

DOI: 10.5846/stxb201509021818

朱海, 胡顺军, 刘翔, 李浩, 李宜科. 不同龄阶梭梭根区土壤水分时空变化特征. 生态学报, 2017, 37(3): - .

Zhu H, Hu S J, Liu X, Li H, Li Y K. Spatio-temporal variations of soil moisture in the root zone of *Haloxylon ammodendron* at different life stages. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): - .

## 不同龄阶梭梭根区土壤水分时空变化特征

朱 海<sup>1,2</sup>, 胡顺军<sup>1,\*</sup>, 刘 翔<sup>1,2</sup>, 李 浩<sup>1,2</sup>, 李宜科<sup>1,2</sup>

1 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 土壤水是荒漠植被发育最主要的制约因子。不仅影响植物的生长和发育, 还限制着植被的种类、数量和分布。梭梭作为北方荒漠区重要的固沙植物, 研究梭梭林地土壤水分动态对其植被生存或恢复以及群落稳定性维持具有重要意义。鉴于少有学者研究过不同龄阶梭梭根区的土壤含水率差异, 于 2014 年 2 月至 2014 年 11 月, 采用中子仪法和烘干法对 0—400 cm 沙层土壤含水率进行了原位观测, 分析了不同龄阶梭梭根区土壤水分的时空变化规律。结果表明: (1) 梭梭根区土壤水分时间变化可分为 4 个阶段: 2 月下旬—3 月下旬是土壤水分快速补给期, 4 月上旬—5 月下旬是土壤水分均衡期, 6 月上旬—10 月下旬是土壤水分耗损期, 11 月上旬—次年 2 月中旬是土壤水分稳定期; (2) 梭梭根区 0—50 cm 土层, 受降雨、融雪水入渗补给和蒸发的影响较大, 土壤水分变异系数较大且随深度增加迅速减小, 50 cm 以下土层变异系数较小且随深度变化微小; (3) 不同龄阶梭梭根区剖面平均土壤含水率全年与春、夏、秋季均表现为: 枯树 > 成熟梭梭 > 中龄梭梭 > 裸地; (4) 随距梭梭树干距离的增大 (0—5 m 范围内), 土壤含水率整体呈减小趋势; 降雨前后, 梭梭根区浅层 (0—10 cm) 土壤含水率增量大于裸地土壤含水率增量。

**关键词:** 梭梭根区; 土壤水分; 时空变化; 古尔班通古特沙漠

## Spatio-temporal variations of soil moisture in the root zone of *Haloxylon ammodendron* at different life stages

ZHU Hai<sup>1,2</sup>, HU Shunjun<sup>1,\*</sup>, LIU Xiang<sup>1,2</sup>, LI Hao<sup>1,2</sup>, LI Yike<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Desert and Oasis, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academic of Sciences, Urumqi 830011, China

2 University of Chinese Academic of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Soil water, as a major factor limiting vegetation in deserts, does not only affect the survival and growth of plants, but also the species abundance and distribution. To research the spatiotemporal variations of soil moisture content in root zone is vital for understanding the recovery, maintenance and the stability of plant communities in deserts. In the Gurbantunggut desert in northwestern China, *Haloxylon ammodendron* as the dominant species plays an important role in dune stabilization. However, little is known about the effects of plant life stage on the variations of soil moisture content in the root zone for *Haloxylon ammodendron*. In our study, soil water dynamics were monitored for eight typical *Haloxylon ammodendrons* individuals in an inter-dune low land at the southern edge of Gurbantunggut Desert, each with a soil moisture monitoring point 20—30 cm away from the stem base. Another two points were set in the inter-shrub bare soil. In addition, 16 points were positioned two individuals with 10 meters away from each other. Thus there were totally 26 points. From February 2014 to November 2014, in-situ observations for soil moisture within 0—400 cm soil were performed by neutron probe method in combination with oven-drying method to explore the spatiotemporal variations of soil moisture in the root zone of *Haloxylon ammodendron* individuals at different life stages. Results show that (1) the annual variation of soil water

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2013CB429902); 国家自然科学基金-新疆联合基金面上项目 (U1303181)

收稿日期: 2015-09-02; 网络出版日期: 2016-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xjhshunjun@aliyun.com

underwent 4 periods, i.e., recharging period (from later February to early March), equilibrium period (from early April to late May), discharging period (from early June to late October), and stable period (from early November to middle February of the following year); (2) soil water dynamics differed within profiles, with a higher coefficient of variation that decreases rapidly with depth in the top 50 cm soil layer, and a relatively constant coefficient for 50—400 cm soil layers; (3) the averaged soil moisture content at different life stages in spring, summer, fall, as well as in the whole year displayed a pattern in order of dead individual > adult individual > young individual > bare soil; (4) soil moisture decreased gradually with the increasing distance to the *Haloxylon ammodendron* base stem within 5 meters; and (5) following rainfall events, the soil moisture content in 10 cm soil increased more in the root zone than in the bare soil.

**Key Words:** root zone; soil moisture; spatio-temporal variation; Gurbantunggut desert; *Haloxylon ammodendron*

土壤水分作为荒漠植被发育最主要的制约因子,不仅影响沙地植物的生长状况,还限制着植被的种类、数量和分布<sup>[1-5]</sup>,同时,植物生长也会影响土壤水分,尤其在干旱与半干旱地区<sup>[6]</sup>。沙地水分状况是气候、植被、地形及土壤因素等自然条件的综合反映<sup>[7]</sup>。梭梭(*Haloxylon ammodendron*)为藜科梭梭属超旱生小乔木,是我国北方荒漠区重要的固沙植物。梭梭林地土壤水分状况一直是北方沙漠地区水分循环研究的重点领域<sup>[8-10]</sup>,研究梭梭林地土壤水分动态对其植被生存或恢复<sup>[11]</sup>以及群落稳定性的维持具有重要意义。

古尔班通古特沙漠降水稀少,蒸发强烈,地下水埋深大,植被生长对土壤水分的依赖性强。梭梭作为该地区的主要固沙植被,其生长发育很大程度上受制于土壤水分条件,同时又对土壤水分动态变化产生反馈<sup>[12]</sup>。尽管不少学者研究了该地区土壤水分及其与植被相互作用<sup>[13-15]</sup>,但目前针对梭梭根区土壤含水率变化的研究较少,且少有学者研究过不同龄阶梭梭根区土壤含水率差异。杨艳凤<sup>[12]</sup>采用 TDR 探头对一株典型大梭梭根区土壤含水率研究后认为,梭梭根区土壤存在“湿岛”效应,且这种效应夏季比春季、雨后比雨前明显。李君<sup>[16]</sup>研究融雪后古尔班通古特沙漠南缘表层土壤含水率的空间变异后发现,在梭梭个体尺度上,土壤含水率从冠下、经冠缘至灌木间地呈梯度递减。周宏飞<sup>[17]</sup>等也对沙漠南缘沙丘不同季节不同部位土壤含水率进行了对比,认为沙丘土壤含水率有明显季节变化和分层变化,植被和地形对土壤水分空间分异作用明显,沙丘坡脚处及荒漠灌木梭梭根区始终存在土壤水分相对富集区。

本文基于前人的研究成果,在古尔班通古特沙漠南缘北沙窝沙区丘间地不同年龄的梭梭植株下面,布设土壤水分定位监测点,采用中子水分仪测定 0—400 cm 土层土壤含水率,分析不同龄阶梭梭根区土壤水分时空变化规律,以为古尔班通古特沙漠植被保护、受损生态系统的恢复与重建提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地位于古尔班通古特沙漠南缘北沙窝试验场(44°22.63′ N, 87°55.21′ E),地貌类型以树枝状沙垄为主,沙垄呈南北走向近平行排列,两侧不对称,东坡陡西坡缓,高度为 5—7 m,沙丘顶部有 1 m 左右的平缓流沙带。年均气温 6.6℃,年潜在蒸散量 2 000 mm,年降水量 100—150 mm。稳定积雪日数 100—160 天,最大积雪深度多在 20 cm 以上<sup>[18]</sup>。潜水位埋深 9—10 m。土壤为典型沙漠风沙土,容重 1.54—1.65 g/cm<sup>3</sup>。植被以梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、白梭梭(*Haloxylon persicum*)为优势种,还包括蛇麻黄(*Ephedra distachya*)、角果藜(*Ceratocarpus arenarius*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)及众多短命植物<sup>[14,19]</sup>。

### 1.2 试验设计

于 2014 年 2 月份,在古尔班通古特沙漠南缘北沙窝试验场丘间低地,选取一块 50 m×50 m 左右的梭梭林样地,样地中梭梭盖度为 36%,密度为 0.25 株/m<sup>2</sup>,从中选取具代表性的梭梭 8 株,在距其基部 20—30 cm 处设置土壤水分监测点(埋设中子管)。参照里昂节夫,Б.Л.等<sup>[20]</sup>对梭梭龄阶(幼苗、幼林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林)的划分,同时结合梭梭冠幅、株高、基径和发育状况<sup>[21]</sup>,将梭梭分为成熟梭梭、中龄梭梭及枯死梭

梭(枯树)(表1),2#、5#、6#和9#土壤水分监测点对应成熟梭梭,1#、3#和8#土壤水分监测点对应中龄梭梭,4#土壤水分监测点对应枯死梭梭。并以裸地的7#和10#土壤水分监测点为对照。另外,选取2株相邻10m左右的成熟梭梭,在中间以50cm间隔,设置一排土壤水分监测点(11#—26#)(图1)。

样树的选择主要参考:(1)长势良好,构型相似,没有病虫害危害,没有动物啃食迹象,没有人为破坏;(2)样树与其它同种或不同种植物保持一定的距离,以减少种间或种内由于对空间资源竞争而产生的影响<sup>[22]</sup>。

表1 不同龄阶梭梭的形态特征

Table 1 Morphological features of *Haloxylon ammodendron* relative to growth stage

| 龄阶<br>Growth stage | 株高<br>Height /m | 冠幅<br>Crown diameter /(m×m) | 基径<br>Basal diameter /cm |
|--------------------|-----------------|-----------------------------|--------------------------|
| 中龄梭梭 Young         | 1.7—2.1         | 1.5×1.3—1.7×1.5             | 5.4—7.3                  |
| 成熟梭梭 Adult         | 3.6—4.2         | 1.9×3.0—4.2×4.0             | 11.5—17.2                |
| 枯树 Dead tree       | 2.2             | 2.4×2.3                     | 8.0                      |

梭梭根部土壤水分采用中子仪法测定,中子管(铝管)埋设深度400cm左右。通常10d左右监测一次,测定深度为10、30、50、70、90、…、390cm。相邻梭梭中间土壤水分采用烘干法测定,在梭梭生长的春、夏、秋季各取土一次,测定深度为20、40、60、80、100、…、300cm。质量含水率与体积含水率转换关系为: $\theta_v = \theta_m \cdot \rho$ ,  $\theta_v$ 为体积含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ),  $\theta_m$ 为质量含水率( $\text{g/g}$ ),  $\rho$ 为容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

### 1.3 数据处理

将处于相同龄阶梭梭旁的各观测点土壤含水率的平均值作为该龄阶梭梭的根区土壤含水率。采用Excel 2003软件,统计不同龄阶梭梭根区的土壤含水率及其变异系数;采用Sigmaplot 10.0及Surfer 8.0软件绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 梭梭根区土壤水分的季节变化

图2描述了成熟梭梭根区、中龄梭梭根区、枯树根区和裸地整个监测剖面土壤含水率随时间变化的过程。不同龄阶梭梭根区与裸地土壤含水率呈现相同的时间变化趋势。2月份,除表层外,整个剖面土壤含水率较低。由于积雪存在一定程度的冻融作用,使得表层土壤含水率较高。3月份开始,随气温回升,地表积雪开始消融,浅层(0—50cm)土壤含水率开始显著增大,并在整个春季(3—5月)都保持较高水平,而深层土壤含水率变化不大。到夏季,表层土壤含水率开始降低,除受降雨影响有一定波动之外,土壤含水率之后一直保持较低水平。而深层土壤,湿润锋逐渐下移,土壤含水率缓慢降低,但在整个夏秋季都保持在较高水平。到秋末冬初,土壤含水率降到较低水平,且在整个冬季基本不再变化。

由于融雪水入渗补给、降水入渗补给和蒸散发的共同作用,梭梭根区土壤水分变化过程可分为4个阶段,2月下旬至3月下旬是土壤水分快速补给期,4月上旬至5月下旬是土壤水分均衡期,6月上旬至10月下旬是土壤水分耗损期,11月上旬至次年2月中旬是土壤水分稳定期。春季是古尔班通古特沙漠土壤水分变化最迅速的时期<sup>[17]</sup>,早春地表积雪开始融化,冬季积雪融水和春季降雨迅速补充到沙漠土壤中,使土壤含水率迅速增大。4月份,梭梭开始萌芽,加之大量短命植物生长,蒸腾量随叶面积增长而快速上升,而该时期融雪水的补给加上相对充足的降雨,土壤水分消耗与补给维持在一个比较均衡的水平。到6月份,融雪水基本消耗,

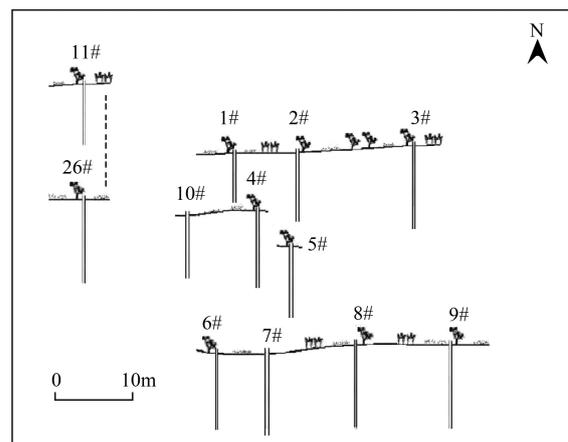


图1 样树分布及土壤水分监测点示意图

Fig.1 Distribution of sample trees and soil moisture observation sites

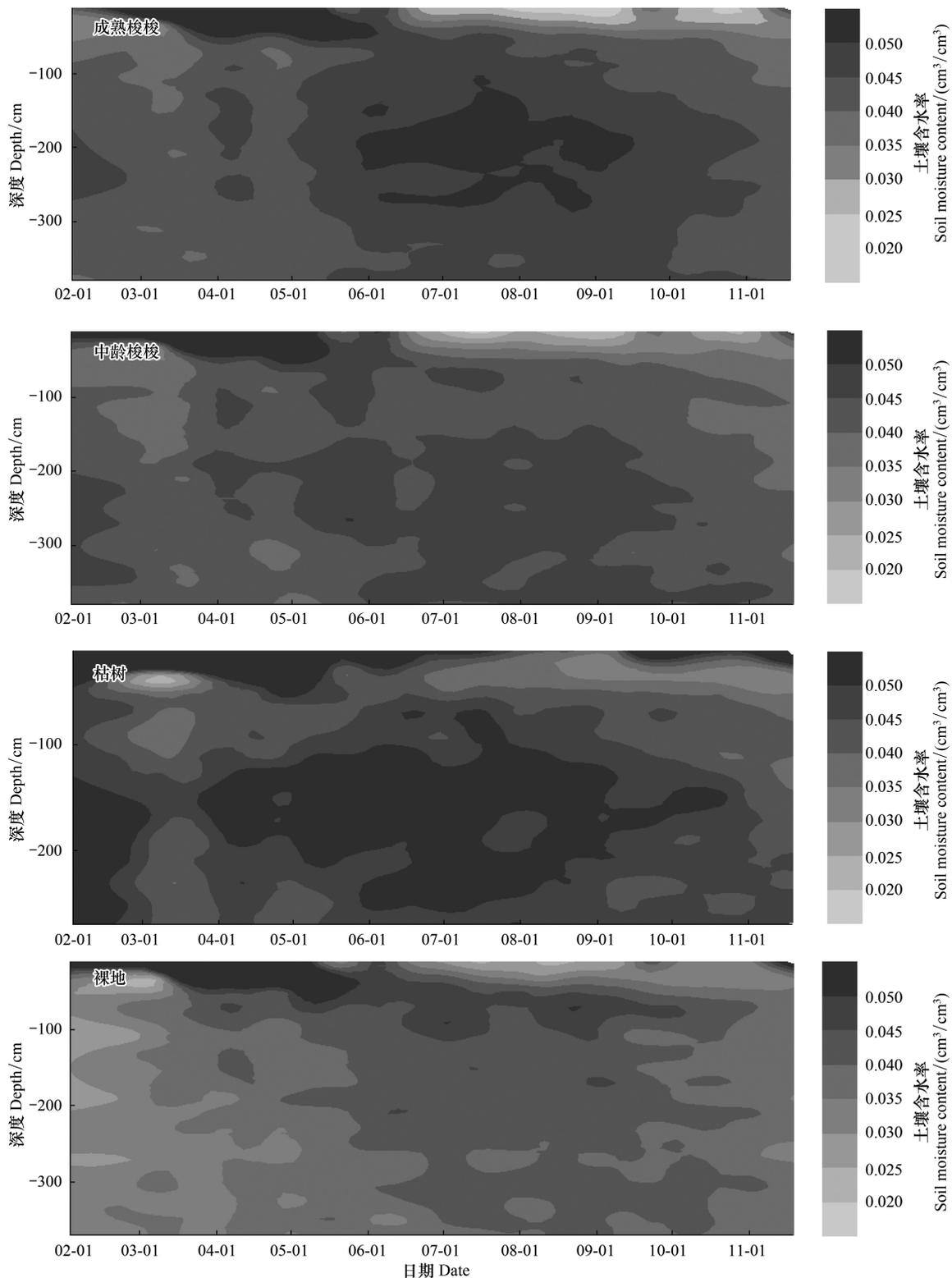


图2 不同龄阶梭梭根区土壤水分季节变化(a—d 分别代表成熟梭梭、中龄梭梭区、枯树和裸地)

**Fig.2** Seasonal patterns of soil moisture in the root zone of *Haloxylon ammodendron* at different growth stages (a—d stands for adult *Haloxylon ammodendron*, young *Haloxylon ammodendron*, dead tree and bare land, respectively)

梭梭达到旺盛生长阶段,各种草本植物也大量生长,使得根区土壤水分消耗量大大增加,造成土壤水分一直处于消耗阶段。在11月上旬,地表已被积雪覆盖,气温较低,土壤冻结后土壤水由液态变成固态,此时梭梭已落

叶停止生长,土壤水分消耗极少,整个冬季土壤含水率基本没有变化。

## 2.2 梭梭根区土壤水分垂直变化

图 3 描述了不同龄阶梭梭根区全年土壤含水率均值及其时间变化变异系数随深度变化的趋势。由图可见,0—50 cm 土层,土壤含水率较高且随深度增加急剧减小。由于早春地表积雪开始融化,冻融作用交替进行,水分向冻土表面汇聚,冻结层阻碍了表层融雪水的入渗,往往使冻土层以上土壤水分处于饱和状态<sup>[14]</sup>,故而测得的表层土壤含水率很高,使得该层全年平均土壤含水率也较高。50 cm 以下土层,除各层土壤质地差异造成的含水率波动外,土壤含水率随深度变化较小。

梭梭根区土壤水分的垂直变化,除受土壤质地、地下水埋深等影响外,还受融雪、降水、蒸发和风等多种因素的影响<sup>[23]</sup>。上层土壤受外界环境影响大,随着深度的增加土壤所受的外界环境影响逐渐减弱。一般来讲,随着深度的增加,土壤含水率的时间变异程度逐渐减小。

由图 3 可见,不同龄阶梭梭根区土壤水分变异系数的变化规律呈现一致性。在 0—50 cm 土层,土壤水分含量受融雪、降雨、表面蒸发等因素的影响显著,融雪期,融雪水入渗使得浅层土壤含水率升得很高,后期受到蒸发等影响又降到很低,年内变化很大,降雨也会使得浅层土壤含水率迅速增加,随蒸发逐渐加强又会迅速下降,因而变异系数很大;50 cm 以下土层,受气象条件影响较小,土壤水分变异系数均低于 0.1,且随深度变化微小。

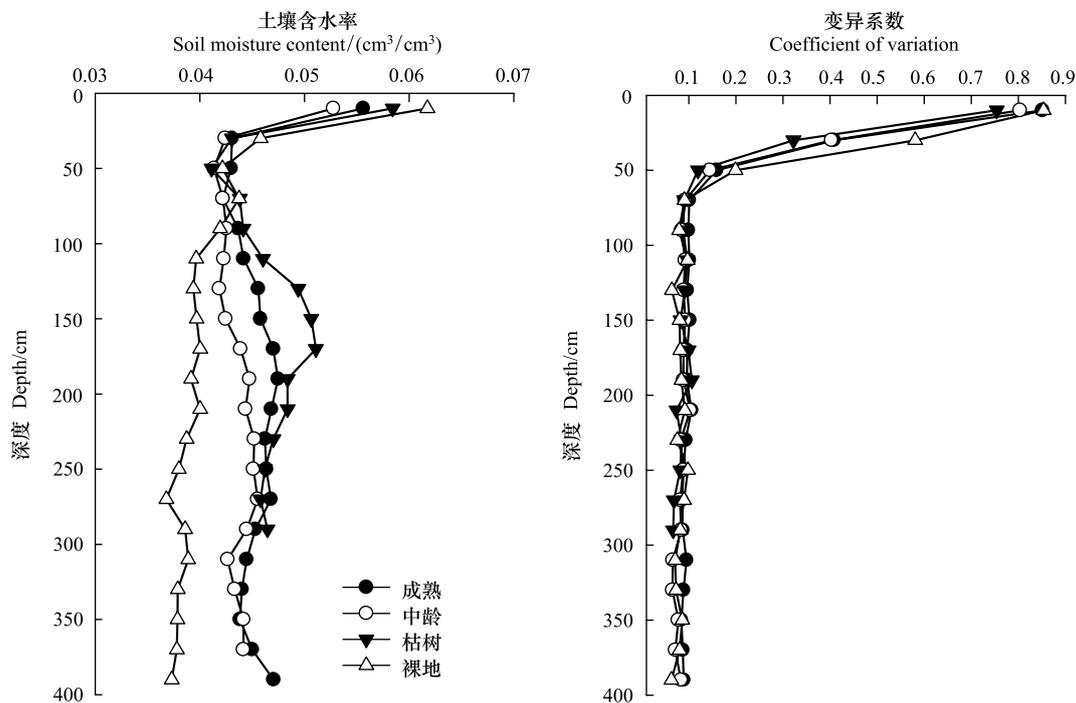


图 3 不同龄阶梭梭根区全年土壤含水率均值及变异系数随深度的变化

Fig.3 Variations of soil moisture content and coefficient of variation with soil depth

## 2.3 不同龄阶梭梭根区剖面平均土壤含水率的差异

由图 4 可见,2014 全年不同龄阶梭梭根区剖面平均土壤含水率分别为:成熟梭梭  $0.046 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,中龄梭梭  $0.044 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,枯树  $0.04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,裸地  $0.041 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,根区土壤含水率高低表现为:枯树>成熟梭梭>中龄梭梭>裸地。春、夏、秋季根区剖面平均土壤含水率差异与全年差异相一致。其中春季由于融雪水入渗的原因,使得整体土壤含水率略高。

梭梭根区土壤含水率主要受树冠集流、蒸散和遮阴作用影响。树冠集流补充根区土壤水分,遮阴作用减少冠层下水分蒸发,蒸腾降低根区土壤含水量。由于枯树仅有树冠集流作用,没有蒸腾消耗,使得根区土壤含

水率很高,且梭梭死亡之后树干开裂,树干基部与地面形成较大裂隙,进一步促进了水分的入渗。成熟梭梭和中龄梭梭由于蒸腾作用使得根区土壤含水率低于枯树根区。就成熟梭梭与中龄梭梭相比,虽然其较大的树冠造成了较大的蒸腾量,但其大的树冠能汇集更多的雨水,加之树冠的遮阴作用更强,使得根区含水率高于中龄梭梭。裸地则不存在相关效应且受太阳直接辐射,水分蒸发使得其土壤含水率最低。

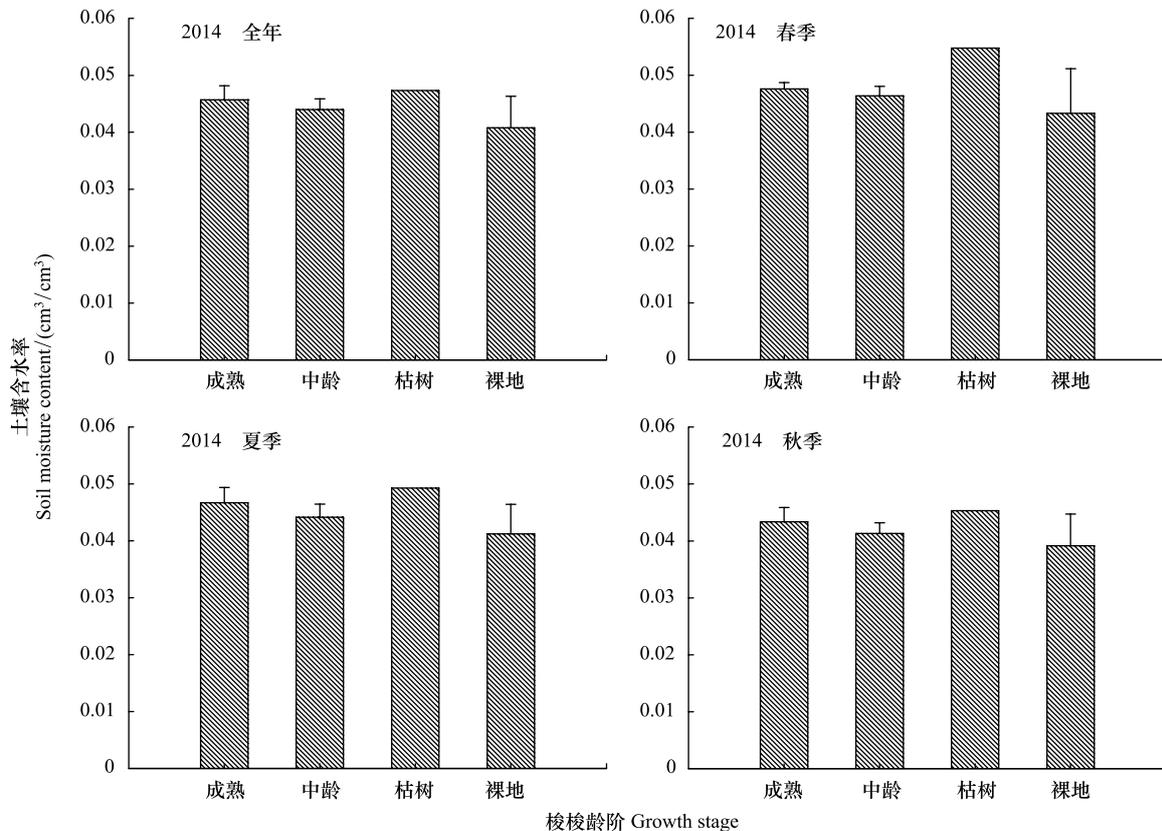


图4 不同龄阶梭梭根区土壤含水率差异

Fig.4 Variances of soil moisture content in the root zone of *Haloxylon ammodendron* at different growth stages

图中误差棒为处于相同龄阶梭梭根区剖面平均土壤含水率的标准差,枯树为单株,无标准差

#### 2.4 距梭梭基部不同距离处土壤含水率特征

由图5可见,随距梭梭树干距离的增大,土壤含水率整体呈减小趋势。距梭梭树干50 cm处,土壤含水率最高,在0—300 cm剖面的土壤最高含水量为 $4.47 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,最低含水量为 $3.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,平均为 $3.72 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。随距梭梭树干距离增大,土壤含水率逐渐减小,到达距梭梭树干500 cm处的土壤含水率最小,在0—300 cm剖面的土壤最高含水量为 $3.34 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,最低为 $2.42 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,平均为 $2.73 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

在梭梭根区,由于树冠的集流作用及根区土壤的良好渗透性能,能使降水渗透得更深<sup>[13]</sup>。加之梭梭冠幅遮阴作用,使得梭梭根区土壤含水率更高。随距树干距离的增加,树冠集流作用及遮阴作用影响越来越小,故而形成土壤含水率减小趋势,这与李君等<sup>[17]</sup>的研究结果一致。

#### 2.5 降雨前后梭梭根区与裸地土壤含水率的差异

梭梭林冠的降水再分配改变了降水时空分布格局<sup>[24]</sup>。在降水过程中,由于树冠集流作用,雨水通过局部汇流补充了根区土壤水分,例如9月20日夜发生了一次典型降雨,降雨量为5.1 mm,雨前(9月11日)、雨后(9月21日)土壤剖面含水率分布如图6所示,且9月11日之前较长一段时间无降雨。由图可见,降雨之后,地表浅层(0—10 cm)土壤含水率明显增大。降雨前后梭梭根区和裸地0—10 cm土层土壤含水率的增量分别为 $0.024 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,  $0.022 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,梭梭根区土壤含水率增量大于裸地。

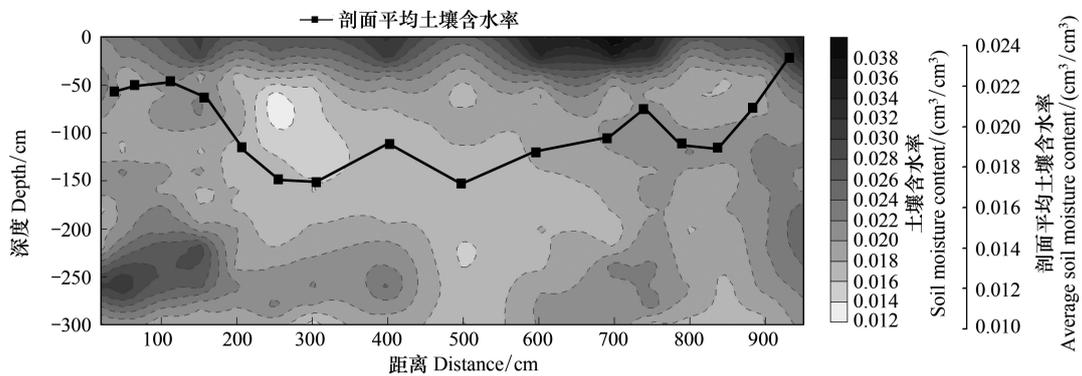


图 5 距梭梭基部不同距离处土壤含水率的变化

Fig.5 Variations of soil moisture content with distance to the base of *Haloxylon ammodendron*

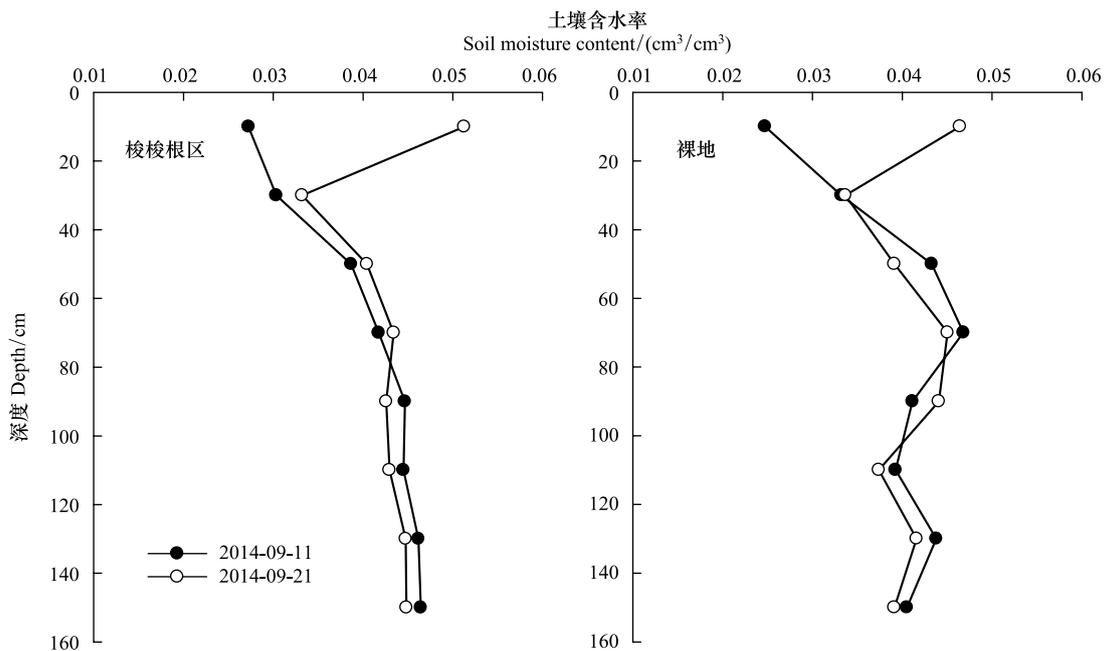


图 6 梭梭根区与裸地土壤含水率降雨前后的差异

Fig.6 Variances of soil moisture content between the root zone of *Haloxylon ammodendron* and bare land before and after rainfall

### 3 结论

(1) 梭梭根区土壤水分时间变化可分为 4 个阶段:2 月下旬至 3 月下旬是土壤水分快速补给期,4 月上旬至 5 月下旬是土壤水分均衡期,6 月上旬至 10 月下旬是土壤水分耗损期,11 月上旬至次年 2 月中旬是土壤水分稳定期。

(2) 梭梭根区全年平均土壤含水率的垂直变化表现为:0—50 cm 土层土壤含水率很高且随深度增加而迅速减小,50 cm 以下,土壤含水率随深度变化较小;从时间变异性来看,0—50 cm 土层土壤水分变异系数很大,并随深度变化急剧减小,50 cm 以下,土壤水分变异系数基本维持在 0.1 左右,且随深度变化微小。

(3) 不同龄阶梭梭根区剖面平均土壤含水率全年与春、夏、秋季均表现为:枯树>成熟梭梭>中龄梭梭>裸地。

(4) 随距梭梭树干距离的增大(0—5 m 范围内),土壤含水率整体呈减小趋势。降雨前后,梭梭根区浅层(0—10 cm)土壤含水率增量大于裸地土壤含水率增量。

致谢:文章修改及英文摘要润色过程中,得到中国科学院新疆生态与地理研究所李君副研究员的指导,谨此致谢。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 孙长忠, 黄宝龙, 陈海滨, 刘增文, 温仲明. 黄土高原人工植被与其水分环境相互作用关系研究. 北京林业大学学报, 1998, 20(3): 7-14.
- [ 2 ] Rodríguez-Iturbe I, Porporato A. Ecohydrology of water-controlled ecosystems: soil moisture and plant dynamics. Cambridge University Press, 2005.
- [ 3 ] Stephenson N L. Climatic control of vegetation distribution: the role of the water balance. American Naturalist, 1990, 135: 649-670.
- [ 4 ] 邱开阳, 谢应忠, 许冬梅, 时项锋, 齐拓野, 刘丽丹, 王东清. 毛乌素沙地南缘沙漠化临界区域土壤水分和植被空间格局. 生态学报, 2011, 31(10): 2697-2707.
- [ 5 ] Gad M R M, Kelan S S. Soil seed bank and seed germination of sand dunes vegetation in North Sinai - Egypt. Annals of Agricultural Sciences, 2012, 57(1): 63-72.
- [ 6 ] 郭忠升. 土壤水分植被承载力的理论与实践. 北京:科学出版社, 2014: 150-180.
- [ 7 ] 王兵. 绿洲荒漠过渡区水热平衡规律及其耦合模拟研究. 北京:中国林业科学研究院, 2002.
- [ 8 ] 何志斌, 赵文智. 荒漠绿洲区人工梭梭林土壤水分空间异质性的定量研究. 冰川冻土, 2004, 26(2): 207-211.
- [ 9 ] 朱雅娟, 贾志清, 刘颖, 刘海涛. 民勤绿洲外围不同林龄人工梭梭林的土壤水分特征. 中国沙漠, 2011, 31(2): 442-446.
- [ 10 ] 刘发民, 张应华, 作彦卿, 张小军. 黑河流域荒漠地区梭梭人工林地土壤水分动态研究. 干旱区研究, 2002, 19(1): 27-31.
- [ 11 ] 格日乐, 高润红. 库布齐沙漠人工梭梭林地土壤储水量动态变化及其水分平衡分析. 内蒙古农业大学学报:自然科学版, 2010, 31(3): 125-129.
- [ 12 ] 杨艳凤, 周宏飞, 徐利岗. 古尔班通古特沙漠原生梭梭根区土壤水分变化特征. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1711-1716.
- [ 13 ] 班卫强, 严成, 尹林克, 杨美琳, 陈艳瑞. 立地条件和积雪厚度对古尔班通古特沙漠梭梭造林的影响. 中国沙漠, 2012, 32(2): 395-398.
- [ 14 ] 蒋进, 王雪芹, 雷加强. 古尔班通古特沙漠工程防护体系内土壤水分变化规律. 水土保持学报, 2003, 17(3): 74-77.
- [ 15 ] 王雪芹, 蒋进, 雷加强, 赵从举. 短命植物分布与沙垄表层土壤水分的关系——以古尔班通古特沙漠为例. 应用生态学报, 2004, 15(4): 556-560.
- [ 16 ] 李君, 赵成义, 朱宏, 王锋. 融雪后梭梭林地土壤水的多尺度空间异质性. 中国科学.D辑:地球科学, 2006, 36(增刊II): 45-50.
- [ 17 ] 周宏飞, 肖祖炎, 姚海娇, 李莉, 李原理. 古尔班通古特沙漠树枝状沙丘土壤水分时空变异特征. 水科学进展, 2013, 24(6): 771-777.
- [ 18 ] 戴岳, 郑新军, 唐立松, 李彦. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭水分利用动态. 植物生态学报, 2014, 38(11): 1214-1225.
- [ 19 ] 张立运, 陈昌笃. 论古尔班通古特沙漠植物多样性的一般特点. 生态学报, 2002, 22(11): 1923-1932.
- [ 20 ] 里昂节夫, B.Л. 卡拉库姆沙漠的梭梭林. 郑世锴, 译. 北京:科学出版社, 1960: 14-17.
- [ 21 ] 刘耘华, 杨玉玲, 盛建东, 张瑾. 北疆荒漠植被梭梭立地土壤养分“肥岛”特征研究. 土壤学报, 2010, 47(3): 545-554.
- [ 22 ] 王丽娟, 孙栋元, 赵成义, 李菊艳, 盛钰. 准噶尔盆地梭梭、白梭梭植物构型特征. 生态学报, 2011, 31(17): 4952-4960.
- [ 23 ] 冯起, 高前兆. 禹城沙地水分动态规律及其影响因子. 中国沙漠, 1995, 15(2): 151-157.
- [ 24 ] 王佑民. 我国林冠降水再分配研究综述(1). 西北林学院学报, 2000, 15(3): 1-7.