DOI: 10. 11686/cyxb2025438
http://cyxb. magtech. com. cn
马祖艳, 董世魁, 李颖, 等. 钼硅硼添加对同德短芒披碱草光合生理的影响及生长综合评价. 草业学报, 2026, 35(10): 192－206.
MA Zu-yan, DONG Shi-kui, LI Yin, *et al*. Effects of molybdenum, silicon, and boron addition on the photosynthetic physiology of *Elymus breviaristatus* and a multivariate evaluation of growth performance. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(10): 192－206.

钼硅硼添加对同德短芒披碱草光合生理的影响及生长综合评价

马祖艳[1,2], 董世魁[1,2*], 李颖[2], 张然[2], 土旦加[3], 吴桂玲[4], 施建军[1], 史德军[3]
(1. 青海大学畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016; 2. 北京林业大学草业与草原学院, 北京 100083; 3. 青海省草原改良试验站, 青海 西宁 810016; 4. 青海大学三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810001)

摘要: 青藏高原地区海拔高, 低温、干旱与强紫外线辐射等严苛环境因子, 严重制约牧草生长。在持续恢复的草地上, 适用于退化草地生态修复的优良牧草－同德短芒披碱草出现了减产现象。常规施肥策略已难以满足其生长需求, 添加微量元素对维持其稳产、高产可能具有关键作用。本研究通过叶面喷施钼[钼酸铵$(NH_4)_2MoO_4$: 0. 15、0. 30、0. 45 g·L^{-1}]、硅(亲水型纳米二氧化硅SiO_2NPs: 0. 10、0. 20、0. 40 g·L^{-1})和硼(硼酸H_3BO_3: 0. 15、0. 30、0. 45 g·L^{-1})3种微量元素开展盆栽试验。结果表明: 3种元素均显著提升株高与地上部干重($P<0.05$), 其中0. 30 g·L^{-1}钼处理株高增幅为34. 56%, 根长在0. 30 g·L^{-1}钼与0. 10 g·L^{-1}硅处理下分别增加59. 86%和79. 53%。同时, 钼、硅添加显著提高了植物的光合能力, 其中0. 40 g·L^{-1}硅处理下净光合速率增幅达111. 53%; 0. 30 g·L^{-1}钼处理下叶绿素a、b含量分别提升46. 00%和54. 32%, 而硼抑制叶绿素a积累。0. 30 g·L^{-1}钼处理下, 分别增强了抗氧化酶活性及渗透调节物质积累, 过氧化物酶活性提升231. 10%, 可溶性糖含量增幅为201. 48%; 硅、硼对酶活性和碳水化合物的调控呈浓度依赖性。主成分分析(前4个主成分累积贡献率为77. 66%)结合隶属函数法确定0. 45 g·L^{-1}钼处理(综合评价D=0. 701)抗逆性最优, 其通过协同根系发育－光合－抗氧化通路提升碳同化效率, 证实钼为高寒牧草抗逆性调控的关键元素, 为退化草地精准修复提供理论依据。

关键词: 钼; 硅; 硼; 形态; 光合; 生理; 综合评价

Effects of molybdenum, silicon, and boron addition on the photosynthetic physiology of *Elymus breviaristatus* and a multivariate evaluation of growth performance

MA Zu-yan[1,2], DONG Shi-kui[1,2*], LI Yin[2], ZHANG Ran[2], TU Dan-jia[3], WU Gui-ling[4], SHI Jian-jun[1], SHI De-jun[3]
1. *Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary*, *Qinghai University*, *Xining* 810016, *China*; 2. *School of Grassland Science*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*; 3. *Qinghai Province Grassland Improvement Experimental Station*, *Xining* 810016, *China*; 4. *Qinghai University*, *State Key Laboratory of Plateau Ecology and Animal Husbandry*, *Xining* 810001, *China*

Abstract: The harsh environment of the Qinghai-Xizang Plateau, characterized by high elevation, low temperature, drought, and intense ultraviolet radiation, severely limits forage grass growth. *Elymus breviaristatus* is a high-quality forage species widely used for restoration of degraded grasslands. However, this forage species has shown yield declines during ongoing grassland restoration, and conventional fertilization is insufficient to meet its growth

收稿日期: 2025-10-21; 改回日期: 2025-12-17
基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF1304303)和国家自然科学基金项目(32361143870)资助。
作者简介: 马祖艳(1997－), 女, 云南弥勒人, 在读博士。E-mail: malbaixxi@163. com
*通信作者 Corresponding author. E-mail: dongshikui@bjfu. edu. cn

requirements. Instead, trace-element supplementation may be critical for sustaining stable and high yields. To explore the effects of trace element supplementation on this important forage grass, a pot experiment was conducted in which *E. breviaristatus* was treated with molybdenum [$(NH_4)_2MoO_4$: 0.15, 0.30, and 0.45 g·L^{-1}], silicon (SiO_2NPs: 0.10, 0.20, and 0.40 g·L^{-1}), or boron (H_3BO_3: 0.15, 0.30, and 0.45 g·L^{-1}) applied as foliar sprays. The results show that all three elements significantly increased plant height and aboveground dry weight ($P<0.05$), compared with the control. Specifically, plant height was increased by 34.56% in the 0.30 g·L^{-1} molybdenum treatment and root length was increased by 59.86% in the 0.3 g·L^{-1} molybdenum treatment and by 79.53% in the 0.1 g·L^{-1} silicon treatment. Molybdenum and silicon addition significantly enhanced photosynthetic capacity. The net photosynthetic rate was increased by 111.53% in the 0.4 g·L^{-1} silicon treatment; and chlorophyll a and b contents were increased by 46.00% and 54.32%, respectively, in the 0.3 g·L^{-1} molybdenum treatment. Treatment with boron inhibited chlorophyll *a* accumulation. Antioxidant enzyme activity and osmolyte accumulation were increased in the 0.3 g·L^{-1} molybdenum treatment, with peroxidase activity increased by 231.10% and the soluble sugars content increased by 201.48%. The regulatory effects of silicon and boron on enzyme activity and carbohydrate accumulation were concentration dependent. In a principal component analysis (PCA), the first four components explained 77.66% of the total variance. On the basis of the PCA and a membership function analysis, 0.45 g·L^{-1} molybdenum (multivariate analysis D=0.701) was identified as the optimal treatment to improve overall stress resistance. This treatment improved carbon assimilation efficiency by promoting root development, photosynthetic performance, and antioxidant capacity. The results of this study show that molybdenum is a key element for regulating the stress tolerance of an alpine forage grass, and provide a theoretical basis for the targeted restoration of degraded grasslands.

Key words: molybdenum; silicon; boron; morphology; photosynthesis; physiology; comprehensive evaluation

植物生长发育过程中不仅需要大量元素也需要微量元素。在植物生产中,微量元素是至关重要的驱动力[1],主要包括铁、锰、锌、铜、硼和钼等,它们是植物生长所需的营养元素[2],在维持土壤－植物的健康和稳定方面发挥着关键作用。其中,钼(molybdenum, Mo)是一种具有独特性能的金属元素,其参与植物体内多种酶的合成和代谢,从而提高植物的抗寒性,促进叶绿素的合成,并提升植物产量[3-4]。硅(silicon, Si)是地球表面和土壤中含量第二丰富的四价元素,大多数的硅以不溶性结晶铝硅酸盐的形式存在于土壤中,不能直接作用于植物[5-6]。硅添加后可对植物的光合机构产生保护作用,并调控相关基因的表达、改善电子的传递效率、促进碳水化合物的转运、提高植物光合能力等[7]。硼(boron, B)与植物生理代谢密切相关,对维持细胞壁的正常生长、保持细胞膜结构完整及维持细胞膜的正常功能具有重要的作用,缺硼会导致植物生长不正常[8-9]。可见,微量元素保持在适当的水平下,才能确保植物的正常生长。因此,研究不同微量元素添加对植物生长发育的影响具有重要意义。

同德短芒披碱草(*Elymus breviaristatus*)是禾本科披碱草属多年生优良牧草,也是青藏高原高寒退化草地生态修复的优良草种之一[10-11]。它为家畜提供了丰富的营养来源,对维持区域生态的稳定发展意义重大。同时,其发达的根系有助于保持水土、防止土壤侵蚀,在维护高原草地生态平衡方面发挥着不可替代的作用。然而,青藏高原地区独特的自然环境给牧草的生长带来了诸多挑战,该区海拔高,生长季短,且低温、干旱、强紫外线辐射等胁迫频繁发生,是典型的环境敏感区和脆弱区[12]。这些逆境条件会抑制植物的光合作用,干扰体内的生理代谢平衡,进而影响牧草(包括同德短芒披碱草)的生长、发育和繁殖,限制其生产力的提高。目前,常规施肥已经不能实现种子增产,甚至减产现象时有发生。因此,如何增强同德短芒披碱草对逆境的适应能力,成为当前退化高寒草地生态恢复研究的关键科学问题之一。

尽管已有研究表明,适量添加微量元素能够改善植物的生长状况和抗逆性能,但这些研究多集中于森林及农田植物,而针对同德短芒披碱草这类高原牧草的研究相对较少,且研究主要集中在含量和分布规律上。因此,本

研究探索钼、硅、硼3种微量元素添加对同德短芒披碱草光合生理特性的影响机制，综合评估其对植物生长的作用效果，以期解答不同微量元素对禾本科牧草的影响机制是否表现为协同、何种微量元素对禾本科牧草的生长发育最有利的科学问题。本研究结果可以为制定科学合理的施肥措施、提高禾本科牧草的产量和品质提供理论支持，对于促进青藏高原退化草地生态恢复提质增效具有重要的指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为同德短芒披碱草，由青海省草原改良试验站提供。供试土壤采自天峻县阳康乡(98°22′ E，37°55′ N，海拔：3860 m)，采集0～20 cm土层，土壤养分含量如表1所示。供试肥料包括3种微量元素：分别是亲水型纳米二氧化硅(SiO_2NPs)、硼酸(H_3BO_3)和钼酸铵[$(NH_4)_2MoO_4$]。

表1 供试土壤养分含量

Table 1 Nutrient content of tested soil

土层深度 Soli depth (cm)	pH	电导率 Electrical conductivity (us·cm^{-1})	有机质 Organic matter (g·kg^{-1})	全氮 Total nitrogen (g·kg^{-1})	全磷 Total phosphorus (g·kg^{-1})	全钾 Total potassium (g·kg^{-1})
0～10	8.75	90.90	26.84	1.82	73.98	10.15
10～20	8.96	92.50	17.31	1.24	20.76	8.09

1.2 试验方法

于2024年4月在恒温气候箱中进行室内盆栽培养试验，恒温气候箱温度基于天峻县2016－2023年生长季均温设置(图1)。人工气候箱(RXZ-436，宁波江南仪器厂)条件设为：白天温度(15±2) ℃保持14 h，夜间(6±2) ℃保持10 h，光照强度6000 lx，相对湿度为70%。

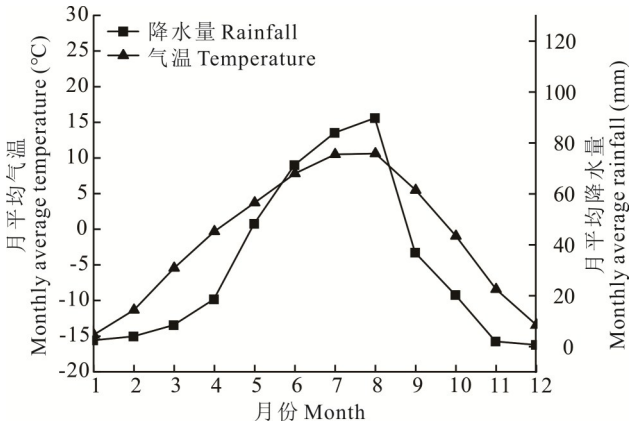


图1 天峻县阳康乡2016–2023年月平均气温和平均降水量

Fig. 1 Monthly average temperature and rainfall in Yangkang township, Tianjun county (2016–2023)

幼苗培养：每盆内放入1 kg土壤，盆栽口径14 cm、高度10 cm、底径7 cm，并配施基肥[CH_4N_2O：20 g·m^{-2}、$Ca(H_2PO_4)_2·H_2O$：1.5 g·m^{-2})]。挑选匀称饱满无病害的种子，用2%的NaClO溶液浸泡并冲洗3遍后进行播种，每盆播种15粒，第一次浇水至土壤完全湿润后，每隔3 d，于18：00补蒸馏水至恒重，待幼苗出苗期和分蘖期各进行一次叶面喷施微量元素肥，每盆每次喷施20 mL，出苗后，选择10株长势一致的植株进行定苗，叶面施肥和补充水分时间不在同一天。设置喷施超纯水、$(NH_4)_2MoO_4$、SiO_2NPs和H_3BO_3，共计1个CK和9个处理，分别标记为CK、Si_1(0.10 g·L^{-1})、Si_2(0.20 g·L^{-1})、Si_3(0.40 g·L^{-1})、Mo_1(0.15 g·L^{-1})、Mo_2(0.30 g·L^{-1})、Mo_3(0.45 g·L^{-1})、B_1(0.15 g·L^{-1})、B_2(0.30 g·L^{-1})、B_3(0.45 g·L^{-1})，每个处理3次重复，试验处理如表2所示。

1.3 指标测定

1.3.1 生长指标 每个处理随机选取5株，用于测定植物的株高(plant heigh，cm)、根长(root length，cm)、地上部干重(dry weight of aboveground，mg·株$^{-1}$)。株高：使用卷尺测量植株从根茎到茎尖的距离。根长：除去根表面的泥土，将根系展平，使用卷尺测量从根茎到最长部分根尖的距离。地上部干重：取5株健康完整的植株，去除根系部分，于电热鼓风干燥箱(FD-115，德国BINDER公司)65 ℃烘干至恒重后称其干重。将盆栽剩余地上部全部收集，并用锡箔纸包好，迅速将其放入液氮中，于－80 ℃保存，用于后续的生理分析。

1.3.2 光合指标　使用光合仪(Li-6800,美国 LI-COR 公司)测定叶片光合指标。选择阳光较好的晴天上午 9:30－11:00 进行,用标准叶室夹取叶片中间部位,测定时在叶室内设置并保持恒定条件:光合有效辐射为 1200 μmol·m^{-2}·s^{-1},叶室温度为 20 ℃,CO_2浓度为 400 μmol·mol^{-1},相对湿度保持在仪器自动控制的稳定范围内。待参数稳定后读数,测定净光合速率(net photosynthetic rate, P_n, μmol·m^{-2}·s^{-1})、气孔导度(stomatal conductance, G_s, mol·m^{-2}·s^{-1})、蒸腾速率(transpiration rate, T_r, mol·m^{-2}·s^{-1})、胞间 CO_2 浓度(inter-cellular CO_2 concentration, C_i, μmol·mol^{-1}),每盆处理重复测量 3 次取平均值。叶片叶绿素 a 含量(chlorophyll a, Chl a, mg·g^{-1} FW)和叶绿素 b 含量(chlorophyll b, Chl b, mg·g^{-1} FW)测定采用 80% 丙酮浸提至叶片褪色,离心取上清,随后用分光光度计(UV-4802S,上海尤尼柯仪器有限公司)测定其在 663 和 645 nm 处的吸光度值[13－14]。

表 2　试验处理设置

Table 2　Experimental treatment group settings (g·L^{-1})

序号 Number	试验处理 Treatment	浓度 Concentration	序号 Number	试验处理 Treatment	浓度 Concentration
1	CK	0.00	6	Mo_2	0.30
2	Si_1	0.10	7	Mo_3	0.45
3	Si_2	0.20	8	B_1	0.15
4	Si_3	0.40	9	B_2	0.30
5	Mo_1	0.15	10	B_3	0.45

注:表中 Si_1、Mo_1、B_1 代表低浓度处理,Si_2、Mo_2、B_2 代表中等浓度处理,Si_3、Mo_3、B_3 代表高浓度处理。

Note: In the Table, Si_1, Mo_1, and B_1 represent low concentration treatments, Si_2, Mo_2, and B_2 represent medium concentration treatments, and Si_3, Mo_3, and B_3 represent high concentration treatments.

1.3.3 生理指标　测定植物叶片中可溶性糖含量(soluble sugar content, mg·g^{-1} FW)和淀粉含量(starch content, mg·g^{-1} FW)等可以确定植物的物质贮存转化能力从而表征植物品质,同时过氧化物酶活性(peroxidase activity, POD, U·g^{-1} FW)和超氧化物歧化酶活性(superoxide dismutase activity, SOD, U·g^{-1} FW)变化也可表征植物的抗性强弱。将－80 ℃保存的地上部样本取出,经液氮研磨后,采用蒽酮比色法进行可溶性糖和淀粉含量[15]测定;POD 活性采用愈创木酚法测定[16];SOD 活性采用氮蓝四唑法测定[17]。

1.3.4 生长能力综合指标　采用 Microsoft Excel 2021 和 SPSS 23 对数据进行处理和统计学分析,采用 Duncan 法进行显著性检验,数据标准化后进行抗性系数计算[18－19]和主成分分析,以特征值大于 1 为标准保留主成分,通过各主成分的综合指标(CI)和贡献率计算隶属函数值(U)、主成分权重值和生态适应性综合评价值(D),D 值越大则植物生态适应性越强[20－21]。

$$Y_i = Y_z / Y_c$$

式中:Y_z 为各指标处理的测定值,Y_c 为各指标的对照测定值,Y_i 为抗性系数。

$$CI_i = \sum (E_{ij} \times X_j)$$

式中:CI_i 为第 i 个综合指标:E_{ij} 为第 i 个主成分第 j 个单项指标对应的特征向量值,X_j 为第 j 个单项指标的标准化值。

$$U_{ij} = \left(X_{ij} - X_{j\min}\right) / \left(X_{j\max} - X_{j\min}\right)$$

式中:U_{ij} 为第 i 种参试材料在第 j 个主成分的隶属函数值,X_{ij} 为第 i 种参试材料在第 j 个主成分的得分值,$X_{j\min}$、$X_{j\max}$ 分别为所有参试材料第 j 个主成分的最小值和最大值。

$$W_j = P_j / \sum P_j$$

式中:W_j 为第 j 个主成分的权重,P_j 为第 j 个主成分的贡献率。

$$D_i = \sum (U_{ij} \times W_j)$$

式中:D_i 为第 i 种参试材料的综合评价值。

1.4　统计分析

运用 Excel 2021 整理数据,使用软件 SPSS 23.0 对数据进行 one-way ANOVA 方差分析、Duncan 多重比较检验、相关性分析和主成分分析,差异显著水平为 0.05($P<0.05$),使用软件 Origin 2021 及 R Studio 4.4.2 作图。数据为平均值±标准偏差。

2 结果与分析

2.1 微量元素添加对披碱草形态结构的影响

幼苗形态能直接反映出植物的生长状态。试验结果表明,钼和硅添加可显著提高同德短芒披碱草的株高($P<0.05$),而硼添加对株高的影响不显著($P>0.05$),株高随着微量元素浓度的增加呈现出先升高后降低的趋势,其中施用Mo_2水平的提升效果最为明显,与CK相比提升了34.56%(图2A)。钼和硅添加对根长均有显著影响($P<0.05$),其中以Mo_2和Si_1水平下较明显,与CK相比分别显著提升了59.86%和79.53%,而硼添加对根长无显著影响($P>0.05$,图2B)。同时,钼和硼添加使披碱草地上部干重均得到显著提升,以Mo_2和B_3水平下提升效果较明显,相较CK分别显著提升了103.00%和89.72%(图2C)。

2.2 微量元素添加对披碱草光合能力的影响

植株的光合参数反映其碳同化效率和环境适应能力,揭示植物的生长活力与生态适应能力。从图3可知,钼和硅添加均显著影响披碱草叶片的光合能力($P<0.05$),P_n、T_r、G_s总体呈现随浓度升高而上升的趋势(图3A,B和D)。Si_3处理下P_n值达到最高,较CK显著升高了111.53%,Mo_3处理下T_r和G_s值达到最高,较CK分别显著升高了40.88%和39.25%。而硼元素到达中高浓度时,对P_n有显著影响($P<0.05$),对T_r和G_s无显著影响($P>0.05$)。同时,钼和硅添加均显著降低了披碱草的C_i值($P<0.05$),但钼和硅各水平之间差异均不显著($P>0.05$),其中Mo_1处理下C_i值最低,较CK降低了9.91%。而硼添加则仅在B_2、B_3水平下显著低于CK,B_1水平与CK差异不显著($P>0.05$,图3C)。

叶绿素含量与光合作用密切相关,叶片中的叶绿素含量可以反映植物对光的吸收能力,一般Chl a有利于吸收长波光,Chl b有利于吸收短波光[22]。从图3可以看出,钼和硅添加均能显著提升披碱草叶片的Chl a、Chl b含量($P<0.05$),且随着浓度的增加呈现出先升高后降低的趋势(图3E,F)。Mo_2和Si_1处理下Chl a和Chl b较高,与CK相比,Chl a分别升高了46.00%和45.41%,Chl b分别升高了54.32%和57.72%。B_3显著降低了披碱草叶片的Chl a含量($P<0.05$),对Chl b的含量无显著影响($P>0.05$)。

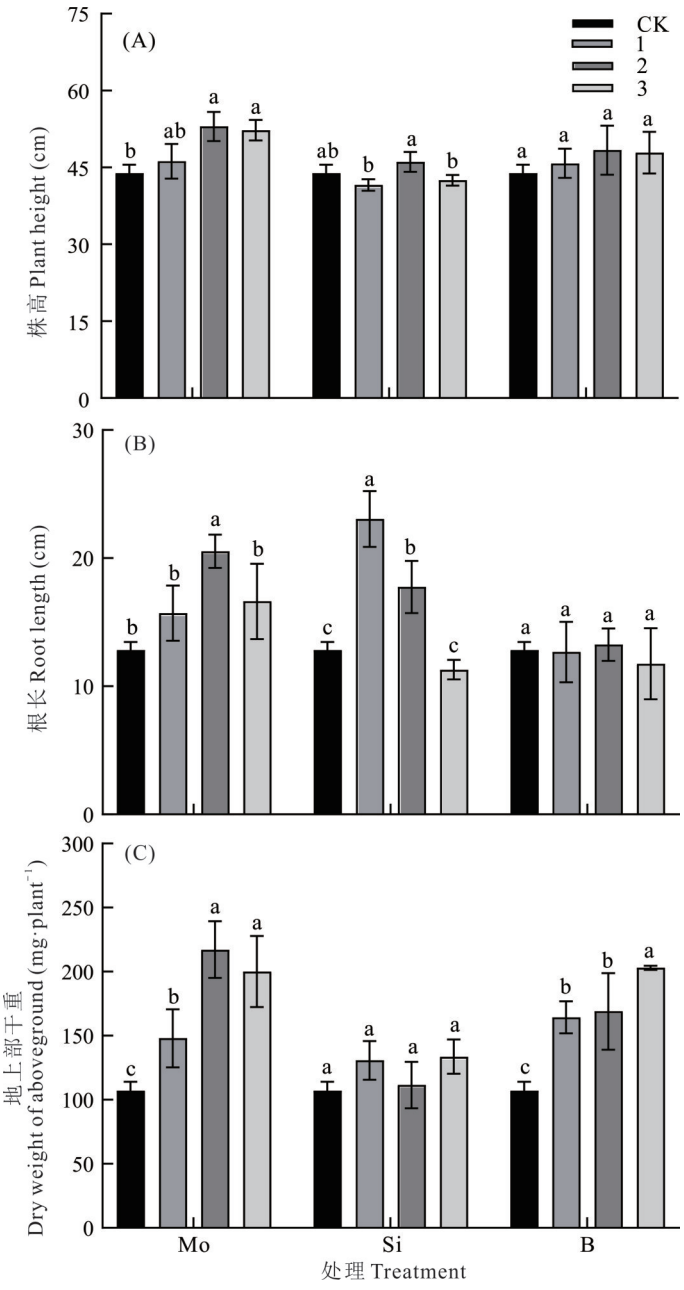


图2 钼硅硼添加对披碱草形态结构的影响

Fig. 2 Effects of molybdenum, silicon and boron applications on morphological traits of *E. breviaristatus*

图中数字1,2和3代表低、中等和高浓度处理。Mo代表钼处理、Si代表硅处理、B代表硼处理,不同小写字母表示在同一微量元素处理下不同浓度间差异显著($P<0.05$)。下同。In the figure, 1, 2, and 3 indicate the low, medium, and high concentration treatments, respectively. Mo denotes molybdenum treatment, Si denotes silicon treatment, and B denotes boron treatment, different lowercase letters denote significant differences among concentrations within the same micronutrient treatment ($P<0.05$). The same below.

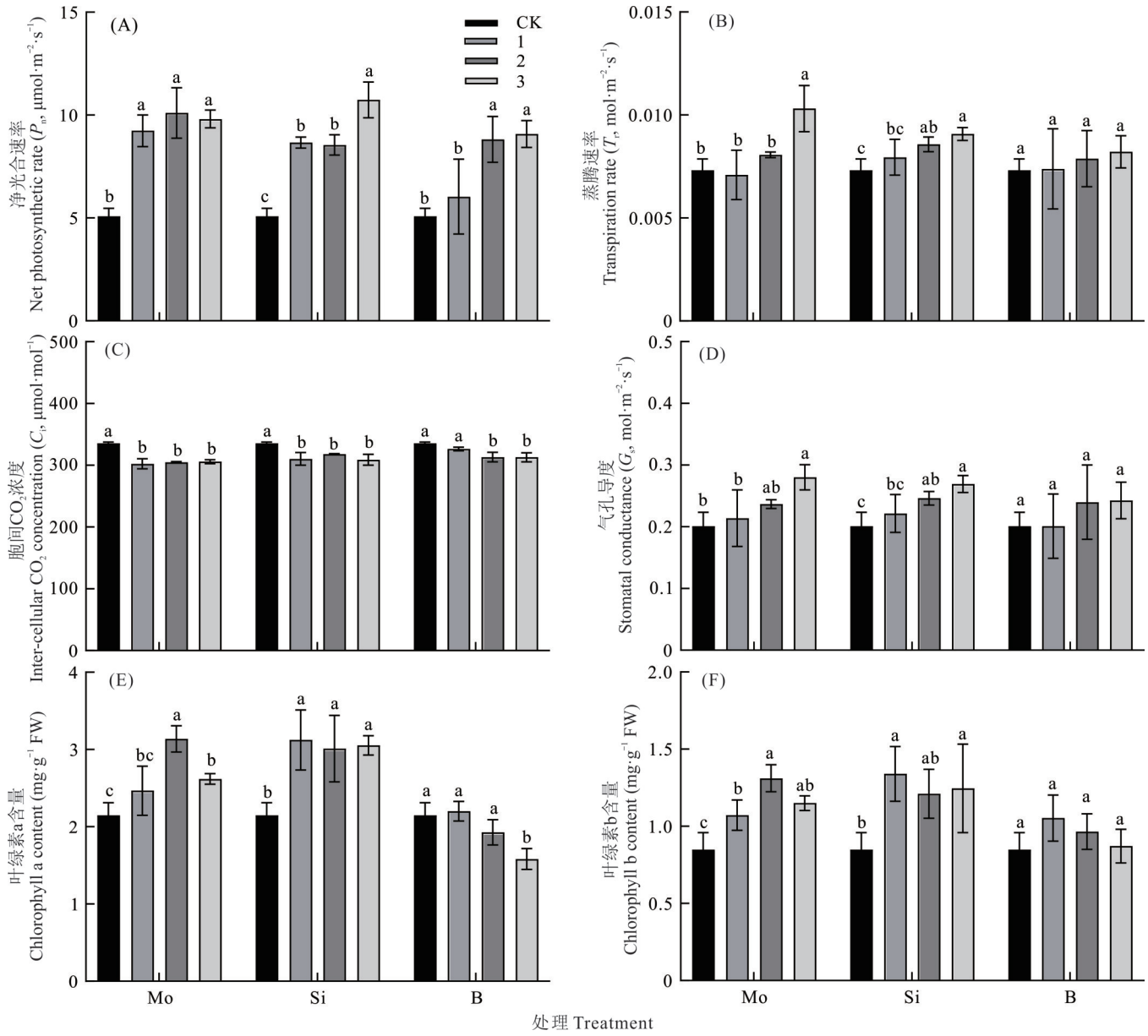


图 3　钼硅硼添加对披碱草光合能力的影响

Fig. 3　Effects of molybdenum, silicon and boron applications on photosynthetic capacity of *E. breviaristatus*

2.3　微量元素添加对披碱草生理生化特性的影响

从图 4 可知，钼添加可显著提升同德短芒披碱草叶片的 POD 活性（$P<0.05$），且随着浓度的增加呈现出先升高后降低的趋势。其中 Mo_2 水平的提升效果最为明显，与 CK 相比显著提升了 231.10%（图 4A）。随着 Mo 浓度的升高，SOD 活性逐渐上升，Mo_3 水平与 CK 相比显著提升了 39.63%（$P<0.05$，图 4B）。硅和硼添加也可提升披碱草叶片的 POD 和 SOD 活性，但硅在低中浓度下才呈现出显著差异（$P<0.05$），硼只在中等浓度下对 POD 活性呈现显著影响，B 只在低浓度下对 SOD 活性呈现显著影响（$P<0.05$）。

从图 4 可以看出，钼和硅添加均可显著提高同德短芒披碱草叶片的可溶性糖含量（$P<0.05$），且随着浓度的增加呈现出先升高后降低的趋势。其中施用 Mo_2 水平的提升效果最为明显，与 CK 相比平均提升了 201.48%（图 4C）。同时，钼添加还显著提升了披碱草叶片的淀粉含量（$P<0.05$），但随着浓度的升高，体现出的作用效果不够显著，其中 Mo_3 水平的提升效果最为明显，与 CK 相比显著提升了 85.88%（图 4D）。而硅添加后，淀粉的含量虽有所提升，但差异不显著（$P>0.05$），硼添加后，可溶性糖的含量虽有所提升，但也无显著差异（$P>0.05$）。可以看

出硅添加后植物可能更侧重于通过积累可溶性糖来进行短期渗透保护,而硼可能更侧重于通过积累淀粉来优化长期能量储存。

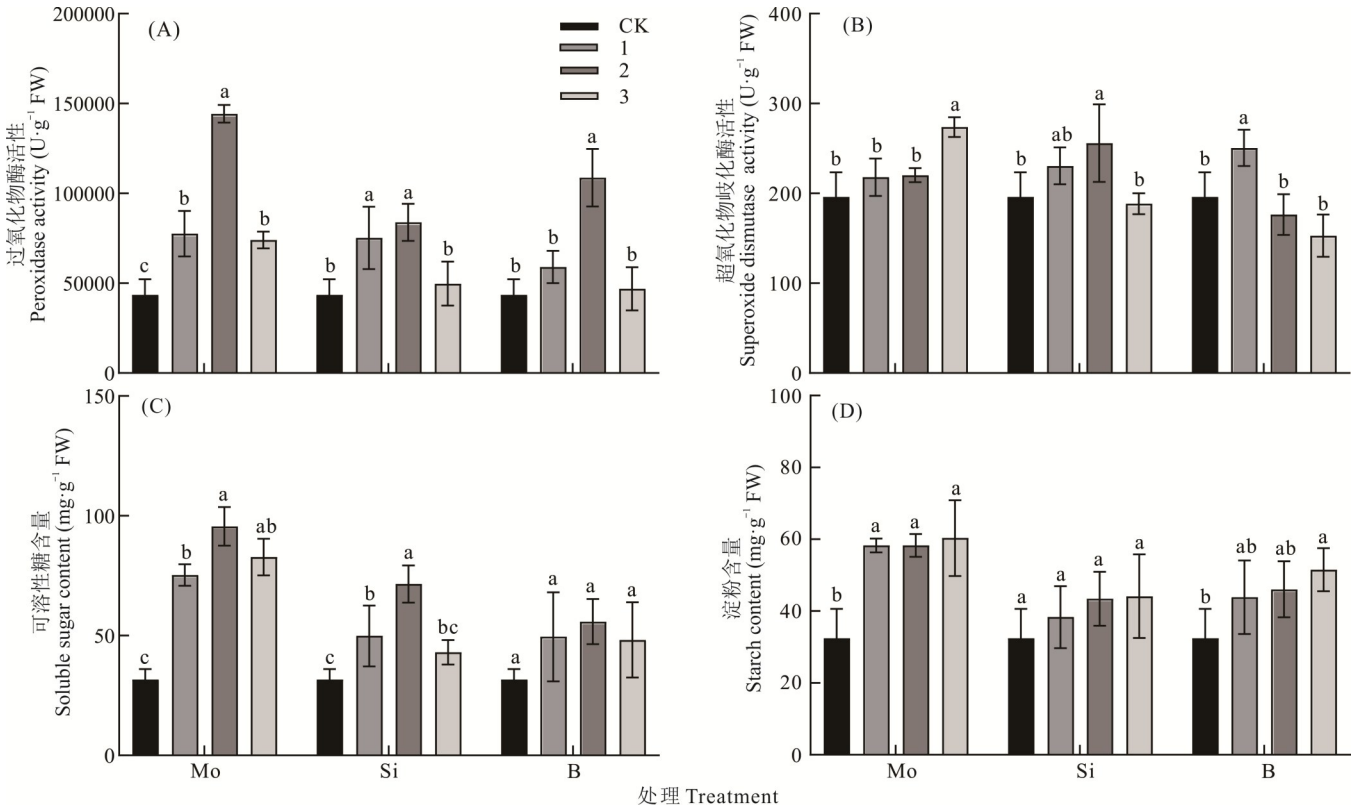


图4 钼硅硼添加对披碱草生理生化特性的影响

Fig. 4 Effects of molybdenum, silicon and boron applications on the physiological and biochemical traits of *E. breviaristatus*

2.4 各指标抗性系数的相关性分析

对同德短芒披碱草13个指标进行抗性系数计算,并对不同微量元素添加处理进行相关性分析。结果表明(图5),同德短芒披碱草各形态指标、叶绿素含量、抗氧化酶活性及光合指标间呈现相关关系。

钼添加后,植株根长、Chl a含量与POD活性呈极显著正相关关系($P<0.01$),可溶性糖、Chl b含量与POD活性呈显著正相关关系($P<0.05$)。Chl a、Chl b与可溶性糖含量呈极显著正相关关系($P<0.01$),SOD活性、G_s与T_r呈极显著正相关关系($P<0.01$),且SOD与G_s也呈显著正相关关系($P<0.05$,图5A)。

硅添加后,P_n、T_r、G_s与植株高度呈显著正相关关系($P<0.05$),P_n与植株根长呈极显著负相关关系($P<0.01$),T_r、G_s与植株根长呈显著负相关关系($P<0.05$)。SOD活性与植株高度呈显著负相关关系($P<0.05$),POD活性与植株根长呈显著正相关关系($P<0.05$,图5B)。

硼添加后,可溶性糖含量与植株根长呈显著正相关关系($P<0.05$),与植株高度和T_r呈显著负相关关系($P<0.05$),T_r与植株高度呈显著正相关关系($P<0.05$)。Chl a含量与地上部干重呈显著负相关关系($P<0.05$),与SOD活性呈显著正相关关系($P<0.05$,图5C)。

2.5 生长指标综合评价

2.5.1 主成分分析 对不同处理条件下同德短芒披碱草的13个指标标准化处理后进行主成分分析,结果如表3和图6所示。根据主成分分析结果,前4个主成分贡献率分别为34.466%、19.234%、15.446%和8.511%,累积贡献率达到77.657%,说明变量之间高度相关,能够代表变量信息,因此选择前4个主成分进行综合评价。在确定的综合指标中(表4),第1、3主成分中特征值较大的是可溶性糖含量、淀粉含量、光合能力、Chl b和根长,

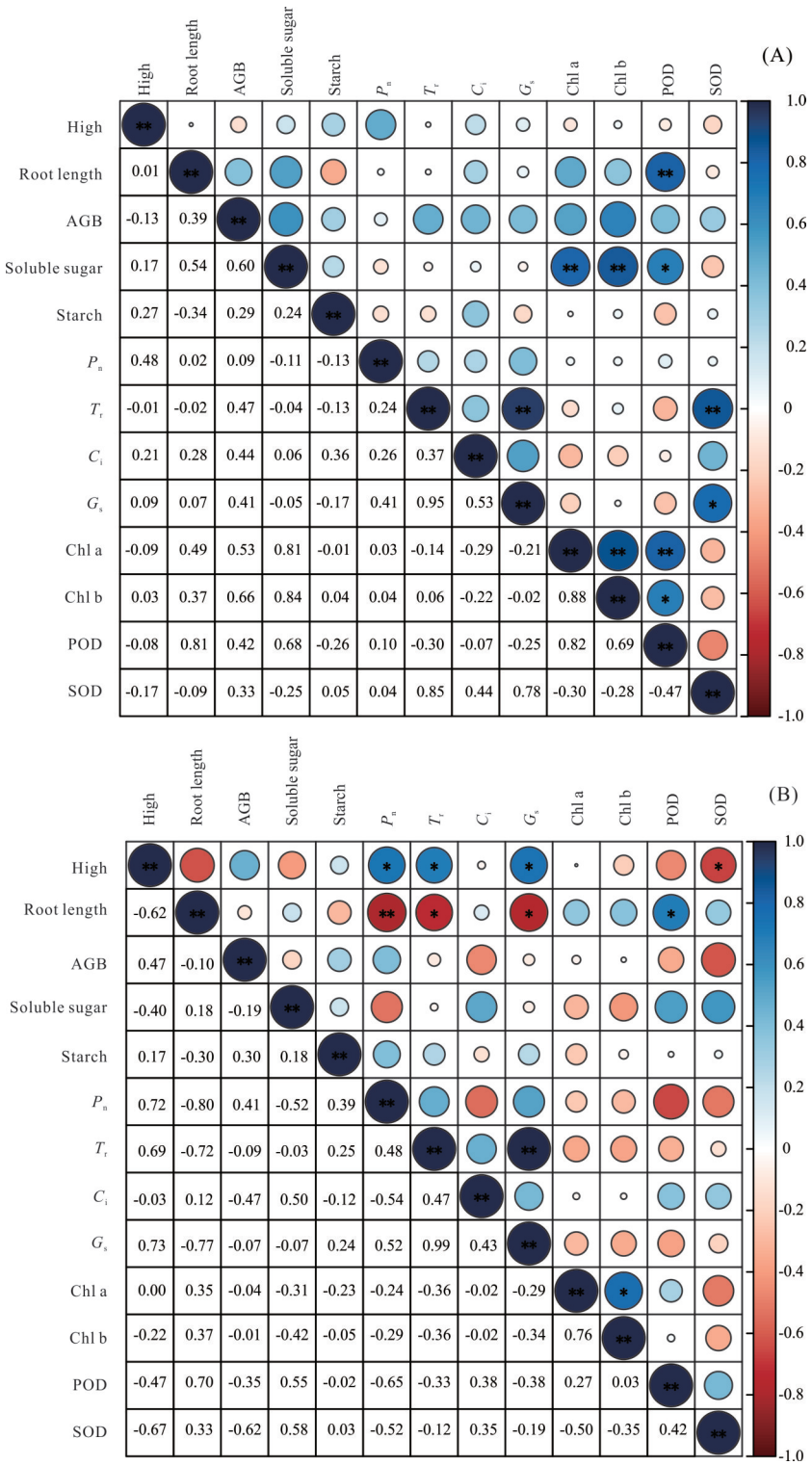
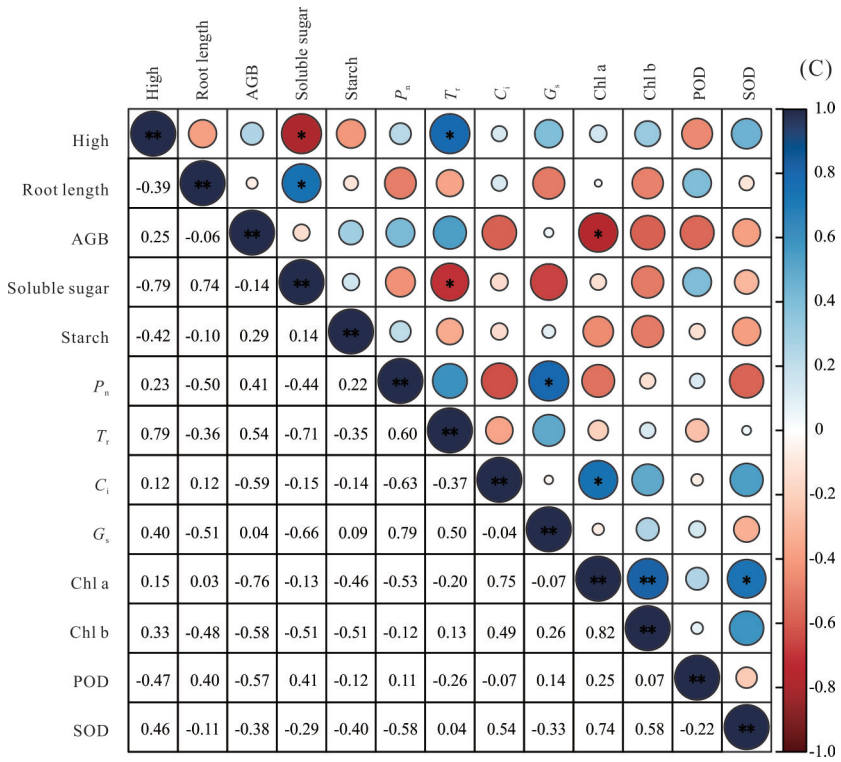


图 5　钼硅硼添加后披碱草光合生理指标抗性系数的相关性分析

Fig. 5　Correlation analysis of resistance coefficients of photosynthetic physiological indices of *E. breviaristatus* following molybdenum, silicon and boron applications

图 A、B、C 分别代表钼、硅和硼添加处理。High：株高；Root length：根长；AGB：地上部干重；Soluble sugar：可溶性糖；Starch：淀粉；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；Chl a：叶绿素 a；Chl b：叶绿素 b；POD：过氧化物酶；SOD：超氧化物歧化酶。图中的蓝色和红色分别代表两个变量之间的正相关和负相关。颜色越深，相关性越强。下同。*表示 $P<0.05$；**表示 $P<0.01$；***表示 $P<0.001$。Fig. A, B and C represents the molybdenum, silicon and boron addition treatment, respectively. High: Plant height; AGB: Dry weight of aboveground; P_n: Net photosynthetic rate; T_r: Transpiration rate; C_i: Inter-cellular CO_2 concentration; G_s: Stomatal conductance; Chl a: Chlorophyll a; Chl b: Chlorophyll b; POD: Peroxidase; SOD: Superoxide dismutase. The blue and red colours in the graph represent positive and negative correlation between two variables, respectively. The darker the colour, the stronger the correlation. The same below. * indicates $P<0.05$; ** indicates $P<0.01$; *** indicates $P<0.001$.



续图5 钼硅硼添加后披碱草光合生理指标抗性系数的相关性分析

Continued Fig. 5 Correlation analysis of resistance coefficients of photosynthetic physiological indices of *E. breviaristatus* following molybdenum, silicon and boron applications

表3 不同处理下同德短芒披碱草抗性的主成分分析

Table 3 Principal component analysis of resistance in *E. breviaristatus* under different treatments

编号 Number	特征根 Eigenvalue			主成分提取 Principal component extraction		
	特征根 Eigenvalue	方差解释率 Variance explained ratio (%)	累积贡献率 Cumulative contribution rate (%)	特征根 Eigenvalue	方差解释率 Variance explained ratio (%)	累积贡献率 Cumulative contribution rate (%)
1	4.481	34.466	34.466	4.481	34.466	34.466
2	2.500	19.234	53.700	2.500	19.234	53.700
3	2.008	15.446	69.147	2.008	15.446	69.146
4	1.106	8.511	77.658	1.106	8.511	77.657
5	0.724	5.570	83.228	—	—	—
6	0.662	5.090	88.318	—	—	—
7	0.468	3.598	91.915	—	—	—
8	0.428	3.292	95.207	—	—	—
9	0.256	1.972	97.179	—	—	—
10	0.191	1.471	98.650	—	—	—
11	0.085	0.655	99.305	—	—	—
12	0.064	0.492	99.797	—	—	—
13	0.026	0.203	100.000	—	—	—

分别为0.752、0.640、0.794、0.607和0.688，说明第1、2主成分反映的是植物光合能力的强弱和能量储存能力的大小。第3、4主成分中，特征值较大的是T_r、G_s和SOD活性，分别为0.713、0.666和0.750，说明第3、4主成分反映的是植物生理功能及其对环境的适应能力。

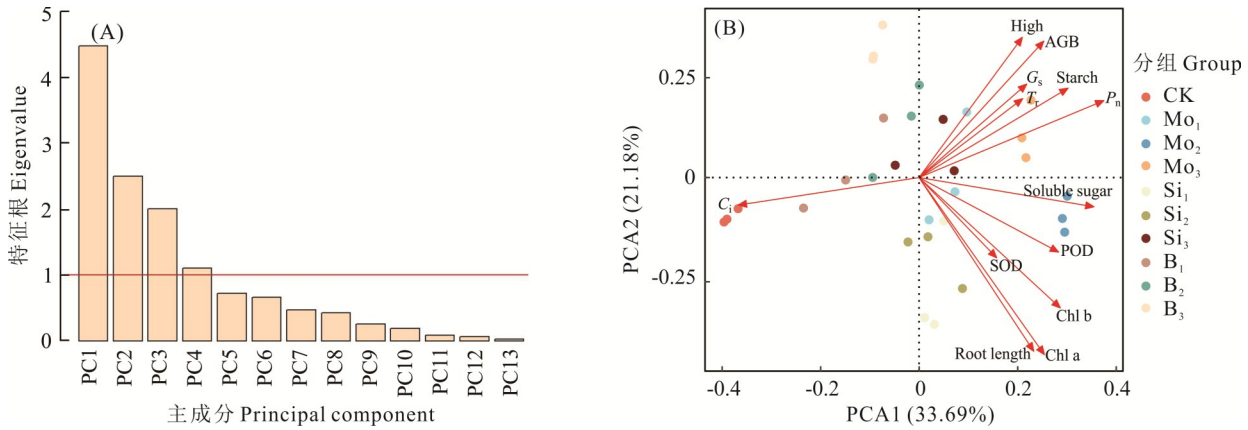


图 6　各主成分特征值及主成分分析

Fig. 6　Eigenvalues of principal components and principal component analysis (PCA)

表 4　综合评价主成分指标系数

Table 4　Coefficients of principal component indicators for comprehensive evaluation

指标 Index	载荷系数 Loading factor				共同度(公因子方差) Commonality (common factor variance)
	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	主成分 3 Principal component 3	主成分 4 Principal component 4	
可溶性糖含量 Soluble sugar content	0.752	0.116	−0.446	0.292	0.863
淀粉含量 Starch content	0.640	−0.354	−0.414	0.137	0.726
净光合速率 Net photosynthetic rate	0.794	−0.305	0.251	−0.333	0.898
胞间 CO_2 浓度 Inter-cellular CO_2 concentration	−0.777	0.109	0.154	0.269	0.712
叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content	0.607	0.517	0.294	−0.284	0.803
过氧化物酶活性 Peroxidase activity	0.600	0.295	−0.424	−0.065	0.631
株高 Plant height	0.444	−0.556	−0.020	−0.105	0.517
根长 Root length	0.493	0.688	−0.150	0.114	0.752
地上部干重 Dry weight of aboveground	0.536	−0.541	−0.375	0.177	0.752
叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content	0.538	0.701	0.291	−0.197	0.906
蒸腾速率 Transpiration rate	0.445	−0.313	0.713	0.279	0.882
气孔导度 Stomatal conductance	0.463	−0.370	0.666	0.011	0.795
超氧化物酶活性 Superoxide dismutase activity	0.334	0.318	0.291	0.750	0.859

2.5.2　隶属函数分析及综合评价　　采用隶属函数法对不同微量元素添加下同德短芒披碱草抗性进行综合评价，综合指标(CI)、隶属函数值(U)、综合评价值(D)及排序如表 5 所示，不同处理下综合评价值(D)为 0.317～0.701，其中数值较高的处理分别为 Mo_3、Mo_2、Si_2、Si_1，Mo_3 水平下最好。钼处理在提升氮代谢相关生理过程、抗氧化防御与气孔调控等多个环节上呈现出协同效应，关键抗逆性指标在综合评价中的得分被整体拉升，而硅、硼因功能单一性或负面效应评分次之。这一结果显示，钼在抗逆能力提升及生态修复实践中具有更高的应用潜力。

3　讨论

3.1　钼、硅、硼添加对植物形态结构的影响

牧草的形态可以直观反映其生长状况。本研究发现，钼、硅、硼 3 种微量元素添加均可显著提高同德短芒披碱草的株高，且在一定浓度范围内随浓度增加呈现先升高后降低的趋势。其中，Mo_2 水平提升效果最为明显。前

表5 不同处理下同德短芒披碱草的综合指标、隶属函数值、综合评价值及排序

Table 5 Comprehensive indexes, subordinate function values, comprehensive evaluation values and ranking of *E. breviaristatus* under different treatments

处理 Treatment	综合指标 Comprehensive indexes (CI)				隶属函数值 Subordinate function value (U)				综合评价值 Comprehensive evaluation ralues (D)	排序 Ranking
	CI_1	CI_2	CI_3	CI_4	U_1	U_2	U_3	U_4		
CK	−2.070	0.527	0.116	0.389	0.016	0.640	0.461	0.620	0.326	9
Mo_1	0.341	−0.040	−0.869	−0.283	0.659	0.500	0.191	0.442	0.503	6
Mo_2	1.593	0.513	−1.059	−0.089	0.993	0.637	0.139	0.493	0.680	2
Mo_3	1.172	−0.616	0.643	1.529	0.881	0.357	0.606	0.922	0.701	1
Si_1	0.166	1.485	0.437	−0.482	0.613	0.877	0.549	0.389	0.641	4
Si_2	0.150	1.055	0.654	0.570	0.608	0.771	0.609	0.668	0.655	3
Si_3	0.129	−0.347	1.395	−1.469	0.603	0.424	0.812	0.128	0.548	5
B_1	−0.818	−0.119	−0.304	0.970	0.350	0.480	0.346	0.774	0.428	7
B_2	−0.196	−0.693	−0.582	−0.567	0.516	0.338	0.270	0.367	0.407	8
B_3	−0.467	−1.764	−0.429	−0.567	0.444	0.073	0.312	0.367	0.317	10

人研究得出叶面喷施微量元素对小麦(*Triticum aestivum*)株高、穗数、穗长、穗重、千粒重等有促进作用[23]。同时,钼和硅添加对根长有显著影响,而硼添加无显著作用。这可能是因为钼参与了植物体内多种酶促反应,影响细胞分裂与伸长,进而促进根系生长[24];硅则可能通过改善细胞壁结构,增强根系的支撑和吸收能力[25]。不同元素对根长影响的差异,暗示了它们在调控植物地下部分生长方面具有不同机制。地上部干重的显著提升表明微量元素有助于光合产物在地上部分的积累。本研究还发现,微量元素添加后披碱草地上部干重得到显著提升,以Mo_2和B_3水平下提升效果较为显著。甄志高等[26]发现在施用适量氮、磷、钾肥的情况下,增施适量的钼肥和硼肥均能使花生(*Arachis hypogaea*)增产。Rana等[27]研究发现,Mo添加增加了小麦的生物量,本试验结果与其一致。其原因可能是植物吸收Mo后,体内酶活性升高,促进植物对营养元素的吸收利用,从而达到增产的效果[28−29]。

3.2 钼、硅、硼添加对植物光合能力的影响

叶片是植物最主要的光合场所,植物90%以上的干物质积累来自光合作用[30]。Imran等[31]和Wen等[32]的研究表明,施用钼肥可以通过提高冬小麦的叶绿素含量来影响P_n,还可以通过影响N的吸收转化来正向调节P_n。叶绿素作为植物光合作用的主要色素,含量越高越有利于植物进行光合作用[33]。前人的研究结果表明,紫花苜蓿(*Medicago sativa*)不同生长期施用不同浓度的硼肥能显著提升其叶绿素含量,其中返青、分枝和现蕾初期喷施硼肥能有效增加紫花苜蓿光合作用能力[34]。本研究得出,钼和硅添加显著影响了披碱草的光合能力,使净光合速率、气孔导度和蒸腾速率上升,同时降低胞间二氧化碳浓度。这可能是由于钼促进了光合关键酶的活性,硅增强了叶片的生理功能,二者均提升了光合能力从而提高了植物对光能和二氧化碳的利用效率。与之相符,钼和硅处理也促进了叶绿素a与b的积累,从而有利于光能的吸收与转化。相比之下,硼处理只在中高浓度时对P_n表现出显著影响,同时伴随Chl a含量的下降。这一结果提示,较高水平的硼可能对叶绿体结构稳定性或色素代谢产生扰动,进而影响光合色素的合成与稳定性。而硼处理下P_n的升高表明,其对光合作用的调控可能并非主要通过增强光捕获能力实现,而更可能与提升光合机构的运行效率相关。

3.3 钼、硅、硼添加对植物生理特征的影响

SOD负责清除超氧阴离子自由基,POD进一步分解过氧化氢,两者协同减少活性氧(reactive oxygen species, ROS)对细胞的氧化损伤,从而提升植物的抗逆性[35−36]。Wu等[37]研究表明,施用钼显著提高了钼低效和钼高效小麦品种的SOD、POD等抗氧化酶的活性,表明钼的施用增强了植物清除活性氧的能力。施硅通过调控抗氧化酶相关基因的表达提高了番茄(*Solanum lycopersicum*)酶促活性氧清除系统的运行速率,以此缓解过量积

累的活性氧，保护细胞膜的完整性[38]。活性氧水平的升高是激发抗氧化酶系统的主要信号，本研究得出，钼添加显著提升了披碱草叶片的POD和SOD活性，增强了植物的抗氧化能力，这可能是钼参与了抗氧化酶的合成或激活过程，帮助植物清除逆境下产生的活性氧（ROS），减轻氧化损伤。而硅和硼也能在特定浓度下提升抗氧化酶的活性，但效果相对较弱且具有浓度依赖性。

可溶性糖是渗透调节物质和能量来源，逆境下积累可增强细胞保水能力，而淀粉是碳水化合物的储存形式，其动态变化反映光合产物分配及能量储备效率，两者共同指示植物对胁迫的生理响应策略[39-40]。在渗透调节物质方面，钼和硅可显著提高披碱草叶片的可溶性糖含量，钼还能显著提升淀粉含量，而硼对二者的影响不显著。这表明不同元素在调节植物渗透调节物质积累上存在差异，可能是植物应对逆境时的不同生理策略，如硅可能更侧重于短期渗透调节，而钼兼顾短期渗透调节和长期能量储存。

3.4　钼、硅、硼微量元素添加下植物生长指标抗性系数的相关性及综合表现

本研究结果表明，不同微量元素添加使同德短芒披碱草各形态结构、光合能力、叶绿素含量及抗氧化酶活性指标间呈现复杂的相关关系。钼添加处理下，根系发育、叶绿素合成、抗氧化酶活性及光合气体交换之间存在协同促进作用，说明钼可能通过促进根系发育增强水分和养分吸收，进而提升叶绿素合成和光合效率。同时，钼激活抗氧化通路以清除活性氧，并与可溶性糖协同维持渗透平衡。SOD活性与G_s、T_r的正相关说明抗氧化系统与气孔调节的耦合，可能通过减少氧化损伤维持气孔功能，优化光合碳同化过程。硅添加处理下，光合指标与株高、根长呈现特定相关关系，说明硅可能通过优先分配资源至根系，促进地下部发育以增强抗逆性，但短期内牺牲了地上部的光合效率。同时，SOD活性与株高的负相关进一步支持硅的物理保护机制，通过增强细胞壁厚度来减少氧化损伤，降低对SOD的需求；而POD活性与根长的正相关则说明根系生长中仍依赖酶促抗氧化系统应对局部活性氧积累。研究结果反映出硅对地上和地下部分生长调控的权衡，同时抗氧化酶活性与植株形态结构的相关关系也体现了其独特的抗逆调节机制。在硼添加处理下，较高硼水平可能诱导硼胁迫，进而扰动植物的生理稳态。过量硼可能削弱叶绿体膜系统的稳定性并影响色素代谢平衡，从而促进光合色素降解。值得注意的是，尽管叶绿素含量下降，中高浓度硼处理下的P_n仍显著提升。这一看似矛盾的现象提示，硼可能同时通过两种路径影响光合作用：一是负面效应，即干扰色素代谢；二是潜在正面效应，即可能通过优化光合机构运行效率（如增强抗氧化酶活性）来提升碳同化能力。相关性结果进一步支持这一推断：可溶性糖含量与根长呈显著正相关关系，提示硼处理可能增强了根系的渗透调节与生长维持能力，但地上部生长受抑，暗示光合产物向地下部的分配比例提高，地上部碳供给相对不足，从而出现叶片黄化等表型。另一方面，Chl a含量与C_i及SOD活性的正相关关系表明，硼胁迫下气孔调节与抗氧化响应可能同步增强；当气孔限制与碳同化不匹配时，叶片可能出现能量利用受限与激发能过剩，诱发光氧化压力，进而加速叶绿素分解并强化“色素下降－光氧化压力”的反馈过程。

综合评价结果表明，钼处理在提升同德短芒披碱草抗逆能力方面表现最优，尤其是Mo_3水平。这是因为钼在氮代谢、光合调节和抗氧化防御等多方面的系统性调控作用，在适宜浓度下能最大程度优化植物的关键抗逆指标。相比之下，硅、硼因功能相对单一或存在负面效应，综合表现较差。这一结果为草地生态修复或牧草高产栽培管理中，同德短芒披碱草合理施用微量元素提供了重要参考，也为进一步研究青藏高原草地植物对微量元素的响应机制提供了前期基础。

4　结论

本研究结果表明，同德短芒披碱草添加钼[$(NH_4)_2MoO_4$]、硅（SiO_2NPs）和硼（H_3BO_3）3种微量元素后，从形态上均能显著提升株高（0.3 g·L^{-1}钼处理增幅达34.56%）和地上部干重，其中钼（0.3 g·L^{-1}）与硅（0.1 g·L^{-1}）还能显著促进根长（增幅分别为59.86%和79.53%），体现了元素对植株形态塑造的不同调控能力。从光合能力看，钼（0.3 g·L^{-1}的处理叶绿素a、b含量显著提升46.00%和54.32%）和硅（0.4 g·L^{-1}处理净光合速率增幅高达111.53%）表现出显著的促进作用；相反，硼在中高浓度时会抑制叶绿素a积累，揭示了不同元素对光合系统截然不同的影响机制。对于生理指标，钼（尤其是0.3 g·L^{-1}处理）表现出全面优势，能显著提升抗氧化酶活性（如

POD活性提升231.10%)和渗透调节物质积累(可溶性糖增幅为201.48%,淀粉含量亦显著增加);硅和硼对抗氧化酶活性和碳水化合物(如可溶性糖)的调控则表现出浓度依赖性且效果相对有限,反映出它们在抗氧化防御和渗透调节策略上的差异。综合主成分分析(前4个主成分累积贡献率为77.66%)与隶属函数法评价,不同元素处理下各指标呈现出复杂的相关关系,证实钼处理(特别是0.45 g·L^{-1},D=0.701)在提升植株整体抗逆能力上优势最为突出,其通过协同促进根系发育、增强光合能力(提升碳同化效率)和激活抗氧化通路发挥关键作用;硅、硼效果相对较弱。总体而言,本研究为理解微量元素对青藏高原高寒草地牧草同德短芒披碱草生长影响的作用机制提供了理论基础,但微量元素在植物体内的作用网络复杂,未来还需从分子层面深入解析其调控机制,为实际生产应用提供更精准的理论指导。

参考文献 References:

[1] Cueto H T, Jacobsen B H, Laursen A S D, *et al*. Dietary folate intake and fecund ability in two preconception cohorts. Human Reproduction, 2022, 37(4): 828-837.

[2] Noman M, Ahmed T, Wang J, *et al*. Micronutrient-microbiome interplay: a critical regulator of soil-plant health. Trends in Microbiology, 2024, 32(4): 319-320.

[3] Qin X M, Zhao Y Y, Wu S W, *et al*. Progress on improving plant stress resistance with molybdenum. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(6): 50-58.
秦晓明, 赵优优, 武松伟, 等. 钼提高植物抗逆性研究进展. 华中农业大学学报, 2023, 42(6): 50-58.

[4] Jia L, Liu C K, Hu C X, *et al*. Research progress of molybdenum nutrition for wheat. Shandong Agricultural Sciences, 2024, 56(6): 173-180.
贾琳, 刘春奎, 胡承孝, 等. 小麦钼营养研究进展. 山东农业科学, 2024, 56(6): 173-180.

[5] Epstein E. The anomaly of silicon in plant biology. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1994, 91(1): 11-17.

[6] Richmond K E, Sussman M. Got silicon the non-essential beneficial plant nutrient. Current Opinion in Plant Biology, 2003, 6(3): 268-272.

[7] Zhang Y, Shi Y, Gong H J, *et al*. Beneficial effects of silicon on photosynthesis of tomato seedlings under water stress. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17: 2151-2159.

[8] Cao G, Liang M Z. Boron-the essential microelement for plant in a balance culture system. Soils and Fertilizers, 2003(5): 54-56, 53.
曹恭, 梁鸣早. 硼——平衡栽培体系中植物必需的微量元素. 土壤肥料, 2003(5): 54-56, 53.

[9] Miao X R, Liu J Y, Zhang Q B, *et al*. Effects of spraying boron and molybdenum fertilizers on productivity and nutritional quality of alfalfa under drip irrigation. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2019, 31(10): 1583-1590.
苗晓茸, 刘俊英, 张前兵, 等. 喷施硼、钼肥对滴灌紫花苜蓿生产性能及营养品质的影响. 浙江农业学报, 2019, 31(10): 1583-1590.

[10] Li Y H. Region trial report on *Elymus breviaristatus* cv. Tongde. Qinghai Prataculture, 2007, 16(4): 9-14.
李永红. 同德短芒披碱草区域试验报告. 青海草业, 2007, 16(4): 9-14.

[11] Sun M D, Li Y H. Domestication and breeding of *Elymus breviaristatus* cv. Tongde. Qinghai Prataculture, 2008, 17(4): 2-7.
孙明德, 李永红. 同德短芒披碱草的驯化选育. 青海草业, 2008, 17(4): 2-7.

[12] Tian M, Tian Y C, Zeng D. Spatiotemporal evolution and mechanism of multi-dimensional coordination of urbanization at county level in the Qinghai-Tibet Plateau. Acta Geographica Sinica, 2024, 79(8): 1940-1960.
田明, 田一聪, 曾丹. 青藏高原县域城镇化多维协调时空演变及其机制. 地理学报, 2024, 79(8): 1940-1960.

[13] Lichtenthaler H K, Wellburn A R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. Biochemical Society Transactions, 1983, 11(5):591-592.

[14] Wang X F, Li Z H, Yuan J P, *et al*. The research between corn varieties canopy of NDVI and chlorophyll. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(16): 175-179.
王晓飞, 李志洪, 袁家萍, 等. 玉米品种冠层NDVI与叶绿素的关系. 中国农学通报, 2010, 26(16): 175-179.

[15] Dong H J, Wang X C, Yuan D Y, *et al*. Radial distribution differences of non-structural carbohydrates in stems of tree species of

different wood in a temperate forest. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46(6): 722－734.
董涵君, 王兴昌, 苑丹阳, 等. 温带不同材性树种树干非结构性碳水化合物的径向分配差异. 植物生态学报, 2022, 46(6): 722－734.

[16] Deng J M, Xiong G S, Yuan X L, *et al*. Differences in SOD, POD, CAT activities and MDA content and their responses to high temperature stress at peak flowering stage in cotton lines with different tolerance to high temperature. Cotton Science, 2010, 22(3): 242－247.
邓茳明, 熊格生, 袁小玲, 等. 棉花不同耐高温品系的SOD、POD、CAT活性和MDA含量差异及其对盛花期高温胁迫的响应. 棉花学报, 2010, 22(3): 242－247.

[17] Cartes P, McManus M, Wulff-Zottele C, *et al*. Differential superoxide dismutase expression in ryegrass cultivars in response to short-term aluminium stress. Plant and Soil, 2012, 350(1): 353－363.

[18] Li R Q, Wang Y X, Sun Y L, *et al*. Effects of salt stress on the growth, physiology, and biochemistry of five *Bromus inermis* varieties. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(1): 99－111.
李瑞强, 王玉祥, 孙玉兰, 等. 盐胁迫对5份无芒雀麦苗期生长和生理生化的影响及综合性评价. 草业学报, 2023, 32(1): 99－111.

[19] Cui J Q. Physiological responses and evaluation of drought resistance of three common greening plants on highway side slope to drought. Lhasa: Tibet University, 2021.
崔佳奇. 三种公路边坡常用绿化植物对干旱的生理响应及其抗旱性评价. 拉萨: 西藏大学, 2021.

[20] Xie Y X, Bao P, Guo Y, *et al*. Changes of physiological characteristics of cold resistance of *Hedychium* and evaluation during natural overwintering period. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2021, 29(5): 509－518.
谢雨萱, 包苹, 郭莺, 等. 自然越冬期姜花属植物生理指标变化及抗寒性评价. 热带亚热带植物学报, 2021, 29(5): 509－518.

[21] Wang H B, Fu Y Y, Yang H J, *et al*. Comprehensive evaluation of antioxidant ability of different genotypes of cotton in germination period based on subordinate function method. Cotton Science, 2021, 33(5): 393－403.
王洪博, 付媛媛, 杨鸿基, 等. 基于隶属函数法对不同基因型棉种萌发期抗氧化能力的综合评价. 棉花学报, 2021, 33(5): 393－403.

[22] Yang X L, Zhu L J, Feng Z Z. Hyperspectral characteristics and chlorophyll content estimation of winter wheat under ozone stress. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(8): 3213－3223.
杨熙来, 朱榴骏, 冯兆忠. 臭氧胁迫下冬小麦叶片高光谱特征和叶绿素含量估算. 生态学报, 2023, 43(8): 3213－3223.

[23] Ali E A. Effect of iron nutrient care sprayed on foliage at different physiological growth stages on yield and quality of some durum wheat (*Triticum durum* L.)varieties in sandy soil. Asian Journal of Crop Science, 2012, 4(4): 139－149.

[24] Magalon A, Fedor J G, Walburger A, *et al*. Molybdenum enzymes in bacteria and their maturation. Coordination Chemistry Reviews, 2011, 255(9/10): 1159－1178.

[25] Ma J F, Yamaji N. A cooperative system of silicon transport in plants. Trends in Plant Science, 2015, 20(7): 435－442.

[26] Zhen Z G, Duan Y, Wu F, *et al*. Effects of Zn, B, Mo and Ca fertilizer on the yield and quality of peanut. Soils and Fertilizers, 2005(3): 48－50.
甄志高, 段莹, 吴峰, 等. Zn、B、Mo、Ca肥对花生产量和品质的影响. 土壤肥料, 2005(3): 48－50.

[27] Rana M S, Sun X, Imran M, *et al*. Molybdenum-induced effects on leaf ultra-structure and rhizosphere phosphorus transformation in *Triticum aestivum* L. Plant Physiology and Biochemistry, 2020, 153: 20－29.

[28] Liu L, Xiao W, Ji M L, *et al*. Effects of molybdenum on nutrition, quality, and flavour compounds of strawberry (*Fragaria*×*ananassa* Duch. cv. Akihime) fruit. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(7): 1502－1512.

[29] Hadi F, Ali N, Fuller M P. Molybdenum (Mo) increases endogenous phenolics, proline and photosynthetic pigments and the phytoremediation potential of the industrially important plant *Ricinus communis* L. for removal of cadmium from contaminated soil. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(20): 20408－20430.

[30] Richards R A, Passioura J B. A breeding program to reduce the diameter of the major xylem vessel in the seminal roots of wheat and its effect on grain yield in rain-fed environments. Crop and Pasture Science, 1989, 40(5): 943－950.

[31] Imran M, Hu C X, Hussain S, *et al*. Molybdenum-induced effects on photosynthetic efficacy of winter wheat (*Triticum aestivum*) under different nitrogen sources are associated with nitrogen assimilation. Plant Physiology and Biochemistry, 2019, 141: 154－163.

[32] Wen X, Hu C X, Sun X C, *et al*. Research on the nitrogen transformation in rhizosphere of winter wheat (*Triticum aestivum*

L.) under molybdenum addition. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26: 2363－2374.

[33] Yang X D, Zhang H B, Wei T T, *et al*. Effects of different amounts of medium and microelement fertilizers on yield and quality of rice. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(15): 76－84.
杨晓丹, 张宏波, 魏婷婷, 等. 中微量元素肥料不同用量对水稻产量及品质的影响. 中国农学通报, 2023, 39(15): 76－84.

[34] Zong Y Z, Wang W Y, Han Q F, *et al*. Effects of different levels of boron fertilizer on alfalfa photosynthesis and source-sink translocation of soluble carbohydrate in alfalfa. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(4): 665－672.
宗毓铮, 王雯玥, 韩清芳, 等. 喷施硼肥对紫花苜蓿光合作用及可溶性糖源库间运转的影响. 作物学报, 2010, 36(4): 665－672.

[35] Ding Y L, Shi Y T, Yang S H. Molecular regulation of plant responses to environmental temperatures. Molecular Plant, 2020, 13(4): 544－564.

[36] Yan A, Wang Y, Tan S N, *et al*. Phytoremediation: a promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 359.

[37] Wu S W, Hu C X, Tan Q L, *et al*. Effects of molybdenum on water utilization, antioxidative defense system and osmotic adjustment ability in winter wheat (*Triticum aestivum*) under drought stress. Plant Physiology and Biochemistry, 2014, 83: 365－374.

[38] Yang R. Regulatory effects of exogenous silicon on low temperature tolerance of tomato seedlings. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2024.
杨然. 外源硅对番茄幼苗低温耐受性的调控效应研究. 晋中: 山西农业大学, 2024.

[39] Morgan J M. Osmoregulation and water stress in higher plants. Annual Review of Plant Physiology, 2003, 35(1): 299－319.

[40] Sun P, Duan X H. Effects of drought stress on soluble sugar and photosynthetic characteristics of *Catharanthus roseus* seedlings. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(8): 54－56.
孙萍, 段喜华. 干旱胁迫对长春花光合特性及可溶性糖的影响. 东北林业大学学报, 2010, 38(8): 54－56.