

# 不同时期喷施 NaHS 对盐碱地裸燕麦 农艺和产量性状的影响

刘建新,刘瑞瑞,刘秀丽,贾海燕,卜婷,李娜

(甘肃省陇东生物资源保护利用与生态修复重点实验室/陇东学院生命科学与技术学院,甘肃庆阳745000)

**摘要:**采用田间试验,分别在2020年裸燕麦不同生育期和2021年裸燕麦抽穗期喷施不同浓度 $H_2S$ 供体硫化钠(NaHS),分析 $H_2S$ 对盐碱胁迫下裸燕麦农艺和产量性状的影响。2020年试验结果表明:喷施时期对裸燕麦株高、单株粒数、单株产量、收获穗、千粒重和产量具有显著影响;NaHS浓度对株高和千粒重无显著影响,而对单株粒数、单株产量、收获穗和产量产生显著影响;二者的交互作用除对株高影响不显著外,对其余上述指标均具有显著影响。株高、单株粒数、单株产量、收获穗、千粒重和产量均以抽穗期喷施最高;单株粒数、单株产量、收获穗和产量随NaHS浓度增大整体呈先增加后下降的变化趋势,其中以喷施 $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHS的产量最高。单株粒数和单株产量分别以抽穗期喷施 $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $50\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHS最高;收获穗数和千粒重分别以抽穗期喷施 $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $50\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHS最大;产量以抽穗期喷施 $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHS最优。隶属函数综合分析显示:抽穗期喷施 $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHS提高裸燕麦农艺产量性状的效果最佳。2021年试验结果表明:抽穗期喷施不同浓度NaHS对裸燕麦株高、收获穗和千粒重的影响不显著;与喷施 $0\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHS相比,喷施 $25\sim 400\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHS可不同程度提高裸燕麦穗粒数、穗粒数和产量,其中喷施 $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHS的效果最显著。综上所述,抽穗期喷施 $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHS可有效促进裸燕麦穗粒数和穗粒数等农艺性状并提高产量。

**关键词:**裸燕麦;硫化氢;盐碱胁迫;农艺性状;产量

**中图分类号:**S512.6 **文献标志码:**A

## Effects of spraying NaHS at different periods on agronomic and yield traits of naked oats in saline-alkali land

LIU Jianxin, LIU Ruirui, LIU Xiuli, JIA Haiyan, BU Ting, LI Na

(Gansu Key Laboratory of Protection and Utilization for Biological Resources and Ecological Restoration/College of Life Sciences and Technology, Longdong University, Qingyang, Gansu 745000, China)

**Abstract:** Field experiments were conducted to spray different concentrations of  $H_2S$  donor sodium hydrosulfide (NaHS) at different growth periods of naked oats (*Avena nuda*) in 2020 and at the heading stage of naked oats in 2021 to examine the effects of  $H_2S$  on agronomic and yield traits of naked oats under salt-alkali stress. The 2020 test results showed that the spraying period had a significant effect on plant height, grain number per plant, yield per plant, harvested ears, 1000-grain weight and yield. The NaHS concentration had no significant effect on plant height and 1000-grain weight, but it significantly affected the grain numbers per plant, yield per plant, harvested ears and yield. Except for the insignificant influence on plant height, the interaction between the two had a significant influence on the other above-mentioned indexes. Plant height, grain numbers per plant, yield per plant, harvested ears, 1000-grain weight and yield were all sprayed at the heading stage to the highest. The grain numbers per plant, yield per plant, harvested ears and yields showed an overall trend of increasing first and then decreasing with the increase of NaHS concentration. Among them, the yield of  $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHS sprayed was the highest. The grain numbers per plant and the yield per plant were the highest when spraying  $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  and  $50\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS at the heading stage, respectively. The harvested ears and 1000-grain weight were the lar-

gest by spraying 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  and 50  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS at the heading stage, respectively. The best yield was to spray 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS at the heading stage. Comprehensive analysis of membership function showed: spraying 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS at the heading stage had the best effect on improving the agronomic yield traits of naked oats. The test results in 2021 showed that: spraying different concentrations of NaHS at the heading stage had no significant effects on the plant height, harvested ears and thousand-grain weight of naked oats. Compared with spraying 0  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS, spraying 25~400  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS increased spike boll numbers, spike grain numbers and the yield of naked oats to varying degrees. Among them, the effect of spraying 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS was the most significant. In summary, spraying 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS at the heading stage effectively promoted the agronomic traits and yield of naked oats, such as the spike boll numbers and spike grain numbers.

**Keywords:** naked oat; hydrogen sulfide; saline-alkali stress; agronomic traits; yield

土壤盐碱化是限制植物生长发育和农业产量提升的世界性环境因素之一。据统计,全球盐碱地面积约  $9.5 \times 10^8 \text{ hm}^2$ , 我国盐渍化土地约  $9.9 \times 10^7 \text{ hm}^2$ <sup>[1]</sup>。土壤盐化与碱化分别是以盐度和 pH 升高为主要特征的两种不同性质的非生物胁迫,我国内陆干旱和半干旱地区的盐碱地多为盐化和碱化伴生构成的复合类型,且成分复杂、程度各异<sup>[2]</sup>。盐碱胁迫导致土壤渗透势降低,引起植物水分亏缺<sup>[3]</sup>;诱导植物矿质营养失衡,造成离子毒害<sup>[4]</sup>,进而引发氧化胁迫,扰乱细胞代谢、抑制生长发育和降低产量<sup>[5]</sup>。因此,探讨消减植物盐碱伤害的技术途径对合理和有效利用盐碱地资源具有重要意义。

硫化氢( $\text{H}_2\text{S}$ )是近年来人们在植物体内发现的第 3 种气体信号,它参与植物生长发育过程和对环境胁迫响应的调节<sup>[6]</sup>。如  $\text{H}_2\text{S}$  促进植物不定根形成<sup>[7]</sup>,并增强植物抵御低温<sup>[8]</sup>、高温<sup>[9]</sup>、干旱<sup>[10]</sup>和重金属<sup>[11]</sup>等逆境的能力。盐胁迫下, $\text{H}_2\text{S}$  通过上调质膜  $\text{Na}^+/\text{H}^+$  转运系统及非选择性阳离子通道(NSCC)和盐超敏感(SOS)信号途径维持杨树(*Ipomoea aquatic*)和小麦(*Triticum aestivum*)  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  稳态<sup>[12-13]</sup>;通过 NO 介导提高盐胁迫大麦(*Hordeum vulgare*)质膜和液泡膜  $\text{H}^+$ -ATP 酶转录及液泡  $\text{Na}^+/\text{H}^+$  逆向转运体表达来提高胞质  $\text{K}^+/\text{Na}^+$ <sup>[14]</sup>;  $\text{H}_2\text{S}$  还可提高盐胁迫小麦的抗氧化能力<sup>[15]</sup>;降低垂丝海棠(*Malus halliana*) 在盐碱胁迫下的氧化损伤<sup>[16]</sup>;缓解 NaCl 对平邑甜茶(*Malus hupehensis*)<sup>[17]</sup>和盐碱胁迫对裸燕麦(*Avena nuda*)<sup>[18-19]</sup>生长的抑制。上述研究表明, $\text{H}_2\text{S}$  能够通过调控抗盐碱机制增强植物耐受盐碱胁迫的能力。然而,这些研究几乎都是以盆栽植物幼苗为材料,且多以单一 NaCl 胁迫为对象,缺乏对盐碱地作物在不同生育期施用  $\text{H}_2\text{S}$  对农艺和产量性状影响的研究。裸燕麦是我国北方广泛种植的禾本科燕麦属一年生粮饲兼用型作物,其籽粒富含蛋白质、不饱和脂肪酸、 $\beta$ -葡聚糖和黄酮

等营养保健成分<sup>[20]</sup>。因裸燕麦具有较强耐盐抗旱特性,诸如盐渍化等边际化土地常首选种植裸燕麦,故盐碱胁迫成为裸燕麦生长发育和产量提升的重要限制因子<sup>[21]</sup>。为明确  $\text{H}_2\text{S}$  缓解裸燕麦盐碱胁迫的最佳施用时期和最适宜施用浓度,本试验采用大田试验,以硫化钠(NaHS)为  $\text{H}_2\text{S}$  供体,探讨喷施时期和 NaHS 浓度对盐碱胁迫下裸燕麦产量和农艺性状的影响,以期利用  $\text{H}_2\text{S}$  缓解裸燕麦盐碱胁迫伤害提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验在甘肃省定西市通渭县什川镇阳坡村( $104^{\circ}56'E, 35^{\circ}7'N$ )进行。海拔 1 889 m,日照时数 1 900~2 100 h;年均气温  $7.4 \sim 9.8^{\circ}\text{C}$ ,  $>10^{\circ}\text{C}$  有效积温  $2540^{\circ}\text{C}$ ;无霜期 140~170 d,降水量 350~500 mm,是典型干旱雨养农业区。土地类型为坡地梯田,土壤类型为黄绵土。土壤 pH 约 8.33,土壤水溶性盐含量为  $2.88 \sim 2.91 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,属轻盐碱土。

### 1.2 试验材料与设计

供试裸燕麦品种为‘定莜 9 号’,由甘肃省定西市农业科学研究院选育,具有丰产和抗旱特性,是甘肃省主栽品种。NaHS 购自山东西亚化学股份有限公司。

试验于 2020—2021 年进行,2020 年试验确定 NaHS 的最佳施用时期和适宜浓度;2021 年试验进一步验证最佳时期施用不同浓度 NaHS 的效应。

2020 年试验:2019 年 10 月用立盈牌多功能微耕机(日照市立盈机械制造有限公司,山东)翻耕前茬小麦地。2020 年播种前结合整地,施入农家肥  $11\ 250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、尿素  $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、过磷酸钙  $375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和磷酸二铵  $94 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。4 月 15 日采取人工撒播机耕翻种,播种量  $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,种子播前用 50%多菌灵可湿性粉剂拌种 12 h 以预防黑穗病,

拌药量为种子质量的 0.2%。人工起垅分区,小区面积  $15\text{ m}^2$  ( $3\text{ m}\times 5\text{ m}$ ),区距 30 cm,周围设保护行。试验采用双因素试验设计:喷施时期设幼苗期(V1)、拔节期(V2)、抽穗期(V3)、开花期(V4)和灌浆期(V5)5个水平;NaHS 浓度设 0、25、50、100、200、400  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  6个水平,共 30 个处理。随机区组排列,重复 3 次。用背负式电动喷雾器(喜丰牌 SWBD-20L 型,台州市优佳电动喷雾器厂)分别在裸燕麦 5 个不同生育时期喷施不同浓度 NaHS (含 0.01% Tween-80),早晚各喷施 1 次,连续喷 3 d,每个小区喷施量约 830 mL。2020 年 8 月 31 日人工镰刀收割。每个小区收  $1\text{ m}^2$  进行室内考种:统计收获穗数;随机选 10 株测量株高;测定 30 株的穗粒数、产量和千粒重。以小区为单位收获,晒干后脱粒,将脱粒后的籽粒自然风干除杂、称取产量。

2021 年试验:2020 年 10 月机耕整翻前茬马铃薯地;2021 年 4 月 20 日整地时施入牲畜粪  $18\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、尿素  $36\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、过磷酸钙  $72\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和磷酸二铵  $72\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。4 月 22 日采取人工撒种机耕翻播,播种量  $66\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;播前用种子质量 0.2% 的 50% 多菌灵可湿性粉剂拌种。播种后人工起垅分区,小区面积  $25\text{ m}^2$  ( $10.0\text{ m}\times 2.5\text{ m}$ ),区距 30 cm,周围设保护行。苗期人工除草,常规管理。在裸燕麦抽穗期(7 月 11 日)时,叶面喷施 0、25、50、100、200、400  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS (添加 0.01% Tween-80);早晚各喷 1 次,连喷 3 d;每小区每次喷施量 3.75 L。重复 4 次,随机区组排列。2021 年 8 月 18 日开始人工镰刀收割,每小区收获  $1\text{ m}^2$  用于室内考种,测量株高,统计收获穗数、穗铃数、穗粒数和千粒重。以小区为单位收获、脱粒,统计产量。

### 1.3 数据统计与分析

运用灰色关联分析计算产量与农艺性状间的关联度。以农艺性状作为比较数列( $X_i$ ),将产量设为参考数列( $X_0$ ),进行灰色关联分析<sup>[22]</sup>。采用 Excel 2010 整理数据,对计数数据进行平方根转换后差异显著性分析,所有数据差异显著性由 SPSS 20.0 软件方差分析后 Duncan 法测验(显著水平  $P=0.05$ ),结果用平均值 $\pm$ 标准误表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同时期喷施 NaHS 对盐碱地裸燕麦株高的影响

在裸燕麦不同时期喷施 NaHS 的结果表明,V2-V5 期喷施 NaHS 比 V1 期喷施能一定程度增加裸燕麦株高(表 1),但只有在喷施 0  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS

时 V2 和 V3 期、喷施 25  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS 时 V2、V3 和 V4 期及喷施 400  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS 时 V2 期的株高达到显著水平;喷施不同浓度 NaHS 之间的株高无显著差异。

### 2.2 不同时期喷施 NaHS 对盐碱地裸燕麦产量性状的影响

从表 2 可见,NaHS 浓度为 0  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  时,V5 期喷施 NaHS 的单株粒数显著高于 V1 期;100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS 时 V3 期喷施的单株粒数显著高于其他各期;200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和 400  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS 时 V3 期喷施的单株粒数显著高于 V2 和 V4 期。与喷施 0  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS 相比,V1~V5 期喷施 25~400  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS 后单株粒数都有所增加,V1 和 V3 期喷施 50~400  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、V2 和 V5 期喷施 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  及 V4 期喷施 25 和 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS 的差异显著,其中 V3 期喷施 100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS 的单株粒数最大。

NaHS 浓度为 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  时 V3 和 V4 期喷施的裸燕麦单株产量显著高于其他时期喷施;100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS 时 V3 期喷施的单株产量最高;NaHS 浓度为 0、25  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和 400  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  时不同时期喷施的单株产量无显著差异。与喷施 0  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS 相比,V1 期喷施 100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、V2 期喷施 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、V3 期喷施 50~200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  及 V4 期喷施 50 和 100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS 显著提高单株产量,其中 V3 期喷施 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS 的单株产量最高(表 2)。

NaHS 浓度为 0  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  时不同时期喷施的裸燕麦收获穗数无显著差异;25  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS 时 V2、V3 和 V4 期喷施的收获穗数显著高于 V1 和 V5 期;50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS 时 V3 期喷施的收获穗数显著高于 V1 期;100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS 时 V2、V4 和 V5 期喷施的收获穗数显著高于 V1 期;200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS 时 V2、V3 和 V4 期喷施的收获穗数显著高于 V1 期;400  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS 时 V3 期喷施的收获穗数最高。V1 期喷施 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS 的收获穗数最高;V2 期喷施 100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、V3 期喷施 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和 400  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS 的收获穗数显著高于其他浓度 NaHS;V5 期喷施 50~400  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS 的收获穗数高于 0  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和 25  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS(表 2),其中 V3 期喷施 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS 的收获穗最优。

NaHS 浓度为 25、50、200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和 400  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  时不同时期喷施的千粒重无显著差异;0  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS 时 V2 期喷施和 100  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  NaHS 时

表 1 不同时期喷施 NaHS 对盐碱地裸燕麦株高的影响/cm

Table 1 Effects of spraying NaHS in different periods on plant height of naked oats in saline-alkali land

时期 Period	NaHS 浓度 NaHS concentrations/( $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )					
	0	25	50	100	200	400
V1	127.0±2.0bA	125.3±2.7cA	129.3±2.0aA	129.3±0.9aA	129.0±2.0aA	126.0±2.5bA
V2	134.7±1.8aA	133.7±0.9abA	133.0±0.6aA	129.7±2.3aA	132.0±2.1aA	134.3±2.3aA
V3	136.0±1.2aA	135.0±2.1aA	133.3±2.3aA	130.0±0.6aA	132.0±3.1aA	130.7±0.7abA
V4	131.3±1.8abA	133.3±1.9abA	134.7±1.8aA	132.3±1.9aA	128.7±2.7aA	131.3±1.8abA
V5	130.3±2.7abA	127.0±2.9bcA	133.7±1.5aA	133.7±1.8aA	129.7±1.2aA	127.0±3.2bA

注:同列不同小写字母表示不同喷施时期间差异显著( $P<0.05$ ),同行不同大写字母表示 NaHS 浓度间差异显著( $P<0.05$ );V1、V2、V3、V4、V5 分别表示幼苗期、拔节期、抽穗期、开花期和灌浆期,下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at different periods ( $P<0.05$ ). Different capital letters after the same row indicate significant differences in NaHS concentrations ( $P<0.05$ ). V1, V2, V3, V4, V5 represent seedling stage, jointing stage, heading stage, flowering stage and filling stage, respectively, the same below.

表 2 不同时期喷施 NaHS 对盐碱地裸燕麦产量性状的影响

Table 2 Effects of spraying NaHS in different periods on yield traits of naked oats in saline-alkali land

性状 Traits	时期 Period	NaHS 浓度 NaHS concentrations/( $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )					
		0	25	50	100	200	400
单株粒数 Grain numbers per plant	V1	20.1±0.2bB	24.3±1.4aAB	27.9±2.3aA	26.3±2.6bA	27.1±2.5abA	29.4±0.7abA
	V2	24.1±1.3abB	26.6±1.5aAB	32.2±1.1aA	28.8±0.4bAB	26.3±2.6bB	23.8±0.5bcB
	V3	22.9±2.8abD	25.2±0.1aCD	30.9±1.4aBC	37.2±0.6aA	32.4±1.6aAB	29.7±0.7aBC
	V4	22.1±0.5abC	29.4±1.6aAB	31.4±1.1aA	27.1±2.5bABC	25.5±2.5bBC	23.2±0.3cC
	V5	25.8±0.6aB	25.3±0.9aB	33.2±2.2aA	29.4±0.6bAB	29.4±2.7abAB	27.8±2.6abcAB
单株产量/g Yield per plant	V1	0.370±0.004aB	0.418±0.032aAB	0.405±0.028bB	0.464±0.021abA	0.410±0.003bB	0.396±0.019aB
	V2	0.373±0.011aB	0.386±0.003aB	0.401±0.007bAB	0.395±0.006cB	0.451±0.006abA	0.399±0.033aAB
	V3	0.371±0.007aB	0.398±0.002aB	0.489±0.012aA	0.476±0.015aA	0.463±0.011aA	0.403±0.003aB
	V4	0.400±0.007aB	0.430±0.025 aAB	0.461±0.026aA	0.468±0.014 abA	0.411±0.002abAB	0.397±0.011aB
	V5	0.399±0.006aA	0.423±0.023aA	0.384±0.015bA	0.417±0.013 bcA	0.423±0.012abA	0.406±0.014aA
收获穗/穗 Harvested ears	V1	305.5±4.1aAB	290.5±17.4bB	303.8±12.4bAB	302.5±14.8cAB	324.2±2.5cA	315.9±3.8bA
	V2	312.9±6.4aB	315.5±7.1aB	313.9±3.2abB	353.9±4.4aA	353.9±6.9abA	315.5±9.0bB
	V3	316.2±6.8aC	327.9±1.7aBC	334.5±3.8aBC	319.9±1.2bcC	374.2±6.4aA	348.5±2.0aAB
	V4	318.5±5.0aB	324.5±5.2aB	329.9±7.7abAB	332.2±12.3abAB	356.5±8.4abA	331.2±3.5abAB
	V5	314.2±3.6aAB	297.5±8.1bB	325.5±7.6abA	337.2±7.0abA	336.2±3.6bcA	330.9±10.5abA
千粒重/g 1000-grain weight	V1	14.57±0.15bA	14.97±0.12aA	15.73±0.32aA	14.80±0.17bA	15.40±0.35aA	15.20±0.87aA
	V2	16.37±0.72aA	15.07±0.37aAB	15.57±0.12aAB	14.63±1.33bB	15.23±0.74aAB	15.23±0.15aAB
	V3	15.90±0.28abA	16.50±0.38aA	16.80±0.29aA	15.77±0.27abA	15.90±0.79aA	16.52±0.49aA
	V4	14.47±0.09bB	15.27±0.32aAB	16.17±0.15aA	16.50±0.06aA	16.37±0.68aA	14.93±0.12aAB
	V5	14.90±0.10abB	15.27±0.26aAB	15.73±0.22aAB	16.77±0.32aA	16.10±0.23aAB	16.20±0.12aAB

V4、V5 期喷施的千粒重最大。V1 和 V3 期喷施不同浓度 NaHS 的千粒重无显著差异;V2 期喷施 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 的千粒重低于喷施 0  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS;V4 和 V5 期喷施 25~400 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 的千粒重不同程度高于喷施 0  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS。其中, V3 期喷施 50  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 的千粒重最大(表 2)。

### 2.3 不同时期喷施 NaHS 对盐碱地裸燕麦产量的影响

由表 3 可知,在 V2~V5 期喷施不同浓度 NaHS 都比 V1 期喷施能够不同程度提高裸燕麦产量,总体看 V3 和 V4 期喷施 NaHS 的产量最优。V1 期喷施 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 的产量显著高于 0、25、50  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和 400  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ;V2 期喷施 200  $\mu\text{mol} \cdot$

$\text{L}^{-1}$  NaHS 的产量显著高于其他浓度 NaHS;V3 期喷施 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 的产量显著高于 0、25  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ;V4 期喷施 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 的产量显著高于 0、25  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和 400  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ;V5 期喷施 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 的产量显著高于 0、25  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和 50  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS。由此可见,V3 期喷施 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 提高裸燕麦产量的效果最佳。

### 2.4 喷施时期和 NaHS 浓度对盐碱地裸燕麦农艺和产量性状的双因素方差分析和多重比较

双因素方差分析(表 4)表明,喷施时期对裸燕麦株高、单株粒数、单株产量、收获穗、千粒重和小区产量均有显著影响;NaHS 浓度对株高和千粒重

无显著影响,对单株粒数、单株产量、收获穗和小区产量有显著影响;二者的交互作用对株高影响不显著,对单株粒数、单株产量、收获穗、千粒重和小区产量影响显著。多重比较结果(表5)显示:株高、单株粒数、单株产量、收获穗、千粒重和小区产量均以抽穗期喷施最高。NaHS浓度为 $50\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的株高、单株粒数和千粒重最大; $100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的单株产量和 $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的收获穗和小区产量最优。

## 2.5 不同时期喷施 NaHS 对盐碱地裸燕麦农艺和产量性状的相关分析和灰色关联分析

相关分析(表6)显示:裸燕麦的株高与千粒重显著正相关;单株粒数与单株产量、小区产量极显著正相关;单株产量与单株粒数、小区产量极显著

正相关;收获穗与千粒重、小区产量极显著正相关;千粒重与株高显著正相关、与收获穗和小区产量极显著正相关;小区产量与单株粒数、单株产量、收获穗和千粒重极显著正相关。

通过灰色关联分析(表7)可以看出,裸燕麦产量与各性状关联度最高的是单株产量,关联度为0.841;其次是收获穗,关联度为0.777;第3位为单株粒数,关联度为0.755;第4位为千粒重,关联度为0.738;第5位为株高,关联度仅为0.695。因此,在甘肃省中部盐碱地裸燕麦不同时期喷施 $\text{H}_2\text{S}$ 影响产量的主要是单株产量、收获穗和单株粒重,千粒重和株高的影响较小。

表3 不同时期喷施 NaHS 对盐碱地裸燕麦产量的影响

Table 3 Effects of spraying NaHS in different periods on yield of naked oats in saline-alkali land

时期 Period	NaHS 浓度 NaHS concentrations/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$					
	0	25	50	100	200	400
V1	1.70±0.02bC	1.80±0.05bBC	1.84±0.10bBC	2.09±0.01bA	1.99±0.02dAB	1.88±0.11bBC
V2	1.75±0.06abC	1.82±0.03bC	1.89±0.05bC	2.09±0.01bB	2.39±0.06bA	1.89±0.11bC
V3	1.76±0.02abE	1.96±0.02abDE	2.45±0.03aAB	2.28±0.07abBC	2.60±0.05aA	2.11±0.02aCD
V4	1.91±0.02aC	2.09±0.12aBC	2.28±0.12aAB	2.33±0.03aA	2.20±0.06cAB	1.97±0.06abC
V5	1.88±0.05abB	1.88±0.05bB	1.87±0.03bB	2.10±0.03bA	2.13±0.06cdA	2.01±0.05abAB

表4 喷施时期和 NaHS 浓度对盐碱地裸燕麦农艺和产量性状的双因素方差分析

Table 4 Two-way analysis of variance of spraying period and NaHS concentration on agronomic and yield traits of naked oats in saline-alkali land

因子 Factor	株高 Plant height /cm	单株粒数/粒 Grain numbers per plant	单株产量 Yield per plant/g	收获穗/穗 Harvested ears	千粒重 1000-grain weight/g	小区产量 Plot yield / $(\text{kg}\cdot 15\text{m}^{-2})$
喷施时期 Spraying period	7.099*	5.047*	4.516*	13.197*	5.413*	26.991*
NaHS 浓度 NaHS Concentration	1.399 <sup>ns</sup>	14.765*	10.008*	15.351*	1.779 <sup>ns</sup>	41.872*
交互作用 Interaction	1.196 <sup>ns</sup>	2.302*	2.644*	1.962*	1.805*	4.784*

注: \* 表示 0.05 水平差异显著, ns 表示差异不显著。

Note: \* represented significance at 0.05 level, and ns represented no significance.

表5 喷施时期和 NaHS 浓度对盐碱地裸燕麦农艺和产量性状的多重比较

Table 5 Multiple comparisons of spraying period and NaHS concentration on agronomic and yield traits of naked oats in saline-alkali land

项目 Item	株高 Plant height /cm	单株粒数/粒 Grain numbers per plant	单株产量 Yield per plant/g	收获穗/穗 Harvested ears	千粒重 1000-grain weight/g	小区产量 Plot yield / $(\text{kg}\cdot 15\text{m}^{-2})$
喷施时间 Spraying periods	幼苗期 Seedling stage	127.7c	25.9c	0.411bc	307.1c	15.11c
	拔节期 Jointing stage	132.9a	27.0bc	0.401c	327.6ab	15.35bc
	抽穗期 Heading stage	132.8a	29.7a	0.433a	336.9a	16.23a
	开花期 Flowering stage	131.9ab	26.5c	0.428ab	332.1ab	15.62bc
	灌浆期 Filling stage	130.2b	28.5ab	0.408bc	323.6b	15.83ab
NaHS 浓度 CConcentration / $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	0	131.9ab	23.0d	0.383d	313.5cd	15.24b
	25	130.9ab	26.1c	0.411bc	311.2d	15.41ab
	50	132.8a	31.1a	0.428ab	321.5bc	16.00a
	100	131.0ab	29.8ab	0.444a	329.1b	15.69ab
	200	130.3ab	28.1bc	0.431ab	349.0a	15.80ab
400	129.9b	26.8c	0.400cd	328.4b	15.62ab	

注: 同列不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences ( $P<0.05$ ).

表 6 不同时期喷施 NaHS 对盐碱地裸燕麦农艺和产量性状影响的相关分析

Table 6 Correlation analysis of the effects of spraying NaHS in different periods on agronomic and yield traits of naked oats in saline-alkali land

指标 Index	株高 Plant height	单株粒数 Grain numbers per plant	单株产量 Yield per plant	收获穗 Harvested ears	千粒重 1000-grain weight	小区产量 Plot yield
株高 Plant height	1.000	0.207	0.035	0.105	0.225 *	0.097
单株粒数 Grain numbers per plant	0.207	1.000	0.456 **	0.129	0.149	0.438 **
单株产量 Yield per plant	0.035	0.456 **	1.000	0.015	0.124	0.804 **
收获穗 Harvested ears	0.105	0.129	0.015	1.000	0.288 **	0.603 **
千粒重 1000-grain weight	0.225 *	0.149	0.124	0.288 **	1.000	0.272 **
小区产量 Plot yield	0.097	0.438 **	0.804 **	0.603 **	0.272 **	1.000

注: \* 和 \*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著和极显著相关。

Note: \* and \*\* indicate significant and extremely significant correlations at the levels of 0.05 and 0.01, respectively.

表 7 不同时期喷施 NaHS 条件下盐碱地裸燕麦农艺性状与产量的灰色关联度及排序

Table 7 Grey correlation degree and ranking of agronomic traits and yield of naked oats in saline-alkali land under the condition of spraying NaHS at different periods

指标 Index	株高 Plant height	单株粒数 Grain numbers per plant	单株产量 Yield per plant	收获穗 Harvested ears	千粒重 1000-grain weight
关联度 Correlation degree	0.695	0.755	0.841	0.777	0.738
关联序 Correlative order	5	3	1	2	4

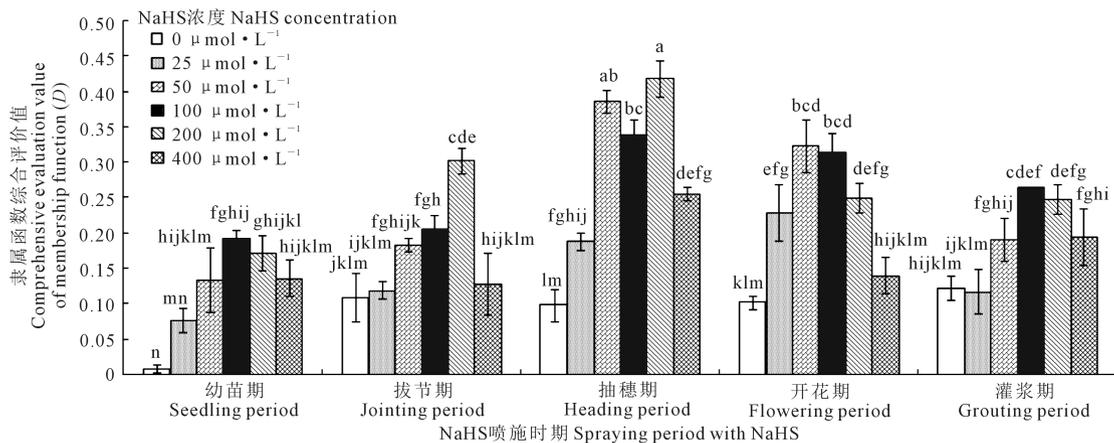
## 2.6 不同时期喷施 NaHS 对盐碱地裸燕麦农艺和产量性状影响的综合评价

裸燕麦农艺和产量性状间存在显著相关关系,说明存在信息重叠,适合进行主成分分析。根据碎石图变化提取 4 个主成分,这 4 个主成分的方差贡献率分别为 41.25%、20.12%、17.03% 和 11.96%,累计贡献率达 90.36%。以这 4 个主成分得分值进行隶属函数分析<sup>[23]</sup>,并以方差贡献率计算权重,得到隶属函数综合评价值( $D$ )。从图 1 可见,喷施时期的  $D$  均值表现为抽穗期(0.282) > 开花期(0.227) > 灌浆期(0.190) > 拔节期(0.176) > 幼苗期(0.121)。方差分析表明,抽穗期  $D$  值显著高于开花期,开花期  $D$  值显著高于灌浆期和拔节期,灌浆期和拔节期  $D$  值显著高于幼苗期,而灌浆期和拔节期  $D$  值差异不显著。NaHS 浓度间  $D$  均值呈现:200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  (0.279) > 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  (0.264) > 50  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  (0.245) > 400  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  (0.172) > 25  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  (0.147) > 0  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  (0.089)。200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 间  $D$  值无显著差异,而显著高于 400、50、25  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和 0  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,其中 50  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  之间及 400  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和 25  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  之间  $D$  值差异不显著,但均显著高

于 0  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。喷施时期和 NaHS 浓度交互作用对  $D$  值影响显著( $F$  值 3.467\*),以抽穗期喷施 50~200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 的  $D$  值最大(图 1)。

## 2.7 抽穗期喷施 NaHS 对盐碱地裸燕麦农艺和产量性状的影响

2020 年试验结果表明,抽穗期喷施 NaHS 提高裸燕麦农艺和产量性状的效果最佳。为进一步验证抽穗期喷施不同浓度 NaHS 对盐碱地裸燕麦农艺和产量性状的调节效应,2021 年试验结果(表 8)显示:与喷施 0  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 相比,喷施 25~400  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 虽不同程度提高了裸燕麦的株高和收获穗,但差异都没有统计学意义;不同浓度 NaHS 处理的千粒重也无显著差异;喷施 25、50、100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和 400  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 的穗铃数差异仍不显著,但喷施 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 的穗铃数显著提高了 21.95%;喷施 25  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和 400  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 的穗粒数无显著差异,喷施 50、100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 的穗粒数分别提高了 15.59%、16.30% 和 23.56%,差异显著;喷施 25、50 和 400  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 的小区产量差异不显著,喷施 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 的小区产量分别显著提高了 13.86% 和 20.05%。



注:不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments at  $P<0.05$ .

图 1 不同时期喷施 NaHS 对盐碱地裸燕麦隶属函数综合评价价值 ( $D$ ) 的影响

Fig.1 Effect of spraying NaHS in different periods on comprehensive evaluation value ( $D$ ) of membership function of naked oats in saline-alkali land

表 8 抽穗期喷施不同浓度 NaHS 对盐碱地裸燕麦农艺和产量性状的影响

Table 8 Effects of spraying different concentrations of NaHS at heading stage on agronomic and yield traits of naked oats in saline alkali land

NaHS 浓度 Concentration / $(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	株高 Plant height/cm	收获穗/穗 Harvested ears	穗铃数/铃 Spike boll numbers	穗粒数/粒 Spike grain numbers	千粒重 1000-grain weight/g	小区产量 Plot yield / $(\text{kg} \cdot 25\text{m}^{-2})$
0	77.7±5.4a	363.2±9.3a	6972.0±160.9b	9725.0±170.1c	15.98±0.16a	4.04±0.13c
25	78.5±1.1a	379.7±16.8a	7071.8±202.4ab	10538.3±311.0bc	16.07±0.60a	4.28±0.06bc
50	80.0±2.8a	399.5±14.1a	7451.5±166.9ab	11241.3±427.7ab	15.63±0.27a	4.32±0.10bc
100	80.1±2.9a	394.2±26.4a	7329.8±178.9ab	11310.5±313.6ab	16.36±0.29a	4.60±0.14ab
200	81.3±2.0a	430.0±37.6a	8502.3±757.5a	12015.8±579.8a	16.48±0.57a	4.85±0.10a
400	80.3±1.9a	412.5±15.4a	8170.0±584.4ab	11002.8±489.4abc	15.32±0.10a	4.16±0.22bc

注:同列不同小写字母表示不同 NaHS 浓度处理间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments with different NaHS concentrations ( $P<0.05$ ).

### 3 讨论

外源  $\text{H}_2\text{S}$  对植物具有多方面的生物学效应,例如促进不定根形成<sup>[7]</sup>、根系生长<sup>[24]</sup>、气孔运动<sup>[25]</sup>和光合作用<sup>[26]</sup>以及提高植物对非生物胁迫的抗性<sup>[9-15]</sup>等。研究证明,低浓度  $\text{H}_2\text{S}$  能够促进植物生长,高浓度  $\text{H}_2\text{S}$  则对生长产生抑制作用<sup>[27]</sup>。在作物不同生育期施用  $\text{H}_2\text{S}$  对生长发育乃至产量构成的影响还未可知。本研究在 2020 年进行的裸燕麦不同生育期喷施不同浓度 NaHS 的试验结果表明:喷施不同浓度 NaHS 对裸燕麦株高无显著影响,仅在喷施 0~25  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 浓度下拔节-开花期喷施的株高优于幼苗期喷施(表 1),这可能是拔节-开花期是裸燕麦株高增长的关键时期,此时正值高温干旱季节,大气干旱是甘肃省中部气候干旱的主要特征,这时进行叶面喷液可能比处于相对低温高湿的幼苗期喷施更能促进伸长生长的缘故。喷施时期和 NaHS 浓度及二者的交互作用对裸燕麦单株粒数、单株产量、收获穗数、千粒重和产量(NaHS 浓度

对千粒重影响不显著除外)均达到显著水平(表 4)。喷施时期中以抽穗期喷施的单株粒数、单株产量、收获穗数、千粒重和产量最佳;单株粒数和单株产量分别以喷施 50  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 最高,收获穗和产量以喷施 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 最大(表 5)。喷施时期和 NaHS 浓度交互作用分析结果显示:分别以抽穗期喷施 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和 50  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 的单株粒数和单株产量最高;抽穗期分别喷施 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和 50  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 的收获穗数和千粒重最大(表 2);产量以抽穗期喷施 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 最高(表 3)。产量与单株粒数、单株产量、收获穗和千粒重呈极显著正相关关系,而与株高间无显著相关关系(表 6)。对产量影响的灰色关联排序依次为单株产量>收获穗>单株粒数>千粒重>株高(表 7)。隶属函数综合分析(图 1)表明,抽穗期喷施 50~200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 的综合评价价值( $D$ )较大,其中喷施 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 的  $D$  值最优。由此可见,在最佳时期喷施适宜浓度  $\text{H}_2\text{S}$  能够促进裸燕麦产量构成因素和产量提高。本

试验条件下,初步确定以裸燕麦抽穗期喷施 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 提高农艺产量性状的效果最佳。

为验证抽穗期喷施不同浓度 NaHS 提高裸燕麦农艺产量性状的效应,进一步确定最佳的 NaHS 喷施浓度。2021 年试验结果显示对裸燕麦农艺和产量性状的影响与 2020 年试验结果存在一些差异,表现为喷施不同浓度 NaHS 对裸燕麦收获穗和千粒重无显著影响(表 8)。这可能与 2021 年和 2020 年同期降雨量(2020 年 4—8 月降水量 218.3 mm;2021 年同期降水量 58.9 mm)相差较大等气象因素有关。2021 年试验结果证明,喷施 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 显著提高了裸燕麦穗铃数,喷施 50~200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 显著提高了穗粒数,喷施 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 显著提高了产量,其中喷施 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 的作用最大。这与 2020 年的喷施 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 提高裸燕麦农艺产量性状的效果最佳的结果一致。说明在盐碱地裸燕麦抽穗期喷施 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 能够有效提高产量和产量构成因素。

在  $\text{H}_2\text{S}$  促进盐碱胁迫下植物生长机理的研究中,王泽鹏等<sup>[17]</sup>指出,用 0.1  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 预处理可通过提高抗氧化酶活性缓解盐胁迫对平邑甜茶根系生长的抑制;碱胁迫下  $\text{H}_2\text{S}$  介导活性氧产生进而调控水稻生长<sup>[28]</sup>;用 25  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 喷施裸燕麦幼苗可提高叶片  $\text{K}^+/\text{Na}^+$  及可溶性蛋白质、可溶性糖和甜菜碱含量,缓解盐碱胁迫诱导的氧化伤害<sup>[18]</sup>;幼苗期喷施 25~100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 可通过调节活性氧代谢和渗透溶质积累缓解盐碱胁迫对裸燕麦幼苗生长的抑制<sup>[19]</sup>。本试验结果表明, $\text{H}_2\text{S}$  可通过调控盐碱地裸燕麦产量构成提高裸燕麦产量。 $\text{H}_2\text{S}$  能够提高裸燕麦产量可能与其作为硫源参与并促进植物生长<sup>[29]</sup>或作为信号分子调控植物营养和氧化还原平衡<sup>[12-15]</sup>有关。有研究报道, $\text{H}_2\text{S}$  能促进低氮和缺磷条件下作物对硝态氮和磷的吸收转运<sup>[30-31]</sup>。甘肃省中部裸燕麦主产区黄绵土类型土壤既缺氮又缺磷, $\text{H}_2\text{S}$  是否通过增强氮磷的吸收和同化促进裸燕麦产量提高有待研究。植物生长发育和产量提升与矿质营养<sup>[12]</sup>、激素分配<sup>[32]</sup>和光合作用<sup>[8]</sup>等多种因素密切相关。在未来研究中,有必要继续关注叶面喷施  $\text{H}_2\text{S}$  对盐碱地裸燕麦离子吸收转运、激素分布运输和碳氮代谢机理的影响,进一步明确  $\text{H}_2\text{S}$  促进裸燕麦增产的机理。本研究仅为两年单点试验的结果,还需进行多年多点试验,了解不同生态条件下喷施  $\text{H}_2\text{S}$  对裸燕麦生长发育和产量的影响,以期探讨  $\text{H}_2\text{S}$  作为一种潜在新型

植物生长调节剂的可能性。

## 4 结 论

2020 年分别在裸燕麦幼苗期、拔节期、抽穗期、开花期和灌浆期喷施不同浓度 NaHS (0、25、50、100、200、400  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 的田间试验结果表明:喷施时期和 NaHS 浓度的交互作用除对裸燕麦株高无显著影响外,对单株粒数、单株产量、收获穗、千粒重和产量均产生显著影响,但对各农艺和产量性状影响的最佳喷施时期和 NaHS 浓度各不相同。隶属函数综合分析显示,抽穗期喷施 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 促进裸燕麦农艺产量性状提升的效果最佳。2021 年在抽穗期喷施不同浓度 NaHS (0、25、50、100、200、400  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 的田间试验结果表明:喷施不同浓度 NaHS 对裸燕麦株高、收获穗和千粒重无显著影响;与喷施 0  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 相比喷施 25~400  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 不同程度提高了裸燕麦穗铃数、穗粒数和小区产量,其中以喷施 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 的效应最优。综上所述,抽穗期喷施 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  NaHS 可有效促进裸燕麦产量构成因素和产量提升。

## 参 考 文 献:

- [1] LIN J X, YU D F, SHI Y J, et al. Salt-alkali tolerance during germination and establishment of *Leymus chinensis* in the Songnen Grassland of China[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 95: 763-769.
- [2] 王俭珍,刘倩,高妮妮,等.植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J].*生态学报*,2017,37(16):5565-5577.  
WANG Q Z, LIU Q, GAO Y N, et al. Review on the mechanisms of the response to salinity-alkalinity stress in plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(16): 5565-5577.
- [3] CAPULA-RODRÍGUEZ R, VALDEZ-AGUILAR L A, CARTMILL D L, et al. Supplementary calcium and potassium improve the response of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) to simultaneous alkalinity, salinity, and boron stress[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2016, 47(4): 505-511.
- [4] HASEGAWA P M. Sodium ( $\text{Na}^+$ ) homeostasis and salt tolerance of plants[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2013, 92: 19-31.
- [5] KHAN A, KHAN A L, MUNEEER S, et al. Silicon and salinity: crosstalk in crop-mediated stress tolerance mechanisms[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 1429.
- [6] WANG R. Physiological implications of hydrogen sulfide: a whiff exploration that blossomed[J]. *Physiological Reviews*, 2012, 92(2): 791-896.
- [7] ZHANG H, TANG J, LIU X P, et al. Hydrogen sulfide promotes root organogenesis in ipomoea batatas, *Salix matsudana* and *Glycine max* [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2009, 51(12): 1086-1094.
- [8] 周超凡,吴春涛,李丹丹,等.外源  $\text{H}_2\text{S}$  通过减轻低温光抑制增强黄瓜幼苗耐冷性[J].*植物生理学报*,2018,54(3):411-420.  
ZHOU C F, WU C T, LI D D, et al. Hydrogen sulfide promotes chilling tolerance of cucumber seedlings by alleviating low temperature photoinhibition[J]. *Plant Physiology Journal*, 2018, 54(3): 411-420.

- [9] CHEN X D, CHEN Q, ZHANG X M, et al. Hydrogen sulfide mediates nicotine biosynthesis in tobacco (*Nicotiana tabacum*) under high temperature conditions [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2016, 104: 174-179.
- [10] CHEN J, SHANG Y T, WANG W H, et al. Hydrogen sulfide-mediated polyamines and sugar changes are involved in hydrogen sulfide-induced drought tolerance in *Spinacia oleracea* seedlings [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 1173.
- [11] CHEN Z, CHEN M S, JIANG M. Hydrogen sulfide alleviates mercury toxicity by sequestering it in roots or regulating reactive oxygen species productions in rice seedlings [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2017, 111: 179-192.
- [12] 朱会朋, 孙健, 赵楠, 等. 盐胁迫下硫化氢调控杨树根系的离子流 [J]. *植物生理学报*, 2013, 49(6): 561-567.
- ZHU H P, SUN J, ZHAO N, et al. Hydrogen sulfide mediates ion fluxes in root of poplars under NaCl stress [J]. *Plant Physiology Journal*, 2013, 49(6): 561-567.
- [13] DENG Y Q, BAO J, YUAN F, et al. Exogenous hydrogen sulfide alleviates salt stress in wheat seedlings by decreasing  $\text{Na}^+$  content [J]. *Plant Growth Regulation*, 2016, 79(3): 391-399.
- [14] CHEN J, WANG W H, WU F H, et al. Hydrogen sulfide enhances salt tolerance through nitric oxide-mediated maintenance of ion homeostasis in barley seedling roots [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 12516.
- [15] DING H N, MA D Y, HUANG X, et al. Exogenous hydrogen sulfide alleviates salt stress by improving antioxidant defenses and the salt overly sensitive pathway in wheat seedlings [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2019, 41(7): 123.
- [16] 赵婷, 杨建宁, 吴玉霞, 等. 外源  $\text{H}_2\text{S}$  处理对盐碱胁迫下垂丝海藻幼苗生理特性的影响 [J]. *果树学报*, 2020, 37(8): 1156-1167.
- ZHAO T, YANG J N, WU Y X, et al. Effects of exogenous  $\text{H}_2\text{S}$  treatment on physiological characteristics of salt-alkali stressed seedling of *Malus halliana* [J]. *Journal of Fruit Science*, 2020, 37(8): 1156-1167.
- [17] 王泽鹏, 岳松青, 荀咪, 等.  $\text{H}_2\text{S}$  预处理对 NaCl 胁迫下平邑甜茶根系氧化损伤和细胞死亡的影响 [J]. *植物生理学报*, 2020, 56(10): 2241-2247.
- WANG Z P, YUE S Q, XUN M, et al. Effects of  $\text{H}_2\text{S}$  pretreatment on oxidative damage and cell death in Roots of *Malus hupehensis* var. *pingyiensis* under NaCl stress [J]. *Plant Physiology Journal*, 2020, 56(10): 2241-2247.
- [18] 刘建新, 刘瑞瑞, 贾海燕, 等. 外源  $\text{H}_2\text{S}$  对盐碱胁迫下裸燕麦幼苗叶片渗透胁迫的调节作用 [J]. *生态学杂志*, 2020, 39(12): 3989-3997.
- LIU J X, LIU R R, JIA H Y, et al. Regulation of exogenous hydrogen sulfide on osmotic stress in leaves of naked oat seedlings under saline alkali mixed stress [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(12): 3989-3997.
- [19] 刘建新, 刘瑞瑞, 贾海燕, 等. 外源  $\text{H}_2\text{S}$  对盐碱胁迫下裸燕麦幼苗生长和生理特性的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2021, 41(2): 245-253.
- LIU J X, LIU R R, JIA H Y, et al. Effects of exogenous hydrogen sulfide on growth and physiological characteristics of naked oat seedlings under saline-alkali mixed stress [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(2): 245-253.
- [20] 林伟静, 吴广枫, 李春红, 等. 品种与环境对我国裸燕麦营养品质的影响 [J]. *作物学报*, 2011, 37(6): 1087-1092.
- LIN W J, WU G F, LI C H, et al. Effects of cultivar and environment on nutritional quality of Chinese naked oats [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(6): 1087-1092.
- [21] 孙仁国, 赵桂琴, 胡凯军, 等. 盐胁迫对燕麦地上干物质积累及灌浆期光合特性的影响 [J]. *中国草地学报*, 2010, 32(5): 15-20.
- SUN R G, ZHAO G Q, HU K J, et al. Effect of salinity stress on aboveground dry matter accumulation of oat and photosynthesis at grain filling stage [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2010, 32(5): 15-20.
- [22] 孙丰磊, 曲延英, 陈全家, 等. 棉花抗旱相关指标综合评价及灰色关联分析 [J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(1): 233-239.
- SUN F L, QU Y Y, CHEN Q J, et al. Comprehensive evaluation of cotton drought tolerance indexes and gray relational analysis [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(1): 233-239.
- [23] 周亚峰, 许彦宾, 王艳玲, 等. 基于主成分-聚类分析构建甜瓜幼苗耐冷性综合评价体系 [J]. *植物学报*, 2017, 52(4): 520-529.
- ZHOU Y F, XU Y B, WANG Y L, et al. Establishment of a comprehensive evaluation system for chilling tolerance in melon seedlings based on principal component analysis and cluster analysis [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2017, 52(4): 520-529.
- [24] 李东波, 肖朝霞, 刘灵霞, 等. 外源硫化氢对豌豆根尖及其边缘细胞的影响 [J]. *植物学报*, 2010, 45(3): 354-362.
- LI D B, XIAO C X, LIU L X, et al. Effects of exogenous hydrogen sulfide ( $\text{H}_2\text{S}$ ) on the root tip and root border cells of *Pisum sativum* [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2010, 45(3): 354-362.
- [25] GARCÍA-MATA C, LAMATTINA L. Hydrogen sulphide, a novel gasotransmitter involved in guard cell signalling [J]. *New Phytologist*, 2010, 188(4): 977-984.
- [26] CHEN J, WU F H, WANG W H, et al. Hydrogen sulphide enhances photosynthesis through promoting chloroplast biogenesis, photosynthetic enzyme expression, and thiol redox modification in *Spinacia oleracea* seedlings [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(13): 4481-4493.
- [27] THOMPSON C R, KATS G. Effects of continuous hydrogen sulfide fumigation on crop and forest plants [J]. *Environmental Science & Technology*, 1978, 12(5): 550-553.
- [28] 祝一文, 车永梅, 赵方贵, 等. 碱胁迫下  $\text{H}_2\text{S}$  参与活性氧代谢和水稻幼苗生长的调控 [J]. *农业生物技术学报*, 2018, 26(7): 1124-1131.
- ZHU Y W, CHE Y M, ZHAO F G, et al.  $\text{H}_2\text{S}$  functions in growth regulation in rice (*Oryza sativa*) seedling and metabolism modulating of reactive oxygen under alkaline stress [J]. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 2018, 26(7): 1124-1131.
- [29] AUSMA T, MULDER J, POLMAN T R, et al. Atmospheric  $\text{H}_2\text{S}$  exposure does not affect stomatal aperture in maize [J]. *Planta*, 2020, 252(4): 63.
- [30] 杨菲, 陆巍. 低氮水平下  $\text{H}_2\text{S}$  对小麦硝态氮吸收的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2014, 34(10): 1413-1419.
- YANG F, LU W. Effect of  $\text{H}_2\text{S}$  on assimilation of nitrate nitrogen in wheat under low nitrogen condition [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(10): 1413-1419.
- [31] 朱春权, 曹小闯, 朱练峰, 等. 硫化氢提高水稻磷吸收转运的生理和分子机制 [J]. *中国水稻科学*, 2019, 33(6): 532-540.
- ZHU C Q, CAO X C, ZHU L F, et al. Physiological and molecular mechanisms of hydrogen sulfide enhancing phosphorus absorption and transportation in rice [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2019, 33(6): 532-540.
- [32] ZHANG P, LUO Q, WANG R L, et al. Hydrogen sulfide toxicity inhibits primary root growth through the ROS-NO pathway [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 868.