



微生物菌剂和海藻酸对蒙古黄芪光合作用及根系生长的影响

刘杰¹, 范菠菠^{1#}, 冯晓娟¹, 赵鹏¹, 王永龙¹, 赵艳玲¹, 罗焱杰¹,
卢玲^{1*}, 王猛^{1*}, 耿志刚²

(1. 包头师范学院生态环境学院, 内蒙古 包头 014030;
2. 农业农村部海藻类肥料重点实验室, 山东 青岛 266400)

摘要: 探究微生物菌剂的施用量和海藻酸的施用浓度对蒙古黄芪光合作用及根系生长的影响, 为蒙古黄芪合理施肥的生态种植提供理论参考。采用两因素裂区的盆栽试验, 以蒙古黄芪种苗为材料, 微生物菌剂的施用量 [对照不施肥 (M0)、施用量 (M1: 3 g/m²) 和 (M2: 6 g/m²)] 为主因素, 海藻酸的施用浓度 [对照清水 (A0)、施用浓度 (A1: 4 g/L) 和 (A2: 8 g/L)] 为副因素, 并测定蒙古黄芪叶片、根际土壤和根系的相关指标。结果表明: 随着微生物菌剂施用量的增加, 蒙古黄芪叶片光合作用、根际土壤微生物含量和酶活性、根系内源激素含量、根系干物质积累量和农艺性状、根系药效成分含量等部分相关指标分别提高了 4.6% ~ 41.2%、10.1% ~ 27.7%、10.7% ~ 18.7%、6.9% ~ 16.9%、23.1% ~ 29.9%; 而随着海藻酸施用浓度的增加, 蒙古黄芪的上述指标基本呈现出先增加后降低的趋势; 光合作用、根际土壤微生物含量和酶活性、内源激素含量以及农艺性状的提高有利于蒙古黄芪产量和质量的提升。微生物菌剂和适宜浓度的海藻酸可增强蒙古黄芪叶片的光合作用, 提高根际土壤的微生物含量和酶活性, 促进根系的生长发育, 进而提升蒙古黄芪的产量和质量, 且以 M2A1 处理 (微生物菌剂施用量为 6 g/m²、海藻酸施用浓度为 4 g/L) 效果最佳, 此时, 根系干物质积累量为 10.55 g/株、黄芪甲苷含量为 0.159%、毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量为 0.055%, 可为蒙古黄芪大田合理施肥的生态种植提供理论参考。

关键词: 微生物菌剂; 海藻酸; 蒙古黄芪; 光合作用; 生长发育; 药效成分

黄芪为豆科植物蒙古黄芪 [*Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao] 或膜荚黄芪的干燥根, 有补气升阳、固表止汗的功能^[1], 现代药理学研究表明, 黄芪中的多糖、皂苷及黄酮类等^[2] 活性成分具有缓解疲劳^[3]、抗肿瘤^[4]、抗氧化^[5]、抗癌症^[6] 等作用。蒙古黄芪原产于内蒙古等地, 相较于膜荚黄芪, 有形态小、花期早、抗性强、品质好等特点^[7]。

农用微生物菌剂指目标微生物 (有效菌) 经过工业化生产扩繁后加工制成的活菌制剂^[8], 这些有效菌包括枯草芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌等^[9]。微生物菌剂可改变土壤真菌群落结构、提高土壤真菌多样性、改善根际土壤养分、减轻连作障碍^[10], 同时通过微生物的生命活动也可促进植物对营养物质和微量元素的吸收, 进而减轻作物病害、提高产量和品质^[11]。海藻酸的分子结构为 (C₆H₈O₆)_n, 是由单糖醛酸线性聚合而成的天然多糖^[12], 存在于褐藻植物的细胞壁和细胞间质中^[13]。海藻酸是海藻肥料主要的功能和活性物质, 可有效促进作物生长发育、改善作物品质, 同时海藻酸分子中的众多羟基与羧基易与土壤中的金属离子相结合, 形成与水分子牢固结合的高分子盐, 进而保持土壤水分^[14]。

目前, 微生物菌剂在大蒜^[15]、玉米^[16]、葡萄^[17] 等作物, 海藻酸在西瓜^[18]、桃^[19]、草莓^[20] 等作物中均有着较为广泛的研究, 对根茎类药用植物蒙古黄芪的研究较少。而药用植物施肥研究是栽培的核心问题^[21], 因此, 本研究探究了微

收稿日期: 2024-09-21; 录用日期: 2024-10-19

基金项目: 包头师范学院高层次人才引进科研启动基金项目 (BTTCRCQD2024-007); 国家自然科学基金项目 (32260027); 内蒙古自治区自然科学基金项目 (2025QN08116); 内蒙古自治区第十二批“草原英才”创新创业人才团队 (内人才发〔2023〕1号); 内蒙古自治区中药材现代农牧业产业技术体系 (IMARS-11)。

作者简介: 刘杰 (1991-), 讲师, 博士, 研究方向为药用植物栽培生理。E-mail: 903352548@qq.com。范菠菠 (1995-), 讲师, 博士, 研究方向为作物遗传育种。E-mail: fanbobo19@126.com。刘杰和范菠菠为共同第一作者。

通讯作者: 卢玲, E-mail: 66051@bttc.edu.cn; 王猛, E-mail: wm123r@163.com。

生物菌剂的施用量和海藻酸的施用浓度对蒙古黄芪叶片光合作用及根系生长发育的影响,为蒙古黄芪大田合理施肥的生态种植提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

蒙古黄芪种苗(平均百苗重 487 g、平均根长 ≥ 35 cm、平均根粗 ≥ 7 mm);盆栽盒(长 50 cm、宽 35 cm、高 20 cm);微生物菌剂(生产单位:陕西恒田生物农业有限公司;主要指标:甲基营养型芽孢杆菌 LW-6 ≥ 20 亿/g 粉剂);海藻酸水溶肥(生产单位:农业农村部海藻类肥料重点实验室;主要指标:pH=8.0~10.0、有机质 $\geq 45\%$ 、海藻酸 $\geq 18\%$ 、 $K_2O \geq 12\%$ 、水分 $\leq 5\%$ 、水不溶物 $\leq 2\%$);大田土壤(有机质 16.93 g/kg,碱解氮 59.78 mg/kg,有效磷 8.74 mg/kg,速效钾 140.39 mg/kg)。

1.2 试验设计

选取 14 株蒙古黄芪种苗平栽于盛有大田土壤的盆栽盒中,蒙古黄芪种苗返青后每个盆栽盒中保留 12 株。采用两因素裂区的设计,主因素为微生物菌剂施用量,设置对照不施肥(M0)、施用量 3 g/m²(M1)和 6 g/m²(M2) 3 个梯度;副因素为海藻酸水溶肥施用量,设置对照清水(A0)、施用浓度 4 g/L(A1)和 8 g/L(A2) 3 个梯度。共 9 个处理,每个处理重复 3 次。其中,微生物菌剂与大田土壤均匀混合后,于平栽蒙古黄芪种苗时施入;清水和海藻酸水溶肥于蒙古黄芪返青 10 d 后以叶面喷施施加灌根的方式施入,每隔 10 d 喷施一次,每次 200 mL,共 2 次,最后一次喷施后 20~22 d 随机选取样株进行指标测定。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶片光合作用

晴天的 10:00—12:00,使用 CIRAS-3 型光合仪测定光合气体交换参数[净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)、气孔导度(G_s)]；使用 SPAD-502 和 Handy PEA 分别测定叶绿素相对含量 SPAD 和叶绿素荧光参数[最大光化学量子产量(F_v/F_m)]。

1.3.2 根际土壤微生物含量和酶活性

用无菌毛刷采集黏着于根上的土壤,采用稀释涂布平板法^[22]进行分离计数根际土壤微生物[细菌(BC)、真菌(FN)、放线菌(AM)]数量;分别采用土壤蔗糖酶(SC)、脲酶(UE)、碱性磷酸酶(AKP)、过氧化氢酶(CAT)试剂盒测定根际土壤酶活性。

1.3.3 根系内源激素含量

采用植物激素酶联免疫分析酶联免疫吸附测定(ELISA)试剂盒测定根系内源激素[油菜素内酯(BR)、脱落酸(ABA)、细胞分裂素(CTK)、赤霉素(GA)、生长素(IAA)]含量。

1.3.4 根系干物质积累量和农艺性状

将根系在 80℃ 烘干至恒重后使用电子天平测定根系干物质积累量(RDMA);使用电子游标卡尺测定根系距芦头 1 cm 处的根粗(RD);使用 Expression 1100XL 扫描仪扫描根系后用 WinRHIZO 根系分析软件计算根表面积(RSA)和根体积(RV);使用卷尺测定根长(RL)。

1.3.5 根系药效成分含量

参考《中华人民共和国药典》^[1]进行根系药效成分[黄芪甲苷(AIV)、毛蕊异黄酮葡萄糖苷(C7G)]含量的测定。

1.4 数据处理与分析

使用 SPSS 24.0 进行两因素裂区方差分析和 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 微生物菌剂和海藻酸对蒙古黄芪叶片光合作用的影响

由表 1 可见,微生物菌剂和海藻酸对蒙古黄芪叶片 6 种光合作用指标均有显著性影响,其互作效应仅对 P_n 和 G_s 有显著性影响。随着微生物菌剂施用量的增加, P_n 、 T_r 、 G_s 、SPAD 和 F_v/F_m 分别提高了 14.3%~22.6%、19.3%~41.2%、10.6%~14.9%、9.3%~12.6% 和 4.6%~6.9%, C_i 则降低了 12.0%~17.0%,说明微生物菌剂的施用有利于光合作用的提高。M0 条件下,A1 处理显著提高了 P_n 、 T_r 、 G_s 、SPAD 和 F_v/F_m ,A2 处理则显著降低了 P_n 和 G_s ;M1 条件下,A1 处理显著提高了 P_n 、 T_r 和 F_v/F_m 并显著降低了 C_i ;M2 条件下,A1 处理显著提高了 T_r 和 SPAD,说明适宜浓度的海藻酸更有利于光合作用的提高。

2.2 微生物菌剂和海藻酸对蒙古黄芪根际土壤微生物含量和酶活性的影响

由表 2 可见,微生物菌剂和海藻酸对蒙古黄芪根际土壤的 3 种微生物含量和 4 种酶活性均有显著性影响,其互作效应仅对 UE 和 CAT 活性有显著性影响。随着微生物菌剂施用量的增加,BC、FN、AM 含量和 SC、UE、AKP、CAT 活性分别提



表 1 微生物菌剂和海藻酸对蒙古黄芪叶片光合作用的影响

处理		净光合速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]		蒸腾速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]		胞间 CO_2 浓度 ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)		气孔导度 [$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]		SPAD		最大光化学量子产量	
M0	A0	5.82b		2.20b		153.0ab		0.376b		38.3b		0.776b	
	A1	6.99a	5.89b	2.83a	2.33c	142.0b	152.5a	0.408a	0.377b	41.9a	38.8c	0.813a	0.781b
	A2	4.87c		1.97b		162.5a		0.348c		36.3b		0.754b	
M1	A0	6.43b		2.55b		143.3a		0.409a		42.3ab		0.807b	
	A1	7.19a	6.73a	3.04a	2.78b	125.6b	134.2b	0.430a	0.417a	44.5a	42.4b	0.845a	0.817a
	A2	6.56b		2.76ab		133.6ab		0.412a		40.3b		0.800b	
M2	A0	7.00a		2.99b		133.1a		0.423a		42.3b		0.825a	
	A1	7.52a	7.22a	3.59a	3.29a	121.1a	126.5b	0.445a	0.433a	45.4a	43.7a	0.851a	0.835a
	A2	7.14a		3.29ab		125.4a		0.432a		43.4ab		0.829a	
F	M	24.19**		164.25**		24.63**		44.29**		60.14**		12.23*	
	A	29.42**		19.55**		6.82*		16.81**		21.13**		14.11**	
	M × A	7.58**		2.23 ^{ns}		1.44 ^{ns}		3.79*		1.94 ^{ns}		0.84 ^{ns}	

注: M—微生物菌剂处理; A—海藻酸处理; M × A—互作效应。不同小写字母代表在 $P<5\%$ 水平上显著; *, ** 分别代表在 $P<5\%$ 和 $P<1\%$ 水平上显著, ns 代表不显著。下同。

表 2 微生物菌剂和海藻酸对蒙古黄芪根际土壤微生物含量和酶活性的影响

处理		细菌 ($\times 10^6 \text{ cfu/g}$)		真菌 ($\times 10^5 \text{ cfu/g}$)		放线菌 ($\times 10^4 \text{ cfu/g}$)		蔗糖酶 (mg/g)		脲酶 (mg/g)		碱性磷酸酶 (mg/g)		过氧化氢酶 (mL/g)	
M0	A0	3.33b		5.74b		9.01b		13.3b		0.246b		3.50b		6.18b	
	A1	3.64a	3.45c	6.43a	6.10b	10.60a	9.98b	15.9a	14.9c	0.327a	0.282c	3.92a	3.74c	7.42a	6.94b
	A2	3.37ab		6.14ab		10.32a		15.5a		0.274b		3.81a		7.22a	
M1	A0	3.75b		6.70b		11.14a		14.9b		0.320b		4.05a		7.65b	
	A1	4.24a	4.02b	7.45a	7.17a	11.23a	11.38a	17.5a	16.4b	0.365a	0.342b	4.32a	4.22b	8.27a	8.10a
	A2	4.07a		7.36a		11.77a		16.8a		0.340ab		4.28a		8.39a	
M2	A0	3.98b		7.45a		11.44a		16.9b		0.351a		4.46a		8.39a	
	A1	4.46a	4.29a	7.88a	7.65a	12.12a	11.90a	19.4a	18.5a	0.364a	0.360a	4.53a	4.54a	8.76a	8.58a
	A2	4.43a		7.61a		12.15a		19.1a		0.365a		4.63a		8.58a	
F	M	45.45**		27.03**		41.38**		99.10**		76.63**		33.35**		33.60**	
	A	17.06**		7.27**		5.47*		22.15**		16.29**		8.40**		27.85**	
	M × A	1.41 ^{ns}		0.43 ^{ns}		1.15 ^{ns}		0.06 ^{ns}		3.33*		1.04 ^{ns}		3.91*	

高了 16.5% ~ 24.3%、17.5% ~ 25.4%、14.0% ~ 19.2% 和 10.1% ~ 24.2%、21.3% ~ 27.7%、12.8% ~ 21.4%、16.7% ~ 23.6%，说明微生物菌剂的施用有利于根际土壤微生物含量和酶活性的提高。M0 条件下，A1 处理显著提高了根际土壤的 3 种微生物含量和 4 种酶活性，A2 处理显著提高了 AM 含量和 SC、AKP、CAT 活性；M1 条件下，A1 处理显著提高了 BC、FN 含量和 SC、UE、CAT 活性，A2 处理显著提高了 BC、FN 含量和 SC、CAT 活性；M2 条件下，

A1 和 A2 处理显著提高了 BC 含量和 SC 活性，说明适宜浓度的海藻酸更有利于根际土壤微生物含量和酶活性的提高。

2.3 微生物菌剂和海藻酸对蒙古黄芪根系内源激素含量的影响

由表 3 可见，微生物菌剂对蒙古黄芪根系 ABA、CTK、GA 和 IAA 含量均有显著性影响，海藻酸对 5 种激素含量均有显著性影响，而互作效应仅对 ABA 含量有显著性影响。随着微生物

表 3 微生物菌剂和海藻酸对蒙古黄芪根系内源激素含量的影响

处理		油菜素内酯 ($\mu\text{g/g}$)		脱落酸 ($\mu\text{g/g}$)		细胞分裂素 ($\mu\text{g/g}$)		赤霉素 ($\mu\text{g/g}$)		生长素 (mg/g)	
M0	A0	122.6ab		251.0b		222.3b		607.3b		13.6b	
	A1	134.1a	123.4b	209.5c	258.3a	254.3a	232.1b	701.1a	652.2b	15.7a	14.1b
	A2	113.6b		314.5a		219.7b		648.3ab		12.9b	
M1	A0	136.6ab		240.5a		259.0b		697.8b		15.6b	
	A1	146.7a	136.6ab	196.2b	218.3b	281.7a	264.7a	774.3a	735.4a	17.7a	16.4a
	A2	126.6b		218.3ab		253.3b		734.1ab		16.0b	
M2	A0	134.0b		187.2a		265.7a		716.1b		15.7b	
	A1	154.9a	144.1a	155.9ab	164.1c	287.7a	275.6a	787.4a	752.8a	18.4a	16.7a
	A2	143.3ab		149.2b		273.3a		754.8ab		16.1b	
F	M	6.93 ^{ns}		53.95 ^{**}		29.72 ^{**}		20.92 ^{**}		17.68 [*]	
	A	9.15 ^{**}		12.01 ^{**}		12.92 ^{**}		13.86 ^{**}		20.24 ^{**}	
	M × A	1.06 ^{ns}		8.16 ^{**}		0.62 ^{ns}		0.12 ^{ns}		0.57 ^{ns}	

菌剂施用量的增加, BR、CTK、GA 和 IAA 含量分别提高了 10.7% ~ 16.8%、14.0% ~ 18.7%、12.8% ~ 15.4% 和 16.3% ~ 18.4%, ABA 含量降低了 15.5% ~ 36.5%, 说明微生物菌剂的施用有利于大部分内源激素含量的提高。M0 条件下, A1 处理显著提高了 CTK、GA 和 IAA 含量并显著降低了 ABA 含量, A2 处理则显著提高了 ABA 含量; M1 条件下, A1 处理显著提高了 CTK、GA 和 IAA 含量并显著降低了 ABA 含量; M2 条件下, A1 处理显著提高了 BR、GA 和 IAA 含量, A2 处理显著降低了 ABA 含量, 说明适宜浓度的海藻酸更有利于 BR、CTK、GA 和 IAA 含量的提高。

2.4 微生物菌剂和海藻酸对蒙古黄芪根系干物质积累量和农艺性状的影响

由表 4 可见, 微生物菌剂对蒙古黄芪 RDMA、RD、RSA 和 RV 有显著性影响, 海藻酸对 RDMA 和 4 种农艺性状均有显著性影响, 其互作效应对 RDMA 和 4 种农艺性状均无显著性影响。随着微生物菌剂施用量的增加, RDMA、RD、RV 和 RL 分别提高了 9.1% ~ 16.9%、15.9% ~ 16.5%、13.1% ~ 15.5% 和 6.9% ~ 10.0%, RSA 降低了 7.8% ~ 8.8%, 说明微生物菌剂的施用有利于根系干物质质量的积累和大部分农艺性状的提高。M0 条件下, A1 处理显著提高了 RDMA、RD 和 RL, 但显著降低了 RSA, A2 处理显著降低了 RD; M1 条件下, A1 处理显著提高了 RDMA、RD 和 RL, 但显著降低

了 RSA; M2 条件下, A1 处理显著提高了 RDMA、RV 和 RL, 但显著降低了 RSA, A2 处理显著降低了 RSA, 说明适宜浓度的海藻酸更有利于 RDMA、RD、RV 和 RL 的提高。

2.5 微生物菌剂和海藻酸对蒙古黄芪根系药效成分含量的影响

由图 1 可见, 微生物菌剂和海藻酸对蒙古黄芪根系的 2 种药效成分含量均有显著性差异, 其互作效应仅对 AIV 含量有显著性影响。随着微生物菌剂施用量的增加, 2 种药效成分含量均呈现出增加的趋势, AIV 和 C7G 含量分别增加了 23.1% ~ 29.9% 和 25.6%。M0 条件下, A1 处理显著提高了 AIV 和 C7G 含量, A2 处理则显著降低了 C7G 含量; M1 条件下, A1 处理显著提高了 AIV 含量, A2 处理显著提高了 C7G 含量; M2 条件下, A1 处理显著提高了 AIV 含量, 说明适宜浓度的海藻酸更有利于 AIV 和 C7G 含量的提高。

2.6 根系药效成分含量和干物质积累量与测定指标的相关性分析

以根系药效成分含量、干物质积累量作为蒙古黄芪质量的主要构成因子, 与测定指标进行 Pearson 相关性分析。由表 5 可见, 产量和质量与 C_i 、ABA 和 RSA 存在高度负相关, 与其他指标存在一定的高度正相关, 说明光合作用、根际土壤微生物含量和酶活性、内源激素含量以及农艺性状均对产量和质量有一定影响。

表 4 微生物菌剂和海藻酸对蒙古黄芪根系干物质积累量和农艺性状的影响

处理		根系干物质积累量 (g/株)		根粗 (mm)		根表面积 (cm ²)		根体积 (cm ³)		根长 (cm)	
M0	A0	8.44b		8.93b		114.9a		10.09ab		38.2b	
	A1	9.32a	8.54c	9.87a	8.89b	91.8c	103.5a	10.69a	9.99b	42.1a	39.0b
	A2	7.84b		7.88c		103.8b		9.18b		36.7b	
M1	A0	8.75b		9.79b		103.5a		11.03ab		39.0b	
	A1	10.14a	9.32b	10.99a	10.30a	86.8b	95.4b	12.04a	11.30a	44.6a	41.7ab
	A2	9.09b		10.11ab		95.9ab		10.84b		41.3ab	
M2	A0	9.42b		9.84a		104.5a		10.87b		40.3b	
	A1	10.55a	9.98a	10.73a	10.36a	85.3b	94.4b	12.42a	11.54a	45.1a	42.9a
	A2	9.96ab		10.52a		93.5b		11.32ab		43.3ab	
F	M	76.74**		19.90**		16.00*		10.64*		5.44 ^{ns}	
	A	17.70**		11.60**		27.41**		10.34**		15.09**	
	M×A	1.55 ^{ns}		3.13 ^{ns}		0.28 ^{ns}		0.92 ^{ns}		1.41 ^{ns}	

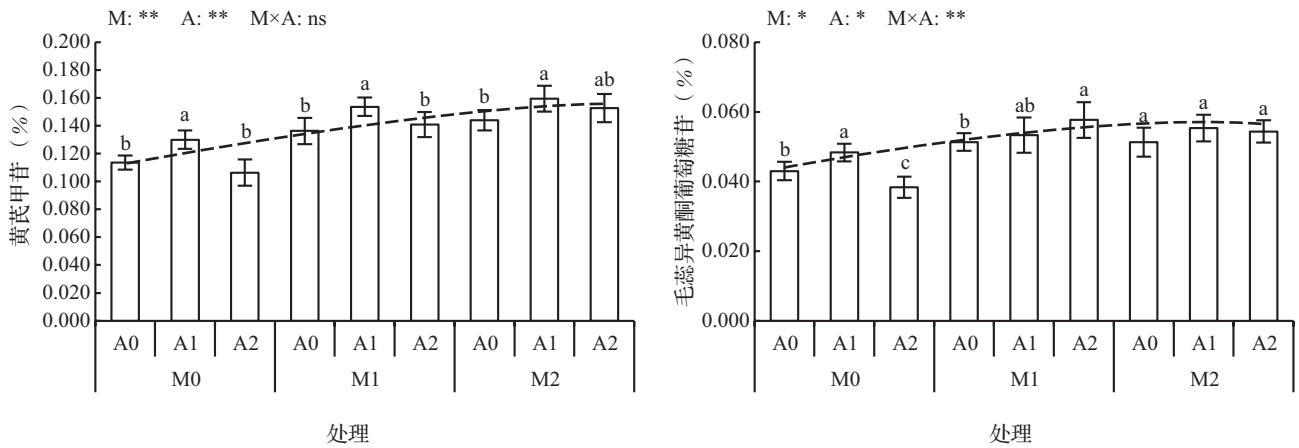


图 1 微生物菌剂和海藻酸对蒙古黄芪根系药效成分含量的影响

注: M- 微生物菌剂处理; A- 海藻酸处理; M×A- 交互效应; 小写字母不同表示在 $P<0.05$ 水平上显著;
*, ** 分别表示在 $P<5\%$ 和 $P<1\%$ 水平上显著, ns 表示不显著。

表 5 根系药效成分含量和干物质积累量与测定指标的 Pearson 相关性系数

指标	P_n	T_r	C_i	G_s	SPAD	F_v/F_m	BC	FN	AM	SC	UE
AIV	0.924**	0.948**	-0.989**	0.978**	0.943**	0.957**	0.963**	0.940**	0.845**	0.834**	0.941**
C7G	0.822**	0.799**	-0.893**	0.886**	0.767*	0.777*	0.852**	0.848**	0.811**	0.661	0.835**
RDMA	0.944**	0.973**	-0.962**	0.945**	0.944**	0.971**	0.909**	0.849**	0.710*	0.837**	0.870**
指标	AKP	CAT	BR	ABA	CTK	GA	IAA	RD	RSA	RV	RL
AIV	0.900**	0.878**	0.914**	-0.912**	0.978**	0.944**	0.943**	0.955**	-0.741*	0.944**	0.896**
C7G	0.784*	0.805**	0.704*	-0.793*	0.816**	0.829**	0.831**	0.889**	-0.613	0.808**	0.754*
RDMA	0.798**	0.766*	0.947**	-0.933**	0.947**	0.900**	0.944**	0.932**	-0.803**	0.945**	0.972**

注: P_n —净光合速率; T_r —蒸腾速率; C_i —胞间 CO_2 浓度; G_s —气孔导度; SPAD—叶绿素相对含量; F_v/F_m —最大光化学量子产量; BC—细菌; FN—真菌; AM—放线菌; SC—蔗糖酶; UE—脲酶; AKP—碱性磷酸酶; CAT—过氧化氢酶; BR—油菜素内酯; ABA—脱落酸; CTK—细胞分裂素; GA—赤霉素; IAA—生长素; RD—根粗; RSA—根表面积; RV—根体积; RL—根长; AIV—黄芪甲苷; C7G—毛蕊异黄酮葡萄糖苷; RDMA—根系干物质积累量。相关系数 r 在 0.8 ~ 1 为高度正相关, 在 -1 ~ -0.8 为高度负相关。



3 讨论

刘希港等^[23]研究表明,微生物菌剂能提高番茄叶片净光合速率、叶绿素含量以及超氧化物歧化酶等抗氧化酶活性,增加番茄的株高、茎粗和产量;王琳等^[24]研究表明,施用微生物菌剂后金银花的绿原酸、木犀草苷、浸出物含量及产量明显提高,总灰分含量显著下降。本研究表明,随着微生物菌剂施用量的增加,蒙古黄芪叶片的光合作用、根际土壤的微生物含量和酶活性、根系的内源激素含量、农艺性状和产量、质量基本呈现出增加的趋势,仅叶片胞间 CO_2 浓度、根系脱落酸含量和根系表面积呈现出下降的趋势,说明微生物菌剂可以有效促进蒙古黄芪叶片光合作用、根系生长发育及产量、质量的提高。本研究所用微生物菌剂的主要有效成分是甲基营养型芽孢杆菌,为生防型革兰氏阳性菌,具有抗菌谱广、抗逆性强、不易产生耐药性等特点,对作物的炭疽病、枯萎病均有良好的抑制效果,部分菌株具有分泌吡啶乙酸、乙烯、铁载体、氨基环丙烷羧酸脱氢酶以及固氮等功能^[25],作为一种性能优良的植物促生菌,对植物生长和增产有直接或间接的促进作用^[26]。甲基营养型芽孢杆菌与大田土壤均匀混合后可能增加了蒙古黄芪根际土壤脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶等酶的活性,从而形成了良好的微生物群落,维持了有机碳和无机碳的平衡,改善了根际土壤的营养,其生命活动也促进了根系对营养物质和微量元素的吸收^[10-11],保证了根系的正常发育,同时更多的营养物质从地下输送到地上部分,反馈到叶片,进而提高了叶片的光合作用和根系的生长发育及产量、质量。这与王菁等^[25]在黄瓜上的研究、张辰弛等^[26]在大豆上的研究有着相似之处。

吉状等^[13]研究表明,甜玉米种子经以海藻酸为主要成分的包衣剂处理后,在甜玉米种子萌发和苗期建成时提高了过氧化物酶、抗坏血酸过氧化物酶和超氧化物歧化酶的活性;朱迎春等^[18]研究表明,海藻酸水溶肥对西瓜叶片光合色素的积累、干物质量的积累、氮素的吸收、单果的质量和中部可溶性固形物的积累均有促进作用;于会丽等^[19]研究表明,海藻酸等提取物复合制剂的配施能够提高桃果实产量、改善品质并促进钾养分吸收,但随着用量的增加,桃的产量和质量指标呈先增高后降低的趋势。本研究表明,随着

海藻酸施用浓度的增加,蒙古黄芪叶片的光合作用、根际土壤的微生物含量和酶活性、根系的内源激素含量、农艺性状和产量、质量基本呈现出先增加后降低的趋势,仅叶片胞间 CO_2 浓度、根系脱落酸含量和根系表面积呈现出先降低后增加的趋势。原因可能是适宜浓度的海藻酸叶片喷施之后,激活了蒙古黄芪一氧化氮介导、生长素诱导等生长发育的调控途径^[27],灌根之后形成的交联高分子盐进一步促进了根系对水分和养分的吸收^[14],进而提高了叶片的光合作用和根系的生长发育及产量、质量;当较高浓度的海藻酸施用之后,叶片出现了一定的翻卷现象,导致叶片的光合作用等指标没有明显提高。

相关性分析发现,蒙古黄芪叶片的光合作用、根际土壤微生物含量和酶活性、根系的内源激素含量以及农艺性状均对产量和质量有一定影响,即蒙古黄芪叶片光合作用、根系形态和生理的一系列变化及交互作用最终反映在产量和药效成分含量上。如蒙古黄芪叶片光合作用制造的初生代谢产物通过同化物的分配在根系中积累,直接提高了根系的干物质积累量,也为黄芪甲苷、毛蕊异黄酮葡萄糖苷等萜类和黄酮类次生代谢产物的合成提供了更多的原料^[28-29];蒙古黄芪根际土壤微生物含量和酶活性的提高促进了根系对土壤中氮、磷、钾等营养元素的吸收利用以及生长过程中的碳氮代谢,从而间接影响了产量和药效成分含量^[30]。

与粮食作物不同,药用植物比起产量更加注重药效成分的含量,但在栽培过程中产量和药效成分含量往往很难同时达到^[31]。本研究表明 M2A1 处理为最佳处理, M2A1 处理下的蒙古黄芪根系干物质积累量和黄芪甲苷含量最高,但毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量比 M1A2 处理低 0.52%。另外发现, M1A1 处理下的根系干物质积累量、黄芪甲苷和毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量仅分别比 M2A1 处理低 3.9%、3.1% 和 3.6%,在考虑肥料成本的实践中,也可认为 M1A1 处理为较优处理。且在后期栽培过程中,可进一步增加肥料的施用梯度与组合种类,使蒙古黄芪在保证药效成分含量的基础上尽可能提高产量。

4 结论

微生物菌剂和适宜浓度海藻酸的施用可提高蒙古黄芪叶片的光合作用,促进蒙古黄芪根系的生长发育,进而提高蒙古黄芪的产量和药效成分含量,



以施用 6 g/m^2 的微生物菌剂配合喷施 4 g/L 的海藻酸效果最佳,此时,蒙古黄芪根系干物质积累量为 10.55 g/株 、黄芪甲苷含量为 0.159% 、毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量为 0.055% 。

参考文献:

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典 [M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.
- [2] 李付平, 靳子明, 刘成松, 等. 黄芪活性成分抗结肠癌作用机制研究进展 [J]. 中草药, 2024, 55 (10): 3549–3557.
- [3] Zhou Y Q, Zhang X, Zhao Z L, et al. Effects of *Astragalus membranaceus* on energy metabolism and expression of CNTF protein in skeletal muscle of exercise-induced fatigue Rats [J]. Agricultural Biotechnology, 2023, 12 (6): 19–24, 29.
- [4] Li N, Zhang Y, Han M M, et al. Self-adjuvant *Astragalus* polysaccharide-based nanovaccines for enhanced tumor immunotherapy: a novel delivery system candidate for tumor vaccines. Science China [J]. Science China Life Sciences, 2023, 67 (4): 680–697.
- [5] 袁前发, 徐志忠, 温春燕, 等. 黄芪多糖对慢性轻度不可预见性应激抑郁小鼠核因子 E2 相关因子 2 通路和血清氧化指标的影响 [J]. 海军军医大学学报, 2023, 44 (12): 1485–1489.
- [6] Liu W Z, Zhang L, Yu M M. Potential mechanism of *Astragalus* polysaccharide increasing chemosensitivity of cervical cancer HeLa cells to carboplatin by modulating the PI3K/Akt signaling pathway [J]. European Journal of Gynaecological Oncology, 2023, 44 (6): 4–11.
- [7] 刘德旺, 谷彩梅, 杨庆珍, 等. 内蒙古地区道地药材蒙古黄芪资源调查及产地适宜性 [J]. 应用生态学报, 2016, 27 (3): 838–844.
- [8] 沈德龙, 李俊, 姜昕, 等. 农用微生物菌剂 GB20287—2006 [S].
- [9] 刘希港, 刘玉青, 周波, 等. 微生物菌剂对菜心种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. 山东农业大学学报 (自然科学版), 2024, 55 (2): 162–168.
- [10] 王贺亚, 罗静静, 王康, 等. 不同微生物菌剂对甜菜根腐病的防效及产量影响 [J]. 新疆农业科学, 2024, 61 (2): 448–454.
- [11] 马巧莉, 赵倩, 肖龙仲, 等. 微生物菌剂对枇杷幼苗养分吸收及转运的影响 [J]. 江苏农业科学, 2024, 52 (2): 168–174.
- [12] 商照聪, 赵秉强, 袁亮, 等. 海藻酸类肥料 HG/T 5050—2016 [S].
- [13] 吉状状, 谭韵, 黄众基, 等. 基于海藻酸的包衣剂对甜玉米种子活力、抗氧化酶系统和产量的影响 [J]. 核农学报, 2023, 37 (11): 2297–2304.
- [14] 高岩, 申培丽, 王海朋, 等. 含海藻酸有机水溶肥料对设施大棚土壤容重与孔隙度影响的研究 [J]. 种子科技, 2018, 36 (10): 97–100.
- [15] 熊雨洁, 宋立晓, 王亚, 等. 解淀粉芽孢杆菌 W48 对大蒜产量品质及土壤质量提升效果研究 [J]. 中国土壤与肥料, 2024 (2): 89–96.
- [16] Du R H, Yan Y H, Wang L, et al. Effects of seed dressing with microbial inoculum on nutrient composition and biological yield of silage corn [J]. Agricultural Biotechnology, 2023, 12 (5): 52–54, 58.
- [17] 张慧珍, 张齐, 高邦牢, 等. 有机无机肥配施菌剂对葡萄园土壤、果实及葡萄酒品质的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2024 (1): 129–140.
- [18] 朱迎春, 安国林, 李卫华, 等. 海藻酸水溶肥对西瓜生长及产量的影响 [J]. 果树学报, 2020, 37 (12): 1898–1906.
- [19] 于会丽, 徐变变, 徐国益, 等. 海藻提取物复合制剂适宜量提高桃果实产量、品质及养分吸收量 [J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27 (9): 1656–1664.
- [20] 范珊珊, 陈娟, 吴长春, 等. 海藻肥对草莓生长、产量和品质的影响 [J]. 中国农学通报, 2024, 40 (9): 60–65.
- [21] 张亚琴, 邓秋林, 文秋姝, 等. 浅谈科学施肥在中药材生态种植中的作用与措施 [J]. 中国中药杂志, 2020, 45 (20): 4846–4852.
- [22] 李国斌, 李光跃, 孙窗舒, 等. 干旱胁迫对蒙古黄芪生物量及其根际微生物种群数量的影响 [J]. 西北植物学报, 2015, 35 (9): 1868–1874.
- [23] 刘希港, 李楠, 季托, 等. 微生物菌剂和玉米蛋白酵素对番茄叶片生理特性和产量的影响 [J]. 应用生态学报, 2023, 34 (11): 3039–3044.
- [24] 王琳, 胡凯基, 及华, 等. 微生物菌剂对金银花生长和品质的调控 [J]. 农业环境科学学报, 2022, 41 (12): 2817–2823.
- [25] 王菁, 马飞, 王君正, 等. 甲基营养型芽孢杆菌对基质培黄瓜生长及根际环境的影响 [J]. 西北农业学报, 2023, 32 (6): 899–909.
- [26] 张辰弛, 马扬旸, 曹雪松, 等. $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米材料与甲基营养型芽孢杆菌对大豆生长及产量的协同促进机制 [J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27 (3): 520–530.
- [27] Liu H, Zhang Y H, Yin H, et al. Alginate oligosaccharides enhanced *Triticum aestivum* L. tolerance to drought stress [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013, 62: 33–40.
- [28] 蒋待泉, 王红阳, 康传志, 等. 复合胁迫对药用植物次生代谢的影响及机制 [J]. 中国中药杂志, 2020, 45 (9): 2009–2016.
- [29] 郭兰萍, 周良云, 康传志, 等. 药用植物适应环境胁迫的策略及道地药材“拟境栽培” [J]. 中国中药杂志, 2020, 45 (9): 1969–1974.
- [30] 武春屹, 罗莎莎, 杨婷, 等. 氮减量配施微生物菌剂对烤烟产量和土壤微生物多样性的影响 [J]. 广东农业科学, 2023, 50 (8): 52–65.
- [31] 王艳, 张雄杰, 盛晋华, 等. 采收期对不同种质香青兰生长和产量及其药效成分的影响 [J]. 西北植物学报, 2022, 42 (6): 1022–1029.

Effects of microbial agent and alginic acid on photosynthesis, and root growth of *Astragalus membranaceus*

LIU Jie¹, FAN Bo-bo^{1#}, FENG Xiao-juan¹, ZHAO Peng¹, WANG Yong-long¹, ZHAO Yan-ling¹, LUO Yan-jie¹, LU Ling^{1*}, WANG Meng^{1*}, GENG Zhi-gang² (1. School of Ecology and Environment, Baotou Teachers' College, Baotou Inner Mongolia 014030; 2. Key Laboratory of Seaweed Fertilizers, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Qingdao Shandong 266400)

Abstract: The effects of microbial agent application amount and alginic acid application concentration on the photosynthesis and root growth of *Astragalus membranaceus* were explored to provide theoretical reference for the ecological planting of *Astragalus membranaceus* with reasonable fertilization. A two-factor split zone pot experiment was adopted, and *Astragalus membranaceus* seedlings were used as materials. The application amount of microbial agent (M0: 0 g/m², M1: 3 g/m² and M2: 6 g/m²) was the main factor, and the application concentration of alginic acid (A0: water control, A1: 4 g/L and A2: 8 g/L) was the secondary factor, and the relevant indicators of *Astragalus membranaceus* leaves, rhizosphere soil, and roots were measured. The results showed that with the increase of microbial agent application amount, the photosynthesis of leaves, microbial content and enzyme activity in rhizosphere soil, endogenous hormone content in roots, roots dry matter accumulation and agronomic traits, and the medicinal components content in the roots were increased by 4.6% to 41.2%, 10.1% to 27.7%, 10.7% to 18.7%, 6.9% to 16.9% and 23.1% to 29.9%, respectively. With the increase of alginic acid application concentration, the above indicators of *Astragalus membranaceus* showed a trend of first increasing and then decreasing. The improvement of photosynthesis, rhizosphere soil microbial content and enzyme activity, endogenous hormone content, and agronomic traits was conducive to the improvement of yield and quality. Microbial agent and alginic acid of appropriate concentration could enhance the photosynthesis of *Astragalus membranaceus* leaves, increase the microbial content and enzyme activity in the rhizosphere soil, promote root growth and development, and improve the yield and quality of *Astragalus membranaceus*. M2A1 treatment (microbial agent application amount of 6 g/m², alginic acid application concentration of 4 g/L) had the best effect. Under this treatment, the roots dry matter accumulation was 10.55 g/plant, the astragaloside IV content was 0.159%, and calycosin-7-glucoside content was 0.055%. This could provide theoretical reference for ecological planting of *Astragalus membranaceus* with rational fertilization in large fields.

Key words: microbial agent; alginic acid; *Astragalus membranaceus*; photosynthesis; growth and development; medicinal composition