

# 民勤绿洲自然稀疏人工梭梭林土壤水分动态

丁爱强<sup>1</sup>, 徐先英<sup>1,2</sup>, 刘江<sup>1</sup>, 崔文天<sup>3</sup>, 张荣娟<sup>4</sup>, 赵鹏<sup>2</sup>, 付贵全<sup>2</sup>

(1. 中国林业科学研究院民勤治沙综合试验站, 甘肃民勤 733000; 2. 甘肃省治沙研究所, 兰州 730070; 3. 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070; 4. 扶风县林业局, 陕西扶风 722200)

**摘要:**为探明自然稀疏林带不同密度对土壤水分动态的影响,建立了土壤水分与林分密度之间数量关系的数学模型。以民勤绿洲—荒漠过渡带自然稀疏的人工梭梭林为研究对象,通过长期土壤水分定位观测,对不同自然稀疏密度梭梭林土壤水分时空动态及密度与土壤水分之间的关系进行了研究。结果表明:(1)不同密度人工梭梭固沙林土壤水分随时间的变化可分为4个阶段:3月初—5月中旬,是土壤水分回升期;5月下旬—9月下旬,土壤水分在丰水年(2015年)为动态平衡期,在枯水年(2016年)为消耗期;10月、11月为水分消退期,12月—翌年2月份,是土壤水分低稳期;(2)雨养条件下,梭梭对土壤水分的消耗主要发生在40 cm以下层,且密度越大消耗越大,变异系数也越大;浅层(0—40 cm)土壤水分变化剧烈,但与林带密度之间的规律不明显;(3)林带土壤剖面平均水分含量无论在全年还是在生长季或非生长季,均随密度的增大而减小;(4)不同退化程度人工梭梭林土壤水分含量与密度之间呈负相关,模型表达式为: $Y=394.67D^2-68.769D+6.526(0\leq D\leq 0.165)$ ,  $R^2=0.934$ 。不同密度人工梭梭林土壤水分随季节的动态变化趋势基本一致,但是受极端降雨事件的影响,在不同年份生长季土壤水分的变化不一致;密度与土壤水分含量之间的关系可以用二次函数模型来反映。

**关键词:**自然稀疏;密度;土壤水分;时空动态;数学模型;人工梭梭林

中图分类号:S715.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)05-0192-07

## Soil Water Dynamics of Natural Thinning *Haloxylon ammodendron* in Minqin Oasis

DING Aiqiang<sup>1</sup>, XU Xianying<sup>1,2</sup>, LIU Jiang<sup>1</sup>, CUI Wentian<sup>3</sup>,  
ZHANG Rongjuan<sup>4</sup>, ZHAO Peng<sup>2</sup>, FU Guiquan<sup>2</sup>

(1. Minqin Desert Control Comprehensive Experimental Station, Chinese Academy of Forestry, Minqin, Gansu 733000, China; 2. Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, China; 3. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 4. Fufeng Bureau of Forestry, Fufeng, Shaanxi 722200, China)

**Abstract:** The influence of different density of natural thinning forest belt on soil water dynamics was proved. A mathematical model was established to quantify relationship between soil moisture and stand density. Natural thinning artificial *Haloxylon ammodendron* forest in the Minqin oasis desert ecotone was selected as the research site. We studied the temporal dynamics of soil moisture content and relationship between the density and soil moisture by long-term observation data of soil moisture. The results showed that: (1) soil moisture content had obvious temporal variation, the annual variation of soil moisture content could be divided into 4 periods, i. e., moisture rising period (from early March to middle May), dynamic balance period (2015 year) or moisture losing period (2016 year) in late May to late September, faded period (October and November), moisture stable period (from December to following February); (2) under rain-fed conditions, soil moisture was mainly consumed by *Haloxylon ammodendron* in the layer below the 40 cm, and the higher density was, the greater the consumption was, the coefficient of variation of soil moisture was also significant in the shallow layer 0—40 cm), which had no the obvious relationship with the forest density; (3) the average soil moisture content of profile decreased with the increase of density at anytime; (4) soil water contents of artifi-

cial *Haloxylon ammodendron* forestlands with the different degrees of degradation were density negatively related to densities, which can be described by  $Y=394.67D^2-68.769D+6.526(0\leq D\leq 0.165)$ ,  $R^2=0.934$ . Dynamic changes of soil moisture in different densities of artificial *Haloxylon ammodendron* is same over the seasons, but it was affected by the extreme rainfall events, changes of soil moisture in different growing seasons were not consistent, the relationship between density and soil moisture content can be expressed by using the quadratic function model.

**Keywords:** natural thinning; density; soil moisture; temporal and spatial dynamics; mathematical model; artificial *Haloxylon ammodendron* forest

梭梭(*Haloxylon ammodendron*)具有强的抗旱、抗热、抗寒、耐盐碱性,而且适应性强,生长迅速,枝条稠密,根系发达,防风固沙能力强,是我国西北干旱荒漠地区固沙造林的优良树种<sup>[1-2]</sup>。在民勤绿洲外围有近 3.5 万  $\text{hm}^2$  梭梭林,是防风固沙林体系的重要组成部分,也是保护绿洲生态安全的重要屏障<sup>[3-4]</sup>。20 世纪 70 年代后期开始,随着人类生产生活和自然因素的干扰,人工固沙林大面积开始退化<sup>[5-6]</sup>,因此,有学者对人工梭梭林的退化机制进行了一系列的研究,并提出了有关退化林带恢复保育的技术措施<sup>[5-8]</sup>。

在干旱荒漠区,土壤水分是调节生境中水分、养分循环、能量流动等诸多生态过程的主要制约因子<sup>[9-12]</sup>,其含量的变化不仅影响着植被的生长<sup>[6]</sup>,而且还限制着植被的种类、数量和分布<sup>[13-16]</sup>,而植被的生长发育又会消耗土壤水分,影响土壤水分的变化,所以两者之间的关系紧密而又复杂。林分的密度是林分特征的一个重要表现,又是影响梭梭林透风系数的最主要因素,适宜的密度不仅是梭梭林健康生长发育的保证,而且也能最大程度的降低风速,阻截流沙,减少风沙流危害<sup>[3]</sup>。在沙区防护林构建中,一般通过提高初植密度的方式增加地表覆盖度,使得林带在短期内就有较高的防风固沙效益<sup>[17]</sup>,但随着植被生长林带土壤水分的消耗也会随之增加,导致土壤旱化之<sup>[18-21]</sup>,而植被为了响应土壤旱化所带来的影响,就会出现自然稀疏现象<sup>[22]</sup>,使林带出现不同程度的退化,严重影响防护林的防风固沙效益,威胁到绿洲的安全。有关干旱荒漠区梭梭林地土壤水分动态平衡及空间异质性等方面的研究报道比较多<sup>[6,9-11,23-30]</sup>,这些研究多是围绕立地条件和土壤自身特性展开,关于林分特征也仅仅有林龄<sup>[23,30-31]</sup>对土壤水分影响的研究,自然稀疏林带不同密度对土壤水分影响的研究少见报道。文章选择自然稀疏密度为 0.024,0.037,0.052,0.075,0.098 株/ $\text{m}^2$  的 5 个密度梯度下的退化人工梭梭林,对其土壤水分进行长期定位观测,研究不同自然稀疏林带内土壤水分的动态变化,并对林分密度与土壤水分含量之间的关系进行建模,以探讨人工梭梭林在退化过程中不同密度

对土壤水分变化规律的影响,建立二者间的数量关系,为民勤绿洲生态环境保护和退化防风固沙林的恢复与重建提供依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于巴丹吉林沙漠东南缘的民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站( $38^{\circ}34'1''\text{N}$ ,  $102^{\circ}58'19''\text{E}$ )附近的荒漠—绿洲过渡带,该区属温带大陆性荒漠气候,年均气温  $7.7^{\circ}\text{C}$ ,最低气温  $-30.8^{\circ}\text{C}$ (1991 年 12 月 27 日),最高气温  $41.0^{\circ}\text{C}$ (1999 年 7 月 22 日),无霜期 172.6 d;多年年均降水量 115.6 mm(1965—2014 年);潜在蒸发量 2 452.7 mm;地下水位由 1961 年的 2.21 m 下降到 2008 年的平均埋深为 17.29 m,仍以  $0.71\text{ m/a}$  的速度继续下降;地带性土壤为灰棕漠土,隐域性土壤有盐土、草甸土、风沙土 3 个亚类。丘间低地、黏土沙障固沙区、黏土平地等典型微区广泛分布。植被主要以梭梭、白刺(*Nitraria tangutorum*)、红砂(*Reaumuria son-gorica*)、沙拐枣(*Calligonum arborescens*)、霸王(*Sarcocaulis xanthoxylon*)、芦苇(*Phragmites australis*)、黄花矾松(*Limonium aureum*)、盐生草(*Halogeton glomeratus*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)等组成。

### 1.2 试验设计

通过前期的野外调查,2014 年 9 月,在甘肃省民勤治沙站周围选择 10 块不同自然稀疏密度的梭梭林为研究对象,均是在流动沙丘上以“黏土沙障+梭梭”模式配置的防风固沙林,并以裸露的流动沙丘作为对照。为了方便研究,将 10 块样地依据密度大小划分为 0.024,0.037,0.052,0.075,0.098 株/ $\text{m}^2$  等 5 个梯度,在林带内,分别布设  $20\text{ m}\times 20\text{ m}$  大样方 3 个,每个大样方内沿对角线设置 3 个  $1\text{ m}\times 1\text{ m}$  小样方调查植被生状况。

土壤水分使用 TDR 定位观测,TDR 水分专用测管埋设与植被调查的同时进行。每个林带内布设 3 根,间距约 10 m,为避免因梭梭消耗或雨水倒灌造成

的局部偏差,测管布设在梭梭的非根区且平整的位置,埋设时使用配套工具,尽量减小对周围结皮和植被的破坏,埋设完成之后,放置一段时间,待土壤水分恢复稳定即可开始试验。土壤水分测定于 2015 年 5 月—2016 年 10 月进行,每月的上旬和下旬利用 TDR 测定,每 20 cm 作为一个测定层,测定深度为 0—140 cm,每根测管同一深度测三次,取均值作为该层土壤含水率,将同一密度梯度内的土壤水分观测值取均值作为试验数据。观测期内降雨量数据由民勤治沙站提供。

1.3 数据分析处理

利用 SPSS 20.0 进行 Duncan 多重检验和回归分析,图表由 Furfur 12.0 和 SPSS 20.0 制作。

2 结果与分析

2.1 不同密度林带植被特征

人工梭梭林带的退化程度不同导致林分的特征也不同。如表 1 所示,不同密度的人工梭梭固沙林林带之间,盖度差异显著,高度差异不显著,Simpson 多样性指数林带与流动沙丘差异显著,林带之间差异不显著;结皮厚度密度最大时对应的值最大,且与其他样地之间的差异显著;林龄之间也存在一定的差异。

随着密度的增大,盖度和结皮厚度也相应增大,Simpson 多样性指数减小,林龄也趋于年轻。盖度与密度同增同减不难理解,但是群落多样性下降这与结皮有直接关系,林龄较小的林带内黏土沙障基本保存完整,所形成的物理结皮更加紧实,也更贫瘠<sup>[31]</sup>,草本等 1 a 生植物很难存活,造成了群落的组成较为单一。

表 1 不同密度人工梭梭林的基本特征

编号	密度/ (株·m <sup>-2</sup> )	高度/ cm	盖度/ %	Simpson 多样性指数	结皮 厚度/mm	林龄/ a
D-0	—	—	0.012d	0.031c	—	—
D-1	0.024	160.11a	0.072abc	0.460a	7.29b	50a
D-2	0.037	160.82a	0.061bcd	0.292ab	9.75b	42a
D-3	0.052	144.69a	0.042cd	0.322ab	7.44b	43a
D-4	0.075	149.00a	0.124a	0.290ab	9.00b	15b
D-5	0.098	141.33a	0.107ab	0.206ab	13.33a	15b

注:小写字母表示不同密度林带之间差异显著( $p<0.05$ )。

2.2 不同密度林带土壤水分动态变化

图 1 和图 2 描述了在降雨的影响下人工梭梭固沙林不同密度林带土壤水分随时间变化的过程。11 月—次年 2 月份,由于地表蒸发且无降雨的补给,使得表层土壤含水率较低,而且整个剖面土壤含水率也较低,保持着相对较为稳定的变化;3 月份开始,土壤水分开始逐渐回升,浅层(0—40 cm)回升速度较快,深层土壤水分略微滞后;到夏季,表层含水率受强烈

的蒸发散作用和降雨的共同影响,变化剧烈,且一直保持较低水平,除降雨事件发生后的短期内较高外,而深层土壤,随着水分的入渗补给,土壤水分平缓降低,整个夏季都保持较高的水平;秋末冬初,土壤含水率交到较低水平,整个冬季基本保持平稳。

如图 2 所示,由连续两个不同降水年份的土壤水分变可知,受降水入渗补给和蒸发散的共同作用,不同密度人工梭梭固沙林土壤水分随时间的变化可分为 4 个阶段:3 月初—5 月中旬,是土壤水分回升期;5 月下旬—9 月下旬,土壤水分在丰水年(2015 年)为动态平衡期,在枯水年(2016 年)为消耗期;10 月、11 月为水分消退期,12 月—翌年 2 月份,是土壤水分低稳期。初春季节,随着气温的回升,固态土壤水分开始消融,而且降雨量也增加,使得土壤水分开始逐渐增大;5 月下旬开始,随着降雨事件发生的次数和降雨量的显著增加,土壤水分也相应增加,但此时也为植物的生长季,植物生长发育等一系列生理活动所消耗的水分也显著增加,土壤蒸发作用也随着高温的来临而加剧,但由于降水是该区土壤水分的主要来源<sup>[9]</sup>,在生长季 5—9 月份,2015 年降雨量为 103.7 mm,占多年年均降水的 89.7%,而 2016 年降雨量为 60.7 mm,仅占多年年均降水量的 52.5%,这就使得生长季土壤水分的变化在丰水年(2015 年)表现为动态平衡,在枯水年(2016 年)表现为消耗,密度越大耗散程度越大;10 月份开始植被逐渐停止生长,土壤水分消耗以土壤蒸发为主,同时由于降水入渗的滞后效应,土壤水分在入渗和蒸发作用下逐渐消退;12 月—翌年 2 月,气温降至冰点,出现霜冻和结冰现象,此时梭梭已凋零停止生长,虽有蒸散作用存在,但损耗也是极低的,而且土壤冻结后土壤水有液态变为固态,使得土壤含水量降到较低水平,整个冬季土壤水分基本不再变化。

2.3 林带土壤水分垂直变化

图 3 描述了不同密度林带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 3 可知,不同密度的林带对土壤水分含量的影响较一致,随着密度增大,对土壤水分的消耗越大,土壤含水率越低。

变异系数是描述土壤水分动态变化的指标之一<sup>[32]</sup>,一般来说,上层土壤受外界环境影响较大,随深度的增加外界的干扰逐渐减弱<sup>[13]</sup>,由图 3 可知,在深度上,不同密度林带土壤水分变异系数的变化规律呈现一致性,浅层较大,深层较小。但是梭梭的水平根系主要分布在 50—100 cm<sup>[33]</sup>,主要利用约 60—120 cm 的土壤水分<sup>[34]</sup>,所以密度越大,深层土壤水分的变异系数越大,变动越剧烈。

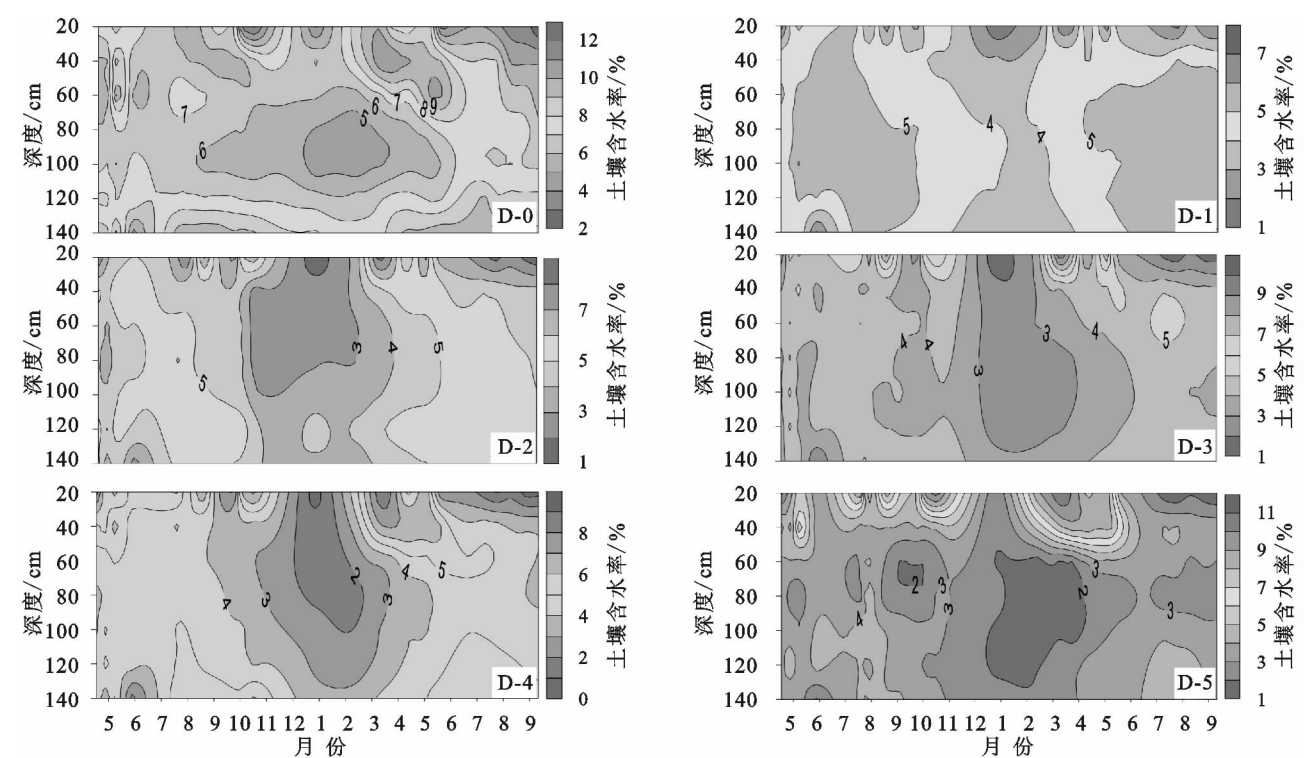


图 1 不同密度林带土壤水分等值线

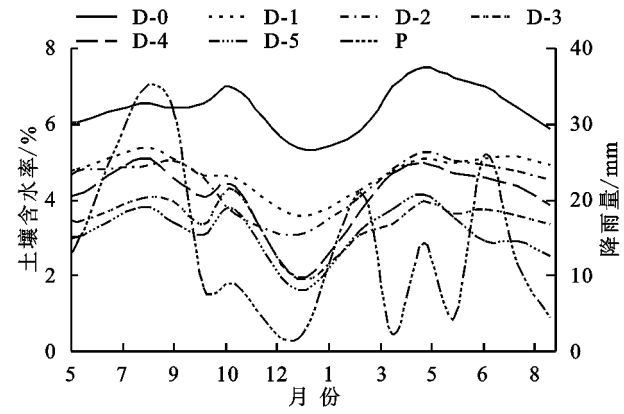


图 2 不同密度林带土壤水分与降雨量

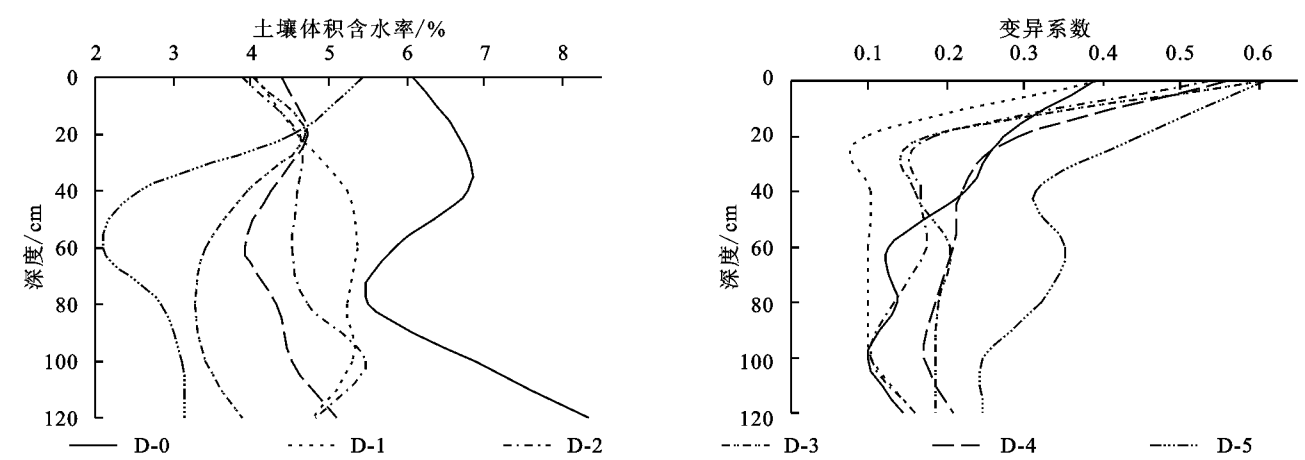


图 3 不同密度林带土壤水分垂直变化

2.5 土壤水分与林带密度关系

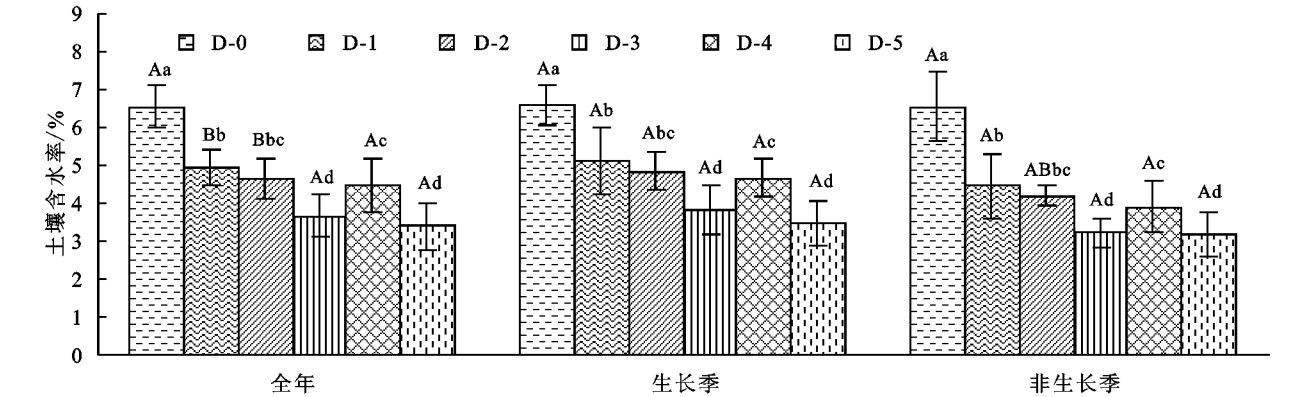
基于上述的研究结果,做出土壤水分 VSWC 与密度  $D$  的散点图,由图 5 可知,土壤水分随密度变化可能

2.4 不同密度林带土壤含水率比较

图 4 描述了不同密度林带在不同时期土壤含水率均值的大小。由图 4 可知,流动沙丘土壤含水率最高,与其他林带差异显著;人工梭梭林不同密度林带之间差异表现不明显;不论是全年,还是生长季(5 月至 9 月)或非生长季(当年 10 至翌年 4 月),林带土壤含水率的变化一致,随着密度的增大而逐渐降低,除密度为  $0.075 \text{ 株}/\text{m}^2$  时林带土壤含水率较高外。从不同时期来看,密度较小时( $D-1, 0.024 \text{ 株}/\text{m}^2$ ;  $D-2, 0.037 \text{ 株}/\text{m}^2$ ),全年与生长季和非生长季之间土壤含水率的差异显著,密度较大时,差异不再显著。

为线性变化,也可能是非线性变化。利用 SPSS 20.0 软件中的“曲线估计”功能预测有可能构建的数学模型,土壤水分随林带密度的变化数学模型可能为线性函数、二

次函数以及指数函数,具体是那个模型能够更好地反映土壤水分与密度之间的关系取决于曲线的拟合度。



注:大写字母表示不同时期相同密度林带土壤含水率的差异,小写字母表示同一时期内不同密度林带土壤含水率的差异( $p<0.05$ );误差棒为相同密度林带土壤含水率平均值的标准差。

图 4 不同时期林带土壤含水率差异

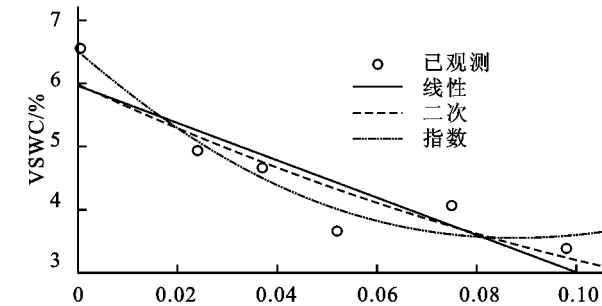


图 5 土壤水分随林分密度分布及模型预测

对 3 种数学模型进行检验分析,结果如表 2 所示。

表 2 模型汇总和参数估计值

模型	模型汇总					参数估计值			函数 表达式
	$R^2$	$F$	$df_1$	$df_2$	Sig.	$C$	$b_1$	$b_2$	
线性	0.800	16.027	1	4	0.016	5.964	-29.548	—	$Y=-29.548D+5.964$
二次	0.934	21.335	2	3	0.017	6.526	-68.769	394.67	$Y=394.67D^2-68.769D+6.526$
指数	0.833	19.991	1	4	0.011	5.979	-6.232	—	$Y=5.979e^{-6.232D}$

注: $C$ 代表常数项; $b_1$ ,  $b_2$  分别为多项式系数。

3 讨论

在干旱沙区,土壤水分是限制植物生长的关键因子,也是影响沙化土地恢复和沙地人工固沙植被稳定性的重要影响因子<sup>[28]</sup>,当地下水难以补给植物生长之需时,一定的降雨决定了植物土壤水分含量及时空动态,植被密度越高,土壤水分的消耗就越高。

受降水、土壤蒸发及植被蒸腾等外界环境因子的共同作用,林带土壤水分随时间的变化呈现不同的规律。本研究认为人工梭梭固沙林土壤水分年际变化可分为 4 个阶段:3 月初—5 月中旬,是土壤水分回升期;5 月下旬—9 月下旬,是土壤水分在丰水年(2015 年)为动态平衡期,在枯水年(2016 年)为消耗期;10 月、11 月为水分消退期,12 月—翌年 2 月份,是土壤水分低稳期。这与已有研究的差异主要体现在植被生长季,非生长季土壤水分的变化基本一致。徐先英

3 种模型统计量  $F$  所对应 Sig. 值均小于 0.05,说明模型总体对方差点解释是显著的; $R^2$  值的大小反映模型的拟合优度,二次方程(0.934)>指数方程(0.833)>线性方程(0.800),说明二次方程能更好的解释试验所得到的客观规律,又对于线性和指数模型来说,当密度增大到某一值或无限增大时,土壤水分就会等于 0 或无限趋近 0,这不符合常规,所以相比于其他两种模型,用二次函数模型来反映土壤水分与林带之间的关系更合适。

等<sup>[9]</sup>通过对民勤沙井子地区典型固沙植被的研究认为 6—7 月为消耗期,8—9 月为积累期;王兵等<sup>[24]</sup>研究认为 7 月、8 月为水分消耗期,9 月为水分积累期;朱雅娟<sup>[17]</sup>、格日乐<sup>[35]</sup>等通过研究不同立地条件或林龄对梭梭林地土壤水分的影响指出 6—8 月为消耗阶段,9—10 月为缓慢恢复阶段;舒维花等<sup>[28]</sup>通过对不同密度柠条对土壤水分影响的研究认为 6—9 月土壤水分消耗期,朱海等<sup>[13]</sup>认为古尔班通古特沙漠 6—10 月是土壤水分耗损期。综上这些研究基本是对一个生长季的研究,虽然也有长期的观测,但在观测期内不同年份生长季的降雨量差异不大,并没有像文章中这种极端的降雨事件出现,这就导致了生长季土壤水分的变化在不同年份有着不同的变化;这些研究结果虽然在具体划分月份上有所差别,但都共同说明了林带土壤水分在生长季变化剧烈。

在模型建立中并未考虑其他环境因子对土壤水分

的影响,这可能对模型的准确性有所影响,但通过模型得到土壤水分与林分密度呈负相关,这与已有的研究所得出的结论一致<sup>[17-21,31,36]</sup>。由模型的数学表达式可以得到,当林分密度  $D=0.087$  株/ $\text{m}^2$  时,土壤水分含量最小  $Y_{\max}=3.53\%$ ,此时林分的密度应为降水承载密度,这结果与李爱德<sup>[37]</sup>等对民勤地区梭梭林地土壤水分平衡研究得出的降水承载密度为  $0.068\sim 0.090$  株/ $\text{m}^2$  的结果一致。当林分密度下降到降水承载密度之后,天然降水能够维持梭梭的生长,此时林分密度基本保持稳定,而土壤水分也有所恢复<sup>[31]</sup>,从模型中也能得出这个规律。研究所选取的均是在流动沙丘上以“黏土沙障+梭梭”模式造林的样地,所以理论上刚开始造林时的土壤水分含量应与流动沙丘水分含量一致,对模型做进一步扩大分析,当林分密度增加到  $0.174$  株/ $\text{m}^2$  时,林带的土壤含水量( $Y_{\text{预测}}=6.526\%$ )与试验观测中所得到的流动沙丘的实际土壤水分含量( $Y_{\text{实际}}=6.618\%$ )近似相等,而此时的密度造林密度  $0.174$  株/ $\text{m}^2$  与研究区人工梭梭林初植密度  $0.165$  株/ $\text{m}^2$  ( $2\text{ m}\times 3\text{ m}$ )<sup>[31]</sup> 接近。模型中林分密度  $D$  的取值范围为  $0\leq D\leq 0.165$ ,因为自然稀疏林带的密度不仅仅决定于土壤水分,假设受其他因子影响,当人工林带完全死亡,这时林带密度为  $0$ ,也是极端最小值;最大值取决于人工造林的标准,试验选择的均为人工林,其最大造林密度为  $0.165$  株/ $\text{m}^2$  ( $2\text{ m}\times 3\text{ m}$ )。

从以上的分析可以得出试验所得到的二次函数模型具有较高的可靠性,能在研究区用来预测和初步判定不同密度人工梭梭林林带的土壤水分状况。但模型也有一定的不足之处,影响土壤水分含量的因素比较多,比如林地的立地条件、土壤的物化特性、种群的生理特征及外界的干扰等,各因子之间的关系也是错综复杂,模型只是选择了众多因子中的比较特殊的林分密度这一指标,在野外试验中易于获取相关的数据,而且林分密度的大小也能够直接表征林带的健康状况和防风固沙效益,所以模型具有一定的利用和参考价值,另外观测周期较短也是本试验的缺点,以上这些不足与缺陷之处有待于在以后的试验研究中逐步完善与修正。

## 4 结论

不同自然稀疏密度人工梭梭林土壤水分随季节的动态变化趋势基本一致,可分为4个阶段:3月初—5月中旬,是土壤水分回升期;5月下旬—9月下旬,是土壤水分在丰水年(2015年)为动态平衡期,在枯水年(2016年)为消耗期;10月、11月为水分消退期,12月—翌年2月份,是土壤水分低稳期;但是受

极端降雨事件的影响,在不同年份生长季土壤水分的变化不一致。林带密度与土壤水分含量之间的的关系可以用二次函数模型  $Y=394.67D^2-68.769D+6.526$  ( $0\leq D\leq 0.165$ ),  $R^2=0.934$  来表达。

## 参考文献:

- [1] 贾志清,卢琦,郭保贵,等.沙生植物:梭梭研究进展[J].林业科学研究,2004,17(1):125-132.
- [2] 郭泉水,谭德远,刘玉军,等.梭梭对干旱的适应及抗旱机理研究进展[J].林业科学研究,2004,17(6):796-803.
- [3] 马瑞,王继和,刘虎俊,等.不同密度梭梭林对风速的影响[J].水土保持学报,2009,23(2):249-252.
- [4] 治沙造林学编委会.治沙造林学[M].北京:中国林业出版社,1981:123-128.
- [5] 黄子琛,刘家琼,鲁作民,等.民勤地区梭梭固沙林衰亡原因的初步研究[J].林业科学,1983,19(1):82-87.
- [6] 马全林,王继和.退化人工梭梭林的恢复技术研究[J].林业科学研究,2006,19(2):151-157.
- [7] 张锦春,赵明,廖空太,等.民勤绿洲边缘荒漠植被滴灌恢复试验研究[J].中国沙漠,2007,27(1):94-98.
- [8] 柴成武,徐先英,王方琳.石羊河下游民勤绿洲荒漠化影响因素趋势预测[J].中国水土保持科学,2007,5(4):34-38.
- [9] 徐先英,刘士余,柴成武,等.民勤沙井子典型固沙植被区土壤水分动态与降水再分配研究[J].水土保持学报,2009,23(6):229-234.
- [10] 张晓艳,褚建民,孟平,等.民勤绿洲荒漠梭梭(*Haloxy-lon ammodendron*)土壤水分特征[J].中国沙漠,2015,35(5):1206-1216.
- [11] 阿拉木萨,裴铁瑶,蒋德明.科尔沁沙地人工固沙林土壤水分与植被适宜度探讨[J].水科学进展,2005,16(3):426-431.
- [12] 黄磊,张志山,陈永乐.干旱人工固沙植被区土壤水分动态随机模拟[J].中国沙漠,2013,33(2):568-573.
- [13] 朱海,胡顺军,刘翔,等.不同龄阶梭梭根区土壤水分时空变化特征[J].生态学报,2017,37(3):1-8.
- [14] Rodríguez-Iturbe I, Porporato A. Ecohydrology of water-controlled ecosystems: soil moisture and plant dynamics[M]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2005.
- [15] Stephenson N L. Climatic control of vegetation distribution: the role of the water balance [J]. American Naturalist, 1990, 135: 649-670.
- [16] Gad M R M, Kelan S S. Soil seed bank and seed germination of sand dunes vegetation in North Sinai-Egypt [J]. Annals of Agricultural Sciences, 2012, 57(1): 63-72.
- [17] 张克斌,罗毓玺.甘肃民勤地区梭梭林调查及合理密度的探讨[J].北京林学院学报,1984,6(1):1-10.
- [18] 舒维花,蒋齐,王占军,等.宁夏盐池沙地不同密度人工柠条林土壤水分时空变化分析[J].干旱区资源与环

- 境,2012,26(12):172-176.
- [19] 谢国勋,王增吉,王占军,等.宁夏干旱风沙区不同种植密度柠条林对土壤水分及植被生物量影响研究[J].宁夏农林科技,2014,55(11):12-14.
- [20] 张文文,郭忠升,宁婷,等.黄土丘陵半干旱区柠条林密度对土壤水分和柠条生长的影响[J].生态学报,2015,35(3):725-732.
- [21] 贾海坤,刘颖慧,徐霞,等.皇甫川流域柠条林地水分动态模拟:坡度,坡向,植被密度与土壤水分的关系[J].植物生态学报,2005,29(6):910-917.
- [22] 常兆丰,韩福贵,仲生年,等.民勤沙区人工梭梭林自然稀疏过程研究[J].西北植物学报,2008,28(1):147-154.
- [23] 朱雅娟,贾志清,刘丽颖,等.民勤绿洲外围不同林龄人工梭梭林的土壤水分特征[J].中国沙漠,2011,31(2):442-446.
- [24] 王兵,崔向慧,白秀兰,等.荒漠化地区土壤水分时空格局及其动态规律研究[J].林业科学研究,2002,15(2):143-149.
- [25] 常兆丰,汪杰,王耀琳,等.降水在沙丘中的运动特征研究:以甘肃民勤沙区为例[J].中国沙漠,2005,25(3):422-426.
- [26] 戴岳,郑新军,唐立松,等.古尔班通古特沙漠南缘梭梭水分利用动态[J].植物生态学报,2014,38(11):1214-1225.
- [27] 刘发民,张应华,仵彦卿,等.黑河流域荒漠地区梭梭人工林地土壤水分动态研究[J].干旱区研究,2002,19(1):27-31.
- [28] 朱海,胡顺军,陈永宝.古尔班通古特沙漠南缘固定沙丘土壤水分时空变化特征[J].土壤学报,2016,53(1):117-126.
- [29] 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[J].冰川冻土,2004,26(2):207-211.
- [30] 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[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2010,31(3):125-129.
- [31] 马全林,王继和,朱淑娟.降水、土壤水分和结皮对人工梭梭(*Haloxylon ammodendron*)林的影响[J].生态学报,2007,27(12):5057-5067.
- [32] 邹文秀,韩晓增,王守宇,等.黑土区土壤剖面水分动态变化研究[J].水土保持通报,2009,29(3):130-132.
- [33] 常学向,赵文智,张智慧.荒漠区固沙植物梭梭(*Haloxylon ammodendron*)耗水特征[J].生态学报,2007,27(5):1826-1837.
- [34] 常兆丰,韩福贵,仲生年,等.民勤沙区人工梭梭林自然稀疏过程研究[J].西北植物学报,2008,28(1):147-154.
- [35] 格日乐,张力,刘军,等.库布齐沙漠人工梭梭林地土壤水分动态规律的研究[J].干旱区资源与环境,2006,20(6):173-177.
- [36] 郭忠升,邵明安.土壤水分植被承载力数学模型的初步研究[J].水利学报,2004,35(10):95-99.
- [37] 李爱德,赵明,王耀琳,等.民勤地区不同林龄梭梭林地水分平衡研究[C]//王继和.甘肃治沙理论与实践.兰州:兰州大学出版社,1999.

~~~~~

(上接第191页)

- [19] 李合生.植物生理生化试验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [20] 王燕,晏紫依,苏艳,等.不同施肥方法对欧洲云杉生长生理和根系形态的影响[J].西北林学院学报,2015,30(6):15-21.
- [21] 刘欢,王超琦,吴家森,等.氮素指数施肥对杉木无性系苗生长及养分含量的影响[J].应用生态学报,2016,27(10):3123-3128.
- [22] 贾瑞丰,尹光天,杨锦昌,等.不同氮素水平对红厚壳幼苗生长及光合特性的影响[J].林业科学研究,2012,25(1):23-29.
- [23] 王冉,何茜,李吉跃,等. N 素指数施肥对沉香苗期光合生理特性的影响[J].北京林业大学学报,2011,33(6):58-64.
- [24] 王力朋,晏紫伊,李吉跃,等.氮素指数施肥对3个楸树无性系光合特性的影响[J].林业科学研究,2013,26(1):46-51.
- [25] 金继运,何萍.氮钾营养对春玉米后期碳氮代谢与粒重形成的影响[J].中国农业科学,1999,32(4):57-64.
- [26] 温国胜,田海涛,张明如,等.叶绿素荧光分析技术在林木培育中的应用[J].应用生态学报,2006,17(10):1973-1977.
- [27] 李双喜,杨曾奖,徐大平,等.施氮量对檀香幼苗生长及养分积累的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(3):807-814.
- [28] 张旺锋,勾玲,王振林,等.氮肥对新疆高产棉花叶片叶绿素荧光动力学参数的影响[J].中国农业科学,2003,36(8):893-898.