

科尔沁沙地几种乔灌木树种耐受极端土壤水分条件与生存能力野外实地测定

张继义^{1,2}, 付 丹¹, 魏珍珍¹, 赵哈林², 张铜会²

(1. 兰州理工大学化工与环境工程学院, 兰州 730050; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘要:用有限面积法野外实地测定了科尔沁沙地几种常见乔灌木树种所能耐受的极端临界土壤含水量和极端干旱条件下的生存能力。有限面积法通过限制植物根系水平分布的范围,降低了根系分布区土壤含水量的空间异质性,提高了土壤含水量测定结果的准确性。通过减少植物的吸水范围,加重了植物的受旱程度,有利于对植物耐受极端干旱能力的检验。测定是在植物野外实际生存状态下进行,测定结果更加符合实际情况。野外实地测定结果表明:按从低到高的顺序,山杏、小叶锦鸡儿、差巴嘎蒿、黄柳、榆树、杨树的最低临界土壤含水量分别是0.82%、0.87%、1.61%、1.89%、2.04%和2.27%,形成了一个梯度顺序,反映了几个树种耐旱性的差异和适宜生境条件的不同。植物在极端干旱条件下的生存能力表现为叶片枯黄、萎蔫、脱落和枝条从上到下逐渐干枯,但枝条基部和根系仍然存活,并保持较长时间的存活能力,在遇到适宜的降水后能继续萌发、生长。这一特性具有蓄种、保种作用,对维持荒漠植物种群稳定与种源续存具有重要意义。测定结果对评价物种的抗旱能力和维持人工林群落稳定具有参考价值。

关键词:有限面积法;最低临界土壤含水量;科尔沁沙地

文章编号:1000-0933(2006)02-0467-08 中图分类号:Q143, Q948, S727.23 文献标识码:A

Determination of the ability of several tree and shrub species to endure and survive extreme aridity with methods of limited areas under field condition in Horqin Sandy Land

ZHANG Ji-Yi^{1,2}, FU Dan¹, WEI Zhen-Zhen¹, ZHAO Ha-Lin², ZHANG Tong-Hui² (1. School of Petrochemical Engineering and Environmental Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 467 ~ 474.

Abstract: Using limited-areas methods, the ability of several tree and shrub species to endure and survive extreme aridity under field condition in Horqin Sandy Land was studied, and the lowest critical soil water content which is endurable for each of these species was determined. By limiting the horizontal distribution extent of plant root systems, the limited-areas methods can decrease spatial heterogeneity of soil water content and improve the accuracy of determination of soil water content. Also, this method has the advantage of worsening the aridity endured by the plant species, which is helpful for testing the ability of these species to endure aridity. Our results showed that, the critical soil water contents which are endurable for *Prunus sibirica* L., *Caragana microphylla* Lam., *Artemisia halodendron* Turcz. ex Bess., *Salix gordejvii* Cheng et Skv., *Ulmus pumila* L., *Populus pseudosimonii* Kitag. are 0.82%, 0.87%, 1.61%, 1.89%, 2.04% and 2.27%, respectively. This result is useful for evaluating the ability of these species to endure aridity, and has some important implications for establishing artificial plantations that have high stability.

基金项目:国家“十五”科技攻关资助项目(2002AB517A06);国家973资助项目(G2000048704);兰州理工大学科研发展基金资助项目(SB05200410)

收稿日期:2004-11-14; **修订日期:**2005-06-24

作者简介:张继义(1968-),男,甘肃会宁人,博士,副研究员,主要从事干旱区恢复生态学研究. E-mail: zhangjiyi@lut.cn

Foundation item: The project was supported by Research Development Project of Lanzhou University of Technology (No. SB05200410), National 10th Five-year Science and Technology Project (No. 2002AB517A06), and State Key and Basic Research Development Plan (No. G2000048704)

Received date: 2004-11-14; **Accepted date:** 2005-06-24

Biography: ZHANG Ji-Yi, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in restoration ecology in arid regions. E-mail: zhangjiyi@lut.cn

Key words: limited-areas methods; the lowest critical value of soil water content; Horqin Sandy Land

在干旱、半干旱地区土壤水分条件是限制植物生长与繁殖的主要因素之一^[1, 2]。因而,植物对水条件的适应以及在极端干旱条件下的耐受能力和生存能力是物种生态特性的重要方面,影响物种的分布和群落结构^[3-5]。在干旱半干旱地区人工植被建设中植物的抗旱性常常作为物种选择的标准^[6],因而对于植物抗旱性的评价受到了众多研究者的注意,其中大多数是以植物在干旱条件下的蒸腾作用、植物体内的水分状况等生理生态特性方面的指标为依据^[7-11]。通过对植物自然分布生境下土壤含水量的测定来了解植物能够生存的最低临界土壤含水量和植物的抗旱性是传统和广泛采用的方法^[1, 12-14]。但野外实地测定土壤含水量的传统方法具有局限性,受到如下制约:植物特别是乔灌木树种的根系分布在垂直和水平二维尺度上具有较大的空间分布范围,而研究证明土壤水分的空间异质性是普遍的^[14, 15],因此,对于植物所能耐受的极端土壤含水量就不能得出准确的结论。同时,对于植物根系水平分布和垂直分布的最远端的确切位置常常不能进行准确的定位,究竟以根系分布范围的哪个区域或哪一点的土壤含水量作为植物耐受的最低临界土壤含水量呢?为了解决上述问题采用了有限面积法,首先通过限制植物水平根系分布范围,从而在减小土壤水分的水平空间差异对测定结果造成的干扰进行了初步的探索和尝试,对科尔沁沙地人工造林中常用的几个乔灌木树种所能耐受的极端土壤含水量进行了野外实地测定和比较,以进一步了解这些树种的耐旱性能,为合理利用这些树种资源进行植被恢复和生态建设提供科学依据。

1 自然概况

研究在位于科尔沁沙地中南部的内蒙古自治区奈曼旗境内中国科学院奈曼沙漠化研究站进行,地理位置 120°41'E, 42°54'N。该地区属半干旱气候,年平均降水量 366mm,年蒸发量 1935mm,年均气温 6.5℃, 1 月平均气温 -12.7℃, 7 月平均气温 23.7℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 3000℃ 以上,无霜期 150d。年均风速 3.5m/s, 8 级以上大风年均 21 次,主要发生在春季 3~5 月份。土壤类型为沙质栗钙土,经破坏后则退化为流动风沙土。沙土基质分布广泛,风沙活动强烈^[16-18]。

2 研究方法

2.1 试验植物材料

所研究的植物材料为科尔沁沙地人工造林中常用的几种乔灌木树种,其中乔木:小叶杨 (*Populus pseudo-simonii* Kitag.), 白榆 (*Ulmus pumila* L.); 小乔木:山杏 (*Prunus sibirica* L.); 灌木:小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla* Lam.), 黄柳 (*Salix gordejewii* Chang et Skv.); 半灌木:差巴嘎蒿 (*Artemisia halodendron* Turcz. ex Bess.)。每个树种在人工栽植的人工群落中野外实地选取 6~15 株,所有树种的人工群落均选择处于流动、半流动半固定、或固定沙地等生境中的人工群落,均具有深厚均一的沙土基质,以保证各树种有效土壤含水量的可比性。所选的植物材料的株数、大小等情况见表 1。

2.2 有限面积法

有限面积法就是通过挖掘切割把植物的水平根系切断,使根系限制在有限的范围内,并用塑料布围裹以阻止根系继续向外生长扩散,这样就可以首先解决植物根系水平分布广、吸水范围大的问题。将植物根系的水平分布限制在有限的范围内,就可以减小根系分布区土壤水分的空间异质性,提高对植物耐受临界土壤含水量测定的准确性。同时,限制植物根系的水平分布范围就缩小了根系的吸水体积,加重了植物的受旱程度和水分胁迫程度,这样更有利于检验植物对干旱的耐受能力和植物所能耐受的最低临界土壤含水量。

限制面积的大小以植株冠幅范围为标准确定,根据植物个体大小有所不同(表 1)。

确定好上述限制区域的大小后开始向下挖掘,切断水平根系。沙土土体松散,为了防止挖掘时土体坍塌,制作了一个直径 1m、高 1.4m 的圆柱形套筒。筒体直径与设计的限制面积的直径相当,筒体高度则与挖掘深度相当。挖掘时先从植株冠顶把套筒放下,移动套筒使植株处于套筒的中央,这样套筒以内的面积就是所要限制面积的大小。顺着套筒向下挖掘,直至所需的挖掘深度。用塑料薄膜(双层)围绕筒体进行围裹,注意接

口处应有 20 ~ 30cm 的交叠。塑料薄膜围裹和缠绕做好后,一人在挖掘沟中用手按住塑料薄膜接口,一人在上面开始小心回填土壤,每填上 30cm 左右要向上将筒体拔出一截,以免填埋过深后筒体在土体埋压下难于从土体中拔出。这样一边填埋,一边向外拔出套筒,直至最后挖掘沟被填平,而套筒也从土体中拔出,并从植株冠顶取下,而塑料薄膜则留在土体中作为隔离层阻止根系在生长季向外生长扩散。注意,塑料的上边缘要与地表齐平,不要高出地表。如塑料薄膜有高出地表的情况应向外翻卷、折叠压平并用土压上,而不能向内翻压以免影响限制区域内地表对降水的接收。

表 1 试验植物材料情况
Table 1 About the plant materials experimented

树种 Species	株数 Number	树高 Height(m)	胸径 DBH(cm)	冠幅(m ²) Crown size	基部枝条数(个) Number of shoots at base(No.)	限制面积 Areas limited	限制深度 Depth (cm)
小叶杨 <i>P. pseudo-simonii</i>	11	0.9 ~ 2.02	—	0.5 ~ 1.02 × 0.6 ~ 0.86	15 ~ 23	半径 0.5m、直径 1m 的圆形区域 Circular area with radius of 0.5m	140
	1	5.2	7.0	1.32 × 0.91	—	半径 1.5m、直径 3m 的圆形区域 Circular area with radius of 1.5m	140
	3	9.5 ~ 12.1	11.0 ~ 13.5	1.9 ~ 2.96 × 2.0 ~ 2.75	—	长 4m、宽 3m 的长方形区域 Rectangular area with length of 4m and breadth of 3m	200
白榆 <i>U. pumila</i>	5	1.7 ~ 2.2	—	1.0 ~ 1.78 × 1.4 ~ 1.62	—	半径 0.5m、直径 1m 的圆形区域 Circular area with radius of 0.5m	140
	1	2.70	6.5	2.88 × 2.91	—	半径 1.5m、直径 3m 的圆形区域 Circular area with radius of 1.5m	140
山杏 <i>P. sibirica</i>	6	1.62 ~ 2.68	—	1.75 ~ 4.12 × 1.8 ~ 3.63	6 ~ 105	半径 2m、直径 4m 的圆形区域 Circular area with radius of 2m	140
小叶锦鸡儿 <i>C. microphylla</i>	12	0.76 ~ 1.3	—	0.6 ~ 1.2 × 0.65 ~ 1.1	24	半径 0.5m、直径 1m 的圆形区域 Circular area with radius of 0.5m	140
黄柳 <i>S. gordejewii</i>	15	1.0 ~ 1.84	—	0.5 ~ 1.5 × 0.47 ~ 1.7	15 ~ 47	半径 0.5m、直径 1m 的圆形区域 Circular area with radius of 0.5m	140
差巴嘎蒿 <i>A. halodendron</i>	12	0.43 ~ 0.86	—	0.62 ~ 1.18 × 0.73 ~ 1.02	20 ~ 78	半径 0.5m、直径 1m 的圆形区域 Circular area with radius of 0.5m	100

上述植物材料的选择及生长面积的切割、限制工作于生长季开始前的 4 月中旬进行。

2.3 土壤含水量的测定

完成上述工作后,于 4 月下旬用烘干称重法开始测定土壤含水量。每株试验植物每次只取 1 钻,取样点处于树干与限制区域外缘连线的中心。测定深度以限制深度为准,每 20cm 为一层次。每 20d 测定 1 次,每次测定的取样点位于以树干为中心的圆周上,每次的位点不能重复,不能为同一个钻孔。

2.4 试验植物材料的生长观察

在进行土壤含水量测定时同步观察试验植物材料的生长状况,记录萌芽、展叶等物候,测量新梢长度、叶片大小等指标,并记录植物在干旱胁迫下的萎蔫、落叶、干枯等反应。在生长季结束后测定生物量。

2.5 最低临界土壤含水量确定的原理

在土壤水分没有得到充分的降雨补给的情况下,由于植物生长的强烈消耗,土壤含水量将持续下降。把除表层(0 ~ 20cm)以外的植物生长能够利用的各层土壤水分所出现的最低点,就叫做该种植物所能耐受的最低临界土壤含水量。因为它是在植物持续利用而且是在植物严重水分亏缺的情况下出现的,那么它就能够代表该种植物所能利用的土壤水分的最低点。假定,植物还能够利用比这一点更低的土壤含水量,那么在植物严重水分亏缺的情况下(植物仍然存活并吸收利用水分),植物必然进一步吸收利用土壤水分而致土壤含水量继续迅速地下降到一个更低点,直至达到植物不能再继续吸收利用的最低点。因此,在测定过程中出现的最低

低土壤含水量即是该种植物能够耐受的最低临界土壤含水量。把各次测定的土壤含水量结果排列,从中对比找出各层的土壤含水量的最低值,即确定为该植物种的最低临界土壤含水量。

3 研究结果

3.1 生长季土壤水分动态

从表 2 可以看出,全年土壤含水量按从低到高的顺序依次为小叶锦鸡儿(1.45) < 山杏(1.81) < 差巴嘎

表 2 生长季土壤水分动态(%)

Table 2 Dynamics of soil water content in growth season

树种 Species	土层 Depth (cm)	观测日期 Date																平均 Average	
		4.27		5.17		6.7		6.27		7.18		8.8		8.29		9.18		Mean s.d	
		Mean	s.d	Mean	s.d	Mean	s.d	Mean	s.d	Mean	s.d	Mean	s.d	Mean	s.d	Mean	s.d		
杨树 <i>P. pseudo-simonii</i>	0~20	3.39	0.63	2.87	0.73	1.28	0.33	3.74	0.54	1.59	0.42	3.79	0.48	1.17	0.17	1.25	0.34	2.38	1.17
	20~40	2.59	1.38	2.44	1.04	2.46	1.31	4.33	1.05	2.66	0.55	4.64	0.45	3.01	0.49	2.67	0.63	2.87	1.04
	40~60	4.43	3.11	3.69	2.77	3.24	1.59	4.4	2.41	3.47	1.61	4.19	2.45	2.82	1.73	2.68	1.49	3.62	0.68
	60~80	4.22	2.43	3.82	2.06	3.64	1.52	3.32	2.42	4.09	2.51	4.06	1.92	3.51	2.31	3.53	2.17	3.82	0.31
	80~100	4.02	1.58	3.82	1.71	3.68	1.57	3.88	1.69	3.67	1.45	3.74	1.4	3.43	1.73	3.63	1.82	3.74	0.18
	100~120	3.82	1.21	4.65	1.67	4.45	1.73	4.8	1.63	5.07	0.98	4.99	1.58	2.27	0.87	2.47	1.21	4.13	1
	120~140	4.38	1.36	4.15	3.09	4.27	2.35	5.48	1.81	3.37	1.72	5.54	0.72	3.07	1.38	2.37	0.81	4.23	1.06
	140~160	3.22	0.5	3.21	1.08	3.27	0.86	2.95	0.94	3.28	0.53	3.79	1.08	2.56	1.38	3.84	3.22	3.24	0.3
	160~180	3.22	0.38	3.85	1.35	3.29	0.58	3.72	1.8	3	0.88	3.68	1.72	2.31	0.72	3.18	3.22	3.23	0.32
	180~200	3.15	0.69	4.47	2.79	3.24	0.89	3.29	1.11	4.46	0.59	3.28	1.04	2.55	1.62	3.86	3.15	3.83	0.73
	平均	Mean 3.64	1.33	3.7	1.83	3.28	1.27	3.99	1.54	3.32	1.18	4.17	1.28	2.67	1.24	2.95	1.21	3.51	0.47
榆树 <i>U. pumila</i>	0~20	3.08	0.51	2.2	0.29	1.09	0.24	3.85	0.96	1.17	0.16	3.78	0.49	1.13	0.22	1.33	0.3	2.2	1.21
	20~40	4.16	0.60	3.18	0.57	2.08	0.36	5.04	1.77	2.57	0.32	3.66	1.49	2.04	0.51	2.44	0.5	3.15	1.07
	40~60	3.72	1.11	3.66	1.15	2.83	0.53	4.81	1.42	2.98	0.48	3.3	0.89	2.63	0.64	2.67	0.87	3.32	0.73
	60~80	3.89	0.86	3.73	0.97	3.09	0.65	2.99	0.65	3.15	0.57	3.1	0.67	2.3	0.43	2.4	0.59	3.08	0.56
	80~100	4.57	2.15	5.11	2.04	3.64	0.68	3.39	0.82	3.41	0.74	3.05	0.61	3.1	1.16	2.22	1.03	3.56	0.91
	100~120	5.39	2.35	6.43	3.89	5.07	1.7	4.21	1.28	4.22	0.88	3.57	1.1	2.46	0.38	3.62	1.1	4.37	1.24
	120~140	4.00	1.30	5.23	1.77	5.51	2.07	4.55	1.07	5.51	1.5	3.1	0.41	2.54	1.02	2.98	0.61	4.18	1.2
	平均	4.12	0.62	4.22	1.04	3.33	0.75	4.12	0.75	3.2	0.6	3.37	0.36	2.1	0.23	2.44	0.29	3.36	0.79
杏树 <i>P. si birica</i>	0~20	2.17	0.67	1.7	0.63	1.21	0.4	4.51	1.37	2.22	0.66	3.15	0.66	1	0.2	1.33	0.45	2.16	1.18
	20~40	1.57	0.48	1.27	0.12	1.41	0.37	3.06	0.45	1.34	0.3	2.55	1.05	1.22	0.3	1.16	0.18	1.7	0.71
	40~60	1.86	0.58	1.73	0.87	1.39	0.34	1.52	0.73	1.2	0.31	1.05	0.24	1.07	0.26	1.28	0.58	1.39	0.3
	60~80	1.63	0.93	1.74	0.81	1.77	1.15	1.44	0.83	1.38	0.51	1.26	0.59	1.03	0.41	1.3	0.63	1.44	0.25
	80~100	3.20	4.86	3.07	4.14	3.14	4.41	2.05	1.98	2.54	3.32	0.99	0.3	0.9	0.31	1.53	0.55	2.18	0.95
	100~120	1.70	0.92	3.83	6.09	3.95	6.67	3.01	3.55	1.26	0.28	0.94	0.28	0.82	0.16	1.31	0.43	2.1	1.29
	120~140	1.71	1.09	1.32	0.35	2.47	3.27	1.52	0.69	1.37	0.43	0.99	0.21	0.85	0.03	1.31	0.5	1.44	0.5
	平均	1.98	1.11	2.09	1.63	2.19	2.22	2.52	1.19	1.65	0.69	1.66	0.38	1.06	0.2	1.34	0.32	1.81	0.48
小叶锦鸡儿 <i>C. microphylla</i>	0~20	2.54	0.46	1.74	0.98	0.8	0.43	3.95	0.73	1.29	0.35	2.57	0.5	0.69	0.25	0.84	0.57	1.8	1.14
	20~40	1.87	1.1	1.86	1.92	1.53	1.01	4.7	0.93	1.45	0.5	1.84	1.58	0.99	0.71	1.24	0.87	1.93	1.16
	40~60	1.29	0.52	1.41	0.73	1.57	0.82	3.14	1.34	1.23	0.27	1	0.41	0.87	0.19	1.03	0.26	1.44	0.72
	60~80	1.43	0.74	1.51	0.47	1.21	0.29	1.09	0.29	1.18	0.22	1.01	0.34	0.87	0.17	0.96	0.3	1.16	0.22
	80~100	1.37	0.37	1.39	0.41	1.34	0.41	1.19	0.33	1.3	0.27	1.08	0.35	0.88	0.16	1.11	0.45	1.21	0.18
	100~120	1.34	0.28	1.49	0.38	1.45	0.34	1.49	0.84	1.47	0.42	1.17	0.34	0.91	0.19	1.14	0.56	1.31	0.21
	120~140	1.42	0.26	1.43	0.44	1.42	0.26	2.52	2.82	1.66	0.82	1.2	0.26	1.04	0.29	1.03	0.5	1.46	0.48
	平均	1.6	0.33	1.56	0.46	1.3	0.36	2.48	0.8	1.37	0.18	1.41	0.29	0.9	0.2	1	0.38	1.45	0.48
黄柳 <i>S. gordejewii</i>	0~20	3.00	0.70	2.83	0.93	1.43	0.77	4.33	1.54	1.73	1.01	3.87	0.81	1.28	0.68	1.42	0.92	2.49	1.2
	20~40	2.84	1.77	2.59	1.28	2.39	1.85	4.78	2.12	2.45	1.6	4.18	2.19	2.06	1.41	1.93	1.9	2.9	1.03
	40~60	2.22	1.68	2.11	1.56	2.1	2.21	3.88	1.91	3.45	2.87	2.8	1.78	1.91	1.03	2.26	1.75	2.59	0.72
	60~80	2.50	1.55	2.5	1.67	2.45	2.29	2.88	1.87	2.66	1.45	2.76	1.94	2.09	1.09	2.57	1.56	2.55	0.24
	80~100	2.40	1.47	2.67	2.19	2.25	1.59	2.45	1.42	2.48	1.33	2.51	1.78	1.89	1.06	2.37	1.79	2.38	0.23
	100~120	2.43	1.60	2.39	1.52	2.3	1.77	2.73	1.72	2.8	1.99	2.72	1.91	2.2	1.35	2.58	1.54	2.48	0.24
	120~140	2.20	1.27	2.32	1.37	2.12	1.54	2.8	2.21	2.53	1.46	2.69	1.95	2.07	1.01	2.09	1.19	2.3	0.36
	平均	2.55	1.24	2.56	1.2	2.22	1.64	3.44	1.43	2.64	1.43	3.17	1.47	1.93	0.86	2.17	1.41	2.58	0.51
差蒿 <i>A. halodendron</i>	0~20	3.25	0.47	2.31	0.82	0.84	0.06	3.35	0.79	0.93	0.17	3.67	0.59	0.96	0.25	1.2	0.22	2.07	1.22
	20~40	2.55	0.97	2.74	0.95	1.79	0.3	3.53	1.44	2.28	2.08	4.3	1.05	2.15	0.7	1.79	0.86	2.6	0.93
	40~60	2.86	0.9	3.08	1.55	1.98	0.57	2.88	1.56	1.67	0.81	1.92	1.07	2.05	1.31	1.61	0.67	2.26	0.59
	60~80	3.66	1.63	3.57	1.24	2.43	1	2.41	1.26	2.0	1.12	1.7	0.8	1.61	0.87	1.97	1.47	2.42	0.8
	80~100	3.44	1.13	2.46	0.82	3.07	1.31	2.62	0.85	2.24	1.24	2.25	1.16	2.01	1.14	1.65	0.84	2.47	0.57
	平均	3.12	0.86	2.88	0.99	2.02	0.6	2.96	0.77	1.82	0.78	2.77	0.67	1.76	0.67	1.64	0.54	2.36	0.62

蒿(2.36) < 黄柳(2.58) < 榆树(3.36) < 杨树(3.51)。在试验期间内各树种所经受的最低平均土壤含水量分别为小叶锦鸡儿 0.9,山杏 1.06,差巴嘎蒿 1.64,黄柳 1.93,榆树 2.1,杨树 2.67,其从低到高的顺序与生长季平均土壤含水量的顺序完全一致,因此二者可能基本反映了植物受旱程度的顺序。最低土壤含水量出现的时间各树种基本一致,其中小叶锦鸡儿、黄柳、榆树、杨树、杏树出现的时间均为第 7 次观测即 8 月 29 日,只有差巴嘎蒿的最低土壤含水量出现在第 8 次观测即 9 月 18 日,这可能与差巴嘎蒿的后期生长有关。8 月底其它各树种生长基本停止,而差巴嘎蒿在生长季末期直到 9 月上旬还可利用土壤水分生长并积累生物量,因此其最低土壤含水量出现的时间与生长后期对土壤水分的消耗有关。在植物停止生长以后和生长季结束时,各树种的土壤含水量没有得到明显恢复。

从不同土层土壤含水量的变化来看,小叶锦鸡儿土壤含水量最低的层次是 60~80cm 和 80~100cm 两个层次,黄柳为 80~100cm 和 120~140cm 两个层次,杨树为表层的 0~20cm 和 20~40cm,榆树为表层 0~20cm 和 60~80cm,差巴嘎蒿为表层 0~20cm 和 40~60cm,杏树为 40~60cm 和 60~80cm 及 120~140cm 层次。0~20cm 表层土壤水分的蒸发损失是导致土壤含水量降低的主要原因,而表层以下层次较低的土壤含水量则主要由植物消耗所引起。因此,土壤含水量最低的层次有可能是植物根系在该层分布较多,植物对该层水分消耗最大。从各土层土壤含水量的变异系数也可以说明这一点,基本上各树种表层 0~20cm 土层的变异系数最大,表明土壤水分即受降雨补给又受强烈蒸发损失,因而波动较大。而每一树种土壤含水量最低的层次其变异系数也最低,表明该层土壤含水量的总体水平较低,是植物稳定利用和水分消耗最大的层次。各层次土壤含水量变异系数的另外一个特点是基本上最上 3 层 0~20cm、20~40cm 和 40~60cm 的变异系数最大,并且依次减小,反映了降水补给所能影响的土层范围大致在 60cm 以内。土壤含水量最高的层次小叶锦鸡儿、黄柳、差巴嘎蒿都为亚表层即 20~40cm 土层,可能是这一层次即能得到降雨的相对充足的补给而蒸发损失却相对较小的缘故。杨树、榆树则是越往深层土壤含水量越高,杏树各层次间波动较大,没有一致性的趋势。

3.2 试验植物材料的生长状况

表 3、表 4 是试验植物材料与处于同一立地条件的对照植株的生长状况的对比,用新梢长度、叶长和生物量积累 3 个指标来反映植物的生长状况。通过整个生长季的观察,我们看到杨树、榆树、杏树与对照相比受到的胁迫较轻,植株生长虽受到抑制,新梢生长短小,叶片也比对照小,但植株的存活没有问题,仍保持一定的生物量积累,叶色仍然正常,没有枯黄、脱落现象,枝条也没有干枯现象。小叶锦鸡儿和黄柳都受到了严重的胁迫,从生长表现上看,小叶锦鸡儿 12 株试验树中有 75%(10 株)受到了严重的胁迫,80% 的叶片干枯、脱落,甚至有枝条干枯现象。而其余 3 株则叶色正常,没有枯黄、脱落,并有一定的生物量积累。黄柳 15 株试验树中有 5 株即 30% 的植株叶片基本全部干枯、脱落,枝条干枯严重。其余 70% 的植株均叶片枯黄,约 30% 的叶片脱落。差巴嘎蒿受到的胁迫为中等程度,生长受到明显抑制,叶片枯黄,并有部分脱落,但差巴嘎蒿的一个突出特点是枝条柔韧,不容易失水,没有枝条干枯现象。

表 3 试验植物材料的生长状况

Table 3 Growth of the plants experimented

树种 Species	新梢长度(cm) Length of new shoots								叶长(cm) Leaf length							
	5.4	5.15	5.26	6.5	6.25	7.7	7.29	8.21	5.4	5.15	5.26	6.5	6.25	7.7	7.29	8.21
杨树 <i>P. pseudo-simonii</i>	4.69	7.95	8.49	8.42	7.82	8.44	7.69	9.09	3.15	4.77	4.95	4.78	4.37	4.48	4.41	4.48
对照 Control	7.34	11.0	12.0	13.7	14.4	14.5	15.3	15.73	4.68	5.26	5.78	6.02	6.03	6.32	6.75	6.94
榆树 <i>U. pumila</i>	1.84	4.07	4.95	6.62	8.3	9.01	12	11.1	1.16	2.43	2.79	2.74	3.05	2.98	3.08	3.17
对照 Control	2.64	4.4	10.8	13.2	14.3	17.4	22.8	25.5	1.29	2	2.01	2.05	2.05	2.06	2.09	2.2
杏树 <i>P. sibirica</i>	3.48	9.48	10.4	10.4	9.33	11.3	10.7	11.3	2.06	4.14	4.02	4.26	4.57	4.67	4.72	4.78
对照 Control	2.52	9.37	9.84	9.82	10.84	11	11.25	11.4	2.03	3.8	4.26	4.25	4.42	5.04	5.2	5.07
小叶锦鸡儿 <i>C. microphylla</i>	1.22	2.9	4.3	5.05	5.11	6.15	5.57	5.7	1.6	2.67	3.16	2.87	3.09	3.64	3.48	3.36
对照 Control	2.7	5.12	14	14.2	15.8	16.5	17.6	18.4	3.36	4.35	5.8	5.93	6.13	6.59	7.46	8.4
黄柳 <i>S. gordejewii</i>	2.45	3.16	3.87	3.6	5.24	5.71	6.88	8.12	1.72	2.89	3.08	2.82	3.57	4.15	4.48	5.12
对照 Control	3.33	5.52	7.54	7.75	9.12	9.18	13.4	14.3	2.78	4.53	5.17	5.82	6.01	6.01	6.06	6.61
差蒿 <i>A. halondendron</i>	2.55	3.9	5.59	5.59	8.32	9.66	13.8	24.4	2.07	3.0	3.03	3.09	3.07	3.61	3.74	4.37
对照 Control	2.6	4.38	7.31	7.97	9.05	9.95	15.13	29.3	1.8	3.26	3.04	2.96	2.87	3.74	3.13	4.25

从黄柳、小叶锦鸡儿受到严重胁迫的植株来看,植物受到严重干旱胁迫后的反应次序如下:首先是叶片的枯黄、萎蔫,干旱继续持续则叶片进一步脱落,但这时枝条可能仍未失水,保持柔软状态和生活力,干旱进一步持续则叶片可能全部脱落,枝条从梢端开始干枯,并随着干旱时间的延长向枝条下部延续。生长观察结果表明,目前还没有整株枯死的植株,一些受到严重胁迫的植株枝条中上部干枯,但枝条基部仍保持萌芽能力,说明枝条基部和根系仍然存活。这也是植物耐旱特性和在极端干旱条件下存活能力的反映。在有充足的降雨后,基部能萌发新枝,如 6 月 25 日 26.1mm 的充足降雨后,7 月 7 日的观测时黄柳、小叶锦鸡儿的植株叶片都重新恢复生机,黄柳基部萌发出新的枝条。

差巴嘎蒿对干旱条件的适应之一是对降雨的反应敏感。在有较充足的降雨后,即使在生长季的后期,仍然能恢复生长,新梢会迅速伸长。如 7 月 29 日以后的多次降雨后,差巴嘎蒿的新梢长度有明显增加。

表 4 试验植物材料的生物量积累

Table 4 Biomass accumulation of experimented plant species

树种 Species	分类 Type	老枝生物量(g) Biomass of old shoots	当年生物量(g) Production in this year(g)			生物量积累率(%) Accumulative rate of biomass
			新梢 Shoots	叶片 Leaves	合计 Total	
杨树	平均 The tested	4286.54	293.656	54.9733	348.629	8.1
<i>P. pseudo-simonii</i>	对照 The control	221.43	34.44	18.6	53.04	24.1
榆树	平均 The tested	2009.4	241.67	93.6433	335.313	16.7
<i>U. pumila</i>	对照 The control	317.4	58.08	24.96	83.04	26.2
杏树	平均 The tested	9016.44	437.547	76.9458	514.493	5.7
<i>P. sibirica</i>	对照 The control	3255.12	317.52	15.93	333.45	10.2
小叶锦鸡儿	平均 The tested	473.765	25.0635	2.28133	27.3448	5.8
<i>C. microphylla</i>	对照 The control	1404.48	351.12	74.52	425.64	30.3
黄柳	平均 The tested	233.66	21.4339	7.54333	28.9772	12.4
<i>S. gordejewii</i>	对照 The control	646.8	358.16	71.61	429.77	66.4
差巴嘎蒿	平均 The tested	174.24	14.1896	46.6667	60.8563	34.9
<i>A. halodendron</i>	对照 The control	184.8	56.0	66.5	122.5	66.3

4 讨论与结论

4.1 土壤含水量

在沙地环境的变化过程中,从流动沙地到半固定沙地、再到固定沙地,随着植被发育,土壤水分条件不断恶化,环境旱化^[19]。小叶锦鸡儿和山杏都是固定沙地的人工林,二者生长季较低的土壤含水量与它们所处的立地条件的水分状况是一致的。

土壤水分是植物生长所需水分的来源,植物对土壤水分的利用取决于土壤含水量的高低以及植物自身的吸水能力。我国北方人工植被建设中土壤干化问题是引起人工植被生长后期退化的主要原因,由于植物蒸腾过量耗水造成植物根系作用范围内土壤水分长时间持续地严重亏缺,天然降水不能有效予以补偿,从而导致植物生长明显衰退以至大面积干枯死亡^[20]。因此,植物在低土壤含水量条件下的吸水能力是植物抗旱性的重要方面,决定该种植物在干旱条件下能否利用有限的土壤水分维持生长与生存以及林分的稳定性。选择耐受低土壤水分条件的植物是人工植被建设的重要技术环节,所选植物种类的水分需求和吸水能力与环境的生态条件之间差距尽可能最小,就能提高林分的适宜度和稳定性。

4.2 主要乔灌木树种所能耐受的最低极端临界含水量与生存能力

植物在极端干旱条件下的反应并非立即或很快死亡,而是要经过叶片萎蔫、枯黄、脱落、枝条从上到下逐渐干枯这样一系列渐进过程。植物最终发生死亡必然是一个较长时间过程的累积效应,而不是短时作用的效果。根据植物在干旱条件下的反应过程,定义临界土壤含水量是指植物生长由于受到水分亏缺而发生明显抑制、生长衰弱或生长停止,叶片小而枯黄、但不发生大量脱落时的土壤含水量。不同树种对水分需求的差异很大,植物所能耐受的最低临界土壤含水量有两方面的含义:一是反映了植物在低含水量条件下的吸水能力,因而也反映了植物的水分利用能力和旱化土壤环境下的适应能力和生存能力;二是既然植物能够在土壤水分渍

乏的条件下利用有限的土壤水分而维持生存,那么该种植物也可能具有其它方面的一些适应能力,如低的蒸腾量及蒸腾调节能力,因而具有很强的耐旱能力。

结合试验期间土壤水分状况和试验植物材料生长状况的对比综合分析,各树种所能耐受的最低临界土壤含水量从低到高的次序是:山杏 0.82,小叶锦鸡儿 0.87,差蒿 1.61,黄柳 1.89,榆树 2.04,杨树 2.27。这一次序形成了一个对土壤水分条件适应能力的从高到低的梯度顺序,反映了几种植物的耐旱性。从最低临界土壤含水量看,小叶锦鸡儿、山杏是低水分耐受植物,能够利用含水量很低条件下的土壤水分,具有强的吸水能力和极强的耐旱能力,它们在固定沙地上可以稳定存在。差巴嘎蒿、黄柳、榆树、杨树则需要相对较好的水分条件,它们适宜在植被恢复初期流动沙地上或半流动、半固定沙地上较好的土壤水分条件下栽植和造林,用它们来加速沙地的固定过程。人工固沙植物群落在生长期消耗的水分均不能得到雨季降水的补充,消耗了沙层中原有的储水量,栽植年限越长,消耗的储水量越多,沙层的含水量也越少,干燥的程度愈深^[1],因此,干旱半干旱沙漠化区域人工固沙植被发育过程中,随着时间延续和群落对土壤水分的消耗,当土壤含水量低于最低临界含水量后,植物叶片将逐渐枯黄,随着干旱时间的持续,叶片将进一步萎蔫、脱落,枝条从上到下干枯。随着时间进一步积累,植物将最终死亡,群落必然衰败。以小叶锦鸡儿和山杏营造的人工林则比以黄柳、差巴嘎蒿、榆树、杨树等高水分需求植物的人工林可以稳定存在更长的时间。

在低于最低临界土壤含水量后,植物并不马上死亡,即使叶片脱落、枝条干枯,枝条基部和根系仍然保持生活能力,在遇到适宜的降水后能够进一步萌发,这是植物在极端干旱条件下保持生存能力的形式,是对干旱环境的适应特征之一。这种特性具有蓄种和保种作用,对极端干旱条件下物种续存和保持种群稳定具有重要意义。小叶锦鸡儿、黄柳、差巴嘎蒿都具有这种生存能力。

植物根系除了水平分布广外,还有垂直分布深的问题。本项研究只是在限制水平根系分布广的方面进行了探索和尝试,试验的控制深度为 1.40m,理论上试验控制深度应以植物根系垂直分布的最大深度为准。但是对根系垂直分布的控制还存在技术上的困难,特别是对于某一特定的植株其根系垂直分布的最大深度究竟是多少还无法进行准确的探测。因此,在本试验条件下试验植物材料可能存在深层吸水问题(在测定土壤层次以下仍可能有根系分布),特别是杨树的 3 株较大个体。通常情况下可以认为植物特别是灌木根系的大部分分布在 1.40m 的土层内,在所采用的试验深度内各树种都受到了明显的胁迫就说明采用的试验深度是合理的,达到了对试验树种在极端土壤水分条件下的吸水能力和耐旱能力及其生存能力进行检测的目的,研究结果有助于更好地理解几种植物的水分需求和对干旱环境条件的适应能力等生态特性,对于评价试验植物材料的耐旱能力和在极端干旱条件下的生存能力具有参考价值。

References:

- [1] Jiang J, Cong Z L. On the rational density of sand-stabilizing plants from water balance. *Chinese Journal of Ecology*, 1986, 5(1): 7 ~ 12.
- [2] Cedra A. The effect of patchy distribution of *Stipa tenacissima* L. on runoff and erosion. *Journal of Arid Environments*, 1997, 36: 37 ~ 51.
- [3] Baird A J, Wilby R L. *Ecohydrology: Plants and Water in Terrestrial and Aquatic Environments*. London: Routledge, 1998. 78 ~ 123.
- [4] Van der Marrel E. *Vegetation dynamics: patterns of change in time and space*. Vegetatio, 1988, 77: 1 ~ 9.
- [5] Zhang W H, Lu T, Ma K M, Zhou J Y, et al. Analysis on the environmental and spatial factors for plant community distribution in the arid valley in the upper reach of Minjiang River. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3): 552 ~ 559.
- [6] Han R L, Liang Z S, Hou Q C. Water-use characteristic of seedlings of the suitable tree species in Loess Plateau. *Journal of Applied Ecology*, 1994, 5: 210 ~ 213.
- [7] Zhou H Y. Current status and perspective of eco-physiological researches in Psammophytes. *Chinese Bulletin of Botany*, 2001, 18: 643 ~ 648.
- [8] Zhou H Y. Comparative study on aridity-resistance of transplanted plants in Jinchang City. *Journal of Desert Research*, 2000, 20: 464 ~ 466.
- [9] Huang Z S. Effects of aridity on water balance and N metabolism of sand-stabilizing plants. *Acta Botanica*, 1979, 21: 314 ~ 319.
- [10] Dong X J. Experimental measurement and ecological significance of water relationship parameters of 9 sandy shrubs. *Acta Botanica*, 1998, 40: 657 ~ 64.
- [11] Chen R S, Kang E S, Zhao W Z, Zhang Z H, et al. Trees transpiration response to meteorological variables in arid regions of northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(3): 477 ~ 485.

- [12] Chen W R, Zhang J X. Water condition and reforestation on mobile sand dune. In: Research on combating desert (No. 4). Beijing: Science Press, 1962. 27 ~ 35.
- [13] Yang X M, Yang W Z. Preliminary study on water balance of artificial plantation in Loess Plateau. *Silva Sinica*, 1989, 25: 549 ~ 553.
- [14] Zhao W Z. Relationship of growth of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to soil water condition. *Journal of Desert Research*, 1992, 12(1): 64 ~ 70.
- [15] Zhao W Z. Impact of plantation on spatial heterogeneity of soil moisture in Horqin Sandy Land. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39: 113 ~ 119.
- [16] Zhu Z D, Chen G T. Land Sandy Desertification in China. Beijing: Science Press, 1994.
- [17] Zhao H L, Liu X M, Li S G. Analysis on the characteristics and causes of the vulnerable environment in Horqin Sandy Land. *Journal of Desert Research*, 1998, 18(Supp.2): 10 ~ 16.
- [18] Liu X M, Zhao H L, Zhao A F, *et al.* The environment and vegetation in Horqin Sandy Land. Beijing: Science Press, 1996.
- [19] Cong Z L, Li J, Zhang W, *et al.* Preliminary study on changes of eco-environment in the processes of desertification and its reversion in the eastern of Horqin Sandy Land. In: Liu X M & Zhao H L eds. Researches on comprehensive combat of eco-environment of Horqin Sandy Land. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1993. 88 ~ 115.
- [20] Yang W X. On the soil aridity of artificial plantation in north of China. *Silva Sinica*, 1996, 32: 78 ~ 85.

参考文献:

- [1] 蒋谨,丛自立.从水分平衡角度探讨固沙植物的合理密度问题. *生态学杂志*, 1986, 5(1): 7 ~ 12.
- [5] 张文辉,卢涛,马克明,周建云,等.岷江上游干旱河谷植物群落分布的环境与空间因素分析. *生态学报*, 2004, 24(3): 552 ~ 559.
- [6] 韩蕊莲,梁宗锁,侯庆春,邹厚远.黄土高原适生树种苗木的耗水特性. *应用生态学报*, 1994, 5: 210 ~ 213.
- [7] 周海燕.荒漠沙生植物生理生态学研究与发展. *生物学通报*, 2001, 18: 643 ~ 648.
- [8] 周海燕.金昌市引种植物抗旱性的比较研究. *中国沙漠*, 2000, 20: 464 ~ 466.
- [9] 黄子琛.干旱对固沙植物的水分平衡和氮素代谢的影响. *植物学报*, 1979, 21: 314 ~ 319.
- [10] 董学军.九种沙生灌木水分关系参数的实验测定及生态意义. *植物学报*, 1998, 40: 657 ~ 664.
- [11] 陈仁升,康尔泗,赵文智,张智慧,等.中国西北干旱区树木蒸腾对气象因子的响应. *生态学报*, 2004, 24(3): 477 ~ 485.
- [12] 陈文瑞,张继贤.流动沙丘的水分状况与固沙造林.见:中国科学院兰州沙漠研究所,治沙研究(第4号).北京:科学出版社,1962. 27 ~ 35.
- [13] 杨新民,杨文治.黄土丘陵区人工林地土壤水分平衡初探. *林业科学*, 1989, 25: 549 ~ 553.
- [14] 赵文智.奈曼沙区樟子松生长状况与水分关系. *中国沙漠*, 1992, 12: 64 ~ 70.
- [15] 赵文智.科尔沁沙地人工植被对土壤水分异质性的影响. *土壤学报*, 2002, 39: 113 ~ 119.
- [16] 朱震达,陈广庭.中国土地沙质荒漠化.北京:科学出版社,1994.
- [17] 赵哈林,刘新民,李胜功.科尔沁沙地脆弱生态环境的基本属性特征和成因分析. *中国沙漠*, 1998, 18(Supp. 2): 10 ~ 16.
- [18] 刘新民,赵哈林,赵爱芬.科尔沁沙地风沙环境与植被.北京:科学出版社,1996.
- [19] 丛自立,李进,张伟,常学礼.科尔沁沙地东部地区沙漠化及其逆转过程中生态环境变化初探.见:刘新民,赵哈林主编.科尔沁沙地生态环境综合整治研究.兰州:甘肃科学技术出版社,1993. 88 ~ 115.
- [20] 杨维西.试论我国北方地区人工植被的土壤干化问题. *林业科学*, 1996, 32(1): 78 ~ 85.