一研究结果需进一步大田佐证。

4 结论

本研究发现,氮代谢酶活性高低可反映小麦产量及氮素利用效率,适宜的氮肥基追比例可显著提高旗叶和籽粒氮代谢关键酶活性,有利于植株氮素积累转运,协同提高产量和氮素利用率,避免氮肥因全部基施和全部追肥造成营养流失或过剩等问题。且本试验在氮肥基追比例为 3:7 时(氮肥基施 30%+追肥 70%)对小麦氮代谢酶活性、氮素积累和利用的促进作用最大,有利于提高籽粒产量和蛋白质产量,是调控新疆滴灌春小麦氮素营养和提高氮素利用效率的有效途径,因此,建议新疆滴灌春小麦生产中氮肥基追比为 3:7 比较适宜。

参考文献:

- [1] 中国国家统计局.中国统计年鉴 2020[EB/OL](2020-09-30). <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2020/indexch.htm>
- [2] 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,2013,19(2):259-273.
- [3] Hawkesford M J. Reducing the reliance on nitrogen fertilizer for wheat production.[J].Journal of Cereal Science,2014,59:276-283.
- [4] 宁川川,王建武,蔡昆争.有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J].生态环境学报,2016,25(1):175-181.
- [5] 黄玲,杨文平,胡喜巧,等.水氮互作对冬小麦耗水特性和氮素利用的影响[J].水土保持学报,2016,30(2):168-174.
- [6] 张振,于振文,张永丽,等.氮肥基追比例对测墒补灌小麦植株氮素利用及土壤氮素表观盈亏的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):240-245.
- [7] 宋文挺,韩明明,陈金,等.氮肥基追比对冬小麦土壤硝态氮变化及氮素利用的影响[J].山东农业科学,2017,49(9):88-94.
- [8] 孙雪原,季雅岚,吴文革,等.不同氮肥运筹对江西南部稻茬小麦产量及氮肥利用的影响[J].耕作与栽培,2020,40(4):1-4.
- [9] 张美微,谢旭东,王晨阳,等.不同生态条件下品种和施氮量对冬小麦产量及氮肥利用效率的影响[J].麦类作物学报,2016,36(10):1362-1368.
- [10] 李亚静,郭振清,杨敏,等.施氮量对强筋小麦氮素积累和氮肥农学利用效率的影响[J].麦类作物学报,2020,40(3):343-350.
- [11] 马东辉,王月福,赵长星,等.施氮量和花后土壤含水量对小麦氮代谢特性和子粒蛋白质含量的影响[J].植物营养与肥料学报,2008,14(6):1035-1041.
- [12] 王东,于振文.施氮水平对强筋小麦氮素同化及籽粒蛋白质组分积累的影响[J].水土保持学报,2007,21(5):147-150.
- [13] 范雪梅,姜东,戴廷波,等.不同水分条件下氮素供应对小麦植株氮代谢及籽粒蛋白质积累的影响[J].生态学杂志,2006,25(2):149-154.
- [14] 马新明,王志强,王小纯,等.不同形态氮肥对不同专用小麦叶片氮代谢及籽粒蛋白质的影响[J].中国农业科学,2004,37(7):1076-1080.
- [15] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,1999.
- [16] Cren M, Hirel B. Glutamine synthetase in higher plant: Regulation of gene and protein expression from the organ to the cell [J].Plant cell Physiology,1999,40(1):1187-1193.
- [17] Singh R D, Srivastava H S. Increase in glutamate synthase(NADH) activity in maize seedlings in response to nitrate and ammonium nitrogen [J]. Physiologia Plantarum,1986,66(3):413-416.
- [18] 何照范.粮油籽粒品质及其分析技术[M].北京:农业出版社,1985.
- [19] 李亚静,郭振清,杨敏,等.施氮量对强筋小麦氮素积累和氮肥农学利用效率的影响[J].麦类作物学报,2020,40(3):343-350.
- [20] Oenema O, Brentrup F, Lammel J, et al. Nitrogen Use Efficiency (NUE)-An indicator for the utilization of nitrogen in agriculture and food systems[M]. United Nations Environment Programme;EU Nitrogen Expert Panel,2015:36-37.
- [21] Wang F, Gao J W, Liu Y, et al. Higher ammonium transamination capacity can alleviate glutamate inhibition on winter wheat (*Triticum aestivum* L.) root growth under high ammonium stress[J].PLoS One,2016,11(8):1-17.
- [22] Robredo A, Rezil P, Miranda J, et al. Elevated CO₂ reduces the drought effect on nitrogen metabolism in barley plants during drought and subsequent recovery [J].Environmental and Experimental Botany,2011,71(3):399-408.
- [23] 李双双,付驰,孙继,等.施氮量对春小麦根系生理活性及籽粒蛋白质品质的影响[J].麦类作物学报,2012,32(6):1139-1143.

[16] 焦瑞枣,任少勇,王姣,等.炭基肥对马铃薯田土壤容重、孔隙度和养分的影响[J].华北农学报,2015,30(4): 231-238.

[17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2013.

[18] 马仁明,蔡崇法,李朝霞,等.前期土壤含水率对红壤团聚体稳定性及溅蚀的影响[J].农业工程学报,2014,30(3):95-103.

[19] 姜佰文,梁世鹏,张迪,等.耕作与施肥对黑土团聚体粒级分布及水稳定性的影响[J].东北农业大学学报,2019,50(7):76-86.

[20] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.

[21] Simek M, Hopkins D W. Regulation of potential denitrification by soil pH in long-term fertilized arable soils [J].Biology and Fertility of Soils,1999,30(1):41-47.

[22] 陈雪,宋娅丽,王克勤,等.基于 Van Genuchten 模型的等高反坡阶下土壤水分特征[J].水土保持研究,2019,26(5):45-52.

[23] 王冬冬,高磊,陈效民,等.红壤丘陵区坡地土壤颗粒组成的空间分布特征研究[J].土壤,2016,48(2):361-367.

[24] 王晓燕,尹洁.坡面小区土壤流失过程中粒径组成变化及其影响因素[J].水土保持学报,2010,24(4):113-118.

[25] 罗晓虹,王子芳,陆畅,等.土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J].环境科学,2019,40(8):3816-3824.

[26] 吕欣欣,丁雪丽,张彬,等.长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响[J].农业资源与环境学报,2018,35(1):1-10.

[27] 胡玉福,彭佳佳,蒋双龙,等.川中丘陵区不同土地利用方式土壤活性有机碳含量特征研究[J].水土保持学报,2014,28(2):221-225,231.

[28] 张洋,王克勤,赵洋毅,等.等高反坡阶对玉米生长及光合特性的影响[J].水土保持通报,2020,40(6):71-77.

[29] Amézqueta E. Soil aggregate stability: A Review [J].Journal of Sustainable Agriculture,1999,14(2/3):83-151.

[30] 李春越,常顺,钟凡心,等.种植模式和施肥对黄土旱塬农田土壤团聚体及其碳分布的影响[J].应用生态学报,2021,32(1):191-200.

[31] 史激光,锡林郭勒天然草地营养成分评价[J].草业科学,2012,29(12):1941-1944.

[32] 周永斌,郭鑫炜,魏亚伟,等.辽西北半干旱区典型人工林土壤 C, N, P 的垂直分布特征[J].沈阳农业大学学报,2016,47(4):418-424.

[33] 吴旭,牛耀彬,陈云明,等.黄土丘陵区沙棘混交林叶片、凋落物、土壤碳氮磷化学计量特征[J].水土保持学报,2021,35(4):369-376.

[34] 易艳灵,吴丽英,杨倩,等.柏木根系分泌物对盆栽香椿土壤养分和酶活性的影响[J].生态学杂志,2019,38(7):2080-2086.

[35] 曹越,赵洋毅,王克勤,等.滇中坡改梯不同种植方式对土壤酶活性的影响[J].西部林业科学,2020,49(4):91-98.

[36] 胡雷,王长庭,王根绪,等.三江源区不同退化演替阶段高寒草甸土壤酶活性和微生物群落结构的变化[J].草业学报,2014,23(3):8-19.

[37] 武晓森,周晓琳,曹凤明,等.不同施肥处理对玉米产量及土壤酶活性的影响[J].中国土壤与肥料,2015(1): 44-49.

[38] 徐国伟,段骅,王志琴,等.麦秸还田对土壤理化性质及酶活性的影响[J].中国农业科学,2009,42(3):934-942.

(上接第 306 页)

[24] 王晓英,贺明荣.追氮时期和基追比例对强筋小麦产量和品质的调控效应[J].麦类作物学报,2013,33(4): 711-715.

[25] 张敏,刘添,李亚静,等.减少灌水次数对强筋小麦氮素积累转运和籽粒蛋白质含量的影响[J].麦类作物学报,2019,39(7):802-809.

[26] 霍中洋,葛鑫,张洪程,等.施氮方式对不同专用小麦氮素吸收及氮肥利用率的影响[J].作物学报,2004,30(5):449-454.

[27] Tian Z W, Liu X X, Gu S L, et al. Postponed and reduced basal nitrogen application improves nitrogen use efficiency and plant growth of winter wheat[J].Journal of Integrative Agriculture,2018,17(12):2648-2661.

[28] 丁锦峰,成亚梅,黄正金,等.稻茬小麦不同氮效率群体花后物质生产与衰老特性差异分析[J].中国农业科学,2015,48(6):1063-1073.

[29] 杨明晓,吴伟,张钧浩,等.不同追氮时期对强筋小麦产量、品质及氮素吸收利用的影响[J].河北农业大学学报,2020,43(2):11-18.

[30] 赵士诚,魏美艳,仇少君,等.氮肥管理对秸秆还田下土壤氮素供应和冬小麦生长的影响[J].中国土壤与肥料,2017(2):20-25.