

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 14 期 Vol.32 No.14 **2012**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 14 期

2012 年 7 月 (半月刊)

## 目 次

海滨沙地砂引草对沙埋的生长和生理适应对策.....	王 进,周瑞莲,赵哈林,等 (4291)
外源 K <sup>+</sup> 和水杨酸在缓解融雪剂对油松幼苗生长抑制中的效应与机理 ...	张 莹,李法云,严 霞,等 (4300)
钱塘江中游流域不同空间尺度环境因子对底栖动物群落的影响.....	张 勇,刘朔孺,于海燕,等 (4309)
贡嘎山东坡非飞行小型兽类物种多样性的垂直分布格局.....	吴永杰,杨奇森,夏 霖,等 (4318)
基于斑块的红树林空间演变机理分析方法.....	李春干,刘素青,范航清,等 (4329)
亚热带六种天然林树种细根养分异质性.....	熊德成,黄锦学,杨智杰,等 (4343)
浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应 .....	何 月,樊高峰,张小伟,等 (4352)
亚热带 6 种天然林树种细根呼吸异质性.....	郑金兴,熊德成,黄锦学,等 (4363)
亚高山/高山森林土壤有机层氨氧化细菌和氨氧化古菌丰度特征 .....	王 奥,吴福忠,何振华,等 (4371)
耕作方式对紫色水稻土轻组有机碳的影响.....	张军科,江长胜,郝庆菊,等 (4379)
火烧对长期封育草地土壤碳固持效应的影响.....	何念鹏,韩兴国,于贵瑞,等 (4388)
闽江河口潮汐湿地二氧化碳和甲烷排放化学计量比.....	王维奇,曾从盛,仝 川,等 (4396)
2010 年夏季珠江口海域颗粒有机碳的分布特征及其来源 .....	刘庆霞,黄小平,张 霞,等 (4403)
新疆冷泉沉积物葡萄糖利用细菌群落多样性的稳定同位素标记分析.....	楚 敏,王 芸,曾 军,等 (4413)
土壤微生物群落多样性解析法:从培养到非培养.....	刘国华,叶正芳,吴为中 (4421)
伊洛河河岸带生态系统草本植物功能群划分 .....	郭屹立,卢训令,丁圣彦 (4434)
濒危植物蒙古扁桃不同地理种群遗传多样性的 ISSR 分析 .....	张 杰,王 佳,李浩宇,等 (4443)
强潮区较高纬度移植红树植物秋茄的生理生态特性.....	郑春芳,仇建标,刘伟成,等 (4453)
冬季高温对白三叶越冬和适应春季“倒春寒”的影响 .....	周瑞莲,赵 梅,王 进,等 (4462)
中亚热带细柄阿丁枫和米槠群落细根的生产和死亡动态.....	黄锦学,凌 华,杨智杰,等 (4472)
欧美杨水分利用效率相关基因 <i>PdEPF1</i> 的克隆及表达 .....	郭 鹏,金 华,尹伟伦,等 (4481)
再力花地下部水浸提液对几种水生植物幼苗的化感作用.....	缪丽华,王 媛,高 岩,等 (4488)
无致病力青枯雷尔氏菌对烟草根系土壤微生物脂肪酸生态学特性的影响.....	郑雪芳,刘 波,蓝江林,等 (4496)
基于更新和同化策略相结合的遥感信息与水稻生长模型耦合技术的研究.....	王 航,朱 艳,马孟莉,等 (4505)
温度和体重对克氏双锯鱼仔鱼代谢率的影响.....	叶 乐,杨圣云,刘 敏,等 (4516)
夏季西南印度洋叶绿素 a 分布特征.....	洪丽莎,王春生,周亚东,等 (4525)
大沽排污河生态修复河道水质综合评价及生物毒性影响.....	王 敏,唐景春,朱文英,等 (4535)
李肖叶甲成虫数量及三维空间格局动态.....	汪文俊,林雪飞,邹运鼎,等 (4544)
<b>专论与综述</b>	
基于景观格局的城市热岛研究进展 .....	陈爱莲,孙然好,陈利顶 (4553)
沉积物质量评价“三元法”及其在近海中的应用 .....	吴 斌,宋金明,李学刚,等 (4566)
<b>问题讨论</b>	
中国餐厨垃圾处理的现状、问题和对策 .....	胡新军,张 敏,余俊锋,等 (4575)
<b>研究简报</b>	
稻秸蓝藻混合厌氧发酵沼液及其化学物质对尖孢镰刀菌西瓜专化型生长的影响.....	刘爱民,徐双锁,蔡 欣,等 (4585)
佛山市农田生态系统的生态损益.....	叶延琼,章家恩,秦 钟,等 (4593)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 314 \* zh \* P \* ¥70.00 \* 1510 \* 33 \* 2012-07



**封面图说:** 噶龙山南坡的高山湖泊——喜马拉雅山南坡的噶龙山光照强烈、雨量充沛,尽管是海拔 4500 多米的高寒地区,山上的草甸依然泛着诱人的翠绿色,冰川和雪山的融水汇集在山梁的低洼处形成了一个又一个的高山湖泊,由于基底的差别和水深的不同,使得纯净清澈的冰雪融水在湖里呈现出不同的颜色,湖面或兰或绿,颜色或深或浅,犹如一块块通透透明的翡翠镶嵌在绿色的绒布之中。兰天下面,白云落在山间,通往墨脱的公路像丝带一样随随便便地缠绕着,一幅美丽的自然生态画卷就这样呈现在你的面前。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201106270948

王进, 周瑞莲, 赵哈林, 赵彦宏, 侯玉萍. 海滨沙地砂引草对沙埋的生长和生理适应对策. 生态学报, 2012, 32(14): 4291-4299.

Wang J, Zhou R L, Zhao H L, Zhao Y H, Hou Y P. Growth and physiological adaptation of *Messerschmidia sibirica* to sand burial on coastal sandy. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(14): 4291-4299.

## 海滨沙地砂引草对沙埋的生长和生理适应对策

王 进<sup>1</sup>, 周瑞莲<sup>1,\*</sup>, 赵哈林<sup>2</sup>, 赵彦宏<sup>1</sup>, 侯玉萍<sup>1</sup>

(1. 鲁东大学生命科学学院, 烟台 264025; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

**摘要:**在 2009 和 2010 年春夏季通过对烟台海滨沙地自然生长的耐沙埋植物砂引草 (*Messerschmidia sibirica* Linn) 进行不同厚度 (1/3 株高-轻度沙埋、2/3 株高-中度沙埋、3/3 株高-重度沙埋) 沙埋试验, 并测定沙埋过程中土壤温度、土壤含水量、叶片鲜重 (FW)、干重 (DW)、植株相对高度 (%)、叶片细胞膜透性、相对含水量、(丙二醛)MDA、抗氧化酶活力 (过氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT))、脯氨酸、可溶性糖含量的变化以探讨砂引草抗沙埋的生长和生理调节策略, 为未来砂引草的科学管理和应用提供理论指导。结果表明, 在沙埋第 5 天、第 10 天, 随着沙埋厚度的增加土壤温度下降, 土壤含水量增加, 植株相对高度和整株砂引草叶片 FW 和 DW 呈上升趋势, 同一植株沙上叶片 FW、DW 不断增加, 沙下叶片 FW、DW 则不断减少。在沙埋第 5 天, 不同厚度沙埋处理的植株叶片细胞膜透性和 MDA 含量均较对照低, 而整株植物叶片 SOD、CAT 活力和脯氨酸含量均较对照高。同一植株沙下叶片细胞膜透性、MDA、脯氨酸含量及 SOD 和 CAT 活力均低于沙上叶片。研究表明, 轻度和中度沙埋使沙上叶片受到地面热辐射、干旱、高温胁迫影响, 导致叶片含水量下降, 膜脂过氧化加强, 膜受损。但同时叶片中快速激活的保护酶和积累的脯氨酸抑制膜脂过氧化可能是保护沙埋后沙上叶片能快速生长的重要生理调控机理。在重度全埋枝叶处于沙下时, 沙下缺氧和黑暗抑制了叶片呼吸作用和光合作用, 同时缺氧也抑制了叶片对营养物质的消耗使叶片成为茎尖生长的物质和能量供体, 促使暗中茎顶端不断的延伸生长冲出沙土再生。砂引草耐全埋的再生能力进一步表明, 砂引草在海岸沙丘固沙、保滩、护岸和植被恢复上将具有重要开发和应用前景。

**关键词:**沙埋; 砂引草; 生长策略; 生理策略

## Growth and physiological adaptation of *Messerschmidia sibirica* to sand burial on coastal sandy

WANG Jin<sup>1</sup>, ZHOU Ruilian<sup>1,\*</sup>, ZHAO Halin<sup>2</sup>, ZHAO Yanhong<sup>1</sup>, HOU Yuping<sup>1</sup>

1 College of Life Sciences, Ludong University, Yantai 264025, China

2 Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

**Abstract:** *Messerschmidia sibirica* Linn, Siberian sea rosemary, may be useful in the restoration and protection of sand dunes. We explored its ability to withstand varying levels of sand burial in the Yan Tai coastal dune in the spring and summer of 2009 and 2010. Four levels of sand burial treatments were set up: no-sand burial (control), light sand burial (1/3 of plant height), moderate sand burial (2/3 of plant height) and severe sand burial (plant fully covered by sand). Changes in soil temperature, soil moisture, fresh weight (FW), dry weight (DW), relative plant height, plasma membrane permeability, MDA content, osmotic regulation, and activity of antioxidant enzymes in the leaves of plants in different levels of sand burial were investigated to elucidate the strategies used to maintain physiological and biochemical processes during growth in the different environments. Soil temperatures below sand decreased while soil water content increased with increasing levels of sand burial. Plants in light and moderate sand burials were taller than controls. In

基金项目: 国家 973 课题 (009CB421303); 国家自然科学基金资助项目 (30972422)

收稿日期: 2011-06-27; 修订日期: 2012-01-10

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhourl@hotmail.com



individual plants, the FW and DW of leaves above sand increased while FW and DW of leaves below sand decreased. On the 5<sup>th</sup> day after sand burial, the leaves of whole plants in each of the three levels of sand burial had lower membrane permeability, MDA and proline contents and higher levels of activities of SOD and CAT than controls. Also, in individual plants, membrane permeability, MDA and proline contents, and activities of SOD and CAT in the leaves below sand were lower than in leaves above sand. The decrease in these physiological indicators was therefore correlated with increases in soil moisture and lower soil temperatures. Leaves above sand appeared to suffer from stronger ground thermal radiation, drought stress, and high temperature.

These findings suggest that under light and moderate sand burial, antioxidant enzymes and proline play an important physiological regulating role in retarding lipid peroxidation and protect the leaves above sand, allowing them to grow rapidly and helping the plant avoid further sand burial. Moreover, under severe sand burial, although darkness and low oxygen limit photosynthesis and respiration of the buried leaves, those leaves can keep more nutrients to transfer to the apex of the shoot to make it grow and emerge above sand. Our results confirm that *Messerschmidia sibirica* Linn has a high resistance to even severe sand burial and uncovers some of the physiological strategies employed in this resistance. Thus it may be a very suitable plant for vegetation restoration, sand fixation, and protecting beaches in coastal dunes.

**Key Words:** sand burial; *Messerschmidia sibirica* Linn; growth strategy; physiological strategy

海岸沙地是海岸沙滩在强劲的风力作用下形成的,这种风沙活动引起的沙埋胁迫是控制沙生植被分布和组成的重要因素<sup>[1]</sup>,Moreno-Casasola<sup>[2]</sup>在研究墨西哥海岸沙埋对植物分布的影响时发现,*Chamaecrista ehamaecristoides*能够在沙埋中生存,而*Palafoxia lindenii*和*Croton punctatus*则不能,说明沙埋能够淘汰不能忍受沙埋的物种,减少不能忍受沙埋的物种的相对多度,增加耐沙埋物种的多度<sup>[3]</sup>。关于为何这些植物能在沙埋下维持生存?它们对沙埋的适应对策是什么成为人们关注的焦点。

关于沙漠植物种子萌发生长与沙埋的关系研究发现,许多沙生植物种子在适度沙埋下可萌动,生长势更高<sup>[4-7]</sup>。幼苗出苗率和沙埋深度还遵循着指数方程关系<sup>[8]</sup>。而且种子大小和其耐沙埋厚度存在正相关关系,大种子耐沙埋厚度大于小种子,如柠条和花棒种子重量大,耐沙埋厚度为6 cm,小画眉的种子重量小,耐沙埋厚度为3 cm<sup>[9]</sup>。Maun和Riach<sup>[10]</sup>的研究也发现,*Calamovilfa longifolia*种子在1—2 cm的沙埋深度也有高的出苗率,并指出由于浅埋能在种子周围维持一定的湿度,保护种子和幼苗免得变干而使沙埋种子比没沙埋种子有更高的发芽率<sup>[11]</sup>。但深度沙埋由于易造成土壤缺氧和低温从而阻碍种子萌发<sup>[12-13]</sup>。对沙埋和植株生长的研究发现,适量的沙埋与供水不仅可以促进幼苗生长<sup>[14]</sup>,促进不定根形成和生长,增强根系吸收水分和养分的能力<sup>[15]</sup>,也能促进砂生槐萌蘖的更新和中间锦鸡儿地上茎和地下根系的生长和生物产量的提高<sup>[16-18]</sup>。但随着沙埋深度的增加,植物叶片生物量比逐渐降低,茎生物量比却逐渐增加<sup>[19]</sup>。上述研究不仅主要集中于研究沙埋对种子萌发的影响,而且对沙埋对植物生长的影响也仅局限于对不定根生长的了解。目前国内外关于植物抗沙埋生长的生理调节机理研究报道较少,尤其是海岸沙地耐沙埋植物的研究鲜有报道。

砂引草(*Messerschmidia sibirica* Linn)为紫草科(Boraginaceae)砂引草属(*Messerschmidia*)的一个种,在山东半岛主要分布于海滨沙地。该种植物具细长的根状茎,匍匐或斜升。水平根状茎多分布于表土下15—20 cm处,伸展可达1—2 m,其垂直根可分布到1 m左右深处,并主要借根状茎的延伸进行无性繁殖。砂引草还是一种泌盐植物在保护生态环境方面发挥着不可替代的作用,如促淤、保滩、护岸以抵御海水侵蚀,以及固沙、防风、防治沙化的作用<sup>[20]</sup>。本文拟通过对烟台海滨沙地砂引草不同厚度沙埋下植株高度、叶片鲜重(FW)、干重(DW)、及叶片细胞膜透性、抗氧化酶活力和渗透调节物含量的对比分析,探讨砂引草耐沙埋生理调控机制和生长适应对策,丰富沙漠科学理论为我国海岸带环境修复,天然沙地砂引草科学管理,以及抗风沙植物的选育提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区自然概况

烟台市地处山东半岛中部,位于东经  $119^{\circ}34'$ — $121^{\circ}57'$ ,北纬  $36^{\circ}16'$ — $38^{\circ}23'$ 。该地区属于温带季风气候,并且有显著的海洋性,年平均降水量为 651.9 mm,主要集中在 7—8 月,占年降雨量的 49%;年平均气温  $11.8^{\circ}\text{C}$ ,最热月为 8 月( $24.6^{\circ}\text{C}$ ),历年极端最高气温  $38.4^{\circ}\text{C}$ ,土壤 pH 值为 4.22—6.79。研究区位于烟台市夹河带桥一带的海滨沙地,地貌以平坦的沙滩和高低起伏的沙丘地为特征,土壤多为风沙土。天然群落以耐风沙植物为主,主要植物有筛草(*Carex kobomugi*)、砂引草等。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 试验材料的标记

在海滨沙地上选择砂引草典型地块为样地,除去杂草,将样地插牌作标记。沙埋之前,选择株高 30 cm 左右,长势均匀的植物若干株,并编号挂牌标记。用记号笔在每个植株近地处、1/3 处、2/3 处的茎部做标记,以便测定相对高度,并在所设梯度处,分别给其对生的叶片做好标记,两个对生叶分别在沙埋第 5 天和 10 天采集用于叶片 FW 和 DW 的测定。

#### 1.2.2 沙埋处理

试验设立 4 个沙埋梯度:0(对照-没沙埋);轻度沙埋(1/3 株高);中度沙埋(2/3 株高)和重度沙埋(全部沙埋),每个处理至少包含 15 株,每处理重复 3 次。沙埋处理,即将纸盒子按株高分别剪制成高 30 cm(重度沙埋)、20 cm(中度沙埋)、10 cm(轻度沙埋)面积约为  $1\text{--}2\text{m}^2$  的方框。按沙埋厚度选取方框将所选植株框起,然后收集地表干沙往框内外覆沙至框高,同时一边覆沙,一边尽量将叶片捋直。沙埋后将方框去除,沙埋区域周围再补充少量沙与地面成斜坡状与自然沙地成一体。最后将沙埋处理区域标记。

#### 1.2.3 生长势的测定和试验取材

生长势是反应沙埋植物生长状况的重要指标之一。在沙埋后的第 5 天及第 10 天,随机从标记的材料中选取植株,将沙子剔除,小心地从作记号的部位将植株从近地表处用剪刀剪下。迅速将其上标记的叶片取下,放于保鲜袋中用于测定鲜重(FW)和干重(DW),并用量尺测量各节位的高度以及总高度。同时迅速用剪刀将植株按沙埋处理的高度分成 3 段,一部分材料即刻带回实验室测细胞膜透性和叶片相对含水量,另一部分材料迅速包裹用液氮固定用于脯氨酸、可溶性糖含量, SOD、POD、CAT 活力的分析。根据所设立沙埋梯度,在沙埋厚度为 0、10、20、30cm 的部位放置温度计测定不同厚度沙埋沙土中土壤温度,从不同厚度沙埋处取土样测定土壤含水量。所有测定均重复 3 次以上。

### 1.3 样品分析

根据章加恩<sup>[21]</sup>的方法测定土壤温度和土壤含水量;根据电导率法测定细胞膜相对透性<sup>[22]</sup>;根据张治安<sup>[23]</sup>等方法测定叶片相对含水量。

酶液制备:称取待测的样叶于预冷研钵中,加入酶提取液(pH=7.8, 0.05 mmol/L 磷酸缓冲液),冰浴上研磨成匀浆,在 15000 r/min  $4^{\circ}\text{C}$  条件下离心 15 min,上清液用于抗氧化酶活力和 MDA、脯氨酸、可溶性糖含量的测定。采用氯化硝基四氮唑蓝(NBT)光还原法测定 SOD 活性<sup>[24]</sup>;采用愈创木酚法测定 POD 活性<sup>[25]</sup>;采用碘量法测定 CAT 活性<sup>[26]</sup>;采用硫代巴比妥酸法测定 MDA 含量<sup>[27]</sup>;采用茚三酮比色法测定游离脯氨酸含量<sup>[28]</sup>;采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量<sup>[29]</sup>。

### 1.4 数据处理

实验数据采用 3 个以上重复的平均值,用 SPSS 11.5 软件进行数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 沙埋对土壤温度和土壤水分的影响

在沙埋过程中对不同厚度沙埋下土壤温度和土壤水分的分析以了解沙埋对植物微生境的影响及与沙埋下植物生长的关系。结果表明,表层(0—5 cm)沙土由于强光辐射引起的水分蒸发而导致含水量很低,但沙

埋明显提高了土壤含水量(表1)。如中度沙埋,随着沙埋厚度增加土壤含水量分别增加了5倍和8倍。与土壤含水量相反,沙土表面温度较高(40℃),但随着沙埋厚度增加,沙土中温度降低,如中度沙埋,随沙埋厚度增加10cm和20cm,土壤温度分别下降了12℃和14℃。

表1 不同沙埋厚度下土壤含水量和土壤温度的变化

Table 1 Changes in soil moisture and soil temperature under different levels of sand burial									
项目 Item		对照 Control		轻度沙埋 Light sand burial		中度沙埋 Moderate sand burial		重度沙埋 Severe sand burial	
		5d	10d	5d	10d	5d	10d	5d	10d
土壤含水量/%	顶部 Top							0.2	1.6
Soil moisture	2/3处 2/3side					0.2a	1.5a	0.3b	3.3b
	1/3处 1/3side			0.2a	1.9a	3.8b	4.7b	8.0c	8.2c
	地表 Soil surface	0.3a	1.5a	1.6b	2.7b	4.8c	8.4c	8.2d	8.7c
土壤温度/℃	顶部							40.1	40.0b
Soil temperature	2/3处					40.2a	40.1a	27.9b	27.6b
	1/3处			40.1a	40.0a	28.0b	28.5b	25.1b	24.0b
	地表	40.1a	40.2a	27.7b	28.9b	24.3bc	24.2bc	20.0c	20.1c

2.2 不同厚度沙埋下砂引草生长和物质积累动态

由表2可以看出,沙埋促进了砂引草植株茎快速生长。经过5d轻度和中度沙埋处理,砂引草植株净增长高度分别比对照高27.0%和24.7%,但重度沙埋植株增高降低(3.1%)。沙埋10d后,对照植株略增高,但沙埋处理的沙上株高增加,而沙下植株叶片变黄,尤其是重度沙埋植株叶片全变黄,植株侧芽萌生,顶部呈畸形生长。

表2 不同厚度沙埋下砂引草叶片鲜重、干重、叶片相对含水量和植株相对高度变化

Table 2 Changes in fresh weight (FW), dry weight (DW) and relative water content (RWC) of the leaves and plant relative height (RH) of *Messerschmidia sibirica* Linn under different levels of sand burial

项目 Item		对照 Control		轻度沙埋 Light sand burial		中度沙埋 Moderate sand burial		重度沙埋 Severe sand burial	
		5d	10d	5d	10d	5d	10d	5d	10d
鲜重 FW	顶部 Top	310.7a	316.5a	313.6a	460.4b	227.4b	358.3c	<b>135.5c</b>	
(叶片)/mg	2/3处 2/3side	458.2a	504.2a	493.6b	580.9b	<b>316.9c</b>		<b>308.6c</b>	
	1/3处 1/3side	296.17a	373.0	<b>296.5b</b>		<b>289.4a</b>		<b>345.7c</b>	
干重 DW	顶部	29.1a	39.0a	48.13b	58.3b	36.4c	43.7c	<b>15.2d</b>	
(叶片)/mg	2/3处	62.2a	64.0a	63.2a	64.3b	<b>35.4c</b>		<b>27.6d</b>	
	1/3处	36.4a	38.4	<b>36.0a</b>		<b>32.1a</b>		<b>34.8a</b>	
相对株高 RH/%	顶部	53.1a	54.7a	49.0a	60.1a	55.2a	70.9a	<b>57.9b</b>	
	2/3处	31.6a	32.5a	32.1a	39.9a	<b>31.9a</b>		<b>27.4c</b>	
	1/3处	15.3a	12.8	<b>18.9b</b>		<b>12.9c</b>		<b>14.7d</b>	
相对含水量	顶部	76.9a	83.3a	79.8a	82.0a	80.3b	81.42a	<b>89.2c</b>	<b>92.1b</b>
RWC/%	2/3处	74.1a	83.8a	80.2b	84.2a	<b>85.8b</b>		<b>85.9b</b>	
	1/3处	79.4a	84.1a	<b>87.2b</b>		<b>85.8b</b>		<b>87.5b</b>	

黑体为沙下部位

与对照相比,沙埋5d和10d沙上叶片FW净增重明显高于对照。尤其是顶部叶片,在沙埋5d到10d期间对照顶部叶片增重5.8mg,而轻度和中度沙埋处理的顶部叶片分别净增147mg和130mg,分别是对照的25倍和22倍。轻度沙埋2/3处叶片净重也较对照高2倍。但沙下植物叶片FW趋于下降并低于对照。

植物叶片DW对沙埋的反应与FW相同。沙埋处理中,沙上植物叶片DW均增加,但增加幅度明显小于FW的增幅。沙埋5d,轻度和中度沙埋叶片DW分别较对照DW高66%和25%,但沙埋10d叶片DW净积累量与对照差异不大。而沙下植物叶片DW均较对照低,叶片DW下降幅度随沙埋厚度的加大而增加,如在植株2/3处,中度和重度沙埋叶片DW分别较对照低43%和56%。

研究表明,在沙埋处理中位于沙上的植物叶片含水量与对照叶片含水量差异不大,但均低于沙下植物叶片。沙下植物叶片含水量较高与沙下温度低,湿度高有关。

### 2.3 不同厚度沙埋下砂引草叶片细胞膜透性和 MDA 含量的变化

在正常情况下,植株上部叶片细胞膜透性略大于下部(表 3)。沙埋 5d,不同厚度沙埋处理的植株整株叶片细胞膜透性均低于对照,如植株平均叶片细胞膜透性较对照分别降低了 25% (轻度)、37% (中度)、54% (重度)。但同一植株沙上叶片细胞膜透性均高于沙下叶片,如轻度和中度沙埋沙上植物叶片细胞膜透性分别比沙下高 3.1% 和 38.3%。另外,植株同一部位则是没有沙埋的叶片细胞膜透性高于沙埋的,如在顶部和 2/3 处没有沙埋的叶片细胞膜透性平均比沙埋的叶片细胞膜透性分别高 94% 和 36%,沙埋降低了沙下叶片细胞膜透性。

同样发现,沙埋 5d。随沙埋厚度的增加,植株平均叶片 MDA 含量分别较对照降低了 10% (轻度)、14% (中度)、23% (重度)。但同一植株沙上叶片 MDA 含量不仅高于对照也高于沙下叶片,如轻度和中度沙埋沙上植物叶片 MDA 含量分别比沙下叶片 MDA 含量高 56% 和 17%。另外,植株同一部位没有沙埋的叶片 MDA 含量高于沙埋的,如在顶部和 2/3 处没有沙埋的叶片 MDA 含量平均比沙埋的叶片分别高 23% 和 101%。同样在沙埋 10d 叶片细胞膜透性的下降也伴随着叶片中 MDA 含量也普遍降低。

表 3 不同厚度沙埋下砂引草叶片细胞膜透性和 MDA 含量的变化

Table 3 Changes in cell membrane permeability and MDA content of *Messerschmidia sibirica* Linn under different levels of sand burial

测定项目 Testing item		对照 No-sand burial		轻度沙埋 Light sand burial		中度沙埋 Moderate sand burial		重度沙埋 Severe sand burial	
		5d	10d	5d	10d	5d	10d	5d	10d
细胞膜透性/% cell membrane permeability	顶部 Top	11.13a	1.88a	7.94b	2.03a	8.30b	2.52a	<b>4.19b</b>	<b>10.57b</b>
	2/3 处 2/3side	12.94a	2.50a	8.17b	4.03b	<b>5.61b</b>		<b>6.47b</b>	
	1/3 处 1/3side	8.20a	2.35	<b>7.81a</b>		<b>6.44ab</b>		<b>4.19b</b>	
丙二醛含量 MDA content /(mmol/g 鲜重)	顶部	1.42a	0.96a	1.59a	1.19a	1.68b	1.49b	1.27a	<b>1.00a</b>
	2/3 处	1.90a	0.57a	2.21b	0.97b	<b>0.68a</b>		<b>1.35b</b>	
	1/3 处	1.95a	1.32	<b>1.22b</b>		<b>2.18c</b>		<b>1.45a</b>	

黑体为沙下部位

### 2.4 不同厚度沙埋下砂引草抗氧化酶活力的变化

结果表明,随着沙埋厚度增加,砂引草叶片 POD 活力呈下降趋势(表 4)。沙埋第 5 天,与对照相比,轻度、中度、重度沙埋的植株叶片平均 POD 活力分别降低了 23%、31%、5%。但同一植株不同部位叶片 POD 活力因沙埋与否而不同。同株沙上叶片 POD 活力较沙下叶片低。植株同一部位叶片 POD 活力随着沙埋厚度的增加而下降。沙埋处理使砂引草植株叶片 POD 活力降低,并随着沙埋时间延长,降低幅度变小。

表 4 不同厚度沙埋下砂引草叶片 POD、SOD 和 CAT 活力的变化

Table 4 Changes in activities of peroxidase (POD), superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) of *Messerschmidia sibirica* Linn under different levels of sand burial

测定项目 Testing item		对照 No-sand burial		轻度沙埋 Light sand burial		中度沙埋 Moderate sand burial		重度沙埋 Severe sand burial	
		5d	10d	5d	10d	5d	10d	5d	10d
SOD activity /(U·g <sup>-1</sup> 鲜重·h <sup>-1</sup> )	顶部 Top	133.6a	72.71a	136.99a	117.78b	159.09b	103.77c	<b>124.61c</b>	<b>96.37d</b>
	2/3 处 2/3side	151.6a	133.18a	141.47b	114.44a	<b>137.55c</b>		<b>129.9d</b>	
	1/3 处 1/3side	120.2a	118.5	<b>139.8b</b>		<b>134.97c</b>		<b>114.55d</b>	
POD activity /(μmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ·min <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup> 鲜重)	顶部	0.51a	0.59a	0.36b	0.43b	0.33c	0.43c	<b>0.48d</b>	<b>0.38d</b>
	2/3 处	0.57a	0.58a	0.34b	0.44a	<b>0.32b</b>		<b>0.45c</b>	
	1/3 处	0.40a	0.51	<b>0.43b</b>		<b>0.36c</b>		<b>0.42b</b>	
CAT activity /(μmol H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /g 鲜重)	顶部	342.3a	317.27a	353.82b	290.46b	378.26c	297.99b	<b>324.41b</b>	<b>294.8b</b>
	2/3 处	253.13a	231.03a	323.22b	304.20b	<b>311.12c</b>		<b>310.97c</b>	
	1/3 处	289.51a	288.55	<b>302.21a</b>		<b>297.18b</b>		<b>285.20a</b>	

黑体为沙下部位



在沙埋第 5 天,随着沙埋厚度增加,砂引草叶片 SOD 的活力不断上升(除重度沙埋)(表 4)。同株不同部位叶片 SOD 活力表现为沙上的大于沙埋叶片。植株同一部位也表现为没沙埋的叶片 SOD 活力高于沙埋叶片。沙埋处理提高了植株沙上叶片 SOD 活力,但却降低了沙埋叶片 SOD 活力。

在沙埋第 5 天,与对照组相比,轻度、中度、重度沙埋均使植株叶片平均 CAT 活力增加,尤其是轻度沙埋。同株不同部位叶片 CAT 活力表现为沙上叶片大于沙下叶片,如轻度沙埋和中度沙埋沙上叶片 CAT 活力分别比沙下高 12% 和 24%。另外,植株同一部位叶片 CAT 活力则随着沙埋厚度的增加而下降。在沙埋第 10 天,沙埋组的 CAT 的平均活力却呈现不断下降的趋势。

## 2.5 不同厚度沙埋下砂引草的渗透调节物含量的变化

在沙埋第 5 天,随着沙埋厚度的增加,砂引草叶片中脯氨酸含量不断增加(表 5)。与对照相比,轻度、中度和重度沙埋处理的整株植物叶片脯氨酸平均含量分别增加 142%、44%、63% ( $P < 0.05$ )。但同一植株沙上叶片脯氨酸含量略高于沙下叶片。而植株同一部位叶片脯氨酸含量却随着沙埋厚度的增加而趋于下降。在沙埋第 10 天,对照砂引草叶片脯氨酸含量略有增加,而沙埋组砂引草沙上叶片脯氨酸含量略有下降。

然而,叶片中可溶性糖对沙埋的反应与脯氨酸相反。沙埋第 5 天,沙埋处理的植株叶片中可溶性糖含量出现大幅下降,轻度、中度和重度沙埋使植株叶片可溶性糖含量较对照分别下降了 60%、63%、80% ( $P < 0.05$ )。而同一植株沙上叶片中可溶性糖含量小于沙下叶片。植株同一部位叶片中可溶性糖含量则随沙埋厚度增加而趋于降低。如在 1/3 处,轻度、中度和重度沙埋下叶片可溶性糖含量分别较对照降低了 72%、73%、82%。相比之下,在沙埋第 10 天,尽管对照和沙埋处理的叶片中可溶性糖含量均大幅下降,但是沙埋处理的叶片可溶性糖含量仍然低于对照。而重度沙埋植株叶片可溶性糖平均含量较对照组增加了 2.38%,究其原因可能是由于新萌发的叶片造成的。

表 5 不同厚度沙埋下砂引草叶片脯氨酸和可溶性糖含量的变化

Table 5 Changes in the contents of proline and soluble sugar in the leaves of *Messerschmidia sibirica* Linn under different levels of sand burial

测定项目 Testing item		对照		轻度沙埋		中度沙埋		重度沙埋	
		No-sand burial		Light sand burial		Moderate sand burial		Severe sand burial	
		5d	10d	5d	10d	5d	10d	5d	10d
脯氨酸/( $\mu\text{g/g}$ 鲜重)	顶部 Top	0.17a	0.76a	0.73b	0.73a	0.91c	0.72a	<b>1.30d</b>	<b>0.75a</b>
Proline content	2/3 处 2/3side	0.87a	0.85a	1.85b	0.82a	<b>0.96c</b>		<b>0.97c</b>	
	1/3 处 1/3side	0.74a	0.82	<b>1.72b</b>		<b>0.67a</b>		<b>0.62a</b>	
可溶性糖/( $\mu\text{g/g}$ 鲜重)	顶部	4.45a	0.78a	2.03bc	0.63a	1.79b	0.38ac	<b>0.68c</b>	<b>2.15b</b>
Soluble sugar content	2/3 处	2.58a	2.9a	1.79b	0.79b	<b>1.66c</b>		<b>1.04bc</b>	
	1/3 处	8.47a	2.62	<b>2.37b</b>		<b>2.26c</b>		<b>1.47b</b>	

黑体为沙下部位

## 3 讨论与结论

### 3.1 砂引草对沙埋适应的生长对策

沙埋是沙生植物经常面临的事件,它能够改变植物正常的生长条件,如温度和湿度等物理因素<sup>[30]</sup>,从而影响植物的生长。本研究结果表明,在沙埋第 5 天,轻度沙埋使沙上和沙下植株相对高度高于对照,中度沙埋使沙上植株相对高度大于对照,沙下与对照相同,但重度沙埋下植株中下部叶片变黄脱落而顶部畸形生长。这说明适度沙埋可促进砂引草生长,这与赵哈林<sup>[18]</sup>等研究是一致的。同时研究还发现,在沙埋处理中沙上植株高度增加的同时还伴随着沙上植物叶片 FW 和 DW 增加,和沙下叶片 FW 和 DW 的减少。这表明沙埋使植物代谢发生改变。在沙埋重力作用下,植物通过垂直快速向上生长摆脱沙埋增加光合作用叶面积,同时还通过将沙下无法行光合作用的叶片中物质转移至沙上叶片,以维持植株的持续生存。

对不耐沙埋的无芒雀麦种子萌发和幼苗生长的研究发现,无芒雀麦幼苗不能从全部沙埋中长出。可能是由于植物无法进行光合作用和气体交换而饥饿死亡<sup>[31]</sup>。并指出植物对沙埋的耐受力与其对长时间黑暗的



忍耐力相关。结果表明,虽然砂引草在全埋下不如在轻度和中度沙埋下生长快,但是经过 10d 沙埋后植株因无光照而畸形生长,叶片变黄脱落,侧芽萌生,顶部茎变粗且有新生黄叶长出,部分植株顶部已冲出沙面。全埋下砂引草在无法行光合作用情况下的生长,其原因可能是:一沙下缺氧抑制了叶片呼吸作用对能量的消耗,使部分叶片成为物质和能量的供体;二沙埋后沙下土壤温度降低和湿度加大有利于茎叶,尤其是老叶中能量和物质转移至生长点。马红媛<sup>[32]</sup>等研究发现,沙埋能够促使其幼苗将能量的大部分供给地上部分生长,从而使幼苗能够破土存活下来。三是砂引草茎顶端具有很强对光的适应性和暗中生长的能力,在暗中茎顶端不断的延伸生长,顶端茎叶一旦冲出沙土就会很快适应光环境而继续生长,可见砂引草是一个可耐全埋的植物。但沙埋引起植株快速生长是否与沙埋重力作用下导致根中激素快速合成并及时运输至沙上有关,有待进一步研究。

### 3.2 砂引草对沙埋适应的生理对策

大量研究发现,在逆境条件下(如低温、水分、养分缺乏等)植物体内活性氧代谢系统的平衡被破坏,导致植物体内氧自由基的积累和引发或加剧细胞的膜脂过氧化<sup>[33]</sup>。氧自由基的积累可激活抗氧化酶保护系统,使抗氧化酶活力增强。同时,植物能通过自身细胞的渗透调节作用抵抗外界渗透胁迫,而脯氨酸则是一种理想的渗透调节物<sup>[34]</sup>,同时具有清除氧自由基的作用<sup>[35]</sup>。

表明,在沙埋的第 5 天,不同厚度沙埋处理的植株叶片细胞膜透性和 MDA 含量均较对照低,而整株植物叶片 SOD、CAT 活力和脯氨酸含量均较对照高。同一植株沙上叶片细胞膜透性、MDA 和脯氨酸含量及 SOD 和 CAT 活力均高于沙下被沙埋的叶片。可见沙埋提高了沙上植物叶片抗氧化酶活力。而在沙埋的第 10 天,由于降水较多,气温的降低,沙上叶片含水量增加,细胞膜透性和 MDA 含量下降,脯氨酸含量及 SOD 和 CAT 活力均下降。沙埋过程中沙上叶片细胞膜透性和 MDA 含量的变化与抗氧化酶活力成正相关系( $R_1 = 0.957$ ;  $R_2 = 0.994$ )。

研究结果还显示,沙埋对砂引草沙上叶片和沙下叶片的影响不同。沙埋使沙下叶片处于低温、潮湿(表 1),缺氧和黑暗环境中,由于叶片蒸腾作用降低导致叶片含水量较高。沙下叶片细胞膜透性、MDA 和脯氨酸含量及 SOD 和 CAT 活力较低的原因可能有:(1)黑暗抑制了光合作用的光反应降低了氧自由基的产生;(2)缺氧抑制了细胞呼吸作用降低氧自由基产生速率;(3)低温降低了细胞代谢强度,这些因子使沙下叶片积累的氧自由基量减少,膜脂过氧化作用降低,MDA 含量减少,同时也降低了 SOD 和 CAT 活力以维护细胞中氧自由基产生和清除间的平衡<sup>[33]</sup>。但是,沙埋使沙上植物叶片处于高地面热辐射、通风受阻、干旱、高温胁迫下。有报道,沙面受强光照辐射和地面热辐射作用,沙面日温度很高,可达 55℃。远离沙面的叶片在通风作用下叶片温度接近大气温度 37.6℃<sup>[36]</sup>。因此,沙埋使远离沙面的叶片接近沙面,叶片受到多重胁迫。其中强光高温作用使叶片光合和呼吸作用增强加大了细胞中氧自由基积累和细胞膜脂过氧化作用,导致 MDA 增多和细胞膜透性的加大;另外,高的地面热辐射也引起叶片蒸腾作用增强使叶片含水量降低(表 2),引起脯氨酸含量增高。但同时沙上叶片积累的氧自由基快速激活抗氧化酶系统以维持细胞内氧自由基代谢平衡。该研究不仅表明沙埋胁迫可间接造成对植物多重胁迫,同时也进一步证实在适应环境多重胁迫中叶片抗氧化酶和脯氨酸在砂引草快速适应沙埋环境保护细胞膜,防止膜脂过氧化起重要生理调节作用。

综上所述,轻度和中度沙埋使沙上叶片受到地面热辐射、干旱、高温胁迫影响,导致叶片含水量下降,膜脂过氧化加强,膜受损。但同时叶片中保护酶活力及脯氨酸含量快速增高抑制膜脂过氧化可能是保护沙埋后沙上枝叶能快速生长的重要生理调控机理。在重度全埋枝叶处于沙下时,虽然沙下缺氧和黑暗抑制了叶片呼吸作用和光合作用,但也降低了氧自由基的产生和膜脂过氧化作用。同时缺氧也抑制了叶片对营养物质的消耗使叶片成为茎尖生长的物质和能量供体,促使暗中茎顶端不断的延伸生长冲出沙土再生。可见砂引草对环境改变异常敏感,在沙埋造成环境变化中细胞中快速激活抗氧化酶和积累脯氨酸在维持细胞氧自由基积累和清除平衡,促进茎顶叶生长起重要保护作用。而砂引草耐全埋的再生能力进一步表明,砂引草在海岸沙丘固沙、保滩、护岸和植被恢复上将具有重要开发和应用前景。

## References:

- [ 1 ] Maun M A, Lapiere J. Effects of burial by sand on seed germination and seedling emergence of four dune species. *American Journal of Botany*, 1986, 73(3): 450-455.
- [ 2 ] Moreno-Casasola P. Sand movement as a factor in the distribution of plant communities in a coastal dune system. *Plant Ecology*, 1986, 65(2): 67-76.
- [ 3 ] Maun M A. Adaptations enhancing survival and establishment of seedlings on coastal dune systems. *Plant Ecology*, 1994, 111(1): 59-70.
- [ 4 ] Zhao W Z, Li Q Y, Fang H Y. Effects of sand burial disturbance on seedling growth of *Nitraria sphaerocarpa*. *Plant Soil*, 2007, 295(1/2): 95-102.
- [ 5 ] Zhang J H, Maun M A. Sand burial effects on seed germination, seedling emergence and establishment of *Panicum virgatum*. *Holarctic Ecology*, 1990, 13(1): 56-61.
- [ 6 ] Jia R L, Li X R, Liu L C, Gao Y H, Li X J. Responses of biological soil crusts to sand burial in a revegetated area of the Tengger Desert, Northern China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(11): 2827-2834.
- [ 7 ] Wang Y G, Yang X H, Ci L J. Impact of sand burial on spatial patterns of shrub communities on the western Ordos Plateau, northwestern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, 32(4): 26-33.
- [ 8 ] Li Q Y, Zhao W Z. Seedling emergence and growth responses of five desert species to sand burial depth. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1802-1808.
- [ 9 ] Su Y G, Li X R, Jia R L, Feng L. Effects of sand-burying on seed germination and seedling emergence of six psammophytes species. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(6): 968-971.
- [ 10 ] Maun M A, Riach S. Morphology of caryopses, seedlings and seedling emergence of the grass *Calamovilfa longifolia* from various depths in sand. *Oecologia*, 1981, 49(1): 137-142.
- [ 11 ] Harper J L, Benton R A. The behaviour of seeds in soil: II. The germination of seeds on the surface of a water supplying substrate. *The Journal of Ecology*, 1966, 54(1): 151-166.
- [ 12 ] Nie C L, Zheng Y R. Effects of water supply and sand burial on seed germination and seedling emergence of four dominant psammophytes in the ordos plateau. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(1): 32-41.
- [ 13 ] Sykes M T, Wilson J B. Dark tolerance in plants of dunes. *Functional Ecology*, 1990, 4(6): 799-805.
- [ 14 ] Li W T, Zhang C, Wang F, Zheng M Q, Zheng Y R, Zhang F. Effects of sand burial and water supply on seedlings growth of two dominant psammophytes in Mu US sandland. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 1192-1199.
- [ 15 ] Yuan P F, Ding G D, Zhao K. The impacts of sand burial on the growth characteristic of *Salix Psammophila* in mobile sand dune. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(4): 53-55.
- [ 16 ] Zhao W Z, Liu Z M. Responses of growth and reproduction of *Sophora moorcroftiana* to altitude and sand-burying in Tibet. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(1): 134-140.
- [ 17 ] Liu H J, Guo K. The impacts of sand burial on seedling development of *Caragana intermedia*. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2550-2555.
- [ 18 ] Zhao H L, He Y H, Yue G Y, Zhou R L. Effects of wind blow and sand burial on the seedling growth and photosynthetic and transpiration rates of desert plants. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(3): 413-419.
- [ 19 ] He Y H, Zhao H L, Zhao X Y, Liu X P. Effects of different sand burial depths on growth and biomass allocation in *Caragana microphylla* seedlings. *Arid Land Geography*, 2008, 31(5): 701-706.
- [ 20 ] Xiang X L, Chu Q G, Liu Zh Q, Qin Y S. Correlation between the morphological structure of salt gland and salt secretion in *Messerschmidia sibirica* Linn. *Journal of Jinan University: Natural Science and Medicine Edition*, 2008, 29(3): 305-310.
- [ 21 ] Zhang J E. *Experimental Research Methods and Technology Commonly Used in Ecology*. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [ 22 ] Luttus S, Kinet J M, Bouharmont J. NaCl-induced senescence in leaves of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars differing in salinity resistance. *Annals of Botany*, 1996, 78(3): 389-398.
- [ 23 ] Zhang Z A, Chen Z Y. *Experiment Technology of Plant Physiology*. Changchun: University Press, 2008: 178-193.
- [ 24 ] Sundar D, Perianayaguy B R, Ramachandra Reddy A. Localization of antioxidant enzymes in the cellular compartments of sorghum leaves. *Plant Growth Regulation*, 2004, 44(2): 157-163.
- [ 25 ] Zhang Z L, Zai W Q. *The Experimental Guide for Plant Physiology*. Beijing: Higher Education Press, 2003: 123-276.
- [ 26 ] Drazkiewicz M, Skórzyńska-Polit E, Krupa Z. Copper-induced oxidative stress and antioxidant defence in *Arabidopsis thaliana*. *BioMetals*, 2004, 17(4): 379-387.

- [27] Hou F L. Plant Physinlogy Experiment. Beijing: Science Press, 2005: 91-93.
- [28] Zhang Z A, Zhng M S, Wei R H. The Experimental Guide for Plant Physiology. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004.
- [29] Zou Q. The Experimental Guide for Plant Physiology. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 189-190.
- [30] Maun M A. The effects of burial by sand on survival and growth of *Calamovilfa longifolia*. *Ecoscience*, 1996, 3(1): 93-100.
- [31] Yang H L, Cao Z P, Dong M, Ye Y Z, Huan Z Y. Effects of sand burying on caryopsis germination and seedling growth of *Bromus inermis* Leyss. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(11): 2438-2443.
- [32] Ma H Y, Liang Z W, Yan C, Chen Y, Huang L H. Effects of sand-burial depth on *Leymus chinensis* seedlings emergence and growth. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12): 2003-2007.
- [33] Jiang M Y, Ji J H, Wang S T. Water stress and membrane-lipid peroxidation in plants. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition*, 1991, 19(2): 88-94.
- [34] Chang E F, Zhou H C, Li P R, Chen Q, Wang X Q, Li H B, Li Y W, Liu Y G, Xu L F. Results analysis on the experiment of *Leacaena Leucecephala* cultivation. *Yunnan Forestry Science and Technology*, 1999, (4): 33-35.
- [35] Stewart C R, Hanson A D. Proline accumulation as a metabolic response to water stress//Turner N C, Kramer P J, eds. *Adaptation of Plants to Water and High Temperature Stress*. New York: Johwiley and Sons, 1980: 173-189.
- [36] Zhang J. Preliminary Studies on the temperature of soil surface in the Hinterland of Taklimakan Desert. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(5): 592-595.

#### 参考文献:

- [7] 王彦阁, 杨晓晖, 慈龙骏. 沙埋对西鄂尔多斯高原灌木群落格局的影响. *北京林业大学学报*, 2010, 32(4): 26-33.
- [8] 李秋艳, 赵文智. 五种荒漠植物幼苗出土及生长对沙埋深度的响应. *生态学报*, 2006, 26(6): 1802-1808.
- [9] 苏延贵, 李新荣, 贾荣亮, 冯丽. 沙埋对六种沙生植物种子萌发和幼苗生长的影响. *中国沙漠*, 2007, 27(6): 968-971.
- [12] 聂春雷, 郑元润. 鄂尔多斯高原 4 种主要沙生植物种子萌发与出苗对水分和沙埋的响应. *植物生态学报*, 2005, 29(1): 32-41.
- [14] 李文婷, 张超, 王飞, 郑明清, 郑元润, 张峰. 沙埋与供水对毛乌素沙地两种重要沙生植物幼苗生长的影响. *生态学报*, 2010, 30(5): 1192-1199.
- [15] 原鹏飞, 丁国栋, 赵奎. 流动沙丘沙埋对沙柳生长特性的影响. *水土保持研究*, 2008, 15(4): 53-55.
- [16] 赵文智, 刘新民. 西藏特有灌木砂生槐繁殖生长对海拔和淹埋的响应. *生态学报*, 2002, 22(1): 134-138.
- [17] 刘海江, 郭柯. 沙埋对中间锦鸡儿幼苗生长发育的影响. *生态学报*, 2005, 25(10): 2550-2555.
- [18] 赵哈林, 何玉惠, 岳广阳, 周瑞莲. 风吹、沙埋对沙地植物幼苗生长和光合蒸腾特性的影响. *生态学杂志*, 2010, 29(3): 413-419.
- [19] 何玉惠, 赵哈林, 赵学勇, 刘新平. 沙埋对小叶锦鸡儿幼苗生长和生物量分配的影响. *干旱区地理*, 2008, 31(5): 701-706.
- [20] 项秀丽, 初庆刚, 刘振乾, 秦永生. 砂引草泌盐腺的结构与泌盐的关系. *暨南大学学报: 自然科学与医学版*, 2008, 29(3): 305-310.
- [21] 章加恩. *生态学常用实验研究方法与技术*. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [23] 张治安, 陈展宇. *植物生理学实验技术*. 长春: 吉林大学出版社, 2008: 178-193.
- [25] 张志良, 瞿伟菁. *植物生理学实验指导*. 北京: 高等教育出版社, 2003: 123-276.
- [27] 侯福林. *植物生理学实验教程*. 北京: 科学出版社, 2005: 91-91.
- [28] 张治安, 张美善, 蔚荣海. *植物生理学实验指导*. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004.
- [29] 邹琦. *植物生理学实验指导*. 北京: 中国农业出版社, 2000: 189-190.
- [31] 杨慧玲, 曹志平, 董鸣, 叶永忠, 黄振英. 沙埋对无芒雀麦种子萌发和幼苗生长的影响. *应用生态学报*, 2007, 18(11): 2438-2443.
- [32] 马红媛, 梁正伟, 闫超, 陈渊, 黄立华. 四种沙埋深度对羊草种子出苗和幼苗生长的影响. *生态学杂志*, 2007, 26(12): 2003-2007.
- [33] 蒋明义, 荆家海, 王韶唐. 水分胁迫与植物膜脂过氧化. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 1991, 19(2): 88-94.
- [34] 常恩福, 周洪昌, 李品荣, 陈强, 王锡全, 李红兵, 李义文, 刘永国, 徐珑峰. 新银合欢育苗试验结果分析. *云南林业科技*, 1999, (4): 33-35.
- [36] 张杰. 塔克拉玛干沙漠腹地沙丘表面温度特征初探. *中国沙漠*, 2003, 23(5): 592-595.



CONTENTS

Growth and physiological adaptation of <i>Messerschmidia sibirica</i> to sand burial on coastal sandy .....	WANG Jin, ZHOU Ruilian, ZHAO Halin, et al (4291)
Alleviation effect and mechanism of exogenous potassium nitrate and salicylic acid on the growth inhibition of <i>Pinus tabulaeformis</i> seedlings induced by deicing salts .....	ZHANG Ying, LI Fayun, YAN Xia, et al (4300)
Influence of different spatial-scale factors on stream macroinvertebrate assemblages in the middle section of Qiantang River Basin .....	ZHANG Yong, LIU Shuoru, YU Haiyan, et al (4309)
Species diversity and distribution pattern of non-volant small mammals along the elevational gradient on eastern slope of Gongga Mountain .....	WU Yongjie, YANG Qisen, XIA Lin, et al (4318)
A patch-based method for mechanism analysis on spatial dynamics of mangrove distribution .....	LI Chungan, LIU Suqing, FAN Huangqing, et al (4329)
Nutrient heterogeneity in fine roots of six subtropical natural tree species .....	XIONG Decheng, HUANG Jinxue, YANG Zhijie, et al (4343)
Variation of vegetation NDVI and its response to climate change in Zhejiang Province .....	HE Yue, FAN Gaofeng, ZHANG Xiaowei, et al (4352)
Heterogeneity in fine root respiration of six subtropical tree species .....	ZHENG Jinxing, XIONG Decheng, HUANG Jinxue, et al (4363)
Characteristics of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea abundance in soil organic layer under the subalpine/alpine forest .....	WANG Ao, WU Fuzhong, HE Zhenhua, et al (4371)
Effect of tillage systems on light fraction carbon in a purple paddy soil .....	ZHANG Junke, JIANG Changsheng, HAO Qingju, et al (4379)
Effects of prescribed fire on carbon sequestration of long-term grazing-excluded grasslands in Inner Mongolia .....	HE Nianpeng, HAN Xingguo, YU Guirui, et al (4388)
Stoichiometry of carbon dioxide and methane emissions in Minjiang River estuarine tidal wetland .....	WANG Weiqi, ZENG Congsheng, TONG Chuan, et al (4396)
Distribution and sources of particulate organic carbon in the Pearl River Estuary in summer 2010 .....	LIU Qingxia, HUANG Xiaoping, ZHANG Xia, et al (4403)
The glucose-utilizing bacterial diversity in the cold spring sediment of Shawan, Xinjiang, based on stable isotope probing .....	CHU Min, WANG Yun, ZENG Jun, et al (4413)
Culture-dependent and culture-independent approaches to studying soil microbial diversity .....	LIU Guohua, YE Zhengfang, WU Weizhong (4421)
The classification of plant functional types based on the dominant herbaceous species in the riparian zone ecosystems in the Yiluo River .....	GUO Yili, LU Xunling, DING Shengyan (4434)
Genetic diversity of different eco-geographical populations in endangered plant <i>Prunus mongolica</i> by ISSR Markers .....	ZHANG Jie, WANG Jia, LI Haoyu, ZHANG Huirong, et al (4443)
Ecophysiological characteristics of higher-latitude transplanted mangrove <i>Kandelia candel</i> in strong tidal range area .....	ZHENG Chunfang, QIU Jianbiao, LIU Weicheng, et al (4453)
The effect of artificial warming during winter on white clover ( <i>Trifolium repens</i> Linn): overwintering and adaptation to coldness in late spring .....	ZHOU Ruilian, ZHAO Mei, WANG Jin, et al (4462)
Estimating fine root production and mortality in subtropical <i>Altingia grilipes</i> and <i>Castanopsis carlesii</i> forests .....	HUANG Jinxue, LING Hua, YANG Zhijie, et al (4472)
The cloning and expression of WUE-related gene ( <i>PdEPF1</i> ) in <i>Populus deltoides</i> × <i>Populus nigra</i> .....	GUO Peng, JIN Hua, YIN Weilun, et al (4481)
The allelopathy of aquatic rhizome and root extract of <i>Thalia dealbata</i> to seedling of several aquatic plants .....	MIAO Lihua, WANG Yuan, GAO Yan, et al (4488)
Effect of the avirulent strain of <i>Ralstonia solanacearum</i> on the ecological characteristics of microorganism fatty acids in the rhizosphere of tobacco .....	ZHENG Xuefang, LIU Bo, LAN Jianglin, et al (4496)
Coupling remotely sensed information with a rice growth model by combining updating and assimilation strategies .....	WANG Hang, ZHU Yan, MA Mengli, et al (4505)
Effects of water temperature and body weight on metabolic rates of Yellowtail clownfish <i>Amphiprion clarkii</i> (Pisces: Perciformes) during larval development .....	YE Le, YANG Shengyun, LIU Min, et al (4516)
The distribution of chlorophyll a in the Southwestern Indian Ocean in summer .....	HONG Lisha, WANG Chunsheng, ZHOU Yadong, et al (4525)
Evaluation of the effects of ecological remediation on the water quality and biological toxicity of Dagou Drainage River in Tianjin .....	WANG Min, TANG Jingchun, ZHU Wenyong, et al (4535)
Quantitative dynamics of adult population and 3-D spatial pattern of <i>Ceoporus variabilis</i> (Baly) .....	WANG Wenjun, LIN Xuefei, ZOU Yunding, et al (4544)
<b>Review and Monograph</b>	
Studies on urban heat island from a landscape pattern view: a review .....	CHEN Ailian, SUN Ranhao, CHEN Liding (4553)
Sediment quality triad and its application in coastal ecosystems in recent years .....	WU Bin, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (4566)
<b>Discussion</b>	
Food waste management in China: status, problems and solutions .....	HU Xinjun, ZHANG Min, YU Junfeng, et al (4575)
<b>Scientific Note</b>	
Effects of microchemical substances in anaerobic fermented liquid from rice straw and cyanobacteria on <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>niveum</i> growth .....	LIU Aimin, XU Shuangsoo, CAI Xin, et al (4585)
Ecological benefit-loss analysis of agricultural ecosystem in Foshan City, China .....	YE Yanqiong, ZHANG Jiaen, QIN Zhong, et al (4593)

# 《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报  
(SHENGTAI XUEBAO)  
(半月刊 1981 年 3 月创刊)  
第 32 卷 第 14 期 (2012 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA  
(Semimonthly, Started in 1981)  
Vol. 32 No. 14 (July, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元