

# 沙埋对沙米幼苗生长及生理过程的影响\*

赵哈林<sup>1\*\*</sup> 曲浩<sup>2</sup> 周瑞莲<sup>2</sup> 王进<sup>2</sup> 李瑾<sup>1</sup> 云建英<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; <sup>2</sup>鲁东大学生命学院, 山东烟台 264025)

**摘要** 2010—2011年在科尔沁沙地,研究了不同沙埋深度下沙米幼苗生长特性及其逆境生理指标的变化.结果表明:沙米幼苗的耐沙埋能力较强,当埋深超过其株高后生长才会受到严重抑制,而埋深超过其株高1.66倍时仍有部分幼苗存活.当埋深未超过株高时,其幼苗丙二醛含量和膜透性的变化不显著;随着埋深进一步增加,其膜质过氧化加剧,细胞膜受损.沙埋胁迫下,沙米幼苗的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性及脯氨酸含量均显著增加,过氧化氢酶(CAT)活性和可溶性糖含量下降.沙埋使植株光合面积减少、细胞膜受损,导致沙米幼苗死亡率增加、生长受抑,但是SOD和POD活性的增强及脯氨酸含量的增加对于减轻沙埋危害将起到一定的作用.

**关键词** 沙生植物 沙米 沙埋 生长特性 生理响应

**文章编号** 1001-9332(2013)12-3367-06 **中图分类号** Q948.3 **文献标识码** A

**Effects of sand burial on growth and physiological process of *Agriophyllum squarrosum* seedlings in Horqin Sand Land of Inner Mongolia, North China.** ZHAO Ha-lin<sup>1</sup>, QU Hao<sup>1</sup>, ZHOU Rui-lian<sup>2</sup>, WANG Jin<sup>2</sup>, LI Jin<sup>1</sup>, YUN Jian-ying<sup>1</sup> (<sup>1</sup>*Cold and Arid Regions Environment and Engineering Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;* <sup>2</sup>*Faculty of Life Sciences, Ludong University, Yantai 264025, Shandong, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2013, **24**(12): 3367-3372.

**Abstract:** In 2010–2011, a sand burial experiment was conducted on the Horqin Sand Land of Inner Mongolia to study the growth characteristics and physiological properties of *Agriophyllum squarrosum* seedlings under different depths of sand burial. The *A. squarrosum* seedlings had stronger tolerance against sand burial. The seedling growth could be severely inhibited when the burial depth exceeded seedling height, but some seedlings could still be survived when the burial depth exceeded 1.66 times of seedling height. When the burial depth did not exceed the seedling height, the seedling MDA content and membrane permeability had no significant change, but the lipid peroxidation was aggravated and the cell membrane was damaged with increasing burial depth. Under sand burial stress, the seedling SOD and POD activities and proline content increased significantly, while the seedling CAT activity and soluble sugar content decreased. Sand burial decreased the leaf photosynthetic area and damaged cell membrane, inducing the increase of seedling mortality and the inhibition of seedling growth. The increase of SOD and POD activities and proline content played a definite role in reducing the sand burial damage to *A. squarrosum* seedlings.

**Key words:** prammophytes; *Agriophyllum squarrosum*; sand burial; growth property; physiological response.

在我国北方沙漠或沙地中,由于风沙活动强烈,风积沙埋现象十分普遍,不仅交通、通讯、水利等工程设施和乡镇时常受到流沙侵袭,而且每年都有大面积的天然草场、人工植被和农田受到沙埋危

害<sup>[1-2]</sup>.近年来,随着国家对这些地区生态环境保护和人工植被建设的日益重视,有关沙埋对植物影响的研究愈来愈受到关注<sup>[2-3]</sup>.

目前国内外关于沙埋对植物影响的研究已有很多报道,研究焦点集中于沙埋对植物的种子萌发、幼苗出土、存活和生长的影响<sup>[4-7]</sup>.例如, Benvenuti等<sup>[4]</sup>研究了沙埋对 *Rumex obtusifolius* 种子萌发、出土和幼苗生长的影响;马红媛等<sup>[7]</sup>研究了不同沙埋

\* 国家自然科学基金项目(30972422,31270752)、国家科技支撑计划项目(2011BAC07B02)和国家“973”项目(2009CB421303)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: resdiv@lzb.ac.cn

2013-01-14 收稿,2013-09-04 接受.

深度对羊草(*Leymus chinensis*)种子萌发和幼苗生长的影响。关于沙埋对植物存活、形态和繁殖影响的研究也有一些报道,例如,赵文智和刘志民<sup>[8]</sup>研究了沙埋对砂生槐(*Sophora moorcroftiana*)繁殖和生长的影响;米志英等<sup>[9]</sup>研究了沙埋对沙柳形态特征的影响。另外,还有少量沙埋对植物解剖结构和幼苗气体交换等影响的研究报道<sup>[10-11]</sup>。研究证实,沙埋可以改变地面光合有效辐射、土壤温度、水分、有机质含量、根际氧含量、微生物活性等环境条件,从而显著影响植物种子萌发、幼苗存活、生长和植物形态特征。但是,沙埋对植物生长的影响因植物种类和沙埋深度不同而有很大差别。通常,沙生植物的耐沙埋能力要强于非沙生植物,沙埋时间越长、越深,对植物的影响越大。但迄今为止,有关沙埋对植物生理过程的影响及其生长受抑的生理机制研究还鲜见报道<sup>[3]</sup>。

沙米(*Agriophyllum squarrosum*)是藜科沙蓬属一年生沙生植物,广泛分布于我国北方的沙漠或沙地之中<sup>[1-2]</sup>。作为先锋植物,沙米是最早侵入流动、半流动沙地的主要植物种,虽然经常受到沙埋危害,却长势良好<sup>[2,12]</sup>。为了了解沙米对沙埋的生理生态适应机制,2010—2011年在内蒙古科尔沁沙地,测定了不同沙埋处理下沙米的存活、生长和逆境生理特性的变化,分析沙埋对沙米生长的影响及其逆境生理响应,以期为该地区退化植被的恢复和重建提供科学依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于我国内蒙古自治区通辽市奈曼旗境内,地处科尔沁沙地腹地(42°55'—42°57' N, 120°41'—120°45' E,海拔340~370 m)。该区属温带半干旱大陆性气候,年均降水量356.9 mm,年均蒸发量1900 mm,年均气温6.5℃,≥10℃年积温3190℃,无霜期151 d;年平均风速3.4 m·s<sup>-1</sup>,每年扬沙天气在20~30 d。地貌特征为起伏的沙丘地和平缓的草甸或农田交错分布,土壤多为风沙土或沙质草甸土。研究区天然植物群落以中旱生植物为主,主要植物种有:沙米、狗尾草(*Setaria viridis*)、大果虫实(*Corispermum macrocarpum*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)和达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)等<sup>[2,12]</sup>。

### 1.2 试验设计

试验地设置在中国科学院奈曼沙漠化研究站的

水分平衡场内。该水分平衡场由数个2 m×2 m×2 m的无底水泥池构成,池内填有风沙土。沙米种子采自2009年秋季,2010年4月将种子条播于水泥池内,行距30 cm。为保证出苗,播种后每3~5 d用喷壶浇一次水,每次浇水量500 mL,以保持沙面经常湿润。出苗后进行间苗,每个水泥池分别保留300株长势相似的幼苗。于5月中旬风沙活动强烈期对试验材料进行沙埋处理,沙子均来源于当地的流动沙丘,此时幼苗平均株高为(6.0±0.2) cm。沙埋试验设计为CK、A、B、C、D、E、F、G、H和I等10个处理,沙埋深度分别为株高的0%、25%、50%、75%、100%、133%、166%、200%、233%和266%。沙埋时,先在池内插入带有刻度的木桩,然后根据木桩刻度小心将沙子埋至设计深度。试验采用随机区组排列,4个重复。沙埋后浇一次透水后不再浇水,靠自然降水补充其土壤水分。

### 1.3 测定项目及方法

试验期间,每天对沙埋处理后的植物叶片进行观察,记录萎蔫及死亡情况。对埋深超过株高的处理,小心地扒开覆沙进行观察,然后将沙子覆上。于沙埋后的第10天剪取部分植株地上部叶片,一部分材料即刻带回实验室,测定细胞膜透性和叶片相对含水量,另一部分材料迅速用纸包裹后置于液氮罐内,用于脯氨酸和可溶性糖含量,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性的分析。SOD活性采用氯化硝基四氮唑蓝光还原法,POD活性采用愈创木酚法,CAT活性采用碘量法,丙二醛含量采用硫代巴比妥酸法,游离脯氨酸含量采用茚三酮比色法,可溶性糖含量采用蒽酮比色法,膜透性采用电导率法<sup>[13-14]</sup>。在8月底植物生长末期,测量其存活率、株高、地上生物量等指标。

### 1.4 数据处理

应用SPSS 13.1软件进行数据的统计分析,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的差异(α=0.05),用Pearson相关系数评价不同因子间的相互关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 沙埋对沙米幼苗存活率、株高和生物量的影响

由图1可以看出,随着沙埋深度的增加,沙米幼苗的存活率、株高和生物量总体呈下降趋势。其中,A处理的幼苗存活率、株高、生物量均较对照显著增加,增加幅度为生物量>存活率>株高;而B~D处理

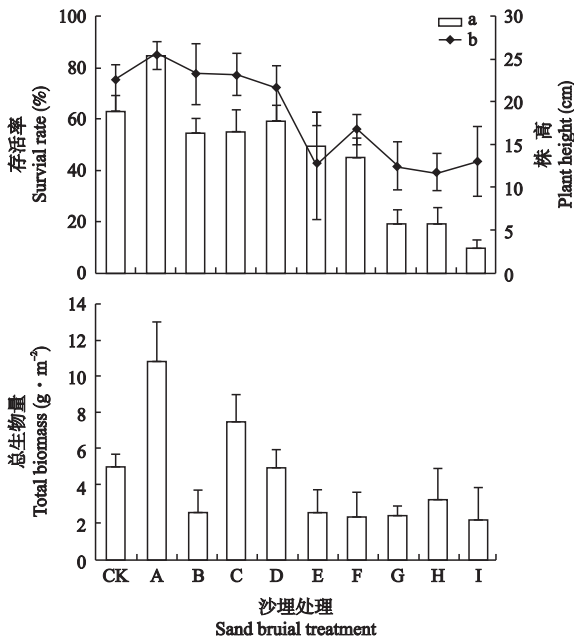


图1 沙米幼苗的存活率(a)、株高(b)和生物量的变化

Fig. 1 Changes of survival rate (a), plant height (b) and biomass of *Agriophyllum squarrosus* seedlings.

CK; 0% h; A; 25% h; B; 50% h; C; 75% h; D; 100% h; E; 133% h; F; 166% h; G; 200% h; H; 233% h; I; 266% h. 下同  
The same below.

沙米幼苗的存活率、株高和生物量与对照相比差异不显著。沙埋深度超过株高以后,其存活率、株高和生物量均较对照显著下降,但E~I处理的株高和生物量的差异均没有达到显著水平,而E和F处理幼苗的存活率显著高于G~I处理。

## 2.2 沙埋对沙米幼苗叶片含水量、丙二醛、膜透性的影响

由图2可以看出,沙埋对沙米幼苗叶片相对含水量、丙二醛含量和膜透性的影响。其中,沙米幼苗叶片的相对含水量在A~C处理中与对照差异不显著,D处理时大幅度升高,之后随着埋深进一步增加而逐渐下降,至I处理时仍显著高于对照;叶片丙二醛含量在A~E处理中变化不明显,E处理之后明显增加;叶片的膜透性随着沙埋深度的增加而逐步升高,I处理时已较对照高出140%。

表1 沙米幼苗各指标之间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients among different indices of *Agriophyllum squarrosus* seedlings

项目 Item	存活率 Survival rate	株高 Height	生物量 Biomass	脯氨酸 Proline	可溶性糖 Sugar	SOD	CAT	POD	丙二醛 MDA	膜透性 MP
株高 Height	0.861 **	1								
生物量 Biomass	0.736 *	0.720 *	1							
丙二醛 MDA	-0.897 **	-0.777 **	-0.476	0.285	-0.388	0.171	-0.748 *	0.372	1	
膜透性 MP	-0.862 **	-0.880 **	-0.626	0.687 *	0.011	0.282	-0.781 *	0.674 *	0.842 **	1
叶片相对含水量 RWC	-0.175	-0.457	-0.262	0.902 **	0.457	0.841 **	-0.365	0.762 *	0.175	0.568

MP: Membrane permeability; RWC: Leaf relative water content. \*  $P < 0.05$ ; \*\*  $P < 0.01$ .

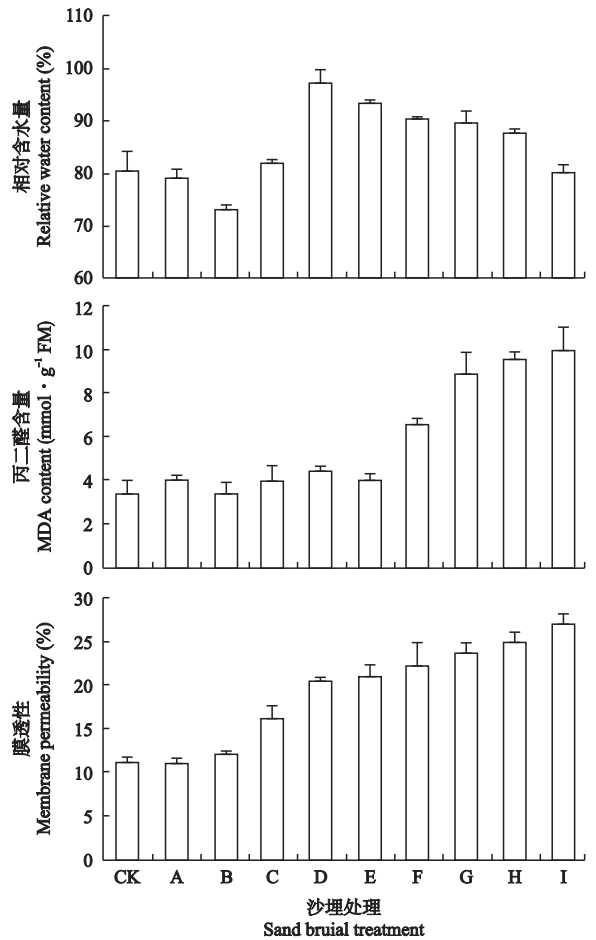


图2 沙米幼苗叶片的相对含水量、丙二醛含量和膜透性的变化

Fig. 2 Changes in leaf relative water content, MDA content and membrane permeability of *Agriophyllum squarrosus* seedlings.

## 2.3 沙埋对沙米幼苗叶片脯氨酸和可溶性糖含量的影响

由图3可以看出,随着沙埋深度的增加,沙米幼苗叶片的脯氨酸含量先增加,在D处理达到最大值(1.970  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{FM}$ )后趋于下降,但是在I处理时其含量仍显著高于对照;可溶性糖含量呈先增加后下降的趋势,在E处理达到最大值后急剧下降,F处理之后其含量已显著低于对照;而可溶性糖/脯氨酸比值总体呈下降的趋势。

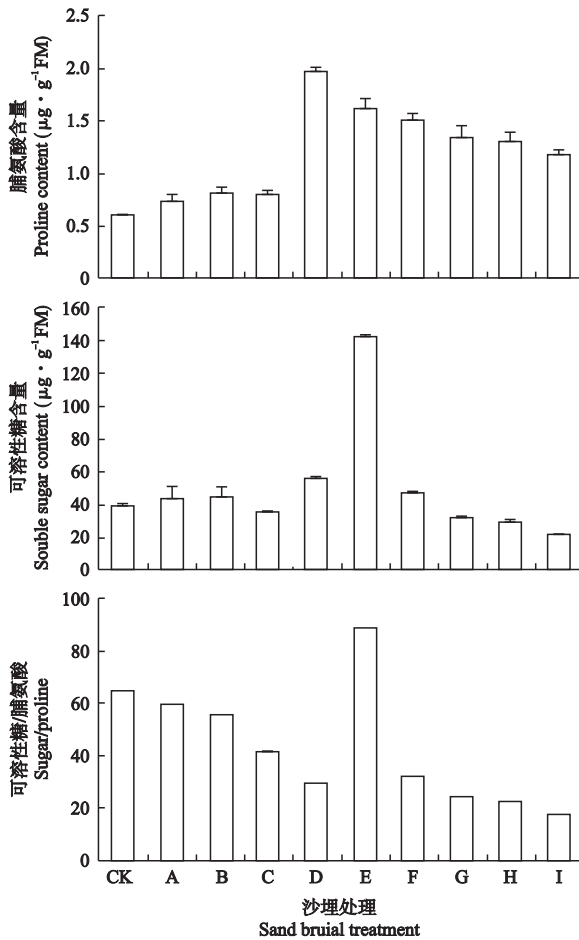


图3 沙米幼苗叶片的脯氨酸和可溶性糖含量及其比值

**Fig. 3** Changes in soluble sugar, proline content and soluble sugar/proline ratio of *Agriophyllum squarrosum* seedlings.

#### 2.4 沙埋对沙米幼苗叶片保护酶活性的影响

由图4可以看出,随着沙埋深度的增加,沙米幼苗叶片的超氧化物歧化酶(SOD)活性增强,在D处理达到最大值后趋于下降,至I处理时仍显著高于对照;过氧化物酶(POD)活性在A~C处理时略有下降,D处理开始回升,E处理达到最大值后趋于下降,至I处理时其活性仍显著高于对照;过氧化氢酶(CAT)活性则随沙埋深度增加而显著下降,G~I处理时其活性已不足对照的25%。

#### 2.5 沙米幼苗生物生理指标的相关分析

由表1可以看出,沙埋处理下,沙米幼苗的存活率和株高与丙二醛含量和膜透性均呈极显著负相关。丙二醛含量与CAT活性呈极显著正相关;膜透性与脯氨酸含量、POD活性呈显著正相关,与丙二醛含量呈极显著正相关,而与CAT活性呈显著负相关。脯氨酸含量和SOD活性与叶片含水量呈极显著正相关,与POD活性呈显著相关。

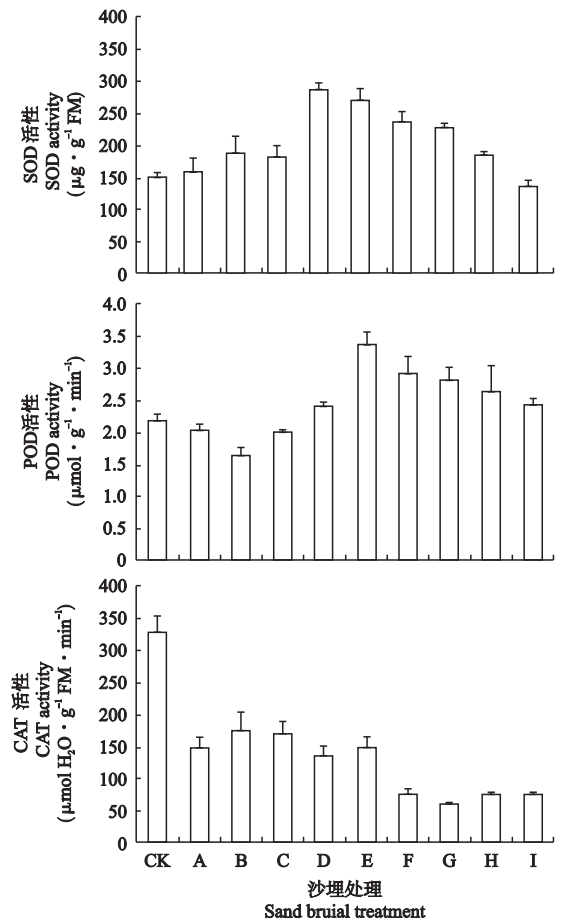


图4 沙米幼苗叶片的SOD、POD和CAT活性的变化

**Fig. 4** Changes in activities of SOD, POD and CAT of *Agriophyllum squarrosum* seedlings under different treatments.

### 3 讨论

#### 3.1 沙埋对沙米幼苗生长特性的影响及其适应性

沙埋是沙漠或沙地中植物经常面临的事件,能够改变植物周围的土壤温度、湿度、硬度和透光率等环境条件,从而影响植物的生长<sup>[3-4]</sup>。但是,不同植物耐受沙埋的能力及其对沙埋的适应性存在较大的差异<sup>[2,6]</sup>。例如,当沙埋为株高的33%时,无芒雀麦(*Bromus inermis*)和小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)幼苗的存活率为100%,且株高和生物量均较非沙埋(对照)明显增加;当沙埋深度达到株高的100%时,无芒雀麦幼苗全部死亡,埋深达到株高的133%时,小叶锦鸡儿幼苗全部死亡<sup>[15-16]</sup>。本研究中,在沙埋深度为株高25%的情况下,沙米的存活率、株高、生物量均较对照有明显增加;沙埋深度与株高相同时,不仅相对存活率高达94.8%,而且株高和生物量与对照没有显著差异;当沙埋深度超过株高以后,其存活率、株高和生物量才明显下降。但



是,即使沙埋深度达到株高的 266%,其存活率、株高和生物量仍然达到对照的 14.8%、58.7% 和 42.9%。这说明与非沙生植物相比,沙米具有很强的耐沙埋能力<sup>[2,13]</sup>,其幼苗能够耐受埋深超过株高 266% 的沙埋;沙米对适度沙埋具有较强的适应能力,只有遭受全埋以后其存活和生长才会受到显著影响。这主要是因为沙米作为沙生植物,在长期风沙环境中已经形成了耐旱、耐贫瘠、耐风沙、喜适度沙埋的特点,具有较强的耐沙埋能力<sup>[2,17]</sup>。当沙埋深度超过其株高以后,沙米的生长受到严重抑制,一方面是因为随着沙埋深度的增加,植物需要更多的能量才能破土而出,而植物幼苗阶段储备的能量较少,较厚的沙埋往往使其无法破土,导致其死亡率增加<sup>[4,18]</sup>;另一方面,由于受沙埋的叶片无法进行光合作用,即使依靠原有能量储备破土而出,光合面积也较非沙埋植株大幅度下降,使其光合作用降低<sup>[3,5]</sup>。此外,沙埋后土壤硬度增加、空气流动性下降也会抑制其幼苗的生长<sup>[18-19]</sup>。

### 3.2 沙米幼苗对沙埋的生理响应

已有研究表明,当植物受到干旱、寒冷、高温等逆境胁迫时,细胞内氧自由基产生和清除的平衡会遭到破坏,使氧自由基大量积累,从而造成膜脂脂肪酸中的不饱和键被过氧化而形成丙二醛。这种膜脂过氧化作用的增强是造成细胞膜伤害,导致细胞死亡的重要原因之一<sup>[2,20]</sup>。本研究中,当埋深低于株高时,沙米体内的丙二醛含量和膜透性变化不明显;当埋深达到其株高 133% 以后,丙二醛含量和膜透性均大幅度增加,幼苗死亡率也显著增加,生长受到抑制。相关分析表明,沙米幼苗存活率的降低和生长受抑与其体内丙二醛含量的大量积累和膜透性的增强呈显著负相关,而膜透性与丙二醛含量的变化呈极显著正相关。这说明严重沙埋下植物体内丙二醛含量的大量积累导致了细胞膜受损,而细胞膜的受损是导致沙米死亡率增加和生长受抑的主要生理机制<sup>[19-20]</sup>。这与周瑞莲和王海鸥<sup>[20]</sup>有关干旱、高温胁迫对沙米生理影响的研究结果一致,说明沙米对沙埋胁迫和干旱、高温胁迫具有类似的生理响应特征。

在干旱和盐分导致的水分胁迫中,植物通常会通过增加细胞溶质含量、降低细胞质渗透势来防止水分的过度散失,从而保持细胞的膨压和生长<sup>[21-22]</sup>。本研究表明,沙埋并未造成沙米的水分胁迫。在沙埋深度为株高 25% ~ 75% 处理下,沙米叶片含水量与对照没有明显差别;而沙埋深度超过株高后,其叶片含水量反而高于对照。其原因可能是:

沙埋使根层的土壤水分明显增加,不会造成植物的水分亏缺<sup>[8,16]</sup>。但是,随着沙埋深度的增加,沙米幼苗体内的渗透调节物质含量发生了明显的变化。其中,脯氨酸含量大幅度增加,可溶性糖含量波动式下降,可溶性糖/脯氨酸比值明显降低。相关分析表明,脯氨酸和可溶性糖含量均与叶片水分含量、膜透性呈显著正相关,其中仅脯氨酸含量与之相关性达到显著水平。这说明在受到沙埋胁迫时,脯氨酸对增加叶片含水量,降低细胞渗透势,防止细胞质渗漏过程起到了积极的作用<sup>[12,20]</sup>。

在逆境条件下,植物体内氧自由基的积累可以激活抗氧化酶保护系统,增强其抗氧化酶活性,起到清除活性氧、减轻其对机体的伤害作用<sup>[3,21]</sup>。本研究结果表明,受到沙埋胁迫后,植株中 SOD 和 POD 活性均表现为先增加后下降,在 233% 埋深下其活性仍然显著高于对照,而 CAT 活性则总体呈下降趋势。相关分析结果显示,SOD 和 POD 活性均与丙二醛和膜透性的变化呈正相关,其中 POD 与之相关性达到显著水平,而 CAT 活性与之呈显著负相关。这与周瑞莲等<sup>[12]</sup>的研究结果相一致,而与刘建新等<sup>[22]</sup>和王茅雁等<sup>[23]</sup>对水分胁迫下苜蓿、玉米幼苗保护酶活性的变化相反。这说明受到沙埋胁迫后,虽然植株中 SOD 和 POD 活性共同起到了抑制膜脂过氧化的作用,但以 POD 活性为主,CAT 活性没有发挥作用<sup>[12]</sup>;另一方面,同一植物种的保护酶系统对不同类型的环境胁迫具有类似的反应,而不同植物种的保护酶系统对不同类型环境胁迫清除活性氧的机制存在一定的差异<sup>[12,22,24]</sup>。

## 4 结 论

沙米的耐沙埋能力很强,轻度沙埋(埋深不超过株高 75%)下其幼苗的存活率、株高和生物量均有所提高,当沙埋超过其株高 166% 时,仍有部分幼苗存活。受到轻度沙埋胁迫时,沙米的丙二醛含量和膜透性变化不明显,沙埋厚度增加则导致丙二醛含量和膜透性大幅度增加,使细胞膜受损;沙埋胁迫下,其 SOD 和 POD 活性和脯氨酸含量大幅度增加,共同抑制膜质过氧化和防止细胞质渗漏;严重沙埋胁迫下,幼苗死亡率增加、生长受抑,主要源于部分幼苗无法破土而出、光合面积下降和细胞膜受损。

### 参考文献

- [1] Wang T (王 涛). Desert and Desertification Control in China. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology

- Press, 2002 (in Chinese)
- [2] Zhao H-L (赵哈林), Zhao X-Y (赵学勇), Zhang T-H (张铜会), *et al.* Plants Adaptation Strategies and Vegetation Stability in the Desertification Process. Beijing: China Ocean Press, 2004 (in Chinese)
- [3] Wang J (王进), Zhou R-L (周瑞莲), Zhao H-L (赵哈林), *et al.* Growth and physiological adaptation of *Messerschmidia sibirica* to sand burial on coastal sandy. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32** (14): 4291-4299 (in Chinese)
- [4] Benvenuti S, Macchia M, Miele S. Light, temperature and burial depth effects on *Rumex obtusifolius* seed germination and emergence. *Weed Research*, 2001, **41**: 177-186
- [5] Harris D, Davy A J. Seedling growth in *Elymus farctus* after episodes of burial with sand. *Annals of Botany*, 1987, **60**: 587-593
- [6] Li Q-Y (李秋艳), Zhao W-Z (赵文智). Seedling emergence and growth responses of five desert species to sand burial depth. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(6): 1802-1809 (in Chinese)
- [7] Ma H-Y (马红媛), Liang Z-W (梁正伟), Yan C (闫超), *et al.* Effects of sand-burial depth on *Leymus chinensis* seedlings emergence and growth. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2007, **26**(12): 2003-2007 (in Chinese)
- [8] Zhao W-Z (赵文智), Liu L-M (刘志民). Responses of growth and reproduction of *Sophora moorcroftiana* to altitude and sand-burying in Tibet. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, **22**(1): 134-139 (in Chinese)
- [9] Mi Z-Y (米志英), Zhou D-D (周丹丹), Wu Y-D (吴亚东). Influence of wind erosion and sand bury on the morphological characteristics of *Salix psammophila*. *Inner Mongolia Forestry Science & Technology* (内蒙古林业科技), 2005, **31**(1): 9-13 (in Chinese)
- [10] Shi L, Zhang ZJ, Zhang CY. Effects of sand burial on survival, growth, gas exchange and biomass allocation of *Ulmus pumila* seedlings in the Hunshandak Sandland, China. *Annals of Botany*, 2004, **94**: 553-560
- [11] Xu B (徐斌), Liu X-E (刘杏娥), Sun Z-Y (孙主义), *et al.* Study on the anatomical properties and variation of sand covered poplar grown in the beaches of Yangtze River. *Forest Research* (林业科学研究), 2005, **18**(6): 738-742 (in Chinese)
- [12] Zhou R-L (周瑞莲), Zhao H-L (赵哈林), Wang H-O (王海鸥). The physiological mechanism of plant succession in Kerqin Sandy Land. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 2001, **18**(3): 13-19 (in Chinese)
- [13] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [14] Zhang Z-L (张志良), Zhai W-J (翟伟菁). Experimental Guide of Plant Physiology. Beijing: Higher Education Press, 2003 (in Chinese)
- [15] Zhao H-L (赵哈林), He Y-H (何玉惠), Yue G-Y (岳广阳), *et al.* Effects of wind blow and sand burial on the seedling growth and photosynthetic and transpiration rates of desert plants. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2010, **29**(3): 413-419 (in Chinese)
- [16] Yang H-L (杨慧玲), Cao Z-P (曹志平), Dong M (董鸣), *et al.* Effects of sand burying on caryopsis germination and seedling growth of *Bromus inermis* L. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(11): 2438-2443 (in Chinese)
- [17] Zhang J-Y (张继义), Zhao H-L (赵哈林), Cui J-Y (崔建垣), *et al.* Biomass of *Agriophyllum squarrosum* community and its function on mobile sand dune in Horqin Sandy Land. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2003, **17**(3): 251-254 (in Chinese)
- [18] Zhao H-L (赵哈林). Desert Ecology. Beijing: Science Press, 2010 (in Chinese)
- [19] Maun MA. Adaptations of plants to burial in coastal sand dunes. *Canadian Journal of Botany*, 1998, **76**: 713-738
- [20] Zhou R-L (周瑞莲), Wang H-O (王海鸥). Correlation between resistance to dehydration and lipid peroxidation of desert plants under atmosphere dehydration and high temperature stresses. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 1999, **19**(suppl. 1): 60-64 (in Chinese)
- [21] Hernandez JA, Almansa MS. Short-term effects of salt stress on antioxidant systems and leaf water relations of pea leaves. *Plant Physiology*, 2002, **115**: 251-257
- [22] Liu J-X (刘建新), Wang X (王鑫), Wang F-Q (王凤琴). Effect of water stress on osmotic adjustment and activity of protective enzymes in alfalfa seedlings. *Pratacultural Science* (草业科学), 2005, **22**(3): 18-21 (in Chinese)
- [23] Wang M-Y (王茅雁), Shao S-Q (邵世勤), Zhang J-H (张建华), *et al.* Effect of water stress upon the activities of protective enzyme system and the structures of membrane system in maize. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica* (华北农学报), 1995, **10**(2): 43-49 (in Chinese)
- [24] Li X (李霞), Yan X-F (阎秀峰), Yu T (于涛). Effects of water stress on protective enzyme activities and lipid peroxidation in *Phellodendron amurense* seedlings. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(12): 2353-2356 (in Chinese)

---

作者简介 赵哈林,男,1954年生,研究员.主要从事沙漠生态学,发表论文370余篇. E-mail: resdiv@lzb.ac.cn

责任编辑 李凤琴

---