

# 科尔沁沙地21种植物水分提升作用的实证检验

阿拉木萨<sup>1</sup> 周丽芳<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院沈阳应用生态研究所 2 中国科学院研究生院)

**摘要:**对科尔沁沙地21种植物开展了水分提升作用检测和发生特点研究。试验采用上下层土壤隔离的自制栽植箱,通过控制上、下层土壤水分含量的方法检测植物水分提升作用。结果表明:有19个参试物种观测到水分提升作用,水分提升作用可能是沙生植物适应干旱环境的普遍特性;植物水分提升作用在00:00—06:00时段内发生频率和提升数量较高;不同物种间水分提升能力存在差异,本研究首次采用每克根系生物量(干质量)24 h可产生的水分提升数量作为比较植物水分提升能力的单位,其数值变化范围为4.86~325.62 g/g之间,平均为72.9 g/g。综合比较认为,乌丹蒿、万年蒿、牧马豆和雾冰藜具有较强的水分提升能力。浅层土壤干旱程度与累计水分提升数量在统计学分析上并未表现出明显的相关性。利用植物水分提升能力改善固沙植被区浅层土壤水分环境条件,对提高半干旱区人工固沙植被的稳定性具有重要意义。

**关键词:**沙生植物;水分提升;土壤水分再分配;科尔沁沙地

中图分类号:S714; Q945 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2011)01-0070-08

Alamusa<sup>1</sup>; ZHOU Li-fang<sup>1,2</sup>. Empirical test of hydraulic lift in 21 plant species in the Horqin sandy land, Inner Mongolia. *Journal of Beijing Forestry University* (2011) 33(1) 70-77 [Ch, 27 ref.]

1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, P. R. China;

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, P. R. China.

We examined the hydraulic lift function of 21 psammophytes and clarified the characteristics of this process in the Horqin sandy land, Inner Mongolia. We used self-made growth boxes, in which the soil was separated into upper and lower layers by Vaseline. The water supply to the upper soil was controlled during the examination period. We determined the hydraulic lift effects by measuring the variation of soil water content in the upper soil. Results showed that the hydraulic lift process occurred mostly during 00:00 to 06:00 hours. The amounts of hydraulically lifted water were different among species. The increment of soil water content lifted per gram of roots during 24 hours varied between 4.86 and 325.62 g/g, the average is 72.90 g/g. Four species, *Artemisia wudanica*, *A. gmelinii*, *Thermopsis lanceolata* and *Bassia dasypylla* had higher hydraulic lift capability among all examined species. No marked correlation was observed between the drought degree of the upper soil and accumulative total water lifted by hydraulic process. It is significant to make use of hydraulic lift capability of psammophytes to improve the water content of shallow soil for artificial vegetations on semiarid sandy lands.

**Key words** psammophyte; hydraulic lift; soil water redistribution; Horqin sandy land

植物水分提升作用是指根系从较湿润的深层土壤中吸取水分再释放于浅层较干旱的土壤中的过程,能够缓解浅层土壤水分匮乏状况,促进植物水分利用和养分吸收<sup>[1-3]</sup>,对植物养分循环和水分平衡产生有利影响<sup>[4-5]</sup>。植物水分提升作用对环境产生的效应表现在不同尺度上,在个体尺度上,它改变了

根际土壤水分空间分布状态,缓解了浅层土壤的干旱程度,提高了根系对土壤中营养元素的吸收效率,延长了该区域植物细根和根毛的活动时间并提高了与其伴生的微生物的活性<sup>[6-7]</sup>;在群落尺度上,它增加了该植物和邻近植物在系统内的竞争能力,影响了群落组成和分布格局<sup>[8]</sup>;在生态系统尺度上,它

收稿日期:2010-03-28

基金项目:国家自然科学基金项目(30671723,40971167)。

第一作者:阿拉木萨,博士。主要研究方向:沙地水资源及水环境与荒漠化防治。电话:024-83970442 Email:alamusa@tom.com 地址:110016 辽宁省沈阳市沈河区文化路72号中国科学院沈阳应用生态研究所。

本刊网址: <http://www.bjfujournal.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

影响了生态系统的水分平衡过程,提高了系统的水分利用率<sup>[9-10]</sup>。

半干旱沙地土壤水分决定着植物的分布格局和生存发展,植物水分提升作用产生的土壤水分转移过程可能对半干旱区植物具有重要意义<sup>[11-12]</sup>。以往研究涉及干旱沙地的植物种较少,仅有沙地柏(*Sabina vulgaris*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、三齿蒿(*Artemisia tridentata*)、沙生冰草(*Agropyron desertorum*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens*)等几个物种,其他沙地植物是否存在水分提升作用及提升数量均没有明确的研究记录,水分提升作用能否对沙地植被稳定持续发展有所贡献目前仍然未知<sup>[13-14]</sup>。在干旱、半干旱沙地环境中,水分提升作用为缓解干旱沙地植物水分胁迫提供了一种可能途径<sup>[15-17]</sup>,这不仅对水分提升植物本身,而且对相邻植物均有益处<sup>[18-20]</sup>。如果能将具备水分提升功能的植物与浅根系固沙植物配置栽植,就可利用其改善固沙植被区土壤水分条件,提高水分和养分利用效率,为建立持久稳定的固沙植被提供理论指导。

水分提升作用的研究从20世纪80年代以来得到广泛重视,从植物种类、发生条件、提升水量等方面开展一系列研究工作,其中水分提升作用是否是植物普遍具备的特性是该领域的重点探讨问题之一。目前很多物种均以观测到水分提升作用,涉及的物种包括乔木、灌木、藤本、牧草和农作物等<sup>[10,18]</sup>,其发生的普遍性被越来越多的实验所证实,迄今已发现约60种植物存在水分提升作用<sup>[19,21]</sup>。因此,本

研究主要开展以下工作:1)科尔沁沙地植物种的水分提升作用检测;2)各物种水分提升作用的水量和发生特点。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验在科尔沁沙地西部区域(E119°39'、N 43°02')进行,该地区年平均气温6.2℃,无霜期140 d,年均风速4.2 m/s,极速风速达到31 m/s,7~8级大风平均每年出现65~70 d,1982—2003年的年平均降水量为(284.4±82.4)mm,年降水量最低值为136.9 mm,平均干燥度为1.99,年内降水分布不均匀,6—8月份降水占全年降水量的70%以上,年蒸发潜力为2 000~2 500 mm/a。当地沙丘起伏坨甸相间,为广阔的沙地景观,主要生境类型为流动和半流动沙丘、固定沙丘、沙沼地、丘间低地和石质残丘。地带性土壤为暗棕壤、栗钙土和黑垆土;非地带性土壤主要有沙土、草甸土和盐碱土。

### 1.2 试验物种

选择21种科尔沁沙地典型沙丘区植物种作为研究对象(表1),所有物种主要分布于沙丘和丘间低地两种立地类型中。参试物种中包括灌木和草本,参试植物通过温室内容器培育获得幼苗,所得的灌木、半灌木种为2年生幼苗,株高范围0.7~1.2 m;草本植物中1年生草本为当年生幼苗,株高范围0.3~0.6 m,多年生草本为2~3年生,株高范围0.2~0.7 m。各物种选择生长状况相近的幼苗

表1 供试植物  
Tab. 1 Species names examined for hydraulic lift

编号	种名	科名	生活型	生境
1	冷蒿( <i>Artemisia frigida</i> )	菊科	SS	固定沙丘、丘间地
2	万年蒿( <i>A. gmelinii</i> )		SS	固定沙丘底部、丘间地
3	差巴嘎蒿( <i>A. halodendron</i> )		SS	半固定沙丘
4	野艾蒿( <i>A. lavandulaefolia</i> )		PH	丘间地
5	大籽蒿( <i>A. sieversiana</i> )		ABH	丘间地
6	黄蒿( <i>A. scoparia</i> )		ABH	丘间地
7	乌丹蒿( <i>A. wudanica</i> )		SS	流动沙丘及半固定沙丘
8	小叶锦鸡儿( <i>Caragana microphylla</i> )	豆科	S	固定沙丘
9	兴安胡枝子( <i>Lespedeza davurica</i> )		SS	沙地、丘间地
10	牧马豆( <i>Thermopsis lanceolata</i> )		PH	沙地、丘间地
11	沙蓬( <i>Agriophyllum squarrosum</i> )	藜科	AH	流动、半流动沙丘
12	雾冰藜( <i>Bassia dasypylla</i> )		AH	固定沙丘
13	灰绿藜( <i>Chenopodium glaucum</i> )		AH	丘间地
14	绿珠藜( <i>C. acuminatum</i> )		AH	丘间地
15	乌丹虫实( <i>Corispermum thelegium</i> )		AH	沙丘
16	细叶白前( <i>Cynanchum sibiricum</i> )	萝藦科	PH	固定沙丘
17	小黄柳( <i>Salix flava</i> )	杨柳科	S	半固定沙丘、流动沙丘
18	伏委陵菜( <i>Potentilla chinensis</i> )	薔薇科	PH	丘间地
19	苋菜( <i>Amaranthus retroflexus</i> )	苋科	AH	丘间地
20	乳浆大戟( <i>Euphorbia esula</i> )	大戟科	PH	丘间地
21	兴安天门冬( <i>Asparagus dauricus</i> )	百合科	PH	丘间地

注:AH.1年生植物;ABH.1、2年生植物;BH.2年生植物;PH.多年生草本;S.灌木;SS.半灌木(小半灌木)。

作为试验植株,每个物种5~10株。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 试验过程及方法

试验采用自制铁皮生长箱栽植参试植株,生长箱上口 $45\text{ cm} \times 45\text{ cm}$ ,高 $100\text{ cm}$ (图1),生长箱内土壤分为上、下两层,每层深度为 $48\text{ cm}$ ,土壤体积为 $0.0972\text{ m}^3$ 。生长箱内填加土壤为风沙土,土壤机械组成物理性沙粒( $>0.01\text{ mm}$ )占93.6%,物理性黏粒( $<0.01\text{ mm}$ )占6.4%,上、下层土壤内分别埋设TDR水分探头(TDR-3土壤水分传感器),位置在各层土壤中部区域,实验前采用烘干法对每个探头进行标定。上层和下层土壤之间用厚度为 $5\text{ mm}$ 的凡士林层分隔,其后通过注水方法检测凡士林层的封闭效果,此凡士林层可以阻碍上、下层土壤之间的水分交流但根系可生长通过。

每个生长箱移植并保留苗木一株。试验开始前,生长箱上、下层土壤正常供水,保持土壤含水量维持在田间持水量的70%左右,维持栽植的参试植物正常生长。经过一段时间培育后,通过对各物种1个处理进行挖根观测,明确参试植物根系生长透过箱中部的凡士林层,且明显分布于上、下层土壤中后,开始相关观测。

首先将生长箱上层土壤表面通过热熔方法覆盖石蜡层(厚度 $2\sim3\text{ mm}$ ),以防止地表蒸发和降水及凝结水对上层土壤水分的影响。随后,停止对生长箱上层土壤供水,下层土壤保持充分供水,且土壤水分含量维持在田间持水量的70%以上。待上层土壤保持干旱状态 $10\sim15\text{ d}$ ,土壤水分含量为田间持水量的20%左右时,开始水分提升观测试验。观测

试验于2007年6月26日至7月27日、2007年8月1日至8月24日、2008年7月3日至8月4日和2008年8月8日至9月9日之间进行。试验期间生长箱位于室外,光照和温度不加以人工控制,试验期间温度变化范围在 $24\sim31\text{ }^\circ\text{C}$ 之间。试验过程中,生长箱上层土壤中仍然保持无供水状态,生长箱下层土壤保证水分充分供给,并于每天的06:00、09:00、12:00、15:00、18:00、21:00、24:00(00:00)时利用事先埋设在上、下层土壤中的TDR探头,测定生长箱中上、下层土壤水分含量。每个试验物种设置3个重复,因设备数量限制,共计分9批次完成测试,每个物种选择晴天连续观测48 h。待试验观测结束,利用水冲洗方法获取各物种生长箱土壤中的全部根系,烘干获得根系生物量干质量。

#### 1.3.2 测定方法

植物水分提升作用检测是通过生长箱上层土壤水分的变化来确定的,在间隔时段的观测中,此次土壤水分的观测数值减去前一次观测数值,如差值为正值,则认为此期间发生了水分提升作用,其差值为植物水分提升作用产生的土壤水分增加量(提升量);再根据生长箱上层土壤体积,可以推算出提升的水量。水分提升作用发生频率统计根据各个物种在观测的48 h期间,各时段发生水分提升作用的次数累积,分时段统计水分提升作用的发生频率。根据获得的参试物种的全部根系生物量干质量,结合单位时间、单位体积土壤内水分含量的增加量,获得单位根系生物量产生的水分提升数量,更为合理地比较各个物种的水分提升能力。文中提及的土壤水分含量均为土壤体积含水量。

## 2 结果与分析

### 2.1 水分提升作用的检验

在参试的21个物种中,除了小叶锦鸡儿、小黄柳2个物种外,其余物种均观测到水分提升现象,占全部观测物种的90.48%。

参加测试的菊科7种蒿属植物均观测到水分提升现象。以往的研究在蒿属的黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)和三齿蒿中也观测到明显的水分提升作用<sup>[3,10,12]</sup>。这意味着蒿属植物可能更容易产生水分提升作用。

### 2.2 水分提升作用发生的时间变化特点

水分提升作用发生的时间段主要分布在00:00—12:00,占全部发生次数的61.31%,其中以06:00—12:00时段发生比例最高,达到总次数的39.29%。15:00—18:00时段未观测到水分提升作用的发生,其他时段均观测到水分提升作用(图2)。

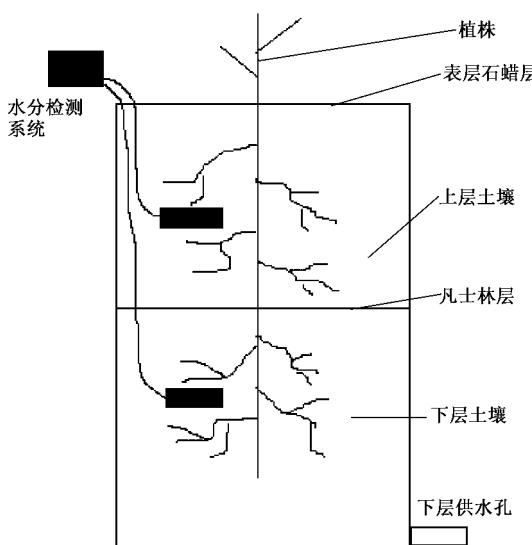


图1 水分提升作用观测生长箱示意图

Fig. 1 Sketch map of growth boxes used to determine hydraulic lift of plants

参试植物水分提升强度以21:00—次日06:00时段为最高,提升量>0.5%的次数主要发生在此时段范围内;06:00—12:00时段发生频率较高,但提升量略低,多分布在0.2%~0.3%之间,其他时段的强度均较低。

### 2.3 水分提升作用的数量比较

因物种差异和各物种植株大小、根系生物量的不同,物种间水分提升作用所产生的提升水量存在差异。对累计48 h的水分提升数量进行统计,结果表明:土壤含水量增量范围在0.08%(细叶白前)~1.6%(伏委陵菜)之间;累计土壤水分增量超过1%的物种有牧马豆、乌丹虫实、乌丹蒿、雾冰藜、伏委陵菜5个物种;提升水量较少的(累计土壤水分增加

量低于0.5%)有灰绿藜、兴安天门冬、细叶白前。其余物种的累计水分提升量分布在0.5%~1.0%之间(图3)。

在各个物种水分提升数量比较中,仅根据产生的土壤水分含量的增加量进行比较存在不合理之处。因为各物种的植株大小和根系生物量存在很大差异,其中根系量与水分提升数量是密切相关的<sup>[22]</sup>,所以本文试图通过单位根系生物量产生的提升水汽数量,比较不同物种之间的水分提升能力,具体指标为:单位根系生物量(1 g)在单位时间(48 h)产生的单位体积土壤(0.097 2 m<sup>3</sup>)中的水分含量增加量。计算结果表明:不同物种单位根系生物量的水分提升数量表现出差异;所有参试物种48 h累计

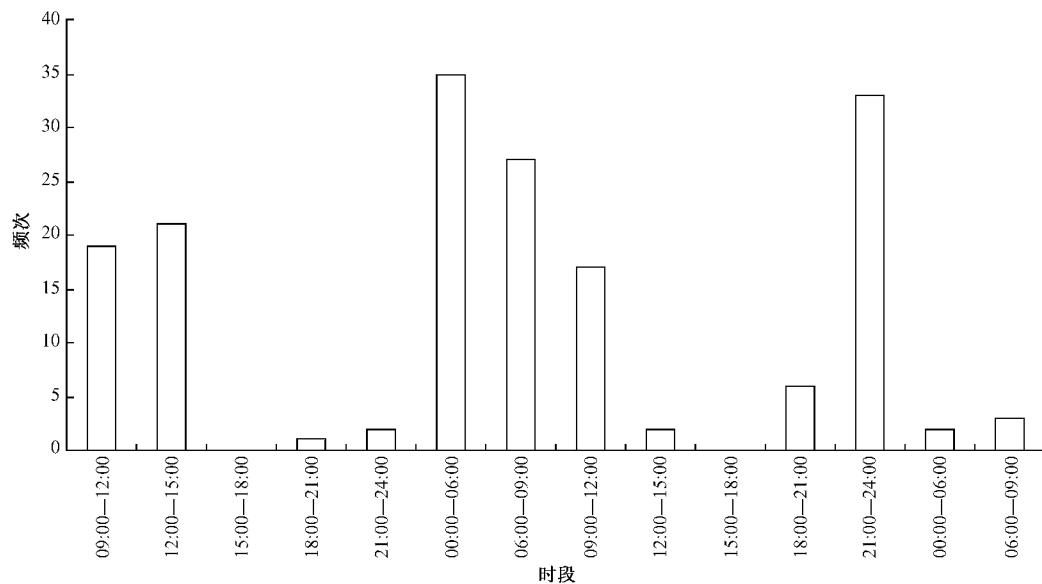


图2 植物水分提升作用发生频率的时间特点  
Fig. 2 Temporal characteristics of hydraulic lift frequency

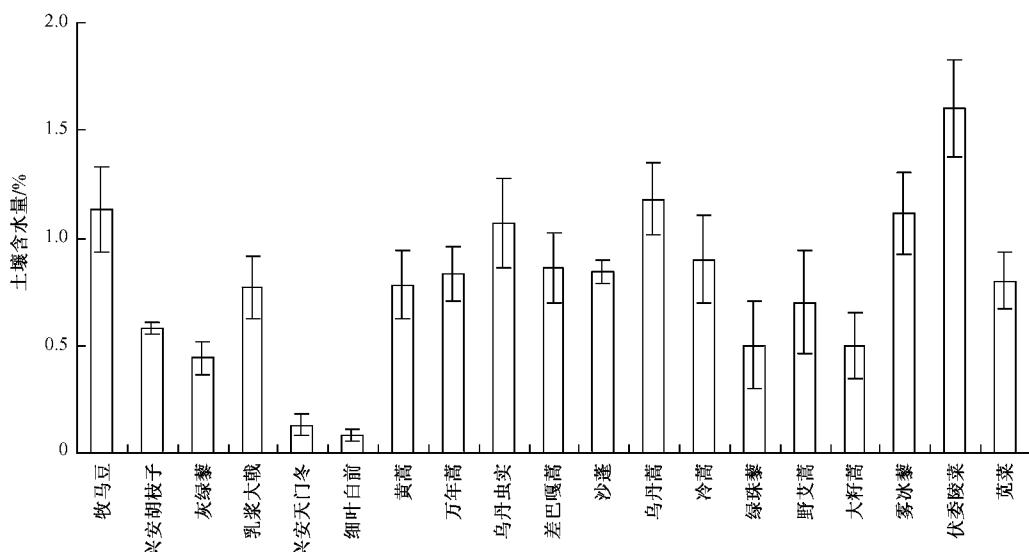


图3 不同物种累计水分提升数量比较  
Fig. 3 Comparison of hydraulic lift amount of different species

注:土壤含水量为各物种累积48 h间,水分提升作用产生的试验箱上层土壤水分含量增量的累计值。

平均水分提升数量为 0.15% ,最高值与最低值相差达 56 倍;最高值的物种为牧马豆 (0.56%) ,其次为乌丹蒿、万年蒿、雾冰藜, 数值均在 0.26% 以上。最低值的物种为兴安天门冬, 仅为 0.01% ,其次为大籽蒿、灰绿藜、野艾蒿, 数值均在 0.03% 以下。统计分析表明:参试物种可以分为 4 个同类子集, 各子集间按照 0.05 水平显著差异划分, 其中乌丹蒿和牧马豆属于提升量最高的一组, 其单位根系生物量提升的水分量显著高于其他物种(除万年蒿外);其次为万年蒿和雾冰藜, 其中万年蒿的水分提升数量显著高于其他物种(除雾冰藜、乌丹蒿和牧马豆之外);提升水量最低的组包括物种为兴安胡枝子、灰绿藜、兴安天门冬、野艾蒿、大籽蒿, 水分提升数量显著低于乌丹蒿、牧马豆、万年蒿和雾冰藜 4 个物种(见图 4)。

植物水分提升的数量对其生态效应的产生至关重要, 水分提升的数量与植物根系量和个体的水分提升能力有关。对根系量大、个体单位根系量提升水分能力大的物种, 其产生的水分提升数量相对较多。通过对累计 48 h 的单位体积土壤中水分增量的比较可知, 伏委陵菜、乌丹蒿、乌丹虫实、雾冰藜和牧马豆 5 个物种的水分提升总量较

高;通过对单位根系生物量 48 h 内单位体积土壤水分增量的比较可知, 牧马豆、乌丹蒿、万年蒿和雾冰藜 4 个物种的水分提升能力较强。结合这两个方面的数据, 综合单位体积土壤水分含量以及单位根系生物量的水分提升数量, 认为乌丹蒿、万年蒿、牧马豆和雾冰藜这 4 个物种的水分提升能力较强。

#### 2.4 上层土壤水分含量与水分提升作用的关系

水分提升作用发生过程中上层土壤水分经干旱处理后, 各物种表层土壤水分表现出较大的差异, 最低仅为 0.1%, 最高达到 2.6%。在此条件下产生的水分提升数量与表层土壤水分含量间并未呈现出明显的相关性(图 5)。分析表明, 累计 48 h 的水分提升数量与土壤水分含量之间并无显著的相关性(相关系数为 0.079,  $n = 20$ ,  $P_{0.05} = 0.381$ ,  $P_{0.01} = 0.487$ ), 说明植物的水分提升作用具有明显的个体差异。水分提升数量可能与植物种特性有着紧密的联系, 如图 5 所示, 表层土壤水分含量最低的几个物种的累计水分提升数量并未表现出较高的水平, 同时表层土壤水分含量较高的物种也产生了较高的水分提升数量, 累计水分提升数量与土壤表层水分的含量并未表现出较高的相关性。

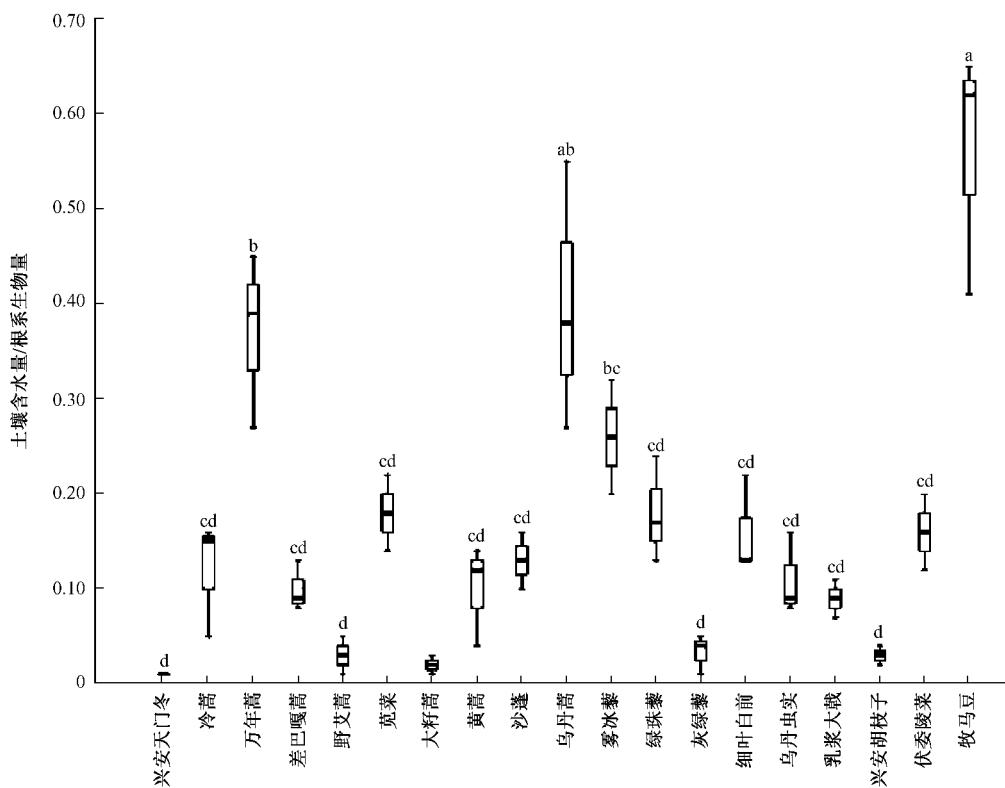


图 4 不同物种单位根系生物量 (1 g) 提升水分数量比较

Fig. 4 Comparison of hydraulic lift water amount of different species on per unit (1 g) of root biomass

注:字母相同者为同类子集;土壤水分含量指每克根系生物量(干质量)

累计 48 h 内的单位体积土壤中水分含量的增量。

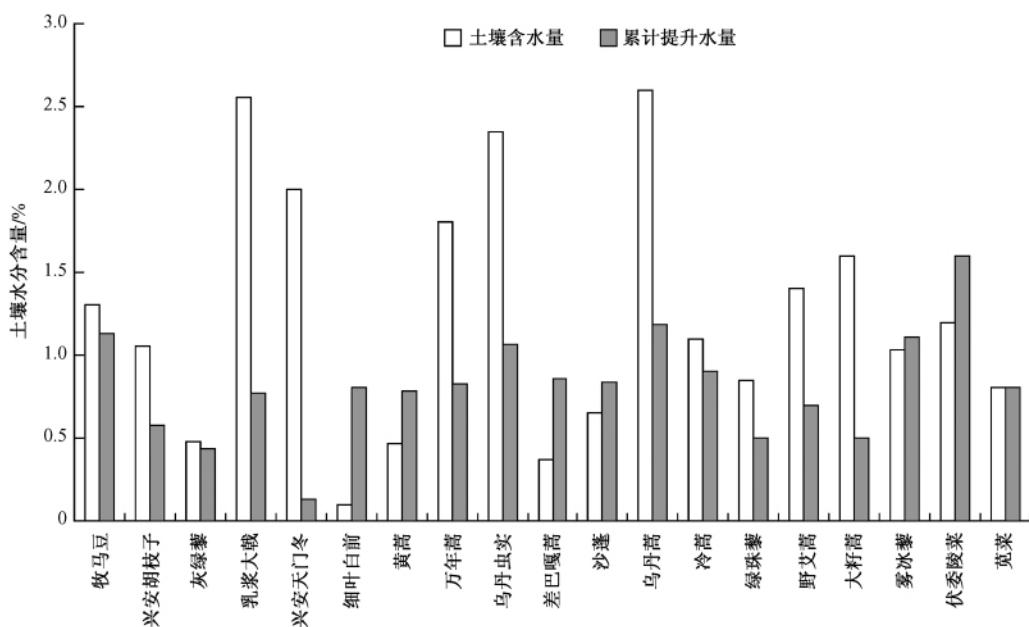


图5 累计48 h水分提升数量与浅层土壤水分关系

Fig. 5 Comparison of hydraulic lift water and topsoil water content

### 3 结论与讨论

#### 3.1 水分提升作用的普遍性

水分提升作用可能是植物适应干旱环境的普遍性特点。在本试验中21个参试物种有19个(90.48%)观测到了根系的水分提升现象,且剩余的2个物种在前期的预备试验中也观测到了水分提升作用。这2个物种均属于耐旱灌木树种,对干旱环境条件具有较高的适应能力,在正式试验中未观测到水分提升现象实属反常,其原因可能是试验所形成的上层土壤干旱程度未必能够引发其自身的水分提升作用,在浅层土壤干旱程度达到一定水平时可能才会引发其水分提升作用,所以对这2种植物的水分提升能力目前还无法做出判断。我们认为,水分提升作用可能是植物适应干旱环境的一种普遍现象,只是不同物种之间可能因物种差异,使得水分提升作用的发生条件存在差异。

以往的研究也表明,水分提升作用可能是植物的普遍特性之一,研究者首先是在乔木和灌木中发现了水分提升现象,其后在牧草和农作物中均观测到了水分提升现象<sup>[23-25]</sup>;随后研究者在更多的植物种中观测到了水分提升作用,这些物种涉及到多种植物类型和地理分布区域(见表2)<sup>[10]</sup>。这些生活型不同的植物分别属于不同科、属,分布于不同的地理气候区域,具有明显的地域和类型代表性,是水分提升作用广泛存在的佐证。

同时,我们认为各物种发生水分提升作用可能存在一个土壤水分含量的最低阈值,只有根系周边

土壤水分含量低于该值时,才会发生根系的水分提升作用,而且不同植物所需的阈值存在差异。本试验在上层土壤水分含量在0.1%~2.6%范围之间观测到植物的水分提升作用,但因观测时段有限和土壤水分含量的梯度变化不连续,所以无法明确指出各个物种的引发水分提升作用的土壤水分含量阈值,这有待于通过后期的细致试验加以明确。但在以往研究中有相关报道:不同植物种发生水分提升作用的土壤水分条件存在差异,只有土壤水分降低到一定程度时,才会发生水分提升作用。Richards等<sup>[1]</sup>认为,当土壤基质势低于-0.5 MPa时,三齿蒿根系才发生水分提升作用;Baker等<sup>[26]</sup>研究发现,只有当土壤基质势在-0.5~-1.3 MPa之间时,才能测到根系的水分提升作用。Vetterlein等<sup>[27]</sup>的研究结果也表明,当土壤基质势降至-1.0 MPa以下时,水分提升作用会停止。

#### 3.2 水分提升作用的数量特点

水分提升数量是所有研究者关注的问题,提升水分数量的多少决定了其现实意义的大小。植物水分提升数量因物种和环境条件的差异而不同,以往研究表明,植物根系水分提升作用的提水量约为第二天白天蒸腾量的10%以下;因植物种类不同,其每株、每夜的提水量从十几克到数百克不等,Baker等<sup>[26]</sup>在狗牙根左干右湿的分根试验中观察到,每个处理在夜间12 h内水分的转移量可达200~600 g,而在8 d时间内平均每天流量为560 g(每处理12 h);Wan等<sup>[24]</sup>观测到棉花根系在12 h内转移的水分可达50~150 g/株;Xu等<sup>[23]</sup>认为高粱水分提

表2 以往研究中观测到水分提升作用的部分植物种类  
Tab. 2 Some species exhibiting hydraulic redistribution

科名	属名	种名	生活型
松科	松属	西黄松( <i>Pinus ponderosa</i> )	乔木
	黄杉属	花旗松( <i>Pseudotsuga menziesii</i> )	乔木
柏科	圆柏属	沙地柏( <i>Sabina vulgaris</i> )	灌木
壳斗科	栎属	蓝栎( <i>Quercus douglasii</i> )	乔木
豆科	苜蓿属	紫花苜蓿( <i>Medicago sativa</i> )	多年生草本
桃金娘科	桉属	多枝桉( <i>Eucalyptus viminalis</i> )	乔木
蒺藜科	<i>Larrea</i>	墨西哥三齿拉瑞阿( <i>Larrea tridentata</i> )	灌木
仙人掌科	仙人掌属	印榕仙人掌( <i>Opuntia ficus-indica</i> )	灌木
茄科	番茄属	番茄( <i>Lycopersicon esculentum</i> )	1年生草本
菊科	蒿属	黑沙蒿( <i>Artemisia ordosica</i> )	半灌木
	蒿属	三齿蒿	灌木
禾本科	<i>Gutierrezia</i>	金雀花拳参( <i>Gutierrezia sarothrae</i> )	半灌木
	玉蜀黍属	玉米( <i>Zea mays</i> )	1年生草本
	狗牙根属	狗牙根( <i>Cynodon dactylon</i> )	多年生草本
	冰草属	沙生冰草( <i>Agropyron desertorum</i> )	多年生草本
	狗尾草属	谷子( <i>Millet</i> ) ( <i>Setaria italica</i> )	1年生草本
	高粱属	高粱( <i>Sorghum vulgare</i> )	1年生草本
锦葵科	狼尾草属	沙土珍珠粟( <i>Pennisetum glaucum</i> )	1年生草本
	棉属	棉花( <i>Gossypium</i> spp.)	1年生草本

注:部分引自参考文献[10]。

升作用可使上层干土的土壤含水率在夜间上升两个百分点,每株根系在夜间使水分流入上层干土的数量约为10~20 g; Vetterlein等<sup>[27]</sup>在测定沙土珍珠粟的水分提升作用中发现,一夜间通过根系释放到土壤中的最大水量为169.56 g; Wan等<sup>[15]</sup>证明,不同品种的玉米水分提升数量存在差异,耐旱杂交种TAES176每株每天根系水分的平均流出量为163 g,而耐旱对照杂交种P3223仅为96 g。以往的植物水分提升能力表达方法是每株或每处理在一定时间内的水分提升数量,但因物种间单株植物的大小或土壤体积可能存在较大的差异,造成其结果无法在物种间比较或植株个体间的比较。本文将水分提升数量与根系生物量联系在一起,能够更方便地表述植物的水分提升数量,其数值变化范围为0.005%~0.335%(每克根系在24 h内的水分提升量),平均为0.075%。根据土壤体积转换单位后为每克根系生物量在24 h内可提升4.86~325.6 g的水分,平均为72.9 g,此结果与上述以往的研究结果在水分提升数量范围上存在部分重合,但部分物种的提升水分数量大于以往的研究结果,这可能与植物物种本身特性和观测期间植物根系的生长状况存在一定的联系。

### 3.3 水分提升作用的发生特点

以往的研究结果表明,水分提升作用的发生与植物蒸腾作用密切相关,水分提升过程通常发生在植物蒸腾作用停止或降低的夜间。Richards等<sup>[1]</sup>认为水分提升作用整夜都在发生。Xu等<sup>[23]</sup>测得水分提升在16:00开始,18:30出现峰值,随后渐弱,

至午夜降至零;提升的水分于第二天黎明之后(06:00—08:00)很快被吸收利用。大部分研究结果都显示,水分提升作用主要发生在夜间时段,白天由于植物蒸腾作用的影响,无法观测到水分提升作用。本研究中发现,多数参试植物的水分提升现象主要发生在00:00—12:00之间,此时段发生的次数最多;强度以21:00—次日06:00时段为最高,水分提升量>0.5%的次数主要发生在此时段范围内。此结果与以往的研究结果相似,特别是发生水分提升作用的时间变化规律相似,仅仅是发生时间向后延迟了几个小时,这可能与植物种类和土壤结构存在一定的相关性。另外,在本试验中部分植物种在上午时段也观测到水分提升作用的产生,针对此问题,我们认为可能是试验过程中夜间产生的提升水分在土壤中的滞留现象引起的,即提升的水分从根系表面释出到分散到TDR探头观测范围内的时间上的滞留过程。

### 3.4 水分提升作用在干旱地区植被建设中的应用展望

在干旱、半干旱沙区,沙丘浅层土壤水分受到植物耗水、土壤质地和环境条件的影响,经常处于干旱状况<sup>[12~13]</sup>。浅层土壤水分的匮乏将会引起植物根系生长受阻、相关土壤微生物活力下降、土壤离子流动性减弱等,最终导致土壤营养物质的空间分布呈不均匀状态,严重影响固沙植物的生存和生长。水分提升作用为沙丘植物提供了一种缓解浅层土壤水分胁迫的可能途径。水分提升作用可增加浅层土壤中的水分含量,有利于维持该土层中根系的各项生

理功能。水分提升作用对于深入探讨干旱、半干旱沙区深层土壤水分与浅层土壤水分、养分间的相互作用具有重大的理论价值和现实意义<sup>[12~20]</sup>。通过筛选半干旱区固沙植物种中具备水分提升作用的植物种,将具备水分提升功能的固沙植物与浅层根系固沙植物配置栽植,利用植物水分提升功能改善固沙植被区浅层土壤水分环境条件,建立持久稳定的固沙植被。这一理论的引进,将会对半干旱区人工固沙植被建设提供新的途径,具有十分直接和极为重要的意义。

人们对根系提水作用的认识还很有限。今后应该在以下方面重点开展研究:1)植物水分提升作用的生理基础研究。明确植物根系水分提升作用的诱导条件,特别是不同物种之间引发水分提升作用的各因素的阈值。2)开展干旱、半干旱地区植物根系水分提升作用优势植物种类的鉴定和筛选工作。3)广泛开展植物根系水分提升作用与植物种优化利用土壤水分的配置方式的研究。

#### 参 考 文 献

- [1] RICHARDS J H ,Caldwell M M. Hydraulic lift: Substantial nocturnal water transport between soil layers by *Artemisia tridentata* roots[J]. *Oecologia*, 1987, 73:486~589.
- [2] CALDWELL M M ,RICHARDS J H. Hydraulic lift: Water efflux from upper roots improves effectiveness of water uptake by deep roots[J]. *Oecologia*, 1989, 79:1~5.
- [3] DAWSON T E. Hydraulic lift and water use by plants: Implications for water balance, performance and plant-interactions [J]. *Oecologia*, 1993, 95:565~574.
- [4] 樊小林,李生秀.植物根系的提水作用[J].西北农业大学学报,1997,25(5):75~81.
- [5] 樊小林,石卫国,曹新华,等.根系提水作用的土壤水分变异及养分有效性 I. 谷子根系提水作用及根系吸收对土壤水分变异的影响[J].水土保持学报,1995,9(4):35~42.
- [6] 樊小林,曹新华,郭立彬,等.根系提水作用的土壤水分变异及养分有效性 II. 黄土性土壤水肥交互和根系提水作用与作物生长效应[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(4):71~76.
- [7] 樊小林,李玲,张林刚.根系提水作用的土壤水分变异及养分有效性 III. 土壤剖面中隔水层对作物吸收养分和土壤养分有效性德效应[J].华南农业大学学报,1998,19(3):72~77.
- [8] MOONEY H A. Further observation on the water relations of *Prosopis tamarugo* of the Northern Atacama Desert [J]. *Oecologia*, 1980, 44:177~180.
- [9] JENSEN R D ,TAYLOR S A ,WIEBE H H. Negative transport and resistance to water flow through plant [J]. *Plant Physiol*, 1961, 36:633~638.
- [10] 陈亚明,傅华,张荣,等.根-土界面水分再分配研究现状与展望[J].生态学报,2004,24(5):1040~1047.
- [11] 阿拉木萨,裴铁璠,蒋德明.人工小叶锦鸡儿固沙植被水分平衡研究[J].水科学进展,2005,16(3):426~431.
- [12] 王志,王蕾,刘连友,等.毛乌素沙地沙丘干沙层水分特征初步研究[J].干旱区研究,2006,23(1):89~93.
- [13] 何维明,张新时.水分共享在毛乌素沙地4种灌木根系中的存在状况[J].植物生态学报,2001,25(5):630~633.
- [14] 何兴东,高玉葆.干旱区水力提升的生态作用[J].生态学报,2003,23(5):996~1002.
- [15] WAN C G ,SOSEBEE R E ,MCMICHAEL B L. Does hydraulic lift exist in shallow-rooted species: A quantitative examination with a half-shrub *Gutierrezia sarothrae* [J]. *Plant and Soil*, 1993, 153:11~17.
- [16] BROOKS J R ,MEINZER F C ,COULOMBE R. Hydraulic redistribution of soil water during summer drought in two contrasting Pacific Northwest coniferous forests [J]. *Tree Physiol*, 2002, 22:1107~1117.
- [17] BURGESS S S O ,PATE J S ,ADAMS M A. Seasonal water acquisition and redistribution in the Australian woody phreatophyte [J]. *Banksia Prionotes Ann Bo*, 2000, 85:215~224.
- [18] MILLIKIN I C ,BLEDSOE C S. Seasonal and diurnal patterns of soil water potential in the rhizosphere of blue oaks: Evidence for hydraulic lift [J]. *Oecologia*, 2000, 125:459~465.
- [19] JACKSON R B ,SPERRY J S ,DAWSON T E. Root water uptake and transport: using physiological processes in global prediction [J]. *Trends Plant Sci*, 2000, 5:482~488.
- [20] 李唯,倪郁,胡自治,等.植物根系提水作用研究述评[J].西北植物学报,2003,23(6):1056~1062.
- [21] 薛小红,牛得草,傅华,等.沙打旺根系提水作用及其机理研究[J].西北植物学报,2007,27(11):2269~2274.
- [22] XU D H ,LI J H ,FANG X W et al. Changes in soil water content in the rhizosphere of *Artemisia ordosica*: Evidence for hydraulic lift [J]. *Journal of Arid Environments*, 2007, 69:545~553.
- [23] XU X ,BLAND W L. Resumption of water uptake by sorghum after water stress [J]. *Agron J*, 1993, 85:697~702.
- [24] WAN C G ,XU W W ,SOSEBEE R E ,et al. Hydraulic lift in drought-tolerant and susceptible maize hybrids [J]. *Plant Soil*, 2000, 219:117~126.
- [25] LISTE H H ,WHITE J C. Plant hydraulic lift of soil water implications for crop production and land restoration [J]. *Plant Soil*, 2008, 313:1~17.
- [26] BAKER J M ,BARER C H M ,VAN BAERL C H M. Water transfer through cotton plants connecting soil regions of differing water potential [J]. *Agron J*, 1988, 80:993~997.
- [27] VETTERLEIN D ,MARSCHNER H. Use of microtensiometer technique to study hydraulic lift in a sandy soil planted with pearl millet (*Pennisetum americanum*) [J]. *Plant Soil*, 1993, 149:275~282.

(责任编辑 冯秀兰)