

干旱胁迫下海藻活性物质对蒙古黄芪光合作用、生长及品质的影响

刘杰¹ 郭嘉华¹ 赵鹏¹ 王永龙¹ 范菠菠² 耿志刚³ 段天凤^{1,*}

(¹包头师范学院,内蒙古 包头 014030;²内蒙古农业大学农学院,内蒙古 呼和浩特 010019;

³农业农村部海藻类肥料重点实验室,山东 青岛 266400)

摘要:为探究干旱胁迫下海藻活性物质对蒙古黄芪 [*Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* (Bunge) P. K. Hsiao] 光合作用、生长及品质的影响,以蒙古黄芪种苗为材料,采用两因素裂区盆栽试验,其中干旱胁迫程度(正常水分 W0、中度干旱胁迫 W1 和重度干旱胁迫 W2,田间持水量分别为 75%~80%、60%~65% 和 45%~50%) 为主因素,海藻活性物质施用浓度(清水 B0、中等浓度 B1: 3 g·L⁻¹ 和高等浓度 B2: 6 g·L⁻¹) 为副因素,测定蒙古黄芪光合作用、抗逆能力、形态特性、内源激素以及药效成分含量等指标。结果表明,随着干旱胁迫程度的加重,蒙古黄芪叶片的光合作用减弱、抗逆能力提高;根系的生长、干物质量的积累和内源激素的分泌受到抑制;根系药效成分含量呈现先增加后降低的趋势。中等浓度的海藻活性物质可以促进不同干旱胁迫程度下蒙古黄芪叶片的光合作用和抗逆能力、根系的生长以及内源激素和药效成分含量的提高,而在重度干旱胁迫下高等浓度的海藻活性物质反而出现了抑制作用。综上所述,中等浓度的海藻活性物质可以促进干旱胁迫下蒙古黄芪的生长和药效成分含量的增加,以 W1B1 处理的毛蕊异黄酮葡萄糖苷和黄芪甲苷含量最高,分别为 0.067% 和 0.146%。本研究结果为道地产区蒙古黄芪的抗旱栽培提供了理论参考。

关键词:海藻活性物质; 干旱胁迫; 蒙古黄芪; 生长发育; 药效成分

DOI:10.11869/j.issn.1000-8551.2024.05.0985

干旱作为一种常见且高发的农业气象灾害,长期困扰着我国的农业生产,尤其是干旱半干旱地区,对作物的危害甚至超过了其他逆境因子的总和^[1]。干旱胁迫对植物众多的生理代谢过程有着抑制和破坏作用,如干旱胁迫下玉米叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和电子传递速率均显著下降^[2];燕麦叶片的超氧阴离子、羟自由基、过氧化氢、丙二醛含量显著提高^[3];地黄的株高、生根数、根长、鲜质量均降低^[4];油菜叶片的吲哚乙酸、细胞分裂素和油菜素内酯含量显著降低,脱落酸含量显著增加^[5];北苍术的苍术素、苍术酮、白术内酯 II 等次生代谢产物大量合成^[6]。

黄芪作为我国重要的大宗药材,主要的基源植物之一是蒙古黄芪 [*Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* (Bunge) P. K. Hsiao], 具有补气升阳等作用^[7]。现代药理

研究发现黄芪含有黄芪甲苷等三萜皂苷类和毛蕊异黄酮葡萄糖苷等黄酮类次生代谢产物^[8],具有抗病毒^[9]、抗氧化^[10]和抗衰老^[11]等功效。内蒙古包头市固阳县为蒙古黄芪的道地产区,年产量已超过全国总产量的十分之一^[12],但道地产区处于干旱地区农牧交错带,水分对药用植物的干物质积累量和次生代谢产物形成均有重要影响^[13]。蒙古黄芪的植株较为矮小,具有花期相对较早、抗逆性较强、形态品质较好等特点^[12]。

海藻活性物质,包括海藻酸、岩藻多糖、褐藻多酚等,是海藻肥的核心物质^[14],富含多种矿物质元素及植物内源激素等^[15]。目前海藻活性物质的生物活性和应用功效正在被广泛研究、开发、应用^[16],在种子引发、叶面施肥、促进作物生长发育等农业生产领域中的各个环节均有着优良的应用功效^[17]。而海藻酸(C₆H₈O₆)_n

收稿日期:2023-08-04 接受日期:2023-10-02

基金项目:中央引导地方科技发展资金项目(2020ZY0025),内蒙古自然科学基金项目(2020MS03071),包头师范学院自然科学类青年科研项目(BSYKJ2023-ZQ10)

作者简介:刘杰,男,讲师,主要从事药用植物栽培生理研究。E-mail: 70323@bttc.edu.cn

* 通讯作者:段天凤,女,副教授,主要从事作物保护研究。E-mail: 70322@bttc.edu.cn

作为海藻活性物质中的主要功效物质,广泛存在于褐藻植物的细胞间质和细胞壁中,具有强化细胞壁的作用,也是植物的重要供能物质,在抵抗干旱等非生物胁迫方面具有明显作用,如海藻酸可缓解干旱胁迫对菜心^[18]和甘蔗^[19]造成的伤害。尽管海藻活性物质在植物抗逆方面的应用已有一些研究报道,但其在干旱胁迫条件下对蒙古黄芪生长和品质的生理调控尚不清楚。因此,本研究以蒙古黄芪种苗为试验材料,通过分析海藻活性物质对干旱胁迫下蒙古黄芪光合作用、抗逆能力、形态特性、内源激素以及药效成分含量的影响,旨在进一步明确海藻活性物质提高蒙古黄芪抗旱性的作用机制,为道地产区蒙古黄芪的抗旱栽培提供理论参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

一级蒙古黄芪 [*Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* (Bunge) P. K. Hsiao] 种苗(平均根长 ≥ 40 cm、平均根粗 ≥ 8 mm、平均百苗重 510 g),购于内蒙古包头市固阳县。育苗基质(有机质 $\geq 35\%$ 、 $N+P_2O_5+K_2O \geq 2.5\%$ 、pH 值 6.8、导电率 $0.8 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)。盆栽盒(长 50 cm、宽 30 cm、高 20 cm)。海藻活性物质(bioactive seaweed substances, BSS)(原料:野生泡叶藻;提取方法:酶解法;商品名称:蓝能量海藻精;登记证号:农肥(2015)准字 4482 号;生产单位:青岛明月蓝海生物科技有限公司;研发单位:农业农村部海藻类肥料重点实验室;主要指标:pH 值 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 $\leq 2\%$)。

1.2 试验设计

选取 10 株一级蒙古黄芪种苗平栽于盛有育苗基质的盆栽盒中,蒙古黄芪种苗返青后每个盆栽盒中保留 8 株。采用两因素裂区设计,主区设正常水分(W0)、中度干旱胁迫(W1)和重度干旱胁迫(W2) 3 个处理,田间持水量分别为 75%~80%、60%~65% 和 45%~50%,每隔 2 d 利用称重法进行补水,田间持水量采用环刀法测定;副区设置叶面喷施清水(B0)、中等浓度(B1, $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)和高等浓度(B2, $6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)海藻活性物质 3 个处理,共 9 个处理,每个处理重复 3 次。其中,清水和海藻活性物质于蒙古黄芪返青 7 d 后开始叶面喷施,每隔 7 d 喷施一次,每次 150 mL,共 3 次,最后一次喷施后 7 d 随机选取样株进行指标的测定。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶片光合作用指标 于晴天的上午 10:00—12:00,使用 SPAD-502 叶绿素测定仪(日本美能达公

司)和 Handy PEA 植物效率分析仪(英国 Hansatech 公司)分别测定叶绿素相对含量(soil and plant analyzer development, SPAD)和叶绿素荧光参数最大光化学量子产量(maximum photochemical quantum yield, F_v/F_m);使用 CIRAS-3 便携式光合仪(美国汉莎公司)测定叶片水分利用率(water utilization efficiency, WUE)、胞间 CO_2 浓度(intercellular CO_2 concentration, C_i)、气孔导度(stomatal conductivity, G_s)、蒸腾速率(transpiration rate, T_r)、净光合速率(net photosynthetic rate, P_n)等光合气体交换参数。

1.3.2 叶片抗逆能力指标 摘下叶片后放入液氮速冻,并在 -80°C 冰箱保存,参考《植物生理学实验指导》^[20]测定叶片的渗透调节物质,即可溶性糖(soluble sugar, SS)、可溶性蛋白(soluble protein, SP)、脯氨酸(proline, Pro)含量以及抗氧化酶过氧化氢酶(catalase, CAT)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶(peroxidase, POD)活性。

1.3.3 根系形态特征指标及干物质积累量 用预冷的蒸馏水清洗干净从盆栽盒中取出的根系后,使用卷尺测定根长(root length, RL);使用电子游标卡尺测定距芦头 1 cm 处的根粗(root diameter, RD);使用 Expression 1100XL 扫描仪(中国爱普生公司)和 WinRHIZO Pro 2007 根系分析软件测定根体积(root volume, RV)和根表面积(root superficial area, RSA);于 80°C 烘干至恒重后使用电子天平测定根系干物质积累量(root dry matter accumulate, RDMA)。

1.3.4 根系内源激素指标 用预冷的蒸馏水清洗干净从盆栽盒中取出的根系后,采用植物激素酶联免疫分析 ELISA 试剂盒(上海茁彩生物科技有限公司)测定内源激素生长素(auxin, IAA)、赤霉素(gibberellin, GA)、细胞分裂素(cytokinin, CTK)、脱落酸(abscisic acid, ABA)、油菜素内酯(brassinolide, BR)含量。

1.3.5 根系药效成分指标 用预冷的蒸馏水清洗干净从盆栽盒中取出的根系后,参考《中华人民共和国药典 2020 年版 一部》^[7]的方法测定药效成分毛蕊异黄酮葡萄糖苷(calycosin-7-glucoside, C7G)、黄芪甲苷(astragaloside, AS)含量。

1.4 数据处理

使用 SPSS 24.0 软件进行方差分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 BSS 对干旱胁迫下蒙古黄芪叶片光合作用的影响

由表 1 可知,与 W0 处理相比,W1 和 W2 处理蒙古

黄芪叶片 C_i 上升了 10.4%~31.2%，而 F_v/F_m 、SPAD、WUE、 G_s 、Tr、Pn 分别下降了 6.258%~15.621%、8.3%~22.6%、20.31%~22.22%、5.651%、5.47%~13.26%、26.95%~38.30%，说明干旱胁迫减弱了蒙古黄芪叶片的光合作用，以重度干旱胁迫下蒙古黄芪叶片光合作用的减弱最为明显。

与 B0 相比，W0 条件下，B1 处理显著降低了蒙古黄芪叶片 C_i 并显著提高了除 SPAD 和 G_s 外的其余光合作

用指标，而 B2 处理仅显著提高了 WUE 和 Pn；W1 条件下，B1 处理显著降低了 C_i 并显著提高了其余光合作用指标，而 B2 处理则显著降低了 F_v/F_m ；W2 条件下，B1 处理显著提高了除 WUE 和 C_i 外的其余光合作用指标，而 B2 处理显著提高了 C_i 并显著降低了除 WUE 和 Pn 外的其余光合作用指标。说明 B1 处理在不同干旱胁迫程度下均可有效增强蒙古黄芪叶片的光合作用，而 B2 处理反而减弱了 W2 条件下蒙古黄芪叶片的光合作用。

表 1 BSS 对干旱胁迫下蒙古黄芪叶片光合作用的影响

Table 1 Effect of BSS on photosynthesis of Mongolian milkvetch leaves under drought stress

| 处理 Treatment | 最大光化学量子产量 F_v/F_m | 叶绿素相对含量 SPAD | 叶片水分利用率 WUE | 胞间 CO_2 浓度 C_i $/(μmol \cdot mol^{-1})$ | 气孔导度 G_s $/(mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$ | 蒸腾速率 Tr $/(μmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$ | 净光合速率 Pn $/(μmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$ | |
|-----------------|------------------------|-----------------|----------------|--|--|--|---|--------|
| W0 | B0 | 0.851b | 47.1a | 2.05b | 161.0a | 0.421a | 5.07b | 10.39b |
| | B1 | 0.885a | 48.9a | 2.50a | 141.9b | 0.436a | 5.33a | 13.30a |
| | B2 | 0.862b | 48.9a | 2.39a | 156.8a | 0.432a | 5.24ab | 12.50a |
| W1 | B0 | 0.812b | 43.4b | 1.77b | 180.4a | 0.425b | 4.80b | 8.49b |
| | B1 | 0.844a | 45.6a | 2.16a | 154.2b | 0.443a | 5.16a | 11.13a |
| | B2 | 0.789c | 44.7ab | 1.83b | 173.0a | 0.436ab | 4.86b | 8.89b |
| W2 | B0 | 0.747b | 39.4b | 1.77a | 193.7b | 0.406b | 4.64b | 8.21b |
| | B1 | 0.787a | 43.3a | 2.08a | 187.2b | 0.427a | 4.99a | 10.35a |
| | B2 | 0.712c | 35.4c | 1.82a | 222.4a | 0.388c | 4.17c | 7.59b |
| W0 | 0.866a | 48.3a | 2.31a | 153.3b | 0.430a | 5.21a | 12.06a | |
| W1 | 0.815b | 44.6b | 1.92b | 169.2b | 0.432a | 4.94b | 9.50b | |
| W2 | 0.749c | 39.4c | 1.89b | 201.1a | 0.407b | 4.60c | 8.72c | |
| W | ** | ** | ** | ** | * | ** | ** | |
| B | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** | |
| W×B | ** | ** | ns | * | * | ** | * | |

注：W0:75%~80%田间持水量；W1:60%~65%田间持水量；W2:45%~50%田间持水量；B0:清水；B1:3 g·L⁻¹海藻活性物质；B2:6 g·L⁻¹海藻活性物质。同列不同字母代表同一指标不同处理间在 $P<5\%$ 水平上差异显著，*、**分别代表 $P<5\%$ 和 $P<1\%$ 水平上显著和极显著，ns 代表不显著。下同。

Note: W0: 75%–80% field water holding capacity. W1: 60%–65% field water holding capacity. W2: 45%–50% field water holding capacity. B0: Water. B1: 3 g·L⁻¹ bioactive seaweed substances. B2: 6 g·L⁻¹ bioactive seaweed substances. Different lowercase letters in the same column represent significant difference at 0.05 level among treatments in the same index. * and ** represent significance and extremely significance at 0.05 and 0.01 levels, respectively, while ns represents no-significance. The same as following.

2.2 BSS 对干旱胁迫下蒙古黄芪叶片抗逆能力的影响

由表 2 可知，随着干旱胁迫程度的加重，蒙古黄芪叶片 CAT 活性呈先增高后降低的趋势，与 W0 处理相比，W1 和 W2 处理 SP、SS、Pro 含量及 POD、SOD 活性分别提高了 65.96%~78.40%、24.32%~38.16%、20.7%~22.0%、7.7%~13.3%、8.2%~10.5%，说明干旱胁迫造成了蒙古黄芪叶片渗透调节物质含量的增加以及抗氧化酶活性的提高，以中度干旱胁迫下蒙古黄芪叶片的抗逆能力提升最明显。

与 B0 相比，W0 条件下，B1 和 B2 处理均显著提高了蒙古黄芪叶片渗透调节物质的含量，但抗氧化酶活性均无显著差异；W1 条件下，B1 处理显著提高了渗透调节物质含量及 CAT 和 POD 活性，而 B2 处理则显著

降低了渗透调节物质含量及 CAT 和 POD 活性；W2 条件下，B1 处理对抗逆能力的影响与 W1 条件下相一致，而 B2 处理则显著降低了渗透调节物质含量及 POD 活性。说明 B1 处理在不同干旱胁迫程度下均可有效提高蒙古黄芪叶片的抗逆能力，而 B2 处理则降低了 W1 和 W2 条件下蒙古黄芪叶片的抗逆能力。

2.3 BSS 对干旱胁迫下蒙古黄芪根系形态特征及干物质积累量的影响

由表 3 可知，相较于 W0 处理，W1 和 W2 处理蒙古黄芪的 RSA 增加了 16.7%~17.9%，而 RL、RD、RV、RDMA 则分别降低了 5.7%~8.0%、5.0%~16.5%、8.2%~25.0%、6.5%~28.9%。说明干旱胁迫抑制了根系的生长发育以及干物质质量的积累，以重度干旱胁迫下的抑制效果最明显。

表2 BSS对干旱胁迫下蒙古黄芪叶片抗逆能力的影响

Table 2 Effect of BSS on stress tolerance of Mongolian milkvetch leaves under drought stress

| 处理 Treatment | | 可溶性蛋白 SP/(mg·g ⁻¹) | 可溶性糖 SS/(mg·g ⁻¹) | 脯氨酸 Pro/(μg·g ⁻¹) | 过氧化氢酶CAT /(U·g ⁻¹ ·min ⁻¹) | 过氧化物酶POD /(U·mg ⁻¹ ·min ⁻¹) | 超氧化物歧化酶 SOD/(U·g ⁻¹) |
|--------------|----|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|---|-------------------------------------|
| W0 | B0 | 3.12b | 6.67b | 88.6b | 25.6ab | 17.5a | 179.7a |
| | B1 | 5.17a | 8.44a | 113.1a | 27.6a | 18.4a | 175.0a |
| | B2 | 4.51a | 8.08a | 107.8a | 23.7b | 18.5a | 177.1a |
| W1 | B0 | 6.99b | 10.59b | 132.7b | 27.6b | 19.3b | 187.2a |
| | B1 | 9.08a | 14.47a | 150.9a | 29.5a | 21.4a | 201.0a |
| | B2 | 5.13c | 7.00c | 90.1c | 25.6c | 17.7c | 187.3a |
| W2 | B0 | 8.12b | 10.37b | 133.5b | 23.4b | 21.4b | 194.8ab |
| | B1 | 9.71a | 12.26a | 168.9a | 25.6a | 23.3a | 206.8a |
| | B2 | 4.97c | 6.21c | 75.3c | 22.0b | 16.8c | 186.0b |
| W0 | | 4.26b | 7.73b | 103.2b | 25.6ab | 18.1b | 177.3b |
| W1 | | 7.07a | 10.68a | 124.6a | 27.6a | 19.5ab | 191.9a |
| W2 | | 7.60a | 9.61a | 125.9a | 23.8b | 20.5a | 195.9a |
| W | | ** | ** | ** | * | * | * |
| B | | ** | ** | ** | ** | ** | * |
| W×B | | ** | ** | ** | ns | ** | ns |

与B0相比,W0条件下,B1处理显著提高了蒙古黄芪的RL、RD和RDMA,而B2处理仅显著提高了RD;W1条件下,B1处理根系形态特征及干物质积累量的变化与W0条件下相一致,而B2处理则无显著差

异;W2条件下,B1和B2处理各指标间均无显著差异。说明B1处理可有效促进W0和W1条件下蒙古黄芪根系的生长发育和干物质质量的积累。

表3 BSS对干旱胁迫下蒙古黄芪根系形态特征及干物质积累量的影响

Table 3 Effect of BSS on morphological characteristics and dry matter accumulation of Mongolian milkvetch roots under drought stress

| 处理 Treatment | | 根长 RL/cm | 根粗 RD/mm | 根体积 RV/cm ³ | 根表面积 RSA/cm ² | 根系干物质积累量 RDMA/g |
|--------------|----|----------|----------|------------------------|--------------------------|-----------------|
| W0 | B0 | 43.1b | 11.8b | 14.3a | 132.6a | 13.9b |
| | B1 | 46.2a | 13.3a | 14.7a | 137.5a | 15.7a |
| | B2 | 44.3ab | 12.9a | 14.5a | 131.2a | 14.5ab |
| W1 | B0 | 41.0b | 11.7b | 13.3ab | 155.3a | 13.0b |
| | B1 | 43.7a | 13.0a | 14.7a | 160.1a | 14.9a |
| | B2 | 41.6ab | 11.7b | 12.4b | 157.8a | 13.4b |
| W2 | B0 | 41.6a | 10.5a | 11.6a | 159.2a | 11.5ab |
| | B1 | 42.3a | 11.5a | 12.3a | 157.7a | 12.3a |
| | B2 | 40.6a | 10.6a | 10.8a | 151.3a | 10.5b |
| W0 | | 44.5a | 12.7a | 14.5a | 133.8b | 14.7a |
| W1 | | 42.1b | 12.1ab | 13.4b | 157.7a | 13.8b |
| W2 | | 41.2b | 10.9b | 11.6c | 156.1a | 11.4c |
| W | | ** | ns | ** | ** | ** |
| B | | ** | ** | * | ns | ** |
| W×B | | ns | ns | ns | ns | ns |

2.4 BSS对干旱胁迫下蒙古黄芪根系内源激素含量的影响

由表4可知,相较于W0处理,W1和W2处理蒙古黄芪根系的ABA含量增加了10%~12%,而IAA、GA、CTK、BR含量则分别降低了15.3%~28.4%、6%~24%、9%~23%、6.6%~20.3%。说明干旱胁迫抑制了根系内

源激素的积累,以重度干旱胁迫下的抑制效果最为明显。

与B0相比,W0条件下,B1处理显著提高了蒙古黄芪根系IAA、GA和BR的含量,而B2处理仅显著提高了BR含量;W1条件下,B1处理显著提高了IAA、GA、CTK和BR含量,而B2处理仅显著提高了BR含

量;W2条件下,B1处理根系内源激素含量的变化与W1条件下相一致,而B2处理无显著差异。说明B1处

理在不同干旱胁迫程度条件下均可有效促进蒙古黄芪根系内源激素含量的增加。

表4 BSS对干旱胁迫下蒙古黄芪根系内源激素含量的影响

Table 4 Effect of BSS on endogenous hormones content of Mongolian milkvetch roots under drought stress

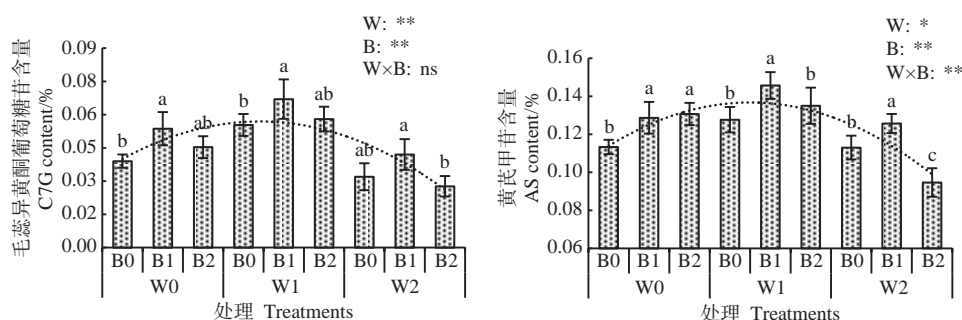
| 处理 Treatment | 生长素 IAA/(mg·g ⁻¹) | 赤霉素 GA/(μg·g ⁻¹) | 细胞分裂素 CTK/(μg·g ⁻¹) | 脱落酸 ABA/(μg·g ⁻¹) | 油菜素内酯 BR/(μg·g ⁻¹) | |
|--------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------|
| W0 | B0 | 23.4b | 1 169b | 345a | 1 240a | 143.8c |
| | B1 | 26.0a | 1 299a | 358a | 1 233a | 174.8a |
| | B2 | 25.1ab | 1 179b | 357a | 1 222a | 159.0b |
| W1 | B0 | 21.3b | 1 054b | 313b | 1 368a | 134.7c |
| | B1 | 23.5a | 1 233a | 336a | 1 312a | 165.3a |
| | B2 | 20.2b | 1 148ab | 322ab | 1 403a | 148.2b |
| W2 | B0 | 18.5b | 943b | 283b | 1 395a | 124.8b |
| | B1 | 21.6a | 1 110a | 304a | 1 342a | 145.0a |
| | B2 | 18.2b | 898b | 276b | 1 406a | 124.2b |
| W0 | 24.9a | 1 216a | 353a | 1 232b | 159.2a | |
| W1 | 21.6b | 1 145a | 324b | 1 361a | 149.4ab | |
| W2 | 19.4c | 984b | 288c | 1 381a | 132.3b | |
| W | ** | ** | ** | ** | * | |
| B | ** | ** | ** | ns | ** | |
| W×B | ns | ns | ns | ns | ns | |

2.5 BSS对干旱胁迫下蒙古黄芪根系药效成分含量的影响

由图1可知,随着干旱胁迫程度的加重,蒙古黄芪根系药效成分含量均呈现先增高后降低的趋势,以W1B1处理的药效成分含量最高,C7G、AS的含量分别为0.067%、0.146%。说明适度的干旱胁迫有利于药效成分含量的增加。

与B0相比,W0条件下,B1处理显著提高了蒙古

黄芪根系C7G、AS的含量,而B2处理仅显著提高了AS含量;W1条件下,B1处理药效成分含量的变化与W0条件下相一致,而B2处理药效成分含量无显著差异;W2条件下,B1处理显著提高了AS含量,而B2处理则显著降低了AS含量。说明B1处理在不同干旱胁迫程度条件下均可有效促进蒙古黄芪药效成分含量的增加,而B2处理在W2条件下甚至降低了药效成分含量。



注:不同小写字母表示同一干旱胁迫程度不同海藻活性物质施用浓度间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different application concentration of bioactive seaweed substances in the same drought stress ($P<0.05$).

图1 BSS对干旱胁迫下蒙古黄芪根系药效成分含量的影响

Fig.1 Effect of BSS on medicinal composition content of Mongolian milkvetch roots under drought stress

2.6 干物质积累量和药效成分含量与测定指标间的相关性

以根系的干物质积累量作为蒙古黄芪产量的主

要构成因子,以药效成分含量作为品质的主要构成因子,与测定指标进行 Pearson 相关性分析。结果表明(表5),蒙古黄芪根系的两种药效成分含量均与Gs和

CAT活性呈极显著的高度正相关,说明叶片光合作用和抗氧化酶活性的提高有利于品质的提升。根系干物质积累量与Ci呈极显著的高度负相关,与 F/F_m 、SPAD、

Gs、Tr、Pn、RL、RD、RV、IAA、GA、CTK、BR含量呈极显著的高度正相关,说明叶片光合作用、根系生长和内源激素含量的提高有利于产量的提升。

表5 干物质积累量和药效成分与测定指标的Pearson相关性系数

Table 5 Pearson correlation coefficient of dry matter accumulation and medicinal composition with measurement indicators

| 指标 Index | F/F_m | SPAD | Gs | Tr | Pn | WUE | Ci | SP | SS | Pro | CAT |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|----------|---------|---------|---------|---------|
| C7G | 0.599 | 0.597 | 0.883** | 0.614 | 0.417 | 0.302 | -0.684* | 0.218 | 0.465 | 0.319 | 0.928** |
| AS | 0.636 | 0.689* | 0.953** | 0.749* | 0.537 | 0.411 | -0.734* | 0.344 | 0.579 | 0.505 | 0.871** |
| RDMA | 0.963** | 0.936** | 0.865** | 0.927** | 0.870** | 0.785* | -0.985** | -0.184 | 0.167 | 0.107 | 0.732* |
| 指标 Index | POD | SOD | RL | RD | RV | RSA | IAA | GA | CTK | ABA | BR |
| C7G | 0.135 | 0.078 | 0.385 | 0.724* | 0.634 | 0.176 | 0.497 | 0.724* | 0.570 | -0.193 | 0.701* |
| AS | 0.366 | 0.191 | 0.464 | 0.739* | 0.654 | 0.142 | 0.559 | 0.747* | 0.605 | -0.285 | 0.733* |
| RDMA | -0.061 | -0.373 | 0.867** | 0.959** | 0.951** | -0.473 | 0.924** | 0.965** | 0.954** | -0.780* | 0.937** |

注: *和**分别表示相关性在0.05和0.01水平达到显著和极显著。相关系数 r 在 ± 1 到 ± 0.8 之间为高度正负相关。

Note: * and ** indicate the correlation was significant and extremely significant at 0.05 and 0.01 level, respectively. The correlation coefficient r between ± 1 and ± 0.8 is highly positive and negative.

3 讨论

3.1 干旱胁迫对蒙古黄芪生长及品质的影响

干旱胁迫是影响蒙古黄芪生长和品质的主要非生物胁迫之一。本研究表明,蒙古黄芪在干旱胁迫下的光合作用明显减弱,表现在 F/F_m 、SPAD、WUE、Gs、Tr、Pn的降低;抗逆能力明显提高,表现在SP、SS、Pro含量和POD、SOD活性的提高;根系的生长受到制约,表现在RL、RD、RV、RDMA的减小;根系内源激素的分泌受到抑制,表现在IAA、GA、CTK、BR含量的显著降低与ABA含量的显著提高,这分别与前人在玉米^[2]、燕麦^[3]、地黄^[4]、油菜^[5]上的研究有相似之处。随着干旱胁迫程度的加重,根系药效成分的含量均呈现先升高后降低的趋势,说明适度的干旱胁迫增加了药效成分的含量,这也与适度的环境胁迫能增加药用植物次生代谢产物含量即“逆境出品质”的研究结论^[21-22]相符,而重度干旱胁迫可能抑制了蒙古黄芪次生代谢途径,进而导致药效成分含量下降^[23]。

3.2 互作效应对蒙古黄芪生长及品质的影响

崔丹丹等^[18]研究表明,干旱胁迫下海藻肥中的海藻酸可以显著提高菜心的株高、最大叶长、叶绿素含量和抗氧化酶活性,并显著降低菜心叶片中自由基的含量;陈迪文等^[19]的研究也表明,干旱胁迫下海藻提取物中的海藻酸可以增加甘蔗的植株鲜重、叶片超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性,提高甘蔗的抗旱系数。本研究表明,不同干旱胁迫程度条件下,中等浓度的海藻活性物质促进了蒙古黄芪叶片光合作用和根系的生长,提高了植株抗逆能力及根系内源激素和药效成分

的含量,原因可能是海藻活性物质在叶面喷施时更易通过茎叶表面细胞膜进入蒙古黄芪细胞,从而激活蒙古黄芪生长发育的调控途径,包括一氧化氮介导、脱落酸信号转导、生长素诱导等途径,进而增强其抵抗干旱胁迫和次生代谢的能力^[24]。而在重度干旱胁迫程度条件下,高等浓度的海藻活性物质反而抑制了蒙古黄芪的生长和药效成分含量的积累,原因可能是高等浓度的海藻活性物质引起了蒙古黄芪叶片的翻卷,从而降低了其抵抗重度干旱胁迫的能力。

蒙古黄芪产质量主要构成因子与测定指标的相关性分析表明,叶片光合作用和抗氧化酶活性的提高有利于根系药效成分含量的提升,叶片光合作用、根系的生长和内源激素含量的提高有利于根系干物质积累量的提升,其中光合作用的增强对蒙古黄芪产质量的提高均有着重要影响。魏廷邦等^[25]的研究也表明,黄芪产量与各项光合指标、生物指标、叶绿素含量、质量指标均呈现显著或极显著正相关关系。原因可能是光合作用制造的有机物直接在根系中进行了积累,促进了产量的提高,蒙古黄芪的药效成分主要为次生代谢产物,而次生代谢产物的合成主要是以初生代谢产物为原料,光合作用制造的有机物为药效成分的积累提供了原料,这也与前人在香青兰^[26]、甘草^[27]上的研究有相似之处。

相较产量,药用植物栽培更注重药效成分含量的提高,且更讲究道地性,但在药用植物栽培过程中产量和品质往往不能兼得^[28]。本研究W0B1处理的产量最高,W1B1处理的药效成分含量最高,符合上述规律。因此,在蒙古黄芪道地产区的大田抗旱栽培过程中,可

以进一步增加海藻活性物质的浓度梯度,以探究最佳施用量范围,使其在保证品质的基础上尽可能提高产量。

4 结论

干旱胁迫抑制了蒙古黄芪叶片的光合作用、根系的生长发育、干物质质量和内源激素的积累,提高了叶片的渗透调节物质含量和抗氧化酶活性,适度干旱胁迫提高了根系的药效成分含量。干旱胁迫下施用 $3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的海藻活性物质可以促进蒙古黄芪生长及品质的提高。

参考文献:

- [1] 姚妮尔,彭祚登,李春兰,刘勇.土壤水分对核桃幼苗生长和生理特性的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(S1):1-6
- [2] 王雅坤,李鸿萍,徐真真,刘天学.高温干旱复合胁迫对玉米光合生理的影响[J].河南农业科学,2023,52(5):17-23
- [3] 李英浩,刘景辉,米俊珍,吕品,潘越,赵宝平,Allen X.重度干旱胁迫下燕麦叶片活性氧清除系统对喷施腐植酸水溶肥的响应[J].西北植物学报,2022,42(5):803-810
- [4] 李萌,腊贵晓,张宝,苏秀红,董诚明.不同脱毒处理怀地黄对干旱胁迫的响应特性[J].北方园艺,2023(7):111-118
- [5] 朱波,徐绮雯,马淑敏,刘帮艳,段美春,王龙昌.干旱缺钾对油菜内源激素、光合作用和叶绿素荧光特性的影响[J].中国油料作物学报,2022,44(3):570-580
- [6] 赵楷,姚杰,于鹏程,宋孝文,姚瑶,何录文,孟祥才.干旱提高北苍术药材质量的生物学机制[J].中国实验方剂学杂志,2023,29(13):180-187
- [7] 国家药典委员会.中华人民共和国药典2020年版一部[M].北京:中国医药科技出版社,2020
- [8] Li B Z, Zhang Q Q, Chen Y H, Su Y L, Sun S Y, Chen G L. Different crop rotation systems change the rhizosphere bacterial community structure of *Astragalus membranaceus* (Fisch) Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao[J]. Applied Soil Ecology, 2021, 166: 104003
- [9] 裴文茜,何凡,程春松,周华.中药黄芪质量评价方法的研究进展[J].中国现代应用药学,2020,37(5):620-628
- [10] Wang X M, Wang Y L, Huang D M, Shi S H, Pei C X, Wu Y C, Shen Z R, Wang F, Wang Z X. Astragaloside IV regulates the ferroptosis signaling pathway via the Nrf2/SLC7A11/GPX4 axis to inhibit PM2.5-mediated lung injury in mice [J]. International Immunopharmacology, 2022, 112: 109186
- [11] Tsai C C, Wu H H, Chang C P, Lin C H, Yang H H. Calycosin-7-O- β -D-glucoside reduces myocardial injury in heat stroke rats[J]. Journal of the Formosan Medical Association, 2018, 118(3): 730-738
- [12] 李鹏飞. 种苗粗度与末端损伤处理对蒙古黄芪生长发育及产质量的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2020
- [13] 张琪.水分调控对蒙古黄芪药效成分及生物合成基因表达的影响[D].长春:吉林农业大学,2021
- [14] 徐昱松,宫彬彬,吴晓蕾,李敬蕊,高洪波.育苗基质喷施海藻肥对番茄幼苗生长的影响[J].河北农业大学学报,2022,45(4):32-36
- [15] 马德源,马云飞,于金慧,尤升波,刘云鹏,黄超,夏晗,毕玉平.海藻肥在现代农业生产中的研究进展[J].山东农业科学,2020,52(8):145-151
- [16] Asadi M, Rasouli F, Amini T, Hassanpouraghdam M B, Souri S, Skrovankova S, Mlcek J, Ercisli S. Improvement of photosynthetic pigment characteristics, mineral content, and antioxidant activity of lettuce (*Lactuca sativa* L.) by arbuscular mycorrhizal fungus and seaweed extract foliar application[J]. Agronomy, 2022, 12(8): 1943
- [17] 张琳,韩西红,王海朋,赵丽丽,秦益民.海藻酸及海藻寡糖在肥料增效剂领域的应用[J].种子科技,2018,36(10):34-35,40
- [18] 崔丹丹,杨锦,耿银银,陈文康,沈宏.海藻肥对菜心抗旱性的影响及其机理探究[J].植物营养与肥料学报,2021,27(7):1185-1197
- [19] 陈迪文,周文灵,敖俊华,黄振瑞,鲍时翔,邹潇潇,沈宏.叶面喷施海藻提取物对甘蔗干旱胁迫的缓解效应[J].热带作物学报,2021,42(5):1348-1354
- [20] 李小方,张志良.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2016
- [21] 蒋待泉,王红阳,康传志,蒋靖怡,杜用玺,张燕,王升,郭兰萍.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
- [22] 郭兰萍,周良云,康传志,王红阳,张文晋,王升,王瑞杉,王晓,韩邦兴,周涛,黄璐琦.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
- [23] Liu J, Zhang X J, Sheng J H. Integrative analysis of the transcriptome and metabolome reveals the mechanism of saline-alkali stress tolerance in *Astragalus membranaceus* (Fisch) Bge. var. *mongholicus* (Bge.) Hsiao[J]. Food Quality and Safety, 2022, 6: 1-13
- [24] Liu H, Zhang Y H, Yin H, Wang W X, Zhao X M, Du Y G. Alginate oligosaccharides enhanced *Triticum aestivum* L. tolerance to drought stress[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013, 62: 33-40
- [25] 魏廷邦,魏玉杰,杨振华,臧广鹏,吴之涛,郗素霞.种植密度及氮肥对绿洲区蒙古黄芪有效成分和产量的影响[J].核农学报,2022,36(8):1664-1675
- [26] 王艳,张雄杰,盛晋华,卢鹏飞,刘杰.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
- [27] 吕学莲,李明,李云翔,白海波,惠建,马海军,李树华,郭生虎,许兴.不同水氮配比对甘草生长、水分利用效率和类黄酮含量的影响[J].植物生理学报,2023,59(2):421-431
- [28] 刘杰,张雄杰,盛晋华,霍秉新,贾长松.肥料类型对盐碱地蒙古黄芪生长与光合特征及药材产量和品质的影响[J].西北植物学报,2021,41(6):1012-1018

Effects of Bioactive Seaweed Substances on the Photosynthesis, Growth, and Quality of Mongolian Milkvetch under Drought Stress

LIU Jie¹ GUO Jiahua¹ ZHAO Peng¹ WANG Yonglong¹ FAN Bobo²
GENG Zhigang³ DUAN Tianfeng^{1,*}

¹Baotou Teachers' College, Baotou, Inner Mongolia 014030;

²Agricultural College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019;

³Key Laboratory of Seaweed Fertilizers, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Qingdao, Shandong 266400)

Abstract: To examine the effects of bioactive seaweed substances on the photosynthesis, growth, and quality of *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* (Bunge) P. K. Hsiao (Mongolian milkvetch) under drought stress, a two-factor split pot experiment was carried out. The main factor in the experiment was the degree of drought stress (standard water supply W0, moderate drought stress W1, and severe drought stress W2, with field water holding rates being 75 to 80%, 60 to 65%, and 45 to 50%, respectively). The secondary factor used in the experiment was the application concentration of bioactive seaweed substances (water B0, moderate concentration B1: 3 g·L⁻¹, and higher concentration B2: 6 g·L⁻¹). Mongolian milkvetch's photosynthesis, stress tolerance, morphological characteristics, endogenous hormones, and medicinal composition content were assessed. The study results showed that, with the aggravation of drought stress, photosynthesis in Mongolian milkvetch leaves decreased and the plant's stress resistance improved while blocking root growth, accumulation of dry matter quality, and secretion of endogenous hormones. A tendency of first increasing and then decreasing was also observed in the content of root medicinal composition. Under various levels of drought stress, moderate concentrations of bioactive seaweed substances promoted photosynthesis and stress tolerance in Mongolian milkvetch leaves as well as root growth while improving the content of endogenous hormones and medicinal composition. In contrast, higher concentrations of bioactive seaweed substances exhibited inhibitory effects under severe drought stress. To sum up, a moderate concentration of bioactive seaweed substances promoted the growth of Mongolian milkvetch under drought stress, with an increase in the content of its medicinal composition. Of them, the highest content of calycosin-7-glucoside and astragaloside in the W1B1 treatment was 0.067% and 0.146%, respectively. This study offers a theoretical foundation for the growth of Mongolian milkvetch in the 'daodi' product region, which is drought tolerant, with significance in promoting its production practice.

Keywords: bioactive seaweed substances, drought stress, Mongolian milkvetch, growth and development, medicinal composition