

# 青海西宁盆地两种披碱草属植物耐盐能力及水土保持能力研究

付江涛

陕西理工大学, 土木工程与建筑学院, 陕西 汉中  
Email: fujiangtao865@163.com

收稿日期: 2020年11月17日; 录用日期: 2020年12月3日; 发布日期: 2020年12月10日

## 摘 要

为评价土壤盐渍化区植物水土保持能力和对盐渍土环境的适应能力, 本研究选取两种水土保持植物垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)和老芒麦(*Elymus sibiricus* Linn.)为供试植物, 通过室内种植的方式对这两种植物进行实验盆种植并对这两种植物开展盐胁迫试验, 盐胁迫结束20 d后分别测定植物株高和干重, 以及植物叶片脯氨酸含量、丙二醛含量、叶绿素含量和相对电导率以及单根抗拉强度, 在此基础上以上述测定值及其增量为评价指标, 借助于隶属函数对2种供试植物耐盐能力和水土保持能力进行评价, 评价结果表明垂穗披碱草和老芒麦耐盐能力分别为0.54和0.52, 且2种植物水土保持能力和耐盐能力综合评价价值分别为0.55和0.48, 即垂穗披碱草对盐渍土环境的适应能力和水土保持能力大于老芒麦。该研究结果可为土壤盐渍化地区开展水土保持治理、环境恢复和生态保护提供理论价值和思路, 同时, 亦可为类似地区开展上述工程试验提供实际指导。

## 关键词

盐胁迫, 生长指标, 生理指标, 根系抗拉强度, 隶属函数

## Soil and Water Conservation and Salt Resistance Capacity of Two Elymus Species in the Xining Basin, Qinghai

Jiangtao Fu

School of Civil Engineering and Architecture, Shaanxi University of Technology, Hanzhong Shaanxi  
Email: fujiangtao865@163.com

Received: Nov. 17<sup>th</sup>, 2020; accepted: Dec. 3<sup>rd</sup>, 2020; published: Dec. 10<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

To evaluate soil and water conservation and salt resistance capacities of plants in soil salinization regions, two herbs (*Elymus nutans* Griseb. and *Elymus sibiricus* Linn.) were selected as the tested species. Based on flower pot plantation, the seeds for the two species were planted in experimental pots and then treated with the salt solution after germination. 20 days after salt solution treatment, the plant height, dry weight, pro concentration, MDA concentration, chlorophyll concentration and relative electronic conductivity in the foliage of and the tensile strength of the two species were determined, based on which comprehensive evaluation method was used to assess the water and soil conservation and salt resistance capacities of the two species. The results show the score (reflecting the water and soil conservation and salt resistance capacities of the two species was calculated using membership function) for *E. nutans* to resist salt stress is 0.52, and the score for *E. sibiricus* is 0.52. And the scores for *E. nutans* to resist salt stress and conserve soil and water is 0.55 and the score for *E. sibiricus* is 0.48, indicating that *E. nutans* play a more significant role than *E. sibiricus* in salt stress tolerance and soil and water conservation. The result can be used as a guidance in regions subject to soil salinization to reduce soil erosion and land acclimation.

## Keywords

Salt Stress, Growth Indexes, Physiological Indexes, Root Tensile Strength, Membership Function

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

近年来受气候变化、不合理的灌溉以及伴随城市扩张而来的工程开挖等行为的影响,我国青海东北部地区水土流失具有逐渐严重的趋势[1]。为应对该区水土流失问题,相关学者开展了大量的理论与试验研究,如胡夏嵩等(2009) [2]发现生长于该区的灌木柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、霸王(*Zygophyllum xanthoxylon*)、四翅滨藜(*Atriplex canescens*)可显著提高植物生长区土体强度,从而实现降低水土流失程度的目的,卢海静等(2013) [3]发现生长于该区的草本植物可发挥其根系数量较多的优势以实现提高边坡稳定性,降低土壤侵蚀量的目的,余芹芹等(2012、2013) [4] [5]、刘亚斌等(2018ab) [6] [7]、周林虎等(2019) [8]分别采用室内直剪、现场直剪试验、室内拉拔摩擦和现场拉拔试验分析了灌木植物(柠条锦鸡儿(*C. korshinskii*)、白刺(*N. tangutorum*)、霸王(*Z. xanthoxylon*)、四翅滨藜(*A. canescens*)、枸杞(*Lycium chinense*))提高边坡稳定性和降低水土壤侵蚀的力学机理,认为灌木根系提高土体抗剪强度,降低水土流失的力学机理在于灌木根系对土体的加筋作用、摩擦作用和牵引锚固作用。然而,在该区土壤盐渍化程度日益加重的背景下[9],上述植物在盐渍土环境中是否能够正常生长从而发挥其固土护坡能力值得商榷。

基于上述论述,本研究提出在盐渍化地区种植若干种具备较强耐盐能力的水土保持植物,通过植物发挥其根系固土护坡能力以降低该区水土流失程度的设想。在查阅相关文献和资料的基础上[10] [11] [12],选择了两种水土保持能力较强的披碱草属植物垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)和老芒麦(*Elymus sibiricus* Linn.)为供试植物,然后通过温室种植方式对这2种植物进行种植,然后采用 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 溶液对其展开盐

胁迫,待盐胁迫结束后,测定其生长指标、生理指标和根系力学强度,在此基础上,以这2种植物生长指标、生理指标和根系力学强度指标为评价因子,通过隶属函数分析法[13],对2种植物耐盐能力和水土保持能力进行评价。该研究结果对于我国盐渍土地区开展水土保持和生态保护研究具有较强的理论价值,同时对相类似地区开展荒山绿化、生态治理和恢复亦具有较强的实际指导作用。

## 2. 试验区概况

研究区西宁盆地及其周边地区位于青藏高原东北部和黄土高原西缘的交接地带,区内独特的地质、地理、气候条件决定了该区生态环境的脆弱性、不稳定性和难以恢复性[14]。该区水土流失较为严重,据统计,区内水土流失面积为289.5 km<sup>2</sup>,占区总面积的63.0%,年均土壤侵蚀模数5000 t/km<sup>2</sup>·a [15],土壤侵蚀种类主要有水蚀、风蚀和重力侵蚀等3种类型[15]。此外,该区是我国土地盐渍化程度强烈发育的地区之一[16],区内年降雨量稀少,且降雨集中,蒸发量大,气候寒冷、干燥,属于典型的高原大陆性气候[16] [17] [18]。区内独特的气候和地貌特征,致使区内土地盐碱化现象十分突出[16] [17] [18]。区内盐渍化土地主要分布于河湟谷地、湟水河南岸山前倾斜平原等地带[16] [17] [18],土层含盐量一般大于0.3%,小于1.3% [16] [18];盐渍土类型以硫酸盐(Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·10H<sub>2</sub>O和MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O)为主,盐渍化程度为中等[18] [19]。

## 3. 试验方法与材料

### 3.1. 供试植物介绍

垂穗披碱草(*E. nutans*)为禾本科,小麦族,披碱草属植物,属多年生疏丛草本植物。其根系为须根型,根系发达,多集中在15~20 cm的土层中,须根长0.3~0.5 m [10]。具有抗旱、耐碱、抗风沙、分蘖能力强、生长旺盛等特点[10] [20],是较好的水土保持、固沙和护坡物种[20],主要分布于西藏、云南、四川、新疆、甘肃、陕西、河北、内蒙古等地[10]。

老芒麦(*E. sibiricus*)为禾本科,小麦族,披碱草属植物,株高60~90 cm [10],其根系为须状根,根长约为30~50 cm,具有生长旺盛、分蘖能力强、耐寒、耐旱、耐盐碱、耐践踏、根系入土深、越冬性强等特点[10],具有较强的幼苗生长势和容易迅速形成良好的植被覆盖,可常用于土体侵蚀较为严重的地方植被恢复[10] [20],主要分布于东北、内蒙古、河北、山西、陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆、四川、西藏等省区[10]。

### 3.2. 植物种植及生长指标测定

将垂穗披碱草和老芒麦种子用浓度为95%的酒精浸泡3~5 min后,然后用蒸馏水清洗3~5次,再用浓度为150 ppm的赤霉素浸泡24 h,最后将其播撒于盛有培养基质的实验盆(培养基质由体积比为3:1的腐殖质和珍珠岩配制而成,实验盆尺寸为:38 cm × 24 cm)中进行种植,种植量根据千粒重和营养面积确定。植物发芽后,每5 d用蒸馏水对植物进行浇灌,浇灌量根据称重法确定,每次在固定时间进行浇灌,即于当日中午12:00前完成。待植物出芽30 d后,对植物进行盐胁迫处理。由于研究区盐渍土主要类型为硫酸盐渍土,本研究采用的胁迫材料为Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液,浓度分别为0 mmol/L、30 mmol/L、60 mmol/L、90 mmol/L和120 mmol/L,胁迫量为1.1 L。为了确保所得数据具有代表性,每个浓度均进行20盆重复。整个试验过程均在温室开展,环境温度为10℃~25℃,光照条件为自然光照,土壤湿度为12%~20%。在胁迫过程中,为了避免盐冲击,胁迫分3次进行,时间间隔为1 d,第1次为0.2 L、第2次为0.3 L、第3次为0.6 L,待盐胁迫结束20 d后,对植物进行预处理。其方法为将需采集的试样盆中的土体缓慢倒出,挑选生长量相对较为一致的植物作为试验对象,将附着于根系上的培养基质颗粒去掉,然后用自来水清

洗若干次，直至根系上未附着培养基质为止，再用蒸馏水清洗 3~5 次。在取样和清洗过程中，避免对植物叶片和根系造成损伤，从而影响试验结果。待预处理结束后，即对植物进行采样，采样过程如下：首先将采集到的供试种植物样品用蒸馏水冲洗干净，以去掉附着在根系上的培养基质，用滤纸拭干植物表面水分，根据植物属种和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液浓度对其进行编号，然后采用卷尺测量植物株高，再将垂穗披碱草和老芒麦分别放入温度为  $70^\circ\text{C}$  的烘箱中烘至恒重，使用天平称量其干重。为确保测量数据的有效性和代表性，以上测量过程中，所有植物株高和干重测定均按 10~15 次进行重复。

### 3.3. 生理指标测定

为研究在 5 种浓度的  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液胁迫处理下，垂穗披碱草和老芒麦叶片丙二醛含量、脯氨酸含量、叶片相对电导率和叶片叶绿素含量。本研究待垂穗披碱草和老芒麦盐胁迫处理结束后第 20 d 时，从每个试验样盆中随机挑选若干株生长正常的植物作为试验材料，用剪刀剪取其叶片部分，并用自来水将所剪取的植物叶片冲洗 3~5 遍，然后再用蒸馏水冲洗 3~5 遍，最后用滤纸吸收叶片表面水分，放入温度为  $4^\circ\text{C}$  的冷藏箱中待用。脯氨酸含量测定采用酸性茚三酮比色法[21]，丙二醛含量测量采用硫代巴比妥酸比色法[22]，相对电导率测试采用电导法[23]，叶绿素总量测试采用乙醇丙酮等量混合液法[24] (图 1)，以上每个试样均进行 3 个重复。



**Figure 1.** Four physiological indices determination. (a) Chlorophyll extraction; (b) Physiological indexes determination

**图 1.** 供试种植物 4 项生理指标试验测定过程。(a) 植物叶片叶绿素提取；(b) 植物生理指标测定

### 3.4. 根系力学指标测定

为测定两种草本单根抗拉性能指标，待盐胁迫结束 20 d 后，对两种植物根系进行了单根拉伸试验。本研究所采用的单根拉伸试验仪的工作原理和基本结构类似于电子万能试验机，主要包括单根拉伸系统和数据采集系统[25]。当植物单根夹持完毕后，开动仪器，使被夹持的单根受到张拉，数据采集系统自动采集并记录单根所有拉力和相应伸长量，直至单根发生破坏。在试验过程中为避免单根被拉出夹具，用橡皮胶带将夹头包裹以增加其与根体的摩擦力，根段长度为 40 mm。此外，为确保根径、单根抗拉力和单根抗拉强度等值具有一定的代表性，单根数量为 40 条。本研究中植物单根抗拉强度按文献[25]进行计算。

### 3.5. 数据统计与分析

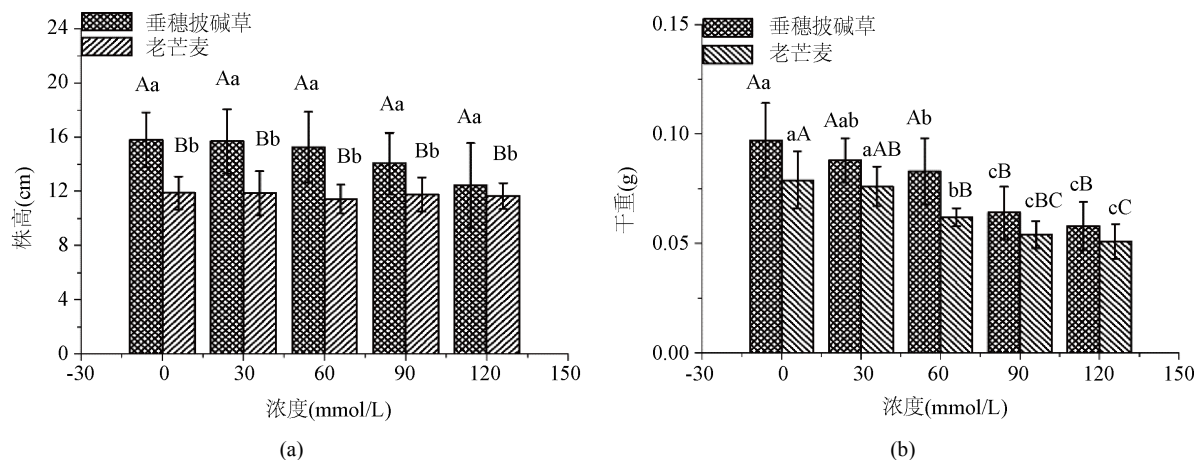
为定量分析盐溶液胁迫处理对上述植物生长指标、生理指标和力学指标的影响，本研究采用方差分

析(ANOVA)在 0.05 和 0.01 显著水平下, 利用最小显著差数法(LSD)进行多重比较[26], 以  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  胁迫溶液浓度(mmol/L)作为自变量, 以生长指标、生理指标和根系力学指标为因变量, 分析盐溶液胁迫处理下, 垂穗披碱草和老芒麦生长指标、生理指标和根系力学指标响应。此外, 为了综合分析 2 种植物的耐盐能力和水土保持能力, 本研究以上述生长指标、生理指标和力学指标为评价因子, 采用隶属函数评估法, 对 2 种植物耐盐能力和水土保持能力进行评价。本研究所有图均通过 OriginPro8 软件进行绘制, 方差分析通过 SPSS 12.0 软件完成, 隶属函数分析通过 Excel 软件完成。

## 4. 试验结果

### 4.1. 盐胁迫对植物生长指标影响

图 2 所示为  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液胁迫处理下, 垂穗披碱草和老芒麦株高和干重生长指标与胁迫液浓度关系。由该图可知, 胁迫后 20 d 时, 2 种供试植物株高和干重随  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液浓度增加均表现出逐渐减小的变化趋势。如当胁迫液浓度由 0 mmol/L 增至 120 mmol/L 时, 垂穗披碱草干重由 0.097 g 减至 0.058 g, 减少幅度为 40.21%。此外, 盐溶液胁迫处理下, 2 种草本植物株高并未表现出显著性差异( $P < 0.05$ )和极显著差异( $P < 0.01$ ), 而其干重则在高浓度(90 mmol/L 和 120 mmol/L)胁迫液处理下与低浓度间(0 mmol/L 和 30 mmol/L)表现出显著( $P < 0.05$ )和极显著性( $P < 0.01$ )差异, 上述现象反映出 2 种草本植物株高对盐胁迫反应较迟钝, 而干重反应则较为敏感。



注: 图中不同字母表示差异显著性结果(最小显著差数法, 即 LSD 法), 其中, 不同大写字母为 0.01 条件下的极显著性差异, 不同小写字母为 0.05 条件下的显著性差异。

Figure 2. Two growth indices of the salt-stressed herbs. (a) Plant height; (b) Dry weight

图 2. 盐胁迫植物生长指标。(a) 株高; (b) 干重

### 4.2. 盐胁迫条件下植物生理指标响应

表 1 和表 2 所示为  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液胁迫处理后第 20 d 时, 垂穗披碱草和老芒麦叶片脯氨酸含量、相对电导率、丙二醛和叶绿素含量 4 项生理指标测定结果。由该表可知, 随着  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液浓度增加, 2 种草本叶片脯氨酸含量、相对电导率、丙二醛含量 3 项生理指标表现出增加的变化特征, 叶绿素含量则表现出减小的趋势。

在相邻组间未表现显著性差异( $P < 0.05$ ), 在整个浓度区间未表现出极显著性差异( $P < 0.01$ ), 叶片叶绿素含量则未表现显著性( $P < 0.05$ )和极显著性差异( $P < 0.01$ ), 该结果体现出 2 种植物叶片脯氨酸含量对盐胁迫较为敏感, 剩余 3 项生理指标则对盐胁迫反应不敏感。

**Table 1.** Tested results for the physiological indices for the foliage of *E. nutans* stressed by Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution in five concentrations in test area**表 1.** 试验区 5 种浓度的 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 胁迫下垂穗披碱草生理指标试验测定结果

Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 溶液浓度(mmol/L)	垂穗披碱草生理指标类型			
	脯氨酸(ug/g)	相对电导率(%)	丙二醛(ummol/g)	叶绿素(ug/g FW)
0	42.21 ± 1.13aA	44.65 ± 13.65cB	7.21 ± 0.60bA	2.23 ± 0.02aA
30	47.91 ± 2.52bB	59.30 ± 2.08bAB	7.54 ± 0.09abA	2.23 ± 0.02aA
60	53.83 ± 1.34cC	67.61 ± 5.68abA	7.84 ± 0.85abA	2.22 ± 0.03aA
90	63.68 ± 2.35dD	72.25 ± 3.76aA	8.43 ± 0.68abA	2.18 ± 0.05abA
120	80.91 ± 1.56eE	74.00 ± 1.58aA	8.65 ± 1.21aA	2.10 ± 0.09bA

注：表中小写字母表示在不同浓度 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液胁迫处理下，垂穗披碱草叶片脯氨酸含量、叶片相对电导率、叶片丙二醛含量和叶片脯氨酸含量间的差异显著性结果(最小显著差数法，即 LSD 法)， $P < 0.05$ ，大写字母表示差异极显著性结果， $P < 0.01$ 。

**Table 2.** Tested results for the physiological indices for the foliage of *E. sibiricus* stressed by Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution in five concentrations in test area**表 2.** 试验区 5 种浓度 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 胁迫下老芒麦生理指标试验测定结果

Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 溶液浓度(mmol/L)	老芒麦生理指标类型			
	脯氨酸(ug/g)	相对电导率(%)	丙二醛(ummol/g)	叶绿素(ug/g FW)
0	33.11 ± 1.06eE	57.38 ± 2.28cC	7.43 ± 0.50bA	2.53 ± 0.31aA
30	37.68 ± 0.81dD	62.31 ± 1.49cBC	7.63 ± 0.72bA	2.52 ± 0.08aA
60	43.87 ± 1.08cC	73.02 ± 7.89bAB	8.68 ± 1.03abA	2.37 ± 0.09aA
90	50.39 ± 2.18bB	79.64 ± 4.11abA	8.96 ± 0.19abA	2.34 ± 0.06aA
120	62.39 ± 2.17aA	81.92 ± 5.43bA	9.22 ± 1.32aA	2.33 ± 0.02aA

注：表中小写字母表示不同浓度 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液胁迫条件下，老芒麦叶片脯氨酸含量、叶片丙二醛含量、叶片相对电导率和叶片叶绿素含量之间的差异显著性结果(最小显著差数法，即 LSD 法)， $P < 0.05$ ，大写字母表示差异极显著性结果， $P < 0.01$ 。

### 4.3. 植物根系力学性能

表 3 所示为 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液胁迫处理下，垂穗披碱草和老芒麦单根抗拉力及抗拉强度测定结果，由该表可知，随着胁迫溶液浓度增加 2 种供试植物单根抗拉力和抗拉强度分别表现出递减和递增的关系。如垂穗披碱草，当胁迫液浓度由 0 mmol/L 增加至 30 mmol/L、60 mmol/L、90 mmol/L 和 120 mmol/L 时，其单根抗拉力分别较对照组减少 7.23%、13.25%、10.24%和 18.07%，其单根抗拉强度分别较对照组增加 -4.32%、3.99%、-1.28%和 11.03%。此外，本研究中垂穗披碱草单根抗拉力和抗拉强度相邻组间并未表现出显著性差异( $P < 0.05$ )，且在整个浓度间均未表现出极显著性差异( $P < 0.01$ )。类似于垂穗披碱草，老芒麦单根抗拉力在相邻组间并未表现出显著性差异( $P < 0.05$ )，且在整个浓度区间未表现出极显著性差异( $P < 0.01$ )，其单根抗拉强度在整个浓度区间亦未表现出显著( $P < 0.05$ )和极显著性( $P < 0.01$ )差异。

### 4.4. 试验区 4 种供试种植物耐盐及水土保持能力综合评价

本文 4.1、4.2 及 4.3 小节研究结果表明，2 种供试植物在 5 种浓度盐胁迫处理下，其生长、生理和根系力学指标表现出不同的响应特征，从而导致采用单一的指标难以反映植物真实的耐盐和水土保持能力，由此，本研究采用隶属函数评估法对垂穗披碱草和老芒麦的耐盐和水土保持能力进行评价，其方法如下，选取垂穗披碱草和老芒麦株高、干重、叶片脯氨酸含量、相对电导率、丙二醛含量和叶绿素含量及其增

**Table 3.** Results of tensile resistance and strength of single root for two herbs stressed by Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution  
**表 3.** Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液胁迫下 2 种草本植物单根抗拉力及拉强度试验结果

Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 溶液浓度 (mmol/L)	垂穗披碱草			老芒麦		
	根径 (mm)	单根抗拉力 (N)	单根抗拉强度 (MPa)	根径 (mm)	单根抗拉力 (N)	单根抗拉强度 (MPa)
0	0.27aA	1.66aA	30.56abA	0.27aA	1.32aA	22.97aA
30	0.26aA	1.54abA	29.24bA	0.26aA	1.16abA	23.51aA
60	0.25aA	1.44abA	31.78abA	0.25aA	1.06bA	24.15aA
90	0.25aA	1.49abA	30.17abA	0.25aA	1.22abA	24.05aA
120	0.24aA	1.36bA	33.93aA	0.24aA	1.19abA	24.25aA

注：表中表中小写字母表示不同浓度 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液胁迫条件下，2 种草本植物各指标之间的差异显著性结果(最小显著差数法，即 LSD 法)， $P < 0.05$ ，大写字母表示 2 种草本植物各指标间的差异极显著性结果(最小显著差数法，即 LSD 法)， $P < 0.01$ 。

量以及单根抗拉力和抗拉强度为参数，对上述 2 种供试草本耐盐和水土保持能力进行了评价。隶属函数计算公式如下[27] [28]：

若耐盐性指标与耐盐性呈正相关，则有：

$$Z_{ij} = (X_{ij} - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin}) \quad (1)$$

若耐盐性指标与耐盐性呈负相关，则有：

$$Z_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin}) \quad (2)$$

式(1)和(2)中， $Z_{ij}$  为第  $i$  种植物  $j$  指标的耐盐隶属函数值， $X_{ij}$  为第  $i$  种植物第  $j$  指标的试验测定值， $X_{imax}$ ， $X_{imin}$  分别为垂穗披碱草和老芒麦株高、干重、叶片脯氨酸含量、相对电导率、丙二醛含量、叶绿素含量及其增量以及单根抗拉强度指标的最大值和最小值[27]。

#### 4.5. 试验区 2 种植物耐盐性及水土保持能力综合评价

将垂穗披碱草和老芒麦株高、干重、叶片脯氨酸含量、相对电导率、丙二醛含量和叶绿素含量及其增量以及单根抗拉强度代入公式(1)和公式(2)，即可获得 2 种供试草本在 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液胁迫处理后的耐盐及水土保持能力隶属函数值，计算结果如表 4 所示，然后对表 4 中的各指标的隶属函数值计算平均值即可得到上述 2 种供试草本的耐盐及水土保持能力综合评价值，如表 5 所示。由表 5 可知，垂穗披碱草耐盐能力综合评价值为 0.54，老芒麦则为 0.52，二者相差不大，但结果二者的水土保持能力，则发现垂穗披碱草的耐盐和水土保持综合评价值(0.55)明显高于老芒麦(0.48)，表明垂穗披碱草耐盐能力和水土保持能力均强于老芒麦。

#### 4.6. 讨论

##### 4.6.1. 盐胁迫与植物生长指标关系

植物生长环境中过量的盐分会对植物造成渗透胁迫，干扰其营养离子的平衡[29] [30] [31] [32] [33]，降低植物叶片面积增长，影响植物新陈代谢过程[29]-[34]，如蛋白质合成、呼吸作用、二氧化碳同化等，而这些最终均会影响植物的正常生长，从而使植物株高、地径、干重、生长量积累、生长量积累分配(根冠比)、根系形态表现出不同的变化规律[29]-[34]。相关研究表明，盐胁迫对植物个体形态发育和生长起着显著的影响，该影响具体表现在以下 2 个方面，即适当浓度的盐胁迫可促进植物生长发育，高浓度且长时间的胁迫可抑制植物生长发育，甚至导致植物枯萎[33]。盐胁迫对植物生长发育起促进作用主要包括

**Table 4.** Values for the salt-tolerance and water and soil conservation capacity of the two species evaluated using membership function**表 4.** 供试草本耐盐性及水土保持能力隶属函数值计算结果

植物	H	DI	DW	DWI	Pro	ProI	REC	RECI	MAD	MADI	CH	CHI	TR
<i>E. n</i> CK	1.00	1.00	0.48	1.00	0.19	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	1.00	0.69
<i>E. n</i> 30	0.98	0.97	0.26	0.55	0.31	0.85	0.61	0.50	0.84	0.84	0.30	1.00	0.57
<i>E. n</i> 60	0.88	0.84	0.30	0.64	0.43	0.70	0.38	0.22	0.69	0.69	0.28	0.95	0.80
<i>E. n</i> 90	0.60	0.48	0.22	0.45	0.64	0.45	0.26	0.06	0.39	0.39	0.19	0.75	0.66
<i>E. n</i> 120	0.23	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.21	0.00	0.28	0.28	0.00	0.35	1.00
<i>E. s</i> CK	0.10	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.66	1.00	0.89	0.89	1.00	1.00	0.00
<i>E. s</i> 30	0.09	0.99	0.96	0.91	0.10	0.88	0.53	0.83	0.79	0.79	0.98	0.95	0.05
<i>E. s</i> 60	0.00	0.87	0.70	0.36	0.23	0.72	0.24	0.47	0.27	0.27	0.63	0.20	0.11
<i>E. s</i> 90	0.07	0.96	0.74	0.45	0.36	0.55	0.06	0.24	0.13	0.13	0.56	0.05	0.10
<i>E. s</i> 120	0.05	0.93	0.61	0.18	0.61	0.24	0.00	0.16	0.00	0.00	0.53	0.00	0.12

注：*E. n* 表示垂穗披碱草，*E. s* 表示老芒麦；CK 表示对照组；H 表示株高，DW 表示干重，DWI 表示干重增量；Pro 表示脯氨酸；ProI 表示脯氨酸增量；REC 表示相对电导率；RECI 表示相对电导率增量；MAD 表示丙二醛；MADI 表示相对电导率增量；CH 表示叶绿素；CHI 表示叶绿素增量；TR 表示单根抗拉强度。

**Table 5.** Comprehensive assessment indices of salt-tolerance and soil and water conservation capacity for the two species**表 5.** 试验区 2 种植物耐盐及水土保持能力综合评价结果

植物	H	DI	DW	DWI	Pro	ProI	REC	RECI	MAD	MADI	CH	CHI	TR	MV
<i>E. n</i>	0.74	0.66	0.25	0.53	0.51	0.60	0.49	0.36	0.64	0.64	0.21	0.81	0.75	(0.54) 0.55
<i>E. s</i>	0.06	0.95	0.80	0.58	0.26	0.68	0.30	0.54	0.42	0.42	0.74	0.44	0.07	(0.52) 0.48

注：表中括号的数字表示耐盐性评价指标，如(0.54)和(0.52)分别表示垂穗披碱草和老芒麦的耐盐能力综合指标评分为 0.54 和 0.52，0.55 和 0.48 分别表示垂穗披碱草和老芒麦的耐盐能力和水土保持能力综合评分；MV 表示基于隶属函数评估法的平均值。

促进植物根系生长，增加植物生物量[33]、促进植物叶片叶绿素合成等[35]；盐胁迫对植物生长发育起抑制作用主要包括，盐胁迫可导致植物叶片面积减小、植株生长较为缓慢、生长量显著降低等现象[33]。本研究中，随胁迫溶液浓度增加，2 种草本干重和株高均表现出降低的变化特征，其中，株高在整个浓度间并未表现出显著和极显著性差异，而干重则在高浓度  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液胁迫处理下表现出显著的降低趋势，这表明高浓度盐胁迫对上述两种草本植物生长抑制作用并未从其株高上体现出来，而是通过其干重体现，如减少叶片厚度等。

#### 4.6.2. 盐胁迫与植物生理指标关系

##### (1) 盐胁迫对植物叶片脯氨酸含量影响

生长于胁迫环境的植物会在该胁迫下产生一系列的生长和生理响应，生理响应主要包括：超氧化物歧化酶(SOD)活性、可溶性蛋白含量、脯氨酸(Pro)含量、丙二醛(MDA)、相对电导率(REC)、叶绿素总量(chl)、过氧化物歧化酶(POD)含量等变化[36]，故可通过测试上述生理指标在植物体内含量大小及其变化规律反映该植物的耐盐能力，而对于不同的植物来说，其盐胁迫后的各指标响应并不一致[27] [28] [30]。本研究选取叶片脯氨酸含量、丙二醛含量、叶片相对电导率、叶绿素总含量 4 项生理指标，通过测试垂穗披碱草和老芒麦叶片中上述指标含量，评价了这 2 种植物的耐盐能力。这 4 项生理指标中，脯氨酸(Pro)为植物组织中一种重要渗透调节物质，其作用主要体现在以下几个方面，即调节植物细胞质的渗透势，



从而维持植物细胞内渗透压平衡[31] [36] [37]; 保护植物蛋白质分子, 增加蛋白质分子的水合度[31] [36] [37]; 维持植物光合活性[31] [36] [37]; 清除植物细胞内活性氧等[31] [36] [37], 一般说来, 几乎所有的逆性条件均会导致植物体内脯氨酸的积累, 如盐胁迫、干旱、病害、高低温、水胁迫等, 植物体内脯氨酸的积累是植物为应对外界环境胁迫而具有的一种自我保护性措施[23] [24]。相关研究表明: 植物体内脯氨酸(Pro)积累量的变化与外界胁迫存在显著相关性, 外界环境胁迫程度愈严重, 则植物体内脯氨酸(Pro)积累量也随之增加, 该现象表明植物对胁迫的耐受能力愈强[31] [36] [37]。4项生理指标中, 脯氨酸是已知分布最广的渗透保护物质, 在外界环境胁迫条件下, 脯氨酸合成的增加和降解的减少均会导致植物体内脯氨酸大量累积, 植物通过提高体内脯氨酸的含量调节渗透平衡, 以保护细胞的结构, 从而维持植物正常发育及生长过程[38]。本研究中, 老芒麦叶片脯氨酸含量增量大于垂穗披碱草, 表明盐胁迫处理下, 老芒麦叶片积累脯氨酸的能力高于垂穗披碱草, 体现出从脯氨酸含量的角度分析, 老芒麦的耐盐性大于垂穗披碱草。

#### (2) 盐胁迫对植物叶片相对电导率影响

叶片相对电导率是反映植物膜系统状况的一个重要的生理生化指标, 植物受到逆境或者其它损伤的情况下细胞膜容易破裂, 膜蛋白受伤害因而使胞质的胞液外渗而使相对电导率增大, 其反映植物质膜的通透性[39], 其中, 抗性较强的植物细胞膜不易破坏, 故其透性相对较小; 抗性较弱的植物细胞膜易于破坏, 故其透性相对较大[39]。本研究中, 垂穗披碱草叶片相对电导率低于老芒麦, 但其增量高于老芒麦, 这体现出从叶片相对电导率的角度分析, 老芒麦耐盐性高于垂穗披碱草。

#### (3) 盐胁迫对植物叶片丙二醛含量影响

丙二醛是膜脂氧化的最终产物, 它的积累对膜和细胞造成一定程度的伤害, 故其含量可反映出植物受逆境伤害的程度[40]。本研究中, 5种浓度的 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 溶液胁迫处理下, 2种植物叶片丙二醛含量随浓度增加均表现出逐渐增加的变化特征, 垂穗披碱草和老芒麦叶片丙二醛含量在低浓度条件下(30~60 mmol/L)与对照组亦无显著性差异。该结果表明, 在低浓度(30~60 mmol/L)  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 溶液胁迫处理下, 垂穗披碱草和老芒麦可通过体内的调节机制使其细胞膜不受损害或伤害相对较小[41] [42], 当浓度高于90 mmol/L时, 2种植物叶片丙二醛含量则表现出显著增加的变化规律, 则该结果表明高浓度的 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 溶液胁迫处理已对2种植物细胞膜造成较为显著的伤害[41]。此外, 本项研究中垂穗披碱草叶片丙二醛含量及增加幅度小于老芒麦, 表明老芒麦细胞质膜受过氧化产物的伤害程度大于垂穗披碱草[40], 反映出从丙二醛角度分析, 垂穗披碱草耐盐能力优于老芒麦。

#### (4) 盐胁迫对植物叶片叶绿素含量影响

叶绿体是盐胁迫下植物最敏感的细胞器之一[43], 叶绿素含量可表示植物在盐胁迫下光合作用的强弱, 从而可通过植物叶绿素含量反映植物对盐胁迫抗性的大小[35]。盐胁迫时植物叶片中叶绿素含量降低的主要原因在于盐胁迫导致植物体内叶绿素降解酶的活性增强, 促进了叶绿素的降解, 故使得植物体内叶绿素含量降低[44]。本项研究中, 在 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 胁迫处理下, 2种植物叶片叶绿素含量随浓度增加表现出呈逐渐减小的变化规律。其中, 垂穗披碱草叶片叶绿素含量减小幅度小于老芒麦, 该结果表明, 盐胁迫对垂穗披碱草叶片叶绿素含量造成的影响相对小于老芒麦。

### 4.6.3. 植物耐盐能力及水土保持综合评价

植物的耐盐性与植物生理生化等多方面因素相关, 是一个多基因控制的极为复杂的反应过程, 也是综合性状的表现[27] [28] [30]。由于不同植物耐盐方式和耐盐机制不同, 其组织或细胞的生理代谢和生化变化亦存在较大差异, 从而使得不同种植物在盐胁迫条件下对某一具体指标(株高、地径、鲜重、干重等生长指标和脯氨酸、叶绿素含量、丙二醛、相对电导率等生理指标)的反应亦不尽相同[45], 如本研究分

别从 4 项生理指标进行评价, 可得到不同的耐盐性结果, 故采用单一指标对植物耐盐性能力进行评价会导致与实际情况产生偏差的问题, 因此有必要采用综合评价的方式对植物的耐盐和水土保持能力进行评价[27] [28] [30] [45]。由此, 本研究以 2 种植物干重、株高、脯氨酸含量、相对电导率、丙二醛和叶绿素含量及其增量以及单根抗拉强度作为耐盐和水土保持能力评价指标, 采用隶属函数将 2 种植物的耐盐和水土保持能力进行了综合评价, 结果表明垂穗披碱草耐盐综合评价值为 0.54 和 0.52, 即垂穗披碱草耐盐能力由于老芒麦, 但二者相差不大。此外, 从耐盐性和水土保持能力综合评价结果看, 垂穗披碱草耐盐和水土保持能力优于老芒麦。

张俊叶等(2012) [28]通过隶属函数法评价了苇状羊茅(*Festuca arundinacea*)、高冰草(*Agropyron elongatum*)、星星草(*Puccinellia tenuiflora*)、冷地早熟禾(*Poa crymophila*)、野大麦(*Horcleum brevisubulatum*)、蒙古冰草(*Agropyron morgolicum*)、披碱草(*Elymus duhuricas*)等 7 种草本植物的耐盐性, 研究结果表明苇状羊茅隶属函数综合评价值为 0.587, 相对大于其它植物, 其次分别为高冰草、星星草、冷地早熟禾、野大麦和蒙古冰草, 其隶属函数综合评价值分别为 0.564、0.512、0.497、0.465 和 0.434, 披碱草隶属函数综合评价值相对最小, 为 0.413, 故上述 7 种植物耐盐能力由强至弱分别为苇状羊茅、高冰草、星星草、冷地早熟禾、野大麦、蒙古冰草、披碱草。本研究中垂穗披碱草和老芒麦隶属函数综合评价值分别为 0.55 和 0.48, 故根据上述学者结论, 即“隶属函数综合评价值愈大, 则对应植物的耐盐性越强”, 故本项研究中, 垂穗披碱草耐盐能力相对大于老芒麦, 该研究结论与杨月娟等(2014) [30]关于“0 mmol/L、50 mmol/L、150 mmol/L 和 250 mmol/L 等 4 种浓度 NaCl 溶液胁迫处理下, 垂穗披碱草综合耐盐能力强于老芒麦耐盐能力的结论”相一致。但需说明的是, 针对上述两种披碱草属植物耐盐能力强弱的观点也有不同的结论, 如李景欣等(2013) [46]、辛慧慧等(2017) [47]发现老芒麦的耐盐能力高于垂穗披碱草, 导致该观点产生差异的原因可能在于这些研究采用了不同生境的野生种质资源, 而不同种质资源间由于长期生长在不同盐渍化生境, 其耐盐性也存在较大差异[11]。此外, 各研究中盐的成分、浓度不同, 也可能是造成研究结果不一致的原因之一[11]。

植物根系是提高边坡土体抗剪强度, 降低坡面水土流失的有效载体, 根系提高边坡土体强度的机理在于生长于土体的植物根系在土体中穿插、产生与土体形成一种类似与复合材料的复合体, 根 - 土复合体。植物根系通过对土体的加筋作用提高根 - 土复合体的抗剪强度。根据 Wu 氏模型(Wu-Waldron-Model 模型)可知, 植物根 - 土复合体抗剪强度由 2 部分组成, 即土体自身抗剪强度和由植物根系所提供的附加粘聚力组成[48]。其中, 附加粘聚力主要通过植物根系结构形态和根系单根抗拉强度组成[48] [49]。本研究中, 由于供试植物为草本植物, 其根系结构形态难以测定, 故选定其单根抗拉强度作为反映植物水土保持能力的指标。本研究中, 两种草本植物单根抗拉力随胁迫液浓度增加表现出降低的变化特征, 而其单根抗拉强度则表现出增加的变化特征, 该研究结果与李光莹等(2015) [12]、李淑霞等(2018) [50]研究结论相一致。

## 5. 结论

随  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液浓度由 0 mmol/L 增加至 120 mmol/L, 垂穗披碱草和老芒麦生长指标总体上表现出降低的变化特征; 盐胁迫条件下 2 种供试种植物叶片脯氨酸、相对电导率、丙二醛含量等 4 种生理指标的含量, 随胁迫液  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液浓度增加表现出逐渐增加的变化特征, 叶片叶绿素含量则随  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液浓度增加表现出逐渐降低的变化特征, 且浓度愈高该变化幅度相对愈显著; 随着盐胁迫浓度增加, 2 种草本植物根系单根抗拉力表现出减小的变化特征, 而其单根抗拉强度则表现出逐渐增加的变化特征, 且垂穗披碱草单根抗拉力和抗拉强度均高于老芒麦; 通过采用隶属函数综合评价结果表明, 垂穗披碱草耐盐能力和水土保持能力综合评价值为 0.55, 老芒麦为 0.48, 垂穗披碱草耐盐能力和水土保持能力强于老芒

麦; 本项研究成果为青海西宁盆地及周边盐渍化地区开展生态修复、环境治理以及类似地区实现科学有效防治土地盐碱化、水土流失、浅层滑坡、土地沙化等地质灾害的发生, 提供重要实验依据并起到理论指导的实际意义。

## 参考文献

- [1] 杨丽波. 西宁市城市水土保持的进展及今后的工作思路[J]. 青海科技, 2013(1): 19-21.
- [2] 胡夏嵩, 李国荣, 朱海丽, 等. 寒旱环境灌木植物根 - 土相互作用及其护坡力学效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 613-620.
- [3] 卢海静, 余芹芹, 胡夏嵩, 等. 西宁盆地黄土区草本植物群根效应及其护坡贡献[J]. 中国水土保持, 2013(12): 55-59+77.
- [4] 余芹芹, 乔娜, 卢海静, 等. 植物根系对土体加筋效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S1): 3216-3223.
- [5] 余芹芹, 胡夏嵩, 李国荣, 等. 寒旱环境灌木植物根 - 土复合体强度模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 1020-1031.
- [6] 刘亚斌, 余冬梅, 祁兆鑫, 等. 寒旱环境黄土区灌木植物根系拉拔试验及其根系表面微观结构特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1): 3701-3713.
- [7] 刘亚斌, 胡夏嵩, 余冬梅, 等. 西宁盆地黄土区 2 种灌木植物根 - 土界面微观结构特征及摩擦特性试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1270-1280.
- [8] 周林虎, 胡夏嵩, 刘昌义, 等. 青藏高原东北部 4 种灌木主根和侧根抗拉力学特性比较[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 93-100.
- [9] 仲德春. 西宁地区盐渍土的分布特征及地基处理研究[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2011, 29(2): 31-33.
- [10] 中科院“中国植物志”编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [11] 王沛, 陈玖红, 王平, 等. 披碱草属植物抗逆性研究现状和存在的问题[J]. 草业学报, 2019, 28(5): 151-162.
- [12] 李光莹, 付江涛, 余冬梅, 等. 碱胁迫条件下草本植物根系力学强度试验研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(4): 584-596.
- [13] 景宇鹏, 李跃进, 蔺亚莉, 等. 玉米耐  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫的生理响应及耐盐碱性综合评价[J]. 中国土壤与肥料, 2019(5): 179-186.
- [14] 马润勇, 彭建兵, 刘利年, 等. 青藏高原隆升的气候环境效应与黄土高原构造侵蚀[J]. 水土保持通报, 2005, 25(5): 5-11.
- [15] 段小玲. 青海省水土流失现状及生态建设思路[J]. 林业调查规划, 2004, 4(29): 55-58.
- [16] 徐志闻, 刘亚斌, 胡夏嵩, 等. 基于水分和原位电导率的西宁盆地盐渍土含盐量估算模型[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 148-154.
- [17] 王青海, 沈辉军, 季恒玉. 我国西北地区土地盐渍化与水资源利用[J]. 四川环境, 2000, 19(4): 40-42.
- [18] 罗友弟. 青海地区盐渍土分布规律及其盐胀溶陷机制探讨[J]. 水文地质工程地质, 2010, 34(4): 116-120.
- [19] 姜有生. 青海东部地区盐渍土的分布特征及工程应对措施[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2006(3): 98-101.
- [20] 陈钊, 梁新平, 侯扶江, 等. 不同放牧强度下垂穗披碱草遗传多样性分析[J]. 草业学报, 2015, 24(8): 159-165.
- [21] 中国科学院上海植物生理研究所, 上海市植物生理学会编. 现代植物生理学试验指南[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 303.
- [22] 郝再彬, 苍晶, 徐仲. 植物生理试验技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨出版社, 2002: 185-192.
- [23] 刘宁, 高玉葆, 贾彩霞, 等. 渗透胁迫下多花黑麦草叶内过氧化物酶活性和脯氨酸含量以及质膜相对透性的变化[J]. 植物生理学通讯, 2000, 36(1): 11-14.
- [24] 张宪政, 谭贵茹, 黄元极. 植物生理学试验技术[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1983: 75-77.
- [25] 刘亚斌, 李淑霞, 余冬梅, 胡夏嵩, 杨幼清. 西宁盆地黄土区典型草本植物单根抗拉力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 157-166.
- [26] Fariduddin, Q., Ahmad Mir, B. and Ahmad, A. (2012) Physiological and Biochemical Traits as Tools to Screen Sensitive and Resistant Varieties of Tomatoes Exposed to Salt Stress. *Journal of Plant Physiology*, **24**, 281-292. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202012000400007>

- [27] 卢素锦, 周青平, 刘文辉, 等. 披碱草属 6 种牧草苗期抗寒性鉴定[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(8): 1889-1892.
- [28] 张俊叶, 张力君, 赵青山, 等. 7 种禾本科牧草种子苗期耐盐性的隶属函数法评价[J]. 内蒙古农业科技, 2012(3): 42.
- [29] He, F.L., Bao, A.K., Wang, S.M., *et al.* (2019) NaCl Stimulates Growth and Alleviates Drought Stress in the Salt-Secreting Xerophyte *Reaumuria soongorica*. *Environmental and Experimental Botany*, **162**, 433-443. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.03.014>
- [30] 杨月娟, 周华坤, 王文颖, 等. 盐胁迫对垂穗披碱草幼苗生理指标的影响[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(1): 101-106.
- [31] 赵可夫, 范海. 盐胁迫下真盐生植物与泌盐植物的渗透调节物质及其贡献的比较研究[J]. 应用与环境生物学报, 2000, 6(2): 99-105.
- [32] 陈爱葵, 韩瑞宏, 李东洋, 等. 植物叶片相对电导率测定方法比较研究[J]. 广东教育学院学报, 2010, 30(5): 88-91.
- [33] Li, J.S., Hussain, T., Feng, X.H., *et al.* (2019) Comparative Study on the Resistance of *Suaeda glauca* and *Suaeda salsa* to Drought, Salt, and Alkali Stresses. *Ecological Engineering*, **140**, Article ID: 105593. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105593>
- [34] Hu, T., Jin, Y., Li, H., *et al.* (2016) Stress Memory Induced Transcriptional and Metabolic Changes of Perennial Ryegrass (*Lolium perenne*) in Response to Salt Stress. *Physiologia Plantarum*, **156**, 54-69. <https://doi.org/10.1111/ppl.12342>
- [35] 倪建伟, 武香, 张华新, 等. 3 种白刺耐盐性的对比分析[J]. 林业科学研究, 2012, 25(1): 48-53.
- [36] Yamamoto, A., Sawada, H., Shim, I.S., *et al.* (2011) Effect of Salt Stress on Physiological Response and Leaf Polyamine Content in NERICA Rice Seedlings. *Plant Soil and Environment*, **57**, 571-576. <https://doi.org/10.17221/413/2011-PSE>
- [37] Wang, Y., Stevanato, P., Yu, L., *et al.* (2017) The Physiological and Metabolic Changes in Sugar Beet Seedlings under Different Levels of Salt Stress. *Journal of Plant Research*, **130**, 1079-1093. <https://doi.org/10.1007/s10265-017-0964-y>
- [38] 全先庆, 张渝洁, 单雷, 等. 脯氨酸在植物生长和非生物胁迫耐受中的作用[J]. 生物技术通讯, 2007, 18(1): 159-162.
- [39] Jia, G.X., Zhu, Z.Q., Chang, F.Q., *et al.* (2002) Transformation of Tomato with the BADH, Gene from *Atriplex*, Improves Salt Tolerance. *Plant Cell Reports*, **21**, 141-146. <https://doi.org/10.1007/s00299-002-0489-1>
- [40] 张景云, 白雅梅, 缪南生, 等. 盐胁迫对不同耐盐性二倍体马铃薯叶片质膜透性、丙二醛和脯氨酸含量的影响[J]. 作物杂志, 2013(4): 75-80.
- [41] 徐静, 董宽虎, 高文俊, 等. NaCl 和 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 胁迫下冰草幼苗的生长及生理相应[J]. 中国草地学报, 2011, 33(11): 36-41.
- [42] 刘奕琳, 万福绪, 娄晓瑞. 盐胁迫对 10 个墨西哥柏树种源幼苗生理生化的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(4): 29-33.
- [43] Strongonov, B.P. (1973) Structure and Function of Plant Cells in Saline Habitats. Halsted Press, New York.
- [44] Woodward, A.J. and Bennett, I.J. (2005) The Effect of Salt Stress and Abscisic Acid on Proline Production, Chlorophyll Content and Growth of *in Vitro* Propagated Shoots of *Eucalyptus camaldulensis*. *Plant Cell Tissue and Organ Culture*, **82**, 189-200. <https://doi.org/10.1007/s11240-005-0515-4>
- [45] 凌云鹤, 周瑶, 景兵, 等. 盐胁迫对向日葵幼苗生长及生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(4): 139-145.
- [46] 李景欣, 杨帆, 赵娜, 等. 4 种披碱草属牧草苗期耐盐性评价[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2013, 5(3): 77-79.
- [47] 辛慧慧, 王慧君, 蔡云. 盐胁迫对披碱草属 3 种牧草幼苗生理指标的影响[J]. 新疆畜牧业, 2017(6): 29-31.
- [48] Kokutse, N.K., Temgoua, A.G.T. and Kavazovic, Z. (2016) Slope Stability and Vegetation: Conceptual and Numerical Investigation of Mechanical Effects. *Ecological Engineering*, **86**, 146-153. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.11.005>
- [49] Reubens, B., Poesen, J., Danjon, F., *et al.* (2007) The Role of Fine and Coarse Roots in Shallow Slope Stability and Soil Erosion Control with a Focus on Root System Architecture: A Review. *Trees*, **21**, 385-402. <https://doi.org/10.1007/s00468-007-0132-4>
- [50] 李淑霞, 刘亚斌, 余冬梅, 等. 寒旱环境盐胁迫条件下两种草本植物的根系力学特性研究[J]. 盐湖研究, 2019, 27(1): 116-131.