

引用格式:

王震, 高旭硕, 张梦歌, 韦文敬, 石兆勇, 徐寿霞. 丛枝菌根和钼对小麦光合荧光特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(3): 10–16.

WANG Z, GAO X S, ZHANG M G, WEI W J, SHI Z Y, XU S X. Effects of arbuscular mycorrhiza and molybdenum on photosynthetic fluorescence characteristics of wheat[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2024, 50(3): 10–16.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



丛枝菌根和钼对小麦光合荧光特性的影响

王震^{1,2,3}, 高旭硕^{1,2,3}, 张梦歌^{1,2,3}, 韦文敬^{1,2,3}, 石兆勇^{1,2,3*}, 徐寿霞^{1,2,3}

(1.河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471000; 2.河南省乡村人居环境工程中心, 河南 洛阳 471000; 3.洛阳市共生微生物与绿色发展重点实验室, 河南 洛阳 471000)

摘要: 利用灭菌土壤进行小麦盆栽试验, 在 0、5、100、1 000 mg/kg 4 个钼含量水平, 分别进行接种幼套近明球囊霉(*Claroideoglossum etunicatum*)和不接种对照处理, 对不同钼水平下丛枝菌根(AM)对小麦光合荧光特性的响应情况进行研究。结果表明: 在不同土壤钼水平下, 丛枝菌根真菌(AMF)能够稳定侵染小麦, 平均侵染率达 58.82%; AM 能够提高 4 个钼水平下小麦的净光合速率(Pn)和气孔导度(Gs); 在钼质量分数为 100 mg/kg 时小麦净光合速率的菌根依赖性最高, 达到 698.05%; AM 能够提高 4 个钼水平下小麦叶片的光系统II最大光化学效率(F_v/F_m)、光系统II的潜在活性(F_v/F_o)、光能吸收性能指数(PI_{abs})、光系统II向下游传递电子的能力(ϕ_o)和电子传递量子产额(ϕ_{Eo}), 尤其在钼质量分数为 100 mg/kg 时, 提高的幅度达显著水平。综上所述, AM 能够提高不同钼水平下小麦光合能力, 改善光系统II的整体性能, 在钼质量分数为 100 mg/kg 时 AM 所发挥的作用最大。

关键词: 小麦; 钼; 丛枝菌根; 净光合速率; 菌根依赖性; 荧光特性

中图分类号: S512.101

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2024)03-0010-07

Effects of arbuscular mycorrhiza and molybdenum on photosynthetic fluorescence characteristics of wheat

WANG Zhen^{1,2,3}, GAO Xushuo^{1,2,3}, ZHANG Mengge^{1,2,3}, WEI Wenjing^{1,2,3}, SHI Zhaoyong^{1,2,3*}, XU Shouxia^{1,2,3}

(1.College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471000, China; 2.Henan Rural Human Settlements Engineering Center, Luoyang, Henan 471000, China; 3.Luoyang Key Laboratory of Symbiosis Microorganism and Green Development, Luoyang, Henan 471000, China)

Abstract: In this study, the responses of arbuscular mycorrhizal(AM) to photosynthetic fluorescence characteristics of wheat under different molybdenum levels were studied by inoculation with *Claroideoglossum etunicatum*(BEG168) and non-inoculation control at four molybdenum levels of 0, 5, 100, 1 000 mg/kg with pot experiment using sterilized soil. The results showed that arbuscular mycorrhizal fungi(AMF) could stably infect wheat under different soil molybdenum levels, with an average infection rate of 58.82%. AM could improve the net photosynthetic rate(Pn) and stomatal conductance(Gs) of wheat under different molybdenum levels. At molybdenum 100 mg/kg, the net photosynthetic rate of wheat was the most dependent on the mycorrhizal dependence, reaching 698.05%. AM could increase the maximum photochemical efficiency of photosystem II(F_v/F_m), the potential activity of photosystem II(F_v/F_o), the light energy absorption performance index(PI_{abs}), the ability of photosystem II to transfer electrons downstream(ϕ_o) and the quantum yield of electron transfer(ϕ_{Eo}) in wheat leaves under different molybdenum levels, especially at molybdenum 100 mg/kg, the increase was significant. In summary, AM could increase the photosynthetic capacity of wheat under different

收稿日期: 2023-10-06

修回日期: 2024-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(32171620); 河南省科技攻关项目(232102111005)

作者简介: 王震(1999—), 男, 河南开封人, 硕士研究生, 主要从事菌根与作物生理生态学研究, 18749846038@163.com; *通信作者, 石兆勇, 博士, 教授, 主要从事菌根多样性与生态功能研究, shizy1116@126.com

molybdenum levels and enhance the overall performance of photosystem II, reaching the optimal outcome at the levels of 100 mg/kg.

Keywords: wheat; molybdenum; arbuscular mycorrhizal; net photosynthetic rate; mycorrhiza dependence; fluorescence characteristics

钼是广泛存在于土壤中的一种微量元素，作为大多数植物生长代谢所必需的营养元素，其在植物生命周期的多项生理过程中有着不可替代的作用^[1]。钼在土壤中的含量一般为 0.2~6.0 mg/kg，存在形式多样，主要以可溶性复合钼酸盐、钼酸钠、钼酸铵、不溶性复合三氧化钼、二硫化钼和钼酸钙的形式存在，能被生物体直接吸收，在环境中相对稳定存在的形式为正六价的钼酸根离子(MoO_4^{2-})^[2-3]。钼在植物中含量相对较低，且尚未明确定义钼的毒性阈值^[4]。土壤中存在适量的钼有利于植物的生长发育，而过量的钼会使植物受到氧化胁迫，进而影响生长，还会引起其他微量元素的缺乏^[5]；过量的钼在植物体内累积后会通过食物链对人类和动物(尤其是反刍动物)健康产生危害^[6]。

丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)是陆地生态系统中分布最广泛的植物共生真菌，它能够侵染植物根系，与陆地上 80%的植物形成互利共生体丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)。AM 可通过改良土壤结构、扩大寄主植物根系吸收面积来提高宿主植物对水分和营养元素的吸收，改善植物生长状态，增强植物抗逆性^[7-9]。AM 通过菌丝对重金属的“过滤”作用来避免重金属对植物组织造成伤害，同时通过螯合作用、菌丝固持等限制重金属的移动，达到抑制重金属从植物根向地上部转运的效果^[10-12]。此外，接种 AMF 可使宿主产生生化拮抗物质来抵御重金属，提高宿主对重金属的耐受性^[13]。植物的生长与其光合荧光特性密切相关，AM 能够促进植物的光合作用^[14-15]。本研究以小麦为供试植物，测定不同质量分数钼处理下接种 AMF 后小麦的侵染率、净光合速率的菌根依赖性、光合和荧光参数，旨在揭示 AM 和钼对小麦光合荧光特性的影响机理。

1 材料与方法

1.1 材料

供试小麦品种为洛旱22号。盆栽用土为黄潮土，质地为壤土，取自河南科技大学试验农场，

过孔径 2 mm 的筛，风干、灭菌(0.11 MPa、121 °C 条件下灭菌 1 h)后备用。盆高 11 cm，盆口(内径) 11 cm，每盆装土 1.2 kg。试验前土壤基本理化性质为：碱解氮、速效磷、速效钾质量分数分别为 79.68、8.94、278.36 mg/kg，有机质质量分数 14.12 g/kg，土壤 pH 7.87。接种 AMF 菌剂为幼套近明球囊霉(*Claroideoglossum etunicatum*)BEG168，菌剂使用前以灭菌河沙为基质，以苏丹草(*Sorghum sudanese*)为宿主扩繁培养，将含有寄主植物根段、相应菌根真菌孢子及根外菌丝体的根际土壤作为接种剂。供试钼源为钼酸铵($(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$)。

1.2 试验设计

试验于 2021—2022 年在河南科技大学试验农场(112°24'49"E, 34°35'47"N)进行。采用双因素完全随机设计。设置 4 个钼酸铵质量分数，即 0、5、100、1 000 mg/kg，与土壤混合，用硝酸铵(NH_4NO_3)来平衡添加不同质量分数钼酸铵所带来的氮素差异。AM 因素设置 2 个水平，即不接种 AMF(NM)和接种 AMF(AM)。共 8 个处理，每个处理 4 次重复，随机排列，共 32 盆。冬小麦于 2021 年 10 月 31 日播种，每盆均匀播 8 粒冬小麦种子，11 月底定苗至每盆 5 株，其间适当补充水分，不进行肥料投入。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 光合气体交换参数的测定

于 2022 年 5 月 17—22 日(灌浆期) 9:00—11:00，用 LI-6400XT 便携式光合仪(LI-COR)在自然光强下测定小麦旗叶的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间二氧化碳浓度(Ci)和蒸腾速率(Tr)。每盆重复 3 次，结果取平均值。

1.3.2 荧光参数的测定

在 2022 年 5 月 17—22 日(灌浆期) 9:00—11:00 测定荧光参数。测定前每个处理随机选取 3 株小麦，并对旗叶相同的部位暗适应 30 min，利用 M-PEA

植物效率分析仪(Hansatech)在光照度为饱和脉冲光(8 568 000 lx)的条件下,在1 s内测定叶片OJIP-test参数(F_o 、 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 PI_{abs})、叶片比活性参数(ABS/RC 、 DI_o/RC 、 TR_o/RC 、 ET_o/RC 、 ABS/CS_o 、 DI_o/CS_o 、 TR_o/CS_o 、 ET_o/CS_o),结果取平均值。依据李鹏民等^[16]的方法计算小麦的 ϕ_o 、 ϕ_{Eo} ;参照文献^[17]的方法计算 W_k 。

1.3.3 小麦生物学产量和菌根侵染率的测定

收获时将小麦地上部分与根系部分分开收获,地上部分105 °C杀青30 min,65 °C烘干至恒重,称其干质量,计算茎、叶片、颖壳、籽粒干质量之和,即为生物学产量^[18]。根系用蒸馏水冲洗干净,选取新鲜细根段放入25 mL比色管,加入10%KOH溶液(90 °C水浴加热10~30 min)脱色后,加入2%HCl溶液浸泡2~5 min,加入醋酸墨水(90 °C水浴加热10~30 min)染色^[19],将根段剪成1 cm小段置于载玻片上,在MoticBA310显微镜下观察被侵染的根段数。根据MCGONIGLE等^[20]的方法计算菌根侵染率。

1.3.4 小麦净光合速率的菌根依赖性计算

依据ZHANG等^[21]的方法计算小麦净光合速率的菌根依赖性。

1.4 数据处理

采用 SPSS 26.0 对数据进行方差分析,选用 Duncan 多重比较法进行差异显著性分析;运用一般线性模型进行主成分分析以及双因素交互作用分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对小麦生物学产量和丛枝菌根侵染率的影响

在 0、5、100、1 000 mg/kg 钼质量分数下小麦的根系侵染率分别为 54.55%、68.79%、57.57%、54.34%,平均侵染率为 58.82%,各处理的侵染率无显著差异。从表 1 中可看出,在钼质量分数为 0、5 和 100 mg/kg 时接种 AMF 后每盆小麦的生物学产量均高于不接种处理的,分别高出 33.13%、6.70%和 17.70%,在钼质量分数为 0 mg/kg 时达到显著水平。

表 1 钼处理下小麦的生物学产量

Table 1 Biological yields of wheat under molybdenum treatment

钼质量分数/(mg kg ⁻¹)	菌根状况	单株生物学产量/g
0	AM	32.87a
	NM	24.69b
5	AM	33.74a
	NM	31.62ab
100	AM	16.09c
	NM	13.67cd
1 000	AM	6.26d
	NM	10.35cd

同列数据不同字母示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

2.2 丛枝菌根和钼对小麦光合特征参数的影响

从表 2 可看出,同一钼质量分数下,AM 处理下小麦的 P_n 、 G_s 和 Tr 均显著高于 NM 处理的, C_i 显著低于不接种处理的。钼、AM 及二者的交互作用对小麦 P_n 、 G_s 、 C_i 、 Tr 的影响均达到了极显著水平($P<0.001$)。说明钼、AM 以及两者的交互作用均显著影响小麦的 P_n 和气体交换参数。

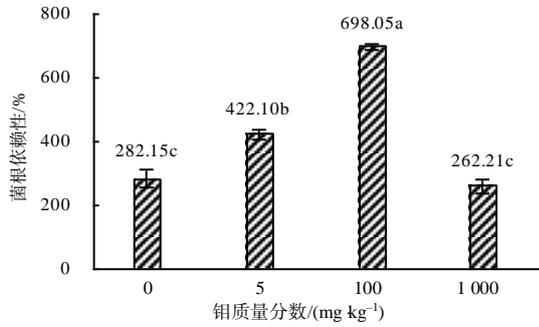
表 2 钼处理下小麦的净光合速率和气体交换参数

Table 2 Net photosynthetic rates and gas exchange parameters of wheat under molybdenum treatment

钼质量分数/(mg kg ⁻¹)	菌根状况	P_n /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	G_s /($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	C_i /($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	Tr /($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
0	AM	3.89c	0.017c	39.64e	1.09c
	NM	1.04f	0.014d	293.66a	0.90d
5	AM	3.41d	0.015d	45.36e	0.91d
	NM	0.66f	0.008f	262.42b	0.48f
100	AM	6.93b	0.029b	11.55f	1.73b
	NM	0.87f	0.004g	71.83d	0.27g
1 000	AM	7.58a	0.032a	19.63f	1.91a
	NM	2.11e	0.012e	129.26c	0.76e
菌根		***	***	***	***
钼		***	***	***	***
菌根×钼		***	***	***	***

同列数据不同字母示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$);“***”示 0.001 水平显著。

图 1 显示, 钼处理下小麦 Pn 的菌根依赖性均达到 200% 以上, 且在钼质量分数为 100 mg/kg 时最高, 达到了 698.05%, 显著高于其他处理, 分别比 0、5、1 000 mg/kg 钼处理的高 147.40%、65.38%、166.22%。



不同字母处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图 1 不同钼水平下小麦净光合速率的菌根依赖性

Fig.1 The mycorrhizal dependence of net photosynthetic rate of wheat with different molybdenum levels

2.3 丛枝菌根和钼对小麦叶片 OJIP-test 参数的影响

从表 3 可以看出, 伴随钼质量分数的升高, 接种 AMF 处理小麦初始荧光(F_0)逐渐下降, 在钼质量分数为 100 mg/kg 时, AM 处理与不接种处理下 F_0 有显著差异, AM 处理的比不接种处理的降低了 20.47%; 其他质量分数钼处理下, 接种与不接种 AMF 的 F_0 无显著差异。钼的独立作用和钼与 AM 的共同作用对小麦 F_0 有显著影响。

在 4 个质量分数钼处理中, AM 处理的最大光化学效率(F_v/F_m)、光系统 II 潜在活性(F_v/F_0)和光合性能指数(PI_{abs})的值均高于不接种处理的, 且均在钼质量分数为 100 mg/kg 时 AM 与 NM 处理之间的差异达到了显著水平, 分别提高 9.93%、47.87%、127.63%。钼、AMF 及二者的交互作用对小麦 F_v/F_m 、 F_v/F_0 和 PI_{abs} 的影响显著。

表 3 钼处理下小麦的 F_0 、 F_v/F_m 、 F_v/F_0 和 PI_{abs}

Table 3 F_0 , F_v/F_m , F_v/F_0 and PI_{abs} of wheat under molybdenum treatment

钼质量分数/(mg kg ⁻¹)	菌根状况	F_0	F_v/F_m	F_v/F_0	PI_{abs}
0	AM	7.775a	0.730cd	2.753c	3.272bc
	NM	7.456ab	0.719d	2.572c	2.164c
5	AM	6.729bc	0.763bc	3.267bc	4.167bc
	NM	6.409cd	0.758bcd	3.166c	2.605bc
100	AM	5.436de	0.808a	4.263a	10.933a
	NM	6.835abc	0.735cd	2.883c	4.803b
1000	AM	5.194e	0.803a	4.077a	11.252a
	NM	5.566de	0.792ab	3.856ab	10.900a
菌根			*	**	***
钼		***	***	***	***
菌根×钼		*	*	*	**

同列数据不同字母处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$); “*” “**” “***” 分别示 0.05、0.01、0.001 水平显著。

2.4 丛枝菌根和钼对小麦叶片比活性参数的影响

从表 4 可知, 在钼质量分数为 0 mg/kg 时, 接种 AMF 显著提高了小麦叶片 ET_0/CS_0 值; TR_0/RC 值在 4 个钼水平下接种与不接种 AMF 均无显著性差异。在钼质量分数为 0 mg/kg 时, 接种 AMF 处理下 ET_0/RC 、 ABS/CS_0 、 DI_0/CS_0 、 TR_0/CS_0 、 ET_0/CS_0 的值均大于不接种 AMF 的, 说明接种 AMF 能够提高小麦 PSII 电子传递的光能利用量。在 100 mg/kg 钼水平下, 接种 AMF 显著降低了小

麦叶片 ABS/RC 、 DI_0/RC 、 ABS/CS_0 和 DI_0/CS_0 的值, 与 NM 处理相比, 分别降低了 16.22%、39.39%、20.47%、43.68%; 而 TR_0/RC 、 ET_0/RC 、 TR_0/CS_0 、 ET_0/CS_0 并无显著变化, 说明接种 AMF 能够提高小麦 PSII 电子传递的光能利用效率。

分析菌根和钼双因素对小麦叶片比活性参数的影响, 发现钼对除 ET_0/CS_0 外的其他 7 个比活性参数均有显著影响, 而菌根仅对 ABS/RC 、 DI_0/RC 、 TR_0/RC 的值有显著影响, 钼和菌根的交互作用显著影响了 ABS/CS_0 、 DI_0/CS_0 、 ET_0/CS_0 的值。

表4 钼处理下小麦叶片的比活性参数

钼质量分数/(mg kg ⁻¹)	菌根状况	ABS/RC	DI _o /RC	TR _o /RC	ET _o /RC	ABS/CS _o	DI _o /CS _o	TR _o /CS _o	ET _o /CS _o
0	AM	1.425ab	0.385ab	1.040ab	0.648abc	7 775a	2 107a	5 568a	3 552a
	NM	1.510a	0.425a	1.085ab	0.595c	7 456ab	2 095a	5 361ab	2 948bc
5	AM	1.354ab	0.324b	1.030abc	0.636abc	6 729bc	1 614bc	5 114ab	3 156abc
	NM	1.478ab	0.358ab	1.120a	0.611bc	6 409cd	1 562bc	4 847bc	2 657c
100	AM	1.126c	0.217c	0.909d	0.672abc	5 436de	1 043d	4 392cd	3 245ab
	NM	1.344b	0.358ab	0.986bcd	0.679abc	6 835abc	1 852ab	4 982bc	3 431ab
1 000	AM	1.139c	0.227c	0.912d	0.691ab	5 194e	1 029d	4 165d	3 147abc
	NM	1.170c	0.243c	0.927cd	0.709a	5 566de	1 165cd	4 400cd	3 359ab
菌根		**	**	*					
钼		***	***	***	*	***	***	***	
菌根×钼						*	*		*

同列数据不同字母示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$); “*” “**” “***”分别示 0.05、0.01、0.001 水平显著。

2.5 丛枝菌根和钼对小麦叶片 ϕ_o 、 ϕ_{Eo} 和 W_k 的影响

表 5 反映了不同钼水平下接种丛枝菌根真菌对小麦叶片 ϕ_o 、 ϕ_{Eo} 和 W_k 的影响, ϕ_o 和 ϕ_{Eo} 能反映 PSII 受体侧光能转化效率的变化, 而 W_k 能反映 PSII 供体侧的变化。随着钼质量分数的升高, 小麦叶片 ϕ_o 和 ϕ_{Eo} 整体上呈上升趋势, W_k 呈下降

趋势。在 0、5、100 mg/kg 的钼水平下, 接种 AMF 处理的小麦叶片 ϕ_o 值和 ϕ_{Eo} 均显著高于不接种处理的, 接种处理的 ϕ_o 值比不接种处理的分别高出 13.62%、13.32%、7.43%, 接种处理的 ϕ_{Eo} 值比不接种处理的分别高出 15.14%、14.32%、18.20%。4 个钼水平下, 接种 AMF 处理的 W_k 均低于不接种处理的, 但二者之间的差异不显著。

表5 钼处理下小麦的 ϕ_o 、 ϕ_{Eo} 和 W_k

钼质量分数/(mg kg ⁻¹)	菌根状况	ϕ_o	ϕ_{Eo}	W_k
0	AM	0.624 8c	0.455 6cd	0.274 3ab
	NM	0.549 9d	0.395 7e	0.288 0ab
5	AM	0.618 4c	0.472 7bc	0.271 8ab
	NM	0.545 7d	0.413 5de	0.297 9a
100	AM	0.739 0a	0.597 4a	0.238 5c
	NM	0.687 9b	0.505 4b	0.259 2bc
1 000	AM	0.755 3a	0.605 8a	0.239 7c
	NM	0.764 7a	0.606 0a	0.242 4c
菌根		***	***	*
钼		***	***	***
菌根×钼			*	

同列数据不同字母示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$); “*” “**” “***”分别示 0.05、0.001 水平显著。

菌根和钼对小麦叶片 ϕ_o 、 ϕ_{Eo} 、 W_k 有显著影响, 二者交互作用仅对 ϕ_{Eo} 有显著影响, 对 ϕ_o 、 W_k 影响不显著。

3 结论与讨论

尹可敬等^[22]对钼矿区不同钼含量土壤中多种植物的菌根侵染率进行了研究, 发现土壤钼含量对植物的菌根侵染率影响不大。本研究发现, 施加不同

质量分数的钼对 AMF 的侵染率也无显著影响。可见在不同钼水平下 AMF 能与小麦形成良好的共生关系, 从而为小麦的生长提供良好的物质基础。马放等^[23]用 2 种 AMF 接种小麦, 接种 AMF 处理的小麦的株高和生物学产量均高于不接种的。本研究中, 在钼质量分数为 0、5、100 mg/kg 情况下, 接种 AMF 提高了小麦的生物学产量。

Pn 是反映光合作用强弱的重要指标, 接种

AMF 可以提高植物的 P_n ^[14, 24-25]。本研究中, 不同钼水平下, 接种 AMF 后小麦 P_n 均提高了, P_n 的菌根依赖性均达到 200% 以上, 且在钼质量分数为 100 mg/kg 时最高, 达 698.05%。接种 AMF 后小麦叶片 G_s 和 Tr 也均显著提高。这与李文彬等^[26]的研究结果一致。说明接种 AMF 能够增加植物的 G_s 和 Tr , 使更多的 CO_2 进入植物叶片细胞中, 为植物光合作用提供充足的原料, 从而提高植物的光合作用。而接种 AMF 后小麦的 C_i 降低, 可能是由于接种 AMF 提高了小麦对 CO_2 的同化利用效率, 从而降低了小麦的 C_i ^[27]。

南思睿等^[28]研究发现, 干旱胁迫会使新疆大叶苜蓿叶片 F_o 升高, 当钼质量分数大于 100 mg/kg 时, 接种 AMF 降低了 F_o , 保护了 PSII 光合中心。也有研究^[29-31]证实, AM 能够通过改善植物荧光特性, 从而提高植物的抗胁迫能力。本研究中, 在不同的钼水平下, 接种 AMF 均能够提高小麦 F_v/F_m 、 F_v/F_o 和 PI_{abs} , 这表明 AM 在不同的钼水平下均能够保护 PSII, 提高小麦的抗胁迫能力, 并且在 100 mg/kg 时 AM 发挥的优势最强。

叶片比活性参数的变化可以反映 PSII 反应中心光能的转换和电子传递情况, 能够量化 PSII 活力并评估植物的光合性能^[32]。本研究结果表明, 接种 AMF 可以促进 PSII 电子的传递, 且在钼质量分数为 100 mg/kg 时, AM 效应较好。在没有添加钼的情况下, 接种 AMF 处理下小麦叶片 ET_o/CS_o 显著高于对照处理, 更加印证了 AM 可以促进 PSII 电子的传递。

ϕ_o 、 ϕ_{Eo} 、 W_k 等电子传递链供受体侧的荧光参数与能量分配比率有关^[33]。本研究中, 当钼质量分数为 0、5、100 mg/kg 时, 同一钼水平下接种 AMF 处理显著提高了小麦的 ϕ_o 、 ϕ_{Eo} , 说明接种 AMF 能够减轻 PSII 受体侧受到的伤害, 这可能是由于 AM 能够帮助植物吸收大量有益的营养元素^[1,34], 从而提高用于电子传递的热量比率的缘故。 W_k 表示电子传递链供体侧受限制程度。本研究中, 同一钼水平下接种 AMF 处理的叶片的 W_k 均低于对照处理, 表明接种 AMF 能够降低电子传递链供体侧的限制程度。究其原因, 可能是小麦将钼识别为有益元素而过度吸收所致, 更深层次的原因有待进一步探讨。

综上所述, 在 4 个钼水平下, AM 均能与小麦建立良好的共生关系, 提高小麦的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、PSII 电子传递效率, 增强 PSII 反应中心活性, 减少光合机构损伤, 改善 PSII 的整体性能, 增强小麦的光合能力, 促进其生长发育, 且在钼质量分数为 100 mg/kg 时, 小麦净光合速率的菌根依赖性最高。

参考文献:

- [1] SHI Z Y, ZHANG J C, WANG F Y, et al. Arbuscular mycorrhizal inoculation increases molybdenum accumulation but decreases molybdenum toxicity in maize plants grown in polluted soil[J]. RSC Advances, 2018, 8(65): 37069-37076.
- [2] VAN GESTEL C A M, MCGRATH S P, SMOLDERS E, et al. Effect of long-term equilibration on the toxicity of molybdenum to soil organisms[J]. Environmental Pollution, 2012, 162: 1-7.
- [3] BOSTICK B C, FENDORF S, HELZ G R. Differential adsorption of molybdate and tetrathiomolybdate on pyrite(FeS₂)[J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(2): 285-291.
- [4] XU S J, HU C X, TAN Q L, et al. Subcellular distribution of molybdenum, ultrastructural and antioxidative responses in soybean seedlings under excess molybdenum stress[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2018, 123: 75-80.
- [5] BOOJAR M M A, TAVAKKOLI Z. New molybdenum-hyperaccumulator among plant species growing on molybdenum mine- a biochemical study on tolerance mechanism against metal toxicity[J]. Journal of Plant Nutrition, 2011, 34(10): 1532-1557.
- [6] SHI Z Y, ZHANG J C, LU S C, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi improve the performance of sweet sorghum grown in a Mo-contaminated soil[J]. Journal of Fungi, 2020, 6(2): 44.
- [7] 瞿宋林, 吴一凡, 刘忠宽, 等. 丛枝菌根真菌对紫花苜蓿生长发育特性的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(10): 2529-2534.
- [8] 张国漪, 程林, 黄立莹, 等. 菌根真菌协同死谷芽孢杆菌抑制棉花黄萎病[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(6): 1008-1015.
- [9] 韦文敬, 石兆勇, 张梦歌, 等. 基于数据库的菌根与施肥对草地植物叶片性状影响的分析[J]. 草业学报, 2023, 32(10): 104-114.
- [10] GÖHRE V, PASZKOWSKI U. Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation[J]. Planta, 2006, 223(6): 1115-1122.
- [11] 侯赛赛, 蒲子天, 张弛, 等. 丛枝菌根真菌缓解土壤

- 过量微量元素和重金属对植物毒害的研究进展[J]. 土壤通报, 2023, 54(3): 739–749.
- [12] HUANG L, CHEN D Q, ZHANG H Q, et al. *Funneliformis mosseae* enhances root development and Pb phytostabilization in *Robinia pseudoacacia* in Pb-contaminated soil[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 2591.
- [13] 罗巧玉, 王晓娟, 林双双, 等. AM真菌对重金属污染土壤生物修复的应用与机理[J]. 生态学报, 2013, 33(13): 3898–3906.
- [14] 晏梅静, 补春兰, 黄盖群, 等. 丛枝菌根真菌对桑树(*Morus alba*)地上部分的促进作用[J]. 植物生理学报, 2020, 56(12): 2647–2654.
- [15] HAGHIGHI M, MOHMMADNIA S, PESSARAKLI M. Effects of mycorrhiza colonization on growth, root exudates, antioxidant activity and photosynthesis trait of cucumber grown in Johnson modified nutrient solution[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2016, 39(14): 2079–2091.
- [16] 李鹏民, 高辉远, STRASSER R J. 快速叶绿素荧光诱导动力学分析在光合作用研究中的应用[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2005, 31(6): 559–566.
- [17] 金立桥, 车兴凯, 张子山, 等. 高温、强光下黄瓜叶片PSII供体侧和受体侧的伤害程度与快速荧光参数W_k变化的关系[J]. 植物生理学报, 2015, 51(6): 969–976.
- [18] 李路, 胡承孝, 谭启玲, 等. 钼污染对冬小麦光合作用特性及产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 620–626.
- [19] 王幼珊, 张淑彬, 张美庆. 中国丛枝菌根真菌资源与种质资源[M]. 北京: 中国农业出版社, 2012.
- [20] MCGONIGLE T P, MILLER M H, EVANS D G, et al. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *The New Phytologist*, 1990, 115(3): 495–501.
- [21] ZHANG M G, SHI Z Y, LU S C, et al. AMF inoculation alleviates molybdenum toxicity to maize by protecting leaf performance[J]. *Journal of Fungi*, 2023, 9(4): 479.
- [22] 尹可敬, 曹利兵, 徐晓峰, 等. 钼污染对丛枝菌根和球囊霉素的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(1): 180–187.
- [23] 马放, 苏蒙, 王立, 等. 丛枝菌根真菌对小麦生长的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6107–6114.
- [24] LEI L L, ZHU Q Y, XU P X, et al. The intercropping and arbuscular mycorrhizal fungus decrease Cd accumulation in upland rice and improve phytoremediation of Cd-contaminated soil by *Sphagnetocola calendulacea*(L.) Pruski[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 298: 113516.
- [25] DONG F X, WANG Y H, TAO J, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi affect the expression of *PxNHX* gene family, improve photosynthesis and promote *Populus simonii*×*P. nigra* growth under saline-alkali stress[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1104095.
- [26] 李文彬, 宁楚涵, 李伟, 等. 菲和苈胁迫下AMF和PGPR对高羊茅生理生态的响应[J]. 草业学报, 2019, 28(8): 84–94.
- [27] 郑舜怡, 郭世荣, 张钰, 等. 丛枝菌根真菌对辣椒光合特性及根际微生物多样性和酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2014, 34(4): 800–809.
- [28] 南思睿, 罗永忠, 于思敏, 等. 干旱胁迫后复水对新疆大叶苜蓿幼苗光合和叶绿素荧光的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(5): 1141–1149.
- [29] 赵艳兰, 曾鑫奕, 弓晋超, 等. 丛枝菌根真菌接种对白车轴草耐盐性的影响[J]. 草业学报, 2023, 32(3): 179–188.
- [30] 李越, 李利, 张斌, 等. 接种 AMF 提高干旱胁迫下土壤微生物活性和燕麦抗旱能力[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(6): 1135–1149.
- [31] 石兆勇, 李珂, 王发园, 等. 纳米银和外源丛枝菌根真菌对甜高粱叶绿素荧光诱导动力学特性的影响[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(2): 283–290.
- [32] MALIBA B G, INBARAJ P M, BERNER J M. The effect of ozone and drought on the photosynthetic performance of canola[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(5): 1137–1144.
- [33] 范佩佩, 冯芳, 刘超, 等. 不同 CO₂ 浓度升高水平对梗稻叶片荧光特性的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(11): 3735–3744.
- [34] ZHOU J, ZANG H D, LOEPPMANN S, et al. Arbuscular mycorrhiza enhances rhizodeposition and reduces the rhizosphere priming effect on the decomposition of soil organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 140: 107641.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 柳正