

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

马东辉, 王月福*, 赵长星*, 林琪

(青岛农业大学植物科技学院, 山东青岛 266109)

摘要:在池栽条件下,研究了施氮量和花后土壤相对含水量对小麦氮代谢特性和子粒蛋白质含量的影响。结果表明,在同一施氮量下,旗叶和子粒硝酸还原酶(NR)和谷氨酰胺合成酶(GS)活性表现为花后土壤相对含水量(Soil relative water content, SRWC)在60%~70%时最高,过低(40%~50%)或过高(80%~90%)均降低NR和GS活性。旗叶蛋白酶活性随土壤相对含水量增加而降低;花后土壤相对含水量过低不利于叶片游离氨基酸含量的提高,过高则前期氨基酸合成少,后期向子粒转运不彻底。子粒游离氨基酸和蛋白质含量也随土壤相对含水量增加而降低;子粒蛋白质积累量以花后土壤相对含水量为60%~70%时最高,过高和过低均不利于子粒蛋白质积累。在同一土壤含水量下,旗叶和子粒NR和GS活性表现为随着施氮量的增加而升高,蛋白酶活性随着施氮量增加而降低;旗叶和子粒游离氨基酸含量、子粒蛋白质含量和积累量随施氮量增加而提高,但施氮量过多,蛋白质积累量增加幅度减小。试验表明,小麦生产中可以通过施用氮肥和控制花后土壤水分含量技术,调节植株氮代谢,提高子粒蛋白质含量。

关键词:小麦;施氮量;土壤相对含水量;氮代谢;蛋白质含量

中图分类号:S512.1

文献标识码:A

文章编号:1008-505X(2008)06-01035-07

Effects of nitrogen fertilizer rate and post-anthesis soil water content on characteristics of nitrogen metabolism and grain protein content in wheat

MA Dong-hui, WANG Yue-fu*, ZHAO Chang-xing*, LIN Qi

(College of Plant Technology and Science, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China)

Abstract: With the ultimate goal of maximising productivity and quality of wheat, effects of soil water content (SRWC) and N fertilization rate on nitrogen metabolism and grain protein content in wheat was tested under proof-rainfall pool culture condition. The results indicated that the activities of nitrate reductase (NR) and glutamine synthase (GS) were the highest in flag leaves and grains of wheat at the same level of nitrogen fertilizer rate with suitable SRWC (60% - 70%) after anthesis. High (80% - 90%) and low (40% - 50%) SRWC suppressed the activities of nitrate reductase (NR) and glutamine synthase (GS). Protease activities decreased with the increase of SRWC after anthesis. Low SRWC after anthesis was unfavorable for the increase of free amino acid content in wheat leaves, while high SRWC resulted in low synthesis rate at early stages. Consequently, its transferring into grains was not complete at late stage. Moreover, free amino acid content and protein content decreased with the increase of SRWC in wheat grains after anthesis. Protein accumulation in grains was the highest under SRWC (60% - 70%) after anthesis, whereas high (80% - 90%) and low (40% - 50%) SRWC made against the protein accumulation in grains after anthesis. Under the same level of SRWC, the increase of nitrogen fertilizer rate resulted in an increase of the activities of nitrate reductase (NR) and glutamine synthase (GS) in flag leaves and grains whereas it lead to a decrease of protease activities. Free amino acid content, protein

收稿日期:2007-09-07

接受日期:2008-05-15

基金项目:国家自然科学基金(30471026);青岛农业大学博士启动基金(630523)资助。

作者简介:马东辉(1978—)男,山东昌邑人,硕士研究生,主要从事小麦栽培生理方面的研究。

* 通讯作者 Tel:0532-86080447, E-mail:wangyuefu01@163.com; zhaochangxing@126.com

content and accumulation increased with the increase of nitrogen fertilizer rate in wheat leaves and grains after anthesis. Excessive nitrogen fertilizer rate reduced the magnitude of increased protein accumulation. It is considered that nitrogen metabolism might be regulated to maximizing grain protein content in wheat production by controlling nitrogen application rate and soil water content after anthesis.

Key words : wheat ; nitrogen fertilizer rate ; soil relative water content (SRWC); nitrogen metabolism ; protein content

氮代谢是植株体内最基本的物质代谢之一,对小麦产量和品质有重要的影响。因此,研究小麦氮代谢规律,对提高小麦产量、改善品质具有重要意义。前人关于氮、磷、钾、密度及环境条件等对小麦氮代谢关键酶活性变化的影响进行了一些研究^[1-7]。水分和氮素是小麦生产的两大基本要素,氮素水平在小麦作物的水分关系方面扮演了重要角色。但是,长期以来,研究肥水耦合效应主要集中在小麦开花前生长发育阶段,而对小麦花后水肥耦合效应方面的研究相对较少。为此,本试验在池栽条件下,重点研究了施氮量和花后土壤相对含水量对小麦氮代谢特性和子粒蛋白质含量的影响,旨在探讨小麦获得高产优质的花后适宜土壤含水量及施氮量,为小麦科学合理的补水灌溉和施用氮肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2004~2006 年两个小麦生长季节在青岛农业大学防雨池栽条件下进行。水泥池面积为 2 m × 2 m,深 1.5 m,不封底,小麦全生育期防降水。供试土壤为潮棕壤土,0—20 cm 土层有机质 11.2 g/kg,水解氮 84.54 mg/kg,速效磷 32.40 mg/kg,速效钾 80.10 mg/kg,土壤容重 1.34 g/cm³,土壤田间最大持水量 25%,土壤 pH 6.8。

试验设施 N 150、225、300 kg/hm² 3 个处理,分别用 N1、N2、N3 表示。每个氮肥处理均设置小麦开花后土壤相对含水量为田间最大持水量的 40%~50%、60%~70%、80%~90% 3 个处理,分别用 W1、W2、W3 表示,共计 9 个处理,随机排列,重复 3 次。

小麦开花期前各处理保持相同的土壤相对含水量(65%),从开花期开始进行水分处理。每隔 5 d 采用 TDR 测量 1 m 深土壤相对含水量,同时通过均匀喷洒补充水分,达到各处理要求,并保持稳定的含水量。

各处理均按每公顷施有机(厩)肥 45000 kg、P₂O₅ 225 kg、K₂O 112.5 kg、硫酸锌 15 kg、硼砂 15 kg,连同 50% 的氮肥撒施地表后耕翻作基肥,剩余 50%

的氮肥于拔节期结合灌水进行追施。供试品种为优质强筋冬小麦,品种济麦 20,基本苗为 180 × 10⁴/hm²,其余的管理措施同一般高产大田。

1.2 测定项目与方法

土壤相对含水量采用美国产 503DR 智能型中子水分仪,同时结合烘干法进行测定。植株和子粒全氮含量采用瑞士 FOSS TECTOR 公司生产的 Kjeltec2300 自动定氮仪(凯氏定氮法)测定。子粒全氮含量乘以 5.7 为蛋白质含量。蛋白酶活性的测定、氨肽酶活性测定及内肽酶活性测定参照郝再彬编著的《植物生理实验技术》。游离氨基酸含量用水合茚三酮法。

硝酸还原酶活性采用活体测定方法,略作改进。反应体系主要包括:0.4 mL 粗酶提取液,1.2 mL 0.1 mol/L KNO₃ 磷酸缓冲液,0.4 mL 2.8 mmol/L NADH 溶液。30℃保温 30 min,加入 1 mL 对-氨基苯磺酸溶液,使其终止反应,加 1 mL α-萘胺溶液,显色 20 min 后离心 10 min,上清液用分光光度计在 540 nm 处测定吸光值。

谷氨酰胺合成酶活性测定:取 1 g 新鲜叶片或其他器官剪碎于研钵中,加入 4 mL 0.05 mmol/L 磷酸缓冲液(pH 7.4,含 0.4 mol/L 蔗糖和 4 mmol/L 的 L-半胱氨酸),于冰浴中研磨后,以 12000 × g 离心 15 min,上清液为酶粗提液。取 1 mL 酶液加入 3 mL 酶反应液(含 50 mmol/L L-谷氨酸钠、4 mmol/L ATP - 2Na、40 mmol/L 羟胺、20 mmol/L 硫酸镁、10 mmol/L L-半胱氨酸、40 mmol/L 磷酸缓冲液),在 30℃下反应 15 min 再加入按 1:1:1 混合的三氯乙酸(30%)、5.5 mol/L 盐酸和 8% 三氯化铁(溶于 0.1 mol/L 盐酸溶液),放置 10 min 后,于 540 nm 处比色。重复 3 次,取其平均值。

试验数据采用 SPSS(10.0)进行数据分析,t 检验进行各处理组间的显著性差异分析。

2 结果与分析

2.1 施氮量和花后土壤相对含水量对小麦旗叶硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶活性变化的影响

硝酸还原酶(NR)和谷氨酰胺合成酶(GS)是植

物体氮素同化的关键酶。图 1A、B 看出,小麦旗叶 NR 和 GS 活性变化基本一致,自开花后呈逐渐下降趋势。在同一施氮量下,前期(开花后 21 d 前)旗叶 NR 和 GS 活性表现为花后土壤相对含水量以 W2 处理最高,W1 处理次之,W3 处理最低;之后则以花后

土壤相对含水量仍以 W2 处理最高,W3 处理次之,W1 处理最低。表明适宜水分条件下,NR 和 GS 可保持较高的活性。在同一土壤相对含水量下,旗叶 NR 和 GS 活性表现为随着施氮量的增加而升高,表明增施氮肥可提高 NR 和 GS 活性,促进氮素同化。

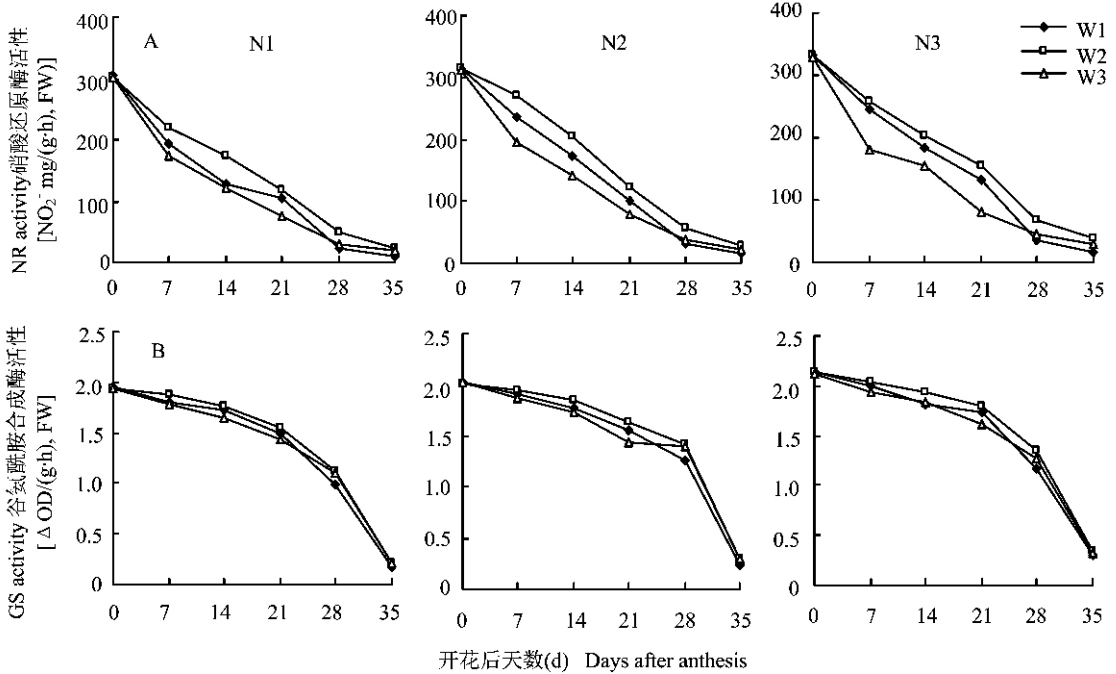


图 1 施氮量和花后土壤相对含水量对小麦旗叶硝酸还原酶(A)和谷氨酰胺合成酶(B)活性的影响

Fig.1 Effects of nitrogen fertilizer rate and post-anthesis SRWC on NR(A) and GS(B) activities in wheat flag leaves

2.2 施氮量和花后土壤相对含水量对小麦子粒硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶活性变化的影响

图 2A、B 看出,小麦子粒 NR 和 GS 活性表现为先升高后降低的趋势,到花后 14 d 到达最大值,以后随着子粒的生长发育又降低。在同一施氮量下,花后 21 d 前子粒 NR 和 GS 活性表现为花后土壤相对含水量 W2 处理最高,W1 处理次之,W3 处理最低;之后表现为花后土壤相对含水量 W2 处理最高,W3 处理次之,W1 处理最低,表明花后土壤相对含水量过高或过低均不利于子粒 NR 和 GS 活性的提高,不利于氮素同化。在同一土壤相对含水量下,子粒 NR 和 GS 活性随着施氮量的增加而提高,表明增施氮肥可提高小麦子粒的氮素同化量。

2.3 施氮量和花后土壤相对含水量对小麦旗叶蛋白酶活性变化的影响

小麦体内蛋白水解酶活性变化与蛋白质的降解密切相关,在蛋白质水解为氨基酸的过程中,先是内肽酶起作用,将蛋白质水解成小肽,然后是外肽酶起

主要作用,将小肽彻底水解成氨基酸,这些氨基酸在开花后通过各种途径被运往子粒,用于合成新的蛋白质。图 3A、B 表明,内肽酶和氨肽酶活性在花后逐渐升高,但花后 21 d 前上升缓慢,花后 21 d 后才迅速升高,到成熟期达到最大。在同一施氮量下,两种酶活性随着土壤相对含水量增加而降低。在同一土壤相对含水量下,两种酶活性随着施氮量增加而降低,表明提高花后土壤相对含水量和增施氮肥可以降低旗叶蛋白酶活性,延缓蛋白质的降解。

2.4 施氮量和花后土壤相对含水量对小麦旗叶和子粒游离氨基酸含量变化的影响

氨基酸是植株体内氮化物的主要存在方式和运输形式。它不但把氮素的吸收、同化与器官中蛋白质的合成和降解联系在一起,也是源库间实现氮素分配转移、再分配的主要方式,子粒蛋白质积累在很大程度上决定于氮素同化物的供应水平。

图 4A 看出,小麦旗叶游离氨基酸含量开花后持续增加,至花后 14 d 左右达到最大值,之后开始

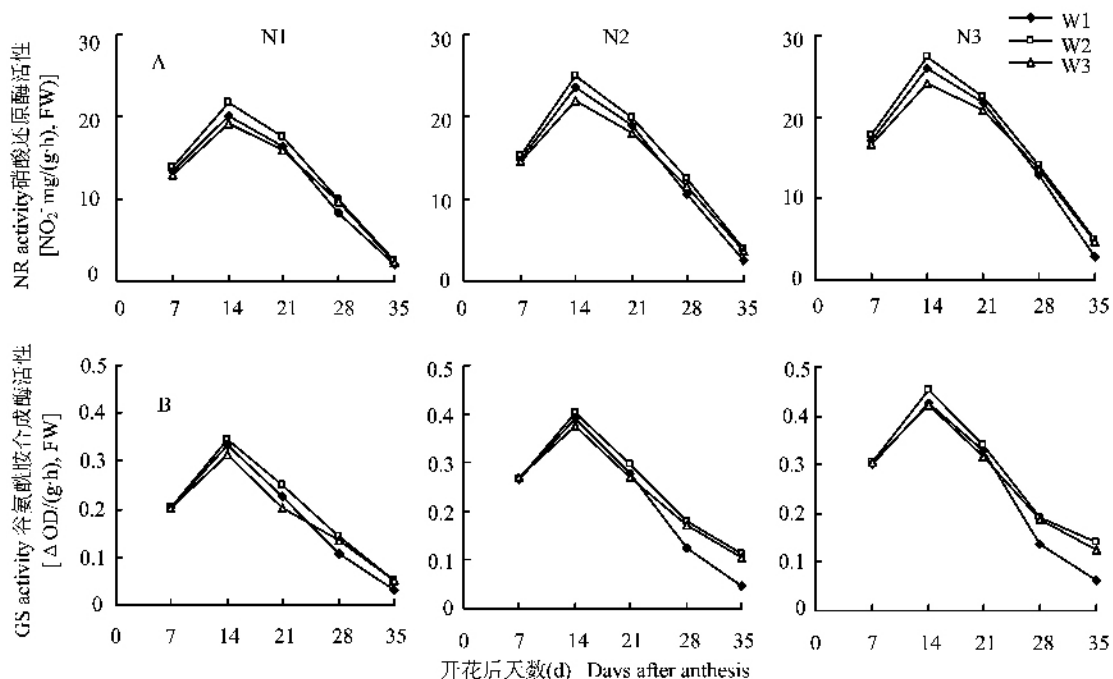


图2 施氮量和花后土壤相对含水量对小麦子粒硝酸还原酶(A)和谷氨酰胺合成酶(B)活性的影响

Fig.2 Effects of nitrogen fertilizer rate and post-anthesis SRWC on NR (A) and GS (B) activities in wheat grains

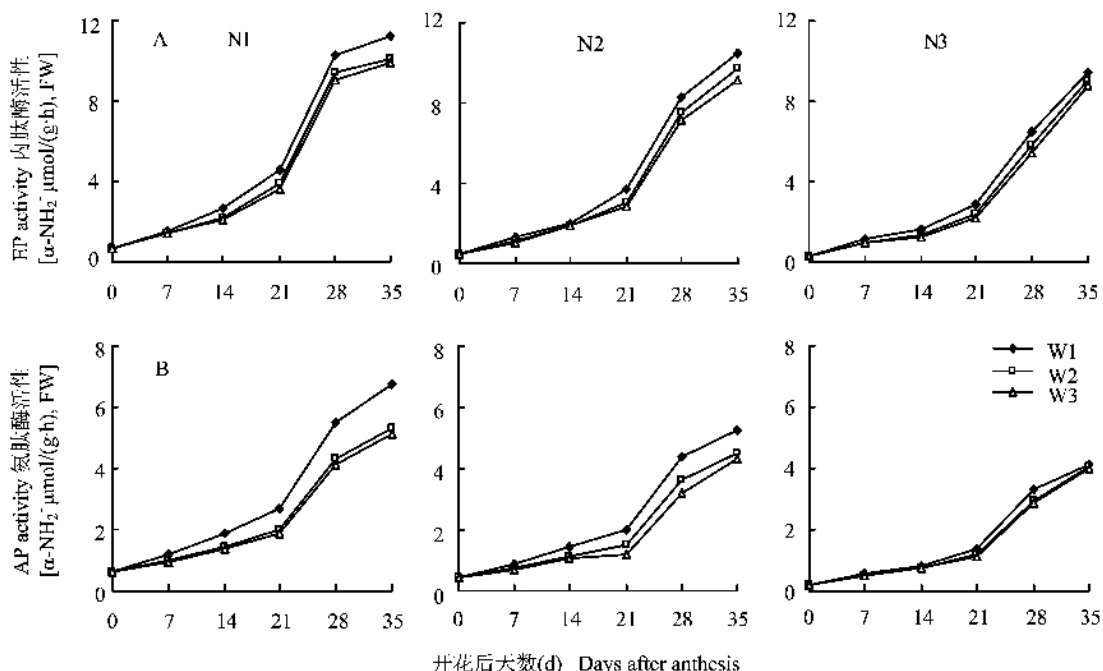


图3 施氮量和花后土壤相对含水量对小麦旗叶内肽酶(A)和氨肽酶(B)活性的影响

Fig.3 Effects of nitrogen fertilizer rate and post-anthesis SRWC on exopeptidase (A) and aminopeptidase (B) activities in wheat flag leaves

下降。在同一施氮量下,花后 28 d 前,旗叶游离氨基酸含量表现为花后土壤相对含水量以 W2 的处理最高,W3 处理次之,W1 处理最低;之后则表现为 W3 处理最高,W2 处理次之,W1 处理最低。表明花

后土壤相对含水量过低不利于叶片游离氨基酸含量的增加,而土壤相对含水量过高,不利于叶片前期氨基酸的合成,后期含量高与向子粒转运的不彻底有关。在同一土壤相对含水量下,旗叶游离氨基酸含

量随着施氮量的增加而升高。

图 4B 看出,子粒游离氨基酸含量在花后 14 d 前升高,之后迅速下降。在同一施氮量下,子粒游离氨基酸含量随着土壤相对含水量的增加而降低,表明花后土壤相对含水量过高不利于子粒游离氨基酸

含量的提高,这可能是限制其子粒蛋白质含量升高的主要原因之一。在同一土壤相对含水量下,子粒游离氨基酸含量随着施氮量的增加而升高,表明增施氮肥可以提高子粒游离氨基酸含量。

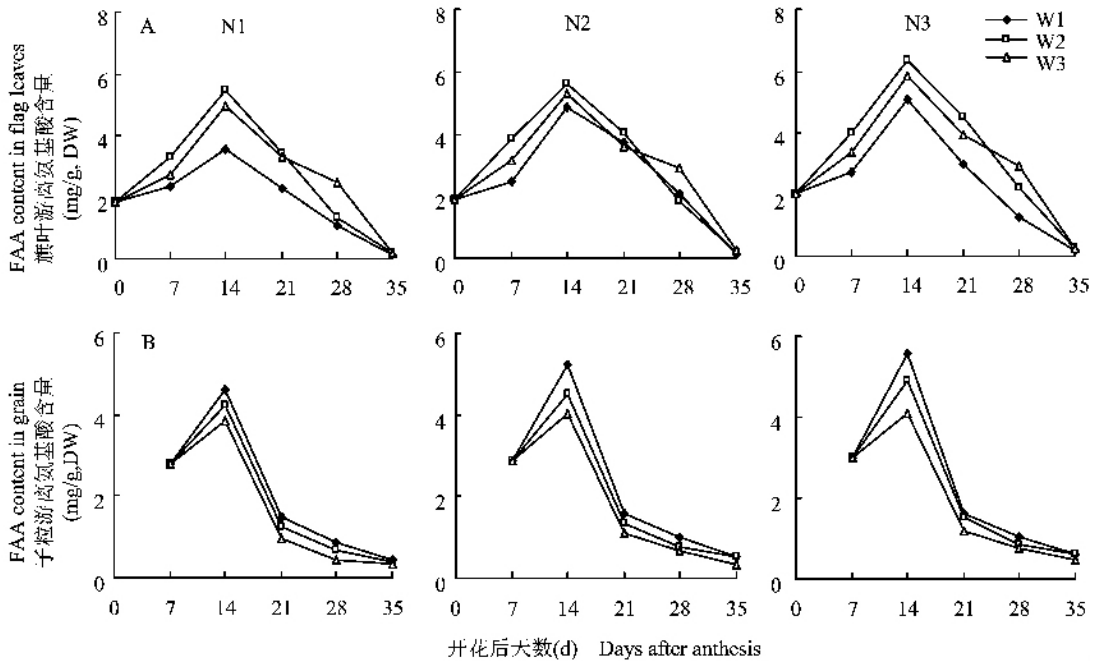


图 4 施氮量和花后土壤相对含水量对小麦旗叶(A)和子粒(B)游离氨基酸含量的影响

Fig.4 Effects of nitrogen fertilizer rate and post-anthesis SRWC on free amino acid (FAA) content in wheat flag leaves(A) and grain(B)

2.5 施氮量和花后土壤相对含水量对小麦开花后氮素同化运转的影响

以营养体氮素积累最高的开花期氮素积累量减去成熟期营养体氮素积累量估测营养体氮素向子粒的运转量,将子粒氮素积累总量减去氮素转移量作为花后吸收氮量。

表 1 看出,氮转移量占子粒氮积累量的 70.11%~92.35%,而花后吸收氮量占 7.65%~9.87%。在同一施氮量下,氮转移量均表现为花后土壤相对含水量为 W2 处理最高,W1 处理次之,W3 处理最低;花后吸收氮量表现为 W2 处理最高,W3 处理次之,W1 处理最低,说明保持花后适宜的土壤相对含水量不仅使氮转移量增多,而且也提高了花后吸收氮量,因而提高了子粒氮积累总量。从占子粒氮的比例看,氮转移量占的比例表现为花后土壤相对含水量为 W1 处理最高,W3 处理次之,W2 处理最低;花后吸收氮量占的比例则表现为 W2 处理最高,W3 处理次之,W1 处理最低。

在同一土壤相对含水量下,氮肥对氮转移量的影响表现不一致。在花后土壤相对含水量为 W1 处理时,表现为施 N 225 kg/hm² 的处理最高,300 kg/hm² 处理次之,150 kg/hm² 处理最低;而 W1 和 W3 的处理,均表现为施 N 225 kg/hm² 的处理最高,300 和 150 kg/hm² 处理差异不显著。花后吸收氮量和占子粒氮的比例,均表现为随施氮量的增加而增加。

2.6 施氮量和花后土壤相对含水量对小麦蛋白质含量及积累量变化的影响

在子粒发育过程中蛋白质含量呈现出高-低-高的变化趋势(图 5A)。在同一施氮量下,子粒蛋白质含量随着花后土壤相对含水量的升高而减小,表明提高花后土壤相对含水量导致子粒蛋白质含量降低。在同一土壤相对含水量下,随施氮量提高子粒蛋白质含量增大,表明增施氮肥可提高子粒蛋白质含量。

从小麦开花后子粒蛋白质积累量(图 5B)也看出,小麦开花后子粒蛋白质积累随着子粒生长发育

而不断增加。在同一施氮量下,以花后土壤相对含水量为 W2 处理的子粒蛋白质积累量最高,表明花后土壤含水量过高和过低均不利于子粒蛋白质的积累。在同一土壤相对含水量下,随施氮量增加,子粒

蛋白质积累量升高,但施氮量过多,蛋白质积累量增加幅度减小甚至降低,表明在本试验条件下,增施氮肥可提高子粒单粒蛋白质积累量,但施氮量过高时,蛋白质积累量增加幅度减小。

表 1 施氮量和花后土壤相对含水量对小麦开花后氮素同化运转的影响

Table 1 Effects of nitrogen fertilizer rate and post-anthesis SRWC on nitrogen assimilation and transfer after wheat anthesis

施氮量 N rate (kg/hm ²)	相对含水量 RWC (%)	子粒氮 Grain N (mg/stem)	运转量 Transfer rate (mg/stem)	占子粒氮百分数 % in grain N (%)	花后同化量 Assim. rate after anthesis (mg/stem)	占子粒氮百分数 % in grain N (%)
150	40~50(W1)	30.72 a	28.37 bc	92.35 c	2.35 e	7.65 bc
	60~70(W2)	39.43 ab	29.02 a	73.60 f	10.41 b	26.40 ab
	80~90(W3)	33.95 d	27.68 de	81.53 d	6.27 d	18.47 b
225	40~50(W1)	36.22 b	31.74 f	87.64 df	4.48 a	12.37 a
	60~70(W2)	45.37 bc	33.22 cd	73.22 bc	12.15 f	26.78 ab
	80~90(W3)	38.46 e	28.95 a	75.28 a	9.51 bc	24.73 bc
300	40~50(W1)	33.33 a	28.64 ab	85.92 b	4.69 ab	14.07 f
	60~70(W2)	42.00 def	29.83 b	71.01 cd	12.17 f	28.98 d
	80~90(W3)	37.66 a	27.09 d	71.92 ab	10.57 d	28.07 cd

注(Note): 不同字母表示在不同施氮量下 5% 水平上差异显著 Different letters mean significant under different nitrogen rate at 5% level.

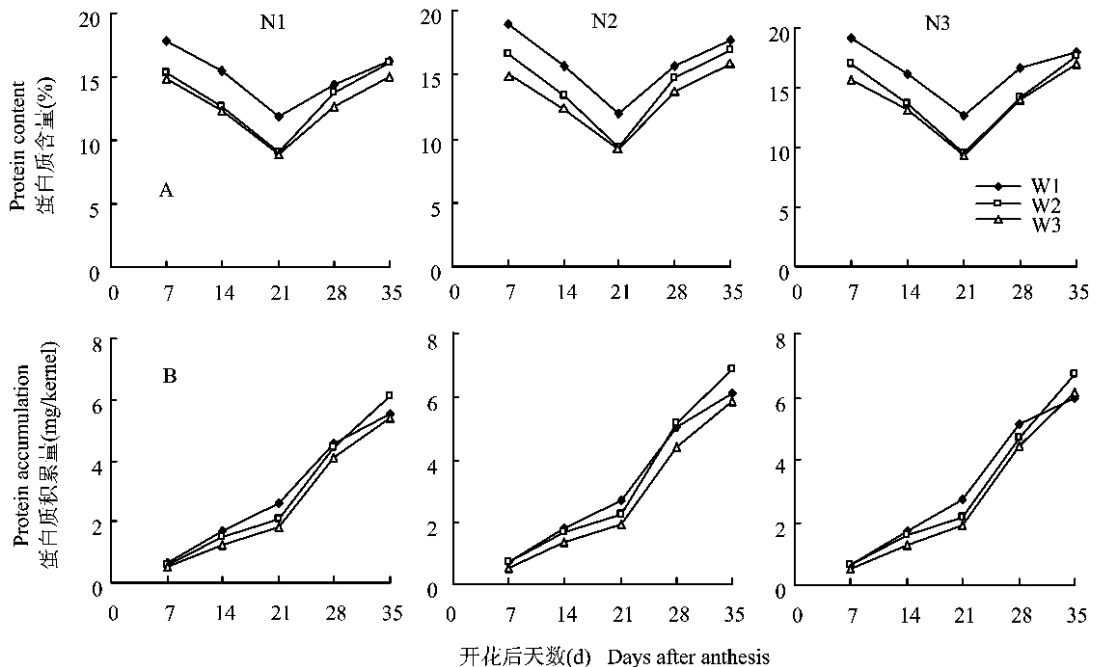


图 5 施氮量和花后土壤相对含水量对小麦子粒蛋白质含量(A)和蛋白质积累(B)的影响

Fig. 5 Effects of nitrogen fertilizer rate and post-anthesis SRWC on protein content(A) and accumulation(B) in wheat grains

3 讨论

植物氮素同化的主要途径之一是以铵直接参与氨基酸的合成与转化,硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)等关键酶参与了催化和调节^[8]。有研

究表明,小麦灌浆初期旗叶 NR 活性与作物子粒产量、子粒含氮量呈显著正相关^[9]。在本试验中,在同一土壤相对含水量下,旗叶和子粒 NR 和 GS 活性表现为随着施氮量的增加而升高;蛋白酶活性随着施氮量增加而降低;旗叶和子粒游离氨基酸含量随着

施氮量增加而升高。子粒蛋白质含量和积累量随施氮量增加而提高,但施氮量过多,蛋白质积累量增加幅度减小。本试验结果与前人研究结果基本一致。

前人研究表明,土壤水分亏缺和渍水均导致小麦旗叶 NR 活性降低^[10-11]。本试验结果表明,在同一施氮量下,旗叶和子粒 NR 和 GS 活性表现为花后适宜土壤相对含水量(W₂)最高,土壤水分过低和过高均降低 NR 和 GS 活性;此外,旗叶蛋白酶活性随土壤相对含水量增加而降低。

土壤水分含量与小麦子粒蛋白质含量呈负相关^[12],增施氮肥可以提高小麦旗叶和茎鞘游离氨基酸含量,也提高了子粒游离氨基酸的含量,进而促进子粒蛋白质合成,提高子粒蛋白质含量^[13-14]。花后干旱和渍水处理均降低了旗叶 NR 活性、叶片总氮含量和游离氨基酸含量,降低了小麦子粒产量和蛋白质产量,施氮可以缓解水分逆境对旗叶 NR 活性的抑制作用,促进植株对氮素的吸收,提高了子粒蛋白质含量^[15]。本研究也同时发现,花后土壤相对含水量过低不利于叶片游离氨基酸含量的增加,而土壤相对含水量过高,前期氨基酸合成少,后期向子粒转运不彻底;子粒游离氨基酸和蛋白质含量随着土壤相对含水量增加而降低;子粒蛋白质积累量以花后土壤相对含水量为 W₂ 时最高,花后土壤相对含水量过高和过低均不利于子粒蛋白质积累。

因此,本试验表明在小麦生产中可以通过施用氮肥和控制花后土壤水分含量技术,调节植株氮代谢,提高子粒蛋白质含量。

参考文献:

- 王月福,于振文,李尚霞,等. 氮素营养水平对冬小麦氮代谢关键酶活性变化和子粒蛋白质含量的影响[J]. 作物学报, 2002, 28(6): 743-748.
Wang Y F, Yu Z W, Li S X *et al.* Effect of nitrogen nutrition on the change of key enzyme activity during the nitrogen metabolism and kernel protein content in winter wheat[J]. *Acta Agron. Sin.*, 2002, 28(6): 743-748.
- 王旭东,于振文,石玉,等. 磷对小麦旗叶氮代谢有关酶活性和子粒蛋白质含量的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(3): 339-344.
Wang X D, Yu Z W, Shi Y *et al.* Effects of phosphorus on activities of enzymes related to nitrogen metabolism in flag leaves and protein contents in grains of wheat[J]. *Acta Agron. Sin.*, 2006, 32(3): 339-344.
- 王小纯,熊淑萍,马新明,等. 不同形态氮素对专用型小麦花后氮代谢关键酶活性及子粒蛋白质含量的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(4): 802-808.
Wang X C, Xiong S P, Ma X M. Effects of different nitrogens for on key enzyme activity involved in nitrogen metabolism and grain protein content in specialty wheat cultivars[J]. *Acta Ecol. Sin.*, 2005, 25(4): 802-808.
- 李永康,蒋高明,杨景成. 温度对小麦碳氮代谢、产量及品质影响[J]. 植物生态学报, 2003, 27(2): 164-169.
Li Y G, Jiang G M, Yang J C. Effects of temperature on carbon and nitrogen metabolism, yield and quality of wheat[J]. *Acta Phytoecol. Sin.*, 2003, 27(2): 164-169.
- 赵春,焦念元,宁堂原,等. 不同环境条件下小麦氮代谢关键酶活性及子粒品质[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1866-1870.
Zhao C, Jiao N Y, Ning T Y *et al.* Enzyme activities in nitrogen metabolism of winter wheat and its grain quality under different environmental conditions[J]. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2006, 17(10): 1866-1870.
- 蔡瑞国,张敏,戴忠民,等. 施氮水平对优质小麦旗叶光合特性和子粒生长发育的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 49-55.
Cai R G, Zhang M, Dai Z M *et al.* Effects of nitrogen application rate on flag leaf photosynthetic characteristics and grain growth and development of high-quality wheat[J]. *Plant Nutr. Fert. Sci.*, 2006, 12(1): 49-55.
- 王旭东,于振文,王东. 钾对小麦旗叶蛋白水解酶活性和子粒品质的影响[J]. 作物学报, 2003, 29(2): 285-289.
Wang X D, Yu Z W, Wang D. Effect of potassium on flag leaf proteinases activity and kernel quality in wheat[J]. *Acta Agron. Sin.*, 2003, 29(2): 285-289.
- 许振柱,周广胜. 植物氮代谢及其环境调节研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 511-516.
Xu Z Z, Zhou G S. Research advance in nitrogen metabolism of plant and its environment regulation[J]. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2004, 15(3): 511-516.
- 洪剑明,柴小清,曾晓光,等. 小麦硝酸还原酶活性与营养诊断和品种选育研究[J]. 作物学报, 1996, 22(5): 634-637.
Hong J M, Cai X Q, Zeng X G *et al.* Study on nitrate reductase activity between nutrition diagnosis and variety breeding of wheat[J]. *Acta Agron. Sin.*, 1996, 22(5): 634-637.
- 曹翠玲,李生秀. 水分胁迫和氮素有限亏缺对小麦拔节期某些生理特性的影响[J]. 土壤通报, 2003, 34(6): 505-509.
Cao C L, Li S X. Effect of water stress and nitrogen deficiency on some physiological characteristics and wheat yield at the jointing stage[J]. *Chin. J. Soil Sci.*, 2003, 34(6): 505-509.
- 蔡永萍,陶汉之,张玉琼. 土壤渍水对小麦开花后叶片几种生理特性的影响[J]. 植物生理学通讯, 2000, 36(2): 110-113.
Cai Y P, Tao H Z, Zhang Y Q. The effect of soil waterlogging on several physiological characters of wheat leaf after flowering[J]. *Plant Physiol. Commun.*, 2000, 36(2): 110-113.
- Barber J S. Factors influencing the grain yield and quality in irrigated wheat[J]. *J. Agric. Sci.*, 1987, 109(1): 19-26.
- 王月福,于振文,李尚霞,等. 不同施肥水平对不同品种小麦子粒蛋白质和地上器官游离氨基酸含量的影响[J]. 西北植物学报, 2003, 23(3): 417-421.
Wang Y F, Yu Z W, Li S X *et al.* The effects of different fertilization level on grain protein and free amino acid content of organs above ground of different wheat variety[J]. *Acta Bot. Boreo-Occident. Sin.*, 2003, 23(3): 417-421.
- Galantini J A, Landriscini M R, Iglesias J O. The effects of crop rotation and fertilization on wheat productivity in the Pampean semiarid region of Argentina: Nutrient balance, yield and grain quality[J]. *Soil Till. Res.*, 2000, 53: 137-144.
- 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子粒蛋白质积累的影响[J]. 生态学杂志, 2006, 25(2): 149-154.
Fan X M, Jiang D, Dai T B *et al.* Effects of nitrogen supply on nitrogen metabolism and grain protein accumulation of wheat under different water treatment[J]. *Chin. J. Ecol.*, 2006, 25(2): 149-154.