

DOI: 10.5846/stxb201503310625

段桂芳, 单立山, 李毅, 张正中, 张荣. 降水格局变化对红砂幼苗生长的影响. 生态学报, 2016, 36(20): - .

Duan G F, Shan L S, Li Y, Zhang Z Z, Zhang R. Effects of changing precipitation patterns on seedling growth of *Reaumuria soongorica*. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(20): - .

降水格局变化对红砂幼苗生长的影响

段桂芳, 单立山, 李毅*, 张正中, 张荣

甘肃农业大学林学院, 兰州 730070

摘要:以西北荒漠生态系统典型植物红砂(*Reaumuria soongorica*)一年生幼苗为研究对象,利用人工遮雨装置,设置3个降水量梯度(W-、W、W+)和2个降水间隔时间梯度(T、T+)进行模拟试验,研究了不同降水格局下红砂幼苗生长、生物量积累和分配的变化特征。结果表明:(1)降水量增加30%,幼苗株高和基径分别平均增加22.0%和28.0%,延长降水间隔时间其作用更显著,分别平均增加24.57%和32.98% ($P < 0.05$);(2)在延长降水间隔时间的同时增加降水量,幼苗地上、地下和总生物量分别显著增加了241.57%、223.95%和236.72% ($P < 0.05$),幼苗地上部分的生长优于地下部分;(3)与对照相比,降水量减少30%,幼苗根长平均增加21.0%,根冠比平均显著增加53.73% ($P < 0.05$),而各部分生物量差异不显著。

关键词:降水格局;红砂幼苗;生物量;生长

Effects of changing precipitation patterns on seedling growth of *Reaumuria soongorica*

DUAN Guifang, SHAN Lishan, LI Yi*, ZHANG Zhengzhong, ZHANG Rong

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

Abstract: Global climate change is predicted to alter rainfall patterns of the growing season, potentially reducing total quantities of growing season precipitation and redistributing rainfall into fewer but larger individual events. Such changes are likely to have profound effects on terrestrial ecosystems. Many soil, plant, and ecosystem properties in the arid and semi-arid regions of Northwest China could be affected, and this could ultimately affect species composition and biological diversity. Both the quantity of rainfall and the precipitation time interval influence seedling growth. Although many studies have examined the effects of a single environmental factor (e.g., temperature, precipitation, or carbon dioxide [CO_2]), or even two factors (e.g., precipitation and temperature or precipitation and CO_2), the interaction of changing precipitation and precipitation time intervals on plants, especially from multiple precipitation and precipitation interval regimes, have attracted little attention to date. Given the strong influence of rainfall on plant growth, it is important to understand the implications of these interactions. *Reaumuria soongorica* is a typical species of the arid regions of Northwest China. The responses of *R. soongorica* seedlings to altered precipitation patterns could reflect the general responses of this ecological system. Annual *R. soongorica* seedlings were used as a case study species to study growth traits, biomass accumulation, and biomass allocation under different precipitation patterns during the growing season. A ventilated rainout shelter was used for experimental manipulation of rainfall patterns to keep temperature and CO_2 close to natural conditions. Then we set up a controlled experiment with two variables: precipitation quantity and precipitation time interval. The three variations of precipitation quantity were -30% (W-); natural precipitation (W); and +30% (W+). The two precipitation time

基金项目:国家自然科学基金(41361100, 31560135, 31360205); 国家国际科技合作专项(2012DFR30830); 甘肃省科技支撑计划项目(1204NKCA084)

收稿日期:2015-03-31; **网络出版日期:**2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liyi@gsau.edu.cn

intervals were 5 days and 10 days. The results showed that: (1) with increased precipitation (+30%), the height and base diameter of seedlings increased by an average of 22.0% and 28.0%, respectively ($P < 0.05$). However, these effects were even more significant when the precipitation interval was extended from 5 to 10 days; these conditions increased height and base diameter by an average of 24.57% and 32.98%, respectively ($P < 0.05$). (2) Above ground, below ground, and total biomass were significantly increased by 241.57%, 223.95%, and 236.72% ($P < 0.05$) when precipitation was increased by 30% and the precipitation interval was extended to 10 days, and the growth of above ground parts was marginally better than that of underground parts, but not obvious. (3) Compared to the control, the mean increase in root length was 21.0%, and the root/shoot ratio increased significantly by 53.73% ($P < 0.05$). When precipitation was decreased by 30%, however, there were no significant changes in biomass accumulation and growth. Through this study we noted that both the quantity and time interval of precipitation significantly affected growth and biomass accumulation in *R. soongorica* seedlings; however, the effects of precipitation quantity were greater than those of the precipitation time interval. Nevertheless, the effects of precipitation still depended greatly on the time interval, with the strongest effects being observed following increases in precipitation with a concurrent extension of the precipitation time interval to 10 days. These results suggest that large events of increased rainfall and extended rainfall intervals in the future will be more conducive to biomass accumulation and growth in *R. soongorica* seedlings.

Key Words: precipitation patterns; *Reaumuria soongorica* seedlings; biomass; growth

气候模型预测显示,随着大气环流格局和水文过程的改变,未来年内和年际间的降水格局都将发生变化^[1-2],具体表现为夏季单次降水量增大且降水间隔时间延长的大降水事件增多^[3-4],我国西北干旱和半干旱区降水的季节波动尤为明显^[5],而荒漠植物的主要水分来源为自然降水,因此,降水波动势必严重影响荒漠种群的延续和更新^[6]。近年来,生态学家已开展了大量关于降水变化对荒漠植物生长影响的研究^[7-9],多数研究认为,降水量增加,能显著促进植物各部分生物量积累和地上枝叶生长^[8-10],但也有研究认为,降水量增加会降低幼苗的主根长,使根冠比下降^[11-12],轻度的水分胁迫反而使幼苗茎质比增大^[12],促进根系生长和地下生物量积累^[13]。可见,降水量的变化对荒漠植物生长有重要影响。然而,其他研究表明,降水格局变化是一个复杂的过程^[14],其中,降水间隔时间变化对植物生长的影响更加突出^[14-17]。研究发现,降水间隔时间是影响干旱草原 ANPP(地上净初级生产力)的主要因素^[15],总降水量一定时,随着降水间隔时间的增长,草原 ANPP 减少^[16-17];也有研究指出,延长降水间隔时间使大针茅(*Stipa grandis*)幼苗地上生物量显著增加,且在低降水量条件下增长降水间隔时间地下生物量增加更显著^[18];而在湿润区,降水间隔时间增长反而会使 *Andropogon gerardii* 地上生物量减少^[19]。显然,以上研究中降水间隔时间变化对植物生长的影响更显著,此外,过去有关降水间隔时间变化对植物生长影响的研究报道较少,所以研究二者对荒漠种群生长及更新的共同影响显得更为必要。而幼苗的生长及适应特征决定其能否成功建立与补充,进而影响种群的更新动态^[15],因此,研究降水格局变化对荒漠优势植被幼苗存活与生长的影响,对于预测优势植被的发展变化趋势、荒漠植被恢复与重建等均具有重要意义。

红砂(*Reaumuria soongorica*)是一种耐旱、耐盐碱、抗逆性很强的超旱生小灌木,广泛分布于西北干旱和半干旱区,是该区的建群种和优势种。它具有耐瘠薄、适应性广、集沙能力强等特点,对荒漠地区的生态保护具有重要作用。然而,由于红砂分布地区多为生态脆弱带,长期受自然和人类活动的影响,致使其分布面积缩小,种群数量减少,在更新上产生断层,极大地影响了该区生态系统的稳定性^[20]。尽管前人已做了大量关于红砂种群结构,种子、叶片生理特性以及根系形态、构型和抗旱生理等方面的研究^[21-23],但在当前全球降水格局变化形势下,幼苗能否生长、存活,如何应对降水格局变化还未知。为此,以一年生红砂幼苗为研究对象,在其生长季节内通过人工控制降水量和降水间隔时间来开展生长模拟试验。旨在探讨这一时期红砂幼苗各部分生物量变化、分配及生长规律对降水格局变化的响应和差异,进而揭示荒漠植被对全球气候变化的响应,同

时为科学的预测荒漠生态系统变化趋势和有效地防止红砂灌丛退化以及荒漠区人工植被恢复提供理论指导和科学依据。

1 研究地区和研究方法

1.1 研究区概况

研究区选在甘肃临泽农田生态系统国家野外科学观测研究站(简称临泽站),该站位于黑河中游、巴丹吉林沙漠南缘,地理坐标为 39°21'N, 100°07'E,处于绿洲的边缘,地势平坦,海拔 1382 m。主要气候特征为干旱、高温和多风,属于典型的温带大陆性荒漠气候^[24]。多年平均降水量 117.1 mm,多集中于 7—9 月(7 月 31.7 mm、8 月 26.1 mm、9 月 31.7 mm)约占全年 65%。空气相对湿度 46%,年蒸发量高达 2390 mm,约为降水的 20 倍,年平均气温 7.6℃,最高达 39.1℃,最低为-27.3℃,年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温为 3085℃,植物生长完全依靠天然降水。地带性土壤为灰棕漠土,典型荒漠植被有红砂、梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、柽柳(*Tamarix ramosissima*)和泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)灌丛沙堆等^[25]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

在试验场内选取面积为 6 m×6 m 的样方,分割出 18 个 1 m²的小区,相邻小区用塑料膜做防渗处理,防渗隔离深 1 m。2014 年 5 月 20 日,于 25℃ 恒温清水中对红砂种子浸种 24 h 后,人工播种。播种方法:成行列播种,行间距与列间距均为 0.2 m,每个行列交叉处下种约 5 粒,下种深度为 0.5—1.0 cm。播种后定期进行管理,以保证种子发芽,生长 2 个月 after 开始接受降水处理。

1.2.2 模拟降水

2014 年 7—10 月,根据临泽站多年(1967—2008)的气象资料统计^[25-26],该区多年平均降水量为 117.1 mm,降水量较高的年份多为 160 mm 左右,比多年平均水平高出约 30%,降水量最低为 82.9 mm,比多年平均水平低 30%,因而设定试验期间降水量增减 30% 的处理;此外,资料还显示,<10 d 的降水间隔期占比率最大为 67.56%,且频率基本稳定,但>10 d 的间隔期频率明显下降且变异较大^[26],加之气候变化可能导致未来西北地区降水间隔期延长^[27],因而本试验以 5 天为间隔期来模拟自然降水频率,适当延长间隔期至 10 d 来模拟由间隔时间延长导致的降水量增加的大降水事件。因此,试验设置 3 个降水量梯度(降水量不变 W、减少 30%W-和增加 30%W+),2 个降水间隔时间梯度(5 天 T,10 天 T+),共记 6 个降水处理:WT、W-T、W+T、WT+、W-T+、W+T+。每处理 3 小区,小区上设有遮雨棚,四周通风,以保持其它自然因子接近自然状况,在整个实验期间,夜晚、阴天和有降水时进行遮盖,防止自然降水对实验的影响。为减少水分蒸发,尽量保证土壤接受的实际降水量与设定的模拟降水量一致,模拟降水均在同一天 19:00—20:00 内完成,并将试验设定的降水量均匀地洒在各小区中,各处理降水量和降水频次如表 1 所示。共进行 4 次破坏性取样试验,取样时间分别为 7 月 20 日、8 月 20 日、9 月 20 日和 10 月 20 日。本文选取幼苗生长旺盛时期—8 月的各项生长指标来探讨降水格局变化对其的影响。

1.2.3 测定指标和方法

每次取样时,挖掘前,首先用钢卷尺测定幼苗株高、冠幅,用游标卡尺测定基径并做好记录。然后用小铲挖出整株根系,带回实验室,小心除去粘附在其上的沙土并用钢卷尺测定主根长,然后将地上与地下部分分离,分别在 60℃ 恒温烘箱中烘至恒重后称重得到红砂幼苗地上生物量、地下生物量、总生物量,计算得出根冠比。

1.2.4 数据处理与分析

基本数据分析和绘图采用 Microsoft Excel 2007,方差分析采用 SPSS 17.0 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)法,显著性检验采用 LSD 法,用一般线性模型对降水量和降水间隔时间的交互效应进行双因素

方差分析。

表 1 实验中的降水设置
Table 1 Precipitation setting in experiment

处理时间 Time	月平均降水量/mm Monthly mean precipitation	降水间隔期 Precipitation interval	平均每次降水量/mm Precipitation			月降水频次 Watering frequency
			W-	W	W+	
7 月 July	31.7	T	3.70	5.28	6.87	6
		T+	7.40	10.57	13.74	3
8 月 August	26.1	T	3.05	4.35	5.66	6
		T+	6.09	8.70	11.31	3
9 月 September	31.7	T	3.70	5.28	6.87	6
		T+	7.40	10.57	13.74	3
10 月 October	6.9	T	0.81	1.05	1.84	6
		T+	1.61	2.30	3.68	3

2 结果与分析

2.1 降水量和降水间隔时间对红砂幼苗生长的影响

从表 2 可以看出,降水量和降水间隔时间对红砂幼苗株高、基径和根长的生长影响显著 ($P<0.05$),但二者之间无显著交互作用。由图 1 可知,株高和基径均随降水量和降水间隔时间的增加而增大,在同一降水量条件下,延长降水间隔时间使株高分别增加 11.11%、15.38% 和 21.06%;基径分别增加 14.63%、21.65% 和 13.95%;在同一降水间隔时间下,增加降水量使株高平均增加 21.19%、26.5%;基径平均增加 26.16%、25.06%。根长在降水量增大时无显著变化,而在降水减少、间隔时间延长时显著增加 29.0% ($P<0.05$)。可见,较高的降水量和较长的降水间隔时间促进了红砂幼苗株高和基径的生长,而低降水量和长降水间隔时间更有利于根系的伸长生长。

表 2 降水量和降水间隔时间对红砂幼苗株高、基径和根长,地上生物量、地下生物量、总生物量和根冠比影响的双因素方差分析结果 (F 值)
Table 2 Results (F -values) based on Two-way ANOVA of the effects of precipitation quantity and precipitation interval on tree height, basal diameter and root length, aboveground biomass, belowground biomass, total biomass and root/shoot ratio to the unplanted half bucket area of *Reaumuria soongorica* seedlings

变量 Source of variation	株高 Tree height	基径 Basal diameter	主根长 Root length	地上生物量 Above ground biomass	地下生物量 Belowground biomass	总生物量 Total biomass	根冠比 Root/Shoot ratio
W	18.25 ***	18.722 **	10.942 ***	15.336 ***	14.988 **	20.059 ***	3.662
T	6.850 *	6.480 *	14.614 **	5.509 *	14.747 **	9.627 **	0.25
W×T	0.559	0.152	3.516	3.103	8.373 **	5.195 *	0.297

*, 表示显著水平 ($P<0.05$); **, 表示极显著水平 ($P<0.01$); T: 降水间隔时间效应 precipitation interval effect; W: 降水量效应 precipitation quantity effect; W×T: 降水量与降水间隔时间交互效应 precipitation quantity × precipitation interval interaction effect

2.2 降水量和降水间隔时间对红砂幼苗生物量的影响

降水量和降水间隔时间对红砂幼苗地上、地下和总生物量都有显著影响 ($P<0.05$),且降水量的作用比降水间隔时间的影响更显著,但二者的交互作用对地上生物量无显著影响 ($P>0.05$) (表 2)。从图 2 可以看出,延长降水间隔时间使地上生物量平均增加 46.82%,降水量增加 30%使地上生物量平均显著增加了 172.2% ($P<0.05$);对于地下生物量而言,降水间隔时间的效应依赖于降水量的多少,当降水量为 W- 和 W 时,增长降水间隔时间使地下生物量只增加了 20.45%,而在高降水量 (W+) 时,地下生物量显著增加了 148.7%;而总生物量在同一降水间隔时间下,降水量增大使其分别增加 73.28%、115.41%,在同一降水量条件下,延长降水间隔时间使总生物量分别增加 30.45%、12.23%、108.93%。可见,降水量相同的条件下,延长降水间隔时间地

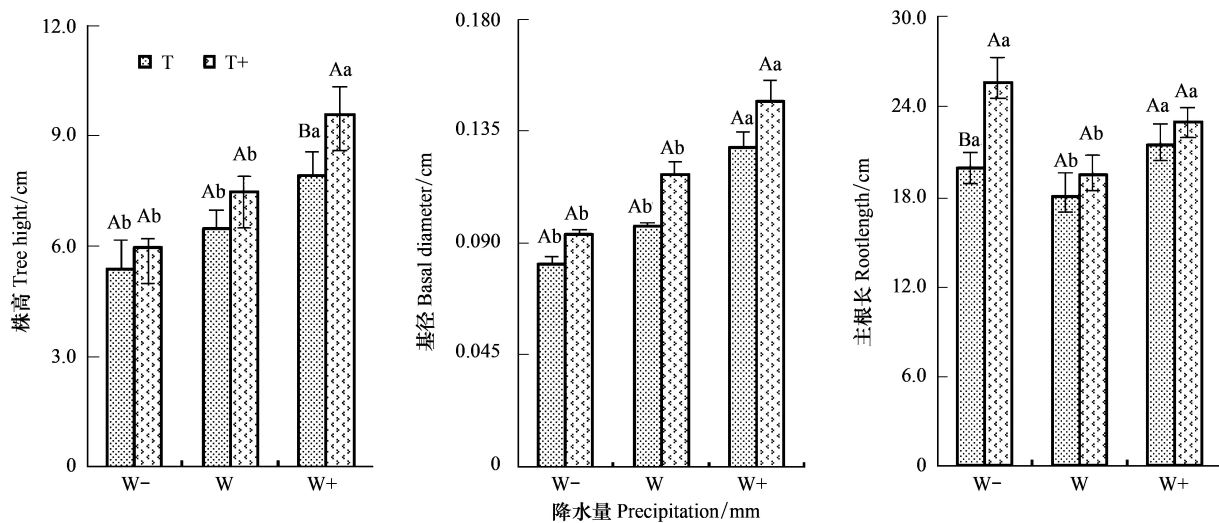


图1 不同降水格局下红砂幼苗株高(A) 基径(B) 和根长(C) 的变化

Fig.1 Dynamics of Tree height (A), Basal diameter (B), Root length (C) of *Reaumuria soongorica* seedlings in different precipitation patterns

不同大写字母表示在相同的水分处理下,延长降水间隔期与对照间差异显著($P < 0.05$);不同小写字母表示;相同降水间隔下,降水变化与对照间的差异显著($P < 0.05$)。T 降水间隔时间为 5 天;T+降水间隔时间为 10d;W 自然降水量;W-降水量减少 30%;W+降水量增加 30%

下、地上、总生物量增加;降水间隔时间相同的条件下,增大降水量各部分生物量增加,但在高降水量、长降水间隔时间环境下红砂幼苗各部分生物量增加更显著。

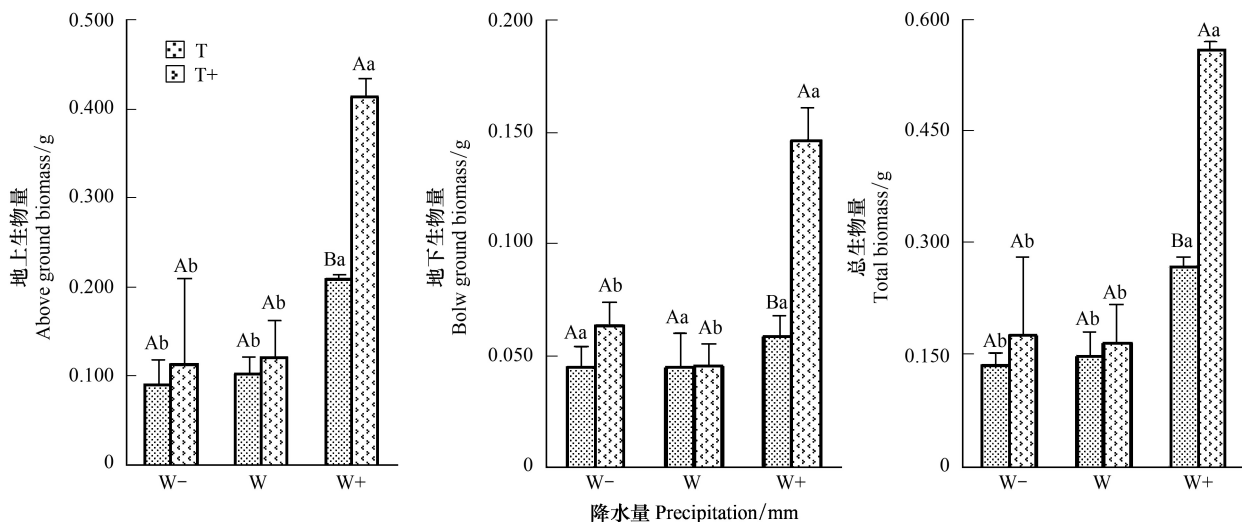


图2 不同降水格局下红砂幼苗地上生物量(A) 地下生物量(B) 和总生物量(C) 的变化

Fig.2 Dynamics of aboveground biomass (A), belowground biomass (B), total biomass (C) of *Reaumuria soongorica* seedlings in different precipitation patterns

2.3 降水格局变化对红砂幼苗地上地下物质分配的影响

降水量和降水间隔时间对红砂幼苗根冠比都没有显著影响($P > 0.05$),二者之间也无显著交互作用(表 2)。从图 3 可以看出,在两降水间隔时间下,随着降水量的增大根冠比均呈下降趋势,而降水量减小时根冠比却显著增大,具体为:降水间隔时间分别为 5 天和 10 天时,降水量增加 30%,根冠比分别减小 31.71% 和 2.70%;降水量减少 30%,根冠比分别显著增加 56.1% 和 51.35% ($P < 0.05$)。显然,低降水量更能促进根冠比的增大。

3 讨论

3.1 降水量变化对红砂幼苗生长的影响

在干旱环境中,限制植物生长的首要因子就是水分。在探讨植物生长对水分变化的响应特征时,生物量及其分配最先受到关注^[27]。张腊梅等^[28]研究指出科尔沁固定沙地植被地上生物量在增雨 30% 时达到最大值,减雨 60% 使地下生物量增加,而降雨量的增加和减少都会使根冠比增加。也有研究表明,在受到水分胁迫时,玉米 (*Maize*) 地上部分生长延缓甚至暂停,根系生物量增加,根冠比增大^[29]。李文尧^[30]等则认为,干旱胁迫显著增加了紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L) 根系表面积和直径 $\geq 1\text{mm}$ 的侧根数目,并使得主根变细、根系生物量下降。本研究发现,降水量增加 30%,红砂幼苗株高、基径和各部分生物量均呈增加趋势,且在降水间隔时间延长为 10 d 时增加最显著。这是因为随着降水量的增大,幼苗地上部分生长旺盛、生物量增加,增大了幼苗获取光资源的面积^[13],从而提高同化速率,光合产物增多,进而使幼苗株高、基径及各部分生物量均显著增加。这与肖春旺等^[11]随着供水的增加,沙柳 (*Salix psammophila*) 幼苗生物量干重显著提高的研究结果一致,Heisler-White 等^[31]的研究结果也证实了这一点,他们发现保持总降水量不变,延长降水间隔时间、增加平均单次降水量,使北美半干旱区草原的 *ANPP* 显著增加 30%。而这与李秋艳和赵文智^[32]随着降水量的增加,红砂幼苗生长高度和高度生长率显著减小,生物量积累和分配变化不显著的结果相反,可能由于两实验设置的降水量不同,且前人并没有设置降水间隔期,可能导致灌水过多,抑制了幼苗生长的原因。而降水量减少 30% 对幼苗地上生物量、总生物量影响均不显著,根长和地下生物量却有所增加,根冠比明显大于其他处理。这表明植物体在受到某一生长因素的限制时,会优先将资源分配到受这一因素影响最大的组织或器官^[33],根系是植物吸收水分和养分的主要器官,也是最先感知逆境胁迫的部位,因而,在水分可利用性很低时,植物会将水分和生物量更多地分配给地下部分^[34],促进根系的生长。许多抗旱植物(如红砂、梭梭、多枝怪柳)都对资源限制都做出了类似的反应^[25,35-36]。此外,在实验过程中,减水处理有落叶的现象,可能导致地上生物量有所下降,从而增大了根冠比。因此,本研究中,在降水间隔时间为 10 d 时降水量增加 30%,更有利于幼苗各部分生物量的积累与生长。

3.2 降水间隔时间变化对红砂幼苗生长的影响

在荒漠地区,降水的频率和时间间隔是影响植物存活、生长,物种组成及结构的重要因素^[37]。由于蒸发量很大,降水的时间分布直接影响土壤含水量,使土壤温度、结构和养分含量等发生变化,进而影响植物的形态、结构和生长等^[38]。有研究^[25]指出,随着降水间隔时间的延长,土壤水分减少,不利于荒漠植物的生长,使植物初级生产力降低。而本研究结果显示,在低降水量 (W^-) 下延长降水间隔时间,根长反而显著增加。表明红砂具有较强的耐旱性,在受到水分胁迫时,各级侧根不断向周围扩展以便获取更多的水分和养分来维持幼苗生长,所以使根系总长度增加^[21]。这与李文尧^[30]等干旱胁迫显著抑制了紫花苜蓿主根的伸长生长,但促进了侧根的伸长生长进而使根系总长度增加的结果一致。在高降水量 (W^+) 条件下,降水间隔时间由 5 天延长至 10 天,幼苗株高、基径、根长及各部分生物量均呈上升趋势,生物量增加尤其显著,这与何维明^[8]和任昱等^[39]对西北地区荒漠植物沙地柏和白刺等随降雨量增加其生物量显著增加的研究结果一致,而与 Knapp

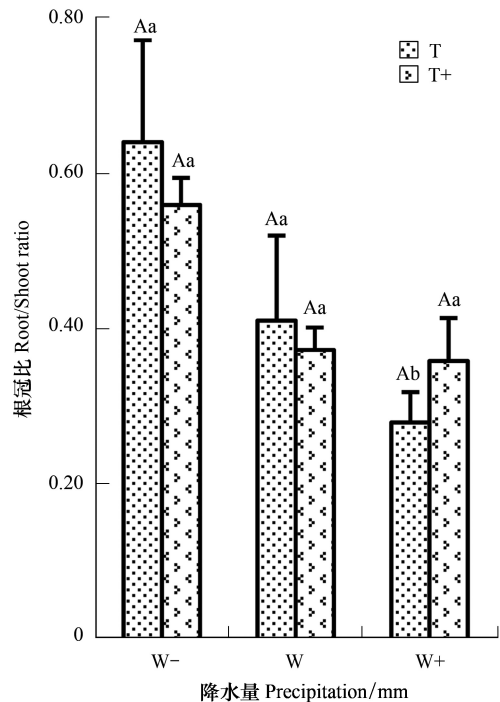


图3 不同降水格局下红砂幼苗根冠比的变化

Fig. 3 Dynamics of Root/Shoot ratio of *Reaumuria soongorica* seedlings in different precipitation patterns

等^[19]和王晓东^[40]的研究结果相反。这是由于试验期间当地的蒸发量很高,导致试验地接收到的大部分降水都通过植物蒸腾和地表蒸发返回到了大气中^[41]。此外,降水间隔时间的延长,使得潜在蒸散增加,干旱加剧^[42]。因此,只有在降水较大时,才能有多余的水分向深层土壤渗透,减少水分损失,增大了土壤水分含量^[43],有效提高了水分利用率,促进了植株对养分的吸收利用,进而促进幼苗各部分生物量的积累和生长。所以本试验中,在降水量增加 30%时将降水间隔时间延长至 10 d,更有利于红砂幼苗同时利用地表和深层土壤中的水分,所以能更显著地促进它的生长。

4 结论

本研究中降水量变化对红砂幼苗各部分生物量积累、分配及生长规律的影响都随降水间隔时间的变化而变化,且在长降水间隔时间下增加降水量对幼苗各部分生物量积累的促进作用大于短降水间隔时间。可能正是因为忽略了降水量效应对降水间隔时间的依赖性^[31,34],才导致以往只单一关注降水量变化对红砂幼苗生长影响的研究结果存在差异。因此,本研究得到以下主要结论:(1)降水量和降水间隔时间对红砂幼苗生长和生物量积累均有显著影响,且降水量的效应大于降水间隔时间;(2)降水量的效应依赖于降水间隔时间,在降水间隔时间延长的条件下增加降水量其效果最明显。可见,未来长降水间隔时间导致的大降水事件更有利于红砂幼苗的生长、存活以及以红砂为建群种的干旱区进行人工植被恢复与种群更新。对于其他种群以及自然群落的适应状况,有待于进一步的探索研究。

参考文献(References):

- [1] Seneviratne S I, Lüthi D, Litschi M, Schär C. Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature*, 2006, 443(7108): 205-209.
- [2] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report // Core Writing Team, Pachauri R K, Reisinger A, eds. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007.
- [3] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. //Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [4] Meehl G A, Arblaster J M, Tebaldi C. Understanding future patterns of increased precipitation intensity in climate model simulations. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(18): 718-719.
- [5] 姚玉璧,王润元,邓振镛,韩树林,邢托勤. 黄土高原半干旱区气候变化及其对马铃薯生长发育的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 379-385.
- [6] Vitousek P M. Beyond global warming: ecology and global change. *Ecology*, 1994, 75(7): 1861-1876.
- [7] White T A, Campbell B, Kemp P D, Hunt C L. Sensitivity of three grassland communities to simulated extreme temperature and rainfall events. *Global Change Biology*, 2000, 6(6): 671-684.
- [8] 何维明. 水分因素对沙地柏实生苗水分和生长特征的影响. *植物生态学报*, 2001, 25(1): 11-16.
- [9] 肖春旺,董鸣,周广胜,刘喜国. 鄂尔多斯高原沙柳幼苗对模拟降水量变化的响应. *生态学报*, 2001, 21(1): 171-176.
- [10] 董丽佳,桑卫国. 模拟增温和降水变化对北京东灵山辽东栎种子出苗和幼苗生长的影响. *植物生态学报*, 2012, 36(8): 819-830.
- [11] 肖春旺,周广胜,马风云. 施水量变化对毛乌素沙地优势植物形态与生长的影响. *植物生态学报*, 2002, 26(1): 69-76.
- [12] 武静莲,王森,蔺菲,郝占庆,姬兰柱,刘亚琴. 降水变化和种间竞争对红松和蒙古栎幼苗生长的影响. *植物生态学报*, 2009, 20(2): 235-240.
- [13] 孙洪刚,刘军,董汝湘,姜景民,刁松峰,李彦杰. 水分胁迫对毛红椿幼苗生长和生物量分配的影响. *林业科学研究*, 2014, 27(3): 381-387.
- [14] Swemmer A M, Knapp A K, Snyman H A. Intra-seasonal precipitation patterns and above-ground productivity in three perennial grasslands. *Journal of Ecology*, 2007, 95(4): 780-788.
- [15] Walck J L, Hidayati S N, Dixon K W, Thompson K, Poschod P. Climate change and plant regeneration from seed. *Global Change Biology*, 2011, 17(6): 2145-2161.
- [16] Fay P A, Carlisle J D, Knapp A K, Blair J M, Collins S L. Productivity responses to altered rainfall patterns in a C₄-dominated grassland. *Oecologia*, 2003, 137(2): 245-251.
- [17] Maestre F T, Reynolds J F. Amount or pattern? Grassland responses to the heterogeneity and availability of two key resources. *Ecology*, 2007, 88:

501-511.

- [18] 周双喜, 吴冬秀, 张琳, 施慧秋. 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. 植物生态学报, 2010, 34(10): 1155-1164.
- [19] Knapp A K, Fay P A, Blair J M, Collins S L, Smith M D, Carlisle J D, Harper C W, Danner B T, Lett M S, McCarron J K. Rainfall variability, carbon cycling, and plant species diversity in a mesic grassland. Science, 2002, 298(5601): 2202-2205.
- [20] Liu Y B, Zhang T G, Li X R, Wang G. Protective mechanism of desiccation tolerance in *Reaumuria soongorica*: leaf abscission and sucrose accumulation in the stem. Science in China Series C: Life Sciences, 2007, 50(1): 15-21.
- [21] 种培芳, 苏世平, 李毅, 孙兆成. 不同地理种源红砂幼苗对 PEG 胁迫的生理响应. 草业学报, 2013, 22(1): 183-192.
- [22] 单立山, 李毅, 董秋莲, 耿东梅. 红砂根系构型对干旱的生态适应. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1283-1290.
- [23] 单立山, 李毅, 任伟, 苏世平, 董秋莲, 耿东梅. 河西走廊中部两种荒漠植物根系构型特征. 应用生态学报, 2013, 24(1): 25-31.
- [24] 庄艳丽, 赵文智. 荒漠植物雾冰藜和沙米叶片对凝结水响应的模拟实验. 中国沙漠, 2010, 30(5): 1068-1074.
- [25] 刘冰, 赵文智. 荒漠绿洲过渡带怪柳和泡泡刺光合作用及水分代谢的生态适应性. 中国沙漠, 2009, 29(1): 101-107.
- [26] 刘冰, 常学向, 李守波. 黑河流域荒漠区降水格局及其脉动特征. 生态学报, 2010, 30(19): 5194-5199.
- [27] 宋连春, 张存杰. 20 世纪西北地区降水量变化特征. 冰川冻土, 2003, 25(2): 143-148.
- [28] 张腊梅, 刘新平, 赵学勇, 张铜会, 岳祥飞, 云建英. 科尔沁固定沙地植被特征对降雨变化的响应. 生态学报, 2014, 34(10): 2737-2745.
- [29] 齐伟, 张吉旺, 王空军, 刘鹏, 董树亭. 干旱胁迫对不同耐旱性玉米杂交种产量和根系生理特性的影响. 应用生态学报, 2010, 21(1): 48-52.
- [30] 李文娆, 张岁岐, 丁圣彦, 山仑. 干旱胁迫下紫花苜蓿根系形态变化及与水分利用的关系. 生态学报, 2010, 30(19): 5140-5150.
- [31] Heisler-White J L, Knapp A K, Kelly E F. Increasing precipitation event size increases aboveground net primary productivity in a semi-arid grassland. Oecologia, 2008, 158(1): 129-140.
- [32] 李秋艳, 赵文智. 5 种荒漠植物幼苗对模拟降水量变化的响应. 冰川冻土, 2006, 28(3): 414-420.
- [33] 刘莹, 盖钧镒, 吕慧能. 作物根系形态与非生物胁迫耐性关系的研究进展. 植物遗传资源学报, 2003, 4(3): 265-269.
- [34] Bloom A J, Chapin III F S, Mooney H A. Resource limitation in plants--an economic analogy. Annual Review of Ecology and Systematics, 1985, 16: 363-392.
- [35] 单立山, 李毅, 段雅楠, 耿东梅, 李真银, 张荣, 段桂芳, Жигунов Анатолий Васильевич. 红砂幼苗根系形态特征和水分利用效率对土壤水分变化的响应. 西北植物学报, 2014, 34(6): 1198-1205.
- [36] Shan L S, Zhang X M, Wang Y K, Wang H, Yan H N, Wei J, Xu H. Influence of moisture on the growth and biomass allocation in *Haloxylon ammodendron* and *Tamarix ramosissima* seedlings in the shelterbelt along the tarim desert highway, Xinjiang, China. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(2): 93-101.
- [37] Cheng X L, An S Q, Li B, Chen J Q, Lin G H, Liu Y H, Luo Y Q, Liu S R. Summer rain pulse size and rainwater uptake by three dominant desert plants in a desertified grassland ecosystem in northwestern China. Plant Ecology, 2006, 184(1): 1-12.
- [38] Weltzin J F, Loik M E, Schwinning S, Williams D G, Fay P A, Haddad B M, Harte J, Huxman T E, Knapp A K, Lin G H, Pockman W T, Shaw M R, Small E E, Smith M D, Smith S D, Tissue D T, Zak J C. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. Bio Science, 2003, 53(10): 941-952.
- [39] 任昱, 卢琦, 吴波, 李永华, 辛智鸣, 姚斌. 白刺叶片气孔特征对人工模拟降雨的响应. 生态学报, 2014, 34(21): 6101-6106.
- [40] 王晓冬, 叶生欣, 沈海龙, 李长海. 不同土壤水分条件对真桦幼苗形态特征、生物量及光合生理特征的影响. 东北林业大学学报, 2008, 36(5): 22-24.
- [41] Heisler-White J L, Blair J M, Kelly E F, Harmony K, Knapp A K. Contingent productivity responses to more extreme rainfall regimes across a grassland biome. Global Change Biology, 2009, 15(12): 2894-2904.
- [42] 尚宗波, 高琼. 中国水分状况对全球气候变化的敏感性分析. 生态学报, 2001, 21(4): 528-537.
- [43] Sala O E, Lauenroth W K, Parton W J. Long-term soil water dynamics in the shortgrass steppe. Ecology, 1992, 73(4): 1175-1181.