

水分条件对滇榄仁种子萌发及幼苗早期生长的影响

王小庆^{1,2},李昆^{2*},刘方炎²,高成杰²,孙永玉²

(1. 云南省昆明市西山区人民政府 海口街道办事处,云南 昆明 650114;

2. 中国林业科学研究院 资源昆虫研究所,国家林业局 元谋荒漠生态系统定位观测站,云南 昆明 650224)

摘要:元谋盆地是中国西南金沙江干热河谷生态脆弱区的典型区域,滇榄仁(*Terminalia franchetii*)种群为该区域仅有的几种重要天然植被类型之一。研究水分条件对滇榄仁种子萌发及幼苗早期生长的影响,以了解其天然更新中的限制因子,为人工促进植被恢复提供理论依据。采用室内控制试验方法研究不同水分条件对滇榄仁种子萌发特征及幼苗早期生长特征的影响。结果表明,滇榄仁种子能够在含水量为15%~40%的土壤中萌发,种子发芽率>55%,适宜的土壤含水量为15%~25%,种子发芽率>70%。当土壤含水量<10%或>50%时,种子萌发受到严重抑制,甚至完全不能萌发。水分条件对滇榄仁幼苗早期生长具有显著影响。随着施水量的增加,幼苗株高、基径、萌枝数、主根长、主茎叶片数、最大叶片长、单株叶面积、比叶面积、生物量均出现了显著增加。随着水分胁迫的加剧,根冠比呈逐渐上升的趋势。综上,滇榄仁种群天然更新的主要影响因子是土壤含水量,应加强群落物种多样性保育及退化土壤的改善,使之形成集水、保水环境,使萌发幼苗安全度过脆弱期从而有效补充幼树以实现种群自我更新。

关键词:滇榄仁;水分条件;种子萌发;幼苗生长;干热河谷

中图分类号:S723.131 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)06-0125-06

Effects of Water Supply on Seed Germination and Early Seedling Growth
of *Terminalia franchetii*

WANG Xiao-qing^{1,2}, LI Kun^{2*}, LIU Fang-yan², GAO Cheng-jie², SUN Yong-yu²

(1. Haikou Street Office, Government of Xishan District, Kunming, Yunnan 650114, China;

2. Yuanmou Desert Ecosystem Research Station, State Forestry Administration, Research Institute of Resources Insects,
The Chinese Academy of Forestry, Kunming, Yunnan 650224, China)

Abstract: *Terminalia franchetii* community is one of the important and rare natural vegetations occurring in Yuanmou basin where the ecotope is typically fragile in the dry-hot valley of Jinsha River in southwestern China. In order to provide theoretical basis for artificially promoting vegetation restoration in this region, effects of water supply on seed germination and early seedling growth of *T. franchetii* was studied initially to understand the natural regeneration barriers of *T. franchetii*. The seed germination and early seedling growth characteristics of *T. franchetii* were observed under different levels of water supply by indoor control method. The seed germination percentage was 55% to 90% under the soil water content (SWC) of 15% to 40%, and the SWC of 15% to 25% was suitable for the seed germination, but the seed germination was restrained seriously even completely unable to germinate when the SWC was lower than 10% or higher than 50%. The results showed that water supply affected significantly the early seedling growth. With the increment of water supply, the seedling height, basal diameter, branch number, main root

收稿日期:2017-01-03 修回日期:2017-05-09

基金项目:“十二五”农村领域国家科技支撑计划课题(2015BAD07B0404)。

作者简介:王小庆,女,硕士,工程师,研究方向:营林造林和植被恢复。E-mail:wxq0417@163.com

*通信作者:李昆,男,研究员,博士生导师,研究方向:干热河谷植被恢复。E-mail:caflikun@163.com

length, leaf number in main stem, maximum leaf length, total leaf area, specific leaf area and dry mass increased, but root to shoot ratio decreased. The results of this research indicated that the water supply was the key obstruction factor for the natural regeneration of *T. franchetii* population, which suggested that the conservation of community species diversity and improvement of degraded soil in the dry-hot valley of Jinsha River should be enhanced to create the water retention environment for the survival of *T. franchetii* in seedling stage to implement self-renewing.

Key words: *Terminalia franchetii*; water supply; seed germination; seedling growth; dry-hot valley

种子萌发是植物个体生长周期的转折点,其萌发行为直接影响着物种的繁殖及种群繁衍过程,进一步影响植被分布、动态及多样性等^[1],而种子萌发通常需要一定的外界环境条件,如光照、温度、湿度、土壤含水量、枯落物等。在不同的外界环境作用下,植物种子可能会产生延缓传播(如植冠种子库)或者延迟萌发(如休眠)等策略寻找最适宜萌发的时机,然后在适宜萌发的条件持续萌发,从而增加成功定居的几率。但萌发后的幼苗由于根系系统的不完善,呼吸和营养吸收等都局限在一个较小的区域内,从而对环境的耐受力不高,极容易受到微环境(如光照、温度、水分等)的影响而不能成功定居^[2-3],而土壤水分的缺乏往往是导致萌发幼苗死亡的首要原因。幼苗定居能否成功,关键是其根系系统能否拓展至能维持其存活的稳定水源区^[4],木本植物幼苗更容易遭受水分胁迫。干热河谷地区受地理纬度和河谷地形的影响,水分条件与热量条件分配极为不均,而滇榄仁(*Terminalia franchetii*)作为金沙江干热河谷地区一级标志种植物之一,同时也是金沙江干热河谷地区几种重要天然植被类型之一^[5],对其种子萌发及幼苗早期生长的研究能够为干热河谷地区天然植被恢复工作提供一定的参考。本研究主要探讨水分条件对其种子萌发及幼苗早期生长阶段的影响,探索滇榄仁种群天然更新的障碍因子,从而为干热河谷地区天然植被的保护及合理开发利用提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料准备

1.1.1 种子的采集与处理 滇榄仁种子于2015年9月采自金沙江干热河谷元谋段滇榄仁群落的成年植株林冠下。将野外采集的种子装入种子袋内,带回国家林业局元谋荒漠生态系统定位观测站(25°40'11" N, 101°51'47" E)(元谋生态观测站)实验室进行净种处理。滇榄仁种子为翅果,净种过程主要是把霉变种子、虫害种子、枯枝杂叶等清理掉,保留外形完好的种子。净种后,随机取完好种子30粒调查种子饱满率,重复8次。

1.1.2 土壤的采集 试验所需土壤取自滇榄仁林下0~30 mm,带回实验室后去除枯枝等杂质,烘箱中80°C 24 h烘干,然后粉碎,用孔径为2.0 mm的土壤筛过筛备用。

1.1.3 试验所需幼苗的准备 于2016年5月15日在元谋生态观测站大棚内平整土地、浇水,翌日待土壤充分吸收水分后,将采集的当年成熟种子均匀撒播在苗圃上,再覆薄土,定期浇水,萌发幼苗备用。

1.2 水分对种子萌发的影响

为减少其他环境因子的影响,试验在国家林业局元谋荒漠生态系统定位观测站实验室25°C恒温箱(FKP-01,湖北省黄石市医疗器械厂)内进行,取内径65 mm、高105 mm广口玻璃瓶,每瓶先平铺100 g过筛后的土壤,播种100粒种子后覆土100 g,再分别加入不同量的自来水配制成含水量为5%、10%、15%、20%、25%、30%、40%、50%和60%的培养基质(含水量=水重×100%/干土重),共9个处理,每处理4次重复,每天称重补充蒸发水分。

种子发芽以幼苗第一对真叶出现作为萌发标准^[6],依据宋松泉^[7]等的方法,采用发芽率、发芽速率、整齐度3个指标对种子萌发进行评价。

发芽率(%):

$$G = \frac{N}{S} \times 100\% \quad (1)$$

发芽速率:

$$MGR = \frac{1}{MGP} = \frac{1}{\sum[(D \times N) / \sum N]} \quad (2)$$

整齐度(Uniformity):

$$U = \frac{1}{Var(D)} \quad (3)$$

式中,N—发芽种子总数;S—供试种子总数;MGP—平均萌发时间;D—各种子发芽所需时间,一般以天为单位;Var—各种子发芽所需时间分布的方差。

滇榄仁种子为一个具等大3翅的翅果,翅果较难分离且剥离的种子不能用于播种,所以试验均采用完好的翅果直接播种。滇榄仁种子空壳率较高,饱满率仅为21.17%。所述种子发芽率是种子实际萌发情况与饱满度换算后的种子发芽率。

1.3 水分对幼苗早期生长的影响

1.3.1 试验布置及管理 参考刘方炎^[8]方法, 干热河谷地区降雨量分配严重不均, 85%的降雨主要集中在雨季早、中期, 旱季几乎无降雨。以元谋地区2009—2015年多年平均降雨量为参考设置施水量梯度, 共设置4个水平, 即稀少(120 mm)、较少(180 mm)、充足(240 mm)和极充足(360 mm)。试验共计施水30次, 故每次施水量分别为4、6、8 mm和12 mm。所用塑料花盆[†]18 cm、深度14 cm, 因此, 具体施水量换算后分别为102、153、203 mL和305 mL。模拟天然降雨过程, 采用浇花用喷壶均匀施于花盆土壤表面。试验期间将大棚四周卷起, 以保证室内外温度基本相同。

于2016年7月15日, 从滇榄仁苗圃里选取生长良好、长势基本一致(苗高约5~7 cm)的幼苗60株, 每个塑料花盆种植3株幼苗, 设置5个重复。待定植后, 试验从2016年8月1日开始, 每隔2 d施水1次, 共计施水30次, 试验持续到2016年10月30日。试验结束时, 已有部分幼苗出现叶片发黄或者整株枯萎的现象, 标记为死亡^[9~11]。

1.3.2 幼苗植株生长指标的测定 于2016年11月2日, 从存活的幼苗中, 每组随机选取5株幼苗(每个花盆取1株幼苗), 分别记录株高、基径、萌枝数、主茎叶片数。并将幼苗小心挖出洗净后, 测量主根长、最大叶片长、单株叶面积。幼苗叶面积采用便携式激光叶面积仪AM-300测量, 以幼苗所有叶片面积之和记为单株叶面积。最后, 用铝盒分别盛放幼苗的根、茎(含叶柄)和叶片于85℃烘箱中烘干48 h后再称重, 用于计算幼苗总干质量、根冠比(地下部分:地上部分)和比叶面积(比叶面积=叶片面积/叶片干质量)。

1.4 数据处理与分析

利用SPSS16.0统计分析软件对数据进行处理分析, 用方差分析比较数据间的差异, 采用LSD进行多重比较; 柱状图使用Excel 2003软件绘制。

2 结果与分析

2.1 水分对种子萌发的影响

土壤水分含量对滇榄仁种子萌发具有显著影响($P<0.05$)(表1), 土壤水分含量为5%和60%时未有种子萌发, 其余处理条件下种子能够萌发。滇榄仁种子发芽率约为20.8%~92.3%, 20%水分条件下发芽率最大, 为92.3%, 15%~40%水分条件下发芽率差异不显著。进一步对种子发芽速率及整齐度进行分析, 发现30%水分条件下发芽速率最大, 与40%、25%及20%下发芽速率对比差异并不

显著($P>0.05$), 50%下发芽速率最小, 与10%下发芽速率对比差异不显著; 25%下发芽整齐度最好, 其次是30%, 二者显著高于其它水分条件下发芽整齐度。对10%~50%下7个水分梯度下的种子萌发进程的观察发现, 播种后6 d种子即萌发, 萌发前期15%~40%含水量下萌发曲线基本一致, 而10%和50%含水量下滇榄仁种子存在萌发滞后现象, 分别在播种后11 d和17 d才开始萌发。播种后12~15 d种子萌发进入高峰期, 萌发率约占总萌发率的42.9%~83.3%。不同处理下种子播种后35 d萌发基本停止, 仅50%水分下偶有种子萌发(图1)。说明滇榄仁种子能够在含水量为15%~40%的土壤中较好地萌发, 当土壤含水量<15%或>40%时, 种子萌发受到严重抑制, 适宜的土壤含水量为15%~25%。

表1 不同土壤含水量下滇榄仁种子萌发特征指数比较

Table 1 Seed germination in different soil water contents

土壤含水量/%	发芽率/%	发芽速率	整齐度
5	0	—	—
10	20.8±2.217b	0.056±0.025 1bc	0.014±0.000 0
15	71.4±3.916a	0.068±0.014 4b	0.039±0.018 4
20	92.3±2.217a	0.086±0.004 3ab	0.133±0.131 1
25	89.3±0.577a	0.090±0.005 3a	0.825±1.451 9
30	56.6±1.708ab	0.098±0.009 3a	0.247±0.258 1
40	62.5±2.217ab	0.091±0.017 4a	0.172±0.149 8
50	23.8±0.817b	0.037±0.009 3c	0.024±0.010 9
60	0	—	—

注: 同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

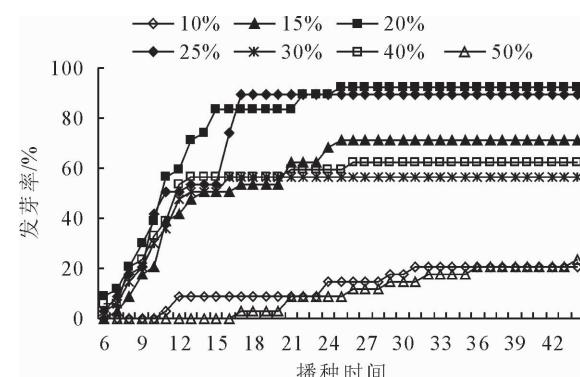


图1 不同水分处理下滇榄仁种子的萌发进程

Fig. 1 Seed germination in different water contents

2.2 水分对幼苗早期生长的影响

2.2.1 水分对幼苗植株存活状况的影响 不同施水量之间幼苗死亡状况存在较大差异。水分充足(240 mm)和极充足(360 mm)条件下, 幼苗均没有出现死亡的现象, 而水分稀少(120 mm)和较少(180 mm)条件下, 幼苗死亡率分别为33.3%和20%。

2.2.2 水分对幼苗植株形态的影响 随着施水量的增加, 幼苗株高、基径、主根长以及萌枝数均出现不同程度的增加, 方差分析结果亦表明, 不同施水量条件下, 幼苗株高、基径及主根长存在显著差异, 而萌枝数

受土壤水分条件的影响极显著(图 2, $P < 0.01$)。

2.2.3 水分对幼苗叶片形态的影响 随着施水量的增加, 幼苗叶片数、最大叶片长度、单株叶面积以及比叶面积均出现不同程度的增加。方差分析结果表明, 不同施水量条件下, 滇榄仁幼苗叶片数、最大叶片长度以及比叶面积存在显著差异, 单株叶面积存在极显著差异(图 3)。

2.2.4 水分对幼苗生物量分配的影响 随着施水量的增加, 幼苗地上部分(包括茎干和叶片)、地下部分以及全株生物量干重均出现不同程度的增加。方差分析结果表明, 随着水分供给的增加, 滇榄仁幼苗生物量呈极显著增加趋势。根冠比是植株地下部分(根)与地上部分(茎、叶)的比值(图 4)。随着施水量的增加, 滇榄仁幼苗根冠比出现明显下降, 在水分条件不充足时, 滇榄仁幼苗亦调整地上地下部分的生长来适应恶劣的环境条件。方差分析结果亦表明, 不同施水量条件下滇榄仁幼苗根冠比存在极显著差异。

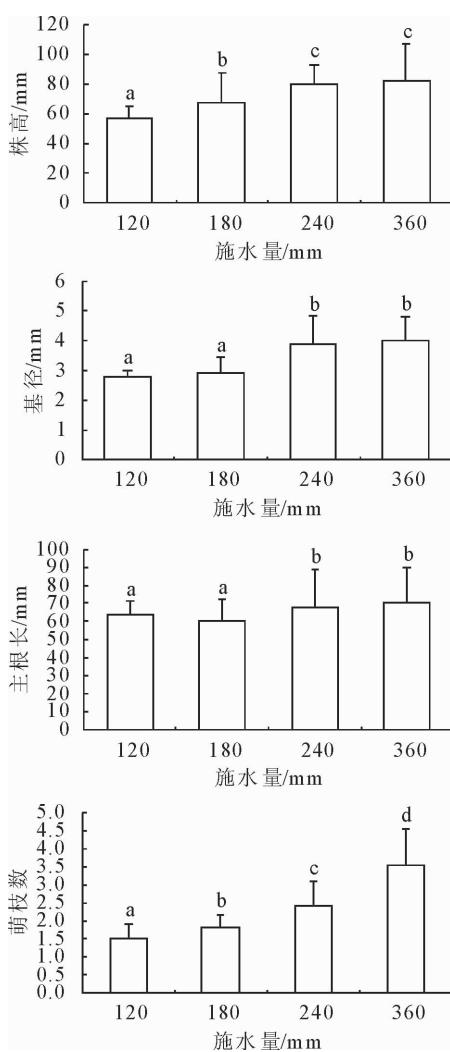


图 2 不同施水量条件下幼苗植株形态特征

Fig. 2 Morphological characteristics of seedlings in different water supply

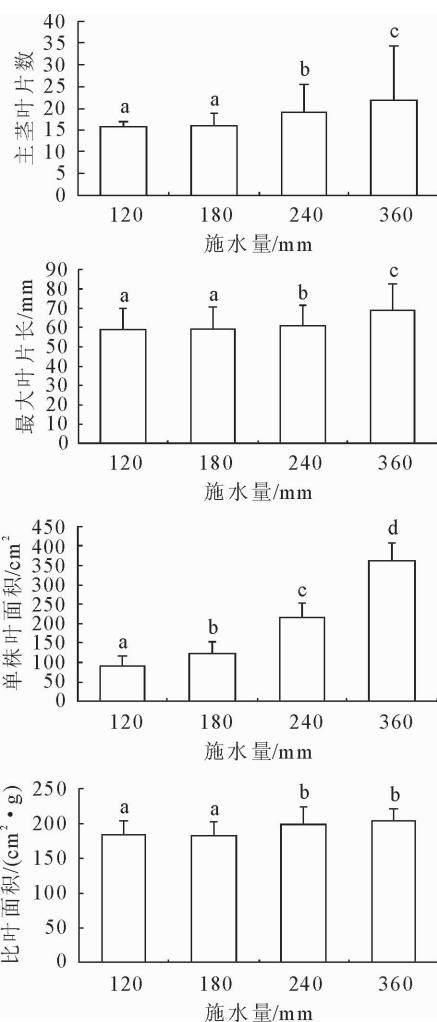


图 3 不同施水量条件幼苗叶片特征

Fig. 3 Leaf characteristics of seedlings in different water supply

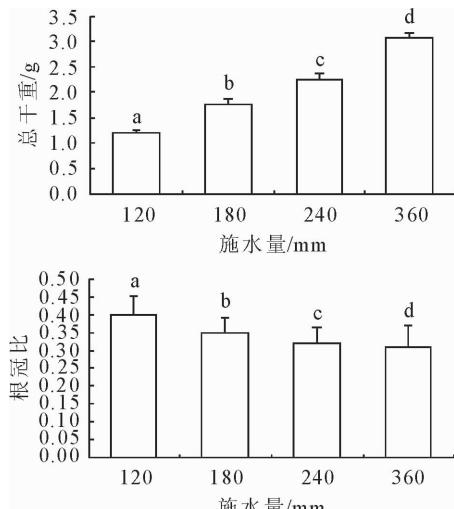


图 4 不同施水量条件下幼苗生物量干重及其分配特征

Fig. 4 Dry biomass and its allocation characteristics of seedlings in different water supply

3 结论与讨论

3.1 滇榄仁种子萌发对水分条件的响应

水分是种子萌发的先决条件, 只有在种子细胞

内自由水增多的条件下,才有可能使种子中一部分贮藏物质变为溶胶,同时使酶活化或合成而起催化作用^[12-13]。水分过多或不足都不利于萌发,水分过多间接造成氧气缺乏,不仅使发芽力下降,有时还导致幼苗形态异常^[14]。水分供应不足,难以满足物质代谢需求,即造成干旱胁迫^[15]。本研究发现,滇榄仁种子在 15%~40% 的土壤水分条件下可较好地萌发,当土壤水分含量等于或小于 15% 以及等于或大于 40% 时受到强烈抑制,甚至完全不能萌发(如 5% 和 60% 的含水量条件下)。研究发现当土壤含水量在 15%~25% 时,其发芽率、发芽指数及整齐度均较高,且萌发开始时间较早。由此可知,滇榄仁种子萌发的适应土壤含水量为 15%~25%,土壤水分含量小于 15% 时种子萌发受到抑制。元谋干热河谷地区气候异常恶劣,表现为又干又热,年降雨量低且分配极度不均,雨季(5—10 月)降雨量占年降雨量的 85% 以上,旱季存在水分严重缺乏的状况^[13,15]。野外调查亦发现,滇榄仁种子在旱季几乎不萌发,只有当雨季来临后,种子萌发才逐渐增多,且集中在雨季早期(6 月)、中期(8 月)萌发。通过野外实测林下土壤含水量发现,雨季林下土壤含水量约 15%,旱季土壤含水量不足 5%,可见,土壤水分条件是干热河谷地区滇榄仁种子萌发的障碍因子。

3.2 滇榄仁幼苗早期生长对水分条件的响应

水分通常被认为是影响幼苗生长的最为关键的因子之一,主要是因为幼苗早期阶段根系系统发育不完善,其水分、养分吸收都局限在一个较小的区域内,微环境中如水分条件的较小变动都可能极大地影响幼苗的存活。在森林环境中,幼苗的早期生长速率直接影响甚至决定幼苗能否成功定居^[16]。因此,在幼苗早期生长阶段,水分条件对其生长甚至存活有较大影响,这种限制作用随着植株年龄、大小的增长而逐渐减少,故刚萌发的幼苗极易受水分缺失影响而无法存活^[13,17]。幼苗发育的子叶阶段死亡率特别高,主要是因为这一阶段根系很短,子叶中贮藏的营养不能满足幼苗生长的需要,故轻微的环境胁迫都会造成幼苗的死亡,但随着幼苗的不断生长,幼苗会通过生长特征指标的变化来逐步适应干旱胁迫,逐步提高自身的耐受能力和接受驯化的能力^[18]。本研究发现,水分条件对滇榄仁幼苗早期生长过程有极显著的影响,在水分供给不断减少时,其植株形态,包括株高、基径、主根长以及萌枝数等均出现不同程度的减少,甚至在降雨量接近旱季多年平均降雨量时出现了不同程度的死亡现象,而当水分供给增加时,滇榄仁植株形态特征亦表现为不断增大。而且,本试验是每间隔 2d 供水 1 次,且用喷

壶洒水,幼苗水分供给相对均匀,不会出现长期缺水的现象,然而在野外条件下,降雨通常分配不均,旱季降雨量约为 15%,时常出现长时间不降水或者未形成有效降水(直达土层内的降水)。由此可知,滇榄仁幼苗在严重缺水条件下已经不能通过自身调节来适应环境变化,故水分是滇榄仁幼苗早期生长阶段的重要障碍因子。野外调查幼苗分布状态发现,一年生萌发幼苗数较多,但主要存在于母株旁、灌丛下等土壤水分保存更好、人为干扰程度更小的林荫处,而一年生萌发幼苗难以度过极度干旱的旱季,成功进入下一个生长阶段^[19]。

植株通过叶片进行光合作用,制造植株生长所需的营养物质。叶片的数量、大小等生长特征对植物的生长及生存均具有重要影响。通常,较小的比叶面积可以增加单位叶面积对 CO₂ 的吸收量,同时,还可以在出现干旱等水分不足情况下提高植物对水分的吸收利用率,因此,比叶面积通常随着水分胁迫的加剧而降低,随着水分供给的增加而加大^[13,17]。本研究发现,不同施水量之间幼苗单株叶面积存在极显著差异,主茎叶片数、最大叶片长及比叶面积也存在显著差异,表明在滇榄仁幼苗早期生长阶段,叶片的生长特征对水分条件极为敏感。当水分供给充足和极充足时,幼苗主茎叶片数、最大叶片长等生长特征均有显著增加,从而导致单株叶面积增加;而在水分胁迫条件下(水分供给稀少和较少时),幼苗主茎叶片数、最大叶片长都有明显地减少,从而导致单株叶面积减小,这说明滇榄仁在水分胁迫条件下通过一定的形态反应来增强对水分胁迫的耐受力及接受驯化的能力。幼苗在生长过程中会达到最大的生存适合度来适应外界环境^[13,20]。植株将资源分配给茎,主要是为了构建和维持植株的生长,将资源分配给根,为了吸收更多的营养和水分等,在干旱气候地区,植物具有较深的根系分布以适应干旱条件^[21]。生物量分配向根部转移可以抵御水分胁迫,也可以提高氮化物的浓度,使得单位叶面积的光合作用能力提高。本研究发现,滇榄仁幼苗早期生长阶段随着水分胁迫的加剧,幼苗总干重出现显著下降,但根冠比出现了显著上升,这与大部分植物的生存策略相似^[22],表明滇榄仁作为元谋干热河谷地区的乡土植物,已对当地极端恶劣的外界环境有了一定的适应性,从而形成了干热河谷地区特有的几种重要天然植被类型之一。

综上所述,干热河谷乡土树种滇榄仁种子萌发及幼苗早期生长阶段均受到水分条件的强烈限制,而干热河谷地区光照和水分的耦合作用加剧了林下土壤水分的蒸发速率,使得森林环境中的土壤水分

远不能满足其植被更新的需要。在今后的乡土树种保护中应注意水分条件的改善,比如封山育林,加强群落物种多样性的保育,从而改善林下微环境,使刚萌发幼苗免遭强光、高温导致短暂缺水而死亡。更为重要的是要改善林下退化的土壤,提高其贮水能力、抗旱能力,营造一个集水、保水的环境才能从根本上解决天然植被的自我更新。

参考文献:

- [1] 刘志民,蒋德明,高红瑛,等.植物生活史繁殖对策与干扰关系的研究[J].应用生态学报,2003,14(3):418-422.
LIU Z M, JIANG D M, GAO H Y, et al. Relationships between plant reproductive strategy and disturbance[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(3): 418-422. (in Chinese)
- [2] GUTTERMAN Y. Strategies of seed dispersal and germination in plants inhabiting deserts [J]. The Botanical Review, 1994, 60(4):373-425.
- [3] 于顺利, SERNBERG M, 蒋高明, 等. 地中海沿岸沙丘微生境对幼苗出现时空格局的影响[J]. 生态学报, 2004, 24(7):1346-1352.
YU S L, STERNBERG M, JIANG G M, et al. The impact of microhabitats on the temporal and spatial patterns of seedling emergence in Mediterranean coastal sand dunes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(7):1346-1352. (in Chinese)
- [4] 刘国军,张希明,吕朝燕,等.不同供水条件下梭梭幼苗生长动态的研究[J].中国沙漠,2012,32(2):388-394.
- [5] 金振洲,杨永平,陶国达.华西南干热河谷种子植物区系的特征、性质和起源[J].云南植物研究,1995,17(2):129-143.
- [6] PAMMENTER N W, FARRANT J M, BERJAK P. Recalcitrant seeds: short-term storage effects in *Avicennia marina* (Forssk.) Vierh. may be germination-associated changes[J]. Annals of Botany, 1984, 54(6):843-846
- [7] 宋松泉,程红焱,姜孝成,等.种子生物学[M].北京:科学出版社,2008:95-98.
- [8] 刘方炎,张志翔,王小庆,等.水分条件对锥连栎种子萌发及幼苗早期生长的影响[J].热带亚热带植物学报,2011,19(2):105-112.
LIU F Y, ZHANG Z X, WANG X Q, et al. Effects of water supply on seed germination and early seedling growth of *Quercus franchetii*[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2011, 19(2):105-112. (in Chinese)
- [9] 李轩然,刘琪璟,蔡哲,等.千烟洲针叶林的比叶面积及叶面积指数[J].植物生态学报,2007,31(1):93-101.
LI X R, LIU Q J, CAI Z, et al. Specific leaf area and leaf area index of conifer plantations in Qianyanzhou station of subtropical China[J]. Journal of Plant Eology, 2007, 31(1):93-101. (in Chinese)
- [10] 闫兴富,曹敏.不同光照对望天树种子萌发和幼苗早期生长的影响[J].应用生态学报,2007,18(1):23-29.
YAN X F, CAO M. Effects of light intensity on seed germination and seedling early growth of *Shorea wantianshuea* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(1):23-29. (in Chinese)
- [11] 张风娟,李继泉,徐兴友,等.环境因子对黄顶菊种子萌发的影响[J].生态学报,2009,29(4):1947-1953.
ZHANG F J, LI J Q, XU X Y, et al. Influence of environmental factors on seed germination of *Flavera bidentis* (L.) Kuntza[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(4):1947-1953. (in Chinese)
- [12] 胡晋.种子生物学[M].北京:高等教育出版社,2006:156-183.
- [13] 刘方炎.金沙江干热河谷滇榄仁与锥连栎幼苗建成机制及生态适应性[D].北京:北京林业大学,2011.
- [14] 鱼小军,师尚礼,龙瑞军,等.生态条件对种子萌发影响研究进展[J].草业科学,2006,23(10):44-49.
YU X J, SHI S L, LONG R J, et al. Research progress on effects of ecological factors on seed germination[J]. Pratacultural Science, 2006, 23(10):44-49. (in Chinese)
- [15] 蒋俊明,费世民,何亚平,等.金沙江干热河谷植被恢复探讨[J].西南林学院学报,2007,27(6):11-15.
JIANG J M, FEI S M, HE Y P, et al. Study on vegetation restoration in dry-hot valleys of the Jinshajiang River[J]. Journal of southwest forestry college, 2007, 27(6):11-15. (in Chinese)
- [16] HUSTON M, SMITH T. Plant succession: life history and competition [J]. American Naturalist, 1987, 130(2), 168-198.
- [17] BURSLEM D F R P, GRUBB P J. Responses to simulated drought and elevated nutrient supply among shade-tolerant tree seedlings of lowland tropical forest in Singapore [J]. Biotropica, 1996, 28(4b):636-648.
- [18] KOZOWSKI J. Why are species' body size distributions usually skewed to the right? [J]. Functional Ecology, 2002, 16(4), 419-432.
- [19] 王小庆,刘方炎,李昆,等.元谋干热河谷滇榄仁群落林下物种多样性与幼苗更新特征[J].浙江农林大学学报,2011,28(2):241-247.
WANG X Q, LIU F Y, LI K, et al. Species diversity and seedling regeneration of three *Terminalia franchetii* communities in the hot-dry Yuanmou Valley[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2011, 28(2):241-247. (in Chinese)
- [20] LAMBERS H, POORTER H. Inherent variation in growth rate between higher plants: a search for physiological causes and ecological consequences [J]. Advances in Ecological Research, 1992, 23(3):187-261.
- [21] 英慧,殷有,于立忠,等.土壤水分、养分对树木细根生长动态及周转影响研究进展[J].西北林学院学报,2010,25(3):36-42.
YING H, YIN Y, YU L Z, et al. Effects of soil moisture and soil nutrient on the dynamic and turnover of the tree fine roots: a review[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(3):36-42. (in Chinese)
- [22] 周白云,梁宗锁,刘启明,等.干旱胁迫下酸枣生长与耗水特性研究[J].西北林学院学报,2010,25(4):45-48.
ZHOU Z Y, LIANG Z S, LIU Q M, et al. Growth and water consumption characteristics of wild jujube on different soil water contents[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(4):45-48. (in Chinese)