

减少降水和草本竞争对白桦幼苗细根形态和生理特征的影响

张萌, 刘宁, 王雪剑, 扬帆, 南宏伟*

(山西农业大学 林学院, 山西 晋中 030800)

摘要:为了了解黄土高原半干旱区草本竞争对于造林树种幼苗细根的影响,以1年生白桦幼苗为试验对象,设置正常和减少天然降水2个水分处理,并以草地早熟禾作为竞争处理模拟草本竞争,进行1个生长季大田盆栽试验。通过测量白桦幼苗细根形态和营养指标,以期揭示白桦幼苗细根对土壤水分胁迫和草本竞争的响应机制,为黄土高原森林营造中阔叶树种选择和栽植技术提供理论依据。结果表明:1)生长季内,减少降水处理显著减少了土壤水分含量33%,但未显著影响白桦幼苗的存活率以及细根生物量和养分含量,仅导致细根表面积和体积减小。2)在草本竞争下,白桦幼苗细根全N含量显著下降,存活率以及总碳、可溶性糖、淀粉和非结构性碳水化合物(NSC)等营养指标未受影响。3)降水和草本地下竞争的交互作用显著影响了白桦幼苗细根生物量、淀粉及NSC含量。有草本地下竞争时,降水减少显著降低了白桦幼苗细根生物量,细根淀粉和NSC含量则显著升高,反映了土壤水分含量下降时白桦幼苗细根竞争能力的下降,从而与草本地下竞争减弱。白桦幼苗细根在正常天然降水下受草本地下竞争影响增加生物量,但在减少降水时其形态和营养特征受到草本地下竞争影响较小。表明在迹地和退耕还林地等养分含量较高土壤上使用白桦幼苗造林时,无需考虑草本竞争的影响。

关键词:白桦; 降水减少; 草本竞争; 细根生物量; 非结构性碳水化合物

中图分类号:S792.153 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2021)04-0073-07

Effects of Reduced Precipitation and Herb Competition on the Morphological and Physiological Characteristics of the Fine Roots of *Betula platyphylla* Seedlings

ZHANG Meng, LIU Ning, WANG Xue-jian, YANG Fan, NAN Hong-wei*

(College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030800, Shanxi, China)

Abstract: In order to understand the influence of herb competition on the fine roots of afforestation tree seedlings in the semi-arid area of the Loess Plateau, 1-year-old birch seedlings were taken as the test objects, two water treatments were set: normal and reduced natural precipitation. *Poa pratensis* was used as the competitive treatment to simulate the herb competition. By measuring the fine root morphology and nutritional indicators of birch seedlings, we hoped to reveal the response mechanism of the fine roots of birch seedlings to soil water stress and herb competition, and to provide a theoretical basis for the selection and planting techniques of broad-leaved tree species in forest construction in the Loess Plateau. The results showed that 1) during the growing season, the precipitation reduction treatment significantly reduced the soil moisture content by 33%, but did not significantly affect the survival rate of the birch seedlings, the biomass and nutrient content of the fine roots, and only reduced the surface area and volume of the fine roots. 2) Under herb competition, the total nitrogen content of the fine roots of birch seedlings decreased significantly, and the survival rate and nutritional indicators such as total carbon, soluble sugar, starch and

收稿日期:2020-08-03 修回日期:2020-09-22

基金项目:国家自然基金(31470630);山西农业大学引进人才博士科研启动费项目(2013YJ17)。

作者简介:张萌。研究方向:森林地下生态学。E-mail:17835423248@163.com

*通信作者:南宏伟,副教授,博士。研究方向:森林地下生态学。E-mail:nanhw@126.com

non-structural carbohydrates (NSC) were not affected. 3) The interaction of precipitation and herb underground competition significantly affected the fine root biomass, starch and NSC content of birch seedlings. When there existed herb underground competition, the biomass of fine roots was significantly reduced under reduced precipitation, and the content of fine root starch and NSC significantly increased, reflecting the decline in the competitive ability of the birch seedlings' fine roots when the soil moisture content decreased, thus weakening the underground competition with herbs. The fine roots of birch seedlings increased the biomass under normal natural rainfall, but the morphological and nutritional characteristics of birch seedlings were less affected by underground competition when rainfall was reduced. The results showed that using birch seedlings for afforestation on soils with high nutrient content such as cutting blanks and conversion of farmland to forests, there was no need to consider the influence of herb competition.

Key words: *Betula platyphylla*; precipitation reduction; herb competition; fine root biomass; non-structural carbohydrate

黄土高原具有干旱半干旱区的典型气候特征,降水有限而蒸发量较高,生态环境相对脆弱^[1-2]。因此,水分胁迫是黄土高原现有森林发挥正常生态功能的主要限制因素之一。水资源减少将导致树木个体各器官的形态结构和生理机制发生变化,对其生存能力以及森林植物群落结构产生影响,进而影响森林的碳汇功能,减弱森林生产力^[3-6]。而细根(直径≤2 mm)作为树木吸收水分和养分的重要器官,在水分胁迫下,其形态结构及生理活性不仅直接影响着树木地上部分的生长发育^[7-8],还能够显著影响地下碳分配和水分运输速率^[9],直接决定着树木对于干旱环境的适应能力,对林分的正常发育和生长起到关键性作用^[10-11]。因此,研究水分胁迫下树木细根的适应机制对于黄土高原半干旱区森林营造的成功尤为重要。

森林树种间的竞争是森林生态系统中重要的自然活动之一。树木个体的地上竞争主要是对于光资源的争夺,而地下竞争则是抢夺土壤中的水分和养分,这2种竞争共同影响着森林植物的生存^[12-14]。当某一资源匮乏时,树木个体对于该资源的竞争将更加激烈,从而使竞争对个体的影响随之增强^[15]。因此,在干旱半干旱环境中,森林植物地下根系的竞争对树木的影响和作用不容忽视。然而,在黄土高原的造林实践中,人工栽植的树木幼苗常常与原生草本和灌木共存,且黄土高原半干旱气候在林木生长季节中导致相当程度的土壤水分亏缺^[16]。因此,有必要了解草本竞争对于栽植幼苗生长和存活的影响,从而为黄土高原的造林工程提供科学依据。

随着近自然造林和可持续林业理念的不断推广,目前黄土高原的造林工作多以采伐迹地和退耕坡田上针阔混交林的营造为主。其中,白桦(*Betula platyphylla*)作为深根系演替早期树种,是用于造林的主要阔叶树种^[17-18]。因此,本研究以1年生白

桦幼苗为试验材料,在大田条件下进行盆栽控制实验,通过模拟降水减少和人工引入草本竞争的方法,研究降水减少以及草本竞争对白桦幼苗细根的形态以及营养特征的影响,讨论白桦在应对干旱胁迫以及草本竞争时的适应策略,为未来黄土高原针阔混交林营造中阔叶树种的选择提供相应的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究样地位于山西省太原市郊区(111°30'—113°09'E, 37°27'—38°25'N),海拔760 m。属北温带大陆性气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥。年平均气温9.5℃,1月平均-6.4℃,7月平均23℃,年均降水量456 mm,年平均蒸发量1 780 mm,约为年平均降水量的3.9倍,冬、春季最为干旱。霜冻期为10月中旬至次年4月中旬,无霜期平均149~175 d。

1.2 试验设计

采用完全随机区组设计,以降水量为主处理,共设置6个5 m×5 m的区组,随机平均分配在正常降水和降水减少2个处理水平下。每区组内使用高0.5 m、直径0.5 m的营养钵以6×4盆的方式栽植白桦幼苗,行距0.5 m,行内盆间距0.2 m。所有营养钵均掩埋于地下,营养钵四周有直径1 cm的小孔4个,底部设有排水孔,以便在基本隔绝盆外土壤水分进入的同时,可于降水过多时排出盆内积水。每区组下随机设置有草和无草2种草本竞争处理,每种草本竞争方式12盆,6个区组共栽植144盆。

2017年4月初,进行缓苗工作,使用实验地附近农田30 cm表层土壤(土壤理化性质见表1)填满所有营养钵,以模拟采伐迹地和退耕还林土壤。每盆栽植白桦1株,白桦幼苗选自本地苗圃中长势和高度基本一致的1年生裸根苗。为保证幼苗的存

活,栽植时未清洗根系。栽植2周后,使用同批次幼苗替换死亡的白桦幼苗,之后的生长季中未进行任何处理。

当年生长季末,栽植幼苗均未死亡,并在原地无防护过冬。

表1 研究使用农田表层土壤的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of farmland surface soil of this study

	田间持水量/%	饱和含水量/%	有机质/(g·kg ⁻¹)	全N/(g·kg ⁻¹)	有效P/(mg·kg ⁻¹)	速效K/(mg·kg ⁻¹)
耕地土壤	25.67±0.545	40.12±1.14	17.23±2.08	1.02±0.034	20.84±0.522	138.65±14.85

2018年4月初,进行盆栽控制试验,在各区组设置为有草的营养钵内均匀撒播约6 g商品早熟禾草种。2018年4月中旬,待早熟禾萌发后,清除无草处理下营养钵内所有的草本以及有草处理下营养钵内的杂草。2018年4月底试验开始前,在减少降水处理区组上方3 m处搭建活动塑料遮雨棚,生长季降雨时打开以模拟减少降雨。其次,进行正常的苗期管理。

2018年5月初,白桦幼苗的平均高度为(20.98±3.02)cm,在有草处理的营养钵内,早熟禾的地上部分已充满营养钵,叶长达40 cm,但直立部分高度在15 cm以下,因此未对白桦幼苗的地上生长构成竞争,仅构成地下竞争。在进行试验期间,每2周以连根拔起的方式清除营养钵内外的杂草。

表2 各试验处理土壤平均含水率

Table 2 The average moisture content of the soil treated in each experiment

	雨季	旱季	%
减少降水	45.26	18.26	31.76
正常降水	62.59	32.60	47.60
降幅	27.69	43.98	33.28

2019年春,部分幼苗过冬后地上部分存在不同程度的抽干现象,因此当年生长季末未测量苗高地径,仅统计存活率。每周随机抽取各区组内2个营养钵,使用数字化土壤水分计测量土壤含水率,此工作持续至样本采集(表2)。

1.3 样本采集

2019年10月,统计白桦幼苗的存活情况。用铁锹将存活的白桦幼苗营养钵挖起,轻轻抖掉根系周围的壤土,用枝剪将较粗的根系(直径≥20 mm)剪掉,将剩下的根系按编号分装在自封袋内带回实验室,并区分白桦和草本根系。白桦扎根较深,其根系质地较硬,有韧性,表皮颜色呈黄褐色;草地早熟禾根系质地柔软,细小且稠密,表皮颜色呈淡黄色,部分根系带有节。

1.4 指标测定

借助数字游标卡尺挑出白桦幼苗细根(直径≤2 mm),并放在EPSON Perfection V700扫描仪中扫描,扫描图片用Win Rhizo软件进行分析,得出白桦

幼苗形态指标。扫描后将所有细根用报纸包好于烘箱中烘干,烘箱温度为80℃,烘干时间为48 h,称量细根干重(g),计算比根长(细根长度/细根干重)。

在每区组采集的细根样本中,每个降水和草本竞争处理组合下选择2株的根系样本研磨后过筛(100目土壤筛),用于生理指标测量。用PE-2400Ⅱ元素分析仪测根系样本量C、N的含量(%),用可见光分光光度计测量可溶性糖(%)、淀粉(%)以及非结构性碳水化合物(NSC)含量(%)^[19-20]。

1.5 数据处理

不同处理组合下白桦幼苗的存活率采用卡方检验分析。利用R 3.2.5软件,以降水和草本竞争处理为自变量,对白桦幼苗细根生物量、比根长、平均直径等根形态指标以及营养指标进行双因素方差分析(ANOVA)。细根生物量、比根长和平均直径经平方根转换以满足正态性和齐性的要求。差异显著的结果采用Tukey检验进行多重比较,使用sigmaplot12.5进行作图。

2 结果与分析

2.1 白桦幼苗存活率

由表3可知,白桦幼苗平均存活率为85.42%。虽然降水减少后无草本竞争时白桦幼苗的存活率略低(77.8%),但降水和草本竞争处理对白桦幼苗存活率的影响均不显著($P>0.05$)。

2.2 白桦幼苗细根形态特征

由表4可知,降水处理显著影响了白桦幼苗细根的表面积和体积,草本竞争未影响白桦幼苗细根形态。而降水和草本竞争的交互作用仅在细根生物量指标上显著。差异显著变量的多重比较结果见表5和图1。

由表5可知,降水减少后白桦幼苗的细根表面积仅为(303.86±14.74)cm²,与正常降水下细根表面积(379.78±25.23)cm²相比减少19.99%。同样,降水减少后白桦幼苗的细根体积仅为(6.38±0.381)cm³,相对正常降水(8.32±0.591)cm³减少23.32%。

由图1可见,在正常降水处理下,有草本竞争时白桦幼苗细根生物量显著高于无草本竞争。但在减

表 3 降水和草本竞争处理组合下白桦幼苗的存活率

Table 3 Survival rates of birch seedlings under the different treatment combinations of precipitation and herb competition

物种	水分	竞争	存活/栽植株数	存活率/%	P 值
白桦	减少降水	无	28/36	77.80	0.832
		有	31/36	86.10	
	正常降水	无	32/36	88.90	
		有	32/36	88.90	
合计			123/144	85.42	

表 4 降水和草本竞争处理组合下白桦幼苗细根形态指标的方差分析结果(F 值)

Table 4 ANOVA results of fine root morphology birch seedlings (F value)

	细根生物量	比根长	细根表面积	细根体积
降水	1.26	1.07	3.74 *	4.97 *
竞争	1.00	0.350	2.303	0.002
降水×竞争	4.11 *	0.064	0.137	0.260

注: * 表示显著水平($P < 0.05$)。下同。

少降水处理下,二者无显著差异。同时,有草本竞争时,正常降水下白桦幼苗细根生物量显著高于减少降水,而在无草本竞争时,二者无显著差异。

2.3 白桦幼苗细根生理特征

由表 6 可知,降水处理未影响白桦幼苗细根的生理特征。草本竞争显著影响了白桦幼苗细根的全氮含量,但未影响白桦幼苗细根的全碳、可溶性糖、淀粉和 NSC 含量。降水和草本竞争的交互作用仅显著影响了白桦幼苗细根淀粉含量和 NSC 含量。

表 5 2 种降水处理下白桦幼苗形态指标的多重比较结果

Table 5 Morphology of birch seedlings under two precipitation treatments

	细根生物量/g	比根长/(m·g ⁻¹)	细根表面积/cm ²	细根体积/cm ³
正常降水	9.19±0.690	719.15±48.23	379.78±25.23a	8.32±0.591a
减少降水	8.21±0.549	709.91±64.80	303.86±14.74b	6.38±0.381b

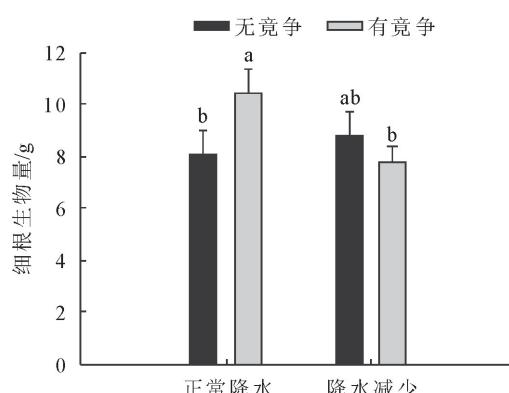
注: 小写字母表示不同处理间有显著差异($P < 0.05$)。下同。

图 1 降水和草本竞争的交互作用对白桦幼苗细根生物量的影响

Fig. 1 Effect of the interaction between precipitation and herb competition on fine root biomass of birch seedlings

表 6 白桦幼苗细根营养指标的方差分析结果(F 值)

Table 6 ANOVA results of fine root nutrition of birch seedlings (F value)

自变量	全 C	全 N	可溶性糖	淀粉	NSC
降水	0.088	0.139	0.089	0.813	1.17
竞争	0.057	4.98 *	0.041	0.150	0.493
降水×竞争	0.030	0.001	0.473	5.02 *	4.67 *

由表 7 可见,草本竞争条件下白桦幼苗细根的全 N 含量为 $1.26 \pm 0.070\%$,与无草本竞争下全 N

含量($1.52 \pm 0.084\%$)相比减少 17.11% 。由图 2 可见,在正常降水条件下,有草本竞争时白桦幼苗细根的淀粉和 NSC 含量呈现低于无竞争时相应含量的趋势,而在减少降水的条件下,则呈现相反的趋势,但上述差异均不显著。同时,有草本竞争时,正常降水下白桦幼苗细根的淀粉和 NSC 含量显著高于减少降水处理下。但在无草本竞争时,二者无显著差异。

3 讨论

3.1 减少降水和草本竞争对细根形态特征的影响

根据资源最优分配理论的预测,当环境中水资源受限时,植物通常会增加细根生物量投入来获得足够的水分以满足自身生长需要^[21]。本研究中,减少降水处理未显著影响白桦幼苗的细根生物量,与一般规律不符。这可能是因为植物对于土壤干旱胁迫的响应取决于土壤养分等其他生长所必需资源的可用性(表 1)。例如,虽然 Meier *et al.* 在研究自然降水梯度下山毛榉(*Fagus sylvatica*)林的细根生物量时发现林分总细根生物量随降水量的减少而显著下降^[22],但 D. Hertel *et al.* 发现^[21],山毛榉林的总细根生物量仅在砂质土壤中随土壤水分含量减少而增加,而在肥沃的壤土中并未显著变化。因此,林木

对于旱胁迫的响应除了要考虑土壤水分可利用性外,养分的可利用性也是一个不可忽略的因素^[23],而资源最优分配理论并未考虑此因素。本研究采用

耕地壤土进行试验,土壤中养分含量较高,从而有可能减弱了土壤水分胁迫的影响,在之后的研究中将设计试验加以论证。

表7 2种竞争处理下白桦幼苗营养指标的多重比较结果

Table 7 Nutrient contents of birch seedlings under two competition treatments

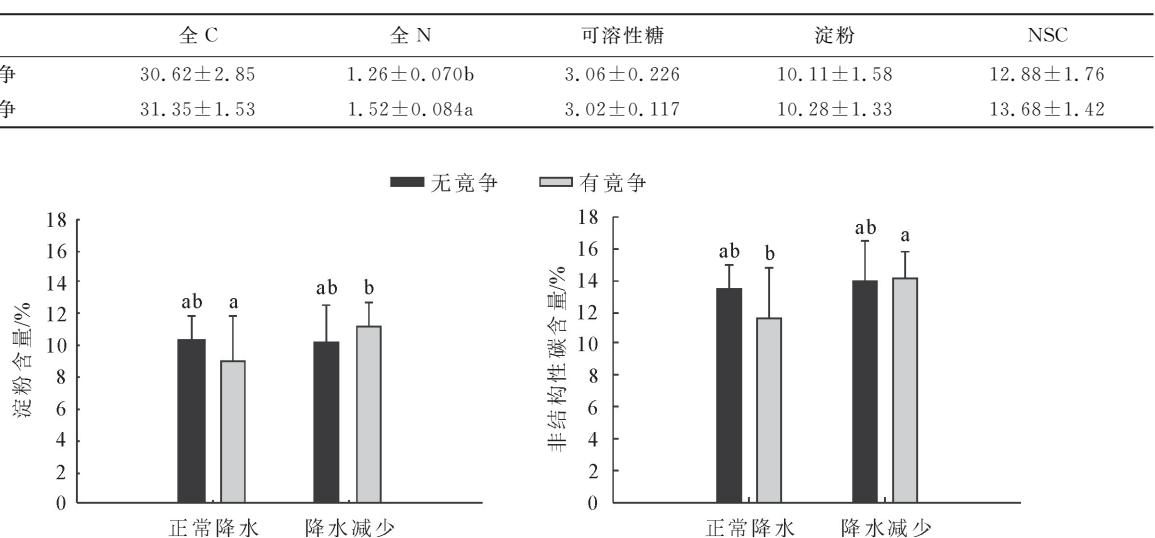


图2 减少降水和草本竞争对白桦幼苗细根代谢的影响

Fig. 2 Effect of the interaction between precipitation and herb competition on fine root metabolism of birch seedlings

与土壤养分的混杂影响相似,本研究中不同降水处理下草本竞争对白桦幼苗细根生物量的影响不同。在正常降水处理下,草本竞争显著增加了白桦幼苗的细根生物量,表现出较强的地下竞争能力。但在减少降水处理下,草本竞争的影响并不显著。有研究发现深根系树种的细根形态有利于1年生草本的生长生存^[24-25],且林下植物的竞争作用也显著增加了树木的细根生物量。同时,不同根系特征物种间的不对称性竞争作用一般随土壤水分含量增加而加强,随土壤水分含量减少而减弱^[26-27]。本研究中,白桦是典型的深根系树种,随着土壤深度增加,其细根生物量对地下总生物量的贡献增加^[28],而早熟禾是林下常见草本,因此通过细根生物量反映出的白桦与草本细根的竞争关系与上述结论相符。

当土壤含水率降低时,林木不仅会调整细根生物量来适应水资源短缺,还可以通过提高比根长、增加细根表面积等来增加根系的投入产出比,从而积极应对干旱胁迫^[3]。本研究中,白桦幼苗细根的表面积和体积在减少降水后显著减小,且与草本地下竞争无关,并未表现出积极的响应。有研究指出,山毛榉细根只有在沙质土壤较干燥的地方才会增加细根平均直径和比根长^[21]。Leuschner等^[22]比较了5个不同降水量和土壤化学成分的樟子松成熟林,也没有发现细根形态的显著变化。不断增加的干旱限制使得林木细根死亡率增加,死亡的林木细根由直径更小,表面积更大的新根代替。也有研究表明,干

旱胁迫将抑制植物主根的生长,促进植物侧根生长。主根变细,林木侧根易受干旱胁迫的影响而处于不断更新状态等因素导致林木细根形态响应消极^[29],这可能是本研究中白桦幼苗细根表面积和体积减少的原因。

综上所述,减少降水后,白桦幼苗细根生物量未显著下降但与草本的地下竞争减弱的结果说明,在迹地和退耕还林地等土壤养分含量高的立地上种植白桦幼苗时,草本对于白桦细根的地下竞争作用较弱。因此,即使未来气候变化导致土壤水分含量下降,草本的竞争作用也不会对白桦幼苗的细根形态有不利影响。

3.2 减少降水和草本竞争对细根营养的影响

非结构性碳水化合物(NSC)由可溶性糖和淀粉组成,由植物叶片合成功能输送至根系。NSC不仅能为根系的结构建成提供原料,也是根系抗逆调节的重要物质^[30-31]。雷虹等^[32]研究发现,根据按需分配的原则,小叶锦鸡儿在轻度干旱胁迫时,通过增加细根中可溶性糖含量,以提高细胞渗透势,满足自身水分需求,且随着干旱程度加深,增加了粗根淀粉的含量,以合成防御性物质,抵抗干旱胁迫。与此不同的是,本研究中白桦幼苗细根的淀粉和NSC含量在无草本竞争时不受减少降水处理的影响,而在有草本竞争时显著增加,但可溶性糖含量无显著变化。减少降水处理后,草本竞争未影响土壤水分含量的测量结果说明白桦幼苗细根淀粉和NSC含量在草本

竞争存在时增加并非是土壤水分的直接结果。郑云普等^[20]发现,由于淀粉不是渗透活性物质,以淀粉含量增加为前提时,植物体内 NSC 的增加并不是为了抵抗干旱胁迫,而是植物体水分的缺失影响了植物组织的结构建成;而 S. W. Bockstette 等^[33]对白杨幼苗在生长初期对牧草竞争响应的研究中发现,牧草竞争增加了白杨根系中可溶性糖的含量,揭示白杨幼苗细根抵抗竞争的渗透调节机制,白杨幼苗对根系竞争的结构可塑性能力有限,但至少暂时能够通过优化吸水效率来补偿根系尺寸和生根空间的减小。综上所述,本研究中草本竞争存在时,白桦幼苗细根生物量在减少降水处理后显著下降,反映了白桦幼苗和草本根系在土壤水分胁迫下的竞争关系减弱,且没有启动自身渗透调节机制,因此由叶片输送至细根的淀粉等营养物质未用于白桦幼苗细根的结构建成,从而大量积累,进一步支持了其正常降水水平下用于白桦细根生物量增加以与草本进行竞争的结果。同时,白桦幼苗细根可溶性糖含量不受降水和草本竞争处理影响的结果说明白桦细根未对环境和生物因子胁迫产生积极的生理响应和适应。

4 结论

本研究使用耕土的大田盆栽试验中,减少天然降水的处理未显著影响白桦幼苗的存活率、细根($\leq 2 \text{ mm}$)生物量、比根长以及细根碳氮含量,但导致其细根表面积和体积显著下降,说明白桦幼苗细根对干旱胁迫做出了消极响应。

当存在草本地下竞争时,白桦幼苗的存活率未受影响,但细根生物量在减少降水处理下显著降低,并导致细根淀粉和 NSC 含量显著升高,反映了土壤水分含量下降时白桦幼苗细根竞争能力的下降,从而与草本竞争能力减弱。

耕土栽植的白桦幼苗细根在正常天然降水下受草本地下竞争增加生物量,但在减少降水时形态和营养特征受草本地下竞争影响较小的结果表明,在迹地和退耕还林地等养分含量较高土壤上使用白桦幼苗造林时,无需考虑草本竞争的影响。

参考文献:

- [1] 孟晗,黄远程,史晓亮. 黄土高原地区 2001—2015 年植被覆盖变化及气候影响因子[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(1): 211-217.
- [2] 贾艳青,张勃. 近 57 年中国北方气候干湿变化及与太平洋年代际振荡的关系[J]. 土壤学报, 2019, 56(5): 1085-1097.
- [3] 钟波元,熊德成,史顺增,等. 隔离降水对杉木幼苗细根生物量和功能特征的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2807-2814.
- [4] 高成杰,崔凯,张春华,等. 干旱胁迫对不同种源云南松幼苗生物量与根系形态的影响[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(3): 9-16.
- [5] 裴艳武,黄来明,贾小旭,等. 干旱胁迫对黄土高原不同质地土壤长柄扁桃和沙柳幼苗生理生态特征的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 234-239.
- [6] FAROOQ M, WAHID A, KOBAYASHI N, et al. Plant drought stress: effects, mechanisms and management[J]. Sustainable Agriculture, 2009, 29(1): 153-188.
- [7] 张鑫,邢亚娟,闫国永,等. 细根对降水变化响应的 meta 分析[J]. 植物生态学报, 2018, 42(2): 164-172.
- [8] 吴敏,张文辉,周建云,等. 干旱胁迫对栓皮栎幼苗细根的生长与生理生化指标的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(15): 4223-4233.
- [9] WU M, ZHANG W H, ZHOU J Y, et al. Effects of drought stress on growth, physiological and biochemical parameters in fine roots of *Quercus variabilis* Bl. seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(15): 4223-4233. (in Chinese)
- [10] HOMMEL R, SIEGWOLF R, ZAVADLAV S, et al. Impact of interspecific competition and drought on the allocation of new assimilates in trees[J]. Plant Biology, 2016, 18(5): 785-796.
- [11] OSTONEN I, HELMISAARI HS, BORKEN W, et al. Fine root foraging strategies in Norway spruce forests across a European climate gradient[J]. Global Change Biology, 2011, 17(12): 3620-3632.
- [12] 王平,王天慧,周道玮,等. 植物地上竞争与地下竞争研究进展[J]. 生态学报, 2007, 27(8): 3489-3499.
- [13] 陈仁飞,姬明飞,关佳威,等. 植物对称性竞争与非对称性竞争研究进展及展望[J]. 植物生态学报, 2015, 39(5): 530-540.
- [14] BAKKER MR, AUGUSTO L, ACHAT DL. Fine root distribution of trees and understory in mature stands of maritime pine (*Pinus pinaster*) on dry and humid sites [J]. Plant and Soil, 2006, 286(1-2): 37-51.
- [15] 高艳. 黄土丘陵区撂荒群落共存种植物竞争对土壤水分变化的响应[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016.
- [16] 杨泽粟,张强,郝小翠. 1982—2013 年黄土高原地表蒸散量变化特征及其对降水的响应[C]//中国气象学会. 第 32 届中国气象学会年会 S5 干旱陆面过程与气候变化. 中国气象学会, 2015: 97-114.
- [17] 秦景. 黄土高寒区主要造林树种抗旱耐盐生理及耗水特性[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [18] 冯飞,牛梓璇. 黄土高原地区人工造林现状探究——以山西省为例[J]. 现代园艺, 2019(8): 159-160.
- [19] 杨振亚,周本智,陈庆标,等. 干旱对杉木幼苗根系构型及非结构性碳水化合物的影响. 生态学报, 2018, 38(18): 6729-6740. YANG Z Y, ZHOU B Z, CHEN Q B, et al. Effects of drought on root architecture and non-structural carbohydrate of *Cunninghamia lanceolate* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): 6729-6740. (in Chinese)
- [20] 郑云普,王贺新,娄鑫,等. 木本植物非结构性碳水化合物变化及其影响因子研究进展[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1188-1196.

- [21] HERTEL D, STRECKER T J, MLLER H H, et al. Fine root biomass and dynamics in beech forests across a precipitation gradient is optimal resource partitioning theory applicable to water-limited mature trees? [J]. Journal of Ecology, 2013, 101(5):1183-1200.
- [22] MEIER I C, LEUSCHNER C. Belowground drought response of European beech: fine root biomass and carbon partitioning in 14 mature stands across a precipitation gradient [J]. Global Change Biology, 2008, 14(9):2081-2095.
- [23] YUAN ZY, CHEN HYH. Fine root biomass, production, turnover rates, and nutrient contents in boreal forest ecosystems in relation to species, climate, fertility, and stand age: literature review and meta-analyses [J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2010, 29(4): 204-221.
- [24] MESSIER C, COLL L, POITRAS-LARIVIRE A, et al. Resource and non-resource root competition effects of grasses on early-versus late-successional trees [J]. Journal of Ecology, 2009, 97(3):548-554.
- [25] ASCHEHOUG ET, CALLAWAY RM. Morphological variability in tree root architecture indirectly affects coexistence among competitors in the understory [J]. Ecology, 2014, 95(7):1731-1736.
- [26] LIAO Y C, FAN H B, WEI X H, et al. Competition increased fine root biomass in Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations in Subtropical China [J]. Forest Ecology & Management, 2019, 435:151-157.
- [27] REWALD B, LEUSCHNER C. Does root competition asymmetry increase with water availability? [J]. Plant Ecology and Diversity, 2009, 2(3):255-264.
- [28] JIANG P P, WANG H M, FU X L, et al. Elaborate differences between trees and understory plants in the deployment of fine roots [J]. Plant and Soil, 2018, 431(1/2):433-447.
- [29] 李文娆, 张岁岐, 丁圣彦, 等. 干旱胁迫下紫花苜蓿根系形态变化及与水分利用的关系 [J]. 生态学报, 2010, 30(19): 5140-5150.
- [30] 王昕, 孙永林, 刘西平. 土壤含水量对刺槐光合能力和碳水化合物分配的影响 [J]. 西北林学院学报, 2015, 30(1): 20-25, 45.
- [31] 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的影响 [J]. 生态学杂志, 2020, 39(3): 803-811.
- [32] 雷虹, 王凯, 田浩等. 小叶锦鸡儿幼苗非结构性碳水化合物积累及分配对干旱胁迫的响应 [J]. 生态学杂志, 2017, 36(11): 3168-3175.
- [33] BOCKSTETTE S W, PINNO B D, LANDHUSSER S M. Responses of planted *Populus tremuloides* seedlings to grass competition during early establishment [J]. Trees: Structure & Function, 2018, 32(5):1279-1289.

(上接第 59 页)

- [11] 齐冰, 杜荣光, 邵碧嘉. 杭州市空气负离子变化特征分析 [J]. 气象与减灾研究, 2011, 34(4):68-71.
- QI B, DU R G, SHAO B J. Characteristics of anion variation in Hangzhou [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2011, 34(4):68-71. (in Chinese)
- [12] 雷恒池, 吴玉霞, 肖辉, 等. 不同天气系统下我国云雨水化学特征的研究 [J]. 高原气象, 2001, 20(2):127-131.
- LEI H C, WU Y X, XIAO H, et al. Study on cloudwater and rainwater chemical characteristics under different weather system over China [J]. Plateau Meteorology, 2001, 20(2): 127-131. (in Chinese)
- [13] 曾曙光, 苏志尧, 陈北光. 广州绿地空气负离子水平及其影响因子 [J]. 生态学杂志, 2007, 26(7):1049-1053.
- ZENG S C, SU Z Y, CHEN B G. Air negative ion concentrations and their affecting factors in greenbelts of Guangzhou [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(7):1049-1053. (in Chinese)
- [14] 林宜鸿, 何中声, 杨素慧, 等. 永泰县夏季空气负氧离子空间异质性研究 [J]. 西北林学院学报, 2019, 34(6):82-88.
- LI Y H, HE Z S, YANG S H, et al. Spatial heterogeneity of summer air negative oxygen ions in Yongtai county [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(6):82-88. (in Chinese)
- [15] 潘洋刘, 曾进, 文野, 等. 森林康养基地建设适宜性评价指标体系研究 [J]. 林业资源管理, 2017(5):101-107.
- PAN Y L, ZENG J, WEN Y, et al. Study on the suitability evaluation index system of forest wellness base construction [J]. Forest Resources Management, 2017(5):101-107. (in Chinese)
- [16] 宿华. 莫尔图国家湿地公园建设必要性浅析 [J]. 内蒙古林业调查设计, 2016, 39(5):67-68.
- [17] 巴特, 张健, 田原, 等. 兴安落叶松生态系统近地表 CH₄ 浓度及其影响因子 [J]. 西北林学院学报, 2017, 32(2):57-60, 66.
- BA T, ZHANG J, TIAN Y, et al. Near-surface CH₄ concentration in the *Larix gmelinii* ecosystem [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(2):57-60, 66. (in Chinese)
- [18] LY/T 2586-2016, 空气负(氧)离子浓度观测技术规范 [S].
- [19] 牛凯, 李华威, 何瑞珍, 等. 郑州市带状绿地不同空间结构类型温湿度效应分析 [J]. 西北林学院学报, 2015, 30(6):237-241.
- NIU K, LI H W, HE R Z, et al. Effects of different spatial structure of urban greenbelts on air temperature and relative humidity in Zhengzhou [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(6):237-241. (in Chinese)
- [20] 王薇. 空气负离子浓度分布特征及其与环境因子的关系 [J]. 生态环境学报, 2014, 23(6):979-984.
- WANG W. Characteristics of negative air ion concentration and its relationships with environmental factors [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(6):979-984. (in Chinese)
- [21] 黄世成, 徐春阳, 周嘉陵. 城市和森林空气负离子浓度与气象环境关系的通径分析 [J]. 气象, 2012, 38(11):1417-1422.
- HUANG S C, XÜ C Y, ZHOU J L. Path analysis on negative air concentration and the meteorological environment in urban and forest zones [J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(11): 1417-1422. (in Chinese)
- [22] 张帅. 植物与空气离子关系的研究 [D]. 南京:南京林业大学, 2010.