

网络出版时间:2024-12-10

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20241210.0945.012

节水灌溉下减氮配施丛枝菌根真菌对旱地灌区 小麦灌浆期光合生理及氮代谢的影响

蒋长明¹,冉新民²,叶万玉¹,陈云香³

(1. 甘肃省水利厅水利技术服务保障中心,甘肃兰州 730000; 2. 兰州大学资源环境学院,甘肃兰州 730020;

3. 兰州资源环境职业技术大学水利工程学院,甘肃兰州 730020)

摘要:为了解节水灌溉下减氮配施丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)在小麦生产中的应用效果,以春小麦品系兰大211为材料,通过裂区试验,在两个灌溉量(常规灌溉400 mm和节水灌溉280 mm)和3个施氮水平[常规施氮($250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、减施氮肥20%($200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和减施氮肥40%($150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)]下设置AMF接种[菌种为摩西斗管囊霉(*Funneliformis mosseae*, FM)]和不接种处理,分析了不同处理间小麦灌浆期生长特性、光合生理、氮代谢过程以及产量的差异。结果表明,FM能够感染小麦根系,并形成稳定的共生关系。与常规灌溉相比,节水灌溉下FM的菌根侵染率、丛枝着生率、侵入点位数和孢囊数均降低。与常规灌溉下常规施氮处理相比,节水灌溉下减氮20%并接种FM处理对小麦群体干物质积累量和叶面积无显著影响,株高和群体总茎数均下降;小麦叶绿素含量、叶绿素荧光参数以及气体交换参数与正常灌溉下常规施氮处理无显著差异,但显著高于节水灌溉下减氮40%和减氮40%并接种FM处理。与常规灌溉下常规施氮处理相比,节水灌溉下减氮20%并接种FM处理的小麦旗叶全氮含量、游离氨基酸含量和可溶性蛋白含量及氮代谢过程中硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶、谷氨酸丙酮酸转氨酶和谷氨酸合成酶活性均无显著差异。节水灌溉下减氮20%并配施FM处理小麦产量达 $7786.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,与常规灌溉下常规施氮处理的产量无显著差异。本试验条件下,节水灌溉下减氮20%并配施FM能维持小麦灌浆期叶绿素含量以及光合作用,保持小麦氮代谢酶活性以及代谢产物含量,是旱地灌区节水、省肥、保持高产的绿色水肥管理模式。

关键词:小麦;丛枝菌根真菌;节水;减氮;光合作用;氮代谢

中图分类号:S512.1;S330

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)02-0213-11

Effects of Nitrogen Reduction and AMF Inoculation on the Photosynthetic Physiology and Nitrogen Metabolism of Wheat at Grain-filling Stage in Arid Irrigation Areas under Water-Saving Irrigation

JIANG Changming¹, RAN Xinmin², YE Wanyu¹, CHEN Yunxiang³

(1. Water Conservancy Technology Service Guarantee Center, Gansu Provincial Department of Water Resources, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. School of Resources and Environment, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730020, China;

3. School of Hydraulic Engineering, Lanzhou Resources and Environment Voc-Tech University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: To investigate the effects of nitrogen reduction combined with application of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on the growth characteristics, photosynthetic physiology, nitrogen metabolism process, and yield of wheat during the grain-filling stage under water-saving irrigation, a wheat line Landa 211 was used as the experimental material. Two irrigation amounts (normal irrigation of 400 mm, water-saving irrigation of 280 mm) and three nitrogen application levels [conventional nitrogen application ($250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), reduced 20% nitrogen fertilizer application ($200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), and reduced 40% nitrogen fertilizer application ($150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)] were set up, inoculated with the AMF strain

收稿日期:2024-01-05 修回日期:2024-03-11

基金项目:中国科学院科技先导专项(A类)(XDA23060702);国家自然科学基金项目(41771084)

第一作者 E-mail: Ahuizg1227@163.com(蒋长明)

通讯作者 E-mail: 3649233234@qq.com(冉新民)

Funneliformes mosseae (FM) and no inoculation. The results indicated that FM could infect wheat roots and formed a stable symbiotic relationship. Compared with normal irrigation, the mycorrhizal infection rate, arbuscular growth rate, number of invasion points, and number of vesicles of FM decreased under water-saving irrigation. Compared with the conventional nitrogen application treatment under normal irrigation, reduced 20% nitrogen under water-saving irrigation and inoculation with FM treatment had no significant effect on the dry matter accumulation and leaf area of wheat population, but the plant height and total stem number of the population decreased. The chlorophyll content, chlorophyll fluorescence parameters, and gas exchange parameters of wheat showed no significant differences compared to the conventional nitrogen application treatment under normal irrigation, but were significantly higher than reduced 40% nitrogen treatments under water-saving irrigation and FM inoculation. Compared with the conventional nitrogen application treatment under normal irrigation, there was no significant difference in the total nitrogen content, free amino acid content, soluble protein content of wheat flag leaves, and the activities of nitrate reductase, glutamine synthase, glutamic pyruvate transaminase, and glutamic acid synthase under reduced 20% nitrogen with water-saving irrigation and FM inoculation. The wheat yield under water-saving irrigation and reduced 20% nitrogen combined with FM treatment reached $7\ 786.0\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, which was not significantly different from the yield under normal irrigation with conventional nitrogen application. To conclude, reduced 20% nitrogen and applying FM in combination with water-saving irrigation could maintain the chlorophyll content and photosynthesis of wheat during the grain-filling period, and maintain the activity of wheat nitrogen metabolism enzymes and metabolite content, which was a green water and fertilizer management model for water-saving, fertilizer saving, and high-yield maintenance in arid irrigation areas.

Keywords: Wheat; Arbuscular mycorrhizal fungi; Water conservation; Reducing nitrogen; Photosynthesis; Nitrogen metabolism

水资源短缺一直是旱地灌区农作物面临的严峻挑战之一。由于全球气候的变化以及水资源的分布不均,干旱强度和频率的日益增加,缺水对西北旱区农业高效、可持续生产的限制作用更加突出^[1-3]。轻度缺水会抑制作物生长发育,影响其外部特征、生理生化过程、产量性状等,严重缺水可导致作物减产甚至绝收^[4]。在水资源短缺条件下,合理施肥可以提高土壤水分利用效率,促进作物生长发育,有效补偿缺水条件下植株生长的不足,改善作物的生理生态功能,促进干物质积累^[5-6]。但长期单施化肥或过量施肥会破坏土壤微生物群落平衡,降低作物群体光能利用效率,提高光合产物的消耗率,导致作物减产,不利于农业的可持续发展^[7]。因此,在旱地作物生产中科学合理的施肥是研究的重要领域之一。

丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)是自然界中普遍存在的一种土壤微生物,在系统发育上属于球囊霉亚门(Glomeromycotina),能与超过 90% 的陆生植物根系形成丛枝菌根,建立共生关系^[8-9]。农田土壤中接种 AMF

可减少化肥的使用量,提高肥料利用效率,刺激作物生长发育,减少环境污染^[10-11]。AMF 能促进作物吸收更多的矿质养分、水分和一些有机养分^[12],改善植株的营养状况,调节土壤理化特性,活化土壤养分^[13],改善土壤肥力和健康状况^[14],提高植株抗逆性以及作物产量和品质^[15]。有研究发现,低氮和高氮水平下 3 种 AMF 均能够侵染小麦根系,显著提高小麦的生物量和地上部氮吸收量,其中根内根孢囊霉 BJ09 菌根的侵染率最高^[16]。接种 AMF 能够提高 $250\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $260\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮量下土壤蛋白酶和脲酶的活性,使小麦氮肥利用率、氮肥农学效率、千粒重和产量均有所增加^[17]。水分胁迫下,接种 AMF 能显著促进小麦籽粒和叶片碳、氮积累,提高小麦净光合速率、产量、叶面积和水分利用效率,并降低小麦根冠比;而充分灌溉条件下,AMF 处理则未见显著效应^[18]。

甘肃是中国小麦主产区之一,小麦种植面积占全国种植总面积的 1/20,居中国第五位。但该地区水资源短缺,作物生产与用水矛盾及不合理

施肥现象较为严重,造成作物氮素过剩、养分失衡和土壤环境污染等诸多问题。因此,如何在有限水资源状况下优化肥料施用量和种类,以协同减少水分缺失的不利影响并降低肥料对作物产量的负面效应,是旱地灌区农业工作者关注的重点问题。以往研究多集中在氮肥减量、节水等措施对小麦氮代谢、生长特性、产量等方面的影响^[19-21],而针对节水灌溉下减施氮肥并接种 AMF 对小麦氮代谢相关酶活性以及光合特性、叶绿素荧光参数等方面的影响则未见报道。本研究通过分析节水灌溉下减施氮肥并接种 AFM 对旱地灌区小麦光合特性、叶绿素荧光参数及氮代谢相关酶活性的影响,明确 AMF 对旱区小麦的生理生态效应,以期对旱地灌区水分资源和氮肥的科学管理提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于甘肃省定西市通渭县平襄镇旱地农作物试验基地(105°14′6.67″E,35°12′46.78″N)。该地区年均气温 6.6 °C,年平均无霜期 146 d,年降水量 300~320 mm,降水量相对较少,为干旱区,属于温带季风气候区。试验田土壤主要为黑麻土,耕层土壤有机质含量 13.65 g·kg⁻¹,全氮含量 0.38 g·kg⁻¹,全磷含量 0.41 g·kg⁻¹,碱解氮含量 23.6 mg·kg⁻¹,速效磷含量 28.3 mg·kg⁻¹,速效钾含量 113.4 mg·kg⁻¹,pH 值为 7.2。

1.2 试验材料与设计

供试春小麦品种为兰大 211,选用的 AMF 菌种为摩西斗管囊霉(*Funneliformis mosseae*, FM),由兰州大学草地农业生态系统国家重点实验室提供,并以玉米和白车轴草作为寄主植物进行扩繁,培养基质由河沙、蛭石和珍珠岩按照 2:1:1 的比例混合而成。栽培容器为花箱(60 cm×30 cm×35 cm),先将培养基质高温高压(121 °C, 101 kPa)灭菌 20 min,晾干后在花箱中装填基质 10 kg,再填充菌剂 500 g,后装入剩余的基质 5 kg。将经 2% 氢氧化钠溶液消毒 20 min 的玉米和白车轴草种子用清水浸泡 10 h,后在培养箱中 25 °C 黑暗催芽,每箱种植 2 株玉米以及 50 株白车轴草,每周按照天气情况浇水 1~2 次以及 Hoagland 营养液 1 000 mL,3 个月后收获培养基质以及植株根系。经检测,FM 扩繁后孢子密度为

每 150 个 50 g,菌根侵染率 70%。

本试验采用三因素裂区设计:主区设置常规灌溉(灌水量 400 mm)和节水灌溉(灌水量 280 mm)2 个灌溉水平;裂区设置常规施氮(250 kg·hm⁻²,N₀)、减施氮肥 20%(200 kg·hm⁻²,N₂₀)和减施氮肥 40%(150 kg·hm⁻²,N₄₀)3 个施氮水平;裂裂区设置不接种 FM 以及接种 FM。共 12 个处理,每处理 3 次重复,小区面积为 50 m²(5 m×10 m)。试验所用氮肥为尿素。为避免水肥因素的干扰,各小区之间埋深 0.8 m 的塑料膜,并起宽 0.5 m、高 0.3 m 的畦埂。小麦于 2022 年 3 月 6 日进行条播,行距 15 cm,播种量 340 kg·hm⁻²,7 月 18 日收获,小麦全生育期内等量灌水 6 次,采用微喷带进行喷灌,喷灌带平行于小麦种植方向布置,置于各小区中间,每条滴灌带灌溉 4 行小麦,以土壤湿度传感器 WATERMARK 200SS 来指示灌溉水量。小麦播种时接种 FM 菌剂,接种 FM 处理的菌剂与种子混合播种,每小区施用 10 kg,不接种处理则添加等量的灭菌接种物。其他栽培管理措施与当地耕作情况相同。

1.3 指标测定

1.3.1 FM 侵染情况的测定

于小麦灌浆期随机选取 15 株小麦,将根系用水冲洗干净,加入 10% 的氢氧化钾溶液在 90 °C SHJ-6 型数显恒温磁力搅拌水浴锅中放置 30 min,冷却后清洗干净,加入 1% HCl 酸化及 0.1% 酸性品红-乳酸甘油染色液放置 12 h,在显微镜下制片镜检,根据刘润进等^[22]描述方法计算菌根侵染率、泡囊数、丛枝着生率和侵入点位数。

1.3.2 小麦生长特性的测定

于小麦灌浆期按 20 cm 单行的距离分别调查各小区群体总茎数变化,并选取 20 株代表整体长势的小麦,用卷尺测量株高,用 LAM-H 型手持活体叶面积仪测量叶片面积。之后去除小麦根系,清洗干净后再放入电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9145A,中国)105 °C 下杀青 1.5 h,后调至 85 °C 烘至恒重后称重,并计算每公顷干物积累量。

1.3.3 旗叶叶绿素含量及叶绿素荧光参数的测定

于小麦灌浆期采用乙醇浸提法测定叶绿素含量^[23]。先称取鲜叶 0.5 g 并加少量 CaCO₃ 粉末、石英砂及 95% 乙醇研磨成匀浆,经过滤定容后利用 HAD-752N 型紫外可见光光度计分别测量在 665、649 和 470 nm 波长下的吸光度值并计算总叶绿素含量以及叶绿素 a/b。随机选择植物叶片

暗处理 30 min, 用便携式叶绿素荧光仪 (HM-1162) 测定叶片的叶绿素荧光参数, 根据暗适应后测定的最小荧光值 (F_0)、最大荧光值 (F_m)、可变荧光值 (F_v) 计算 PSII 的最大光化学量子效率 (F_v/F_m) 和 PSII 潜在活性 (F_v/F_0)。

1.3.4 旗叶光合参数的测定

于小麦灌浆期上午 9:00—12:00 选取健康成熟的叶片进行测量, 便携式光合仪各参数设置光照强度 $1\ 000\ \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 叶室温度 $25\ ^\circ\text{C}$, 湿度 60%, CO_2 浓度 $400\ \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 测量过程中依次记录小麦旗叶的净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s)、细胞间隙 CO_2 浓度 (C_i) 等参数。

1.3.5 籽粒蛋白质含量及氮代谢酶活性的测定

于小麦灌浆期取样测定籽粒蛋白质含量和氮代谢酶活性。籽粒蛋白质含量参考金华丽等^[24]的方法测定; 硝酸还原酶 (NR) 测定采用活体磺胺比色法; 谷氨酰胺合成酶 (GS) 活性和谷氨酸丙酮酸转氨酶 (GPT) 活性参考王静等^[25]的方法测定; 谷氨酸合成酶 (GOGAT) 参照马新明等^[26]的方法测定。

1.3.6 产量性状的测定

于小麦成熟期, 在各处理中每个小区收割单行小麦植株, 调查小区内小麦穗长、穗粒数和千粒

质量, 最后折算成每公顷籽粒产量。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 软件处理数据和绘图, 采用 SPSS16.0 进行统计分析, 通过单因素方差分析 (one-way ANOVA)、双因素方差分析 (two-way ANOVA)、以及差异显著性检验 (LSD 法, $\alpha = 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 节水灌溉及减氮下 FM 对小麦根侵染的影响

本试验条件下, FM 能够侵染小麦根系, 并形成稳定的共生关系 (表 1)。与常规灌溉相比, 节水灌溉下 FM 菌根侵染率、丛枝着生率、侵入点位数和泡囊数均降低, 说明节水灌溉显著抑制了 FM 对小麦根系的侵染。常规灌溉下, 菌根侵染率、丛枝着生率、侵入点位数和泡囊数均表现为 $N_{20} + \text{FM} > N_0 + \text{FM} > N_{40} + \text{FM}$; 节水灌溉下, $N_{20} + \text{FM}$ 处理的菌根侵染率、丛枝着生率、侵入点位数和泡囊数均最大, 较 $N_0 + \text{FM}$ 处理分别提高 0.2 个百分点、3.3 个百分点、10.6% 和 22.9%, 较 $N_{40} + \text{FM}$ 处理分别提高 6.1 个百分点、3.0 个百分点、28.1% 和 29.3%。这说明, 在常规或者节水灌溉下, 减氮 20% 最有利于 FM 对小麦的侵染。

表 1 不同灌溉和施氮条件下 FM 对小麦根侵染的表现

Table 1 Development of mycorrhizal fungi in wheat under different irrigation amounts and nitrogen levels

灌溉量 Irrigation amount	施氮水平及 FM 接种 Nitrogen level and FM inoculation	菌根侵染率 Mycorrhizal colonization rate/%	丛枝着生率 Arbuscule rate/%	侵入点位数 Inflection points per centimeter	泡囊数 Vesicles per centimeter
常规灌溉 Normal irrigation	N_0	—	—	—	—
	$N_0 + \text{FM}$	61.5 ± 3.7b	49.3 ± 6.4b	0.83 ± 0.12b	2.13 ± 0.32b
	N_{20}	—	—	—	—
	$N_{20} + \text{FM}$	64.2 ± 4.5a	50.6 ± 5.2a	0.97 ± 0.11a	2.44 ± 0.39a
	N_{40}	—	—	—	—
节水灌溉 Water-saving irrigation	N_0	—	—	—	—
	$N_0 + \text{FM}$	42.6 ± 2.8d	23.4 ± 1.9e	0.66 ± 0.15d	1.22 ± 0.24e
	N_{20}	—	—	—	—
	$N_{20} + \text{FM}$	42.8 ± 3.6d	26.7 ± 2.4d	0.73 ± 0.10c	1.50 ± 0.35d
	N_{40}	—	—	—	—
	$N_{40} + \text{FM}$	36.7 ± 4.2 e	23.7 ± 2.2e	0.57 ± 0.11e	1.16 ± 0.28e

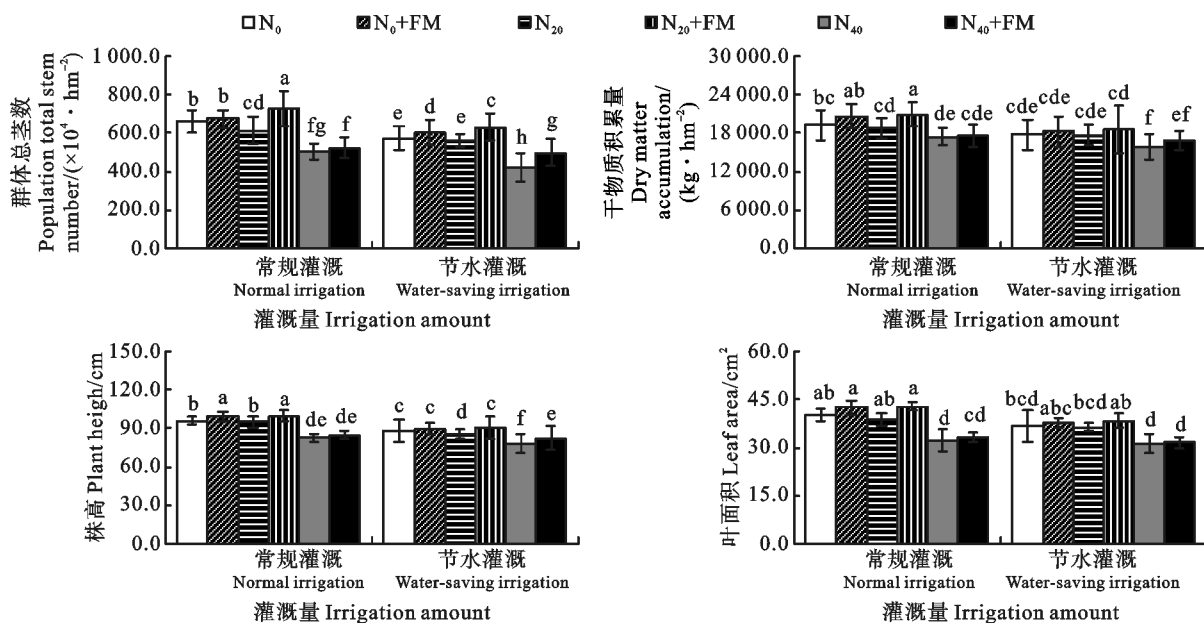
同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下表同。

Different lowercase letters after the values in the same columns indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same in tables 2 and 3.

2.2 节水灌溉下减氮配施 FM 对小麦灌浆期群体生长特性的影响

不同灌溉量和施氮量下,与不接种 FM 相比,接种 FM 会增加小麦群体总茎数、干物质积累量、株高和叶面积(图 1)。常规灌溉下, $N_{20} + FM$ 处理的群体总茎数显著高于其他处理, $N_0 + FM$ 和 $N_{20} + FM$ 处理间小麦干物质积累量、株高无显著差异,且 N_0 、 $N_0 + FM$ 、 N_{20} 和 $N_{20} + FM$ 处理间小麦叶面积也无显著差异;与 N_0 处理相比, $N_{20} + FM$ 处理的小麦群体总茎数、干物质积累量和株高分别增加 10.2%、8.8%和 3.1%,叶面积无显

著差异。节水灌溉下, $N_{20} + FM$ 处理的群体总茎数最大,与 N_0 处理相比增加了 9.6%,而 N_0 和 N_{20} 处理间群体总茎数无显著差异; N_0 、 $N_0 + FM$ 、 N_{20} 和 $N_{20} + FM$ 处理间干物质积累量和叶面积均无显著差异,但均显著高于 N_{40} 和 $N_{40} + FM$ 处理; N_0 、 $N_0 + FM$ 和 $N_{20} + FM$ 处理间株高也无显著差异,但均显著高于 N_{20} 、 N_{40} 和 $N_{40} + FM$ 处理。综合可知,与常规灌溉下 N_0 处理相比,节水灌溉下 $N_{20} + FM$ 处理不会降低小麦干物质积累量和叶面积,但株高和群体总茎数均下降。



图柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下图同。

Different lowercase letters above the columns indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same in figures 2–5.

图 1 不同处理下小麦的生长特性

Fig. 1 Wheat growth characteristics under different treatments

2.3 节水灌溉下减氮配施 FM 对小麦灌浆期旗叶叶绿素含量的影响

常规灌溉下, N_0 、 $N_0 + FM$ 、 N_{20} 和 $N_{20} + FM$ 处理间小麦叶绿素含量无显著差异,但均显著高于 N_{40} 和 $N_{40} + FM$ 处理; N_0 、 $N_0 + FM$ 和 $N_{20} + FM$ 处理间小麦叶绿素 a/b 无显著差异,但均显著高于 N_{20} 、 N_{40} 和 $N_{40} + FM$ 处理(图 2)。节水灌溉下, N_0 、 $N_0 + FM$ 、 N_{20} 和 $N_{20} + FM$ 处理间小麦叶绿素含量也无显著差异,但均显著高于 N_{40} 和 $N_{40} + FM$ 处理; $N_{20} + FM$ 处理的叶绿素 a/b 最高,与 N_0 处理相比增加了 5.9%。由此可见,与常规灌溉下 N_0 处理相比,节水灌溉下 $N_{20} + FM$ 处理的小麦旗叶叶绿素含量和叶绿素 a/b 均

无显著差异。

2.4 节水灌溉下减氮配施 FM 对小麦灌浆期旗叶叶绿素荧光参数的影响

小麦灌浆期旗叶 F_v/F_m 在不同处理间均无显著差异(图 3)。常规灌溉下, $N_{20} + FM$ 处理的 F_v/F_0 最高,与 N_0 处理相比提高 7.6%; N_0 、 $N_0 + FM$ 和 N_{20} 处理间小麦 F_v/F_0 无显著差异,且均显著高于 N_{40} 和 $N_{40} + FM$ 处理。节水灌溉下, N_0 、 $N_0 + FM$ 和 $N_{20} + FM$ 处理间 F_v/F_0 无显著差异,但均显著高于 N_{40} 和 $N_{40} + FM$ 处理。综上所述,与常规灌溉下 N_0 处理相比,节水灌溉下 $N_{20} + FM$ 处理的小麦旗叶 F_v/F_m 和 F_v/F_0 均无显著差异。

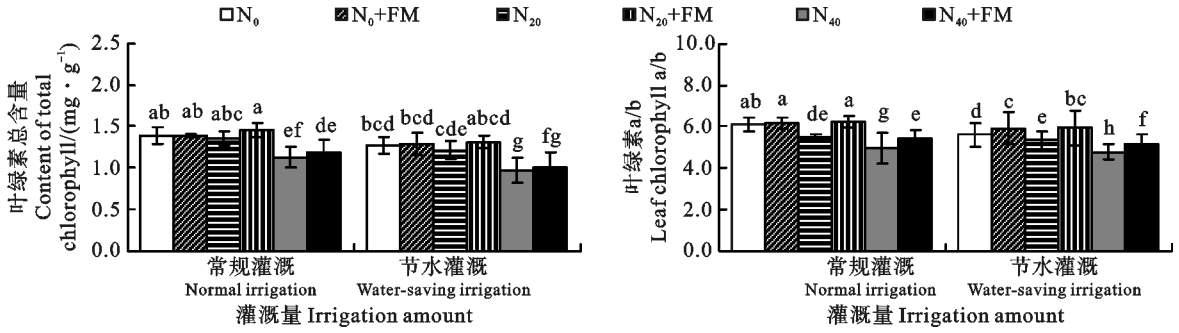


图 2 不同处理下小麦旗叶的叶绿素含量差异

Fig. 2 Difference of chlorophyll content in wheat flag leaf under different treatments

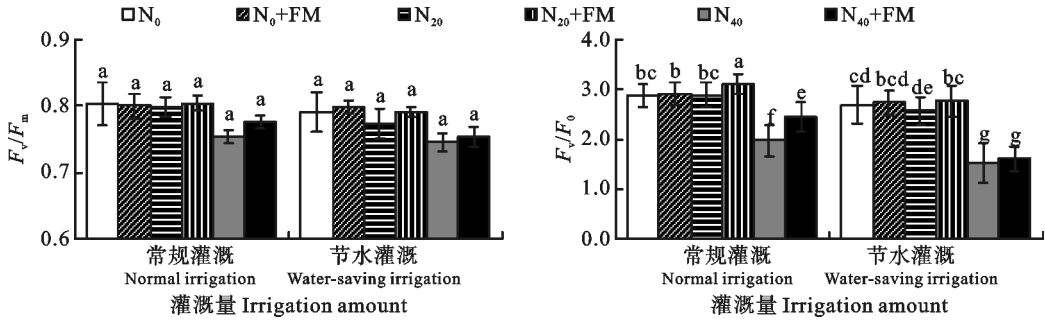


图 3 不同处理下小麦旗叶 F_v/F_m 和 F_v/F_0 的差异

Fig. 3 Difference of F_v/F_m and F_v/F_0 of wheat flag leaf under different treatments

2.5 节水灌溉下减氮配施 FM 对小麦灌浆期旗叶光合特性的影响

常规灌溉下, $N_{20} + FM$ 处理小麦旗叶 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 均最大, 与 N_0 处理相比分别增加 25.6%、39.3%、24.9% 和 16.8%, 其中 T_r 显著高于其他

处理(图 4)。节水灌溉下, $N_{20} + FM$ 处理的 P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i 均最高, 与 N_0 处理相比分别增加 21.8%、41.9%、37.1% 和 23.3%。与常规灌溉下 N_0 处理相比, 节水灌溉下 $N_{20} + FM$ 处理小麦旗叶 P_n 、 T_r 和 G_s 无显著差异, C_i 则显著增加。

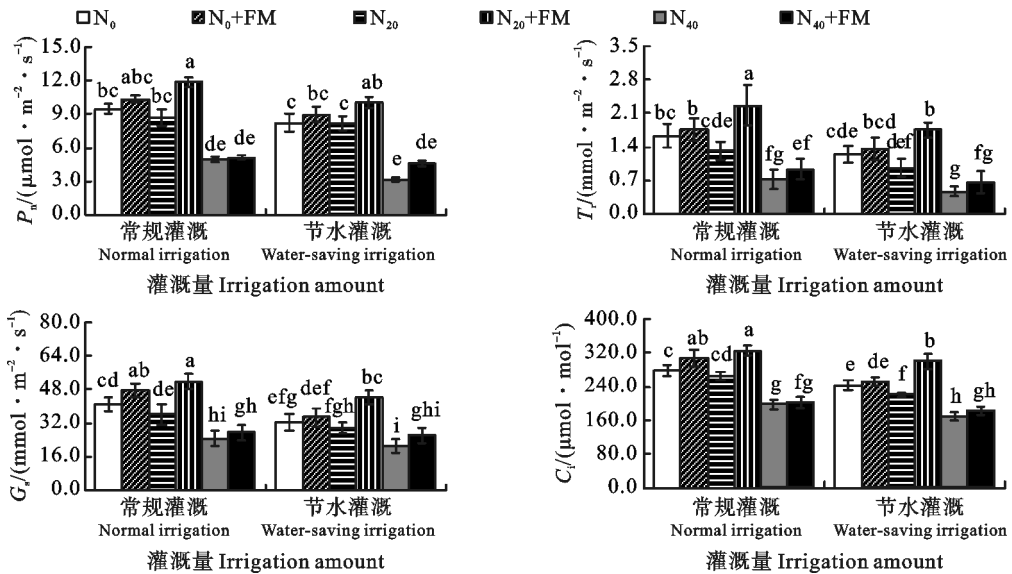


图 4 不同处理下小麦旗叶的光合特性

Fig. 4 Photosynthetic characteristics of wheat flag leaf under different treatments

2.6 节水灌溉下减氮配施 FM 对小麦灌浆期旗叶氮代谢物质的影响

不同灌溉量和施氮量下,与不接种 FM 相比,接种 FM 均能增加小麦灌浆期旗叶全氮、游离氨基酸、可溶性蛋白及硝态氮含量(图 5)。常规灌溉下, $N_{20}+FM$ 处理的硝态氮含量显著高于其他处理; N_0+FM 和 $N_{20}+FM$ 处理的全氮和可溶性蛋白含量均显著高于其他处理,且两个处理间无显著差异; N_0 、 N_0+FM 、 N_{20} 、 $N_{20}+FM$ 处理间小麦游离氨基酸含量无显著差异;与 N_0 处理相比, $N_{20}+FM$ 处理的小麦硝态氮、全氮和可溶性蛋白

含量分别增加 8.3%、15.9%和 16.3%。节水灌溉下, $N_{20}+FM$ 处理的可溶性蛋白含量最高; N_0+FM 、 $N_{20}+FM$ 处理下硝态氮含量最高; N_0 、 N_0+FM 、 $N_{20}+FM$ 处理下全氮含量较高,但不同处理间差异不显著; N_0 、 N_0+FM 、 N_{20} 、 $N_{20}+FM$ 处理间小麦游离氨基酸含量差异不显著。与 N_0 处理相比, $N_{20}+FM$ 处理的小麦硝态氮含量和可溶性蛋白含量分别增加 17.1%和 12.8%。与常规灌溉下 N_0 处理相比,节水灌溉下 $N_{20}+FM$ 处理下小麦旗叶全氮含量、游离氨基酸和可溶性蛋白含量变化均不显著,硝态氮含量则有所下降。

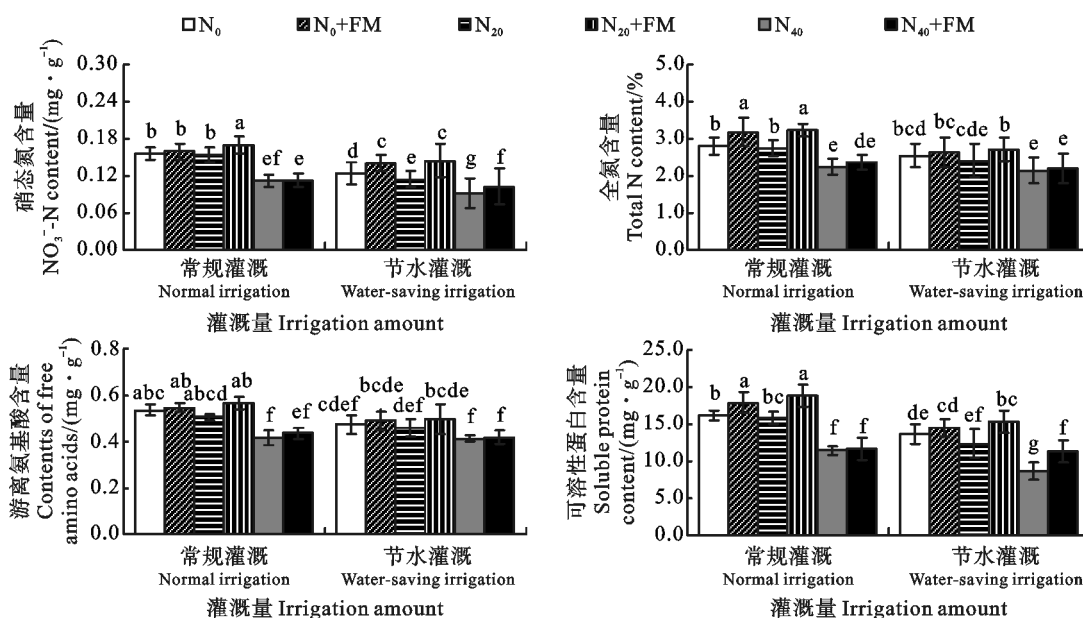


图 5 不同处理下小麦氮代谢物质的差异

Fig. 5 Difference of nitrogen metabolite in wheat under different treatments

2.7 节水灌溉下减氮配施 FM 对小麦灌浆期旗叶氮代谢相关酶活性的影响

由表 2 可知,常规灌溉和节水灌溉下,小麦 NR、GS、GPT 和 GOGAT 最高均为 $N_{20}+FM$ 处理,最低均为 N_{40} 处理。与 N_0 处理相比, $N_{20}+FM$ 处理小麦 NR、GS、GPT 和 GOGAT 活性在常规灌溉下分别增加 21.4%、5.7%、35.6%和 31.0%;在节水灌溉下分别增加 16.3%、7.6%、24.5%和 47.9%。与常规灌溉下 N_0 处理相比,节水灌溉下 $N_{20}+FM$ 处理的小麦旗叶 NR、GS、GPT 和 GOGAT 活性均无显著差异。

2.8 节水灌溉下减氮配施 FM 对小麦成熟期产量及其构成的影响

不同灌溉量下, $N_{20}+FM$ 处理小麦穗长、穗粒数、千粒重、产量均最大(表 3)。常规灌溉下,与

N_0 处理相比, $N_{20}+FM$ 处理的小麦穗长、穗粒数、千粒重、产量分别增加 21.4%、5.7%、35.6%和 31.0%。节水灌溉下, N_0 、 N_0+FM 和 $N_{20}+FM$ 处理间小麦穗长、千粒重和产量均无显著差异。常规灌溉下 N_0 处理与节水灌溉下 $N_{20}+FM$ 处理间小麦穗粒数、千粒重及产量均无显著差异,而小麦穗长有所下降。

3 讨论

土壤中微生物的种类较多,大部分土壤微生物对土壤的形成、物质循环和肥力演变等均有显著影响。在植物根系周围生活的土壤微生物可以调节植物生长,植物共生的微生物如根瘤菌、菌根和真菌等能为植物直接提供氮素、磷素和其他矿物质元素以及有机酸、氨基酸、维生素、生长素等各

表 2 不同处理下小麦氮代谢相关酶活性的差异

Table 2 Difference of enzyme activity related to nitrogen metabolism in wheat under different treatments

灌溉量 Irrigation amount	施氮量及 FM 接种 Nitrogen amount and FM inoculation	硝酸还原酶 NR/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	谷氨酰胺合成酶 GS/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	谷氨酸丙酮酸 转氨酶 GPT/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	谷氨酸合成酶 GOGAT/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)
正常灌溉 Normal irrigation	N ₀	20.53±0.58cd	3.86±0.12c	20.25±3.75b	42.24±4.68bc
	N ₀ +FM	22.94±0.63b	3.95±0.09b	22.87±5.67ab	47.58±4.95ab
	N ₂₀	19.10±0.21ef	3.82±0.12c	19.03±2.75bc	39.86±5.53bc
	N ₂₀ +FM	24.93±0.73a	4.08±0.05a	27.45±5.56a	55.34±6.32a
	N ₄₀	13.20±0.46h	3.28±0.03g	10.08±3.03ef	10.45±2.03e
节水灌溉 Water-saving irrigation	N ₀ +FM	13.43±1.03h	3.47±0.04f	11.02±2.43def	11.21±2.36e
	N ₀	18.33±0.56fg	3.55±0.14e	16.54±3.89bcde	28.60±4.34d
	N ₀ +FM	19.64±0.08de	3.69±0.02d	17.02±3.56bcd	36.10±7.74cd
	N ₂₀	17.34±1.12g	3.30±0.15g	13.23±4.43cdef	36.21±9.48cd
	N ₂₀ +FM	21.31±0.76c	3.82±0.04c	20.59±5.75b	42.32±5.35bc
	N ₄₀	11.54±0.45i	2.94±0.16i	9.12±1.76f	9.40±2.94e
	N ₄₀ +FM	12.52±0.54hi	3.19±0.05h	10.24±2.43ef	10.14±3.12e

表 3 不同处理下小麦产量及其构成的差异

Table 3 Difference of wheat yield and its components under different treatments

灌溉量 Irrigation amount	施氮量及 FM 接种 Nitrogen amount and FM inoculation	穗长 Ear length/cm	穗粒数 Grains per ear	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Yield/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
正常灌溉 Normal irrigation	N ₀	10.19±0.04bc	41.3±2.6bc	52.33±4.25ab	7 688.3±156.9c
	N ₀ +FM	10.28±0.05ab	42.2±2.8ab	54.92±4.74a	7 999.1±226.3ab
	N ₂₀	10.14±0.12c	38.6±2.5cd	51.14±4.84b	7 660.7±119.5c
	N ₂₀ +FM	10.35±0.14a	44.6±1.2a	55.15±6.63a	8 136.4±255.3a
	N ₄₀	9.81±0.06e	33.7±1.5fg	44.07±2.34de	6 841.7±164.1fg
节水灌溉 Water-saving irrigation	N ₄₀ +FM	9.86±0.07de	35.5±0.9def	44.78±4.73d	7 083.0±150.3ef
	N ₀	9.95±0.03d	36.9±1.4de	49.65±8.34bc	7 513.0±144.4cd
	N ₀ +FM	9.97±0.03d	38.1±1.6cd	49.77±7.31bc	7 622.5±156.3c
	N ₂₀	9.87±0.07de	36.8±2.0def	48.07±6.32c	7 286.1±154.1de
	N ₂₀ +FM	9.94±0.07d	40.8±1.5bc	50.85±6.82bc	7 786.0±213.3bc
	N ₄₀	9.76±0.04e	31.9±1.6g	41.72±2.45e	6 735.7±173.3g
	N ₄₀ +FM	9.87±0.03de	34.2±0.9efg	44.77±5.02d	6 977.8±136.6fg

种有机营养,促进植物的生长。AMF 作为一种能够与绝大多数植物共生并广泛存在的土壤微生物,其根外菌丝(extraradical mycelium,ERM)可以从周围环境中吸收不同形态的氮素,当 ERM 组织与 NH₄⁺接触时,该组织中的 GS(谷氨酰胺合成酶)活性增加,而 AMF 内储存的 C 源水平将影响 N 的吸收和同化利用^[27]。AMF 的生长发育受到环境条件、土壤状态等多种因素影响。已有研究发现,增施氮肥降低了小麦全生命周期中 AMF 的孢子密度、根外菌丝密度和根内定殖率^[28]。本研究结果与前人一致,与常规施氮处理相比,减施氮肥 20%处理下 FM 菌根侵染率、丛枝着生率、侵入点位数和泡囊数最高,而减施氮肥

40%处理下菌根发育情况减弱,说明土壤中适宜的氮含量有利于 FM 对小麦侵染,而土壤中高水平氮输入会降低 FM 的菌根侵染率、丛枝着生率、侵入点位数和泡囊数,显著抑制 FM 生长发育。

作物的生长发育情况是作物获得高产的基础,而群体总茎数、干物质累积量、株高、叶面积等是作物生长发育的直观指标。有研究发现,合理的灌溉管理和施肥措施可以保证小麦生长需水量和水分利用效率,提高小麦的养分吸收和利用效率,且小麦有效叶面积与施肥水平呈正相关^[29]。本研究中,同一灌溉量下,与常规施氮处理相比,减施氮肥 20%处理下小麦干物质累积量和叶面积均无显著差异,仅常规灌溉下群体总茎下降及

节水灌溉下株高下降,这可能是氮素缺少不能及时补给植物所需生长的养分;同一施氮水平下,节水灌溉会影响小麦群体总茎数、干物质累积量、株高、叶面积。有学者认为,减施氮肥处理对小麦叶面积指数无显著影响^[30],高氮添加和高水量灌溉反而会使得小麦的干物质累积量下降^[31],本研究结果与此一致。此外,本研究显示,常规灌溉或节水灌溉下减施氮肥并接种 FM 能够提高小麦群体总茎数、干物质累积量、株高、叶面积,且在节水灌溉下减施氮肥 20% 并接种 FM 仍保持常规灌溉下不减氮处理下的小麦干物质累积量和叶面积,仅株高和群体总茎数有所下降。胡君利等^[32]提出,接种外源 AMF 可以促进小麦生长,并可通过改善根系分泌物等来提高土壤微生物量。这可能是因为 AMF 形成菌丝与宿主植物形成菌根结构,并可通过扩展形成菌根网络系统,在缺水条件下,AMF 还可以主动向植物运输水分和养分,形成菌根后根系的输水效率更高,水分运输阻力更小,进而提高植物抗干旱能力^[33]。

光合作用也直接影响小麦的生产力,土壤水分和氮素营养通过改变叶绿素含量以及叶绿素荧光参数等影响小麦光合作用。在一定施氮水平范围内,随着施氮量的增加,小麦叶绿素含量、光合速率、光合性能指数均呈上升趋势,而施氮量继续增加的情况下光合速率开始下降,而光合性能指数和叶绿素含量则无明显变化^[34]。灌水过多对小麦干物质积累不利,特别是对花后旗叶的光合特性及产量的形成有负效应^[35]。水分缺失下小麦叶绿素含量降低,光合速率明显下降,而适当的水分含量能够提高光合作用^[36]。本研究条件下,减施氮肥 20% 处理对叶绿素含量和叶绿素 a/b 无影响,叶绿素荧光参数(F_v/F_m 、 F_v/F_0)以及光合参数等也无显著变化,而减施氮肥 40% 处理下叶绿素含量和光合参数等均下降,节水灌溉下对小麦叶绿素含量以及光合作用也有一定的影响,但与常规灌溉下常规施氮处理相比,节水灌溉下减施氮肥 20% 并接种 FM 处理对小麦旗叶叶绿素含量、叶绿素 a/b、叶绿素荧光参数、以及 P_n 、 T_r 和 G_s 并无显著差异,可见接种 FM 能够提高叶绿素含量以及光合作用,可能是 FM 通过改善植物体内氮、磷、钾、微量元素等营养状况而间接促进光合作用,积累干物质并促进植物生长,本研究中接种 FM 对小麦叶片硝态氮和全氮含量具有促进作用也证实了这一点。

氮代谢是作物氮同化及蛋白质等有机氮化合物的合成、分解的转化过程,而 NR、GS、GPT 及 GOGAT 是参与植物氮代谢过程的关键酶,游离氨基酸、蛋白质则是相关的代谢产物^[37]。适当减施氮肥可提高滴灌春小麦籽粒灌浆特性以及 NR、GOGAT、GS 活性,实现节肥和高产^[38]。本研究下,节水灌溉下减施氮肥 20% 并接种 FM 处理的小麦旗叶 NR、GS、GPT 和 GOGAT 活性与常规灌溉下常规施氮处理相比无显著差异,叶片硝态氮含量则有所下降,叶片全氮含量、游离氨基酸和可溶性蛋白含量并无下降趋势,说明 FM 能够提高氮代谢相关酶活性,进而提高叶片硝态氮含量、全氮含量、游离氨基酸和可溶性蛋白含量。姜丽娜等^[39]研究发现,减施氮肥能够促进营养器官中的干物质向籽粒的运转,提高了籽粒贡献率,促进籽粒产量增加。本研究中,节水灌溉下减施氮肥 20% 并接种 FM 的小麦穗粒数、千粒重以及产量与常规灌溉下常规施氮处理相比无显著差异,而小麦穗长有所下降,这与崔美香等^[40]研究发现小麦接种幼套球囊菌后干质量增长迅速,产量增加的结论一致。

4 结论

常规灌溉或者节水灌溉下 FM 均能够侵染小麦根系,并形成稳定的共生关系。与正常灌溉施氮处理相比,节水灌溉下减施氮肥 20% 并接种 FM 处理的小麦干物质累积量、叶面积、叶绿素含量、叶绿素荧光参数、光合参数、氮代谢相关酶活性、氮代谢产物含量均可达到正常灌溉不减氮处理水平,小麦产量达 $7\ 786.0\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,是旱地灌区节水、省肥、保持高产的绿色水肥管理模式。

参考文献:

- [1] SURESH K R, NAGESH M A. Experimental studies on effect of water and soil quality on crop yield [J]. *Aquatic Procedia*, 2015, 4: 1235.
- [2] AL-MEFLEH N, TADROS M. Influence of water quantity on the yield, water use efficiency, and plant water relations of *Leucaena leucocephala* in arid and semi arid environment using drip irrigation system [J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2010, 5: 1917.
- [3] 夏军, 刘春葵, 任国玉. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战 [J]. *地球科学进展*, 2011, 26(1): 1.
XIA J, LIU C Z, REN G Y. Opportunity and challenge of the climate change impact on the water resource of China [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(1): 1.
- [4] 王凯悦, 陈芳泉, 黄五星. 植物干旱胁迫响应机制研究进展 [J]. *中国农业科技导报*, 2019, 21(2): 19.

- WANG K Y, CHEN F Q, HUANG W X. Research advance on drought stress response mechanism in plants [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2019, 21(2): 19.
- [5] 刘庚山, 郭安红, 安顺清, 等. 开发利用土壤深层水资源的一种有效途径: “以肥调水”的大田试验研究[J]. *自然资源学报*, 2002, 17(4): 423.
- LIU G S, GUO A H, AN S Q, *et al.* A scientific approach of using water resources in deep soil layer-farmland experimental studies of utilizing water by fertilizer [J]. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(4): 423.
- [6] 孟晓琛, 张富仓, 刘蓝骄, 等. 播期和水氮互作对滴灌施肥春玉米生长和水氮利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(10): 1794.
- MENG X C, ZHANG F C, LIU L J, *et al.* Effects of sowing date and water-nitrogen interaction on the growth and water and nitrogen utilization of spring maize under drip fertigation [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(10): 1794.
- [7] 高明霞, 孙瑞, 崔全红, 等. 长期施用化肥对壤土微生物多样性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1572.
- GAO M X, SUN R, CUI Q H, *et al.* Effect of long-term chemical fertilizer application on soil microbial diversity in anthropogenic loess soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6): 1572.
- [8] 谢伟, 郝志鹏, 张莘, 等. 丛枝菌根网络介导的植物间信号交流研究进展及展望[J]. *植物生态学报*, 2022, 46(5): 493.
- XIE W, HAO Z P, ZHANG S, *et al.* Research progress and prospect of signal transfer among plants mediated by arbuscular mycorrhizal networks [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2022, 46(5): 493.
- [9] CHATURVEDI A, CRUZ CORELLA J, ROBBINS C, *et al.* The methylome of the model arbuscular mycorrhizal fungus, *Rhizophagus irregularis*, shares characteristics with early diverging fungi and Dikarya [J]. *Communications Biology*, 2021, 4(1): 901.
- [10] 武杞蔓, 张金梅, 李玥莹, 等. 有益微生物菌肥对农作物的作用机制研究进展[J]. *生物技术通报*, 2021, 37(5): 221.
- WU Q M, ZHANG J M, LI Y Y, *et al.* Recent advances on the mechanism of beneficial microbial fertilizers in crops [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2021, 37(5): 221.
- [11] 贺冰, 赵月平, 邵秀丽, 等. 微生物菌剂与化学肥料配施对番茄幼苗生长的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2010, 44(5): 528.
- HE B, ZHAO Y P, SHAO X L, *et al.* Effect of combined application of microbial inoculum and chemical fertilizer on tomato seedling growth [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2010, 44(5): 528.
- [12] 郭艳娥, 李芳, 李应德, 等. AM真菌促进植物吸收利用磷元素的机制[J]. *草业科学*, 2016, 33(12): 2379.
- GUO Y E, LI F, LI Y D, *et al.* Progress in the elucidation of the mechanisms of arbuscular mycorrhizal fungi in promotion of phosphorus uptake and utilization by plants [J]. *Pratacutural Science*, 2016, 33(12): 2379.
- [13] 毕银丽, 孙江涛, 王建文, 等. AM真菌对采煤沉陷区黄花菜生长及根际土壤养分的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(15): 5315.
- BI Y L, SUN J T, WANG J W, *et al.* Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on daylily growth and soil fertility in a coal mining subsidence area of northern Shaanxi [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(15): 5315.
- [14] 韩阳, 郝鲜俊, 张又丹. 不同磷水平下接种AM真菌对矿区废弃地土壤酶活性的影响[J]. *西南农业学报*, 2017, 30(6): 1402.
- HAN Y, HAO X J, ZHANG Y D. Effects of AM fungi inoculated with different phosphorus levels on soil enzyme activities in abandoned mining area [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 30(6): 1402.
- [15] 庞春花, 杨世芳, 张永清, 等. 不同施磷水平下接种AM真菌对藜麦生长及产量构成因素的影响[J]. *作物杂志*, 2017(6): 131.
- PANG C H, YANG S F, ZHANG Y Q, *et al.* Effects of inoculating arbuscular mycorrhizal fungi on growth of quinoa under different phosphorus levels [J]. *Crops*, 2017(6): 131.
- [16] 段建锋, 田慧, 高亚军. 接种丛枝菌根真菌对小麦根内氮转运蛋白基因表达的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2016(2): 130.
- DUAN J F, TIAN H, GAO Y J. Effect of inoculating different arbuscular mycorrhizal fungi on the expression of nitrogen transporter genes in roots of wheat [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(2): 130.
- [17] 贾艳艳, 杨文飞, 杜小凤, 等. 接种AM真菌和施氮对还田稻秆氮素释放和小麦产量的影响[J]. *江西农业学报*, 2020, 32(3): 8.
- JIA Y Y, YANG W F, DU X F, *et al.* Effects of AM fungi inoculation and nitrogen application on rice-straw nitrogen release and wheat yield [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2020, 32(3): 8.
- [18] 段海霞. 丛枝菌根真菌对旱地小麦根际调控和生产力形成的影响及机理[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- DUAN H X. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on rhizosphere regulation & productivity formation and their mechanisms in dryland wheat [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [19] 胡语妍, 万文亮, 王江丽, 等. 不同水氮处理对滴灌春小麦氮素积累转运及产量的影响[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2018, 36(4): 448.
- HU Y Y, WAN W L, WANG J L, *et al.* Effects of different water and nitrogen treatments on nitrogen accumulation, transportation and yield of drip irrigation spring wheat [J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2018, 36(4): 448.
- [20] 王海琪, 黄艺华, 蒋桂英, 等. 氮肥基追比例对滴灌春小麦氮代谢及氮肥利用率的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(1): 297.
- WANG H Q, HUANG Y H, JIANG G Y, *et al.* Effects of base topdressing ratio of nitrogen fertilizer on nitrogen metabolism and use efficiency of spring wheat under drip irrigation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(1): 297.
- [21] 陈静, 王迎春, 李虎, 等. 滴灌施肥对冬小麦农田土壤NO₃⁻-N分布、累积及氮素平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(4): 927.
- CHEN J, WANG Y C, LI H, *et al.* Characteristics soil nitrate nitrogen distribution, accumulation and nitrogen balance in winter wheat field under drip fertigation [J]. *Journal of*

- Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(4): 927.
- [22] 刘润进, 陈应龙. 菌根学[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 27.
LIU R J, CHEN Y L. Mycorrhizology [M]. Beijing: Science Press, 2007: 27.
- [23] 李得孝, 郭月霞, 吴海燕, 等. 玉米叶绿素含量测定方法研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21(6): 153.
LI D X, GUO Y X, YUN H Y, et al. Determined methods of chlorophyll from maize [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(6): 153.
- [24] 金华丽, 许春红, 徐泽林. 近红外光谱法测定小麦籽粒中的蛋白质含量[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2010, 31(6): 21.
JIN H L, XU C H, XU Z L. Determination of protein content in wheat grain by near infrared spectroscopy [J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 31(6): 21.
- [25] 王静, 王小纯, 熊淑萍, 等. 耕作方式对砂姜黑土小麦氮代谢及氮素利用率的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(8): 1111.
WANG J, WANG X C, XIONG S P, et al. Effects of different tillage methods on nitrogen metabolism and nitrogen utilization efficiency of wheat grown in lime concretion black soil region [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(8): 1111.
- [26] 马新明, 李琳, 赵鹏, 等. 土壤水分对强筋小麦‘豫麦34’氮素同化酶活性和籽粒品质的影响[J]. 植物生态学报, 2005, 29(1): 48.
MA X M, LI L, ZHAO P, et al. Effect of water control on activities of nitrogen assimilation enzymes and grain quality in winter wheat [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2005, 29(1): 48.
- [27] 金海如, 蒋湘艳. AM真菌氮代谢与运转研究新进展[J]. 菌物学报, 2009, 28(3): 466.
JIN H R, JIANG X Y. Recent advances in the studies of nitrogen metabolism and translocation in arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Mycosystema*, 2009, 28(3): 466.
- [28] BABALOLA B J, LI J, WILLING C E, et al. Nitrogen fertilisation disrupts the temporal dynamics of arbuscular mycorrhizal fungal hyphae but not spore density and community composition in a wheat field [J]. *The New Phytologist*, 2022, 234(6): 2057.
- [29] 张兴义. 水肥耦合对春小麦有效叶面积及产量的影响[J]. 生态农业研究, 2000, 8(4): 37.
ZHANG X Y. Effects of water and fertilizer coupling on efficient leaf area and grain yield of spring wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2000, 8(4): 37.
- [30] 崔帅, 王红光, 李东晓, 等. 限水减氮对高产麦田群体动态和产量形成的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(8): 1060.
CUI S, WANG H G, LI D X, et al. Effect of limited irrigation and reduced nitrogen on population dynamics and yield formation in high-yielding wheat field [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(8): 1060.
- [31] 马耕, 张盼盼, 王晨阳, 等. 高产小麦花后植株氮素累积、转运和产量的水氮调控效应[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(6): 798.
MA G, ZHANG P P, WANG C Y, et al. Regulation effect of irrigation and nitrogen on post-anthesis nitrogen accumulation, translocation and grain yield of high-yield wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(6): 798.
- [32] 胡君利, 林先贵, 王俊华, 等. 大气对流层臭氧浓度升高下AM真菌对小麦生长的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3393.
HU J L, LIN X G, WANG J H, et al. Arbuscular mycorrhizal fungal effects on wheat growth in response to elevated tropospheric O₃ concentration [J]. *Environmental Science*, 2009, 30(11): 3393.
- [33] QUEREJETA J I, EGERTON-WARBURTON L M, PRIETO I, et al. Changes in soil hyphal abundance and viability can alter the patterns of hydraulic redistribution by plant roots [J]. *Plant and Soil*, 2012, 355(1): 63.
- [34] 高素玲, 苗丰, 陈建辉, 等. 氮素水平对旱作小麦光合特性的影响[J]. 华北农学报, 2013, 28(4): 169.
GAO S L, MIAO F, CHEN J H, et al. Effects of nitrogen levels on photosynthetic characteristics of *Triticum aestivum* L. in dry farmland [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2013, 28(4): 169.
- [35] 李如意, 李巧云, 尹钧, 等. 不同水分处理对半冬性小麦光合特性和产量的影响[J]. 河南农业科学, 2010, 39(6): 9.
LI R Y, LI Q Y, YIN J, et al. Effects of water treatments on photosynthetic characteristics and yield of semi-winter wheat [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2010, 39(6): 9.
- [36] 陈旭, 郝明德, 许晶晶, 等. 干旱对关中地区不同年代小麦品种旗叶光合特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 159.
CHEN X, HAO M D, XU J J, et al. Effect of drought stress on photosynthesis characteristics in flag leaf of wheat cultivars in different years in the central Shaanxi Plain [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(1): 159.
- [37] 张聘, 王红光, 房琴, 等. 不同氮反应冬小麦品种幼苗素质及氮代谢关键酶活性的耐低氮差异研究[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(9): 1143.
ZHANG P, WANG H G, FANG Q, et al. Difference of low-nitrogen tolerance in seedling quality and activity of nitrogen metabolism related key enzymes between nitrogen responding types of winter wheat varieties [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(9): 1143.
- [38] 李彦肖, 王荣荣, 罗雪梅, 等. 减量施氮对滴灌春小麦籽粒灌浆特性和氮代谢酶活性的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(7): 794.
LI Y X, WANG R R, LUO X M, et al. Effect of reduced nitrogen application on grain filling characteristics and grain related enzyme metabolism of spring wheat under drip irrigation [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(7): 794.
- [39] 姜丽娜, 马静丽, 方保停, 等. 限水减氮对豫北冬小麦产量和植株不同层次器官干物质运转的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(6): 957.
JIANG L N, MA J L, FANG B T, et al. Effect of lower water and nitrogen supply on grain yield and dry matter remobilization of organs in different layers of winter wheat plant in northern Henan Province [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(6): 957.
- [40] 崔美香, 李焱, 卢彦琦. 不同丛枝菌根真菌对小麦幼苗感染及生物产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(1): 57.
CUI M X, LI Y, LU Y Q. Effects of different arbuscular mycorrhizal fungi on wheat seedling infection and biological yield [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(1): 57.