

DOI: 10.5846/stxb201902180285

李新乐, 张景波, 董雪, 辛智鸣, 段瑞兵, 罗凤敏, 李永华. 模拟增雨对荒漠植物幼苗生长和根系形态的影响. 生态学报, 2020, 40(10): 3452-3461.

Li X L, Zhang J B, Dong X, Xin Z M, Duan R B, Luo F M, Li Y H. Effects of simulated precipitation addition on growth and root morphological characteristics of desert plant seedling. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3452-3461.

模拟增雨对荒漠植物幼苗生长和根系形态的影响

李新乐^{1,2,3}, 张景波¹, 董雪^{1,3}, 辛智鸣^{1,3}, 段瑞兵^{1,3}, 罗凤敏^{1,3}, 李永华^{2,*}

1 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 磴口 015200

2 中国林业科学研究院, 荒漠化研究所, 北京 100091

3 内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站, 磴口 015200

摘要: 降雨是荒漠生态系统过程和功能的最重要限制因子, 荒漠植物幼苗对生长季降雨的变化极端敏感。为探讨荒漠植物对未来降雨格局变化的响应, 选取乌兰布和沙漠两种典型荒漠植物幼苗(白刺和油蒿)为研究对象, 根据生长季内(6—9月)每次降雨量, 进行不同梯度的人工模拟增雨试验(CK: 自然降雨、A: 增雨 25%、B: 增雨 50%、C: 增雨 75%、D: 增雨 100%), 研究两种植物幼苗生长和根系形态特征对降雨量变化的响应。结果表明: (1) 不同增雨处理对白刺和油蒿幼苗的地上部生长有显著影响($P < 0.05$), 增雨处理的白刺和油蒿幼苗的株高、平均冠幅和基径显著高于 CK, 并随着增雨量的增大而增大(白刺基径除外); (2) 增雨处理之间、白刺和油蒿之间在总根长、总表面积、平均直径、总体积、根尖数和分叉数均有显著差异($P < 0.05$)。对白刺幼苗而言, B 处理和 C 处理的根系参数均显著大于 CK、A 和 D 处理, 且 B 和 C 处理之间没有显著差异(平均直径除外); 对油蒿幼苗而言, 随着增雨量的增加, 油蒿总根长、总表面积、总体积、根尖数和分叉数呈现逐渐增加的趋势, 而平均直径呈现先增加后降低的趋势, 且在 B 处理下达到最大值。(3) 增雨处理显著降低了白刺幼苗的根冠比, 而对油蒿幼苗的根冠比没有显著影响, 并且白刺幼苗根冠比显著大于油蒿幼苗。(4) 白刺和油蒿幼苗的根系主要分布在 0—0.5 mm 和 0.5—1 mm 内, <2 mm 的细根比例分别在 B 和 D 处理下达到最大值。这表明白刺和油蒿幼苗能够通过调整地上部生长和根系形态来适应降雨的变化。

关键词: 荒漠植物幼苗; 模拟增雨; 生物量; 根系形态; 根冠比

Effects of simulated precipitation addition on growth and root morphological characteristics of desert plant seedling

LI Xinle^{1,2,3}, ZHANG Jingbo¹, DONG Xue^{1,3}, XIN Zhiming^{1,3}, DUAN Ruibing^{1,3}, LUO Fengmin^{1,3}, LI Yonghua^{2,*}

1 Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou 015200, China

2 Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3 Dengkou Desert Ecosystem Research Station of Inner Mongolia, Dengkou 015200, China

Abstract: Precipitation is the most important limiting factor for processes and functions of desert ecosystems and desert plant seedlings are extremely sensitive to precipitation changes during the growing season. In order to explore the response of desert plant seedlings to future precipitation pattern changes, two typical desert plant seedlings (*Nitraria tangutorum* and *Artemisia ordosica*) in Ulan Buh desert were selected as research objects. The artificial simulated precipitation addition experiment was conducted with five different gradients (CK: natural precipitation, A: +25% precipitation, B: +50% precipitation, C: +75% precipitation, D: +100% precipitation) based on the precipitation of growing season from June to September to study the growth of two plant seedlings and the response of root morphological characteristics to precipitation

基金项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项资助(CAFYBB2020MB007); 内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站运行补助(201913214)

收稿日期: 2019-02-18; **网络出版日期:** 2020-04-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lyhids@caf.ac.cn

changes. The results showed that 1) different precipitation treatments had significant effects on the shoot growth of *Nitraria tangutorum* and *Artemisia ordosica* seedlings ($P < 0.05$). The height, average crown, and base diameter of *Nitraria tangutorum* and *Artemisia ordosica* seedlings were significantly higher than the CK and increased with the amount of precipitation (except for the base diameter of *Nitraria tangutorum*). 2) There were significant differences in total root length, total surface area, average diameter, total volume, number of root tips and number of branches between precipitation treatments ($P < 0.05$). For the *Nitraria tangutorum* seedlings, the root parameters of B and C treatments were significantly greater than those of CK, A and D treatments, and there was no significant difference between B and C treatments (except for the average diameter); for the *Artemisia ordosica* seedlings, the total root length, total surface area, total volume, number of root tips and number of branches increased gradually with the increase of precipitation, while the average diameter increased first and then decreased, and reached the maximum under B treatment. 3) Precipitation addition treatment significantly reduced the root-shoot ratio of *Nitraria tangutorum* seedlings, but had no effect on the seedlings of *Artemisia ordosica*, and the root-shoot ratio of *Nitraria tangutorum* seedlings was significant greater than the seedlings of *Artemisia ordosica*. 4) The roots diameter of two seedlings were mainly distributed in 0—0.5mm and 0.5—1mm, and the ratio of fine root ($< 2\text{mm}$) reached the maximum value under B and D treatment, respectively. It suggested that *Nitraria tangutorum* and *Artemisia ordosica* seedlings could adjust shoot growth and root morphology to adapt precipitation changes.

Key Words: desert plant seedlings; simulated precipitation addition; biomass; root morphological; root-shoot ratio

在全球变暖影响下,全球及区域降雨格局正在发生改变,极端干旱、极端降雨事件发生频率增加,这将对陆地生态系统产生深刻影响^[1]。据气象数据分析显示,亚洲中部干旱地区降雨格局变化明显,主要表现为:降雨量增加、降雨时间分配改变、降雨强度增强^[2]。同时,我国以荒漠生态系统为主的西北干旱地区在未来也将出现夏、秋两季降雨明显增多的趋势^[3-4]。降雨是干旱区荒漠生态系统过程和功能的最重要限制因子^[5],而幼苗生长被认为是植物生长过程中最重要和敏感的一个阶段,降雨格局变化必将改变其存活状况,进而对种群更新、群落组成和结构、物种多样性、生产力产生影响^[6]。因此,通过模拟降雨格局变化,研究其对荒漠植物幼苗生长的影响对于揭示植物对环境变化的响应和适应规律至关重要,也为预测未来降雨格局变化下,我国干旱区荒漠植被的演化方向与速率提供理论支撑和数据支持^[7]。

目前,生态学家已经开展了大量关于降雨格局变化对荒漠植物幼苗生长的研究,但研究结果与结论差异较大。已有研究表明,全球气候变化引起的降雨量增减将加强或抑制幼苗的生长^[8-9]。Heisler-White 等^[10]研究表明,保持生长季总降雨量不变,延长降雨间隔时间且增加平均单次降雨量的降雨格局使草地植物地上净初级生产力显著增加。李秋艳和赵文智^[11]研究发现,不同降雨梯度下泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa* Maxim)幼苗生物量及其分配随着降雨量的增加而呈抛物线变化趋势。随着水量的增加,油蒿幼苗生物量、株高、总枝数和长度、总叶片数、总叶面积、比叶面积和细根长逐渐增大,而生物量根冠比逐渐减小^[12]。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^[13]。可见,荒漠植物幼苗随降雨格局变化呈现不同的响应对策,但目前大部分关于降雨格局变化的研究都局限于植物的地上部分,根系作为植物吸收水分的器官,降雨变化其最先感知^[14],未来降雨格局变化所导致的土壤水分改变对植物幼苗根系形态的影响我们知之甚少^[15]。此外大多数研究集中在不同降雨量、不同降雨间隔期对幼苗生长的影响^[16],并未涉及按自然降雨间隔期增加降雨条件下幼苗的生长变化规律。

白刺(*Nitraria tangutorum*)和油蒿(*Artemisia ordosica*)是乌兰布和荒漠重要的优势种、建群种,也是对降雨变化较为敏感的荒漠植物^[17-18]。在研究区,稀少、多变的降雨量对其生活史、生理特征影响很大,由于荒漠植物幼苗的早期阶段最脆弱,对水土条件变化最敏感,因此荒漠植物幼苗生长对环境的响应直接影响其幼苗存活及种群的更新动态^[19]。本研究按照自然降雨间隔进行模拟增雨试验,旨在探讨白刺和油蒿幼苗地上地下生物量变化及其根系形态特征对模拟降雨格局变化的响应和差异,进而为科学地预测荒漠生态系统变化趋

势、群落演替规律以及加快荒漠区植被恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区巴彦淖尔市磴口县中国林业科学研究院沙漠林业实验中心第二实验场,地理位置为 106°43'E,40°24'N,海拔约 1050 m。该区位于乌兰布和沙漠东北部,属于温带大陆性干旱气候,年平均气温 7.8℃,多年平均降雨量约 145 mm,降雨主要集中在 6—9 月份,约占全年降雨的 70%—80%,年蒸发量约 2327 mm,无霜期 136 d,土壤类型为风沙土。植被类型属于温带灌木荒漠,唐古特白刺(*Nitraria tangutorum*)是研究地点的优势植物,能够阻挡风沙并形成白刺灌丛沙包,沙包高约 1—3 m,直径约 6—10 m,植被盖度约为 45%—75%,伴生种有油蒿、沙鞭(*Psammochloa villosa*)和沙米(*Agriophyllum squarrosum* (Linn.) Moq.)等。群落盖度为 20%—30%。

1.2 实验设计

实验共设置 5 个降雨处理:即自然降雨 CK,在当年自然降雨量的基础上人工模拟增雨,分别增加 25% (A),50%(B),75%(C)和 100%(D),具体增雨量见表 1。采用随机区组设计,每个处理 8 个重复。

表 1 模拟增雨量设置

Table 1 Simulated precipitation addition setting in experiment

时间(月-日) Time	自然降雨量 Precipitation/mm	人工模拟增雨量 Precipitation addition/mm			
		A	B	C	D
06-21	1.6	0.4	0.8	1.2	1.6
06-24	8.4	2.1	4.2	6.3	8.4
06-26	2.4	0.6	1.2	1.8	2.4
07-02	3.3	0.83	1.65	2.49	3.3
07-06	2.3	0.58	1.16	1.74	2.3
07-20	30.2	7.55	15.1	22.65	30.2
07-23	1.6	0.4	0.8	1.2	1.6
08-06	2.3	0.58	1.16	1.74	2.3
08-12	5.5	1.38	2.76	4.14	5.5
08-17	6.6	1.8	3.6	5.4	7.2
08-30	8.8	2.2	4.4	6.6	8.8
09-01	22.6	5.65	11.3	16.95	22.6
09-11	1.7	0.43	0.86	1.29	1.7
09-27	2.3	0.58	1.16	1.74	2.3
合计 Total	100.2	25.1	50.1	75.2	100.2

表中 A:增雨 25%,B: 增雨 50%,C: 增雨 75%,D: 增雨 100%

供试苗木为白刺和油蒿的 2 年生容器苗,供试土壤采用沙壤土,中等肥力,田间持水量为 25.7%,土壤取回后过筛,去除杂质后备用。试验采用室外盆栽种植,花盆中装入供试土壤,花盆外径为 20 cm,内径为 19.6 cm,高度为 22.5 cm。5 月初每盆植入 1 株,定植后充分灌水以保证成活率,苗木成活后选择长势一致的植株进行控水试验。试验于 2018 年 6 月至 10 月进行,根据每次自然降雨量的不同,以每个自然降雨事件的降雨量、降雨间隔时间为基准,利用 10 个 50 L 圆柱形水桶收集降雨,并将每次截留下的雨水按实验设计用量筒装入喷壶,均匀洒入增雨处理的花盆中。实验期间定期进行除草和病虫害防治。

1.3 取样与测定

在 2018 年 10 月 14 日用卷尺测量植株高度、冠幅,游标卡尺测量幼苗基径后,采集白刺和油蒿幼苗和根系,先用剪刀将植株从基部剪断,用信封袋分装其地上部分(叶和枝);然后用手轻轻拍打花盆外侧使花盆中的土体与花盆分离,用自来水慢慢冲洗土体,逐渐将完整根系从土体中分离,放在吸水纸上用吹风机将根系吹

干,立即用根系扫描仪(EPSON Perfection V800)扫描以获取根系图像,将完整的根系装入信封袋。将地上部分样品和根系样品带回实验室进行室内称重处理,并在烘箱中以 60℃ 恒温烘至恒重后再称重,得到白刺和油蒿幼苗以下指标数据:构件生物量、地上生物量、地下生物量、总生物量和根冠比。

扫描的根系图像用 WinRHIZO TRON 根系分析软件(Regent Instruments Canada Incorporation, Canada)进行分析,获取根系的平均直径、长度、总体积、根表面积和根尖数等参数。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据整理分析,通过 SPSS 17.0 软件采用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验不同增雨处理或不同植物幼苗对各参数的影响,显著性检验采用 LSD 法,检验的显著性水平定为 0.05。用 SigmaPlot 10.0 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同增雨处理对白刺和油蒿幼苗地上部生长的影响

由图 1 可知,不同增雨处理下白刺和油蒿幼苗的株高、平均冠幅(冠幅长轴和短轴的均值)和基径存在一定差异。对白刺幼苗而言,增雨处理的白刺幼苗株高和平均冠幅显著高于 CK,并随着增雨量的增大而增大。与 CK 相比,增雨处理的白刺基径显著大于 CK,但 A、B、C、D 4 个增雨处理之间的基径并没有显著差异。对油蒿幼苗而言,增雨处理的油蒿株高、平均冠幅和基径均显著高于 CK,并随着增雨量的增加逐渐增大。其中,在株高方面,A、B、C、D 处理比 CK 分别高 7.4%、28.3%、30.7%和 61.4%;在平均冠幅方面,A、B、C、D 处理比 CK 分别高 11.7%、27.5%、34.7%和 53.8%;在基径方面,A、B、C、D 处理比 CK 分别高 26.4%、35.3%、65.1%和 100.3%。通过比较两种植物幼苗株高、平均冠幅和基径可以看出,在 CK、A 和 D 处理下,白刺幼苗株高显著小于油蒿,而在 B、C 处理下两种植物株高没有显著差异;在全部增雨处理下白刺平均冠幅均显著小于油蒿;而随着增雨量的增加,白刺基径由显著大于油蒿转变为无显著差异,直至在 D 处理下显著小于油蒿。

2.2 不同增雨处理对白刺和油蒿幼苗根系参数的影响

图 2 分析结果显示,增雨处理之间、白刺和油蒿之间在总根长、总表面积、平均直径、总体积、根尖数和分叉数均有显著差异($P < 0.05$)。对白刺幼苗而言,B 处理和 C 处理的根系参数均显著大于 CK、A 和 D 处理,且 B 和 C 处理之间没有显著差异(平均直径除外,其表现为先增加后下降的趋势)。对油蒿幼苗而言,随着增雨量的增加,油蒿总根长、总表面积、总体积、根尖数和分叉数呈现逐渐增加的趋势,而平均直径呈现先增加后降低的趋势,且在 B 处理下达到最大值。通过比较两种植物的根系参数变化特征可以看出,在不增雨情况下,两种植物的根系平均直径和根尖数存在显著差异,其他根系参数均无显著差异,白刺幼苗根系平均直径大于油蒿幼苗,而油蒿幼苗根尖数高于白刺。在增雨条件下,A、B、C 处理的白刺总根长、总表面积、平均直径、根尖数和分叉数显著大于油蒿;但在 D 处理下,白刺总根长、总表面积、平均直径、总体积、根尖数和分叉数均明显下降,与油蒿无显著差异,甚至小于油蒿。

2.3 不同增雨处理对白刺和油蒿幼苗生物量、根冠比和含水量的影响

图 3 显示,增雨处理对白刺和油蒿幼苗生物量、根冠比和含水量均有显著影响($P < 0.05$),但影响程度有所不同。对于白刺幼苗而言,随着增雨量的增加,其地上鲜重和干重呈现逐渐增加的趋势,根系鲜重和干重以及总鲜重和总干重则表现为先增加后降低的趋势,在 B 处理或 C 处理下达到最大值。对于油蒿而言,其地上鲜重和干重、根系鲜重和干重以及总鲜重和干重均随着增雨量的增加表现为逐渐增加的趋势,在 D 处理下达到最大值。从增雨对根冠比的影响来看,增雨处理显著降低了白刺幼苗的根冠比,而对油蒿幼苗根冠比的影响没有显著差异。

通过比较两种植物的生物量、根冠比和含水量差异可知,在各个处理下油蒿幼苗地上生物量均显著大于白刺幼苗,而白刺幼苗根冠比均显著大于油蒿幼苗;除 D 处理油蒿幼苗根系生物量显著大于白刺幼苗外,其他处理下油蒿幼苗根系生物量均小于白刺幼苗。此外,在 CK 和 D 处理下油蒿幼苗总生物量显著大于白刺幼

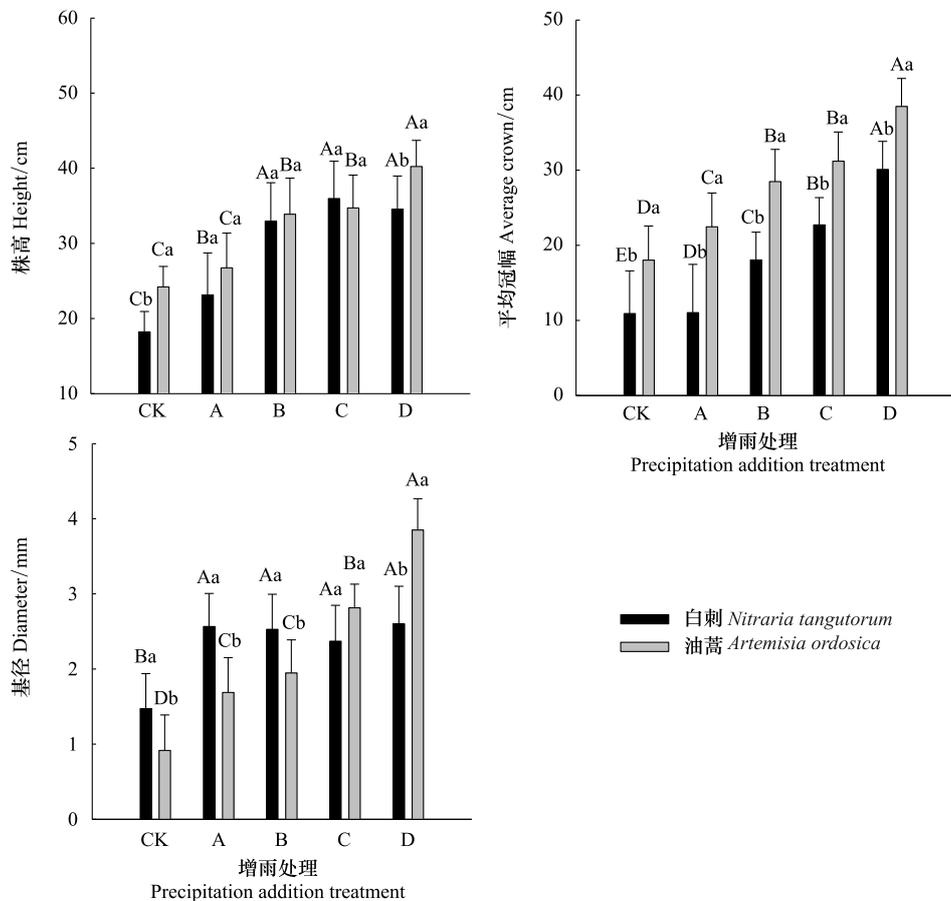


图1 不同增雨处理下白刺和油蒿地上部生长的变化特征

Fig.1 Dynamics characteristics of aboveground growth of *Nitraria tangutorum* and *Artemisia ordosica* seedlings under different precipitation addition treatments

不同大写字母表示同一植物在不同的增雨处理下,各生长参数差异显著($P < 0.05$);不同小写字母表示相同增雨处理下,两种植物生长参数差异显著($P < 0.05$);CK:对照,A:增雨 25%,B:增雨 50%,C:增雨 75%,D:增雨 100%

苗。在低水分条件下(CK和A处理),油蒿幼苗的含水量显著高于白刺,但在增雨量增加后,两种植物含水量没有显著差异。

2.4 不同增雨处理下白刺和油蒿幼苗根系径级分布差异

从图4白刺和油蒿幼苗根系在不同径级下的分布百分比可以看出,白刺和油蒿幼苗的根系主要分布在0—0.5 mm和0.5—1 mm内,和CK相比,在0—0.5 mm和0.5—1 mm径级内,增雨处理的根系分布占比相对较高。对于白刺幼苗根系而言,随着根系径级的增大,根系分布占比逐渐降低,其中<2 mm的细根在CK和增雨处理下的百分比分别为69.5%、77.5%、80.0%、79.6%和78.8%,B处理下<2 mm的细根比例最高。对于油蒿幼苗而言,根系中>4.5 mm的粗根比例较高,仅低于0—0.5 mm和0.5—1 mm的细根,并且随着增雨量增加而增大;此外,<2 mm的细根在CK和不同处理下的百分比分别为61.9%、63.3%、71.0%、68.4%和71.6%,由此可知D处理下<2 mm的细根比例最高。

3 讨论

3.1 模拟增雨对荒漠植物幼苗生长的影响

在干旱荒漠生态系统中,水是植物生长发育的限制因子,植物在幼苗阶段的生长及其对降雨变化的响应直接决定了植株的生长和存活能力^[20]。Bai等^[21]研究表明,降雨增加将显著促进植物的生长,特别是促进叶

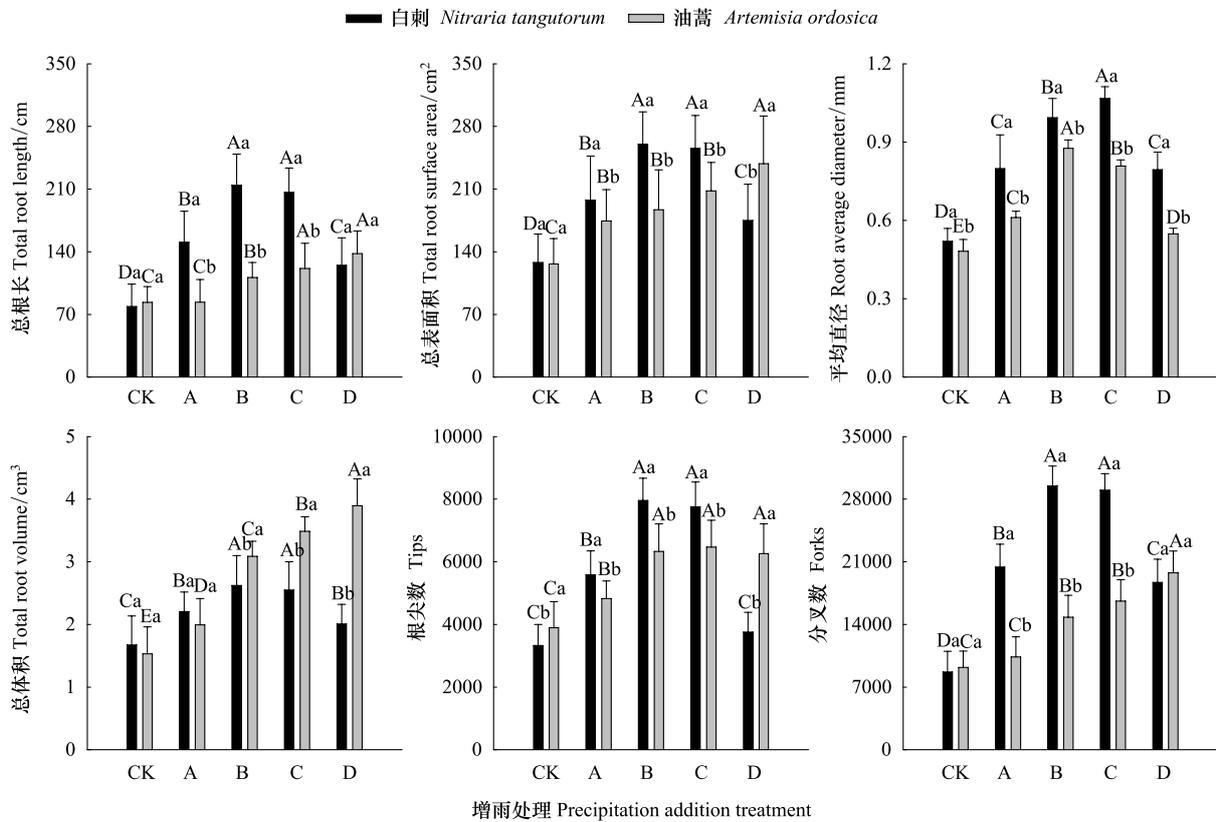


图 2 不同增雨处理下白刺和油蒿根系参数的变化特征

Fig.2 Dynamics characteristics of root parameter of *Nitraria tangutorum* and *Artemisia ordosica* seedlings under different precipitation addition treatments

不同大写字母表示同一植物在不同的增雨处理下,各生长参数差异显著 ($P < 0.05$)。不同小写字母表示相同增雨处理下,两种植物生长参数差异显著 ($P < 0.05$)

片及株高的生长;对不同水分条件下毛乌素沙地油蒿幼苗生长和形态的影响研究结果显示:随着水量的增加,油蒿幼苗生物量、株高逐渐增大^[12]。本研究表明,降雨量增加显著促进了两种荒漠植物幼苗地上部分生长,其株高、平均冠幅和基径均显著增加,这与上述研究结果一致。同时,当影响植物幼苗生长的其他环境因子(如温度、光照、土壤的理化性质)适宜时,油蒿地上部分生长比白刺更明显,说明增加降雨对油蒿幼苗生长的促进作用优于白刺。

本研究结果显示降雨量增加对白刺和油蒿幼苗生物量的积累存在差异。对于白刺幼苗而言,随着增雨量的增加,其根系鲜重和干重以及总鲜重和干重均表现为先增加后降低的趋势,在 B 处理或 C 处理下达到最大值。可见,降雨量增加对白刺的促进效应存在阈值,在自然降雨基础上增加 50%降雨量将更有利荒漠区白刺幼苗的生长,但在当地自然降雨条件下增加 100%降雨将不利于该区域白刺幼苗的生长。有研究指出过高强度降雨会抑制沙生植物的生长,降雨太多反而会使沙生植被出现不适应的现象^[22]。对于油蒿幼苗而言,其地上鲜重和干重、根系鲜重和干重以及总鲜重和干重均随着增雨量的增加表现为逐渐增加的趋势,在 D 处理下达到最大值。这说明在水分供应充足时,植物幼苗光合速率提高,保证植株在整体水平维持较高的碳获取能力,保持旺盛生长,从而提高地上和地下生物量的积累^[23]。

此外,为适应土壤水分的变化,两种植物幼苗的生物量的分配表现出明显的可塑性。本研究发现,降雨量增加显著降低了白刺幼苗的根冠比,表明降雨量的增加虽然同时促进了地上部和地下根系生长,但对地上部的促进作用更明显,增雨量越大,光合产物向地上部的分配越大。大量研究表明,水分变化可以显著影响植物

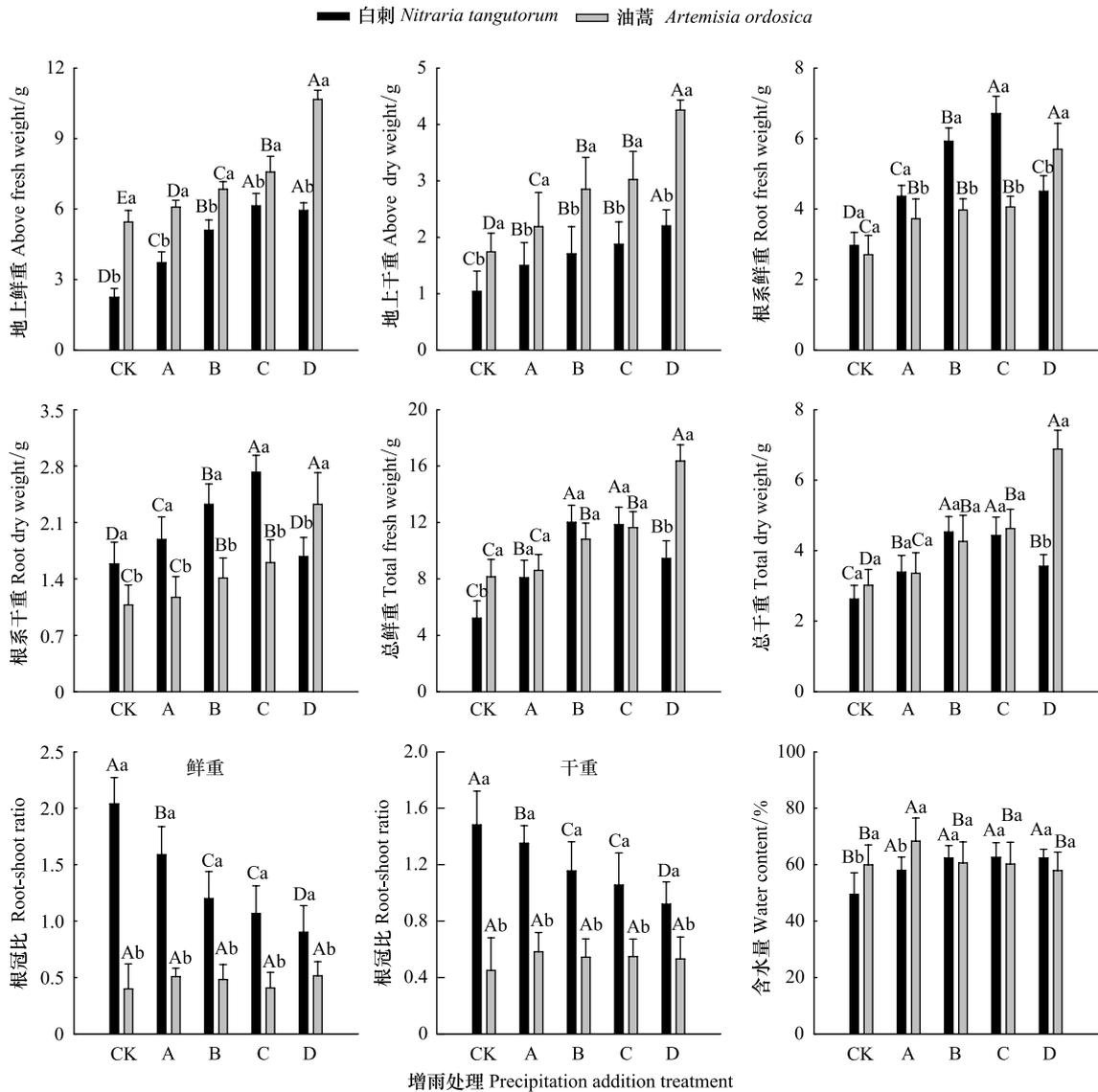


图3 不同增雨处理下白刺和油蒿生物量、根冠比和含水量的变化

Fig.3 Dynamics characteristics of biomass, root-shoot ratio and water content of *Nitraria tangutorum* and *Artemisia ordosica* seedlings under different precipitation addition treatments

FW:鲜重 Fresh weight; DW:干重 Dry weight; 不同大写字母表示同一植物在不同的增雨处理下,各生长参数差异显著($P < 0.05$);不同小写字母表示相同增雨处理下,两种植物生长参数差异显著($P < 0.05$)

的生物量分配,当供水不足时,植物优先生长地下部分;当供水充足时,植物会将更多的光合产物分配到地上部分^[24]。白刺通过分配更多的光合产物促进地上生长来有效应对降雨的增加,是为了有效利用环境资源以及实现最大化碳收获所采取的生存适应策略^[17]。而油蒿幼苗各处理之间根冠比没有显著差异,更多的体现出“协同生长”效应。说明油蒿植物幼苗在适应水分条件变化时能够同时协调地上部分与地下部分的生长,使光合产物向地上地下器官的分配同步增加,以满足能量和物质的平衡供给^[25],是其适应水分增加的重要策略。

3.2 模拟增雨对荒漠植物幼苗根系形态特征的影响

根系形态是描述植物根系随环境变化的重要指标^[26],土壤水分变化是影响植物根系形态特征的重要因素,当土壤水分发生变化时,植物根系最先感知并迅速产生信号传递到各个器官,进而改变自身形态和生理生

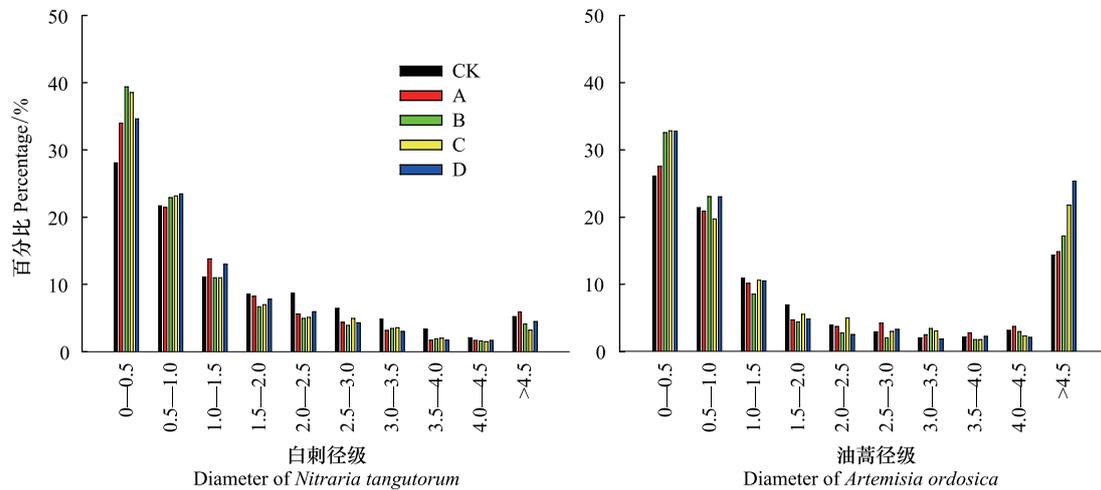


图 4 不同增雨处理下白刺和油蒿根系径级分布差异

Fig.4 Distribution difference of root diameter of *Nitraria tangutorum* and *Artemisia ordosica* seedlings under different precipitation addition treatments

化特性以适应变化的水分环境^[27]。有研究指出,降雨量增加 30%使红砂幼苗总根长、总表面积、总根体积、主根长和根系生物量显著增加^[16]。也有研究表明,降雨量增加使白刺幼苗根系表面积显著增加,其余各形态指标差异均不显著,且在低降雨量条件下主根长达到最大^[28]。通过对古尔班通古特沙漠梭梭群落在降水控制试验下的研究发现降水对细根生物量、生产、根数和单根密度均有显著影响^[29],徐贵青和李彦^[14]对荒漠灌木根系的水分响应特征研究表明:多枝怪柳细根对降水无响应,琵琶柴细根对降水响应极为显著。本研究表明,在 B 处理和 C 处理下白刺幼苗根系参数均显著大于 CK、A 和 D 处理,且 B 和 C 处理之间没有显著差异。而对油蒿幼苗而言,随着增雨量的增加,油蒿总根长、总表面积、总体积、根尖数和分叉数呈现逐渐增加的趋势,平均直径呈现先增加后降低的趋势,且在 B 处理下达到最大值。这说明植物根系形态并不是恒定的,当外界条件改变时,通过根系形态的可塑性调整来适应降雨量变化^[30]。

细根(直径<2 mm)在生态系统能量流动和物质循环中起着关键性的作用^[31]。其具有极大的吸收表面积,是植物吸收养分和水分的重要器官^[32]。相比湿润的生态系统,在干旱的立地条件下细根占植物总生物量的比例更高,植物将更多的碳分配到细根,以最大化利用有限的土壤水分^[33]。不同类型植物的细根对降水变化的响应程度不同^[34]。本研究结果显示,白刺幼苗细根在 CK 和增雨处理下的百分比分别为 69.5%、77.5%、80.0%、79.6%和 78.8%,即随着增雨量的增加呈现先增加后降低的趋势,B 处理下细根比例最高;而油蒿幼苗细根在 CK 和增雨处理下的百分比分别为 61.9%、63.3%、68.4%、71.0%和 71.6%,随着增雨量的增加而逐渐增加。Gill 等和 Jackson [35]在新墨西哥州奇瓦瓦沙漠研究发现,石碳酸灌木细根生物量随着夏季降水减少而下降,而 Bai 等^[36]在内蒙古温带草原的实验表明,和正常降水相比,增加降水使植物细根年际生产量提高 5.9%。在莫哈维荒漠生态系统的研究表明,增加夏季降水对植物细根生长没有显著影响,而增加冬季降水提高了细根生产力^[37]。本研究中两种植物幼苗细根所占比例随降雨变化的差异一定程度上反映了两种植物幼苗不同的水分吸收策略。

4 结论

在自然降雨条件下,降雨增多的降雨格局促进了幼苗生长,表明未来我国西北干旱区降雨量增加的降雨格局有利于荒漠植物幼苗更新过程。降雨量增加对两种植物幼苗生长、生物量积累、分配以及根系形态参数均产生显著影响,但影响程度有所不同。对油蒿幼苗而言,地上部和根系各参数均随着增雨量的增加呈现明显增加的趋势,表明其对生长季降雨量响应更敏感。而对白刺幼苗而言,降雨量增加的促进效应存在阈值,在

自然降雨基础上增加 50%降雨量(B 处理)将更有利荒漠区白刺幼苗的地上部和根系的生长,并且细根分布比例也最大。此外,降雨量增加显著降低了白刺幼苗的根冠比,可见白刺幼苗改变生物量分配模式是其适应水分增加的重要策略。

参考文献(References):

- [1] Stocker T, Plattner G K, Qin D H. IPCC climate change 2013: The physical science basis - findings and lessons learned//Proceedings of 2014 EGU General Assembly Conference. Vienna, Austria; EGU, 2014.
- [2] Gong D Y, Shi P J, Wang J A. Daily precipitation changes in the semi-arid region over northern China. *Journal of Arid Environments*, 2004, 59(4): 771-784.
- [3] Xu L G, Zhou H F, Liang C, Wu A Q. Multi-time scale variability of precipitation in the desert region of North China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(8): 1002-1011.
- [4] 李新乐, 陆占东, 丁波, 辛智鸣, 董雪, 马跃. 近 30 年乌兰布和沙漠东北边缘气候变化趋势及周期特征. *气候变化研究快报*, 2018, 7(2): 83-92.
- [5] 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. *BioScience*, 2003, 53(10): 941-952.
- [6] 张浩, 王新平, 张亚峰, 虎瑞, 潘颜霞, 陈宁. 干旱荒漠区不同生活型植物生长对降雨量变化的响应. *生态学杂志*, 2015, 34(7): 1847-1853.
- [7] 张荣, 单立山, 李毅, 段桂芳, 段雅楠, 张正中, Васильевич Ж. А. 人工模拟降雨格局变化对白刺幼苗生长的影响. *草业学报*, 2016, 25(1): 117-125.
- [8] 单立山, 李毅, 段桂芳, 张正中, 张荣, 种培芳. 模拟降雨变化对两种荒漠植物幼苗生长及生物量分配的影响. *干旱区地理*, 2016, 39(6): 1267-1274.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 肖春旺, 周广胜, 赵景柱. 不同水分条件对毛乌素沙地油蒿幼苗生长和形态的影响. *生态学报*, 2001, 21(12): 2136-2140.
- [13] 白蕾, 单立山, 李毅, 张正中, 种培芳. 降雨格局变化对红砂幼苗根系生长和生物量分配的影响. *西北植物学报*, 2017, 37(1): 163-170.
- [14] 徐贵青, 李彦. 共生条件下三种荒漠灌木的根系分布特征及其对降水的响应. *生态学报*, 2009, 29(1): 130-137.
- [15] Chou W W, Silver W L, Jackson R D, Thompson A W, Allen-Diaz B. The sensitivity of annual grassland carbon cycling to the quantity and timing of rainfall. *Global Change Biology*, 2008, 14(6): 1382-1394.
- [16] 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): 6457-6464.
- [17] 何季, 吴波, 鲍芳, 李嘉竹, 姚斌, 叶静芸, 刘建康, 辛智鸣. 人工模拟降雨对乌兰布和沙漠白刺生物量分配的影响. *林业科学*, 2016, 52(5): 81-91.
- [18] 辛智鸣, 黄尧茹, 章尧想, 郝玉光, 葛根巴图, 马迎宾, 孔维春, 窦利军. 乌兰布和沙漠白刺与沙蒿群落多样性及其对降水的响应. *河南农业科学*, 2015, 44(1): 117-120, 142-142.
- [19] 张毅. 三种荒漠植物在不同水分条件下的生存适应研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2004.
- [20] 郑伟. 植物幼苗生长对策研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2011.
- [21] Bai Y F, Wu J G, Xing Q, Pan Q M, Huang J H, Yang D L, Han X G. Primary production and rain use efficiency across a precipitation gradient on the Mongolia Plateau. *Ecology*, 2008, 89(8): 2140-2153.
- [22] 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.
- [23] Ackerly D D, Bazzaz F A. Leaf dynamics, self-shading and carbon gain in seedlings of a tropical pioneer tree. *Oecologia*, 1995, 101(3): 289-298.
- [24] 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.
- [25] 魏雅芬, 郭柯, 陈吉泉. 降雨格局对库布齐沙漠土壤水分的补充效应. *植物生态学报*, 2008, 32(6): 1346-1355.
- [26] Jackson M. Hormones from roots as signals for the shoots of stressed plants. *Trends in Plant Science*, 1997, 2(1): 22-28.
- [27] 朱维琴, 吴良欢, 陶勤南. 作物根系对于干旱胁迫逆境的适应性研究进展. *土壤与环境*, 2002, 11(4): 430-433.
- [28] 单立山, 李毅, 张荣, 张正中, 种培芳. 降雨格局变化对白刺幼苗根系形态特征的影响. *生态学报*, 2017, 37(21): 7324-7332.
- [29] Zhao H M, Huang G, Li Y, Ma J, Sheng J D, Jia H T, Li C J. Effects of increased summer precipitation and nitrogen addition on root

- decomposition in a temperate desert. *PLoS One*, 2015, 10(11): e0142380.
- [30] Xu H, Li Y, Xu G Q, Zou T. Ecophysiological response and morphological adjustment of two Central Asian desert shrubs towards variation in summer precipitation. *Plant, Cell & Environment*, 2007, 30(4): 399-409.
- [31] 郭大立. 植物根系: 结构、功能及在生态系统物质循环中的地位//第三届现代生态学讲座暨国际学术研讨会论文集. 北京: 国家自然科学基金委员会, 2005.
- [32] 王政权, 郭大立. 根系生态学. *植物生态学报*, 2008, 32(6): 1213-1216.
- [33] Hui D F, Jackson R B. Geographical and interannual variability in biomass partitioning in grassland ecosystems: a synthesis of field data. *New Phytologist*, 2006, 169(1): 85-93.
- [34] 张鑫, 邢亚娟, 闫国永, 王庆贵. 细根对降水变化响应的 meta 分析. *植物生态学报*, 2018, 42(2): 164-172.
- [35] Gill R A, Jackson R B. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist*, 2000, 147(1): 13-31.
- [36] Bai W M, Wan S Q, Niu S L, Liu W X, Chen Q S, Wang Q B, Zhang W H, Han X G, Li L H. Increased temperature and precipitation interact to affect root production, mortality, and turnover in a temperate steppe: implications for ecosystem C cycling. *Global Change Biology*, 2010, 16(4): 1306-1316.
- [37] Verburg P S J, Young A C, Stevenson B A, Glanzmann I, Arnone III J A, Marion G M, Holmes C, Nowak R S. Do increased summer precipitation and N deposition alter fine root dynamics in a Mojave Desert ecosystem? *Global Change Biology*, 2013, 19(3): 948-956.