

降雨格局变化对红砂幼苗根系生长 和生物量分配的影响

白 蕾, 单立山, 李 毅*, 张正中, 种培芳

(甘肃农业大学 林学院, 兰州 730070)

摘 要:以自然生长的典型红砂(*Reaumuria songarica* (Pall.) Maxim.)群落中的幼苗为研究对象,以自然降雨为对照,设定降雨量减少 30%(W^-)、不变(W)和增加 30%(W^+)3 个降雨量水平,2 个降雨时间间隔即自然降雨时间(T)、延长降雨间隔时间至 1.5 倍(T^+),研究降雨格局变化对红砂幼苗根系生长和生物量分配的影响。结果表明:(1)同一降雨量条件下,降雨间隔延长促进了红砂幼苗主根的伸长生长、增加了根表面积,增大了根冠比,有利于红砂幼苗根系生长。(2)降雨量较少的条件下(W^- 、 W),延长降雨间隔促使红砂幼苗地下、地上及总生物量累积;而降雨量较多(W^+)条件下,延长降雨间隔使各部分生物量有所降低,但差异不显著。(3)在自然降雨间隔条件下,降雨量的增加使红砂幼苗的总生物量和主根长呈增加的变化趋势,对其生长起到促进作用。研究认为,降雨格局的变化会明显影响自然生长的红砂群落中幼苗的生长和生物量分配。

关键词:红砂;降雨量;降雨间隔;生物量

中图分类号: Q948.112⁺3

文献标志码: A

Effects of Changing Rainfall Patterns on the Root and Biomass of *Reaumuria soongorica* Seedlings

BAI Lei, SHAN Lishan, LI Yi*, ZHANG Zhengzhong, CHONG Peifang

(College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Rainfall affects the plant growth. Effects of changing rainfall patterns on the root and biomass of *Reaumuria soongorica* seedlings were researched in this paper. Seedlings of typical natural growth *R. soongorica* community as the research object, natural rainfall as check, we set up a experiment with two variables: rainfall quantity and rainfall time interval. The three variation of rainfall quantity were -30% (W^-), natural rainfall (W) and $+30\%$ (W^+). The two rainfall time interval were natural rainfall time interval (T) and 1.5 times of natural rainfall time interval (T^+). The results showed that: (1) In the condition of same rainfall quantity, the extended rainfall time interval promoted the root length, root surface area and root shoot ratio, which could gain underground water to increase seedling growth. (2) In the condition of W^- and W , all part of biomass would be accumulated by the extended rainfall time interval, but it showed opposite in the W^+ . (3) In the condition of natural rainfall time interval, the main root length and biomass increased markedly. When rainfall quantity was promoted, *R. soongorica* seedlings growth was

收稿日期: 2016-09-26; 修改稿收到日期: 2017-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(41361100, 31560135, 31360205, 41461044); 甘肃省科技支撑项目(1604FKCA088)和甘肃省高等学校科研项目(2015A-067)

作者简介: 白蕾(1993—), 女, 在读研究生, 主要从事西北抗旱灌木研究。E-mail: 540698192@qq.com

* 通信作者: 李 毅, 教授, 博士生导师, 主要从事林木遗传育种教学及西北抗旱灌木种质资源收集保护。E-mail: liyi@gsau.edu.cn

advanced at the same time. Visible changes in rainfall patterns will significantly affect seedling growth and biomass allocation in the natural growth *R. soongorica* community.

Key words: *Reaumuria soongorica*; rainfall quantity; rainfall time interval; biomass

全球气候变化改变了生态系统中的水循环,降雨格局也随之发生变化^[1],其中区域性降雨格局变化正在继续和扩大^[2]。在过去的 50 年间,西北干旱区整体处于相对湿润时段且增湿趋势明显,降雨间隔增加而极端降雨事件增多^[3],这些变化必将对植物的生长及形态特征产生重要影响^[4],进而影响群落的结构和功能。在荒漠生态系统中,自然降雨是植物主要的水分来源^[5],根系是最先感知到环境水分变化的器官,随即向上传递化学信号调节气孔行为^[6],并通过自身形态和生物量的调整来适应不同的水分环境。因此,加强降雨格局变化对荒漠植物根系生长及生物量分配影响的研究对于了解气候变化对荒漠生态系统结构与功能的影响有重要意义。

目前各国生态学家已经做了大量关于降雨格局变化对陆地生态系统影响的研究,涉及植物生长、物种组成、生物多样性、群落结构和特征等诸多方面^[6-10]。在植物生长方面,降雨格局变化对幼苗根系形态结构调整及生物量分配的影响受到广泛关注,已有研究表明降雨格局变化能显著改变植物的根系生长及生物量的分配,如:增加降雨量会促进植物生物量的积累^[11]、抑制根系伸长^[12],且不同物种对降雨量变化的响应不同^[13];延长降雨间隔会抑制草原生态系统中植物的根系生长和生物量积累^[14]。然而,对于降雨格局的改变,植物(特别是荒漠植物)也会采取相应的生长策略来适应这种变化。例如,植物会通过改变生物量的分配、增大根冠比以适应干旱环境^[15],通过凋落叶片来忍耐更长持续干旱的时间^[16]。可见,植物可以通过改变自身形态及生物量分配来适应降雨格局的变化。因此,幼苗生长特别是根系生长对降雨格局变化的响应及其适应性特征会直接影响幼苗定居成功与否,进而影响幼苗更新动态^[17]。

红砂(*Reaumuria soongarica* (Pall.) Maxim.) 是荒漠生态系统中一种常见的建群种和优势种,具有很强的耐盐、抗旱、集沙能力,其抗逆性强,生态可塑性大,对荒漠地区的生态保护具有重要作用且有荒漠景观的生境特征^[18]。目前,中国学者对红砂已经有了比较全面、系统的研究,包括其功能特性、形态分布、抗逆生态、分子和基因等方面^[19-22]。有关降雨格局变化对红砂幼苗生长的影响也有一些研

究^[23],但主要集中于人工栽培的模拟降雨,而关于自然条件下红砂幼苗生长尤其是地下部分对降雨格局变化响应的研究鲜有报道。因此,本实验以典型自然生长的红砂群落中的幼苗为研究对象,设置了 2 个降雨间隔和 3 个降雨量,共 6 个处理,以探讨红砂幼苗根系生长和生物量分配对降雨格局变化的响应,旨在阐明红砂幼苗生长对降雨格局变化的响应机制,同时为有效防止红砂灌丛退化及荒漠区人工植被恢复提供理论指导和科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

实验区位于中国黑河中游、巴丹吉林沙漠南缘绿洲外围的沙质荒漠和砾质荒漠区(N 39°21', E 100°07', 海拔 1 387 m),属温带大陆性气候。绿洲外缘砾质荒漠土壤为灰棕漠土,土壤母质为第四纪砂砾洪积—冲积物,地势相对平坦。平均年降雨量约 117 mm,并主要集中在 6~9 月,年蒸发量为 2 390 mm,约为降雨量的 20 倍,≥10 °C 年积温为 3 088 °C,实验期间地表平均温度为 25.20 °C,常年平均地下水位为 4.2 m。

1.2 实验设计

本实验设置了降雨量减少(W^-)、不变(W)和增加(W^+)3 个降雨量水平,以及自然降雨间隔(T)和延长降雨时间间隔(T^+)2 个降雨间隔。其中, W 指与自然降雨量相同, W^- 和 W^+ 分别是指模拟雨量在自然降雨量的基础上减少和增加 30%; T 是指人工模拟降雨的时间与自然降雨一致,而 T^+ 是指人工模拟降雨的时间在 2 次降雨时间间隔延长 50%的那一天^[17,23]。2 个变量共组成 6 个处理组合: W^-T 、 WT 、 W^+T 、 W^-T^+ 、 WT^+ 、 W^+T^+ ,每个处理设 3 个重复,共 18 个样地。以每个自然降雨事件的降雨量、降雨间隔期为基准,通过遮雨棚实现对自然降雨的控制,再依据降雨处理来调节每次模拟降雨的水量和时间。采用人工降雨器,实施雨水添加,需在降雨后 12 h 完成。

2014 年 6 月在红砂分布原生境选定样地,在样地内随机选取 1 m×1 m 的样方共 18 个,并保证每个样方有 4 株以上多年生红砂幼苗。用铁皮在样地周围围起来,铁皮地上露出 10 cm,埋入地下深度为

表 1 各处理模拟的降雨量和降雨日期
Table 1 Simulated rainfall intensity and rainfall date in each treatment

降雨日期(日/月) Rainfall data (Day/Month)	降雨量 Rainfall intensity/mm					
	W ⁻ T	W ⁻ T ⁺	WT	WT ⁺	W ⁺ T	W ⁺ T ⁺
2/7	4.2	4.2	6	6	7.8	7.8
8/7	2.1	—	3	—	3.9	—
11/7	—	2.1	—	3	—	3.9
2/7	2.1	—	3	—	3.9	—
22/7	13.44	—	19.2	—	24.96	—
29/7	—	2.1	—	3	—	3.9
1/8	—	13.44	—	19.2	—	24.96
3/8	5.6	—	8	—	10.4	—
12/8	3.08	—	4.4	—	5.72	—
19/8	—	5.6	—	8	—	10.4
21/8	1.54	—	2.2	—	2.86	—
29/8	4.76	—	6.8	—	8.84	—
2/9	—	3.08	—	4.4	—	5.72
6/9	0.42	—	0.6	—	0.78	—
11/9	1.26	—	1.8	—	2.34	—
15/9	—	1.54	—	2.2	—	2.86
27/9	—	4.76	—	6.8	—	8.84
4/10	1.12	—	1.6	—	2.08	—
9/10	—	0.42	—	0.6	—	0.78
11/10	3.36	—	4.8	—	6.24	—
17/10	—	1.26	—	1.8	—	2.34
总量 Total/mm	42.98	38.5	61.4	55	79.82	71.5
次数 Times	12	10	12	10	12	10

注:T 为自然降雨间隔时间,T⁺ 为自然降雨周期延长 1.5 倍后的间隔时间;W 为自然降雨量;W⁻ 为降雨量减少 30%;W⁺ 为降雨量增加 30%;下同

Note: T, natural rainfall time interval. T⁺, 1.5 times of natural rainfall time interval. W, natural rainfall. W⁻ and W⁺, natural rainfall -30% and +30%. The same as below

40 cm,以防止地表径流和雨水入渗对实验的影响。搭建遮雨棚,降雨前进行遮盖以防止雨水落入,无降雨时打开。其中 WT(CK,不干预降雨)和 W⁺ T(只增加降雨量)2 个处理不设遮雨措施。实验于 2014 年 7 月 1 日开始观测并控制降雨,降雨时间和降雨量如表 1 所示。

1.3 指标测定

2014 年 9 月 20 日在每个处理中随机选择 3 株幼苗,在离植株 30 cm 处挖开半圆型坑,沿坑壁将根系(主根与侧根)从上到下依次取出且保持完整^[24],测定主根长度(精确到 0.1 cm)。带回实验室后,用毛笔扫去附着在幼苗上的泥土,将地上部分与地下部分分离,用 EPSON 扫描设备对根系进行扫描,后

通过 WinRHIZO 根系分析系统获得主根长和根表面积。将地上和地下两部分分别放入烘箱中 105 ℃杀青 2 h,80 ℃烘干至恒重,称取干重(精确到 0.01 g)。

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2007 软件完成原始数据整理及图表制作;用 SPSS 21.0 进行统计分析,Duncan 法进行差异显著性检验($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 降雨格局变化对红砂幼苗根系形态特征的影响

由表 2 可知,仅降雨间隔时间对主根长和根表面积影响显著($P<0.05$),降雨量及二者的交互作

用对红砂幼苗根系形态特征无显著影响 ($P > 0.05$)。由图 1 可知,在相同降雨量下,延长降雨间隔促进了红砂幼苗根系的生长,如在降雨量较少的 W^- 和 W 情况下,延长降雨间隔后其主根长分别比相应自然降雨间隔增加 36.3%、61.4%,而根表面积则分别增加了 63.3%、82.5%;在自然降雨间隔下,降雨量增加也可促进幼苗根系生长,降雨量增加 30% (W^+T) 处理主根长和根表面积分别比对照相比 (WT) 增加 24.1% 和 43.3%,而在延长降雨间隔下随着降雨量的增加主根长和根表面积呈现先升高后降低的变化趋势;在所有的处理组合中,红砂幼苗根系生长以自然降雨量且降雨间隔延长处理 (WT^+) 为最佳。可见,增加降雨量以及在自然降雨的情况下延长降雨间隔均可不同程度地促进红砂幼

苗根系的生长。

2.2 降雨格局变化对红砂幼苗各部分生物量的影响

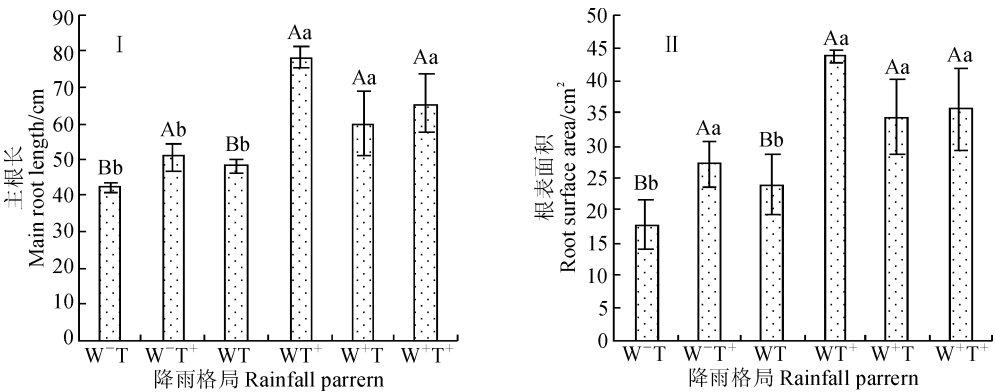
方差分析表明:降雨间隔时间对红砂幼苗地下生物量影响显著 ($P < 0.05$),降雨量对红砂幼苗地上生物量和总生物量影响显著,二者的交互作用对地下、地上和总生物量均无显著影响 ($P > 0.05$) (表 2)。其中,在降雨量较少 (W^- 和 W) 的条件下,延长降雨间隔可使地下、地上和总生物量平均值分别比相应正常降雨间隔增加 102.8%、43.7% 和 58.0%,而降雨量较多 (W^+) 的条件下延长降雨间隔对各部分生物量并无显著影响;在自然降雨间隔下随着降雨量的增加各部分生物量逐渐增加,而在延长降雨间隔 (T^+) 的情况下增加降雨量却使各部分生物量呈

表 2 各处理红砂幼苗形态和生长指标方差分析表

Table 2 Results (F -values) based on Two-way ANOVA of the effects of rainfall quantity and rainfall interval on morphological and growth characteristics of *R. soongorica* seedlings

变量 Source of variation	主根长 Main root length	根表面积 Root surface area	地上生物量 Above ground biomass	地下生物量 Below ground biomass	总生物量 Total biomass	根冠比 Root / Shoot ratio
W	3.066	1.318	4.605 *	3.135	4.757 *	0.362
T	5.169 *	5.158 *	0.542	5.117 *	1.601	3.073
W×T	1.747	0.589	2.486	1.005	2.220	1.077

注: * 表示 0.05 显著水平; T、W 和 W × T 分别表示降雨间隔时间效应、降雨量效应和降雨量与降雨间隔时间交互效应。
Note: * indicates significant correlation at level of 0.05. T, W, and W × T stand for rainfall interval effect, rainfall quantity effect, and rainfall quantity × rainfall interval interaction effect, respectively



相同降雨量下不同大写字母表示延长降雨间隔与对照间差异显著 ($P < 0.05$); 相同降雨间隔下不同小写字母表示 3 个降雨量之间的差异显著性 ($P < 0.05$); 下同

图 1 不同降雨格局下红砂幼苗主根长 (I) 和根表面积 (II) 的变化

The different capital letters under the same rainfall precipitation mean significant difference between extend rainfall interval and contrast at 0.05 level; The different lowercase letters under the same rainfall interval mean significant difference between the three rainfall precipitation at 0.05 level; The same as below

Fig. 1 Dynamics of main root length (I) and root surface area (II) of *R. soongorica* seedlings under different rainfall patterns

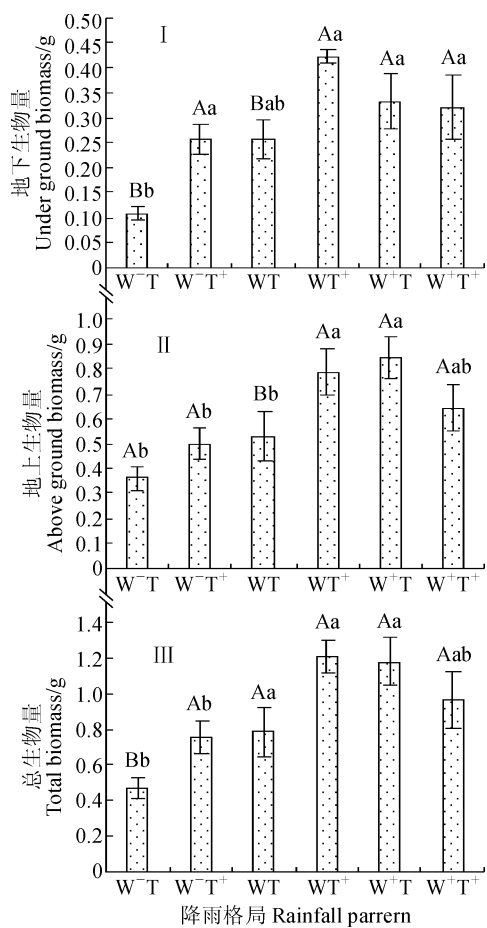


图2 不同降雨格局下红砂幼苗地下(I)、地上(II)和总生物量III的变化

Fig. 2 Dynamics of under ground biomass(I), above ground biomass(II), and total biomass(III) of *R. soongorica* seedlings in different rainfall patterns

现出先增加后减少的趋势;各处理间相比较,幼苗各部分生物量均以 W^+T 和 WT^+ 相对较高(图2)。可见,在降雨量较少的情况下延长降雨间隔、在自然间隔下增加降雨量更有利于红砂幼苗各部分生物量的积累。

2.3 降雨格局变化对红砂幼苗根冠比的影响

由表2可得出,降雨间隔时间、降雨量以及二者的交互作用对红砂幼苗的生物量分配均无显著影响($P>0.05$)。从图3可以看出,在相同降雨量下,延长降雨间隔可使红砂幼苗根冠比不同程度增加,增幅平均为43.1%;随着降雨量的增加,红砂幼苗根冠比在降雨间隔延长条件下逐渐减小,而在自然降雨间隔下先升高后降低;各处理间相比较,红砂幼苗的根冠比在减少降雨量且延长降雨间隔时达到最大值0.6。可见,减少降雨量且延长降雨间隔有利于增加红砂幼苗的根冠比。

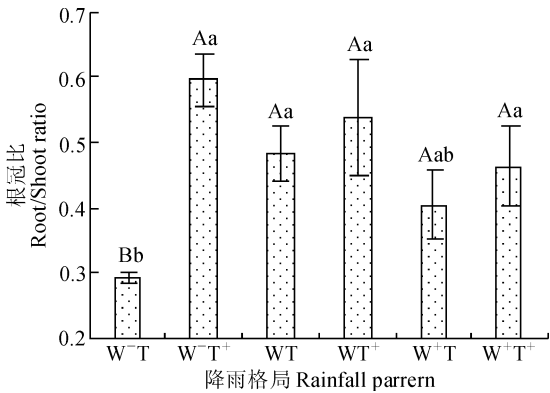


图3 不同降雨格局下红砂幼苗根冠比的变化

Fig. 3 Dynamics of root/shoot ratio of *R. soongorica* seedlings in different rainfall patterns

3 讨论与结论

3.1 降雨间隔时间变化对红砂幼苗根系生长及生物分配的影响

延长降雨间隔将使植物经受更长的持续干旱时间^[25],根系作为植物对水分变化的感应器会通过自身形态及生长的调整来适应这种环境。有研究表明持续干旱胁迫能促进植物特别是荒漠灌木主根的伸长生长以扩大自己的营养空间,进而补充植物对水分的亏缺,这也是由植物根系的向水性决定的^[26-27]。本研究发现:在各降雨量条件下,延长降雨间隔均促进了红砂幼苗主根的伸长生长,这与大多数荒漠植物主根长随干旱胁迫程度的增加而伸长的结果一致。例如,Tsakalidimi等^[28]对自然生长的冬青栎(*Quercus ilex*)幼苗研究发现,为了抵御干旱冬青栎幼苗会以抑制基径增加为代价促使主根深入到湿润土层,这表明为适应这种持续干旱环境植物会将较多的光合有机产物输送到根系以加速主根的伸长,由此来保证根系可向湿润区域延伸进而增强其竞争力^[26]。还有研究指出植物通过改变根系形态来适应降雨格局变化是植物应对全球气候变化的基本机制之一^[29-31],其中改变根表面积是许多植物应对降雨格局变化的一项基本策略^[32]。本研究发现:在相同降雨量下,延长降雨间隔均可促进红砂幼苗根表面积增加,可能是因为延长降雨间隔增加了其忍耐干旱胁迫持续的时间,为了获取更多的水源红砂幼苗通过增加根系表面积来扩大根系吸水面积,进而增强了其吸水能力和抗旱能力。

大量研究表明延长降雨间隔将促进植物幼苗地上、地下和总生物量积累^[33-34],但在北美较湿润草原地区的研究结果恰好相反^[35-36]。本研究发现在

低降雨量(W^- 和 W)下延长降雨间隔会使红砂幼苗地下、地上和总生物量明显增加,这与周双喜等^[37]对蒙古典型草原优势种大针茅幼苗的研究结果一致,表明相对较长的降雨间隔时间更有利于红砂幼苗生物量的积累,其原因可能是在间隔后期较低的土壤水分条件对植物产生了水分胁迫,促使其根系扩张^[38-39]从而提高吸水能力以此来适应干旱环境,在降雨补充之后扩张的根系及其较强的吸水能力为植株的生长提供了更多的水分,进而促进了各部分生物量的累积;然而,在高降雨量(W^+)下延长降雨间隔对各部分生物量并无显著影响,可能是延长降雨间隔会使植物的蒸腾和地表蒸发增加,但是高降雨量又将多余的水分向深层渗透,从而减少了水分损失以此达到动态平衡。本研究还发现同一降雨量条件下降雨间隔的延长增大了红砂幼苗的根冠比,这表明为适应降雨间隔延长所形成的持续干旱,红砂幼苗可通过根冠比的增加来缓解植物对持续干旱胁迫下水分、养分的供求矛盾。

3.2 降雨量变化对红砂幼苗根系生长及生物量分配的影响

大量研究表明,植物的生物量与年降雨量之间呈正相关关系^[40-41],如增加降雨量显著促进了辽东栎(*Quercus mongolica*)幼苗地上部分的生长,减少降雨量造成的干旱使地上及地下部分的生长均受到抑制,进而降低了辽东栎幼苗的更新潜力^[42]。本研究发现,除 W^+T^+ 处理外,同一降雨间隔条件下随降雨量增加红砂幼苗的地上和地下及总生物量随之增加,这与中国西北干旱区绝大部分灌木地上生物量随降雨量增加而显著增加的结果一致^[43-45],表明未来干旱区降雨量的增加将有利于荒漠植物幼苗的生长和存活,进而有利于幼苗的定居。朱雅娟等^[46]研究指出降雨量的增加对植物地上生长的影响存在

阈值效应,在水分条件较好的磴口(降雨量 145 mm),50%增雨(单次增雨量为 14.50 mm)即可促进白刺枝条生物量增加;而水分条件相对较差的民勤(降雨量 115 mm),75%增雨(单次增雨量为 17.25 mm)才能促进白刺枝条生物量增加。在本研究中增雨 30%红砂幼苗的生物量即可显著增加,表明红砂幼苗生长对水分变化较敏感,适当增雨就能促进其地上生长。然而,李秋艳等^[13]研究发现降雨量的增加并没有使红砂幼苗生物量显著增加,这可能是由于其实验并没有设置降雨间隔,总灌溉量每天平均浇灌而每次灌溉的水量又相对较低,在夏季高气温强烈蒸发作用下其水分的可利用性降低,因此没有显著改变红砂幼苗的生物量。

此外,本研究还发现降雨量和降雨间隔的交互作用对红砂幼苗根系生长及生物量分配并无显著影响,这与 Ruiru Gao 等^[47]对沙蓬的研究结果并不一致,可能是因为本实验对降雨量和降雨间隔仅设有 2 个和 3 个水平,由于红砂自身较强的抗旱性其交互作用并未表现出来。

综上所述,本研究得出以下主要结论:1)同一降雨量条件下,降雨间隔延长促进了红砂幼苗主根的伸长生长、增加了根表面积,增大了根冠比,有利于红砂幼苗根系生长。2)降雨量较少的条件下(W^- 、 W),延长降雨间隔能促使红砂幼苗地下、地上及总生物量累积;而降雨量较多(W^+)的条件下,延长降雨间隔使各部分生物量有所降低,但差异不显著。3)在自然降雨间隔条件下,降雨量的增加使红砂幼苗的总生物量和主根长呈增加的变化趋势,对其生长起到促进作用。但是,本实验仅研究了在 3 个降雨量和 2 个降雨间隔条件下红砂幼苗根系的生长及生物量的分配,对于更多水平下二因素对红砂幼苗形态和生长的影响还有待进一步研究。

参考文献:

[1] 战伟,沙伟,王森,等.降雨和温度变化对长白山地区水曲柳幼苗生长和光合参数的影响[J].应用生态学报,2012,23(3):617-624.
ZHAN W, SHA W, WANG M, et al. Effects of the variations in precipitation and temperature on photosynthetic parameters and growth of *Fraxinus mandshurica* seedlings in Changbai Mountains of Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(3): 617-624.
[2] 武静莲,王森,蒯菲,等.降雨变化和种间竞争对红松和蒙古

栎幼苗生长的影响[J].应用生态学报,2009,20(2):235-240.
WU J L, WANG M, LIN F, et al. Effects of precipitation and inter specific competition on *Quercus mongolica* and *Pinus koraiensis* seedlings growth[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(2): 235-240.
[3] 姚俊强,杨青,刘志辉,等.中国西北干旱区降雨时空分布特征[J].生态学报,2015,35(17):5 846-5 855.
YANG J Q, YANG Q, LIU Z H, et al. Spatio-temporal change of precipitation in arid region of the Northwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(17): 5 846-5 855.

- [4] VILED, PERVENTM, *et al.* Arabidopsis, growth under prolonged high temperature and water deficit: independent interactive effects? [J]. *Plant Cell & Environment*, 2012, **35**(4): 702-718.
- [5] RYANA, SPONSELLER. Precipitation pulses and soil CO₂ flux in a Sonoran Desert ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 2007, **13**(2): 426-436.
- [6] JIA W, ZHANG J. Stomatal movements and long-distance signaling in plants[J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2008, **3**(10): 772-773.
- [7] WILLIS K J, BHAGWAT S A. Biodiversity and Climate Change[J]. *BfN - Skripten (Bundesamt für Naturschutz)*, 2015, **2**(2): 164-175.
- [8] WILCOX K R, FISCHER J C V, MUSCHA J M, *et al.* Contrasting above-ground and below-ground sensitivity of three Great Plains grasslands to altered rainfall regimes[J]. *Global Change Biology*, 2014, **21**(1): 335-344.
- [9] KNAPP A K, FAYP A, BLAIR J M, *et al.* Rainfall variability, carbon cycling, and plant species diversity in a mesic grassland[J]. *Science*, 2002, **298**(5601): 2 202-2 205.
- [10] KIMBALL S, ANGERT A L, *et al.* Contemporary climate change in the Sonoran Desert favors cold-adapted Species[J]. *Global Change Biology*, 2010, **16**(5): 1 555-1 565.
- [11] FAY P A, CARLISLE J D, KNAPP A K, *et al.* Productivity responses to altered rainfall patterns in a C4-dominated grassland[J]. *Oecologia*, 2003, **137**(2): 245-251.
- [12] 秦 洁, 鲍雅静, 李政海, 等. 退化草原糙隐子草根系特征及地上高度对水分梯度的响应[J]. *中国草地学报*, 2015, **37**(3): 80-86.
- QIN J, BAO Y J, LI Z H, *et al.* Response of root characteristics of *Cleistogenes squarrosa* and above-ground height to water gradient in degraded grasslands[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2015, **37**(3): 80-86.
- [13] 李秋艳, 赵文智. 5 种荒漠植物幼苗对模拟降雨量变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2006, **28**(3): 414-420.
- LI Q Y, ZHAO W Z. Responses of seedlings of five desert species to simulated precipitation change [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, **28**(3): 414-420.
- [14] HARPER C W, BLAIR J M, FAY P A, *et al.* Increased rainfall variability and reduced rainfall amount decreases soil CO₂ flux in a grassland ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 2005, **11**(2): 322-334.
- [15] 杨贵羽, 罗远培, 李保国, 等. 不同土壤水分处理对冬小麦根冠生长的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2003, **21**(3): 104-109.
- YANG G Y, LUO Y P, LI B G, *et al.* Effect of different soil water conditions on growth of root and shoot of winter wheat [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, **21**(3): 104-109.
- [16] 张 荣, 单立山, 李 毅, 等. 人工模拟降雨格局变化对白刺幼苗生长的影响[J]. *草业学报*, 2016, (1): 117-125.
- ZHANG R, SHAN L S, LI Y, *et al.* Effect of change to simulated precipitation patterns on seedling growth of *Nitraria tangutorum* [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, (1): 117-125.
- [17] WALCK J L, HIDAYATI S N, DIXON K W, *et al.* Climate change and plant regeneration from seed[J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(6): 2 145-2 161.
- [18] 董秋莲. 不同生境红砂种群结构和动态研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
- [19] 刘家琼, 邱明新, 蒲锦春, 等. 我国荒漠典型超旱生植物——红砂[J]. *植物学报*, 1982, (5): 485-488.
- LIU J Q, QIU M X, PU J C, *et al.* The typical extreme xerophyte —*Reaumuria Soongorica* in the desert of China[J]. *Acta Botanica Sinica*, 1982, (5): 485-488.
- [20] 曾彦军, 王彦荣, 张宝林, 等. 红砂种群繁殖特性的研究[J]. *草业学报*, 2002, **11**(2): 66-71.
- ZENG Y J, WANG Y R, ZHANG B L, *et al.* Reproductive characteristics of *Reaumuria soongorica* populations[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2002, **11**(2): 66-71.
- [21] 单立山. 红砂抗逆生态学研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2014.
- [22] 殷恒霞, 石 勇, 张 雯, 等. 荒漠植物红砂(*Reaumuria soongorica*)基因组微卫星富集文库的构建及特性[J]. *中国沙漠*, 2016, 2: 374-382.
- YIN H X, SHI Y, ZHANG W, *et al.* Construction and characterization of enriched microsatellite library from desert plant *Reaumuria soongarica* [J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 2: 374-382.
- [23] 段桂芳, 单立山, 李 毅, 等. 降雨格局变化对红砂幼苗生长的影响[J]. *生态学报*, 2016, 20: 1-8.
- DUAN G F, SHAN L S, LI Y, *et al.* Effects of changing precipitation pattern on seedling growth of *Reaumuria soongarica* [J]. *Acta Ecological Sinica*, 2016, 20: 1-8.
- [24] 田 媛, 塔西甫拉提·特依拜, 李 彦, 等. 梭梭幼苗的存活与地上地下生长的关系[J]. *生态学报*, 2014, **34**(8): 2 012-2 019.
- TIAN Y, TASHPOLAT-TIYIP, LI Y, *et al.* The survival and above/below ground growth of *Haloxyylon ammodendron* seedling [J]. *Acta Ecological Sinica*, 2014, **34**(8): 2 012-2 019.
- [25] FAY P A, CARLISLE J D, KNAPP A K, *et al.* Productivity responses to altered rainfall patterns in a C4-dominated grassland[J]. *Oecologia*, 2003, **137**(2): 245-251.
- [26] SHAN L S, ZHANG X M, WANG Y K, *et al.* Influence of moisture on the growth and biomass allocation in *Haloxyylon ammodendron* and *Tamarix ramosissima* seedlings in the shelterbelt along the Tarim Desert Highway, Xin Jiang, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(S2): 93-101.
- [27] 尉秋实, 赵 明, 李昌龙, 等. 不同土壤水分胁迫下沙漠蒿的生长及生物量的分配特征[J]. *生态学杂志*, 2006, **25**(1): 7-12.
- YU Q S, ZHAO M, LI C L, *et al.* Growth and bioms allocation of *Chilopsis linearis* under different soil water stresses [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, **25**(1): 7-12.

- [28] TSAKALDIMI M, ZAGAS T. A comparison of root architecture and shoot morphology between naturally regenerated and container-grown seedlings of *Quercus ilex* [J]. *Plant & Soil*, 2009, **324**(1-2):103-113.
- [29] YIMAMU Y. Effects of soil moisture on cotton root length density and yield under drip irrigation with plastic mulch in Aksu Oasis Farmland [J]. *Journal of Arid Land*, 2010, **2**(4):243-249.
- [30] ZENG F J, SONG C, GUO H F, BO L, LUO W C, GUI D W, ARNDT S, GUO DL. Response of root growth of *Alhagi sparsifolia* Shap. (Fabaceae) to different simulated groundwater depths in the southern fringe of the Taklimakan Desert, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2013: 220-232.
- [31] 马晓东, 朱成刚, 李卫红. 多枝怪柳幼苗根系形态及生物量对不同灌溉处理的响应 [J]. *植物生态学报*, 2012, **36**(10): 1 024-1 032.
- MA X D, ZHU C G, LI W H. Response of root morphology and biomass of *Tamarix ramosissima* seedlings to different water Irrigation [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, **36**(10): 1 024-1 032.
- [32] CORTINA J, GREEN J J, BADDELEY J A, *et al*. Root morphology and water transport of *Pistacia lentiscus* seedlings under contrasting water supply: A test of the pipe stem theory [J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2008, **62**(3): 343-350.
- [33] SWEMMER A M, KNAPP A K, *et al*. Intra-seasonal precipitation patterns and above-ground productivity in three perennial grasslands [J]. *Journal of Ecology*, 2007, **95**(4): 780-788.
- [34] HEISLER-WHIRE J L, BLAIR J M, KELLY E F, *et al*. Contingent productivity responses to more extreme rainfall regimes across a grassland biome [J]. *Global Change Biology*, 2009, **15**(12): 2 894-2 904.
- [35] FAY P A, CARLISLE J D, KNAPP A K, *et al*. Altering Rainfall Timing and Quantity in a Mesic Grassland Ecosystem: Design and Performance of Rainfall Manipulation Shelters [J]. *Ecosystems*, 2000, **3**(3): 308-319.
- [36] KNAPP A K, FAY P A, BLAIR J M, *et al*. Rainfall variability, carbon cycling, and plant species diversity in a mesic grassland [J]. *Science*, 2002, **298**(5 601): 2 202-2 205.
- [37] 周双喜, 吴冬秀, 张琳, 等. 降雨格局变化对内蒙古典型草原优势种大针茅幼苗的影响 [J]. *植物生态报*, 2010, **34**(10): 1 155-1 164.
- ZHOU S X, WU D X, ZHANG L, *et al*. Effects of changing precipitation patterns on seedlings of *Stipa grandis* a dominant plant of typical grassland of Inner Mongolia, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, **34**(10): 1 155-1 164.
- [38] 丁红, 张智猛, 戴良香, 等. 水分胁迫和氮肥对花生根系形态发育及叶片生理活性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(2): 450-456.
- DING H, ZHANG Z M, DAI L X, *et al*. Effects of water stress and nitrogen fertilization on peanut root morphological development and leaf physiological activities [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(2): 450-456.
- [39] 牛晓丽, 胡田田, 刘亭亭, 等. 适度局部水分胁迫提高玉米根系吸水能力 [J]. *农业工程学报*, 2014, (22): 80-86.
- NIU X L, HU T T, LIU T T, *et al*. Appropriate partial water stress improving maize root absorbing capacity [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, (22): 80-86.
- [40] KNAPP A K, Smith M D. Variation among biomes in temporal dynamics of above ground primary production [J]. *Science*, 2001, **291**(5 503): 481-483.
- [41] BAI Y, WU J, XING Q, *et al*. Primary production and rain use efficiency across a precipitation gradient on the Mongolia Plateau [J]. *Ecology*, 2008, **89**(8): 2 140-2 153.
- [42] 董丽佳, 桑卫国. 模拟增温和降雨变化对北京东灵山辽东栎种子出苗和幼苗生长的影响 [J]. *植物生态学报*, 2012, **36**(8): 819-830.
- DONG L J, SANG W G. Effects of simulated warming and precipitation change on seedling emergence and growth of *Quercus mongolica* in Dongling Mountain, Beijing, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, **36**(8): 819-830.
- [43] 何维明. 水分因素对沙地柏实生苗水分和生长特征的影响 [J]. *植物生态学报*, 2001, **25**(1): 11-16.
- HE W M. Effects of water factor on hydraulic and growth characteristics of *Sabina Vulgaris* seedlings [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2001, **25**(1): 11-16.
- [44] 肖春旺, 董鸣, 周广胜, 等. 鄂尔多斯高原沙柳幼苗对模拟降雨量变化的响应 [J]. *生态学报*, 2001, **21**(1): 171-176.
- XIAO C W, DONG M, ZHOU G S, *et al*. Response of *Salix psammophila* seedlings to simulated precipitation change in Ordos Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(1): 171-176.
- [45] 任昱, 卢琦, 吴波, 等. 白刺叶片气孔特征对人工模拟降雨的响应 [J]. *生态学报*, 2014, **34**(21): 6 101-6 106.
- REN Y, LU Q, WU B, *et al*. Response of leaf of *Nitraria tangutorum* Bobr stomata characteristics to artificial simulation of Rainfall [J]. *Acta Ecological Sinica*, 2014, **34**(21): 6 101-6 106.
- [46] 朱雅娟, 贾子毅, 吴波, 等. 模拟增雨对荒漠灌木白刺枝叶生长的促进作用 [J]. *林业科学研究*, 2012, **25**(5): 626-631.
- ZHU Y J, JIA Z Y, WU B, *et al*. The role of increased precipitation in promoting branch and leaf growth of *Nitraria tangutorum* [J]. *Forest Research*, 2012, **25**(5): 626-631.
- [47] RUI GAO, XUEJUN YANG, *et al*. Effect of rainfall pattern on the growth and fecundity of a dominant dune annual in a semi-arid ecosystem [J]. *Plant Soil*, 2015, 389: 335-347.

(编辑: 裴阿卫)