

两种水分条件下真菌接种及氮肥施加对小麦生长、生理及氮磷吸收的影响

张蓓蓓, 张辉, 景琦, 武悦萱, 校思泽, 王苗苗

(陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室/宝鸡文理学院地理与环境学院, 陕西 宝鸡 721013)

摘要:为探究不同水分条件下真菌接种和氮肥施加对小麦生长、水分利用效率及营养吸收的影响,以小麦品种 Superb 为材料,选取丛枝菌根接种(接种和不接种)和氮肥施加($0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)在两个水分处理(拔节期开始,水分充足 WW 和水分胁迫 WD)的温室条件下进行试验,分析开花期生长及叶片气体交换参数和成熟期产量及籽粒、茎秆氮磷含量的变化,最后对水分利用效率和籽粒、茎秆氮磷含量作了相关性分析。结果显示:两种水分条件下接种丛枝菌根(AMF)均显著提高旗叶的比叶面积(SLA),其中,水分胁迫处理施氮显著降低叶片 SLA, AMF 接种显著增大叶片的相对含水量(RWC);两种水分条件下,菌根接种和氮肥(N)施加均显著提高叶片净光合速率(P_n)和蒸腾速率(Tr),其中,水分胁迫处理下,AMF 接种对 P_n 的影响显著,N 肥施加和 AMF 接种后的 P_n 比 CK 高 31%;两种水分处理下,N 肥施加和 AMF 接种后小麦 WUE 和瞬时水分利用效率(WUEi)值升高,其中,水分胁迫环境下,AMF 接种和 N 肥施加下小麦 WUE 分别提高了 13.02% 和 1.17%,且不同处理下叶片稳定性碳同位素分辨率(CID)也有所升高。水分胁迫处理下,施 N 和 AMF 接种均显著提高小麦茎和籽粒氮含量、株高、生物量和产量,茎秆和籽粒的磷含量也显著升高。WUE 与籽粒、茎秆氮、磷含量呈显著的正相关,CID 与籽粒、茎秆氮磷含量呈显著负相关关系。总的来说,N 肥施加和 AMF 接种可显著改善小麦在干旱条件下的生长及生理变化。

关键词:小麦; 生长; 干旱; 真菌; 氮肥; 氮吸收; 磷吸收; 水分利用效率

中图分类号:S512.1 文献标志码:A

Effect of mycorrhizal fungi inoculation and nitrogen fertilization on physiological characteristics, growth, and nitrogen and phosphorus uptake of wheat under two distinct water regimes

ZHANG Bei-bei, ZHANG Hui, JING Qi, WU Yue-xuan, XIAO Si-ze, Wang Miao-miao

(Key Laboratory of Disaster Survey and Mechanism Simulation of Shaanxi Province / College of Geography and Environment, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shannxi 721013, China)

Abstract: In order to explore the effects of mycorrhizal fungi (AMF) inoculation and N fertilization ($0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) on wheat growth, WUE, nutrient uptake under different water regimes, well-watered (WW) and water-deficit (WD), a greenhouse experiment was conducted and relationships among the phosphorus (P), N concentration of stem, seed, and WUE were also analyzed. The results showed that the specific leaf area (SLA) of flag leaves was significantly increased by AMF inoculation under the two water regimes while the SLA was lowered under N fertilization and the relative water content (RWC) was increased under drought conditions. Nitrogen fertilization significantly increased the leaf P_n and Tr but AMF inoculation only significantly increased the P_n under N fertilization and AMF inoculation by 31% under water-deficit condition compared to CK. The WUE and instantaneous WUE (WUEi) were enhanced by N fertilization and AMF inoculation under both water conditions. Under water-deficit condition, the wheat WUE increased by 13.02% and 1.17%, respectively, under the inoculation of AMF and N fertilization. In addition, the leaf carbon isotope discrimination (CID) was also increased under different treatments. Combined N fertilization and AMF inoculation significantly increased N concentrations in wheat

stem and grain, plant height, biomass, and grain yield under water-deficit situation. The P concentrations in stem and grain were also increased. In addition, the WUE was positively correlated with grain N, and stem N, P concentrations. In general, the plant physiological characters were decreased by water-deficiency but improved by N fertilization and AMF inoculation under water-deficiency.

Keywords: wheat; growth; drought; mycorrhizae fungi; nitrogen fertilizer; nitrogen uptake; phosphorus uptake; water use efficiency

小麦品种 Superb 是生长在加拿大西部草原上的主要作物之一,西部草原生态区主要位于阿尔伯塔省,该区气候特点是生长季节短,干旱和热胁迫频繁。小麦主要生长在雨养条件下,干旱在生长季节的任何时候都会发生。除了干旱胁迫之外,营养缺乏,特别是氮(N)和磷(P)缺乏,也是农业生态者关注的主要问题^[1-2]。研究发现,丛枝菌根(AMF)与植物根系共生可以促进植物对水分和养分的吸收,促进植物生长^[3-4]。这种共生关系往往导致植物吸收水分、体内流动及流出植物体速率的变化,进而影响组织水化和植物的生理学反应^[5-6]。前人研究显示,真菌接种可以改变寄主植物体的水分状况^[7-8]。同时,干旱胁迫条件下,真菌接种后植物叶片的水势较高,使得植物体的水分状况良好^[9-10]。另外,接种后的植物比不接种的植物表现出较高的光合速率^[11]。AMF 可显著改善干旱胁迫下植物的气孔导度,蒸腾和光合作用^[12]。另有报道显示 AMF 可增加光合单位的数量,光储存及光输出,还可以提高植物的水分利用效率^[13-15]。以往的研究主要集中在真菌接种对不同植物生长和产量的直接影响上^[16-17],但对真菌接种、氮(N)肥施加和不同水分条件下加拿大主栽小麦品种的水分利用效率(WUE)、稳定性碳同位素分辨率(Δ)和生长状况研究较少。在该研究中,通过使用气体交换方法和碳同位素法测定不同处理下小麦的水分利用效率来评估 AMF、N 肥施加在两种水分条件下对小麦水分利用率和 N、P 吸收的影响,以期为不同胁迫条件下小麦的种植模式优化提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

品种为加拿大西部草原广泛种植的硬春红麦品种 Superb, 基本特征为偏矮较壮、有芒、高产和晚熟。

1.2 试验设计

试验处理由两个氮肥添加水平($0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、两个土壤水分水平(水分充足, 95% 田间最大持水量, WW; 水分胁迫, 40% 田间最大持

水量, WD)和两个真菌(AMF, *Glomus intraradices*, 每克大概含有 1600 个繁殖体)接种水平(接种和不接种)组成, 随机区组设计, 8 个处理且每个处理 4 次重复, 在 WW 和 WD 处理下分别有 4 个处理, 为(1) CK: 无氮肥, 不接种; (2) M: 无氮肥, 接种; (3) N: 氮肥 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 不接种; (4) MN: 氮肥 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 接种。所有盆栽随机放置在光周期为 16 h 的温室内, 白天晚上的温度分别为 25℃ 和 15℃。

试验采用的是 20 cm 高和 30 cm 直径的塑胶盆, 每盆装 6.5 kg 的混合土壤(为了增加土壤的松软度, 土壤由泥煤苔和大田土壤 1 : 1 混合而成), 土壤 pH 值 6.0, 有机质含量 $86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, N 含量 $56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, P 含量 $34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, K 含量 $296 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, S 含量为 $41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。种植前进行田间最大持水量测定, 施加氮肥, 并对小麦种子进行接种。每盆播种接种后的小麦种子 10 颗, 后间苗为 4 株, 保持水分充足至拔节期, 对水分胁迫的盆栽停止浇水直到土壤水分含量为 40% 的田间最大持水量; 水分充足的盆栽一直保持在 95% 田间持水量左右, 两种土壤水分处理一直保持到作物成熟。开始水分处理后, 每 1~2 d 称一次盆重, 根据水分胁迫和水分充足处理计算水分利用及每天浇水量。

1.3 生理指标和氮磷含量的测定

1.3.1 生理指标测定 开花期, 测定旗叶的比叶面积(SLA)和叶片相对含水量(RWC)^[18]; 用 Li-Cor6400 测定旗叶的光合速率(P_n)和蒸腾速率(Tr)。瞬时水分利用效率(WUE_i) = P_n/Tr 。开花期时每盆收获两株小麦测定地上部分生物量, 并根据该时间段所用水分计算从拔节期到开花期的水分利用效率(WUE), $WUE = \text{地上生物量}/\text{用水重量}$ 。成熟期时测定株高、生物量及产量。

稳定性碳同位素分辨率(CID, Δ)测定^[19]: 开花期时, 每盆随机选取 5 片旗叶剪下, 所有叶片放置在 105℃ 的烘箱杀青, 然后 80℃ 烘干 48 h 至恒重, 烘干的叶片由 Spex Sample Prep 8000D(GV Instruments Ltd, Manchester, UK)球磨仪磨碎后用同位素质谱仪 MAT-253 进行稳定性碳同位素丰度的测定。计算方式如下:

$$CID(\%) = [(\delta a - \delta p) / (1 + \delta p)] \times 1000$$

其中, δa 为大气中的稳定性碳同位素丰度, δp 为小麦叶片的稳定性碳同位素丰度。

1.3.2 氮磷含量测定 成熟后, 小麦种子和茎秆磨碎后进行消解, 然后用 Flowsys 连续流动分析仪进行总氮及总磷的测定。

1.4 数据分析

试验数据采用 Microsoft Office Excel 2003 和 SPSS 22.0 进行方差分析, Pearson 进行相关分析; 用 Tukey's HSD 检验进行多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理下小麦旗叶相对含水量和比叶面积差异分析

水分充足处理下, N 肥施加和真菌接种显著增加了旗叶的相对含水量(RWC), 但是水分胁迫降低了旗叶的 RWC(表 1 和图 1A 所示)。水分充足处理下, MN 处理下比 CK 处理下叶片的 RWC 升高了 12.9%; 水分胁迫处理下, RWC 升高了 17.3%。氮肥施加、真菌接种及水分处理均对比叶面积(SLA)产生显著的影响(表 1)。其中, 真菌接种提高了小麦叶片的 SLA, 但是 MN 处理下叶片的 SLA 降低(图 1B)。

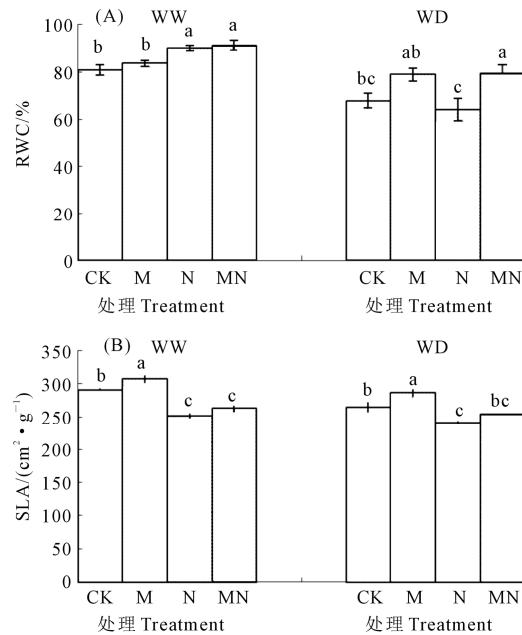
表 1 两种水分处理下氮肥施加和真菌接种对小麦旗叶叶片相对含水量和比叶面积影响的差异分析

Table 1 Analysis of variance of effect on relative water content and specific leaf area of flag leaves of wheat subjected to different N fertilization, AMF inoculation under two water conditions

水分处理 Water regime	因素 Factor	相对含水量 Relative water content (RWC)	比叶面积 Specific leaf area (SLA)
WW	N	25.76 **	93.66 **
	M	1.55	10.41 **
	M×N	0.22	0.30
WD	N	0.19	29.30 **
	M	13.87 **	11.17 *
	M×N	0.38	0.66
不同水分处理 F 值 The F value under different water regimes		51.04 **	29.47 **

注: 每一列的数字代表了 F 值, 其中 * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。N: 氮肥处理; M: 真菌处理; WW: 95% 田间持水量; WD: 40% 田间持水量。下同。

Note: the numbers in the column mean the significant F value. * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$. N: nitrogen treatments; M: mycorrhizal fungi inoculation; WW: Well-watered (95% field capacity), WD: Water-deficit (40% field capacity). The same below.



注: CK: 无氮肥不接种; M: 无氮肥接种; N: 氮肥 180 kg · hm⁻² 不接种; MN: 氮肥 180 kg · hm⁻² 接种。下同。

Note: CK: no N fertilization and non-mycorrhizal inoculation; M: no N fertilization and mycorrhizal inoculation; N: 180 kg · hm⁻² N fertilization and non-mycorrhizal inoculation; MN: 180 kg · hm⁻² N fertilization and mycorrhizal inoculation. The same below.

图 1 两种水分条件下真菌接种、氮肥施加对小麦旗叶叶片相对含水量(RWC)和比叶面积(SLA)的影响

Fig.1 Effect of N, mycorrhizal inoculation under WW and WD treatments on relative water content (RWC) and specific leaf area (SLA) of flag leaves

2.2 不同处理下小麦旗叶光合速率、蒸腾速率、水分利用效率及稳定性碳同位素分辨率差异分析

叶片气交换参数和水分利用效率见表 2。叶片 Pn 和 Tr 在 WW 水分处理下较高。其中, 氮肥施加及真菌接种均对 Pn 有显著的正向作用, 而 Tr 只有显著的氮肥施加效应。水分充足条件下, MN 处理下的 Pn 比 CK 高 34%; 水分胁迫条件下, MN 处理下的 Pn 比 CK 高 31%。氮肥施加和水分胁迫对拔节期到开花期的 WUE 有显著促进的作用, 只有在水分充足条件下, 氮肥施加对 WUEi 有显著的影响。氮肥施加显著地提高了叶片的 CID, 但水分胁迫显著降低了叶片的 CID。

2.3 不同处理下小麦籽粒、茎秆氮磷含量差异分析

由表 3 看出, 水分充足条件下, 氮肥施加及真菌接种可显著影响茎秆及籽粒的氮含量。水分胁迫条件下, 氮肥施加和真菌接种的综合作用显著提高了籽粒和茎秆的氮含量(图 2A), 以该条件 MN 处理下的氮含量最高。水分胁迫条件下, 氮肥施加对籽

表2 两种水分条件下氮肥施加及真菌接种对小麦叶片光合速率、蒸腾速率、水分利用效率及稳定性碳同位素分辨率的影响

Table 2 Effects of different N fertilization and AMF inoculation under two water regimes on leaf photosynthesis (Pn), transpiration (Tr), water use efficiency (WUE) and carbon isotope discrimination (CID) of wheat

处理 Treatment	光合速率 Pn		蒸腾速率 Tr		瞬时水分利用效率 Instantaneous water use efficiency WUEi / (μmol · mmol⁻¹)	水分利用效率 Water use efficiency WUE /(g · kg⁻¹)	稳定性碳同位素分辨率 Carbon isotope discrimination CID/‰
	Photosynthetic rate /(μmol · m⁻² · s⁻¹)	Transpiration rate /(mmol · m⁻² · s⁻¹)					
WW	CK	20.28±0.97	7.21±0.99		2.81±0.15	2.75 ± 0.17	21.76±0.36
	M	21.48±0.85	7.28±0.24		2.95±0.74	3.10±0.10	21.46±0.18
	N	24.87±1.52	7.97±0.80		3.11±0.21	6.61±0.44	22.24±0.39
	MN	27.10±0.62	7.58±0.24		3.56±0.32	6.50±0.53	22.62±0.34
WD	CK	17.27±0.22	5.05±1.09		3.42±0.10	3.13±0.33	20.21±0.40
	M	19.78±0.93	5.08±0.24		3.90±0.12	3.32±0.36	20.20±0.41
	N	19.94±0.99	6.26±0.79		3.30±0.36	6.51±0.80	20.68±0.20
	MN	22.65±3.38	6.01±0.57		3.77±0.39	7.07±0.81	21.36±0.40
差异性分析(F 值) ANOVA (F value)							
WW	N	2.06	4.45 *		4.75 *	101.51 **	6.27 *
	M	2.31	0.18		2.02	0.12	0.02
	M * N	0.03	0.03		0.55	0.40	1.07
WD	N	20.00 **	18.46 **		0.01	32.97 **	5.55 *
	M	6.18 **	0.04		0.99	0.37	0.83
	M * N	0.25	0.24		0.03	0.09	0.90
不同水分处理 F 值 The F value under different water regimes							
		13.51 **	9.16 **		7.15 **	28.03 **	30.98 **

注:表里上半部分的值代表了平均值±标准误,下半部分的值为 F 值,且 * $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。

Note: The values presented in the first part of table are mean±standard errors. The last part of table means the F value. * $P<0.05$, ** $P<0.01$.

表3 两种水分处理下氮肥施加和真菌接种对小麦籽粒、茎秆氮磷含量影响的差异分析

Table 3 Analysis of variance of effect of different N fertilization and AMF inoculation on N and P concentrations in stem and grain of wheat at maturity stage under WW and WD conditions

水分处理 Water regime	方差分析 ANOVA	氮含量		磷含量			
		N concentration		P concentration			
		茎秆 Stem	籽粒 Grain	茎秆 Stem	籽粒 Grain		
WW	N	30.47 **	31.97 **	28.93 **	44.05 **		
	M	4.61 *	4.57 *	1.14	15.15 **		
	M×N	1.40	0.04	0.51	2.41		
WD	N	28.88 **	81.49 **	2.91	3.75		
	M	1.92	2.62	1.16	4.82 *		
	M×N	1.03	1.52	0.13	0.22		
不同水分处理 F 值 The F value under different water regimes		50.49 **	40.67 **	7.39 *	228.05 **		

粒和茎秆磷含量有显著的影响;同时两种水分条件下,仅真菌接种对籽粒的磷含量有显著的影响(图 2B)。不同处理下,籽粒、茎秆氮含量和籽粒磷含量之间存在着显著的相关关系,其中,籽粒磷含量与籽粒氮含量呈显著的正相关关系($r=0.50, P<0.05$),籽粒磷含量与茎秆氮含量也呈显著的正相关关系($r=0.68, P<0.01$)。

2.4 不同处理下小麦株高、生物量和产量差异分析

由表4看出,两种水分条件下,氮肥施加及真菌接种均显著影响了小麦的株高。同时,氮肥施加及真菌接种促进了小麦的生物量及产量(图3)。

表4 两种水分处理下氮肥施加和真菌接种对小麦株高、生物量及产量影响的差异分析

Table 4 Analysis of variance of effect of different N fertilization and AMF inoculation on plant height, biomass, and yield under WW and WD conditions

水分处理 Water regime	方差分析 ANOVA	株高		生物量		产量 Yield
		N	Plant height	Biomass		
WW	N	19.98 **		117.23 **	254.47 **	
	M	4.44 *		6.44 *	7.38 *	
	N×M	0.52		1.78	7.19 *	
WD	N	16.40 **		15.28 **	12.14 **	
	M	4.99 *		5.68 *	5.32 *	
	N×M	0.18		0.04	0.01	
不同水分处理 F 值 The F value under different water regimes		51.07 **		124.81 **	207.62 **	

2.5 不同处理下水分利用效率与籽粒、茎秆氮磷含量相关分析

由表5看出,WUE 与籽粒氮含量和籽粒、茎秆磷含量之间存在显著的正相关关系,与茎秆氮含量相关不显著。叶片 CID(Δ)与籽粒、茎秆氮磷含量之间存在显著的负相关关系,但 WUEi 仅与籽粒磷含量呈正相关关系。

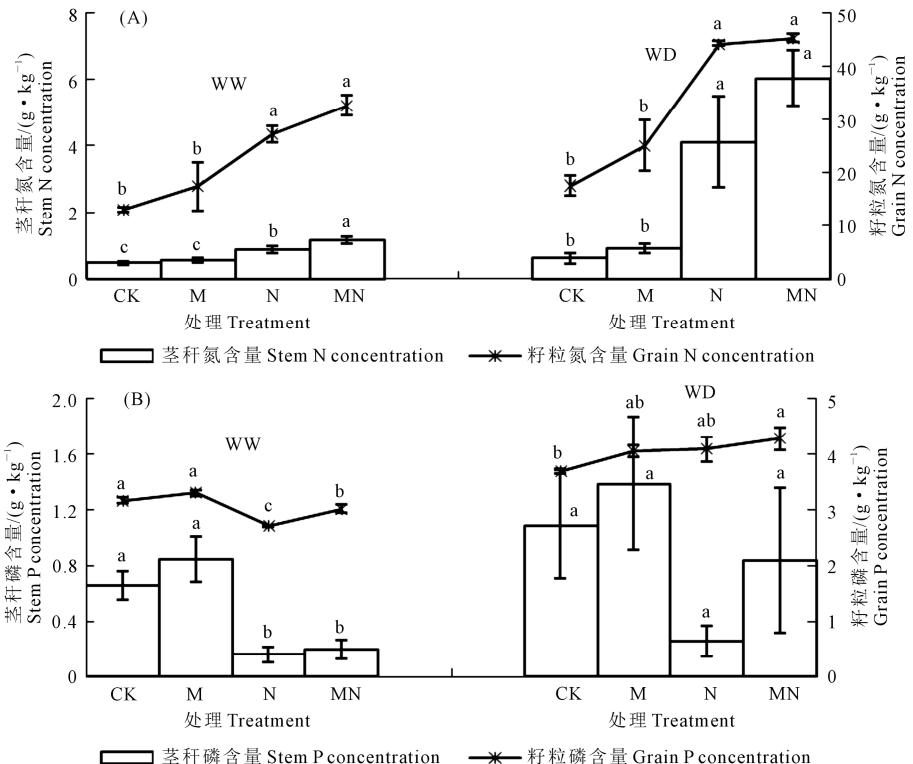


图2 两种水分条件下真菌接种、氮肥施加对小麦籽粒、茎秆氮磷含量的影响

Fig.2 Effect of N, mycorrhizal inoculation under WW and WD treatments on grain, stem nitrogen, and phosphorus concentrations

表5 小麦水分利用效率与籽粒、茎秆氮磷含量相关性分析

Table 5 The correlation among water use efficiency (WUE), N and P concentrations in stem and grain

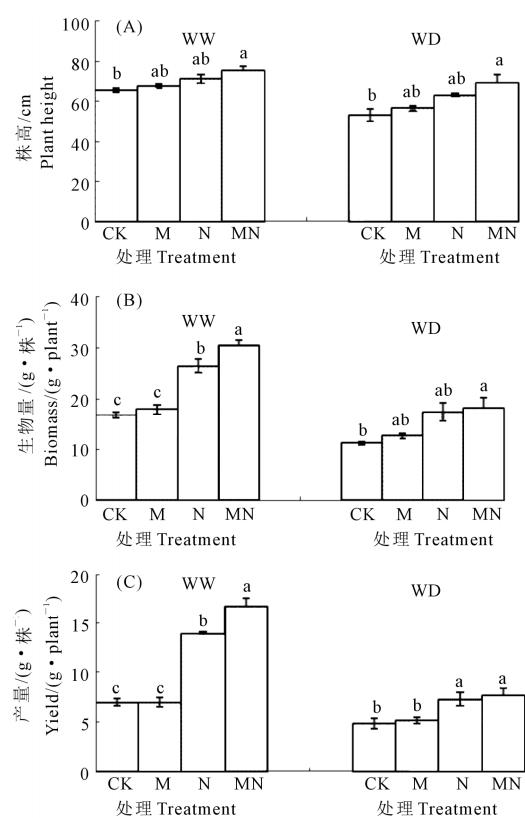


图3 两种水分条件下真菌接种、氮肥施加对小麦株高、生物量和产量的影响

Fig.3 Effect of N, mycorrhizal inoculation under WW and WD treatments on plant height, biomass, and yield

	WUE	WUEi	CID	籽粒 N Grain N	茎秆 N Stem N	籽粒 P Grain P	茎秆 P Stem P
WUE	1						
WUEi	0.22	1					
CID	-0.71 **	-0.04	1				
籽粒 N Grain N	0.43 *	0.19	-0.60 **	1			
茎秆 N Stem N	0.35	0.31	-0.51 **	0.78 **	1		
籽粒 P Grain P	0.59 **	0.53 **	-0.49 **	0.50 **	0.68 **	1	
茎秆 P Stem P	0.49 **	0.14	-0.46 *	-0.28	-0.26	0.28	1

注 Note: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。

3 讨 论

水分胁迫对植物生长、生物量及产量的影响与形态学和物候学相关,水分供应可显著影响植物生长和作物产量的提高^[20],本研究与前人研究结果相似,水分胁迫(WD)可严重影响小麦的生长及产量的形成及提高。水分胁迫下,植物生物量及产量的降低主要通过改变一些生理过程而完成,比如干旱引起叶面积的缩小,影响冠层系统对光合有效辐射(PAR)的吸收,进而导致新的干物质生产减少,叶

面积继续缩小,光合产物减少,表现为生长发育的减慢及产量的降低,呈现一种负反馈的机制^[21]。本研究中叶片 RWC 和 SLA 在干旱条件下显著降低(图 1),这与前人对小麦研究的结果相似^[22],主要的生理机制可能为干旱胁迫下叶片细胞的水力传导率降低,使得叶片生长减慢,进而降低水分运移速率,阻碍细胞分裂和叶片膨大,最终阻碍叶片的发育^[23]。此外,与前人对豇豆和大麦的研究结果相似^[24],温室环境下水分胁迫提高了小麦的 WUE 和 WUEi。水分胁迫条件下,叶片的气孔导度(G_s)和叶片蒸腾(Tr)显著降低,叶片光合速率(Pn)略有下降,使得叶片 WUEi 增加。此外,水分胁迫处理下,叶片细胞通过渗透调节提高叶片的保水能力,使得水的利用效率增强,进而提高植物的 WUE^[25]。该研究中,干旱降低了小麦的 CID,真菌接种提高了小麦 CID 的值。Yasir 等^[26]也报道了类似的结果,干旱环境下 49 种小麦 CID 的值降低。同时本研究中 CID 与 WUE 呈显著负相关关系,这与 Farquhar 等研究相似,该关系已被证实是一种可靠的预测 WUE 的分析测定方法^[19]。

丛枝菌根真菌(AMF)是土壤微生物区系中生物量最大最重要的成员之一,能改善土壤理化特性和土壤微生物菌群结构。真菌接种的研究表明^[27],接种的玉米叶片叶面积显著高于未接种处理的叶片,这与本研究真菌接种后对叶片的影响结果相一致(图 1B)。此外,真菌接种可显著改善植物的含水量^[28]。本研究中,真菌接种后叶片 RWC 提高了将近 10%(图 1A)。同时,在不同水分条件下,真菌接种及氮肥施加均引起了小麦生长、生物量及产量的提高;引起该正向效应的原因可能为菌丝提高了作物对土壤中氮肥及水分的吸收^[29],最终促进了植物的生长发育^[30]。此外,在水分胁迫条件下,接种的植物 WUE 高于未接种的植物,表明 AMF 接种可有效改善干旱胁迫下植物的生理性能^[31]。分析原因,可能是真菌接种后菌丝大量繁殖,通过共生作用提高植物根系吸收水分的能力,借助广泛的菌丝网络,确保更好的气孔调节和碳同化,进而减轻水分胁迫的影响,提高水分利用效率^[32]。本研究也得到了相似的结果,水分胁迫条件下,接种后小麦的 WUE 升高了 10%(表 2)。本研究结果显示茎秆氮磷含量均高于籽粒,此外,接种后小麦茎秆氮磷含量均高于未接种的小麦,这与 Attia 和 Nemat 的研究结果相似^[33]。接种 AMF 后直接导致小麦吸收及获取氮磷能力的提高;有结果表明,在干旱条件下,外源 AM 真菌菌丝对玉米的氮磷转运增加,进而提高

玉米不同器官的氮磷含量^[34]。籽粒、茎秆磷含量与氮含量之间存在显著的正相关关系,可能因为接种 AMF 后,菌丝通过提高氮素吸收来影响土壤中磷的利用;同时,菌丝提高根系吸收水分利用的能力,以水调肥,共同促进氮磷含量的提高^[35]。

4 结 论

在许多地区,水成为作物生产及生长的主要限制因素,AMF 接种作为改善植物吸收水分及养分的手段是一种很有前景的策略,在旱作条件下,可显著提高小麦的产量。本研究在温室条件下,AMF 接种提高了小麦对磷、氮的吸收,促进了小麦的 WUE 和产量的提高。AMF 接种可显著提高水分胁迫条件下植物的水分利用效率,表明干旱环境下 AMF 接种可有效地改善植物生长。WUE 与籽粒、茎秆氮磷含量呈显著正相关,表明小麦的生理指标 WUE 与品质指标氮磷含量呈胁同性变化趋势,下一步研究方向是选择更多的小麦基因型进行大田试验,综合考虑各方面因素进行进一步的验证。

致谢:在此感谢加拿大阿尔伯塔大学的 Scott X. Chang 和 Anthony O. Anyia 教授对该试验提供的帮助。

参 考 文 献:

- [1] Chen J, Chang X S, Anyia O A. The physiology and stability of leaf carbon isotope discrimination as a measure of water-use efficiency in barley on the Canadian prairies [J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2010, 197(1):1-11.
- [2] 阳显斌,张锡洲,李廷轩,等.施磷量对不同磷效率小麦氮、磷、钾积累与分配的影响[J].核农学报,2012, 26(1): 141-149.
- [3] Zhang B B, Chang X S, Anyia O A. Mycorrhizal inoculation and nitrogen fertilization affect the physiology and growth of spring wheat under two contrasting water regimes [J]. Plant and Soil, 2016, 398(1-2): 47-57.
- [4] Condon A G, Richard R A, Rebetzke G J, et al. Breeding for high water-use efficiency [J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(407): 2447-2460.
- [5] Augé R M. Water relations, drought and vesicular arbuscular mycorrhizal symbiosis [J]. Mycorrhiza, 2002, 11(1): 3-42.
- [6] Wu Q S, Xiao R X , Zou Y N. Improved soil structure and citrus growth after inoculation with three arbuscular mycorrhizal fungi under drought stress [J]. European Journal of Soil Biology, 2008, 44 (1): 122-128.
- [7] Liu Z L, Ma L N, He X Y, et al. Water strategy of mycorrhizal rice at low temperature through the regulation of PIP aquaporins with the involvement of trehalose [J]. Applied Soil Ecology, 2014, 84: 185-191.

- [8] Zhang B B, Liu W Z, Chang X S, et al. Phosphorus fertilization and fungal inoculations affected the physiology, phosphorus uptake and growth of spring wheat under rainfed conditions on the Canadian prairies [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2013, 199(2): 85-93.
- [9] 李鑫, 周冀衡, 贺丹锋, 等. 干旱胁迫下枸溶性钾肥配施对烤烟土壤理化性质、微生物数量及根系生长的影响[J]. *核农学报*, 2016, 30(12): 2434-2440.
- [10] Subramanian K S, Charest C, Dwyer L M, et al. Arbuscular mycorrhizas and water relations in maize under drought stress at tasseling[J]. *New Phytologist*, 1995, 129(4): 643-650.
- [11] Tawaraya K. Arbuscular mycorrhizal dependency of different plant species and cultivars[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2003, 49(5): 655- 668.
- [12] Dixon R K, Rao M V, Garg V K. Water relations and gas exchange of mycorrhizal Leucaena leucocephala seedlings [J]. *Journal of Tropical Forest Science*, 1994, 6(1): 542-552.
- [13] 张蓓蓓. 小麦水分利用效率对干旱、高温及真菌接种等环境的响应[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2011.
- [14] Wang G M, Coleman D C, Freckman D W, et al. Carbon partitioning patterns of mycorrhizal versus non-mycorrhizal plants: real time dynamic measurements using CO₂ [J]. *New Phytologist*, 1989, 112(4): 489-493.
- [15] Simpson D, Daft M J. Interactions between water-stress and different mycorrhizal inocula on plant growth and mycorrhizal development in maize and sorghum [J]. *Plant and Soil*, 1990, 121(2): 179-186.
- [16] Gholamhoseini M, Ghalavand A, Dolatabadian A, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on growth, yield, nutrient uptake and irrigation water productivity of sunflowers grown under drought stress[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 117: 106-114.
- [17] Farquhar G D, O'Leary M H, Berry J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves [J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1982, 9: 121-137.
- [18] Rebetzke G J, Richards R A. Genetic improvement of early vigour in wheat[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1999, 50(3): 291-301.
- [19] Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1989, 40: 503-537.
- [20] Omirou M, Ioannides M I, Ehaliotis C. Mycorrhizal inoculation affects arbuscular mycorrhizal diversity in water melon roots, but leads to improved colonization and plant response under water stress only[J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, 63: 112-119.
- [21] 江晓东, 石姣姣, 李映雪, 等. 不同筋力冬小麦冠层反射光谱的差异分析[J]. *核农学报*, 2014, 28(8): 1503-1509.
- [22] Stone P J, Wilson D R, Reid J B, et al. Water deficit effects on sweetcorn: I. Water use, radiation use efficiency, growth, and yield[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2001, 52(1): 103-113.
- [23] Morte A, Lovisolo C, Schubert A. Effect of drought stress on growth and water relations of the mycorrhizal association *Helianthemum almeriense-Terfezia claveryi*[J]. *Mycorrhiza*, 2000, 10(3): 115-119.
- [24] Anyia A O, Herzog H. Water-use efficiency, leaf area and leaf gas exchange of cowpeas under mid-season drought[J]. *European Journal of Agronomy*, 2004, 20(4): 327-339.
- [25] Anyia A O, Slaski J J, Nyachiro J M, et al. Relationship of carbon isotope discrimination to water use efficiency and productivity of barley under field and greenhouse conditions [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2007, 193(5): 313-323.
- [26] Yasira T A, Min D H, Chen X J, et al. The association of carbon isotope discrimination (Δ) with gas exchange parameters and yield traits in Chinese bread wheat cultivars under two water regimes [J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 119: 111-120.
- [27] Sarabia M, Cornejo P, Azcón R, et al. Mineral phosphorus fertilization modulates interactions between maize, rhizosphere yeasts and arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Rhizosphere*, 2017, 4: 89-93.
- [28] Luise K, Marcel G A, van der H. Arbuscular mycorrhizal fungal species differ in their effect on nutrient leaching [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 94: 191-199.
- [29] Faber B A, Zasoske R J, Munns D N, et al. A method for measuring hyphal nutrition and water uptake in mycorrhizal plants[J]. *Canadian Journal of Botany*, 1991, 69(1): 87-94.
- [30] Bryla D R, Duniway J M. Effects of mycorrhizal infection on drought tolerance and recovery in safflower and wheat[J]. *Plant and Soil*, 1997, 197(1): 95-103.
- [31] Chen J, Chang S X, Anyia O A. Physiological characterization of recombinant inbred lines of barley with contrasting levels of carbon isotope discrimination[J]. *Plant and Soil*, 2013, 369(1-2): 335-349.
- [32] Li J, Guo X P, Zhu Q K. Study on correlation of transpiration, photosynthesis and water use efficiency with soil water contents of fruit trees[J]. *Soil and Water Conservation Research*, 2007, 14(1): 302-305.
- [33] Kaya C, Higgs D, Kirmak H, et al. Mycorrhizal colonization improves fruit yield and water use efficiency in watermelon (*Citrullus lanatus* Thunb) grown under well-watered and water-stressed conditions [J]. *Plant and Soil*, 2003, 253 (2), 287-292.
- [34] Attia M, Nemat A M. Assessment the impact of certain growth promoting rhizobacteria strains on symbiotic effectiveness of arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Egypt Journal of Microbiology*, 2003, 38: 75-88.
- [35] Corkidi L, Merhaut J D, Allen B E. Effects of mycorrhizal colonization on nitrogen and phosphorus leaching from nursery containers[J]. *Hortscience*, 2011, 46(11): 1472-1479.