

# 模拟降水变化和氮添加对红砂幼苗生物量分配的影响

李全刚,单立山\*,解婷婷,杨洁,王红永,李瑞

(甘肃农业大学林学院,甘肃 兰州 730070)

**摘要:**【目的】研究植物生长和生物量分配对不同水氮供应的响应特征,对揭示不同水氮添加之间的耦合关系和寻求最优的水肥供应模式具有重要的意义。【方法】本研究以红砂幼苗为试验对象,测定了不同降水量(降水量减少30%、正常降水量、降水量增加30%)和氮添加[(无氮添加(纯N 0 g/(m<sup>2</sup>·a)),低氮添加(纯N 4.6 g/(m<sup>2</sup>·a)),中氮添加(纯N 9.2 g/(m<sup>2</sup>·a)),高氮添加(纯N 13.8 g/(m<sup>2</sup>·a))]条件下红砂幼苗生长及各器官干物质量。【结果】降水减少30%时,在中、低氮添加下,红砂幼苗株高、地上地下生物量和叶重比、叶根重比、源汇重比均会随施氮量增加而增加,而在高氮添加下上述指标均受到抑制;在高氮添加下,红砂幼苗叶重比、叶根重比和源汇重比均随水分增加而增加,但根冠比呈现相反趋势。【结论】红砂幼苗对水氮耦合效应表现出较强的可塑性,且能够通过不同的水肥供应调整株高和基径的生长以及生物量分配。

**关键词:**降水变化;氮沉降;生物量分配;红砂幼苗

**中图分类号:**S793.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2024)01-0029-09

**DOI:**10.13817/j.cnki.cycp.2024.01.004



近年来,由于人们对化石燃料的过度开发与使用,加快了全球气候变化的进程<sup>[1]</sup>。气候变化促进了极端天气事件发生频率,使全球降水格局发生明显变化<sup>[2]</sup>。据预测,我国西北干旱与半干旱地区季节性降水有显著增加趋势<sup>[3]</sup>,主要表现为降水季节性波动更加明显、年际降水量增多、夏季单次降水量大且时间延长、冬季降水减少<sup>[4-5]</sup>。随着降水格局的改变,我国西北干旱与半干旱地区的荒漠植物在水分利用、生理特性、形态特征、环境适应性等方面也会发生相应的改变<sup>[6]</sup>。由于工业用氮和农业氮肥的不合理使用,导致大气中氮含量不断增加,氮沉降事件频繁发生<sup>[7-8]</sup>。

过度的氮沉降会导致土壤酸化,改变土壤养分,影响植物生长发育<sup>[9]</sup>。我国西北干旱与半干旱地区降水量和土壤氮含量较低成为限制荒漠植物生长发育的主要因子<sup>[10]</sup>。因此,基于降水量变化和氮添加来探讨荒漠植物生长和生物量分配对干旱区生态环境改善与建设具有重要的作用。

生物量作为生态系统物质循环的来源和能量流动的基础<sup>[11]</sup>,对研究植物的生长具有重要的作用<sup>[12]</sup>。有研究表明,水分增加能促进植物生长和生物量积累,例如胡云峰等<sup>[13]</sup>通过研究发现随着降水量的增加,植物地上部分生物量会得到显著增加,张金凤等<sup>[14]</sup>通过研究发现水分添加可以使草地地上生物量提高17%~37%。但也有研究发现,水分添加会降低植物生物量<sup>[15]</sup>。如:白雪等<sup>[16]</sup>发现在降水量较多的年份,羊草种群的生物量呈下降趋势。氮作为植物有机体中的重要物质,是生理代谢的催化剂,对植物生物量分配有很大影响,有研究发现少量的氮增加能够大大促进涩茅(*Malcolmia africana*)和钩刺雾冰藜(*Bassia hyssopifolia*)等草本植物生长和生物量的增

**收稿日期:**2022-08-24;**修回日期:**2022-09-23

**基金项目:**国家自然科学基金(32160253,U23A2061);甘肃省重点研发计划项目(22YF7EA117);甘肃省科技重大专项计划(22ZD6FA052)

**作者简介:**李全刚(1992-),男,甘肃庆阳人,硕士研究生。

E-mail:1449386455@qq.com

\*通信作者。E-mail:shanls@gsau.edu.cn

加<sup>[17-18]</sup>。但也有一些研究与之相反,于立忠等<sup>[19]</sup>发现随着土壤中氮的增加,光合产物在细根中的分布比例降低,导致细根生物量降低。大部分研究发现水分和氮素共同添加能促进植物生物量的积累,而单一的水或氮添加有利于地上生物量积累,在水氮共同添加下,水分对氮肥的释放效率具有正向影响,进而导致地上生物量显著增加<sup>[20]</sup>,同时增水和适宜的氮添加能促进荒漠植物各器官生长和干重积累<sup>[21]</sup>。然而,以往关于水氮添加对植物生物量分配已有较多的研究,但多集中于森林和草地系统<sup>[22]</sup>,而对于灌木特别是荒漠典型灌木的生物量分配及其变化关系的研究还较为缺乏<sup>[23]</sup>,因此,探究水氮添加对荒漠植物生物量的影响、不同水肥供应的响应机制和寻求最优的水肥供应模式具有重要的意义。

红砂(*Reaumuria soongorica*)是我国西北干旱荒漠区重要的超旱生小灌木,对维持荒漠脆弱生态系统的稳定性及保护荒漠生态环境具有重要作用<sup>[24]</sup>。为探讨水氮因子对红砂幼苗生长及生物量分配的影响机制,近年来在人工控制的试验条件下,对红砂生物量变化的研究逐渐增多<sup>[25]</sup>,而关于水氮添加对于植物生长及生物量分配也有大量的研究,但大多针对农作物和一年生草本植物,对于荒漠植物和多年生灌木的研究较为缺乏<sup>[26-27]</sup>。为此,本研究通过水氮添加来测定红砂幼苗生长和生物量分配,试图揭示以下问题:1)水氮添加对红砂幼苗基径和株高有怎样的影响;2)水氮添加对于红砂幼苗不同器官和地上地下生物量分配的影响如何。通过对以上2个问题的回答,有利于揭示红砂幼苗生物量分配和对于干旱环境的适应性策略,为我国干旱与半干旱区红砂群落的构建、恢复和保护提供理论参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料来源与培养

试验材料来源于甘肃省白银市景泰县临近中兰铁路干线的山前戈壁滩,地理位置(103°33′~104°43′ E, 36°43′~37°38′ N),海拔1 627 m。在征得当地相关部门同意后,于2019年4月初,前往景泰县将采样地自然生长的红砂幼苗以平均样株大小为标准,随机选取120株大小均一(平均株高和冠幅均为(10±0.2) cm)的一年生红砂幼苗进行人工整株挖掘。试验

材料采集结束后,对于挖掘产生的土坑用土掩盖恢复原状,并将材料及时带回甘肃农业大学校内实验基地进行人工栽植。该实验基地平整开放,无遮挡,通风条件良好,在口径34.5 cm,底径21 cm,高34 cm的花盆中填入黄土、蛭石、珍珠岩按一定比例混合均匀的改良土13 kg,取大小均匀的红砂幼苗移栽到花盆中,每盆一株,定植后定期用去离子水进行浇灌。为防止土壤随灌溉水流失,在花盆底部放置一个大托盘,待幼苗经过2月缓苗之后,选取苗形大小均匀的幼苗进行控水和施氮试验。

### 1.2 试验设计

本试验采用不同水分和氮素添加双重因素进行处理,通过中国气象局官方网站统计采样地1953—2013年约60年的气象资料,该红砂幼苗采集区60年平均降水量约为109 mm(W),降水量最大年份降水量为142 mm,比年均降水量高30%左右(W<sub>+</sub>),降水量最低年份降水量为76 mm,比年均降水量低30%左右(W<sub>-</sub>)。本试验为模拟红砂自然分布区降水特征且为方便控制与计算,将年均降水量控制为110 mm,在此基础上增加或减少30%,设置降水梯度分别为W<sub>+</sub>和W<sub>-</sub>。在模拟试验中分别计算出6—10月这5个月中每个月的降水量占全年降水量的比例,然后计算出每个月的降水量,根据花盆大小将降水量换算成每个处理相应浇水量(表1),灌水量换算方法:在直径为20 cm的雨量器内,每降水31.4 mm相当于自然降水1 mm,计算公式为:

$$3.14 \times 10 \text{ cm}^2 / 31.4 \text{ cm}^3 = S/A$$

式中:A表示降水量,S表示降水面积,即在面积为S的地面上降水A ml相当于1 mm降水<sup>[28]</sup>。

氮素添加主要以西北荒漠区大气氮沉降水平为依据<sup>[29]</sup>,设置4个水平组,分别为:不添加任何氮素的对照组N<sub>0</sub>,添加纯N 0 g/(m<sup>2</sup>·a),低氮水平组N<sub>1</sub>,添加纯N 4.6 g/(m<sup>2</sup>·a),中氮水平组N<sub>2</sub>,添加纯N 9.2 g/(m<sup>2</sup>·a),高氮水平组N<sub>3</sub>,添加纯N 13.8 g/(m<sup>2</sup>·a)<sup>[30]</sup>。本试验共设置12个处理,每个处理设置9个重复,共计108盆植株。试验选择含氮量较高的尿素作为氮源<sup>[29]</sup>,N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>施尿素的量分别为0.886 5、1.773 0、2.659 5 g,将每个重复所需的尿素和去离子水换算后装入喷壶,待尿素充分溶解后依次喷洒植物。在控制期间,每5 d浇1次水<sup>[30]</sup>,浇水时间在当日19:00左右,

表1 降水量占比及浇水量换算

Table 1 Proportion of precipitation and conversion of watering amount

时间	降水量占比/%	每月浇水量/mL	每次浇水量/mL	W <sub>+</sub> /mL	W/mL	W <sub>-</sub> /mL
六月	15.46	1 530	255	332	255	179
七月	19.61	1 941	324	421	324	226
八月	22.00	2 178	363	472	363	254
九月	15.46	1 530	255	332	255	179
十月	6.10	603	101	131	101	70

期间注意除草和预防病虫害。

### 1.3 生长及生长量的测算

在进行水氮控制处理前和每次取样之前分别测量盆中各个红砂植株的株高和基径。红砂株高采用刻度清晰的钢卷尺测量,精度为0.1 cm。使用精确度为0.01 mm的游标卡尺测量基径。植株各个部分(叶、茎、粗根、细根)鲜重和干重分别用普通分析天平测定,精度为0.000 1 g。相关指标计算方法:叶重比=叶生物量/总生物量,根冠比=根生物量/地上生物量,叶根重比=叶生物量/根生物量,源汇重比=叶生物量/非叶片总生物量<sup>[31]</sup>。

### 1.4 试验样品采集与处理

于当年7月、9月、11月月底,分3次采样。将带盆的红砂植株倾斜,用手轻轻拍打盆壁,将土块和红砂一起取出。用铁铲轻拍红砂根部泥块,使之与根分开,用地膜或保鲜膜缠住植株根系,防止根系失水,尽快带回实验室。将植株置于盆中,用超纯净水洗掉植株表面泥土和杂物,然后将植株外表多余水分用吸水纸除去,将植株各个器官(叶、茎、粗根、细根)取下称取鲜重。最后将植株各个部分放入120℃烘箱中杀青30 min,烘干至恒重,对各部分称取干重,并记录数值。

### 1.5 数据处理与分析

试验数据计算与整理采用Excel 2010,制表采用

Word 2010,数据分析采用SPSS Statistics 20.0,绘图采用Origin 2021绘制,图表中出现数值均为平均值±标准误,降水变化和氮添加对红砂幼苗各个器官生长及生物量分配的影响均采用双因素方差分析法。

## 2 结果与分析

### 2.1 水氮添加下红砂幼苗基径与株高的变化特征

双因素方差分析表明,水分对红砂幼苗株高存在显著影响( $P<0.05$ )(表2)。在氮添加条件下( $N_1-N_3$ ),红砂幼苗基径随水分增加呈增加趋势,且 $N_3$ 条件下 $W_-$ 基径显著小于 $W$ 和 $W_+$ ,分别减少了41.45%和40.91%(图1)。在 $W_-$ 处理下,红砂幼苗基径随施氮量的增加总体呈降低趋势,与 $N_0$ 相比, $N_1$ 和 $N_3$ 显著降低基径长度,分别降低18.08%和28.05%。红砂幼苗各氮处理下平均株高随水分的增加总体呈增加的趋势,与 $W_-$ 相比, $W$ 和 $W_+$ 平均分别增加8.41%和13.60%。在 $N_0$ 和 $N_3$ 处理下,随水分的增加株高呈增加的趋势,且与 $W_-$ 相比, $W$ 和 $W_+$ 株高分别显著增加了40.35%、47.37%和27.94%、32.35%。 $W_-$ 处理下,红砂幼苗株高随氮添加呈现出先升高后降低的趋势,在 $N_2$ 条件下达到最大值,与 $N_0$ 相比, $N_1$ 和 $N_2$ 分别显著增加54.38%和62.81%;而 $N_3$ 株高的增加受到抑制,与 $N_2$ 相比,显著降低26.72%。

表2 水氮添加下红砂幼苗基径与株高的双因素方差分析

Table 2 Two-way variance analysis of base diameter and plant height of *R. soongorica* seedlings under water and nitrogen supplementation

指标	水分		氮处理	
	F	P	F	P
基径	0.684	0.508	0.175	0.913
株高	3.451	0.037	1.458	0.233

注: $P<0.05$ ,表示相关性显著; $P<0.01$ ,表示相关性极显著。

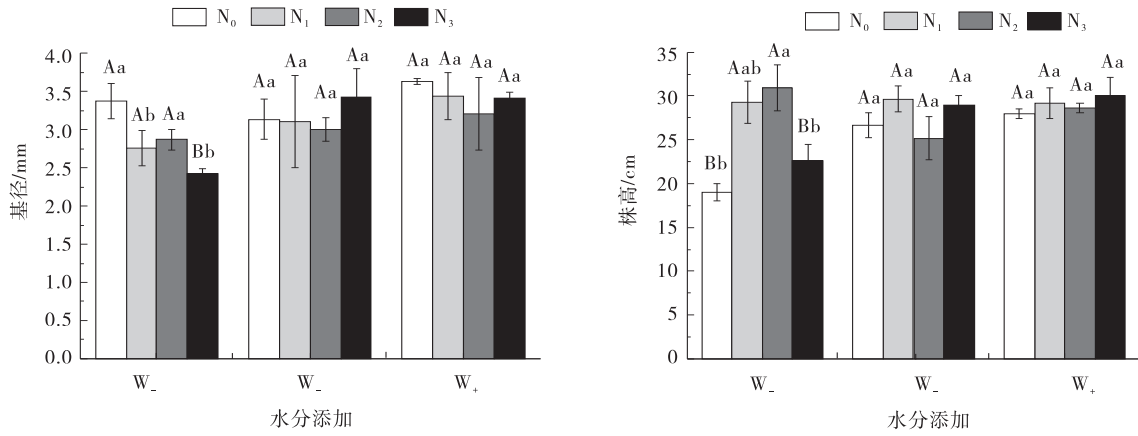


图1 水氮添加下红砂幼苗基径与株高的动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of base diameter and plant height of *R. soongorica* seedlings

注:不同大写字母表示同一氮素水平下不同水分处理间差异显著( $P < 0.05$ ),不同小写字母表示同一水分处理下不同氮素水平间差异显著( $P < 0.05$ ),下同。

2.2 水氮添加下红砂幼苗地上和地下生物量的变化特征

双因素方差分析表明,水分对红砂幼苗地上和地下生物量具有极显著影响( $P < 0.01$ )(表3)。在低氮( $N_0$ 和 $N_1$ )添加下,红砂幼苗地上和地下生物量随水分的增加均呈现逐渐增加的趋势, $W_+$ 处理下幼苗地上和地下生物量较 $W_-$ 处理分别增加了211.92%、

262.96%和109.57%、105.25%(图2)。中氮( $N_2$ )处理下,红砂幼苗地上和地下生物量随水分增加呈现出先降低后增加的趋势, $W_+$ 条件下达到最大值,与 $W_-$ 相比, $W_+$ 处理下地上和地下生物量分别显著增加了52.68%和31.13%,且红砂幼苗地上和地下生物量在 $N_2W_+$ 处理下达到最大值,分别为2.652和2.140 g。

表3 水氮添加对红砂幼苗地上和地下生物量的双因素方差分析

Table 3 Two-factor analysis of variance on aboveground and belowground biomass of *R. soongorica* seedlings with water and nitrogen supplementation

指标	水分		氮处理	
	F	P	F	P
地上生物量	7.596	0.001	0.938	0.427
地下生物量	10.613	<0.001	0.849	0.471

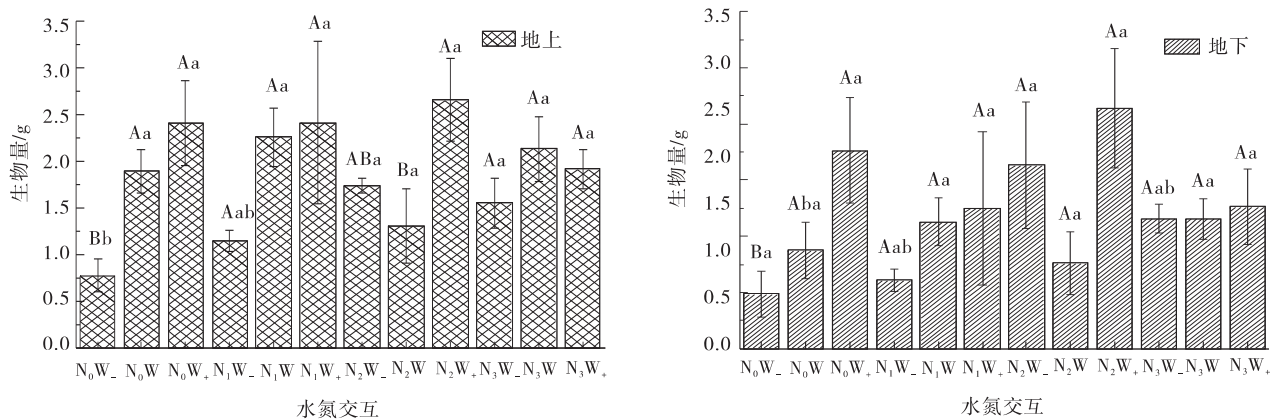


图2 水氮添加下红砂幼苗地上地下生物量干重变化

Fig. 2 Changes of aboveground and belowground biomass of *R. soongorica* seedlings under water and nitrogen supplementation

2.3 水氮添加下红砂幼苗叶重比、根冠比、叶根重比、源汇重比的变化

双因素方差分析表明,氮添加对红砂幼苗叶重比和源汇重比具有极显著影响( $P < 0.01$ ),对根冠比、叶根重比具有显著影响( $P < 0.05$ )(表 4)。在  $N_0$  处理下,红砂幼苗叶根重比、源汇重比随水分增加呈下降趋势,与  $W_-$  相比, $W$  和  $W_+$  处理分别下降 1.64%、11.83% 和 3.79%、19.28%。 $N_1$  处理下,幼苗叶重比、根冠比、叶根重比、源汇重比均随水分增加呈下降趋势,与  $W_-$  相比, $W$  和  $W_+$  分别下降 7.35%、6.11%、

3.60%、11.87% 和 24.75%、7.06%、11.21%、30.25%。在  $N_2$  和  $N_3$  处理下,幼苗叶重比、叶根重比、源汇重比均随水分增加呈先增加后降低趋势,均在  $W$  水分条件下达到最大值,而根冠比恰好相反。在  $W_-$  处理下,红砂幼苗叶重比和源汇重比随氮添加呈现先升高后降低的变化趋势,且均在  $N_1$  条件下达到最大值,与  $N_1$  相比,各处理下分别减少了 9.68%、24.75%、33.82% 和 13.84%、32.71%、45.15%。在  $W$  处理下,幼苗根冠比随氮添加呈现增加的变化趋势,其余各处理较  $N_0$  分别增加 8.61%、19.21% 和 28.92%。

表 4 水氮添加下红砂幼苗叶重比、根冠比、叶根重比、源汇重比的双因素方差分析

Table 4 Two-factor ANOVA analysis of leaf weight ratio, root/shoot ratio, leaf/root weight ratio, source-sink weight ratio of *R. soongorica* seedlings under water and nitrogen supplementation

指标	水分		氮处理	
	F	P	F	P
叶重比	1.089	0.342	5.187	0.003
根冠比	2.111	0.129	3.168	0.029
叶根重比	1.453	0.241	3.125	0.031
源汇重比	1.118	0.333	6.003	0.001

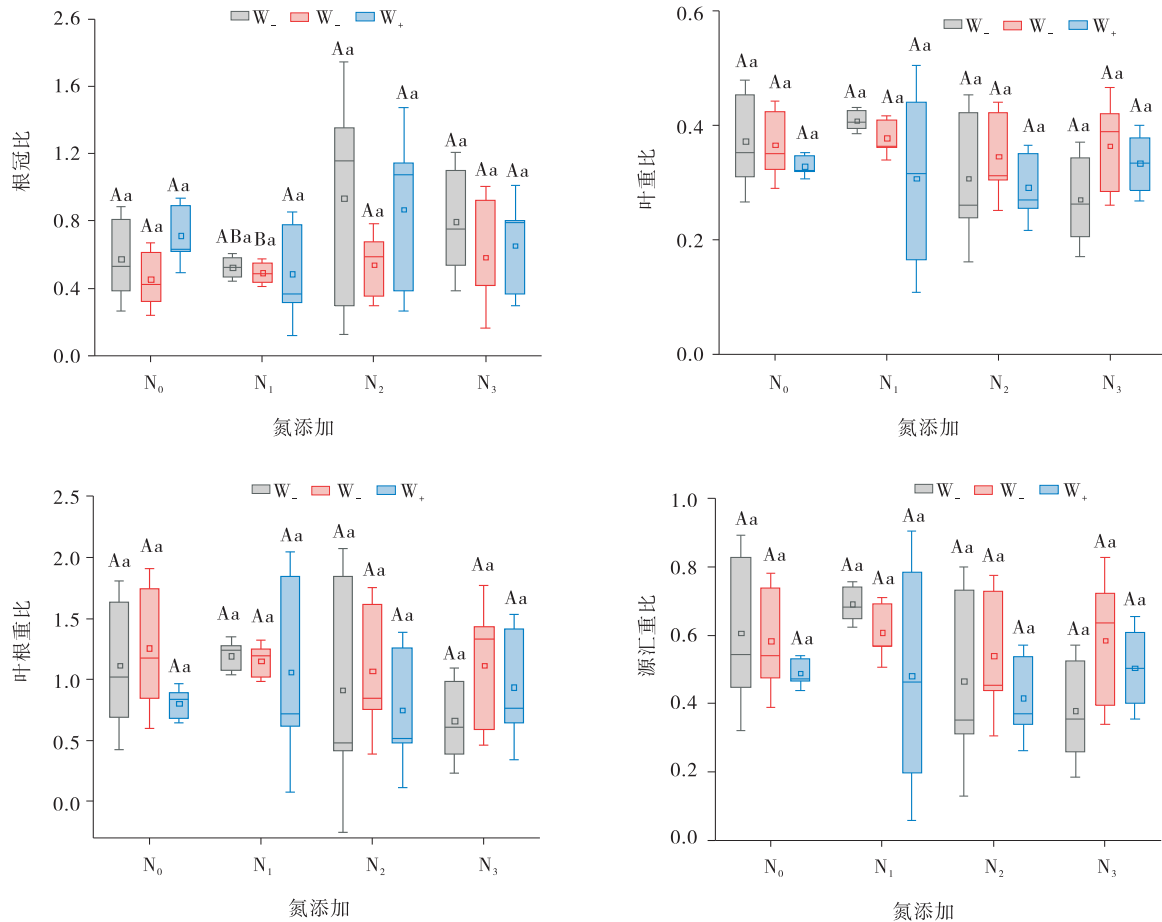


图 3 水氮添加下红砂幼苗叶重比、根冠比、叶根重比、源汇重比的变化

Fig. 3 Changes of leaf weight ratio, root/shoot ratio, leaf/root weight ratio and source-sink weight ratio of *R. soongorica* seedlings under water and nitrogen supplementation

### 3 讨论

#### 3.1 水氮添加对红砂幼苗基径与株高生长的影响

基径和株高是反映植株个体生长状况的重要指标,其生长量不仅反映了植物阶段性生长状况,也反映了植物个体对所处环境变化的适应策略<sup>[32-33]</sup>。有研究表明,植物基径和株高的生长受水肥等多重因素影响<sup>[34]</sup>,延长降水时间、增加降水量和降水频率均可以显著提高植物基径和株高生长<sup>[35]</sup>。本研究发现,红砂幼苗株高随水分增加呈增加趋势,这与我国西北干旱、半干旱区红砂、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)等荒漠植物的研究结果相同<sup>[36-38]</sup>,表明水分增加改善了土壤水分条件,能有效促进红砂幼苗个体生长。这可能是由于随着水分增加,提高了土壤含水率,土壤中水分被红砂幼苗根系吸收后运输到植物体内,为植物细胞生长和分裂提供了动力,加快了植物体内细胞的生长和分裂,进而促进了红砂幼苗基径和株高的生长<sup>[35]</sup>。在高氮添加下,红砂幼苗基径和株高的生长会随水分减少而降低,这与李永洁等<sup>[39]</sup>和崔豫川等<sup>[40]</sup>的研究结果一致,说明水分减少加剧了土壤干旱程度,形成干旱胁迫,不利于幼苗生长,而高氮添加会抑制幼苗生长。这可能是由于水分减少和高氮添加使幼苗体内原生质由溶胶状态变成凝胶状态,致使基径和株高生长减缓甚至停滞,进而影响幼苗株高和基径的生长<sup>[41]</sup>。

#### 3.2 水氮添加对红砂幼苗地上地下生物量的影响

植物的初级生产和光合产物在地上地下的分配策略均可以通过地上地下生物量来反映<sup>[42-43]</sup>。有研究表明:适度水分或轻度水分胁迫时施氮量越高,越能促进地上和地下生物量的积累<sup>[44]</sup>。本研究发现,在中、低氮添加条件下,红砂幼苗地上和地下生物量随水分的增加总体呈增加的变化趋势,这与张中信等<sup>[42]</sup>和李化山<sup>[18]</sup>的研究结果类似,说明随着水分的改善有利于红砂幼苗地上地下器官的生长。这可能是由于随着水分增加,土壤的水分条件得到改善,细根是植物从土壤中吸收水分和养分的主要器官,大量的碳被分配到地下促进了细根的系统构建,进而提高了地下生物量 and 水分吸收运输的效率,水分和养分运输到地上部分,进一步促进了地上和地下生物量的累积<sup>[45]</sup>。本研究还发现,降水减少30%,红砂幼苗地上和地下

生物量随施氮量的增加呈先增加后降低的变化趋势,且在中氮处理下达到最大,在高氮处理下受到抑制。这与宗宁等<sup>[46]</sup>和祁瑜等<sup>[47]</sup>通过施氮对高原草甸和克氏针茅(*Stipa krylovii*)的研究得出的结论一致,说明在干旱胁迫下,适量的氮添加(低氮和中氮)能促进红砂幼苗生物量积累,而高氮抑制其生物量积累,这是因为在干旱胁迫下水氮之间存在一种耦合效应,生物量对氮添加较为敏感,氮添加缓解了幼苗对氮素的需求,进而促进了幼苗光合作用和养分运输,幼苗将养分输送到地上部分,促进了地上生物量的累积<sup>[48]</sup>。但低浓度氮添加不能满足地下部分的需求,且红砂幼苗地上部分对氮的敏感度高于地下部分,因此地上部分生物量增长显著高于地下部分<sup>[49]</sup>。

#### 3.3 水氮添加对红砂幼苗生物量分配的影响

衡量植物生产力的重要指标是生物量,而叶重比、根冠比、叶根重比、源汇重比是衡量单株植物生物量分配的重要指标,对研究植物生物量分配和对环境变化的响应具有重要的意义<sup>[50]</sup>。本研究发现,在中高氮处理下,红砂幼苗叶重比、叶根重比和源汇重比均随水分的增加呈现出先增加后降低的变化趋势,而根冠比则相反,这与张鹏等<sup>[31]</sup>对混生红砂和珍珠(*Salsola passerina*)生物量及分配的研究结果相似。这表明在水分充足的情况下,氮添加使植物倾向于以牺牲地下部分为代价增加地上部分生物量,但高水高氮添加能促进红砂幼苗根系生长,这可能是由于红砂幼苗由对地下养分的竞争逐渐转化为对地上光资源的竞争,随着N添加量增大,根系的养分吸收能力逐渐过剩,将更多的资源分配给地上部分,植株变得高大,以利于获得更多的光照<sup>[51]</sup>。本研究还发现,在干旱胁迫下,红砂幼苗叶重比、叶根重比、源汇重比随氮添加呈现出先升高后降低的趋势,这与陆文涛等<sup>[50]</sup>的研究结果一致,说明干旱胁迫下,高氮不利于红砂幼苗生长和生物量积累,这可能是由于干旱胁迫下,水氮之间的耦合效应,在水分不足的情况下,适量氮素能够为植物生长提供动力,起到以肥调水的作用,但当氮素过多,会抑制植物根系吸水,造成植物生长减缓或停止<sup>[52]</sup>。

### 4 结论

综上所述,水分和氮素添加能显著改变红砂幼苗

生物量分配。当干旱胁迫加剧时,红砂幼苗株高、地上地下生物量和叶重比、叶根重比、源汇重比均会随施氮量增加而增加,且均在高氮添加下受到抑制。而基径会随施氮量增加而总体降低。在中低氮添加下,红砂幼苗基径、株高和地上地下生物量会随水分增加而增加。在高氮添加下,红砂幼苗叶重比、叶根重比和源汇重比均会随水分增加而增加,但水分过量添加会抑制其生长,而根冠比呈现相反趋势。通过模拟降水和氮添加对红砂幼苗生物量分配的研究表明,红砂幼苗对水氮耦合效应表现出较强的可塑性,在适宜水分和养分添加下生长良好。

#### 参考文献:

- [1] 应对气候变化,发达国家不能欠债不还[J]. 科学大观园, 2021(23):60.
- [2] 陈建国,杨扬,孙航. 高山植物对全球气候变暖的响应研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(3): 435-446.
- [3] Xu L G, Zhou H F, Liang C, *et al.* Spatial and temporal variability of annual and seasonal precipitation over the desert region of China during 1951-2005[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(20): 2947-2959
- [4] Meehl G A, Arblaster J M, Tebaldi C. Understanding future patterns of increased precipitation intensity in climate model simulations [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(18):109-127.
- [5] 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* [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [6] 白亚梅. 降水变化和氮添加对红砂幼苗根系形态特征及生理指标的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2020.
- [7] GALLOWAY J N, TOWNSEND A R, ERISMAN J W, *et al.* Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions [J]. *Science*, 2008, 320(5878): 889-892.
- [8] ZHU J X Z, WANG Q F, HE N P, *et al.* Imbalance atmospheric nitrogen and phosphorus depositions in china: Implications for nutrient limitation [J]. *Journal of Geophysical Research—Bio—geosciences*, 2016, 121(6):1605-1616.
- [9] 王昭. 氮沉降对鼎湖山常绿阔叶林土壤生态的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2022, 53(3): 421-428.
- [10] 郭蕊. 水、氮控制对荒漠草原植物群落特征及CO<sub>2</sub>通量的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2016.
- [11] 阮友维. 南亚热带过熟马尾松人工纯林及其混交林的生物量和碳储量特征[D]. 南宁:广西大学, 2019.
- [12] Pilon R, Picon-Cochard C, Bloor J M G, *et al.* Grassland root demography responses to multiple climate change drivers depend on root morphology [J]. *Plant and Soil*, 2012, 364:395-408.
- [13] 胡云锋,巴图娜存,毕力格吉夫,等. 乌兰巴托—锡林浩特样带草地植被特征与水热因子的关系[J]. *生态学报*, 2015, 35(10):3258-3266.
- [14] 张金凤,徐雨晴. 水氮添加对内蒙古多伦县退耕还草地生物量、生产力及其分配的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(2):192-200.
- [15] 李晓雪,贺燕燕,杨文航,等. 不同水分处理和密度配置对牛鞭草与狗牙根生长与种间竞争的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(9):3046-3058.
- [16] 白雪,程军回,郑淑霞,等. 典型草原建群种羊草对氮磷添加的生理生态响应[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(2): 103-115.
- [17] 周晓兵,张元明,王莎莎,等. 模拟氮沉降和干旱对准噶尔盆地两种一年生荒漠植物生长和光合生理的影响[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(12):1394-1403.
- [18] 李化山,汪金松,刘星,等. 模拟N沉降对太岳山油松人工林和天然林草本群落的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(11):3710-3721.
- [19] 于立忠. 施肥对日本落叶松细根形态特征及养分含量的影响[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2006.
- [20] 高海燕,红梅,霍利霞,等. 水氮耦合对荒漠草原植物物种多样性及生物量的影响[J]. *草业科学*, 2018, 35(1): 36-45.
- [21] 张婉婷. 降雨变化和氮添加对红砂幼苗非结构性碳水化合物及化学计量特征的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2020.
- [22] 杨昊天,李新荣,刘立超,等. 荒漠草地4种灌木生物量分配特征[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(5):1340-1348.
- [23] Jennifer R, Stephane M, Tanguy J, *et al.* Growth and biomass allocation in seedlings of rainforest trees in New Caledonia: monodominants vs. subordinates and episodic vs. Continuous Regenerators [J]. *Journal of Tropical Ecology*, 2017, 33(2):128-142.
- [24] 张颖娟,黄甫江云,卢欣石. 草原化荒漠地区珍稀物种长

- 叶红砂种群遗传多样性分析[C]//农区草业论坛论文集,2008:604—608.
- [25] 周海燕,谭会娟,张志山,等. 红砂和珍珠对极端环境的生理响应与调节机制. 中国沙漠,2012,32(1):24—32.
- [26] ASSENG S, TURNER N, KRATING B A. Analysis of water— and nitrogen—use efficiency of wheat in a mediterranean climate [J]. *lant and Soil*, 2001, 233 (1) : 127—143.
- [27] FIASCONARO M L, GOGORCENA Y, MUÑOZ F. Effects of nitrogensource and water availability on stem carbohydrates and cellulosic bioethanol traits of alfalfa plants[J]. *Plant Science*, 2012, 191(8):16—23.
- [28] 杨洁,单立山,苏铭,等. 降水变化和生长方式对红砂和珍珠化学计量特征的影响[J]. 草地学报,2021,29(10):2221—2232.
- [29] 文海燕,傅华,牛得草,等. 大气氮沉降对黄土高原土壤氮特征的影响[J]. 草业科学,2013,30(5):694—698.
- [30] 张婉婷,单立山,李毅,等. 氮添加与降雨变化对红砂幼苗非结构性碳水化合物化合物的影响[J]. 生态学杂志,2020,39(3):803—811.
- [31] 张鹏,李毅,单立山,等. 降水变化对混生红砂—珍珠生物量及分配的影响[J]. 草地学报,2021,29(3):478—487.
- [32] 刘玉冰. 荒漠复苏植物红砂抗旱机理的生理生态学特性研究[D]. 兰州:兰州大学,2006.
- [33] 黄培祐,聂湘潭,周建民,等. 准噶尔盆地中部琵琶柴 (*Reaumuria soongorica*) 群落的生境研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版),1988(3):66—71.
- [34] 林旭俊,欧滨. 水肥耦合对小叶榄仁幼苗生长的影响[J]. 热带林业,2015,43(2):10—13.
- [35] 曾嘉庆. 重庆喀斯特生境山麻杆种群生态学研究[D]. 重庆:西南大学,2016.
- [36] 段桂芳,单立山,李毅,等. 红砂幼苗根系形态特征对降水格局变化的响应[J]. 草业学报,2016,25(10):95—103.
- [37] 闫励,杨方社,李怀恩,等. 砒砂岩区不同立地下沙棘根系分形特征[J]. 干旱区研究,2019,36(2):467—473.
- [38] 吕豪豪,马晓东,张瑞群,等. 水分胁迫下不同氮素对多枝桧柳幼苗生长及生理的影响[J]. 草业学报,2016,25(9):54—63.
- [39] 李永洁,李进,徐萍,等. 黑果枸杞幼苗对干旱胁迫的生理响应[J]. 干旱区研究,2014,31(4):756—762.
- [40] 崔豫川,张文辉,李志萍. 干旱和复水对栓皮栎幼苗生长和生理特性的影响[J]. 林业科学,2014,50(7):66—73.
- [41] 梁银丽,陈培元. 土壤水分和氮磷营养对冬小麦根苗生长的效应[J]. 作物学报,1996,22(4):476—482.
- [42] 张中信,岳奇奇,钱申,等. 外源氮添加对2种豆科牧草功能性状的影响[J]. 江苏农业学报,2020,36(5):1197—1204.
- [43] 戴诚,康慕道,纪文瑶,等. 内蒙古中部草原地下生物量与生物量分配对环境因子的响应关系[J]. 草地学报,2012,20(2):268—274.
- [44] 孙佳林,张炜成,郑海霞,等. 水氮交互作用下草地早熟禾生长特性的变化[J]. 草地学报,2015,23(6):1226—1232.
- [45] 李桢. 降水改变对植被地下生物量的影响及其机制[D]. 上海:华东师范大学,2020.
- [46] 宗宁,段呈,耿守保,等. 增温施氮对高寒草甸生产力及生物量分配的影响[J]. 应用生态学报,2018,29(1):59—67.
- [47] 祁瑜,Mulder J,段雷,等. 模拟氮沉降对克氏针茅草原土壤有机碳的短期影响[J]. 生态学报,2015,35(4):1104—1113.
- [48] 邵蕊,刘颖慧,李悦,等. 施氮对典型草原克氏针茅光合特性的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2016,52(5):651—657.
- [49] 王晓薇,牛萌楠,张丽薇,等. 不同施氮水平对温带典型草原植物地上一地下生物量分配模式的影响[J]. 河南师范大学学报(自然科学版),2021,49(6):39—46.
- [50] 陆文涛,种培芳,田艳丽,等. 模拟氮沉降及降水作用下红砂和珍珠猪毛菜幼苗生物量的分配模式[J]. 草业科学,2021,38(11):2144—2154.
- [51] 李盼盼,王兵,刘国彬,李彬彬. 氮添加对白羊草种群及土壤特征的影响[J]. 中国水土保持科学,2017,15(2):35—42.
- [52] 白亚梅,李毅,单立山,等. 降水变化和氮添加对红砂幼苗根系形态特征的影响[J]. 干旱区研究,2020,37(5):1284—1292.



# Effects of rainfall change and nitrogen addition on biomass allocation of *Reaumuria soongorica* seedlings

LI Quan-gang, SHAN Li-shan\*, XIE Ting-ting, YANG Jie,

WANG Hong-yong, LI Rui

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

**Abstract:** 【Objective】 Investigation on the characteristics of plant basal height growth and biomass allocation in response to different water and nitrogen supplies is important for revealing the coupling relationship between different water and nitrogen additions and for finding the optimal water and fertilizer supply pattern. 【Method】 In this study, *Reaumuria soongorica* seedlings were subjected to different precipitation (30% reduction in precipitation, normal natural precipitation, 30% increase in precipitation) and N additions no N ( $0 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ), low N ( $4.6 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ), medium N ( $9.2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ), high N ( $13.8 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ). 【Result】 The results showed that the height, above-ground and below-ground biomass, leaf weight ratio, leaf-root weight ratio and source-sink weight ratio of *R. soongorica* seedlings increased with increasing drought stress and were all suppressed with high N additions, while the basal diameter decreased overall with increasing N additions. The basal diameter, plant height and above- and below-ground biomass of *R. soongorica* seedlings increased with increasing water at low and medium N additions. Under high N addition, the leaf weight ratio, leaf root weight ratio and source-sink weight ratio of *R. soongorica* seedlings increased with increasing water, but excessive water addition inhibited their growth, while the root-to-crown ratio showed the opposite trend. 【Conclusion】 *R. soongorica* seedlings showed strong plasticity to the coupling effect of water and N, and were able to adjust the growth of plant height and basal diameter as well as biomass distribution through different water and fertilizer supply.

**Key words:** rainfall variation; nitrogen deposition; biomass allocation; *Reaumuria soongorica* seedlings

(责任编辑 刘建荣)