

# 有机肥和海藻酸配施提高盐碱地蒙古黄芪抗逆性和品质

刘杰<sup>1</sup>, 吴强<sup>2</sup>, 赵鹏<sup>1</sup>, 王永龙<sup>1</sup>, 高雪峰<sup>1</sup>, 赵培伟<sup>3</sup>, 马斌<sup>4</sup>, 范菠菠<sup>1\*</sup>

(1 包头师范学院, 内蒙古包头 014030; 2 内蒙古自治区农牧业科学院, 内蒙古呼和浩特 010031; 3 农业农村部海藻类肥料重点实验室, 山东青岛 266400; 4 宁夏农林科学院林业与草地生态研究所, 宁夏银川 750002)

**摘要:** 【目的】研究有机肥施用量和海藻酸施用浓度对盐碱地蒙古黄芪 [*Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongolicus* (Bge.) Hsiao] 光合效率、抗逆能力、产量和质量的影响, 为盐碱地中蒙古黄芪生态种植的合理施肥提供理论参考。【方法】以蒙古黄芪种苗为材料, 连续两年在内蒙古固阳县的盐碱地上开展了大田试验。试验采用两因素三水平完全设计, 两因素为有机肥 (O)、海藻酸 (A)。3 个有机肥施用量为 0、1200、2400 kg/hm<sup>2</sup>, 分别记为 O0、O1、O2; 3 个海藻酸施用浓度为 0、1、2 g/L, 分别记为 A0、A1、A2, 共组成 9 个处理。于蒙古黄芪种苗返青后 60 天开始测定叶片光合效率参数、抗氧化酶活性和渗透调节物质含量, 于蒙古黄芪种苗返青后 120 天开始测定根系产量、药效成分和重金属含量。【结果】相较于 O0 处理, O1、O2 处理黄芪两年净光合速率 ( $P_n$ )、蒸腾速率 ( $T_r$ ) 和气孔导度 ( $G_s$ ) 分别提高了 13.6%~29.2%、17.0%~32.3%、14.8%~21.2%, 过氧化氢酶 (CAT)、超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 活性分别提高了 10.4%~24.0%、9.5%~13.5%、7.5%~29.5%, 可溶性糖 (SS)、可溶性蛋白 (SP)、脯氨酸 (Pro) 含量分别提高了 11.0%~28.8%、22.3%~94.3%、13.2%~61.4%, 根系产量提高了 3.8%~8.1%, 黄芪甲苷 (AIV) 和毛蕊异黄酮葡萄糖苷 (C7G) 含量分别提高了 7.4%~19.4%、4.5%~22.7%, Pb、Cd、As 和 Cu 含量分别下降了 1.4%~16.0%、5.0%~19.5%、5.6%~9.7%、11.5%~35.2%。相较于 A0 处理, A1 处理显著提高了黄芪光合效率、抗氧化酶活性和渗透调节物质含量, 提升了根系产量和药效成分含量, Pb、Cd、As、Hg 和 Cu 含量分别降低了 12.0%~22.2%、6.9%~17.1%、7.5%~13.3%、7.1%~18.9%、16.1%~21.9%。2022、2023 年均以 O2A1 处理的产量 (6887、7153 kg/hm<sup>2</sup>) 最高, O0A2 处理的产量 (6065、6278 kg/hm<sup>2</sup>) 最低。2022、2023 年 O1A1 处理的两种药效成分含量最高, AIV 含量 (0.144%、0.148%) 较 O2A1 提高了 5.1%~7.2%, C7G 含量 (0.059%、0.060%) 较 O2A1 处理提高了 5.3%~13.5%。【结论】施用有机肥和适宜浓度的海藻酸均可增强蒙古黄芪的光合效率, 提高蒙古黄芪的抗逆能力, 进而提高蒙古黄芪的产量和药用品质。以施用有机肥 1200 kg/hm<sup>2</sup> 配合喷施浓度为 1 g/L 的海藻酸提升盐碱地蒙古黄芪产量、品质和抗逆能力的效果最佳, 且没有引起重金属污染的风险。

**关键词:** 有机肥; 海藻酸; 盐碱地; 蒙古黄芪; 产量; 品质

## Combined application of organic fertilizer and alginic acid improves the stress resistance and quality of *Astragalus mongolicus* in saline-alkali land

LIU Jie<sup>1</sup>, WU Qiang<sup>2</sup>, ZHAO Peng<sup>1</sup>, WANG Yong-long<sup>1</sup>, GAO Xue-feng<sup>1</sup>,  
ZHAO Pei-wei<sup>3</sup>, MA Bin<sup>4</sup>, FAN Bo-bo<sup>1\*</sup>

(1 Baotou Teachers' College, Baotou, Inner Mongolia 014030, China; 2 Inner Mongolia Academy of Agricultural & Animal Husbandry Sciences, Hohhot, Inner Mongolia 010031, China; 3 Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Seaweed Fertilizers, Qingdao, Shandong 266400, China; 4 Institute of Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan, Ningxia 750002, China)

**Abstract:** 【Objectives】Organic fertilizer and alginic acid have been proved of increasing the stress resistance of crop. We studied the combinations of organic fertilizer rates and alginic acid concentrations on improving the

收稿日期: 2023-11-15 接受日期: 2024-02-19

基金项目: 包头师范学院自然科学类青年科研项目 (BSYKJ2023-ZQ10); 宁夏回族自治区农业科技自主创新资金资助项目 (NGSB-2021-16-02); 内蒙古自治区高等学校青年科技人才发展项目 (NJYT24051); 国家自然科学基金项目 (32260027); 包头师范学院黄河流域生态保护和高质量发展研究院科研项目 (BSYHY202217)。

联系方式: 刘杰 E-mail: 70323@bttc.edu.cn; \* 通信作者 范菠菠 E-mail: fanbobo19@126.com

photosynthetic efficiency, stress resistance, yield, and medical quality of *A. mongholicus* in saline-alkali land.

【**Methods**】A field experiment with a two-factor-three-level complete design was conducted in saline-alkali land for two consecutive years, using seedlings of *A. mongholicus* as materials. The two factors were organic fertilizer and alginic acid, the three application levels of organic fertilizer were 0, 1200, and 2400 kg/hm<sup>2</sup> (denoted as O0, O1, and O2); and the three application concentration levels of alginic acid (A) were 0, 1, and 2 g/L (denoted as A0, A1, and A2). At 60 days after the rejuvenation of *A. mongholicus*, the leaf photosynthetic parameters, antioxidant enzyme activities, and osmoregulation substance contents were measured. And at 120 days, the yield, and the content of medicinal components and heavy metals in *A. mongholicus* roots were measured. 【**Results**】Compared with O0, O1 and O2 treatment increased the leaf  $P_n$ ,  $T_r$ , and  $G_s$  in 2022 and 2023 by 13.6%–29.2%, 17.0%–32.3%, and 14.8%–21.2%, enhanced the activities of CAT, SOD, and POD by 10.4%–24.0%, 9.5%–13.5%, and 7.5%–29.5%, increased of soluble sugar, soluble protein, and proline contents by 11.0%–28.8%, 22.3%–94.3%, and 13.2%–61.4%, and increased the root yields by 3.8%–8.1%, the AIV contents by 7.4%–19.4% and C7G contents by 4.5%–22.7%, and decreased Pb, Cd, As, and Cu contents by 1.4%–16.0%, 5.0%–19.5%, 5.6%–9.7%, and 11.5%–35.2%, respectively ( $P<0.05$ ). Compared with A0, A1 treatment significantly increased all the tested photosynthesis parameter values, the activities of antioxidant enzymes, and the contents of osmoregulation substances, significantly enhanced the root yields and medicinal component contents, and decreased Pb, Cd, As, Hg, and Cu contents by 12.0%–22.2%, 6.9%–17.1%, 7.5%–13.3%, 7.1%–18.9%, and 16.1%–21.9%, respectively. In both 2022 and 2023, O2A1 treatment was recorded the highest root yield (6887, and 7153 kg/hm<sup>2</sup>) while O0A2 treatment was recorded the lowest root yield (6065, and 6278 kg/hm<sup>2</sup>). Compared with O2A1 treatment, O1A1 increased AIV content by 5.1%–7.2% and C7G content by 5.3%–13.5%. 【**Conclusions**】Both organic fertilizer and alginic acid application showed obvious effect on increasing the stress resistance, root yield and the medicinal composition contents of *A. mongholicus*, due to the enhanced photosynthetic efficiencies and antioxidant enzyme activities. Satisfactory synergetic effect on yield and quality but low heavy metal content can be obtained at combination rate of organic fertilizer 1200 kg/hm<sup>2</sup> with 1.0 g/L of alginic acid to produce *A. mongholicus* in saline-alkali land.

**Key words:** organic fertilizer; alginic acid; saline-alkali land; *Astragalus mongholicus*; yield; quality

黄芪有补气升阳等药效作用<sup>[1]</sup>, 具有多种药用价值, 为多年生草本豆科植物膜荚黄芪或蒙古黄芪的干燥根, 是我国重要的大宗药材, 其含有的毛蕊异黄酮葡萄糖苷等黄酮类和黄芪甲苷等三萜皂苷类次生代谢产物<sup>[2]</sup>, 具有抗病毒和抗衰老等功效<sup>[3]</sup>。其中蒙古黄芪的道地产区为内蒙古包头市固阳县<sup>[4]</sup>, 并获得黄芪“农产品地理标志”等称号。

有机肥主要是由植物残体或动物排泄物等富含有机质的原料经发酵腐熟后而形成的肥料, 施用后可以有效的提高作物的产量和质量<sup>[5–6]</sup>, 改善土壤微生物群落结构<sup>[7]</sup>等。海藻酸( $C_6H_8O_6$ )<sub>n</sub>作为一种天然多糖聚合物, 是由单糖醛酸线性聚合而成的多糖, 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, 是植物的重要供能物质, 也是海藻肥中的标志成分<sup>[8]</sup>, 同时也可以作为肥料助剂, 在促进作物生长发育、改善肥料品质以及提高肥料利用率

等方面具有重要作用<sup>[9]</sup>。

内蒙古自治区存在大面积的盐碱荒地<sup>[10]</sup>, 盐碱荒地受到化肥和农药的污染较少, 种植抗盐碱类药材, 具有易集约化管理、成本低和污染少等的优势, 同时也与“不向农田抢地”的中药材的生态种植理念相契合<sup>[11]</sup>。目前药用植物施肥研究是栽培的核心问题之一<sup>[12]</sup>, 而不同肥料及助剂对逆境胁迫下根茎类药用植物的影响研究相对较少, 因此本研究在盐碱地中探究有机肥的施用量和海藻酸的施用浓度对蒙古黄芪产量和品质的影响, 为盐碱地中蒙古黄芪生态种植的合理施肥提供理论参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2022 年和 2023 年在内蒙古包头市固阳

县银号镇进行, 该地位于东经 110°20′0.024″, 北纬 41°7′19.308″, 海拔 1357 m, 年平均降水量 272.7~291.1 mm, 耕层土壤化学性状见表 1。

1.2 试验材料

优质蒙古黄芪种苗 (平均根长≥32 cm, 平均根粗≥0.8 cm, 平均百苗重 530 g), 株距 15 cm, 行距 30 cm, 沟深 8~10 cm, 平栽。供试有机肥为呼和浩特市德源肥业有限公司生产的商品有机肥 (有机质含量≥90%, N+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+K<sub>2</sub>O≥12%), 海藻酸由农业农村部海藻类肥料重点实验室提供。有机肥随开沟移栽蒙古黄芪种苗时一次性施入。海藻酸在蒙古黄芪返青后 30 天一次性施入, 海藻酸稀释后均匀喷洒在叶片表面, 并在喷洒后将剩余溶液浇灌在根系周围。

1.3 试验设计

试验为两因素三水平完全设计, 两因素为有机肥施用量和海藻酸施用浓度, 3 个有机肥施用量为 0、1200、2400 kg/hm<sup>2</sup>, 分别记为 O0、O1、O2; 3 个海藻酸施用浓度包括 0、1、2 g/L, 分别记为 A0、A1、A2, 3 个海藻酸用量均为 3 t/hm<sup>2</sup>, 共 9 个处理, 每个处理 3 次重复, 小区面积为 20 m<sup>2</sup> (5 m×4 m), 其他田间管理同常规栽培。其中, 两年蒙古黄芪种苗返青时间分别为 2022-06-10 和 2023-06-03。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 叶片光合气体交换参数 返青后 60 天, 于晴天的上午 9:30—11:30, 在各小区内随机选取 3 株无破损样株叶片, 使用 CIRAS-3 型光合仪测定光合气体交换参数, 包括净光合速率 ( $P_n$ )、蒸腾速率 ( $T_r$ )、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度 ( $C_i$ )、气孔导度 ( $G_s$ ), 以及叶片水分利用率 (WUE)。

1.4.2 叶片抗氧化酶活性和渗透调节物质含量 于返青后 60 天在各小区内随机选取 3 株样株, 摘下叶片后放入液氮速冻, 并在-80℃ 冰箱保存。参考 Liu 等<sup>[13]</sup>的方法测定叶片中的抗氧化酶 [过氧化氢酶 (catalase, CAT)、超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶 (peroxidase, POD)] 活性以及渗透调节物质 [可溶性糖 (soluble sugar, SS)、

可溶性蛋白 (soluble protein, SP)、脯氨酸 (proline, Pro)] 含量。

1.4.3 根系产量 于返青后 120 天, 小区预留 1/2 面积进行蒙古黄芪根系产量的测定。

1.4.4 根系药效成分和重金属含量 于返青后 120 天在各小区内随机选取 3 株样株根系, 参考《中国药典》<sup>[1]</sup>进行根系药效成分 [黄芪甲苷 (AIV)、毛蕊异黄酮葡萄糖苷 (C7G)] 和重金属 [铅 (Pb)、镉 (Cd)、砷 (As)、汞 (Hg)、铜 (Cu)] 含量的测定。

1.5 数据处理与分析

试验数据采用 Excel 2016 进行处理和作图, 使用 SPSS 24.0 进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 有机肥和海藻酸对蒙古黄芪叶片光合气体交换参数的影响

由表 2 和表 3 可见, 有机肥施用量和海藻酸施用浓度对黄芪叶片的  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $C_i$  和  $G_s$  均有显著影响 ( $P<0.05$ ), 而两者之间的互作效应仅对 2023 年  $C_i$  有显著的影响。相较于 O0 处理, O1、O2 处理两年的  $P_n$ 、 $T_r$  和  $G_s$  分别提高了 13.6%~29.2%、17.0%~32.3% 和 14.8%~21.2%,  $C_i$  下降了 8.6%~18.0%, 而水分利用率 (WUE) 无显著变化, 说明有机肥可以有效提高蒙古黄芪叶片的光合作用, 且 O2 处理的增效更加明显。相较于 A0 处理, A1 处理提高了两年的  $P_n$  和  $T_r$ , 降低了两年的  $C_i$ , 对 2022 年 O0 和 O1 处理条件下的  $G_s$  也有显著的提高作用; 而 A2 处理反而降低了 2022 年 O0 处理条件下的  $P_n$  和  $T_r$ , 提高了 2023 年 O0 处理条件下的  $C_i$ , 说明适宜的海藻酸浓度更有利于蒙古黄芪叶片光合作用的提高。

2.2 有机肥和海藻酸对蒙古黄芪叶片抗氧化酶活性和渗透调节物质含量的影响

由表 4 和表 5 可见, 2 年有机肥施用量和海藻酸施用浓度对蒙古黄芪叶片的抗氧化酶活性和渗透调节物质含量影响显著, 两者之间的互作效应仅在 2023 年 POD 活性上显著。相较于 O0 处理, O1、

表 1 耕层土壤化学性质

Table 1 Chemical properties of test sols in top layers

| 年份<br>Year | 碱解氮<br>Alkali hydrolyzed N<br>(mg/kg) | 速效磷<br>Available P<br>(mg/kg) | 速效钾<br>Available K<br>(mg/kg) | 全氮<br>Total N<br>(g/kg) | 有机质<br>Organic matter<br>(g/kg) | pH  | 全盐量<br>Total salt<br>(g/kg) |
|------------|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------|---------------------------------|-----|-----------------------------|
| 2022       | 59.13                                 | 8.24                          | 133.84                        | 1.03                    | 16.37                           | 8.3 | 8.21                        |
| 2023       | 54.84                                 | 8.81                          | 126.71                        | 1.18                    | 15.08                           | 8.1 | 7.94                        |

表 2 不同有机肥和海藻酸处理下蒙古黄芪叶片光合气体交换参数 (2022 年)

Table 2 Photosynthetic gas exchange parameters in *A. mongholicus* leaves under different organic fertilizer and alginic acid treatments (2022)

| 处理<br>Treatment |         | 净光合速率 $P_n$<br>[ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ] | 蒸腾速率 $T_r$<br>[ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ] | 胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 $C_i$<br>( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ) | 气孔导度 $G_s$<br>[ $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ] | 水分利用率 (%)<br>Water use efficiency |
|-----------------|---------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| O0              | A0      | 9.33 b                                                       | 5.03 b                                                      | 160.1 a                                                     | 0.434 b                                                  | 1.86 a                            |
|                 | A1      | 11.84 a                                                      | 5.82 a                                                      | 145.8 b                                                     | 0.523 a                                                  | 2.04 a                            |
|                 | A2      | 8.08 c                                                       | 4.28 c                                                      | 167.5 a                                                     | 0.415 b                                                  | 1.89 a                            |
|                 | 平均 Mean | 9.75 c                                                       | 5.04 c                                                      | 157.8 a                                                     | 0.458 b                                                  | 1.93 a                            |
| O1              | A0      | 10.38 b                                                      | 5.99 b                                                      | 145.3 a                                                     | 0.488 b                                                  | 1.73 a                            |
|                 | A1      | 12.91 a                                                      | 6.83 a                                                      | 134.0 b                                                     | 0.577 a                                                  | 1.89 a                            |
|                 | A2      | 11.10 b                                                      | 5.38 b                                                      | 137.9 ab                                                    | 0.512 ab                                                 | 2.08 a                            |
|                 | 平均 Mean | 11.46 b                                                      | 6.07 b                                                      | 139.1 b                                                     | 0.526 a                                                  | 1.90 a                            |
| O2              | A0      | 11.93 b                                                      | 6.39 b                                                      | 141.6 a                                                     | 0.526 a                                                  | 1.88 a                            |
|                 | A1      | 13.96 a                                                      | 7.31 a                                                      | 128.0 b                                                     | 0.560 a                                                  | 1.92 a                            |
|                 | A2      | 11.90 b                                                      | 6.31 b                                                      | 137.2 ab                                                    | 0.530 a                                                  | 1.90 a                            |
|                 | 平均 Mean | 12.60 a                                                      | 6.67 a                                                      | 135.6 b                                                     | 0.539 a                                                  | 1.90 a                            |
| 方差分析 ANOVA      |         |                                                              |                                                             |                                                             |                                                          |                                   |
| O               |         | **                                                           | **                                                          | **                                                          | **                                                       | ns                                |
| A               |         | **                                                           | **                                                          | **                                                          | **                                                       | ns                                |
| O×A             |         | ns                                                           | ns                                                          | ns                                                          | ns                                                       | ns                                |

注：O0、O1、O2代表有机肥施用量为0、1200、2400 kg/hm<sup>2</sup>；A0、A1、A2代表海藻酸施用浓度为0、1、2 g/L。同列数据后不同字母代表处理间差异达到0.05显著水平。方差分析部分，O代表有机肥处理，A代表海藻酸处理，O×A代表互作效应，ns代表变量效应不显著，\*、\*\*分别代表变量效应达到0.05、0.01显著水平。

Note: O0, O1, and O2 represent organic fertilizer application amount 0, 1200, and 2400 kg/hm<sup>2</sup>; A0, A1, and A2 represent alginic acid application concentration 0, 1, and 2 g/L. Different small letters after data in the same column represent significant difference among treatments at 0.05 levels. In the ANOVA, O, and A represent organic fertilizer and alginic acid treatments, and O×A represents the interaction effect, ns indicates no significant effect, \* and \*\* indicate the effect at 0.05 and 0.01 significant levels, respectively.

O2 处理两年的 CAT、SOD、POD 活性分别提高了 10.4%~24.0%、9.5%~13.5%、7.5%~29.5%，SS、SP、Pro 含量分别提高了 11.0%~28.8%、22.3%~94.3%、13.2%~61.4%，说明有机肥可以显著提高蒙古黄芪的抗逆能力，且 O2 处理的提高效果更加明显。相较于 A0 处理，施用海藻酸后，A1 处理显著提高了两年的 CAT 和 SOD 活性以及 O0 和 O1 处理条件下的 POD 活性，同时对两年的 SP 和 Pro 含量、2022 年 SS 含量以及 2023 年 O0 和 O1 处理条件下的 SS 含量也有着显著的提高；A2 处理显著提高了两年 O0 处理条件下的 SP 含量、2022 年 O0 和 O1 处理条件下的 SS 和 Pro 含量以及 O2 处理条件下的 SP 含量，说明海藻酸也可以显著提高蒙古黄芪的抗逆能力，且 A1 处理的提升效果更加明显。

2.3 有机肥和海藻酸对蒙古黄芪根系产量的影响

由图 1 可见，两年有机肥和海藻酸处理对蒙古

黄芪产量均有显著影响，但两者之间对产量均无显著性互作效应。O1、O2 处理两年根系产量较 O0 处理提高了 3.8%~8.1%，说明有机肥的施用有利于蒙古黄芪产量的增加。不论有机肥施用量高低，A1 处理两年产量均显著高于 A2 处理，且两年均以 O2A1 处理的产量最高，2022 和 2023 年分别为 6887 和 7153 kg/hm<sup>2</sup>，且较 O1A1 处理提高了 1.7%~4.2%，O0A2 处理的产量分别为 6065、6278 kg/hm<sup>2</sup>。说明适宜浓度的海藻酸有利于提高蒙古黄芪产量，较高的有机肥施用量可进一步提升海藻酸的增产效果。

2.4 有机肥和海藻酸对蒙古黄芪根系药效成分和重金属含量的影响

由图 2 可见，有机肥施用量对 2 年蒙古黄芪根系毛蕊异黄酮葡萄糖苷 (C7G) 含量和 2022 年黄芪甲苷 (AIV) 含量有显著影响，海藻酸施用浓度对两年

表 3 不同有机肥和海藻酸处理下蒙古黄芪叶片光合气体交换参数 (2023 年)

Table 3 Photosynthetic gas exchange parameters in *A. mongholicus* leaves as affected by organic fertilizer and alginic acid treatments (2023)

| 处理<br>Treatment |         | 净光合速率 $P_n$<br>[ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ] | 蒸腾速率 $T_r$<br>[ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ] | 胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 $C_i$<br>( $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ) | 气孔导度 $G_s$<br>[ $\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ] | 水分利用率 (%)<br>Water use efficiency |
|-----------------|---------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| O0              | A0      | 8.98 b                                                       | 4.45 b                                                      | 143.2 b                                                     | 0.395 ab                                                 | 2.03 a                            |
|                 | A1      | 10.22 a                                                      | 5.16 a                                                      | 132.0 c                                                     | 0.438 a                                                  | 1.98 a                            |
|                 | A2      | 8.44 b                                                       | 4.16 b                                                      | 159.1 a                                                     | 0.359 b                                                  | 2.03 a                            |
|                 | 平均 Mean | 9.22 b                                                       | 4.59 b                                                      | 144.8 a                                                     | 0.397 b                                                  | 2.01 a                            |
| O1              | A0      | 9.86 b                                                       | 5.11 b                                                      | 135.7 a                                                     | 0.451 a                                                  | 1.95 a                            |
|                 | A1      | 11.81 a                                                      | 5.85 a                                                      | 122.0 b                                                     | 0.497 a                                                  | 2.03 a                            |
|                 | A2      | 9.73 b                                                       | 5.17 b                                                      | 139.2 a                                                     | 0.433 a                                                  | 1.89 a                            |
|                 | 平均 Mean | 10.47 a                                                      | 5.37 a                                                      | 132.3 b                                                     | 0.460 a                                                  | 1.96 a                            |
| O2              | A0      | 10.31 b                                                      | 5.34 b                                                      | 125.5 a                                                     | 0.457 a                                                  | 1.95 a                            |
|                 | A1      | 12.26 a                                                      | 5.96 a                                                      | 109.6 b                                                     | 0.518 a                                                  | 2.06 a                            |
|                 | A2      | 11.13 b                                                      | 5.40 ab                                                     | 121.0 a                                                     | 0.469 a                                                  | 2.07 a                            |
|                 | 平均 Mean | 11.23 a                                                      | 5.56 a                                                      | 118.7 c                                                     | 0.481 a                                                  | 2.03 a                            |
| 方差分析 ANOVA      |         |                                                              |                                                             |                                                             |                                                          |                                   |
| O               |         | **                                                           | **                                                          | **                                                          | **                                                       | ns                                |
| A               |         | **                                                           | **                                                          | **                                                          | *                                                        | ns                                |
| O×A             |         | ns                                                           | ns                                                          | *                                                           | ns                                                       | ns                                |

注: O0、O1、O2代表有机肥施用量为0、1200、2400 kg/hm<sup>2</sup>; A0、A1、A2代表海藻酸施用浓度为0、1、2 g/L。同列数据后不同字母代表处理间差异达到0.05显著水平。方差分析部分, O代表有机肥处理, A代表海藻酸处理, O×A代表互作效应, ns代表变量效应不显著, \*, \*\*分别代表变量效应达到0.05、0.01显著水平。

Note: O0, O1, and O2 represent organic fertilizer application amount 0, 1200, and 2400 kg/hm<sup>2</sup>; A0, A1, and A2 represent alginic acid application concentration 0, 1, and 2 g/L. Different small letters after data in the same column represent significant difference among treatments at 0.05 levels. In the ANOVA, O, and A represent organic fertilizer and alginic acid treatments, and O×A represents the interaction effect, ns indicates no significant effect, \* and \*\* indicate the effect at 0.05 and 0.01 significant levels, respectively.

的 AIV 和 C7G 含量均有显著影响, 但有机肥施用量和海藻酸施用浓度对两年的 AIV 和 C7G 含量均无显著性交互效应。相较于 O0 处理, O1、O2 处理两年的 AIV 和 C7G 含量分别提高了 7.4%~19.4% 和 4.5%~22.7%, 相较于 O1 处理, O2 处理的 AIV 和 C7G 含量分别下降了 1.6%~3.0% 和 3.6%~14.8%, 说明施用有机肥更有利于提高蒙古黄芪的药效成分含量。相较于 A0 处理, 两年仅 A1 处理显著提高了 AIV 和 C7G 含量, 分别提高了 8.4%~19.4% 和 13.3%~40.2%, 且两年均以 O1A1 处理的两种药效成分含量最高, AIV 含量 2022 和 2023 年分别为 0.144% 和 0.148%, C7G 含量分别为 0.059% 和 0.060%, 且 AIV 含量较 O2A1 处理提高了 5.1%~7.2%, C7G 含量较 O2A1 处理提高了 5.3%~13.5%, 说明适宜浓度的海藻酸在较低有机肥用量下提高蒙古黄芪药效成分含量的效果更佳。

由表 6 可见, 有机肥施用量对 2022 年 Pb、Cd、As、Cu 含量和 2023 年 Cd、Hg、Cu 含量有显著的影响, 海藻酸施用浓度对两年的 5 种重金属含量均有显著的影响, 而两者之间的互作效应仅对 2023 年 Pb 含量有显著的影响。相较于 O0 处理, 施用有机肥后, 仅对 2022 年 Hg 含量无著性影响, 而两年的 Pb、Cd、As 和 Cu 含量分别下降了 1.4%~16.0%、5.0%~19.5%、5.6%~9.7% 和 11.5%~35.2%, 说明有机肥有利于降低蒙古黄芪根系重金属的含量。相较于 A0 处理, 施用海藻酸后, A1 处理的 Pb、Cd、As、Hg 和 Cu 含量分别降低了 12.0%~22.2%、6.9%~17.1%、7.5%~13.3%、7.1%~18.9%、16.1%~21.9%, A1 和 A2 处理显著降低了两年的 Pb 含量; A1 处理显著降低了两年 O0 处理条件下和 2022 年 O1 处理条件下 Cd 含量, A2 处理显著降低了 2023 年 O0 和 O1 处理条件下 Cd 含量; A1 处理

表 4 不同有机肥和海藻酸处理下蒙古黄芪叶片抗氧化酶活性

Table 4 Antioxidant enzyme activities in *A. mongholicus* leaves under different organic fertilizer and alginic acid treatments

|                 |         | 2022                             |                                          |                                     | 2023                             |                                          |                                     |
|-----------------|---------|----------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|
| 处理<br>Treatment |         | 过氧化氢酶<br>Catalase<br>[U/(g·min)] | 超氧化物歧化酶<br>Superoxide dismutase<br>(U/g) | 过氧化物酶<br>Peroxidase<br>[U/(mg·min)] | 过氧化氢酶<br>Catalase<br>[U/(g·min)] | 超氧化物歧化酶<br>Superoxide dismutase<br>(U/g) | 过氧化物酶<br>Peroxidase<br>[U/(mg·min)] |
| O0              | A0      | 36.3 b                           | 157.6 b                                  | 15.3 b                              | 32.0 b                           | 137.6 b                                  | 12.9 b                              |
|                 | A1      | 40.8 a                           | 169.7 a                                  | 17.8 a                              | 35.8 a                           | 160.6 a                                  | 14.4 a                              |
|                 | A2      | 33.1 b                           | 145.8 c                                  | 14.6 b                              | 30.5 b                           | 150.6 a                                  | 11.3 c                              |
|                 | 平均 Mean | 36.7 b                           | 157.7 b                                  | 15.9 b                              | 32.8 c                           | 149.6 b                                  | 12.9 b                              |
| O1              | A0      | 39.1 c                           | 169.1 b                                  | 17.0 b                              | 35.7 b                           | 159.0 b                                  | 15.5 b                              |
|                 | A1      | 47.0 a                           | 182.2 a                                  | 18.7 a                              | 38.6 a                           | 177.3 a                                  | 17.4 a                              |
|                 | A2      | 42.7 b                           | 166.8 b                                  | 15.6 b                              | 34.3 b                           | 166.2 ab                                 | 15.6 b                              |
|                 | 平均 Mean | 42.9 a                           | 172.7 a                                  | 17.1 a                              | 36.2 b                           | 167.5 a                                  | 16.2 a                              |
| O2              | A0      | 44.3 b                           | 175.3 b                                  | 17.7 a                              | 38.6 b                           | 161.4 b                                  | 16.1 a                              |
|                 | A1      | 48.8 a                           | 188.5 a                                  | 18.5 a                              | 41.9 a                           | 174.6 a                                  | 16.7 a                              |
|                 | A2      | 43.4 b                           | 173.0 b                                  | 16.8 a                              | 37.4 b                           | 167.2 ab                                 | 17.2 a                              |
|                 | 平均 Mean | 45.5 a                           | 179.0 a                                  | 17.7 a                              | 39.3 a                           | 167.8 a                                  | 16.7 a                              |
| 方差分析 ANOVA      |         |                                  |                                          |                                     |                                  |                                          |                                     |
| O               |         | **                               | **                                       | *                                   | **                               | *                                        | **                                  |
| A               |         | **                               | **                                       | **                                  | **                               | **                                       | **                                  |
| O×A             |         | ns                               | ns                                       | ns                                  | ns                               | ns                                       | *                                   |

注：O0、O1、O2代表有机肥施用量为0、1200、2400 kg/hm<sup>2</sup>；A0、A1、A2代表海藻酸施用浓度为0、1、2 g/L。同列数据后不同字母代表处理间差异达到0.05显著水平。方差分析部分，O代表有机肥处理，A代表海藻酸处理，O×A代表互作效应，ns代表变量效应不显著，\*、\*\*分别代表变量效应达到0.05、0.01显著水平。

Note: O0, O1, and O2 represent organic fertilizer application amount 0, 1200, and 2400 kg/hm<sup>2</sup>; A0, A1, and A2 represent alginic acid application concentration 0, 1, and 2 g/L. Different small letters after data in the same column represent significant difference among treatments at 0.05 levels. In the ANOVA, O and A represent organic fertilizer and alginic acid treatments, and O×A represents the interaction effect, ns indicates no significant effect, \* and \*\* indicate the effect at 0.05 and 0.01 significant levels, respectively.

显著降低了两年 O0 和 O1 处理条件下 As 含量，A2 处理显著降低了 2023 年 O0 和 O2 处理条件下 As 含量；A1 处理显著降低了 2023 年 O1 和 O2 处理条件下和 2022 年 Hg 含量，A2 处理显著降低了两年 O0 和 O2 处理条件下 Hg 含量；A1 处理显著降低了两年 Cu 含量，A2 处理显著降低了 2023 年 O2 处理条件下和 2022 年 Cu 含量，说明海藻酸也有降低蒙古黄芪重金属含量的作用。

3 讨论

盐碱地是我国重要的后备耕地战略资源，研究表明有机肥可以改善盐碱地土壤的容重和孔隙度等物理结构，提升耕层的养分含量，增强土壤微生物的活性和土壤胶体吸附盐基离子的能力，其含有的有机质在分解时产生的有机酸等物质可有效降低土

壤的 pH<sup>[14]</sup>；含有海藻酸的海藻肥也可以通过改善盐碱地土壤的微生物群落结构进一步增加土壤肥力，改善土壤理化性质，一定程度上可以替代或者减少化肥的施用<sup>[15]</sup>。

沈向捷<sup>[16]</sup>的研究表明 2250 kg/hm<sup>2</sup> 的有机肥可以增加盐碱地中红花的光合作用及其对逆境的抵抗能力，提高红花产量，并有效提高红花羟基红花黄色素 A 和山柰酚这两种药效成分含量；方雅瑜等<sup>[17]</sup>的研究表明施用有机肥后，水稻各器官中 Cd 和 Pb 含量显著降低；杨青山<sup>[18]</sup>的研究也表明，蚕沙有机肥可以在一定程度上缓解连作障碍下药用植物延胡索根系重金属含量的积累。本研究表明施用有机肥后，蒙古黄芪的光合作用和抗逆能力明显增强，表现在 P<sub>n</sub>、T<sub>r</sub>、G<sub>s</sub>、CAT 活性、SOD 活性、POD 活性、SS 含量、SP 含量和 Pro 含量的提高；产量也明显提

表 5 不同有机肥和海藻酸处理下蒙古黄芪叶片渗透调节物质含量

Table 5 Osmoregulation substance contents in *A. mongholicus* leaves under different organic fertilizer and alginic acid treatments

| 处理<br>Treatment |         | 2022               |                      |               | 2023               |                      |               |
|-----------------|---------|--------------------|----------------------|---------------|--------------------|----------------------|---------------|
|                 |         | 可溶性糖 (mg/g)        | 可溶性蛋白 (mg/g)         | 脯氨酸 (μg/g)    | 可溶性糖 (mg/g)        | 可溶性蛋白 (mg/g)         | 脯氨酸 (μg/g)    |
|                 |         | Soluble sugar (SS) | Soluble protein (SP) | Proline (Pro) | Soluble sugar (SS) | Soluble protein (SP) | Proline (Pro) |
| O0              | A0      | 15.2 c             | 5.30 b               | 110.2 c       | 13.6 b             | 3.70 b               | 93.6 b        |
|                 | A1      | 19.3 a             | 7.41 a               | 139.6 a       | 15.6 a             | 5.26 a               | 126.2 a       |
|                 | A2      | 17.3 b             | 6.51 a               | 128.7 b       | 14.5 ab            | 4.76 a               | 108.7 b       |
|                 | 平均 Mean | 17.3 b             | 6.41 c               | 126.2 b       | 14.6 b             | 4.57 c               | 109.5 c       |
| O1              | A0      | 17.4 b             | 7.16 b               | 131.5 b       | 16.4 b             | 7.71 b               | 131.8 b       |
|                 | A1      | 20.8 a             | 8.40 a               | 151.9 a       | 18.6 a             | 9.21 a               | 150.9 a       |
|                 | A2      | 19.5 a             | 7.97 ab              | 144.9 a       | 17.4 ab            | 8.06 b               | 144.5 ab      |
|                 | 平均 Mean | 19.2 a             | 7.84 b               | 142.8 a       | 17.5 a             | 8.33 b               | 142.4 b       |
| O2              | A0      | 18.8 b             | 8.12 b               | 138.0 b       | 18.7 a             | 7.78 b               | 165.0 b       |
|                 | A1      | 20.5 a             | 9.70 a               | 153.3 a       | 19.0 a             | 9.58 a               | 186.3 a       |
|                 | A2      | 20.1 ab            | 9.36 a               | 146.2 ab      | 18.8 a             | 9.29 a               | 178.8 ab      |
|                 | 平均 Mean | 19.8 a             | 9.06 a               | 145.8 a       | 18.8 a             | 8.88 a               | 176.7 a       |
| 方差分析 ANOVA      |         |                    |                      |               |                    |                      |               |
| O               |         | **                 | **                   | **            | **                 | **                   | **            |
| A               |         | **                 | **                   | **            | *                  | **                   | **            |
| O×A             |         | ns                 | ns                   | ns            | ns                 | ns                   | ns            |

注: O0、O1、O2代表有机肥施用量为0、1200、2400 kg/hm<sup>2</sup>; A0、A1、A2代表海藻酸施用浓度为0、1、2 g/L。同列数据后不同字母代表处理间差异达到0.05显著水平。方差分析部分, O代表有机肥处理, A代表海藻酸处理, O×A代表互作效应, ns代表变量效应不显著, \*、\*\*分别代表变量效应达到0.05、0.01显著水平。

Note: O0, O1, and O2 represent organic fertilizer application amount 0, 1200, and 2400 kg/hm<sup>2</sup>; A0, A1, and A2 represent alginic acid application concentration 0, 1, and 2 g/L. Different small letters after data in the same column represent significant difference among treatments at 0.05 levels. In the ANOVA, O and A represent organic fertilizer and alginic acid treatments, and O×A represents the interaction effect, ns indicates no significant effect, \* and \*\* indicate the effect at 0.05 and 0.01 significant levels, respectively.

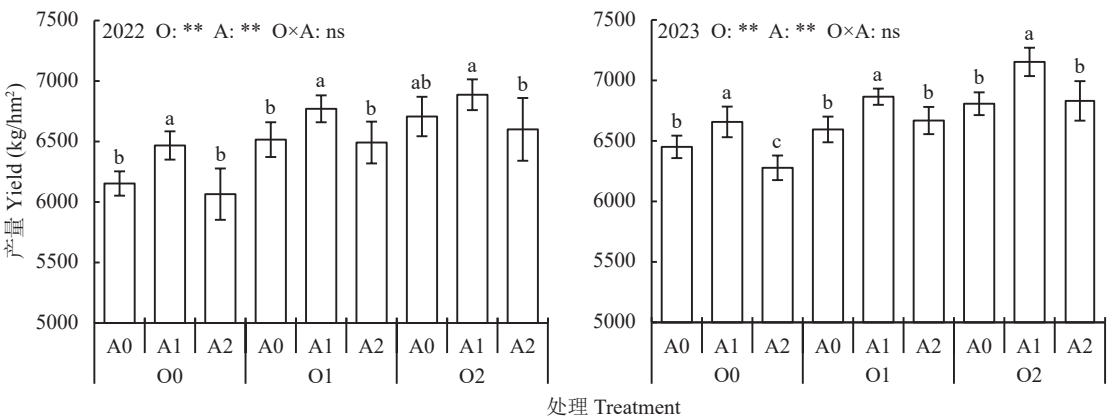


图 1 不同有机肥和海藻酸处理下蒙古黄芪根系产量

Fig. 1 Root yield of *A. mongholicus* under different organic fertilizer and alginic acid treatments

注: O0、O1、O2 代表有机肥施用量为 0、1200、2400 kg/hm<sup>2</sup>; A0、A1、A2 代表海藻酸施用浓度为 0、1、2 g/L。O 代表有机肥处理, A 代表海藻酸处理, O×A 代表互作效应。\*、\*\* 分别代表变量效应在 5% 和 1% 水平显著, ns 代表不显著。

Note: O0, O1, and O2 represent organic fertilizer application amount 0, 1200, and 2400 kg/hm<sup>2</sup>; A0, A1, and A2 represent alginic acid application concentration 0, 1, and 2 g/L. O and A represents organic fertilizer, and alginic acid treatment, and O×A represents interaction effect, \* and \*\* indicate effect significance at the 5% and 1% levels, respectively, while ns represents no significant effect.

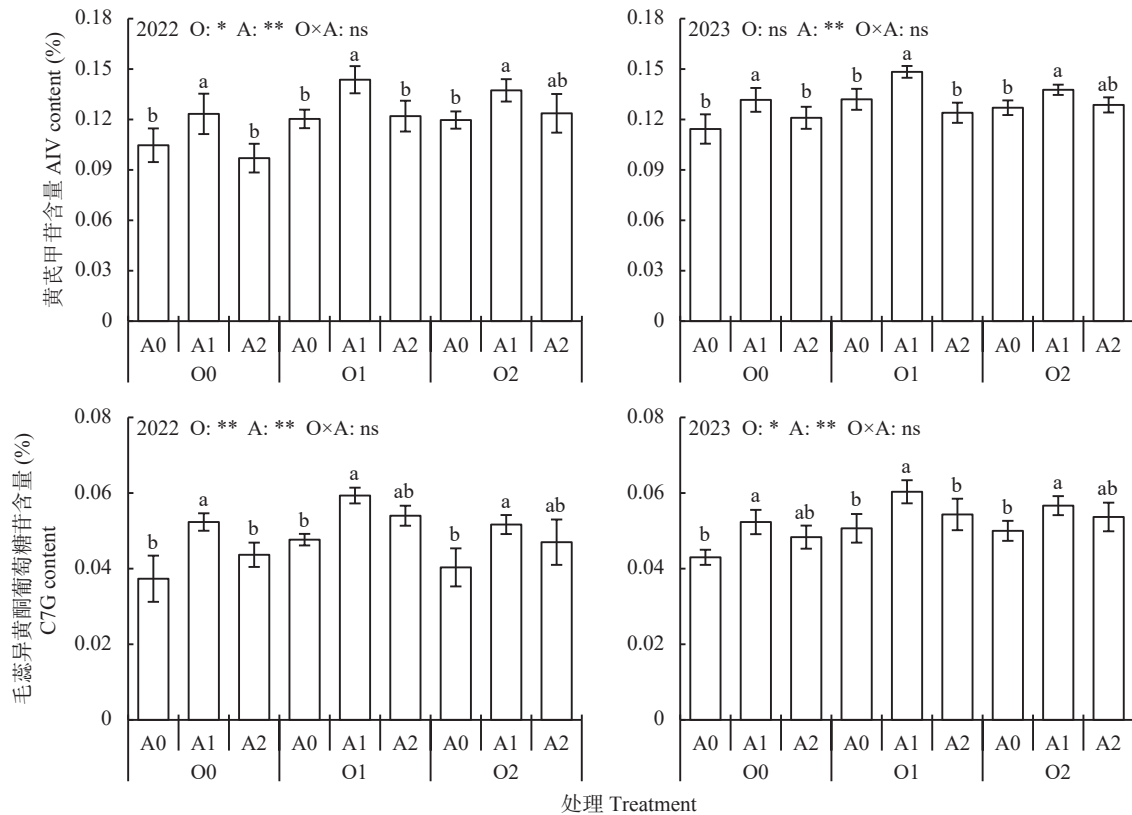


图2 不同有机肥和海藻酸处理下蒙古黄芪根系黄芪甲苷和毛蕊异黄酮葡萄糖苷含量

Fig. 2 Astragaloside IV (AIV) and calycosin-7-glucoside (C7G) content in *A. mongholicus* roots under different organic fertilizer and alginic acid treatments

注: O0、O1、O2 代表有机肥施用量为 0、1200、2400 kg/hm<sup>2</sup>; A0、A1、A2 代表海藻酸施用浓度为 0、1、2 g/L。O 代表有机肥处理, A 代表海藻酸处理, O×A 代表互作效应。\*、\*\* 分别代表变量效应在 5% 和 1% 水平显著, ns 代表不显著。

Note: O0, O1, and O2 represent organic fertilizer application amount 0, 1200, and 2400 kg/hm<sup>2</sup>; A0, A1, and A2 represent alginic acid application concentration 0, 1, and 2 g/L. O, and A represents organic fertilizer, and alginic acid treatment, and O×A represents interaction effect, \* and \*\* indicate effect significance at the 5% and 1% levels, respectively, while ns represents no significant effect.

高;同时重金属含量明显降低,表现在 Pb、Cd、As 和 Cu 含量的下降;但相较于 O1 处理, O2 处理的 AIV 和 C7G 含量分别下降了 1.6%~3.0% 和 3.6%~14.8%。原因可能是有机肥对盐碱地有一定的改良作用<sup>[19-20]</sup>,随着有机肥施用量的增加,蒙古黄芪受到的盐碱胁迫降低,而适度的盐碱胁迫可以增加药用植物药效成分的含量<sup>[21]</sup>。

吉状状等<sup>[22]</sup>的研究表明,以海藻酸为主要成分的包衣剂能通过提高甜玉米种子萌发期间的抗氧化酶活性,从而促进种子的萌发和苗期建成,进而提高产量;李松伟等<sup>[23]</sup>的研究也表明,海藻肥明显增强和改善了烟叶的渗透调节能力和光合作用。本研究表明 A1 处理下的海藻酸可以显著提高蒙古黄芪的光合作用、抗逆能力、产量和药效成分含量,并显著降低了重金属含量,而 A2 处理下的海藻酸仅对降低蒙古黄芪重金属含量有着明显的作用。原因可能是海藻酸进行灌根后,土壤中 Pb、Cd、As、Hg 和 Cu 等

重金属离子易被海藻酸分子中的众多羟基和羧基结合<sup>[8]</sup>,土壤中的重金属离子可以通过药用植物根系的吸收、转运和迁移进入体内<sup>[24]</sup>,海藻酸起到的钝化土壤重金属的作用,减少了蒙古黄芪根系对重金属离子的吸收;而 A2 处理下的海藻酸由于较高的浓度,叶面喷施后引起了蒙古黄芪叶片的翻卷,导致叶片的光合作用和抗逆能力没有明显提高,这也与何锐等<sup>[25]</sup>在芥蓝上的研究结果有相似之处。

互作效应下的分析表明,各处理的产量和药效成分含量与部分光合气体交换参数、抗氧化酶活性和渗透调节物质含量有着相似的变化趋势,原因可能是光合作用制造的有机物可以反馈根部,进而提高了根系的干物质积累量,也可以为药效成分合成的次生代谢途径提供原料,而抗逆能力的提高也促进了根系干物质和药效成分合成的代谢途径,这与吕学莲等<sup>[26]</sup>在甘草上的研究结果有相似之处;而各处理重金属含量则与之有着相反的变化趋势,原因可

表 6 不同有机肥和海藻酸处理下蒙古黄芪根系重金属含量

| Table 6 Heavy metal content in <i>A. mongholicus</i> roots under different organic fertilizer and alginic acid treatments |                 |    |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 年份<br>Year                                                                                                                | 处理<br>Treatment |    | 铅 Pb (mg/kg)  |               | 镉 Cd (μg/kg)  |               | 砷 As (mg/kg)  |               | 汞 Hg (μg/kg)  |               | 铜 Cu (mg/kg)  |               |
|                                                                                                                           |                 |    | 含量<br>Content | 平均<br>Average | 含量<br>Content | 平均<br>Average | 含量<br>Content | 平均<br>Average | 含量<br>Content | 平均<br>Average | 含量<br>Content | 平均<br>Average |
| 2022                                                                                                                      | O0              | A0 | 0.916 a       | 0.799 a       | 70.6 a        | 65.1 a        | 0.425 a       | 0.410 a       | 22.0 a        | 19.7 a        | 9.22 a        | 8.20 a        |
|                                                                                                                           |                 | A1 | 0.771 b       |               | 61.7 b        |               | 0.373 b       |               | 18.2 b        |               | 7.67 b        |               |
|                                                                                                                           |                 | A2 | 0.711 b       |               | 62.9 ab       |               | 0.431 a       |               | 18.8 b        |               | 7.70 b        |               |
|                                                                                                                           | O1              | A0 | 0.823 a       | 0.700 b       | 62.0 a        | 55.9 b        | 0.400 a       | 0.374 b       | 21.1 a        | 19.9 a        | 7.71 a        | 6.75 b        |
|                                                                                                                           |                 | A1 | 0.654 b       |               | 51.4 b        |               | 0.349 b       |               | 18.6 b        |               | 6.47 b        |               |
|                                                                                                                           |                 | A2 | 0.623 b       |               | 54.4 ab       |               | 0.374ab       |               | 19.9 ab       |               | 6.05 b        |               |
|                                                                                                                           | O2              | A0 | 0.745 a       | 0.671 b       | 55.7 a        | 52.4 b        | 0.398 a       | 0.376 b       | 19.6 a        | 18.3 a        | 6.68 a        | 5.31 c        |
|                                                                                                                           |                 | A1 | 0.631 b       |               | 50.3 a        |               | 0.354 a       |               | 17.7 b        |               | 5.22 b        |               |
|                                                                                                                           |                 | A2 | 0.637 b       |               | 51.2 a        |               | 0.378 a       |               | 17.5 b        |               | 4.02 c        |               |
| 2023                                                                                                                      | O0              | A0 | 1.163 a       | 0.951 a       | 82.7 a        | 74.1 a        | 0.564 a       | 0.518 a       | 26.6 a        | 24.5 a        | 11.59 a       | 10.65 a       |
|                                                                                                                           |                 | A1 | 0.905 b       |               | 70.3 b        |               | 0.489 b       |               | 24.7 a        |               | 9.70 b        |               |
|                                                                                                                           |                 | A2 | 0.785 c       |               | 69.2 b        |               | 0.502 b       |               | 22.1 b        |               | 10.66 ab      |               |
|                                                                                                                           | O1              | A0 | 1.045 a       | 0.938 a       | 76.3 a        | 70.4 a        | 0.514 a       | 0.489ab       | 26.0 a        | 24.8 a        | 10.40 a       | 9.42 b        |
|                                                                                                                           |                 | A1 | 0.870 b       |               | 69.9 ab       |               | 0.467 b       |               | 23.7 b        |               | 8.63 b        |               |
|                                                                                                                           |                 | A2 | 0.897 b       |               | 64.9 b        |               | 0.486ab       |               | 24.6 ab       |               | 9.24 ab       |               |
|                                                                                                                           | O2              | A0 | 0.902 a       | 0.824 b       | 67.7 a        | 64.4 b        | 0.496 a       | 0.468 b       | 21.7 a        | 18.6 b        | 9.24 a        | 8.23 c        |
|                                                                                                                           |                 | A1 | 0.794 b       |               | 63.0 a        |               | 0.459ab       |               | 17.6 b        |               | 7.59 b        |               |
|                                                                                                                           |                 | A2 | 0.776 b       |               | 62.6 a        |               | 0.448 b       |               | 16.5 b        |               | 7.85 b        |               |
| 方差分析 ANOVA                                                                                                                |                 |    |               |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
| 2022                                                                                                                      | O               |    | *             |               | **            |               | **            |               | ns            |               | **            |               |
|                                                                                                                           | A               |    | **            |               | **            |               | **            |               | **            |               | **            |               |
|                                                                                                                           | O×A             |    | ns            |               | ns            |               | ns            |               | ns            |               | ns            |               |
| 2023                                                                                                                      | O               |    | ns            |               | *             |               | ns            |               | **            |               | **            |               |
|                                                                                                                           | A               |    | **            |               | **            |               | **            |               | **            |               | **            |               |
|                                                                                                                           | O×A             |    | **            |               | ns            |               | ns            |               | ns            |               | ns            |               |

注: O0、O1、O2代表有机肥施用量为0、1200、2400 kg/hm<sup>2</sup>; A0、A1、A2代表海藻酸施用浓度为0、1、2 g/L。O代表有机肥处理, A代表海藻酸处理, O×A代表互作效应。\*、\*\*分别代表变量效应在5%和1%水平显著, ns代表不显著。  
Note: O0, O1, and O2 represent organic fertilizer application amount 0, 1200, and 2400 kg/hm<sup>2</sup>; A0, A1, and A2 represent alginic acid application concentration 0, 1, and 2 g/L. O, and A represents organic fertilizer, and alginic acid treatment, and O×A represents interaction effect, \* and \*\* indicate effect significance at the 5% and 1% levels, respectively, while ns represents no significant effect.

能是盐碱胁迫增加了重金属含量对蒙古黄芪光合作用和抗逆能力的影响, 蒙古黄芪体内的重金属离子可能与叶绿素、SS、SP、Pro 合成的几种酶以及 CAT、SOD 和 POD 肽链中氢硫基结合, 从而阻碍了叶绿素和渗透调节物质的合成, 抑制了抗氧化酶的活性<sup>[27]</sup>, 这与陆佳欣等<sup>[28]</sup>在芍药上的研究结果有相似之处。

药用植物栽培过程中其产量和药效成分含量经常不能兼得<sup>[29]</sup>, 本研究 O2A1 处理的产量最高且较 O1A1 处理提高了 1.7%~4.2%, O1A1 处理的两种药效成分含量均最高, 其中 AIV 含量较 O2A1 处理提高了 5.1%~7.2%, C7G 含量较 O2A1 处理提高了 5.3%~13.5%, 由于 O1A1 处理对两种药效成分含量的提升更加明显, 且药用植物更加注重药用价值,

再考虑到实践中的肥料成本, 可认为 O1A1 处理为最佳处理。后期在道地产区的盐碱地栽培过程中, 可进一步增加肥料的组合种类与施用梯度, 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、降低重金属含量。

## 4 结论

施用有机肥和适宜浓度的海藻酸可增强蒙古黄芪的光合效率, 提高蒙古黄芪的抗逆能力, 进而提高蒙古黄芪的产量和品质, 以施用有机肥 1200 kg/hm<sup>2</sup> 配合喷施浓度为 1 g/L 的海藻酸提升盐碱地蒙古黄芪产量、品质和抗逆能力的效果最佳, 且没有引起重金属污染的风险。

## 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. 315–316.  
National Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China[M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2020. 315–316.
- [2] Li B Z, Zhang Q Q, Chen Y H, *et al.* 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.
- [3] 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.  
Pei W H, He F, Cheng C S, Zhou H. Research progress on the quality evaluation methods of traditional Chinese medicine astragali radix[J]. *Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy*, 2020, 37(5): 620–628.
- [4] 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.  
Liu D W, Gu C M, Yang Q Z, *et al.* Resource surveys and suitability of origin for genuine medicinal materials, *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* in Inner Mongolia, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(3): 838–844.
- [5] 唐继伟, 徐久凯, 温延臣, 等. 长期单施有机肥和化肥对土壤养分和小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(11): 1827–1834.  
Tang J W, Xu J K, Wen Y C, *et al.* Effects of organic fertilizer and inorganic fertilizer on the wheat yields and soil nutrients under long-term fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(11): 1827–1834.
- [6] Zhao K N, Huang M, Li Y J, *et al.* Combined organic fertilizer and straw return enhanced summer maize productivity and optimized soil nitrate-N distribution in rainfed summer maize–winter wheat rotation on the southeast loess plateau[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, 23(1): 938–952.
- [7] Liu X Q, Liu H R, Zhang Y S, *et al.* Organic amendments alter microbiota assembly to stimulate soil metabolism for improving soil quality in wheat-maize rotation system[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 339: 117927.
- [8] 张琳, 韩西红, 王海朋, 等. 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.  
Zhang L, Han X H, Wang H P, *et al.* Application of alginic acid and alginate oligosaccharide in fertilizer synergist field[J]. *Seed Science & Technology*, 2018, 36(10): 34–35.
- [9] Asadi M, Rasouli F, Amini T, *et al.* 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.
- [10] 杨博, 屈忠义, 孙慧慧, 等. 粉垄耕作对河套灌区盐碱地土壤性质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 52–59.  
Yang B, Qu Z Y, Sun H H, *et al.* The effect of smash-ridging cultivation on properties of saline-alkali soil in hetao irrigation district[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(8): 52–59.
- [11] 杨利民. 中药材生态种植理论与技术前沿[J]. 吉林农业大学学报, 2020, 42(4): 355–363.  
Yang L M. Theory and technology frontiers of ecological planting of Chinese medicinal materials[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2020, 42(4): 355–363.
- [12] 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.  
Zhang Y Q, Deng Q L, Wen Q S, *et al.* Brief discussion about role and measures of scientific fertilization in ecological cultivation of Chinese medicinal materials[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2020, 45(20): 4846–4852.
- [13] 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(2): 201–203.
- [14] 闫茂鲁, 王晓鹏, 郑云珠, 等. 有机肥对我国盐碱地土壤改良及作物生长的影响[J]. 农业工程, 2023, 13(8): 56–62.  
Yan M L, Wang X P, Zheng Y Z, *et al.* Effects of organic fertilizer on soil improvement and crop growth in saline-alkaline soil in China[J]. *Agricultural Engineering*, 2023, 13(8): 56–62.
- [15] 刘国强, 王洪斌, 郑勇. 盐碱地专用肥研究进展[J]. 新疆师范大学学报(自然科学版), 2017, 36(4): 50–54.  
Liu G Q, Wang H B, Zheng Y. Research progress of the research on the special fertilizer application of saline-alkali soil[J]. *Journal of Xinjiang Normal University (Natural Sciences Edition)*, 2017, 36(4): 50–54.
- [16] 沈向捷. 有机肥施用量对不同品种红花产量和质量的影响[D]. 内蒙古呼和浩特: 内蒙古农业大学硕士学位论文, 2023.  
Shen X J. Effects of different application amount of organic fertilizer on yield and quality of safflower (*Carthamus tinctorius* L.)[D]. Hohhot, Inner Mongolia: MS Thesis of Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
- [17] 方雅瑜, 邹慧玲, 尹晓辉, 等. 赤泥和有机肥对镉、铅在水稻中吸收分布的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(5): 466–476.  
Fang Y Y, Zou H L, Yin X H, *et al.* Effects of red-mud and organic fertilizer on cadmium and lead absorption and distribution in rice[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(5): 466–476.

- 466–476.
- [18] 杨青山. 蚕沙有机肥对连作延胡索产量和品质的影响[D]. 重庆: 重庆三峡学院硕士学位论文, 2023.
- Yang Q S. The effect of silkworm sand organic fertilizer on the yield and quality of continuous cropping *Corydalis yanhusuo* W. T. Wang[D]. Chongqing: MS Thesis of Chongqing Three Gorges University, 2023.
- [19] Deng P B, Guo L P, Yang H T, *et al.* Effect of an organic fertilizer of *Ganoderma lucidum* residue on the physical and chemical properties and microbial communities of saline alkaline soil[J]. *Water*, 2023, 15(5): 962.
- [20] Gu Y Y, Liang X Y, Zhang H Y, *et al.* Effect of biochar and bioorganic fertilizer on the microbial diversity in the rhizosphere soil of *Sesbania cannabina* in saline-alkaline soil[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1190716.
- [21] 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.
- Guo L P, Zhou L Y, Kang C Z, *et al.* Strategies for medicinal plants adapting environmental stress and "simulative habitat cultivation" of dao-di herbs[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2020, 45(9): 1969–1974.
- [22] 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.
- Ji Z Z, Tan Y, Huang Z J, *et al.* Effects of seed coating agent based on alginic acid on seed vigor, antioxidant enzyme system and yield of sweet corn[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2023, 37(11): 2297–2304.
- [23] 李松伟, 王发展, 陈彪, 等. 生物炭配施海藻肥对连作植烟土壤理化特性及烤烟生长的影响[J]. 河南农业大学学报, 2021, 55(5): 852–861.
- Li S W, Wang F Z, Chen B, *et al.* Effects of biochar combined with seaweed fertilizer on the physicochemical characteristics of continuous tobacco planting soil and flue-cured tobacco growth[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2021, 55(5): 852–861.
- [24] 武浩楠, 田雨, 卢园, 等. 不同年生蒙古黄芪中黄芪甲苷和金属元素的关系分析[J/OL]. 沈阳药科大学学报, 2023: 1–10[2023-11-05]. <https://doi.org/10.14066/j.cnki.cn21-1349/r.2023.0127>.
- Wu H N, Tian Y, Lu Y, *et al.* Analysis of the relationship between astragaloside IV and metal elements in *Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bge. var. *mongholicus* (Bge) Hsiao under different years [J/OL]. *Journal of Shenyang Pharmaceutical University*, 2023: 1–10[2023-11-05]. <https://doi.org/10.14066/j.cnki.cn21-1349/r.2023.0127>.
- [25] 何锐, 谭星, 高美芳, 等. 添加不同浓度海藻肥对水培芥蓝生长及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(11): 2051–2059.
- He R, Tan X, Gao M F, *et al.* Effects of different concentrations of seaweed extract on growth and quality of Chinese kale in hydroponics [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(11): 2051–2059.
- [26] 吕学莲, 李明, 李云翔, 等. 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.
- Lü X L, Li M, Li Y X, *et al.* Effects of different ratios of water and nitrogen on growth, water use efficiency and flavonoid content of *Glycyrrhiza uralensis*[J]. *Plant Physiology Journal*, 2023, 59(2): 421–431.
- [27] 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.
- Jiang D Q, Wang H Y, Kang C Z, *et al.* Influence and mechanism of stress combination on medicinal plants secondary metabolism[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2020, 45(9): 2009–2016.
- [28] 陆佳欣, 王洪刚, 王震, 等. 不同非生物胁迫对药用植物芍药影响的国内研究进展[J]. 中药材, 2022, 45(1): 248–254.
- Lu J X, Wang H G, Wang Z, *et al.* Domestic research progress on the effects of different abiotic stress on the medicinal plant *Paeonia lactiflora* Pall.[J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2022, 45(1): 248–254.
- [29] 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.
- Wang Y, Zhang X J, Sheng J H, *et al.* Effect of harvesting period on growth, yield and pharmacodynamic components of different germplasms from *Dracocephalum moldavica* L.[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, 42(6): 1022–1029.