

DOI: 10.5846/stxb201310312633

马赞花, 张铜会, 刘新平, 毛伟, 岳祥飞. 春季小降雨事件对科尔沁沙地尖头叶藜萌发的影响. 生态学报, 2015, 35(12): 4063-4070.

Ma Y H, Zhang T H, Liu X P, Mao W, Yue X F. Effects of small rainfall events in spring on germination of *Chenopodium acuminatum* in Horqin Sandy Land. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12): 4063-4070.

春季小降雨事件对科尔沁沙地尖头叶藜萌发的影响

马赞花, 张铜会*, 刘新平, 毛伟, 岳祥飞

中国科学院大学寒区与旱区环境与工程研究所, 兰州 730000

摘要:通过人工模拟降雨试验研究了科尔沁沙地优势草本植物尖头叶藜萌发和幼苗建成对春季小降雨事件(2、4、8 mm 和自然降雨)的响应。结果表明:不同降雨处理对尖头叶藜的萌发和幼苗建成有显著影响($P < 0.05$)。8mm 降水量是促使尖头叶藜萌发的最小降雨阈值。不同降雨量处理下尖头叶藜萌发数量大小顺序为:8mm 处理>对照>4 mm 处理>2mm 处理;而高度和冠幅依次是 2 mm 处理(2.23 cm 和 7.15 cm²)>对照(2.03 cm 和 6.21 cm²)>4mm 处理(1.86 cm 和 5.01 cm²)>8mm 处理(1.48 cm 和 4.72 cm²);降雨量为 8mm 的地上生物量最多(45.26 g/m²),对照为 35.49 g/m²、4mm 处理为 26.54 g/m²、2mm 处理为 15.26 g/m²。尖头叶藜幼苗的水分利用效率与每次降水量呈显著地正相关关系,随着每次降雨量的增大地上生物量逐渐增大。本试验中各处理的总降雨量一致,但地上生物量不同且差异显著。每次降雨量×降雨次数的分布状况影响了尖头叶藜幼苗的地上生物量。科尔沁沙地尖头叶藜萌发及其幼苗建成在密度、形态和水分利用效率和地上生产力上对不同模式的小降雨做出了积极的响应。
关键词:小降水事件;降雨强度;萌发;幼苗建成;生态特征;科尔沁沙地

Effects of small rainfall events in spring on germination of *Chenopodium acuminatum* in Horqin Sandy Land

MA Yunhua, ZHANG Tonghui*, LIU Xinping, MAO Wei, YUE Xiangfei

Cold and Arid Regions of Environmental and Engineering Research Institute, University of Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: This paper assessed the effects of small artificial rainfall events (2 mm, 4 mm, 8 mm and natural rainfall as control) on the germination and seedling growth of *Chenopodium acuminatum* in Horqin Sand Land. Analysis showed that artificial rainfall treatment had significant impacts on the germination and seedling growth of *Chenopodium acuminatum* ($P < 0.05$). The rainfall threshold in Horqin Sand Land for the germination of *Chenopodium acuminatum* is 8mm. The plant number of seedlings in 8 mm rainfall treatment, natural rainfall (CK), 4 mm and 2 mm is in a decreasing order, and the plant height and canopy of seedling in different rainfall treatments were in the order: 2 mm (2.23 cm and 7.15 cm²) > CK (2.03 cm and 6.21 cm²) > 4 mm (1.86 cm and 5.01 cm²) > 8 mm (1.48 cm and 4.72 cm²). Aboveground biomass was in the order of 8 mm (45.26 g/m²) > CK (35.49 g/m²) > 4 mm (26.54 g/m²) > 2 mm (15.26 g/m²). Water use efficiency of *Chenopodium acuminatum* seedling was positively correlated to rainfall of each time and the aboveground biomass was increased with rainfall amount. Total rainfall at last in the experiment was the same, but the aboveground biomass was significantly different. The rainfall amount × rainfall times was a determinant factor of aboveground productivity of *Chenopodium acuminatum* seedlings. The density and water use efficiency, germination and seedling growth of *Chenopodium acuminatum* all positively responded to small rainfall events in Horqin Sand Land.

基金项目:973 项目课题(2009CB421303); 国家科技支撑项目课题(2011BAC07B02); 中国科学院战略性先导科技专项子专题(XDA05050201-04-01); 国家自然科学基金项目(41371053, 31300352)

收稿日期:2013-10-31; **网络出版日期:**2014-08-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangth@lzb.ac.cn

Key Words: small rainfall events; rain intensity; germination; seedling establishment; ecological characteristics; Horqin Sandy Land

在干旱和半干旱地区,水分是植物生长的主要限制因子之一,生态系统中的水分主要来自于降水输入的土壤水分^[1]。尽管在干旱半干旱地区降雨十分缺乏,但每一次的降雨所引起的短期的水资源富集却可以在一段时间内促进植物萌发并满足植物的生长需要^[2]。而小降雨事件在干旱半干旱地区降雨频次中占很大比例,统计近 40 年科尔沁沙地的降雨数据发现本地区降雨模式为小雨量,高频率,10 mm 以下的小降雨事件占总降雨频次的 90%。国外的一些研究^[3-5]认为小雨量降水在生态学上意义不大。国内的一些研究如郭柯等^[6]在毛乌素沙地的研究表明,小于 1 mm 的降雨对流动沙地都没有效果;小于 5 mm 的降雨在固定沙地下渗的深度只有 5 cm 左右,雨后绝大部分的雨水被蒸发掉,对固定沙地灌木根系层土壤水分的补充基本没有效果。又如姚德良^[7]等对沙坡头的研究表明,小于 8 mm 的降水均属无效降水。但是还有一些研究持相反结论,Sala 和 Lauenroth 的研究^[8]表明,半干旱区小降雨事件(<5 mm)对草本植物有显著的生态作用。还有研究^[9]表明 2.5 mm 的降雨也会对仙人掌类植物产生显著影响。李新荣等在沙坡头的研究^[10]表明,发生<10 mm 的降水可以支持表土层的微生物和植物的生长。以上研究更多地关注单次小降雨事件对植被的影响,而对小降雨的时间分布对沙地植被的研究相对较少。而对小降雨下植被的生产力的研究就更少。许多研究结果显示,草原植物群落地上净初级生产力与年平均降雨量之间呈现显著正相关关系^[11-13]。也有研究^[14]表明沙地植被的地上生产力和降雨量并不显著正相关,相反却表现出负相关关系,降雨变化却和生成力呈显著的正相关。还有研究^[15]表明增大降雨变率会对草地的干物质积累起负面效果,生产力和降雨变率之间的关系表现出在全生育的前期两者之间具有促进作用,在后期则具有抑制作用。综上所述,目前小降雨事件对沙地植被生长发育的研究还很有限,研究结果之间差异也很大,没有规律性的结论,需要进行更加广泛深入的研究。另外,目前关于小降雨事的研究都局限于小降雨是否有效,而在小降雨频发的情况下地上植被生产力与降雨量关系是否与以上研究结论一致尚不了解。本试验的主要目的就是在小降雨事件频发的科尔沁沙地研究不同级别的小降雨事件对沙地植被萌发和幼苗期生产力的影响。由于藜科植物适应恶劣环境的能力较强,在沙漠化生境中优势度更为明显,在极严重沙漠化生境中藜科植物的优势度高达 80.71^[16],藜科植物对环境变化的积极响应,其在沙漠化逆转过程中藜科植物起着关键作用^[17]。因此本试验选取科尔沁沙地 3 种常见的藜科植物之一——尖头叶藜(*Chenopodium acuminatum* Willd)为研究对象。试验比较不同模式的小降雨处理对科尔沁沙地尖头叶藜种子萌发和幼苗建成的影响,为科尔沁沙地其他一年生植被对小降雨的响应提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

本试验在中科院寒区与旱区环境与工程研究所科尔沁沙地奈曼沙漠化研究站(42°54'N, 120°41'E)进行。实验区概况^[18-20]如下:科尔沁沙地位于内蒙古自治区东部,属于半干旱大陆性季风气候区,春季干旱多风,年均气温 6.5℃,1 月平均气温-13.1℃,极端最低气温-29.7℃,7 月平均气温 23.6℃,极端最高气温 39.0℃,≥10℃年积温 3218℃,无霜期 151d,多年平均降水量在 360 mm 左右,年均蒸发量 1935.4 mm。年均日照 2951.2 h,年均风速 3.5—4.5 m/s,其中 4—5 月平均风速可达 5.0—6.0 m/s。降雨模式为小雨量,高频率,图 1 显示了奈曼地区从 1971—2010 年 5 月份的降雨分级频率统计图。通过分析奈曼旗从 1971—2010 年 5 月份的降雨数据,发现本地区春季的降雨模式为小雨量,高频率,如图 1 所示,5—10 mm 降雨占总降雨频次的 8%,0—5 mm 的小雨量降雨占总降雨频次的 91%,其中小于 2 mm 以下的小降雨事件占总降雨频次的 55%,2—5 mm 的小降雨事件占总降雨频次的 37%。土壤类型为风沙土,地貌类型以流动沙丘、半固定沙丘、固定沙丘和面积不等的平缓沙地和低洼地交错分布为特征。科尔沁沙地最常见的 3 种藜科植物^[17]是沙蓬

(*Agriophyllum squarrosum* Linn.)、大果虫实(*Corispermum macrocarpum* Bunge)和尖头叶藜。

1.2 试验设计

本试验在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所奈曼沙漠化研究站的遮雨棚内进行。该遮雨棚顶部透明,两侧通风。实验 2011 年 4 月底开始直到 5 月底结束。通过分析奈曼旗从 1971—2010 年 5 月份的降雨数据,如图 1 所示,5—10 mm 降雨占总降雨频次的 8%,0—5 mm 的小雨量降雨占总降雨频次的 91%,其中小于 2 mm 以下的小降雨事件占总降雨频次的 55%,2—5 mm 的小降雨事件占总降雨频次的 37%。以此为基础,本试验选择了每次降雨为 2、4、8 mm 来代表 0.1—2 mm,2—5 mm,5—10 mm 范围内的降雨量。试验方案为:总降雨量不变,即植被生长期降雨总量控制为历年平均水平不变,但是每次降雨量分别 2、4、8 mm 和对照 CK,共 4 个处理,每个处理 9 个重复。试验在直径为

30cm,高为 50cm 的聚氯乙烯(PVC)桶中进行,桶的底部打孔。在 4 月中旬植被还未萌发时,到优势物种为尖头叶藜的固定沙地上,选择地势相同,往年植被生长状况均一的地块,以保证土壤中的植被种子含量均匀。将地表上枯枝败叶和石子之类的杂质去除,挖一条两边为沟的凸字形土柱带(宽×高为 30cm×45cm),每隔 30cm 形成一个目标土柱,用小铲子将土柱加工成圆柱形,在这个过程中小心地保护土柱不要受到破坏,同时也不破坏土壤微生物,将土柱用无底的硬质 PVC 桶套住,用铁锹沿着桶底将套桶和土柱挖出来,将直径为 30cm,长为 30cm×45cm 的土柱按原状脱出填入到试验用的 PVC 桶中,桶内土壤表面离桶沿均为 5cm。之后将进行人工模拟降雨的 27 个桶放在遮雨棚,作为对照的 9 个 PVC 桶则埋在遮雨棚外。所有试验 PVC 桶都埋入土中,桶沿儿与地齐平,之后模拟降雨。人工模拟降雨总量依据近 40 年来奈曼地区 5 月的平均降水量为 31.6mm≈32mm。以图 1 为基础,本试验选择了每次降雨为 2、4、8 mm 来代表 0.1—2、2—5、5—10 mm 范围内的降雨量。按照每次降雨 2、4 mm 和 8mm 计算出需模拟降雨的频次。则 5 月份每次降雨 2mm 的处理模拟降雨次数为 16 次,1 次/2d;4mm 的处理为 8 次,1 次/4d;8mm 的处理为 4 次,一次/8d。对照处理接收 2011 年 5 月份的自然降雨。在 2011 年 5 月份的降雨观测结果为:降雨总量为 31.8mm,分别为 10.5、5、5.45、7.1、3.4、0.33 mm。模拟降雨开始以后勤于观测,发现植被开始萌发,只观测记录尖头叶藜的萌发和生长发育情况,而其他植被则不做任何处理以模拟物种竞争。

1.3 数据获取和计算

记录各处理 9 个重复 PVC 桶中尖头叶藜的萌发时间,萌发之后每周监测一次以下指标:株高、冠幅、密度,同时每次都测量土壤表层 15cm 的水分,用 TRIME-FM-P3(IMKO Micromodultechnik, Ettlingen, Germany)便携式土壤水分测量仪。到 5 月底测定幼苗地上生物量,齐根剪去地上部分,放入烘箱,在 80℃烘干 48 h 后称重,计算水分利用效率 WUE,在本文中为生态系统意义上的水分利用效率,即指的是单位面积上的植物消耗水量所形成的生物量(干物质),本文中的单位是 $\text{g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$ [21-22]。

1.4 统计分析方法

用 Excel 软件对数据整理和初步分析,采用 SPSS17.0 统计分析软件包对数据进 One-way ANOVA 方差分析和采用 Origin8.0 做相关分析,并用 LSD 法进行多重比较尖头叶藜的生态指标、水分利用率等处理间的差异。

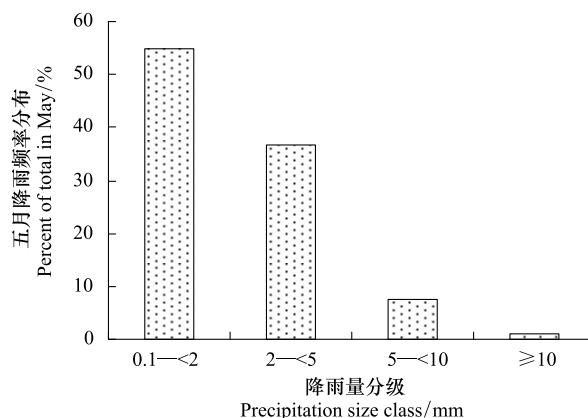


图 1 奈曼地区从 1971—2010 年 5 月份不同级别的降雨频率

Fig.1 The rainfall frequency for different rank levels in Mayin Naiman from 1971 to 2010

2 结果与分析

2.1 0—15cm 表层土壤的体积含水量

用 TRIME-PICO TDR 便携式土壤水分测量仪测量不同降雨处理条件下 0—15 cm 表层土壤的体积含水量, 所得结果如图 2 所示。

由图 2 可知, 0—15 cm 表层土壤的体积含水量受到了不同降雨处理的影响, 其中每次降雨量为 2 mm 的处理土壤表层含水量最小仅为 5% 左右, 随着每次降雨量从 2、4 mm 逐渐增大到 8 mm, 表层的土壤的体积含水量也随之分别增大到 5.9%, 7.1% 左右, 而对照的表层土壤的体积含水量则受到自然降雨强度和频率的影响而不稳定, 其平均土壤含水量为 6.45%。由于降雨量处理的差异, 表层土壤含水量在尖头叶藜的萌发和生长时期受到影响而出现变化, 这种变化必然会引起尖头叶藜的生态特征在新环境中表现出不同的适应性。

2.2 尖头叶藜的萌发时间和植株数量变化动态

根据观察遮雨棚内 3 个处理发现, 每次降雨 2、4 mm 的处理都是在第 8 天 (即两者接受降雨总量均为 8 mm) 的时候萌发的, 每次降雨是 8 mm 的处理则在第 4 天即接受 1 次模拟降雨后开始萌发的, 这就说明了在遮雨棚人工控制条件下, 小降雨事件能够促使尖头叶藜种子萌发的的重要因素是降雨总量达到 8 mm 以上。观察遮雨棚外接收自然降雨的对照发现, 在第 1 次自然降雨 10.5 mm 之后的两天尖头叶藜种子开始萌发。这与人工模拟控制条件下发现的规律一致。

在图 3 中显示的是不同处理条件下尖头叶藜植株数量的动态变化曲线, 这 4 种处理的变化趋势一致, 均为先迅速上升后趋向平衡的“J”型曲线。植株数量最多的是每次降雨量为 8 mm 的处理, 其次是自然对照、每次降雨量为 4 mm 处理, 最小值出现在每次降雨为 2 mm 处理中。其中降雨处理为 2 mm 和 4 mm 的植被数量远低于自然对照 CK 和每次降雨为 8 mm 的处理。

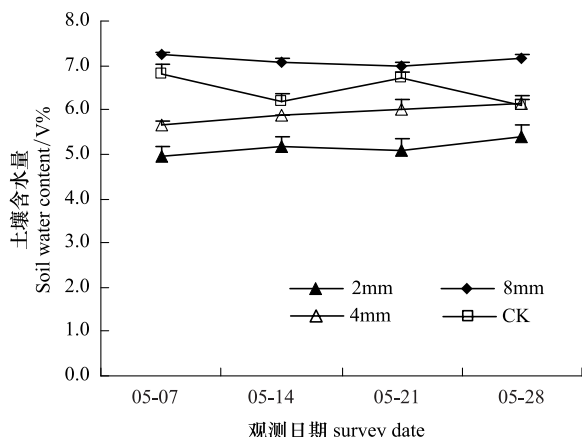


图 2 不同降雨频次下植被的土壤含水量

Fig. 2 The soil water content under different rain treatments
(Mean $\pm$ S.E. $n=9$)

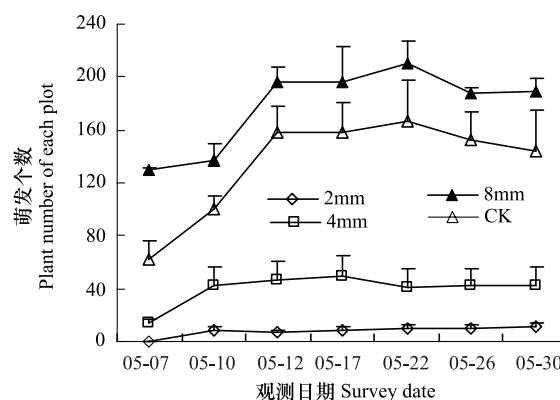


图 3 不同处理条件下尖头叶藜的植株数量动态变化

Fig. 3 Plant number dynamic curves under different treatments

2.3 不同降雨处理下尖头叶藜幼苗的株高和冠幅

图 4 所示, 尖头叶藜幼苗的高度和冠幅在模拟控制降雨的 3 个处理下, 随着每次降雨量的增大, 单株的高度和冠幅逐渐减小, 即每次降雨量为 2 mm 的值最大, 8 mm 处理下的值最小。而自然对照的单株高度和冠幅优于每次降雨量为 4 mm, 8 mm 的处理。

尖头叶藜幼苗的高度在每次降雨为 2 mm 条件下最大可以达到 2.23 cm, 大于自然对照下的 2.03 cm, 接下来是每次降雨为 4 mm 处理下的 1.86 cm, 且这三者间的差异显著; 每次降雨为 8 mm 条件下尖头叶藜植株高度最小仅为 1.48 cm, 显著低于 2 mm 处理和自然对照的高度 (图 4)。

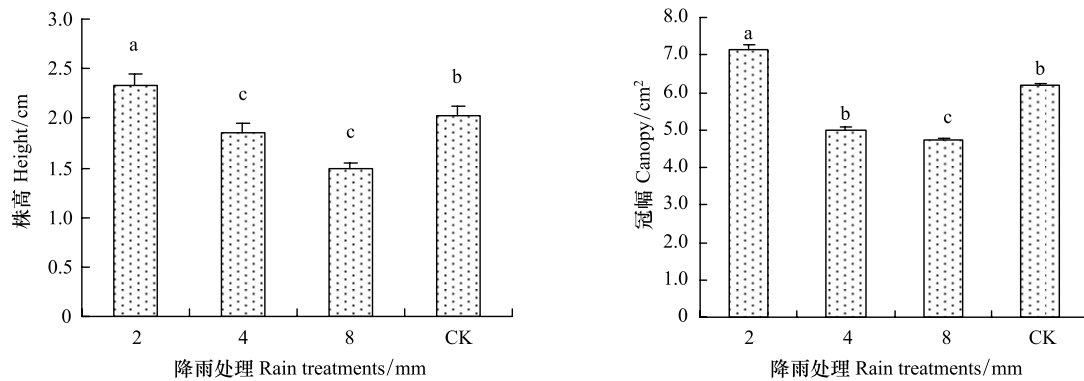


图 4 不同降雨处理下尖头叶藜的株高和冠幅

Fig.4 plant height and canopy of *Chenopodium acuminatum* under different rain treatments (Mean±S.E. n=9)

尖头叶藜幼苗的冠幅在每次降雨量为 2mm 的处理下最大为 7.15cm^2 ;自然对照和 4mm 处理下的居中,分别为 6.21cm^2 和 5.01cm^2 且两者间无显著差异;而每次降雨量为 8mm 的处理其值最小仅为 4.72cm^2 ,显著小于其他处理的值(图 4)。以上结果说明在本实验中,在植被萌发的 5 月,总降雨量不变的情况下,每次降雨量为 2mm 和 4mm 的这种雨量少频次高的降雨补给水分的方式能促使尖头叶藜幼苗的植株高度和冠幅增大。

2.4 不同降雨处理下尖头叶藜幼苗的地上生物量

在 5 月底,经过 1 个月的生长 4 种处理下幼苗地上生物量,每次降雨量为 8mm 的值最大,可达到 $45.26\text{g}/\text{m}^2$;依次是自然对照为 $35.49\text{g}/\text{m}^2$,4mm 处理的值为 $26.54\text{g}/\text{m}^2$;2mm 处理的值最小仅为 $15.26\text{g}/\text{m}^2$,这四者之间差异显著(图 5)。以上结果说明本实验中,在植被萌发和生长的 5 月份,总降雨量不变的情况下,尖头叶藜幼苗的地上生物量对每次降雨量不同的处理产生了相应的适应性,随着每次降雨量的增大,尖头叶藜幼苗的地上生物量逐渐增大。

2.5 不同降雨处理下尖头叶藜幼苗的水分利用效率

图 6 中所示不同降雨处理下尖头叶藜幼苗的水分利用效率,由于每次降雨量处理的差异,表层土壤含水量出现变化,因此影响到了尖头叶藜幼苗对水分的利用效率。这 4 种处理中水分利用效率最高的是每次降雨量为 8mm 的处理,可达到 $1.44\text{g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$;依次是自然对照为 $1.11\text{g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$,4mm 处理的值为 $0.83\text{g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$;2mm 处理的值最小仅为 $0.48\text{g m}^{-2} \text{mm}^{-1}$,这四者之间差异显著。

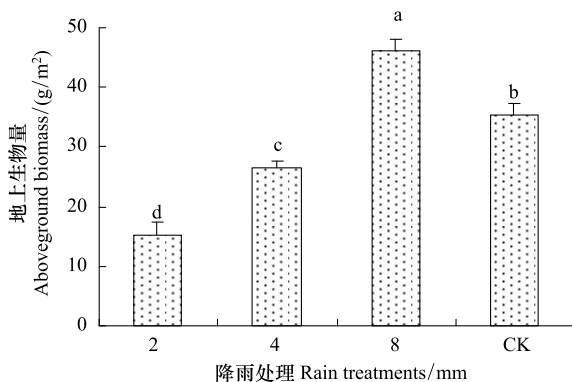


图 5 不同降雨处理下尖头叶藜的地上生物量

Fig.5 The aboveground biomass under different rain treatments (Mean±S.E. n=9)

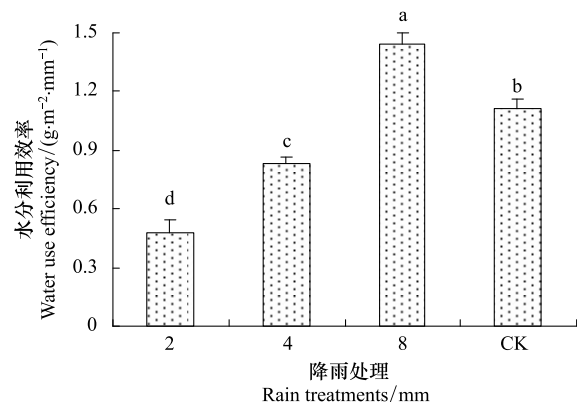


图 6 不同降雨处理尖头叶藜的水分利用效率

Fig.6 the WUE under different rain treatments (Mean±S.E. n=9)

图 7 中显示的是每次降水量与幼苗水分利用效率之间的相关关系,从图中可以看出二者之间呈线性正相

关($R^2=0.9559$),而采用 Spearman 相关分析方法对每次降水量与尖头叶藜幼苗水分利用效率进行相关分析,结果表明,小降雨条件下,尖头叶藜幼苗水分利用效率与每次降水量呈显著地正相关关系(相关系数 0.98,显著性水平 $P=0.01$)。

3 结论与讨论

水分是影响种子萌发的重要因素。由于种子成熟后期极度脱水,只有在水分条件满足的条件下经过吸胀作用,种子才能够启动萌发过程。吸胀程度取决于种子成分、种皮和果皮对水分的透性以及环境中水分的有效性^[23]。对于同物种种子,由于吸水量的不同,有可能导致种子的萌发率不一样^[24]。本实验体现了尖头叶藜的种子萌发对吸水量的需求。根据观察遮雨棚内 3 个处理发现,每当降雨量达到 8mm 时,尖头叶藜的种子开始萌发,而 CK 在第 1 场降雨 10.5 mm 之后的两天尖头叶藜种子开始萌发。这与人工模拟控制条件下发现的规律一致。以上结果说明,在科尔沁地区尖头叶藜种子的

萌发季节,并不会因为每次的降雨量小,当降雨总量大于 8mm,种子吸收足够萌发所需的水分才能萌发。在以前的研究中发现,不同的生态环境下,促使植被萌发的最小降雨阈值亦不同。例如,在莫哈韦沙漠^[25],促使植被萌发的最小降雨量是 15mm。在内盖夫沙漠^[26],促使一些沙漠物种萌发的最小降雨量范围是 10—15mm。而在科威特的研究^[27]中,发现了 4 mm 的模拟降雨足以促使一些物种的萌发,特别是车前属的物种。本试验中当降雨量达到 8mm 时,尖头叶藜的种子开始萌发只是一年份观察结果,这是否是促使尖头叶藜萌发的最小降雨阈值,需要进行多年份的连续观察和验证。

长期以来关于小于 5mm 的小降雨是否有效没有形成定性的结论,许多研究认为 5mm 以下的降水属于无效降水^[28-31],但是也有研究有相反结论,比如在王亚婷^[32]的研究发现 2mm 的降雨会影响到角茴香的根系在 0—11cm 土层内的分布。而本试验中所观察到的结果发现了小降雨事件影响到了尖头叶藜种子的萌发。8mm 处理和对照的植株密度变化趋势相似,均为先迅速上升后下降然后小幅波动保持较高水平。但是水分补充方式各不相同,8mm 处理是由于有定时定量的水分补充,而自然对照则是由于降雨时间和降雨量均为随机。可是两者均会由于一次降水较多诱导大量尖头叶藜的萌发,从而使密度维持在一个较高的水平。2mm 和 4mm 处理的变化趋势则是先少量萌发,之后慢慢上升维持一个稳定的水平。到最后植株数量最多的是 8mm 处理,其次是对照,4 mm 处理,2 mm 处理。其中降雨处理为 2 mm 和 4 mm 的植被数量远低于 8mm 处理和对照,但是个体在高度和冠幅的生长发育上远大于 8mm 处理。以上 3 种降雨模式和对照处理中,2mm 和 4mm 的处理幼苗萌发采取的分批萌发类似 K-对策^[33],即通过壮大逐渐萌发少数植株的株高和冠幅,以“质”取胜。而 8mm 和自然对照的幼苗萌发策略类似 r-对策,即通过大批萌发维持较高密度以“量”取胜。2mm 和 4mm 处理的分批萌发对策是极端生境下植物长期适应自然选择的结果^[34]。

传统的研究^[35]表明土壤水分可以影响到植物的水分利用效率。水分利用效率常被定义为一定生长季节干物质的积累量与所消耗水分的比值^[36],水分利用效率的大小决定了植物的节水能力和水分生产水平^[37]。高水分利用效率是干旱地区植物适应当地生境的重要策略^[38]。这与本试验的研究结果一致,即高水分利用效率决定了尖头叶藜幼苗地上部分生产力水平。本试验结果表明尖头叶藜幼苗水分利用效率与每次降水量呈显著地正相关关系。随着每次降雨量的增大,尖头叶藜幼苗积累的地上生物量逐渐增大。而自然对照 CK 在地上生物量积累上小于 8mm 处理条件下的,但优于 2mm 和 4mm 处理条件下的。这与对照 CK 所接受的自然降雨的强度和频率有关,而在 5 月份自然降雨量与控制条件的雨量一致均为 32mm,但每次降水量分别为

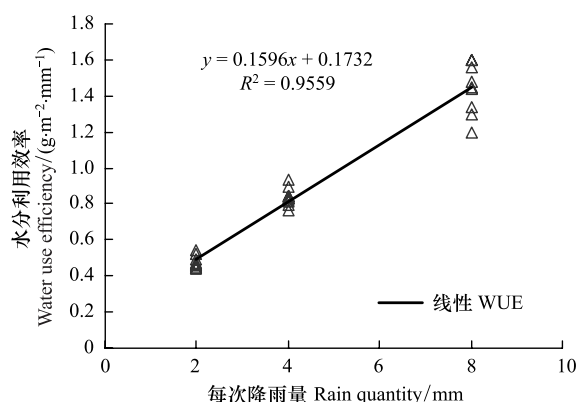


图7 每次降雨量与尖头叶藜水分利用效率的相关性

Fig.7 the correlation between rain quantity and WUE (Mean±S.E. n=9)

10.5、5、5.45、7.1、3.4、0.33 mm,其中大于4mm同时又小于8mm的降雨事件的降水量达到了总降水量的55%,而CK的水分利用效率又居于2、4mm处理和8mm处理之间,这与本试验模拟控制条件下得出的规律相符,即小降雨条件下,尖头叶藜幼苗水分利用效率与每次降水量呈正相关关系。

一般情况下年平均降雨量被广泛当做草地生产力的关键驱动因子,但是在较小的时间尺度上,仅仅通过降雨量解释不了地上净初级生产力的差异^[39]。Swemmer等的研究^[40]则发现生长季内由降雨分布(包括生长季内的平均单次降雨量、降雨次数和平均降雨间隔时间3个因素)产生的更为复杂的作用。本试验再次验证了这一结论。本试验中各处理在降雨量一样,但是地上生产力各不相同且相互之间差异显著。因此总降雨量这单一因素并不能决定尖头叶藜幼苗的地上生物量,而每次降雨量×降雨次数的分布状况对尖头叶藜幼苗地上生产力的影响力更大。

参考文献(References):

- [1] Ehleringer J R, Phillips S L, Schuster W S F, Sandquist D R. Differential utilization of summer rains by desert plants. *Oecologia*, 1991, 88(3): 430-434.
- [2] Schwinning S, Sala O E. Hierarchy of responses to resource pulses in arid and semi-arid ecosystems. *Oecologia*, 2004, 141(2): 211-220.
- [3] Sala O E, Lauenroth W K. Root profiles and the ecological effect of light rain showers in arid and semiarid regions. *American Midland Naturalist*, 1985, 114(2): 406-408.
- [4] Loik M E, Breshears D D, Lauenroth W K, Belnap J. A multi-scale perspective of water pulses in dryland ecosystems: Climatology and ecohydrology of the western USA. *Oecologia*, 2004, 141(2): 269-281.
- [5] Reynolds J F, Kemp P R, Ogle K, Fernandez R J. Modifying the pulse-reserve. Paradigm for deserts of North America: precipitation pulses, soil water, and plant responses. *Oecologia*, 2004, 141(2): 194-210.
- [6] 郭柯, 董学军, 刘志茂. 毛乌素沙地沙丘土壤含水量特点: 兼论老固定沙地上油蒿衰退原因. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 275-279.
- [7] 姚德良, 李家春, 杜岳, 李新荣, 张景光. 沙坡头人工植被区陆气耦合模式及生物结皮与植被演变的机理研究. *生态学报*, 2002, 22(4): 452-460.
- [8] Sala O E, Lauenroth W K. Small rainfall events: An ecological role in semiarid regions. *Oecologia*, 1982, 53(3): 301-304.
- [9] Dougherty R L, Lauenroth W K, Singh J S. Response of a grassland cactus to frequency and size of rainfall events in a North American shortgrass steppe. *Journal of Ecology*, 1996, 84(2): 177-183.
- [10] Li X R, Wang X P, Li T, Zhang J G. Microbiotic soil crust and its effect on vegetation and habitat on artificially stabilized desert dunes in Tengger Desert, North China. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(3): 147-154.
- [11] Sala O E, Lauenroth W K, Parton W J. Long-term soil water dynamics in the shortgrass steppe. *Ecology*, 1992, 73(4): 1175-1181.
- [12] Knapp A K, Smith M D. Variation among biomes in temporal dynamics of aboveground primary production. *Science*, 2001, 291(5503): 481-484.
- [13] 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.
- [14] 贺俊杰, 王英舜, 黄凤茹, 成喜良, 武魁, 刘成. 降雨格局的变化对草原生态系统的影响研究进展. *内蒙古科技与经济*, 2010, (15): 50-52.
- [15] 强生才. 微集雨模式和降雨变律对燕麦田间生产力及水迁移过程的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2011.
- [16] 赵哈林, 赵学勇, 张铜会, 周瑞莲. 沙漠化的生物过程及退化植被的恢复机理. 北京: 科学出版社, 2007.
- [17] 毛伟, 李玉霖, 赵学勇, 黄迎新, 罗亚勇, 赵玮. 3种藜科植物叶特性因子对土壤养分、水分及种群密度的响应. *中国沙漠*, 2009, 29(3): 468-473.
- [18] 赵学勇, 张春明, 左小安, 黄刚, 黄迎新, 罗亚勇, 王少昆, 曲浩. 科尔沁沙地沙漠化土地恢复面临的挑战. *应用生态学报*, 2009, 20(7): 1559-1664.
- [19] 左小安, 赵哈林, 赵学勇, 郭铁瑞, 张铜会, 毛伟, 苏娜, 冯静. 科尔沁沙地不同恢复年限退化植被的物种多样性. *草业学报*, 2009, 18(4): 9-16.
- [20] 刘新平, 何玉惠, 赵学勇, 张铜会, 李玉霖, 云建英. 科尔沁沙地奈曼地区降水变化特征分析. *水土保持研究*, 2011, 18(2): 155-158.
- [21] Kramer P J, Kozlowski T T. *Physiology of Woody Plants*. New York: Academic Press, 1979: 443-444.
- [22] 刘文兆. 作物生产、水分消耗与水分利用效率间的动态联系. *自然资源学报*, 1998, 13(1): 23-27.
- [23] 张勇, 薛林贵, 高天鹏, 晋玲, 安黎哲. 荒漠植物种子萌发研究进展. *中国沙漠*, 2005, 25(1): 106-112.
- [24] 薛建国. 水分、盐分和温度对几种荒漠植物种子萌发的影响[D]. 甘肃: 甘肃农业大学, 2008.

- [25] Beatley J C. Phenological events and their environmental triggers in Mojave desert ecosystems. *Ecology*, 1974, 55(4): 856-863.
- [26] Loria M, Noy-Meir I. Dynamics of some annual populations in a desert loess plain. *Israel Journal of Botany*, 1979, 28(3/4): 211-225.
- [27] Brown G. Community composition and population dynamics in response to artificial rainfall in an undisturbed desert annual community in Kuwait. *Basic Applied Ecology* 2002, 3(2): 145-156.
- [28] Tian Y, Su D, Li F, Li X L. Effect of rainwater harvesting with ridge and furrow on yield of potato in semiarid areas. *Field Crops Research*, 2003, 84(3): 385-391.
- [29] 王国宏, 张新时. 从生态地理背景论草地畜牧业产业在黄土高原农业可持续发展中的战略地位. *生态学报*, 2003, 23(10): 2017-2026.
- [30] Yoo S H, Choi J Y, Jang M W. Estimation of design water requirement using FAO Penman-Monteith and optimal probability distribution function in South Korea. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(7): 845-853.
- [31] 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.
- [32] 王亚婷, 唐立松. 古尔班通古特沙漠不同生活型植物对小雨量降雨的响应. *生态学杂志*, 2009, 28(6): 1028-1034.
- [33] Andrews J H, Harris R F. *r*- and *K*-selection and microbial ecology. *Advances in Microbial Ecology*, 1986, 9: 99-147.
- [34] 赵惠勋. 群体生态学. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1990: 40-52.
- [35] 胡小文, 王彦荣, 武艳培. 荒漠草原植物抗旱生理生态学研究进展. *草业学报*, 2004, 13(3): 9-15.
- [36] Wright G C, Hubick K T, Farquhar G D. Discrimination in carbon isotopes of leaves correlates with water-use efficiency of field-grown peanut cultivars. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1988, 15(6): 815-825.
- [37] Sobrado M A. Relation of water transport to leaf gas exchange properties in three mangrove species. *Trees*, 2000, 14(5): 258-262.
- [38] 邓雄, 李小明, 张希明, 叶万辉, Foezki A, Runge M. 多枝怪柳气体交换特性研究. *生态学报*, 2003, 23(1): 180-187.
- [39] 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.
- [40] 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.