

毛乌素沙地南缘沙柳灌丛土壤水分及水量平衡*

安慧¹ 安钰^{2**}

(¹宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室/西部生态与生物资源开发联合研究中心, 银川 750021; ²宁夏农林科学院荒漠化治理研究所, 银川 750002)

摘要 以毛乌素沙地南缘沙柳人工固沙灌丛为研究对象, 对不同栽植密度(0.2、0.6 和 0.8 株·m⁻²)沙柳灌丛生长季土壤水分动态和蒸散量变化进行研究. 结果表明: 不同栽植密度沙柳灌丛区土壤水分动态和蒸散量存在明显差异, 土壤含水量随着栽植密度增加呈单峰型曲线; 生长季内沙柳灌丛土壤含水量变化呈“S”形曲线, 并与降雨存在密切的关系. 蒸散量以栽植密度 0.8 株·m⁻²的沙柳灌丛最高(114.5 mm), 占同期降雨量的 90.8%; 以 0.6 株·m⁻²的沙柳灌丛最低(109.7 mm). 根据生长季土壤水分动态和水分平衡特征, 毛乌素沙地南缘沙柳灌丛适种密度为 0.6 株·m⁻².

关键词 毛乌素沙地 沙柳 栽植密度 水分平衡

文章编号 1001-9332(2011)09-2247-06 **中图分类号** S152.7 **文献标识码** A

Soil moisture dynamics and water balance of *Salix psammophila* shrubs in south edge of Mu Us Sandy Land. AN Hui¹, AN Yu² (¹Ministry of Education Key Laboratory of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in North-western China/United Center for Ecology Research and Bioresource Exploitation in Western China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; ²Institute of Desertification Control, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(9): 2247-2252.

Abstract: Taking the artificial sand-fixing *Salix psammophila* shrubs with different plant density (0.2, 0.6, and 0.8 plants·m⁻²) in Mu Us Sandy Land as test objects, this paper studied the soil moisture dynamics and evapotranspiration during growth season. There existed obvious differences in the soil moisture dynamics and evapotranspiration among the shrubs. The soil moisture content changed in single-hump-shape with the increase of plant density, and in “S” shape during growth season, being closely correlated with precipitation. The evapotranspiration was the highest (114.5 mm) in the shrubs with a density 0.8 plants·m⁻², accounting for 90.8% of the total precipitation during growth season, and the lowest (109.7 mm) in the shrubs with a density 0.6 plants·m⁻². Based on the soil moisture dynamics and water balance characteristics, the appropriate planting density of *S. psammophila* shrubs in Mu Us Sandy Land could be 0.6 plants·m⁻².

Key words: Mu Us Sandy Land; *Salix psammophila*; planting density; water balance.

水是干旱、半干旱地区植被恢复最重要的生态制约因子^[1], 是影响植物生存、生长发育的关键因素, 对植被恢复和长期稳定发展有着重要的影响^[2-4], 正确处理水资源和植被建设的关系对于充分发挥植被生态功能具有重要意义. 基于干旱、半干旱地区水资源对植被建设的限制性影响, 以及近年

来我国北方少数地区的多年人工林、草地出现以土壤旱化为主要特征的大面积退化, 土壤水分的植被承载力研究受到学者们的广泛关注^[5-7]. 土壤水分的植被承载力核心问题是确保土壤水分不亏缺的条件下所能支撑植被量的多少^[8-11], 以避免违背土壤水分和植物生态需水分异规律而造成植被重建失败.

确定土壤水分的植被承载力是我国北方干旱、半干旱地区合理调控土壤水分和植被生长关系、科学恢复林草植被的核心问题. 有关学者对我国干旱、半干旱地区人工植被区土壤水分平衡和动态变化特

* 国家基础研究发展计划重点项目(2009CB426304)、宁夏回族自治区自然科学基金项目(NZ0910)、国家自然科学基金青年基金项目(31000214)和教育部分高等学校博士学科点新教师基金项目(20106401120001)资助.

** 通讯作者. E-mail: anyu-02@163.com

2011-03-22 收稿, 2011-06-21 接受.

征进行了研究. 李新荣等^[12]研究了沙坡头地区流动风沙土、天然植被下固定风沙土和不同年代人工植被下固定风沙土的水分季节变化, 指出沙地水分变化与植被种类、密度及植物根系分布深度密切相关; 王鸣远等^[13]认为, 从流动沙丘变为固定沙丘的过程中, 固沙植被形成后的土壤水分动态和灌木林群落实际蒸腾蒸发量的关系反映了不同植被覆盖、不同密度、不同年份和不同季节水分平衡的状况. 由于植物生长过程中耗水量和栽植密度的不同, 固沙植物区土壤水分变化的差异明显. 耗水量大、栽植密度高的植被区土壤水分严重亏缺, 随着植物的生长发育, 土壤含水量不断下降, 引起植物生长逐渐衰退、死亡, 导致现存植被可能向荒漠化发展^[14-16]. 因此, 根据固沙林的防护效能和土壤水分平衡确定“生态密度”, 对于干旱、半干旱地区植被生态建设具有十分重要的现实意义.

沙柳(*Salix psammophila*)广泛分布于毛乌素沙地南缘, 对于干旱缺水、风蚀沙埋等恶劣条件有很强的适应性, 是毛乌素沙地主要的人工造林树种之一^[17]. 在植被建设中, 如果沙柳灌丛的密度过大, 将导致土壤含水量严重下降, 从而使灌丛趋于不稳定. 本文通过对毛乌素沙地南缘不同栽植密度的沙柳固沙灌丛土壤水分和水分平衡的研究, 探讨植被对水资源的调控机理, 并依据水分平衡理论确定适宜的沙柳栽植密度, 以期为解决毛乌素沙地植被建设中植被与水资源之间的矛盾提供理论依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于地处毛乌素沙漠南缘的宁夏回族自治区盐池县沙边子治沙基地(37°52′30″—37°57′30″N, 107°26′15″—107°33′45″E), 海拔1300~1360 m. 该地区属于典型的中温带大陆性气候, 是干旱与半干旱气候的过渡地带, 年均气温7.5℃, 极端最高气温34.9℃, 极端最低气温-24.2℃, 年均无霜期为165 d; 年降雨量280 mm, 其中70%以上降雨集中在6—9月, 降雨年际变率大; 年蒸发量2710 mm^[18-19]. 依地貌单元, 该地区可划分为沙丘地、丘间盐碱滩地和缓坡丘陵梁地3个类型. 地带性植被属荒漠草原带. 除明沙丘外, 流动半流动沙丘以沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、沙竹(*Psammochloa villosa*)、沙地旋覆花(*Inula salsoloides*)为主; 固定半固定沙地以油蒿(*Artemisia ordosica*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、牛心朴子(*Cynanchum komarovii*)、中亚白草

(*Pennisetum centrasiaticum*)为主; 丘间盐碱滩地主要以白刺(*Nitraria sibirica*)、细枝盐爪爪(*Kalidium gracile*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)和苦豆子等为主; 缓坡丘陵梁地植物以猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、赖草(*Leymus secalinus*)、苦豆子和牛心朴子等为主.

1.2 研究方法

试验区沙柳群落是1982年人工建植的固沙植被(平均密度1.0~1.2株·m⁻²), 每隔3~4年进行平茬复壮管理. 人工沙柳群落内主要伴生种有沙蒿(*Artemisia desertorum*)、杨柴(*Hedysarum laeve*)、苦马豆(*Swainsona salsula*)、牛心朴子、苦豆子、披针叶黄华(*Thermopsis lanceolata*)、绵蓬(*Corispermum patelliforme*)、艾蒿(*Artemisia argyi*)等.

2010年5月在人工沙柳群落区内, 选取3个不同密度的沙柳[平均栽植密度分别为0.2株·m⁻²(T₁)、0.6株·m⁻²(T₂)和0.8株·m⁻²(T₃)]人工群落作为试验样地. 在每块样地随机设置3个4 m×4 m的样方. 6—9月每月的中旬, 在距离沙柳灌丛根部0.5 m处设3个取样点, 采用土钻烘干法测定0~100 cm土壤含水量, 以10 cm为间隔, 重复3次. 9月中旬在测定土壤含水量的同时, 在每个样方距离沙柳灌丛根部0.5 m挖3个土壤剖面, 采用环刀采集0~100 cm土层原状土壤, 以10 cm为间隔, 测定各土层的土壤容重. 不同栽植密度沙柳灌丛生长季0~100 cm土层土壤含水量为0~100 cm土层6—9月土壤含水量的平均值.

试验区微气象参数采用安设在试验区2 m高处Vantage Pro2 Plus自动气象站(DAVIS, USA)观测, 观测指标为: 降雨量、空气相对湿度、地表温度、太阳总辐射、光合有效辐射、2 m处大气温度、2 m处风速和风向等气象参数.

毛乌素沙地人工固沙灌丛区土壤水分主要受降雨影响, 且无地表径流产生, 植被根系区土壤不受地下水的影响(地下水位埋深>8 m), 故水量平衡公式可简化为:

$$G = P - \Delta W + \Delta Q$$

式中: P 为测定期间降雨量(mm); G 为蒸散量(mm); ΔQ 为地表下200 cm处水分渗漏或补充量(mm)(因沙丘植被区地下水位低, 土壤无渗漏和补充, 故此处 $\Delta Q = 0$); ΔW 为某一时段土壤贮水量变化(mm).

$$\Delta W = Et_1 - Et_2$$

$$E = 0.1 \times M \times R \times H$$

式中: E 为贮水量 (mm); M 为土壤含水量 (%); R 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); H 为土层深度 (cm)^[20].

1.3 数据处理

采用 SAS 8.0 统计分析软件对数据进行方差分析,并用 Duncan 新复极差法进行多重比较,显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$

2 结果与分析

2.1 不同栽植密度沙柳灌丛土壤水分动态

由表 1 可见,不同栽植密度沙柳灌丛土壤水分状况存在显著差异. 随栽植密度的增加,沙柳灌丛土

壤含水量呈单峰曲线,栽植密度 $0.6 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ (T_2) 时达到最大值,显著高于 $0.2 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ (T_1) 和 $0.8 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ (T_3),而 T_1 和 T_3 的土壤含水量差异不显著. T_1 和 T_3 的土壤水分变化趋势相似,含水量整体较低,且变化幅度很小.

随着土壤深度的增加,不同栽植密度沙柳灌丛土壤含水量呈增加趋势,且 T_2 的表层 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土壤含水量均显著高于其他栽植密度,从表层土壤的 2.7% 增加到深层的 6.0% ,然后逐渐趋于稳定.

2.2 不同栽植密度沙柳灌丛土壤水分的季节动态
生长季沙柳灌丛土壤含水量呈“S”形曲线变化

表 1 不同栽植密度沙柳灌丛土壤含水量的变化

Table 1 Variations of soil moisture of *Salix psammophila* shrubs under different planting densities (mean \pm SD, %)

栽植密度 Planting density (plants \cdot m $^{-2}$)	土壤深度 Soil depth (cm)	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	生长季 Growth season
T_1	0 ~ 10	0.90 \pm 0.46Be	0.50 \pm 0.13Cde	2.42 \pm 0.35Bcd	1.45 \pm 0.44Bc	1.32 \pm 0.81Bc
	10 ~ 20	2.10 \pm 1.04Bde	0.80 \pm 0.04Cde	3.05 \pm 0.60Bd	2.45 \pm 0.26Bc	2.10 \pm 1.01Bab
	20 ~ 30	3.06 \pm 0.82Bdc	1.06 \pm 0.18Cdc	4.34 \pm 0.98Bcd	2.64 \pm 0.03Bbc	2.77 \pm 1.34Ba
	30 ~ 40	3.23 \pm 1.27Bdc	1.23 \pm 0.28Cc	4.64 \pm 0.75Bbc	2.62 \pm 0.32Bbc	2.93 \pm 1.44Bc
	40 ~ 50	2.93 \pm 0.13Bbc	1.59 \pm 0.36Cb	6.51 \pm 0.50Ba	4.07 \pm 0.78Bab	3.78 \pm 1.93Bbc
	50 ~ 60	3.09 \pm 0.39Bbc	1.84 \pm 0.43Cb	6.71 \pm 0.34Bab	5.49 \pm 0.34Ba	4.28 \pm 2.03Ba
	60 ~ 70	2.51 \pm 0.43Bbc	2.08 \pm 0.39Cb	6.84 \pm 1.01Bab	4.48 \pm 1.62Ba	3.98 \pm 2.14Bbc
	70 ~ 80	2.45 \pm 0.29Bab	2.15 \pm 0.37Cb	4.92 \pm 1.11Bbcd	3.77 \pm 0.46Ba	3.32 \pm 1.28Bc
	80 ~ 90	2.78 \pm 0.12Bab	2.50 \pm 0.22Ca	3.69 \pm 1.93Bcd	4.33 \pm 0.04Ba	3.40 \pm 1.15Ba
	90 ~ 100	2.96 \pm 0.10Ba	2.67 \pm 0.15Ce	3.42 \pm 2.23Bcd	4.52 \pm 0.25Ba	3.39 \pm 1.21Ba
T_2	0 ~ 100	2.60 \pm 0.69B	1.64 \pm 0.73C	4.65 \pm 1.59B	3.58 \pm 1.24B	3.12 \pm 1.29B
	0 ~ 10	1.53 \pm 0.62Ae	1.43 \pm 0.72Ade	7.86 \pm 2.04Acd	2.60 \pm 0.28Ac	3.35 \pm 2.92Ac
	10 ~ 20	2.17 \pm 1.04Ade	1.51 \pm 0.28Ade	4.32 \pm 0.49Ad	2.63 \pm 0.30Ac	2.66 \pm 1.20Aab
	20 ~ 30	2.61 \pm 0.45Ade	1.71 \pm 0.54Ade	5.52 \pm 1.39Acd	2.92 \pm 0.21Abc	3.19 \pm 1.63Aa
	30 ~ 40	3.26 \pm 1.41Ade	1.95 \pm 0.48Ac	7.57 \pm 3.39Abc	3.35 \pm 0.15Abc	4.03 \pm 2.72Ac
	40 ~ 50	4.37 \pm 1.81Abc	3.29 \pm 0.42Ab	9.16 \pm 0.87Aa	3.49 \pm 0.58Aab	5.08 \pm 2.66Abc
	50 ~ 60	4.90 \pm 1.97Abc	4.92 \pm 1.45Ab	6.66 \pm 2.90Aab	5.75 \pm 2.54Aa	5.56 \pm 2.09Aa
	60 ~ 70	4.24 \pm 0.68Abc	4.33 \pm 2.14Ab	5.38 \pm 2.98Aab	7.49 \pm 3.29Aa	5.36 \pm 2.52Abc
	70 ~ 80	5.87 \pm 2.27Aab	3.98 \pm 0.68Ab	4.59 \pm 1.02Abcd	5.38 \pm 1.37Aa	4.96 \pm 1.46Ac
	80 ~ 90	5.64 \pm 0.98Aab	4.55 \pm 0.45Aa	5.35 \pm 1.14Acd	6.99 \pm 4.56Aa	5.63 \pm 2.25Aa
T_3	90 ~ 100	6.02 \pm 1.72Aa	5.67 \pm 0.54Ae	6.05 \pm 0.59Acd	6.41 \pm 1.19Aa	6.04 \pm 0.99Aa
	0 ~ 100	4.06 \pm 1.61A	3.33 \pm 1.58A	6.25 \pm 1.55A	4.70 \pm 1.91A	4.59 \pm 1.24A
	0 ~ 10	1.60 \pm 0.53Be	0.71 \pm 0.08Bde	3.53 \pm 0.35Bcd	1.69 \pm 0.50Bc	1.88 \pm 1.13Bc
	10 ~ 20	1.68 \pm 0.05Bde	1.36 \pm 0.28Bde	4.23 \pm 0.43Bd	2.09 \pm 0.64Bc	2.34 \pm 1.22Bab
	20 ~ 30	2.08 \pm 0.21Bdc	1.44 \pm 0.43Bdc	3.83 \pm 0.34Bcd	2.78 \pm 0.64Bbc	2.53 \pm 1.00Ba
	30 ~ 40	1.93 \pm 0.09Bdc	1.57 \pm 0.55Bc	4.42 \pm 0.55Bbc	2.97 \pm 0.48Bbc	2.72 \pm 1.22Bc
	40 ~ 50	2.19 \pm 0.44Bbc	1.72 \pm 0.08Bb	5.48 \pm 1.00Ba	4.37 \pm 1.92Bab	3.44 \pm 1.87Bbc
	50 ~ 60	2.48 \pm 0.73Bbc	1.86 \pm 0.26Bb	6.09 \pm 1.11Bab	3.41 \pm 0.63Ba	3.46 \pm 1.80Ba
	60 ~ 70	2.88 \pm 0.33Bbc	2.06 \pm 0.46Bb	6.23 \pm 0.61Bab	3.81 \pm 0.65Ba	3.75 \pm 1.70Bbc
	70 ~ 80	3.45 \pm 0.44Bab	2.79 \pm 0.31Bb	6.00 \pm 0.33Bbcd	4.13 \pm 1.42Ba	4.09 \pm 1.42Bc
80 ~ 90	3.46 \pm 0.78Bab	2.90 \pm 0.50Ba	5.15 \pm 1.56Bcd	4.14 \pm 0.99Ba	3.91 \pm 1.24Ba	
90 ~ 100	4.50 \pm 0.39Ba	3.23 \pm 0.46Be	2.82 \pm 0.41Bcd	4.06 \pm 0.61Ba	3.65 \pm 0.80Ba	
0 ~ 100	2.62 \pm 0.94B	1.96 \pm 0.79B	4.78 \pm 1.19B	3.34 \pm 0.93B	3.18 \pm 1.21B	

T_1 、 T_2 和 T_3 分别表示沙柳栽植密度为 0.2 、 0.6 和 $0.8 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ T_1 , T_2 , and T_3 indicated respectively planting density for 0.2 , 0.6 and $0.8 \text{ plants} \cdot \text{m}^{-2}$ of *Salix psammophila* shrubs. 同列不同大写字母表示不同栽植密度间差异显著,不同小写字母表示相同密度下不同土壤深度间差异显著. Different capital letters in the same column indicated significant difference under different densities, and different small letters indicated significant difference under the same density. 下同 The same below.

趋势(表1).7月中旬达到最低值,之后随着降雨量的增加,土壤水分得到补充,8月中旬达到最高值,9月随着降雨量的减少,土壤含水量稍有下降.7—8月沙柳灌丛0~100 cm深度土壤含水量呈剧烈波动状态,不同深度土壤含水量差异明显.沙柳灌丛区土壤水分变异主要受到降雨的影响(图1).土壤含水量的季节变化与同期降雨分布相关, T_1 、 T_2 和 T_3 的相关系数分别为0.727、0.738和0.721,均达到显著水平.

生长季沙柳灌丛0~100 cm土壤贮水量也呈“S”形曲线变化(图2).沙柳灌丛土壤贮水量在7月中旬达到最低值,7—8月逐渐增加,8月中旬达到最高值,8—9月逐渐降低,但贮水量仍保持在较高

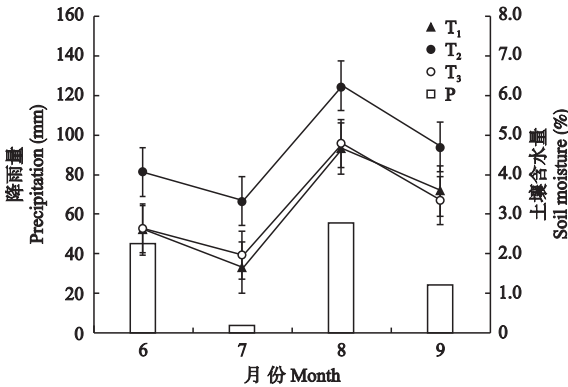


图1 不同栽植密度沙柳灌丛生长季土壤含水量与降雨量分布

Fig. 1 Precipitation distribution and soil moisture of *Salix psammophila* shrubs under different planting densities (mean \pm SD).

T_1 、 T_2 和 T_3 分别表示沙柳栽植密度为0.2、0.6和0.8株 \cdot m $^{-2}$. T_1 、 T_2 、and T_3 indicated respectively planting density for 0.2, 0.6 and 0.8 plants \cdot m $^{-2}$ of *Salix psammophila* shrubs. 下同 The same below. P: 降雨量 Precipitation.

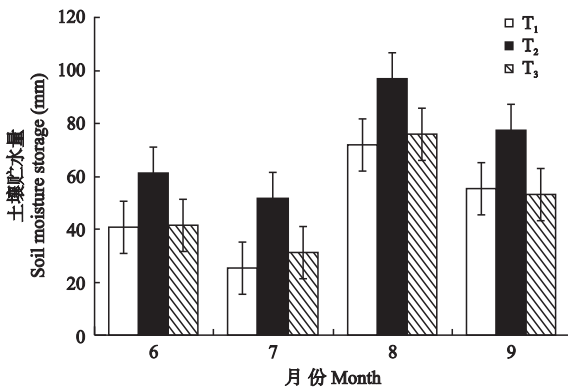


图2 不同栽植密度沙柳灌丛土壤贮水量季节变化

Fig. 2 Seasonal variations of soil moisture storage of *Salix psammophila* shrubs under different planting densities (mean \pm SD).

的水平.6—7月间沙柳灌丛土壤贮水量为负值,说明此阶段土壤水分以支出为主,蒸散量大于降雨量,导致土壤水分亏缺;7—8月正值毛乌素沙地降雨的主要分布期,沙柳灌丛土壤贮水量增高,是土壤水分贮存的重要阶段;8—9月,各栽植密度沙柳灌丛土壤水分均呈缺失状态.

2.3 不同栽植密度沙柳灌丛的蒸散量

在生长季,植被蒸散量呈不均匀分布,3种不同栽植密度沙柳灌丛区蒸散量在8—9月达到峰值(40.8~51.8 mm),是其他时期蒸散量的3~5倍. T_1 、 T_2 和 T_3 蒸散量与同期降雨量的相关系数分别为0.774、0.453和0.696($P < 0.05$),除 T_2 外, T_1 、 T_3 蒸散量与同期降雨量呈显著正相关.生长季随栽植密度增加,沙柳灌丛蒸散量呈倒抛物线的变化趋势(图3).在同期降雨量为126.1 mm条件下, T_3 的蒸散量最高,为同期降雨量的90.8%,土壤水分节余为11.6 mm; T_2 蒸散量最低,为同期降雨量的87.0%,显著低于其他栽植密度区,生长期土壤水分节余16.4 mm,说明沙柳固沙灌丛大部分降雨通过蒸散过程流失,土壤水分得不到降雨的有效补充. T_3 蒸散量高于 T_1 和 T_2 ,表明较高密度植被区的大部分降雨通过蒸散作用损失,土壤水分难以得到降雨补充,土壤水分状况趋于恶化;低密度植被区土壤水分则能够得到较多的降雨补充.

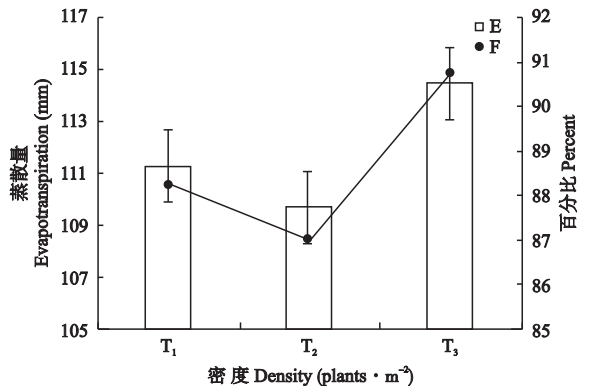


图3 不同栽植密度沙柳植被蒸散量

Fig. 3 Evapotranspiration of *Salix psammophila* shrubs under different planting densities (mean \pm SD).

E: 蒸散量 Evapotranspiration; F: 蒸散量占同期降雨比例 Rate between evapotranspiration and precipitation at the same period.

3 讨 论

3.1 沙柳灌丛土壤水分动态与植被密度的关系

在干旱、半干旱地区生态系统中,灌木植被占有特殊的地位,可以与环境保持一致性和连续性.固沙

灌丛形成后的水分动态以及沙地植物对水分亏缺的适应性,是干旱、半干旱地区沙地生态系统演化研究关注的焦点. 试验区土壤表层有约 20 cm 厚的干沙层,使得表层土壤含水量低于中、下层土壤,不同栽植密度沙柳灌丛土壤含水量垂直分布与其他研究结果^[21-22]相似,随着土壤深度的增加,土壤含水量呈增加趋势. 沙柳灌丛生长季节土壤含水量随着栽植密度的增加呈单峰型曲线,而徐荣等^[21]、阿拉木萨等^[22]和周志宇等^[23]研究认为,柠条(*Caragana intermedia*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)和白沙蒿(*Artemisia sphaerocephala*)灌丛土壤含水量随着栽植密度增加而降低. 沙柳灌丛土壤含水量随栽植密度的变化趋势与其他研究结论不同,可能与供试植物种类、年龄、立地条件或其他因素相关. 这有待于进一步研究.

在干旱、半干旱地区,土壤“水库”中蓄存的有效水量是地上植被生长最主要的水分来源,土壤“水库”的容量和有效水分的数量直接影响到沙地植被分布的格局及其稳定性^[24]. 0~100 cm 土层沙柳灌丛土壤含水量和土壤贮水量季节动态均呈“S”形曲线,并与生长季降雨分布密切相关. 6 月土壤含水量较高,主要是气温较低,植物蒸腾耗水和土壤水分消耗较少;7 月土壤含水量较低,是因为降雨量较少,植物生长旺盛,土壤水分消耗量增大;8 月土壤含水量开始上升,主要是 8 月降雨量较大(55.4 mm),土壤能够得到较多的水分补充;9 月土壤水分含量较高,主要是随着气温下降,植物生长缓慢、耗水量减少,且土壤蒸发量也较小. 这说明生长季沙柳灌丛土壤含水量的变化主要受降雨的影响^[12, 21-22, 25]. 沙柳灌丛土壤水分季节动态与气温升高、沙面蒸发能力增强,以及季节性降雨量增加等因素密切相关.

3.2 土壤水分平衡和水分植被承载力

降雨和蒸散是荒漠化地区植物群落水分平衡的重要组成部分. 从沙地水分的有限性和植物群落土壤水分供需平衡的角度分析,如果植物群落土壤水分亏缺程度较轻,且能及时得到补充,则该植物群落的适应性和稳定性较强. 沙柳灌丛蒸散量随栽植密度增加呈倒抛物线,这与阿拉木萨等^[22, 26]、崔向慧等^[27]的研究结论不同. 本研究结果表明, T_3 蒸散量最高, T_2 的蒸散量为同期降雨量的 87.0% 显著低于 T_1 和 T_3 . 在人工固沙植被建植初期,高密度固沙植被能够快速形成有效盖度,具有防风固沙效应;随着植被的生长,其需水量增加,水分竞争愈加剧烈,引

起土壤水分的亏缺,从而抑制了固沙植物的生长,影响其稳定性.

参考文献

- [1] Zhao W-Z (赵文智), Cheng G-D (程国栋). Comment on some problems of eco-hydrologic process in arid area. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2001, **46** (22): 1851-1857 (in Chinese)
- [2] Wang XP, Berndtsson R, Li XR, et al. Water balance change for a re-vegetated xerophyte shrub area. *Hydrological Sciences Journal*, 2004, **49**: 283-295
- [3] Wang Z (王志), Wang L (王蕾), Liu L-Y (刘连友), et al. Preliminary study on soil moisture content in dried layer of sand dunes in the Mu Us sandland. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 2006, **23**(1): 89-92 (in Chinese)
- [4] Fu H (付华), Zhou Z-Y (周志宇), Chen S-K (陈善科). A study on relationship between vegetation density and soil water content of *Artemisia sphaerocephala* air-sown grassland in south-eastern edge of Tengger Desert, Inner Mongolia, China. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2001, **21**(3): 265-270 (in Chinese)
- [5] Guo Z-S (郭忠升), Shao M-A (邵明安). Mathematical model for determining vegetation carrying capacity of soil water. *Journal of Hydraulic Engineering* (水利学报), 2004, **35**(10): 95-99 (in Chinese)
- [6] Wang YH, Yu PT, Xiong W. Water yield reduction after afforestation and related processes in the semiarid Liupan Mountains, Northwest China. *Journal of the American Water Resources Association*, 2008, **44**: 1086-1097
- [7] Xia YQ, Shao MA. Soil water carrying capacity for vegetation: A hydrologic and biogeochemical process model solution. *Ecological Modelling*, 2008, **214**: 112-124
- [8] Price D. Carrying capacity reconsidered. *Population and Environment*, 1999, **21**: 5-26
- [9] Guo Z-S (郭忠升), Shao M-A (邵明安). Precipitation, soil water and soil water carrying capacity of vegetation. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2003, **18**(5): 522-528 (in Chinese)
- [10] Wang J (王俭), Sun T-H (孙铁珩), Li P-J (李培军). Research progress on environmental carrying capacity. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(4): 768-772 (in Chinese)
- [11] Radersma S, Ong CK, Coe R. Water use of tree lines: Importance of leaf area and micrometeorology in sub-humid Kenya. *Agroforestry Systems*, 2006, **66**: 179-189
- [12] Li X-R (李新荣), Ma F-Y (马凤云), Long L-Q (龙立群), et al. Soil water dynamics under sand-fixing vegetation in Shapotou area. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2001, **21**(3): 217-222 (in Chinese)
- [13] Wang M-Y (王鸣远), Guan S-H (关三和), Wang Y (王义). Soil moisture regimen and application for plants in Maowusu transition zone from sand land to desert. *Journal of Arid Land Resources and Environment* (干旱区资源与环境), 2002, **16**(2): 37-44 (in Chi-

- nese)
- [14] Gao Q (高琼), Dong X-J (董学军), Liang N (梁宁). A study on the optimal vegetation coverage for sandy grassland in Northern China based on soil water budget. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1996, **16**(1): 33-40 (in Chinese)
- [15] Li XR, Ma FY, Xiao HL, *et al.* Long-term effects of revegetation on soil water content of sand dunes in arid region of Northern China. *Journal of Arid Environments*, 2004, **57**: 1-16
- [16] Wang X-P (王新平), Zhang Z-S (张志山), Zhang J-G (张景光), *et al.* Review to researches on desert vegetation influencing soil hydrological processes. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2005, **25**(2): 196-201 (in Chinese)
- [17] Kang F-R (亢福仁), Wang P-K (王鹏科), Wang L-X (王立祥). Research on exploitative potential and status Quo of wilding vegetation resources in Maowusu sandy land. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2006, **22**(10): 407-410 (in Chinese)
- [18] Zhang Z-Q (张志谦), Qiu B-M (仇保铭), Long Z-P (龙治普), *et al.* Preliminary study on climatic characteristics and agricultural utilizations in Shabianzi, Yanchi county. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 1996, **16**(2): 166-172 (in Chinese)
- [19] Xu D-M (许冬梅), Wang K (王堃). Characteristics of soil microbe in southern ecotone of Mu Us sandy land. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2007, **27**(5): 805-808 (in Chinese)
- [20] Keating BA, Gaydon D, Huth NI, *et al.* Use of modelling to explore the water balance of dryland farming systems in the Murray-Darling Basin. Australia. *European Journal of Agronomy*, 2002, **18**: 159-169
- [21] Xu R (徐荣), Zhang Y-F (张玉发), Pan Z-B (潘占兵), *et al.* Impact of planting density of *Caragana intermedia* on soil moisture in the restoration of degraded grassland. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2004, **22**(1): 172-175 (in Chinese)
- [22] Alamusa (阿拉木萨), Ci L-J (慈龙骏), Yang X-H (杨晓晖), *et al.* Water balance of different density artificial *Caragana microphylla* shrubs in Horqin sand land. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(1): 31-35 (in Chinese)
- [23] Zhou Z-Y (周志宇), Li F-R (李锋瑞), Chen Y-M (陈亚明), *et al.* Growth and reproduction and their relationships with soil moisture in artificially established *Artemisia sphaerocephala* populations of different densities in the Alxa Desert. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(5): 895-899 (in Chinese)
- [24] Gerile (格日乐), Gao R-H (高润红). A study on moisture balance of artificial *Haloxylon ammodendron* forest in Kubuqi Desert. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University* (内蒙古农业大学学报), 2010, **31**(3): 125-129 (in Chinese)
- [25] Alamusa (阿拉木萨), Jiang D-M (蒋德明), Luo Y-M (骆永明). Study on soil moisture and water balance in processes of dune fixation shrubs development at semi-arid region. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2005, **19**(4): 107-110 (in Chinese)
- [26] Alamusa (阿拉木萨), Pei T-F (裴铁璠), Jiang D-M (蒋德明). A study on soil moisture content and plantation fitness for artificial sand-fixation forest in Horqin sandy land under. *Advances in Water Science* (水科学进展), 2005, **16**(3): 426-431 (in Chinese)
- [27] Cui X-H (崔向慧), Feng Q (冯强), Wang X-Q (王学全). Characteristics and simulation analysis of evapotranspiration of shrub sand dune at the oasis-desert transitional zones. *Science of Soil and Water Conservation* (中国水土保持科学), 2007, **5**(1): 44-48 (in Chinese)

作者简介 安慧,女,1981年生,博士,助理研究员.主要从事恢复生态学和植物生理生态学研究. E-mail: anhui08@163.com

责任编辑 李凤琴
