

塔克拉玛干沙漠夏季保墒措施对沙拐枣 幼林土壤水分及林木生长的影响

孙旭伟^{1,2}, 李生字¹, 徐新文¹, 雷加强¹, 靳正忠¹, 郑婷婷^{1,2}, 谢致平³

(1. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049;
3. 中山大学 生命科学学院, 广东 广州, 510275)

摘要: 基于塔克拉玛干沙漠腹地田间试验, 对比分析了不同保墒措施对沙拐枣林地土壤水分和生长的影响。结果表明: (1) 保墒措施对土壤水分垂直分布的影响明显, 虽然灌溉初期处理间差异不大, 但在灌溉周末差异较大; 覆膜、覆沙、蒸发抑制剂(Guilspare[®])分别提高了0—20 cm, 30—60 cm和20—40 cm的土壤含水量。(2) 保墒措施对灌溉周期内沙拐枣清晨水势和午后水势均有显著影响, 不同处理的清晨水势大小顺序为: 地膜>覆沙>蒸发抑制剂>对照(CK); 蒸发抑制剂处理的午后水势却大于地膜。(3) 与对照相比, 保墒措施下沙拐枣的水分环境得到了较大改善, 地膜和覆沙处理下沙拐枣生长状况较好, 蒸发抑制剂处理的长势较差。

关键词: 塔克拉玛干沙漠; 保墒措施; 沙拐枣; 土壤水分; 生长特征

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)02-0097-06

中图分类号: S152.7

Effects of Different Soil Moisture Conserving Treatments on Soil Moisture and Growth Characteristics of *Calligonum mongolicum* in Summer in Hinterland of Taklimakan Desert

SUN Xu-wei^{1,2}, LI Sheng-yu¹, XU Xin-wen¹, LEI Jia-qiang¹,

JIN Zheng-zhong¹, ZHENG Ting-ting^{1,2}, XIE Zhi-ping³

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi,

Xinjiang 830011, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100049, China; 3. School of Life Science, SUN YAT-SEN University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

Abstract: Based on field experiment in the hinterland of Taklimakan Desert, the vertical distribution of soil moisture and growth characteristics of *Calligonum mongolicum* under different treatments were contrasted and analyzed. Results showed that (1) the vertical distribution of soil moisture was affected obviously by different soil moisture conserving treatments. Differences among treatments were not big in the early irrigation interval, but a reverse phenomenon was observed in the later irrigation interval. Soil moisture content increased at depths of 0—20 cm, 30—60 cm, and 20—40 cm under treatments of mulching film, mulching sand, and spurting inhibitor, respectively. (2) Both predawn and postmeridian water potential were affected obviously by different treatments. By predawn water potential, the order was mulching film > mulching sand > spurting inhibitor > CK, but postmeridian water potential of mulching film was less than spurting inhibitor. (3) Comparing with CK, it was clear that hydrological environment of plant was improved with soil moisture conserving treatments. The growth condition of *Calligonum mongolicum* under mulching film and mulching sand was better than spurting inhibitor.

Keywords: Taklimakan Desert; soil moisture conserving treatment; *Calligonum mongolicum*; soil moisture; growth characteristic

收稿日期: 2009-09-09

修回日期: 2009-12-18

资助项目: 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-13); 新疆维吾尔自治区重大科技专项(200733144-3); 塔里木油田公司科研项目(971008090016; 971008090017)

作者简介: 孙旭伟(1983—), 男(汉族), 甘肃省静宁县人, 硕士研究生, 主要从事干旱区节水技术研究。E-mail: sxwei0115@163.com。

通信作者: 李生字(1975—), 男(汉族), 河北省宣化市人, 博士, 副研究员, 主要从事风沙地貌和荒漠化防治研究。E-mail: lishy_hb@163.com。

水分条件对植物水分生理、生长特征及其形态结构都会造成影响^[1],而土壤水分是沙漠生态系统中水的主要存在形式。因此,土壤水分是影响沙漠植物生存和生长发育的主要限制因子。土壤水分也是联系地表水与地下水的纽带,在水资源的形成、转化及消耗过程中起着重要作用^[2],是影响沙漠地区生态系统稳定、结构和功能正常发挥的关键因子。目前,塔克拉玛干沙漠腹地人工林地利用地下咸水滴灌。地下水是塔克拉玛干沙漠腹地植物蒸腾和土壤贮水的主要来源,然而强烈的大气蒸发造成灌溉水很大一部分以土壤蒸发的形式损失。土壤水分无效损失不但增大了灌溉费用,而且一定程度上影响地下水资源的可持续利用。因此,采取合理的保墒措施以减少土壤水分损失,对于沙漠人工生态系统平衡的维持具有十分重要的意义。

沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)是一种多年生小灌木,叶已退化为同化枝,为典型的旱生植物,具有适应干旱荒漠环境的特征。许多学者对其水分生理和生长特征进行了大量研究,主要集中在蒸腾速率、耗水特性^[3-9]、水势以及P-V曲线^[6,7,8]等方面。然而,前人的这些研究只是在自然状态且水分条件较好的情况下进行的,有关不同保墒措施下沙拐枣生长特征的研究还未见报道。本研究在极端干旱的塔克拉玛干沙漠腹地布设田间试验,观测不同保墒措施下人工幼林土壤水分状况、沙拐枣长势和水势。研究结果对于塔里木沙漠公路防护林工程节水和可持续管护具有理论指导作用。

1 研究区概况

研究区域位于塔克拉玛干沙漠腹地的塔中地区(39°06'N, 83°40'E),海拔1100 m,属于典型的暖温带荒漠气候。据塔中气象站资料,该区年平均气温12.4℃,年最热月为7月份,月平均气温28.2℃,最

冷月为12月份,月平均气温-8.1℃,极端最低气温-20.2℃,极端最高气温45.6℃;全年≥10℃积温为4621.8℃,无霜期为283 d。年平均降水量24.6 mm,年蒸发量3638.6 mm,年平均相对湿度29.4%,年日照时数2571.3 h,年平均风速2.5 m/s。4—8月为风季,平均风速为3.2 m/s,最大瞬时风速达24 m/s,该区大风频繁,风热同期,浮尘扬沙天气十分常见。这种气候特点导致高温低湿型与大风低湿型干热风并发危害,对植物的生长极为不利。土壤特征随地貌不同而有差异,绝大部分为流动风沙土,盐分含量1~2 g/kg,在丘间地偶尔出现亚黏土,夹杂在风沙土中间,一般厚度只有20~60 cm。

2 试验设计与方法

2.1 试验设计

试验地位于中国科学院新疆生态与地理研究所塔中沙漠研究站东北14 km。选择地势平坦的丘间沙地布设田间试验,土质为流动风沙土(理化性质见表1)。2009年4月初,扦插沙拐枣枝条,同时设置3种保墒措施:覆膜、喷施蒸发抑制剂(Guilspare[®])、地表覆沙和对照,依次标记为地膜、蒸发抑制剂、覆沙和CK,每种处理3个重复。覆膜采用宽100 cm、厚0.06 mm的薄膜起垄覆盖;蒸发抑制剂(Guilspare[®])喷施浓度为1.5%(V/V)、施用量3.0 L/m²,为瑞士Guilford Development公司生产的一种新型节水产品,是一种可溶的有机硅化合物,弱碱性透明液体,基本成分为N, O, Si;附着的亲水基具有保持土壤水分的作用。地表覆沙厚度为30 cm。观测地块按照保墒措施分成4个小区,每个小区面积为4.5 m×10 m,沙拐枣行距1.5 m,株距1 m。试验采用咸水滴灌,其矿化度为4.23 g/L。每次灌溉8 h,相当于28 kg/(株·次),灌溉周期为7 d。

表1 风沙土基本理化性质

| 指标 | 含水量/% | 饱和持水量/% | 毛管持水量/% | 总孔隙度/% | 孔隙度/% | 总盐量/(g·kg ⁻¹) | 电导率/(ms·cm ⁻¹) |
|-----|-------|---------|---------|--------|-------|---------------------------|----------------------------|
| 特征值 | 0.02 | 27.03 | 25.64 | 37.58 | 35.64 | 1.51 | 0.09 |
| 指标 | 黏粒/% | 粉沙/% | 极细沙/% | 细沙/% | 中沙/% | 粗沙/% | pH(1:5) |
| 特征值 | 8.73 | 0.27 | 12.35 | 52.04 | 30.79 | 2.112 | 2.42 |

2.2 试验方法

2.2.1 土壤含水量测定 灌溉后1 d(2009年8月27日)和灌溉周期末(2009年9月1日)分别观测土壤含水量。由于试验区为流沙地,地下水位在10 m以下,每次灌溉只能下渗到100 cm,且沙拐枣为一龄幼苗,0—100 cm湿润层可完全满足植物生长的需要。因此,该试验只测定0—100 cm土壤含水量。用土钻每隔10

cm取样,采用烘干(105℃)称重法测定含水量。

2.2.2 水势测定 采用压力室(PMS, Instrument Co. Model 1000, USA)测定植株上部同化枝,分别于灌水后1 d和灌溉周期末进行测定,清晨水势和午后水势的测定时间分别为6:00和14:00,每处理选定3株植物,每株测定带叶小枝3个重复。

2.2.3 生长指标测定 从2009年7月开始,对沙拐

枣幼苗的生长状况进行观测,测定前随机选取3株幼苗挂牌,每月上旬测定1次。用钢卷尺和游标卡尺分别测量苗木的株高、冠幅和地径。冠幅采用公式(1)计算:

$$L = \sum(A \times B \times \pi / 4) + n^{[9]} \quad (1)$$

式中: L ——样本平均冠幅; A, B ——分别为样株树冠东西向、南北向的长度; $\pi/4$ ——长方形改为圆形的常数; n ——样本数。

2.2.4 生物量调查 2009年9月下旬,在每个处理随即选取3株样木,收割地上部分,带回实验室立即称量鲜重,所有样品经80℃烘24h至恒重,称量干重。

2.3 数据处理

采用SPSS 13.0软件对观测数据进行方差分析,相关图件采用Excel 2003和Sigma Plot 10.0完成。

3 结果与分析

3.1 土壤水分垂直分布特征

停灌后1d土壤水分的垂直分布图表明(图1a),保墒措施不同程度地改变了土壤的水分垂直分布状况,但处理间的差异不明显。与对照组(CK)相比,保墒措施处理后土壤水分随土层深度的变化具有一定规律性。对照组(CK)土壤含水量随土层深度的变化幅度很大,分布比较紊乱,蒸发抑制剂和覆沙处理

表层土壤含水量极低($< 2\%$),随土层深度的增大逐渐变大,土壤水分分布呈单峰曲线变化,分别在20—40cm和30—60cm土层出现峰值。地膜的0—20cm土壤含水量明显高于其它处理,随着土层深度的增大逐渐降低,至70cm以下土层含水量趋于稳定。从图1b可以看出,灌溉周期末土壤水分损失较大,处理间土壤含水量随土层深度的变幅差异较大,对照(CK)、蒸发抑制剂、地膜、覆沙表层土壤水分比停灌后1d分别损失94%,90%,1.6%和24.3%。0—10cm土层地膜处理的含水量最高,蒸发抑制剂和对照(CK)相差甚微,覆沙最小,但随土层深度的增加其增大的趋势最为强烈。对照和地膜10—20cm土壤含水量逐渐变小,至20cm处3种保墒措施的含水量几乎相同。20cm以下土层水分分布趋于平稳,土壤含水量随着土层深度的增大迅速降低,至80—100cm深层趋于稳定。王晓静^[10]等发现1年龄沙拐枣幼苗根系垂直方向主要分布在20—40cm,夏季灌溉周期内受大气蒸发的影响,覆沙处理土壤水分向上运移,20—40cm土壤含水量不断增大,植物根系吸水充足,长势良好;地膜和蒸发抑制剂的土壤含水量低于覆沙处理,植物受水分胁迫较覆沙处理严重。从图1可以看出停灌初期,对照(CK)土壤含水量与保墒措施差异不大,而灌溉周期末远低于保墒措施,这说明在极端干旱的沙漠环境中保墒措施的蓄水保墒效果明显,其中覆沙处理效果最好。

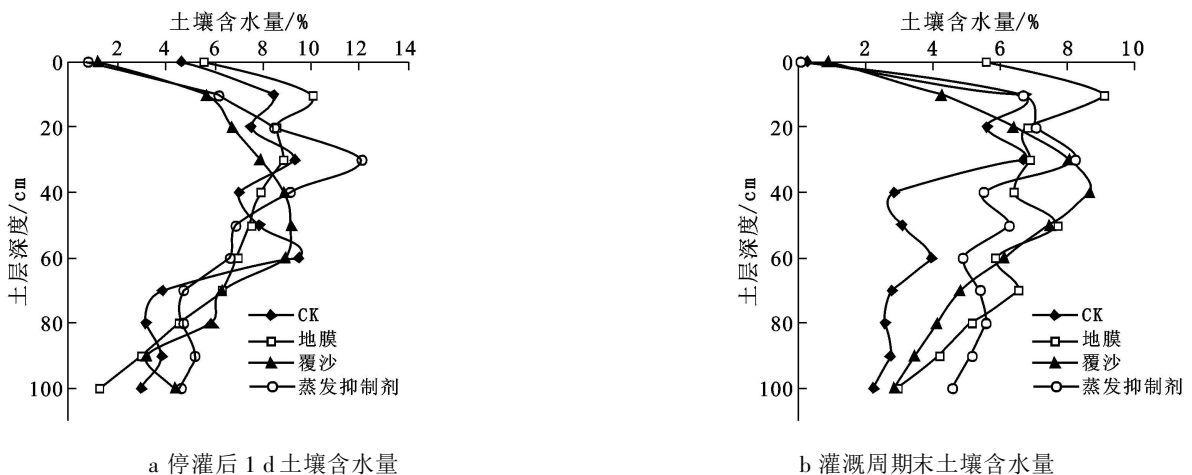


图1 不同保墒措施下土壤含水量的垂直分布特征

3.2 沙拐枣水势的变化

水势是反映植物水分状况的重要指标之一,它的高低表明植物从土壤或相邻细胞中吸收水分以确保其正常生理活动的能力^[11]。

本研究对2009年8—9月的测定值进行了分析,探讨不同保墒措施下沙拐枣水势在灌溉周期的变化情况。一般来讲,清晨水势反映了日出以前植物水分的

恢复状况,可用来判断植物水分亏缺程度^[12]。清晨水势高表明植物得到了良好的水分供应,反之则表明植物受到水分胁迫^[13]。图2的A、C分别反映了停灌后1d和灌溉周期末不同保墒措施下沙拐枣清晨水势的变化情况。两时段沙拐枣的清晨平均水势值均为地膜最高,对照(CK)最低;所有处理停灌后1d高于灌溉周期末,处理间差异不大。方差分析表明,停灌后1d处

理间的清晨水势差异不显著,而灌溉周期末地膜显著高于蒸发抑制剂($P < 0.05$)。

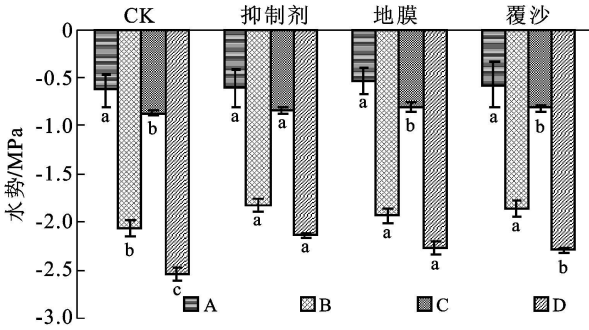


图 2 不同保墒措施下沙拐枣水势变化曲线

注: A、B 分别为停灌后 1 d 清晨和午后水势; C、D 分别为灌溉周期末清晨和午后水势; 不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

植物午后水势反映其受水分胁迫的程度以及水分亏缺的最大值^[1]。图 2 中 B、D 分别为停灌后 1 d 和灌溉周期末不同处理下沙拐枣午后水势的变化。停灌后 1 d 和灌溉周期末沙拐枣的午后水势变化趋势基本一致,但不同处理对沙拐枣午后水势高低的影响仍有差异。不同处理下停灌后 1 d 和灌溉周期末沙拐枣午后水势大小顺序分别为:蒸发抑制剂 > 覆沙 > 地膜 > 对照(CK)和蒸发抑制剂 > 地膜 > 覆沙 > 对照(CK)。方差分析表明,停灌后 1 d 不同保墒措施下沙拐枣午后水势显著高于对照(CK) ($P < 0.05$),

保墒措施间差异不显著;灌溉周期末对照(CK)水势显著低于保墒措施 ($P < 0.05$),覆沙与地膜和蒸发抑制剂间均达到显著差异 ($P < 0.05$)。

3.3 沙拐枣生长特征

株高、地径和冠幅是判断幼树生长状况的重要指标,能够很好地体现灌木的形态特征,从而可以直观判断应该采用哪一种保墒措施较为合理。试验随机抽取的样本大小差异较大,所以本研究分析样本的株高、地径和冠幅月净生长量和累积净生长量。由调查结果(表 2)得知,保墒措施对沙拐枣株高、地径和冠幅净生长量的影响程度存在月份差异。7 月份,蒸发抑制剂下沙拐枣株高、地径和冠幅净生长量最小,覆沙的株高和地径净生长量最大,地膜的冠幅净生长量最大。其中覆沙下株高净生长量显著高于其它处理 ($P < 0.05$),地径净生长量显著高于蒸发抑制剂 ($P < 0.05$),其它处理间均无显著差异。处理间冠幅净生长量的差异不显著,最大值 (0.233 m^2)与最小值 (0.145 m^2)仅相差 0.087 m^2 。方差分析结果表明,8 月份处理间沙拐枣株高、地径和冠幅净生长量差异均无显著性。表 2 数据表明,8 月份地膜处理下沙拐枣株高与冠幅的净生长量最大,比对照分别高出 41.37% 和 52%,覆沙处理下地径净生长量最大,比对照、蒸发抑制剂和地膜分别高出 27%、21%和 11.6%。

表 2 不同处理下沙拐枣生长指标净生长量(2009 年 7—8 月)

| 处理 | 7 月净生长量 | | | 8 月净生长量 | | |
|-------|--------------------|----------------------|--------------------|---------------------|-------------------|--------------------|
| | 株高/cm | 地径/mm | 冠幅/ m^2 | 株高/cm | 地径/mm | 冠幅/ m^2 |
| 覆沙 | 29.67 ± 6.66^a | 4.16 ± 2.64^a | 0.214 ± 0.10^a | 26.00 ± 11.79^a | 5.58 ± 4.24^a | 0.202 ± 0.07^a |
| 地膜 | 19.00 ± 7.00^b | 2.24 ± 0.66^{ab} | 0.233 ± 0.03^a | 29.00 ± 2.65^a | 4.93 ± 0.57^a | 0.405 ± 0.08^a |
| 蒸发抑制剂 | 17.67 ± 4.04^b | 0.94 ± 0.29^b | 0.145 ± 0.07^a | 28.33 ± 3.05^a | 4.38 ± 3.80^a | 0.279 ± 0.13^a |
| CK | 18.67 ± 2.52^b | 2.06 ± 0.55^{ab} | 0.167 ± 0.10^a | 17.00 ± 7.94^a | 4.07 ± 2.29^a | 0.194 ± 0.15^a |

注:相同字母表示 $P < 0.05$ 水平差异不显著。

从不同处理下沙拐枣株高和地径累积净生长量(图 3a)可以看出,覆沙处理下沙拐枣株高和地径累积净生长量最大,比对照(CK)分别增加了 20 cm 和 3.6 mm;蒸发抑制剂处理下地径累积增长量反而小于对

照组。图 3b 为不同处理下沙拐枣冠幅累积净生长量,冠幅在地膜处理下累积增长量最大,是对照(CK)的 1.76 倍。以上分析可知,保墒措施对沙拐枣生长有显著影响,地膜和覆沙都是较好的节水技术。

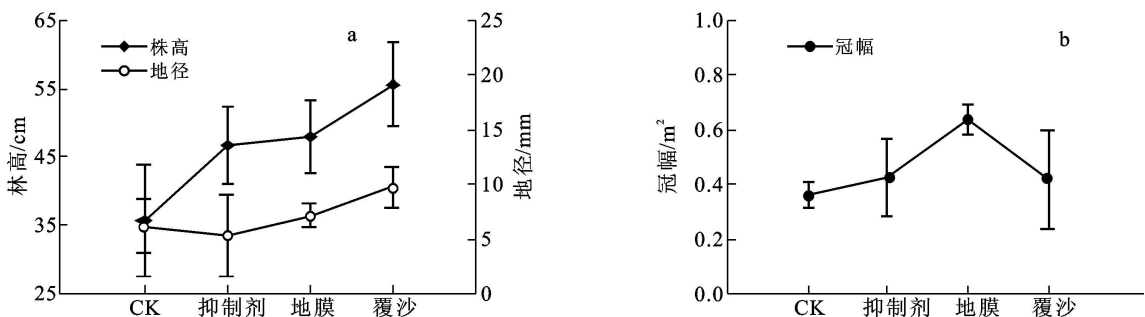


图 3 不同保墒措施下沙拐枣株高、地径和冠幅累积净生长量

3.4 沙拐枣生物量分析

采用生物量收获法^[14]对比了不同处理下沙拐枣地上部分生物量的大小(图4)。覆沙的沙拐枣地上部分总鲜重显著高于对照组和蒸发抑制剂($P < 0.05$),其它处理间差异未达到显著水平。不同处理下沙拐枣地上部分鲜重大小顺序为:覆沙>地膜>蒸发抑制剂>CK;相应的干物质重量为覆沙显著高于对照(CK)($P < 0.05$),其它处理间差异均无显著性。说明采取覆沙措施后,沙拐枣地上部分长势良好,生理活动旺盛,生物量迅速增加,对防沙体系的快速建立和健康运行有积极作用。

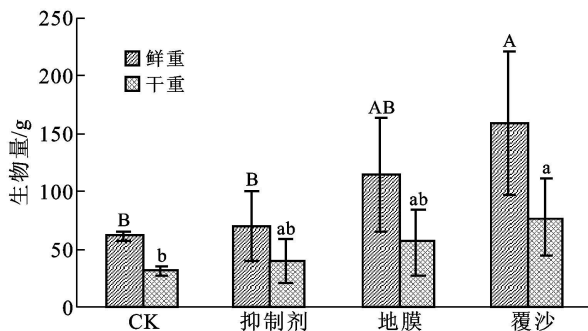


图4 不同保墒措施下沙拐枣生物量比较

注:图中不同大、小写字母分别表示沙拐枣鲜重和干重差异显著($P < 0.05$)。

4 结果与讨论

4.1 保墒措施对土壤水分垂直分布的影响

不同保墒材料,其空隙程度和通透性能存在差异,所以在抑制土壤水分蒸发的同时,对施用区及相邻非施用区内土壤水分移动与分布将产生影响^[15]。本研究发现,3种保墒措施中地膜处理明显地提高了0—20 cm 土层含水量,30—80 cm 土层含水量均低于另外2种处理,这与侯连涛^[16]等人的研究结果一致。黄强^[17]等在咸水畦灌条件下研究得出,停灌初期仅10 cm 以上土层水分向地表运移,至停灌60 h后,上移水分深度稳定在90 cm。这与本研究认为在灌溉周期末80—100 cm 深层土壤含水量的变化趋于稳定这一结论基本吻合。这可能是因为覆膜后切断了土壤与外界的气、热交换,地表高温致使土壤水分向上运移聚集在土壤上层(0—20 cm),随着土层深度的增大,热量向下传导能力逐渐减弱,土壤水分主要受重力控制向下运移,至80 cm 土壤水主要以束缚水的形式存在。喷施蒸发抑制剂后土壤表层在灌溉后易形成难以被水浸透的疏水层,切断了毛管,从而阻止了土壤水分的蒸发,土壤水分主要在重力作用下向下运移,受侧渗的影响大部分集中在20—40 cm。试验发

现覆沙处理0—5 cm 为干沙层,而干沙层对流动沙丘土壤蒸发有显著的抑制作用^[18],另外覆沙处理直接将水分输送到地下30 cm处,灌溉水分受大气蒸发的影响很微弱,水分运动以下渗和侧渗为主,同时受灌溉量的限制主要分布在30—60 cm。

4.2 保墒措施对植物水势的影响

植物水势是反映植物吸水能力与保水能力大小的综合指标,其变化状况可以从一个侧面较为客观地反映植物体内水分运转及平衡状况。本研究对不同保墒措施下沙拐枣水势的研究认为,停灌后1 d 清晨和午后水势均高于灌溉周期末;沙拐枣水势随着土壤含水量的减小降低,与解婷婷^[1]、单长卷^[19]、杨鑫光^[20]等的研究结果一致。地膜处理停灌后1 d 和灌溉周期末清晨水势最大,而午后水势最大值则出现在蒸发抑制剂处理。可能是因为覆膜后上层土壤含水量高,沙拐枣夜间水分吸收较好,清晨水势较大;覆膜后午后水势低于蒸发抑制剂处理,这可能是由于地膜提高了土壤温度,而沙拐枣在高温环境条件下通常具有较高的蒸腾速率^[20],水分散失较多所致。

4.3 保墒措施对植物生长影响

保墒措施提高了土壤含水量,增强了根系对水分和养分的吸收,从而大幅提高了林木的生长量。本研究发现,保墒措施下沙拐枣株高、地径、冠幅的生长量8月份优于7月。这是因为7月是塔克拉玛干沙漠腹地最热月,沙拐枣耗水量最大^[3],受水分胁迫严重;同时7月较高的蒸腾速率(T_r)也使其水分利用效率(WUE)小于8月^[21]。7月份覆沙处理下沙拐枣株高和地径增长量大于地膜,可能与该月强烈的大气蒸发下覆沙处理下深层土壤水分向上运移有关。覆膜后沙拐枣冠幅增长量较大,可能与沙拐枣同化枝光合作用对温度的响应有关。苏培玺^[22]等认为,水分胁迫导致沙拐枣出现光抑制,而提高空气湿度或者土壤湿度,都能避免光抑制,提高光能利用率。研究结果还发现,7月喷施蒸发抑制剂后沙拐枣各生长指标净生长量均最小,8月却高于对照。可能是塔克拉玛干沙漠7月高温低湿的气候环境不利于蒸发抑制剂效益的实现。目前关于蒸发抑制剂对使用环境变化的响应研究还未见报道,这方面的研究还需进一步深入。

5 结论

地膜处理大幅度提高了0—20 cm 土层含水量,沙拐枣长势良好,清晨水势也是处理中最大的,可见该处理在一定程度上提高了沙拐枣夜间吸水能力。覆沙措施下土壤水分主要分布在30—60 cm 土层,沙拐枣株高、地径净生长量和生物量均为最大。因此,

春季栽植幼苗时采用覆膜措施,不但能够给幼苗提供充足的水分,还能够提高土壤温度,利于幼苗成活和生长,夏季采用覆沙措施,能够较好的减缓大气蒸发造成的水分胁迫,避免光抑制,提高光能利用率,促进植物生长。试验结果表明,蒸发抑制剂提高了20—40 cm 土壤含水量,但在高温低湿的沙漠腹地蒸发抑制剂处理下,沙拐枣生长状况不太理想。

致谢 塔克拉玛干沙漠研究站的工作人员对试验的开展提供了很多帮助,谢致平博士提供了蒸发抑制剂,在此一并表示感谢!

[参 考 文 献]

- [1] 解婷婷,张希明,单立山,等.灌溉量对多枝柽柳水分生理及生长的影响[J].干旱区研究,2008,25(6):802-807.
- [2] 雷志栋,胡和平,杨诗秀.土壤水研究进展与评述[J].水科学进展,1999,10(3):311-318.
- [3] 许浩,张希明,王永东,等.塔里木沙漠公路防护林乔木状沙拐枣耗水特性[J].干旱区研究,2006,23(2):216-222.
- [4] 梁少民,闫海龙,张希明,等.天然条件下塔克拉玛干沙漠沙拐枣对潜水条件变化的生理响应[J].科学通报,2008,53(S2):100-106.
- [5] 许浩,张希明,闫海龙,等.塔里木沙漠公路防护林植物水分状况[J].科学通报,2008,53(S2):131-139.
- [6] 李向义, Frank M T, Anderea F, 等.自然状况下头状沙拐枣对水分条件变化的响应[J].植物生态学报,2003,27(4):516-521.
- [7] 李向义,张希明,何兴元,等.沙漠—绿洲过渡带4种多年生植物水分关系特征[J].生态学报,2004,24(6):1164-1171.
- [8] Zeng F J, Timothy M B, Peter A L, et al. Water and nutrient dynamics in surface roots and soils are not modified by short-term flooding of phreatophytic plants in a hyperarid desert[J]. Plant and Soil 2006, 279: 129-139.
- [9] 张仁富,刘晓春,余文,等.四旁树冠幅调查及覆盖面积计算[J].江苏林业科技,1991(2):30-31.
- [10] 王晓静,徐新文,雷加强,等.沙漠腹地咸水滴灌条件下沙漠公路防护林根系垂直分布特征[J].科学通报,2008,53(S2):69-73.
- [11] 曾杰,曾凡江,郭海峰,等.策勒绿洲外围2种植物幼苗对NaCl的生理响应[J].干旱区研究,2008,25(5):673-678.
- [12] Pelaez D V, Boo R M. Plantwater potential for shrubs in Argentina[J]. Journal of Range Management, 1987, 40(1):6-9.
- [13] Sobrado M A, Turner N C. A comparison of the water relations characteristics of *Helianthus annuus* and *Helianthus petiolaris* when subjected to water deficits[J]. Oecologia, 1983, 58: 309-313.
- [14] 赵育民,牛树奎,王军邦,等.植被光能利用率研究进展[J].生态学杂志,2007,26(9):1471-1477.
- [15] 王进鑫,刘广全,王迪海.局部覆盖条件下土壤水分移动性能与蒸发力的关系[J].水土保持学报,2004,18(4):143-145.
- [16] 侯连涛,焦念元,韩宾,等.不同覆盖方式对土壤水分分布的影响[J].灌溉排水学报,2007,26(1):47-50.
- [17] 黄强,李生秀,宋郁东.咸水灌溉沙地后的水盐运移规律[J].土壤学报,2003,40(4):547-552.
- [18] 刘新平,张铜会,赵哈林,等.流动沙丘干沙层厚度对土壤水分蒸发的影响[J].干旱区地理,2006,29(4):523-526.
- [19] 单长卷,郝文芳,梁宗锁,等.不同土壤干旱程度对刺槐幼苗水分生理和生长指标的影响[J].西北农业学报,2005,14(2):44-49.
- [20] 杨鑫光,傅华,张洪荣,等.水分胁迫对霸王苗期叶水势和生物量的影响[J].草业学报,2006,15(2):37-41.
- [21] 闫海龙,梁少民,张希明,等.塔克拉玛干沙漠特有灌木光合作用对生境中特殊温度、湿度及辐射变化的响应[J].科学通报,2008,53(S2):74-81.
- [22] 苏培玺,严巧娣.C4荒漠植物梭梭和沙拐枣在不同水分条件下的光合作用特征[J].生态学报,2006,26(1):75-82.