

文章编号: 1001-1498(2008)04-0436-10

干旱胁迫下金沙江干热河谷主要造林树种 盆植苗的蒸腾耗水特性

段爱国, 张建国*, 何彩云, 张俊佩, 张守攻

(中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘要:对土壤干旱胁迫条件下金沙江干热河谷 29 个植被恢复树种盆植苗的蒸腾耗水特性进行了研究, 结果表明:

(1) 白天不同幼苗蒸腾耗水量均随干旱时间的延长而持续下降, 而且下降的幅度具有明显差异; 当水分供给量相同时, 高强度蒸腾失水的幼苗在极度干热的天气里更易亦更快地受到干旱的胁迫。(2) 干旱 6 d 后, 黑荆、新银合欢、杞木和兰桉的实际蒸腾耗水量下降幅度最大, 达 85.78% ~ 93.11%; 久树、攀枝花、山毛豆、山合欢及云南松的下降幅度最小, 仅为 6.37% ~ 17.42%。蒸腾量下降比例的聚类结果与幼苗 k 值大小比较结果基本一致。(3) 幼苗第 1 天的蒸腾量大小决定了定量供水条件下幼苗蒸腾失水的动态变化状况。随着干旱胁迫的延伸, 幼苗夜晚蒸腾量占全天蒸腾量的比例有所增加。(4) 当幼苗处于严重水分胁迫时, 3 月份 25 种供试幼苗白天蒸腾耗水量下降幅度的大小排序与中度水分胁迫时一致。(5) 依据幼苗白天蒸腾耗水速率与土壤水势的数量关系, 应用系统聚类法将 29 种供试幼苗分为高、亚高、亚低及低蒸腾耗水速率等 4 类。

关键词: 干热河谷; 苗木; 蒸腾耗水; 干旱胁迫

中图分类号: Q945.78 文献标识码: A

Studies on Transpiration of seedlings of the Main Tree Species Under the Condition of Drought Stress in the Dry-hot River Valleys of the Jinsha River

DUAN Ai-guo¹, ZHANG Jian-guo¹, HE Cai-yun¹, ZHANG Jun-pei, ZHANG Shou-gong

(1. Research Institute of Forestry, CAF; Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091)

Abstract: Transpiration of twenty-nine potted afforestation species for vegetation restoration in the dry-hot valleys of the Jinsha River was studied under different drought stress weight on typical sunny day. Five main conclusions were gotten as follows: (1) The transpiring water consumption of different seedlings in the day time presented a sustained descent with the drought stress, the descending extent of different seedlings was obviously different. The seedlings, with the strong water consumption, were more easy and quick to suffer from drought stress. (2) After six-day's drought treatment, the practical water consumption of *Acacia meamsii*, *Leucaena leucocephala* cv *Salvador*, *Carallia longipes*, *Eucalyptus globulus* descended the most, being 85.78% ~ 93.11%; *Schleichera oleosa*, *Bambax malabaricum*, *Tephrosia candida*, *Albizia kalkora*, *Pinus yunnanensis* descended the least, being only 6.37% ~ 17.42%. The classified result by the descended extent of water consumption was identical to the comparison result of slope k . (3) The transpiring water consumption of seedlings in the first day determined the dynamic variation of water losing. With the sustaining of drought stress, the proportion of water consumption in the

收稿日期: 2008-02-15

基金项目: 国家林业局林业重点工程科技支撑项目“西南困难立地抗逆性优良乔灌木树种选择及快繁技术试验示范”

作者简介: 段爱国 (1976—), 男, 湖北荆州人, 博士, 助理研究员, 主要从事森林培育与树木生理生态方向的研究, E-mail: duanag@forestry.ac.cn

* 通讯作者: E-mail: zhangjg@forestry.ac.cn

night to water consumption in the whole day gradually increased (4) When the seedlings suffered serious drought stress in March, the descending proportion order of transpiring from water consumption of twenty-five species was identical to the size order while suffering from middle-class drought stress (5) According to the quantitative formula between transpiring water consumption rate of seedlings in the day time, systematically classified method could be used to divide twenty-nine tree species into four classifications including high transpiring water consumption, sub-high transpiring water consumption, sub-low transpiring water consumption and low transpiring water consumption

Key words: dry-hot river valley; seedlings; transpiring water consumption; drought stress

蒸腾耗水是树木水分散失的主要途径,是土壤—植物—大气系统 (SPAC) 中的水分运转的关键环节或枢纽^[1]。树木蒸腾耗水量的准确测算是干旱与半干旱地区造林树种选择、造林密度、人工林分稳定性评价以及防护林体系优化配置等林业生态治理工程建设技术中最关键、最核心的问题^[2-4]。金沙江干热河谷区气候干旱炎热,降水量较少且分配不均,土壤干旱贫瘠,是我国造林极端困难的立地之一^[5-9]。按照适地适树的造林基本准则,选择符合该区水分承载力的植被恢复树种及盆植模式是造林成败的关键。在土壤干旱胁迫作用于植物生理生态特性的研究方面,植物叶片光合作用、蒸腾速率及叶绿素荧光参数占据了主要位置,而相对于植物蒸腾耗水特性在干旱区水分承载力与水分循环问题分析上的重要性,其研究尚待进一步深入。在以往的研究中,不同的学者应用快速称重法、热脉冲法、气孔计法、整株容器法及微气象法等不同的测定方法对树种蒸腾耗水特性展开研究^[10-12],得出了一些区域性的结论,但亦存在一些问题,如实验树种的选取偏重于考虑理论层面的问题,而缺乏对某一地区众多树种蒸腾耗水特性的系统分析。鉴于快速称重法便于将多种苗木蒸腾耗水特性在同一平台的集中比较,本文从植物蒸腾耗水的角度出发,研究了土壤干旱胁迫下金沙江干热河谷区 29 个植被恢复树种盆植苗蒸腾耗水特性,旨在为水资源季节性严重缺乏条件下的植被恢复和实现水量平衡下的林木培育提供理论与实践依据。

1 试验地概况

试验设置在云贵高原云南省境内金沙江中段的元谋县,为典型的干热河谷区。雨季约 5 个月(6—10 月),降水集中,空气闷热;干季 6~7 个月(11 月至翌年 5 月),主要为 3、4、5 月,年降水量 614 mm,其中 6—10 月份降雨占全年降水量的 92%,年蒸发量 3 848 mm,年均空气相对湿度 53%。试验区土壤以燥红土为主,干旱瘠薄,水肥条件极差。自然植

被以草丛为主,杂以灌木,稀少乔木,称为半自然稀树草原或稀树灌草丛。

2 研究方法

2005 年 1 月共收集金沙江干热河谷区有代表性的 29 个树种,包括乡土树种与外来引进树种,所有材料都在 2005 年 2 月中下旬进行盆植,每盆 1 株,苗木生长情况见表 1。盆植土壤采用当地燥红土,统一过筛称质量,带土瓦盆质量 15 kg,盆子规格为:高 30 cm,直径 35 cm。

于 2005、2006 年干季(3 月份)、热季(5 月份)及雨季末期(10 月份)的典型晴天对试验树种幼苗蒸腾耗水的日季节变化进行露天测定。测定方法采用适于野外试验的快速称重法,称重天平为德国生产的 Sartorius B12 电子天平,精度达 0.1 g。根据幼苗生长状况(表 1),试验分 3 次进行:2005 年 10 月选取生长旺盛的 15 种阔叶树种各 5 盆,连续称质量 3 d,测定雨季后供试幼苗的蒸腾耗水量;2006 年 3 月选择 25 种盆植苗,每种幼苗设 3 次重复,在光照强度、温度及湿度相似的 5 个典型晴天里连续进行称质量,在第 6 个典型晴天的早晚各称 1 次,得到前晚及当天的蒸腾耗水量,以探讨干热环境中土壤持续干旱胁迫下幼苗蒸腾耗水特性;2006 年 5 月采用人工控水与自然干燥相结合的方法,对 3 月份未能进行测试的小桐子等 4 个树种的盆植苗进行干旱处理,每树种各选 6 盆,形成不同的盆植土壤水势梯度,然后在典型晴天连续称质量,探讨不同水分胁迫下这 5 种幼苗的蒸腾耗水特性。每次试验前均对参试幼苗充分浇水 3 d,然后用保鲜薄膜密封盆植土壤,并用塑料袋套住整个花盆,防止土壤水分蒸发失水的影响,另设置 3 盆不覆膜作对照,日变化测定时间为 8:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00、20:00,每次称质量的同时用 Licor-6400 便携式光合测定系统记录光照强度、温度及湿度等环境因子^[18]。

表 1 29 个实验树种盆植幼苗生长情况

编号	树种拉丁名	苗木种类	苗龄 /a	平均地径 /cm	平均高 /m	平均冠幅 /m
1	滇刺枣 (<i>Ziziphus mauritiana</i> Lam)	播种苗	1	1.39	0.86	0.35
2	苏门答腊金合欢 (<i>Acacia glauca</i> (L.) Moelichl)	播种苗	1	0.98	1.16	0.59
3	久树 (<i>Schleichera oleosa</i> (Bur) Oken)	移植苗	2	1.59	1.00	0.55
4	大叶相思 (<i>Acacia auriculiformis</i> A. Cunn.)	移植苗	2	1.50	1.48	0.45
5	马占相思 (<i>Acacia mangium</i>)	移植苗	2	1.55	1.50	0.51
6	墨西哥柏 (<i>Cupressus lusitanica</i> Mill)	移植苗	3	1.33	1.13	0.42
7	干香柏 (<i>Cupressus duclouxiana</i> Hickel)	移植苗	3	1.04	1.35	0.43
8	圆柏 (<i>Sabina chinensis</i> (L.) Ant)	移植苗	3	1.45	1.23	0.45
9	攀枝花 (<i>Bombax malabaricum</i> DC.)	移植苗	2	1.42	0.92	0.55
10	云南松 (<i>Pinus yunnanensis</i> Franch.)	移植苗	2	1.42	0.32	0.38
11	山合欢 (<i>Albizia kalkora</i> (Roxb.) Prain)	野生苗	2	1.01	0.40	0.43
12	聚果榕 (<i>Ficus racemosa</i> L.)	移植苗	2	1.58	1.10	0.55
13	木麻黄 (<i>Casuarina equisetifolia</i>)	移植苗	2	1.27	1.43	0.53
14	余甘子 (<i>Phyllanthus emblica</i> L.)	移植苗	2	1.21	0.92	0.60
15	杞木 (<i>Carallia longipes</i>)	移植苗	2	1.62	0.96	0.55
16	大叶女贞 (<i>Ligustrum lucidum</i> Ait.)	移植苗	2	1.43	0.93	0.52
17	夹竹桃 (<i>Nerium indicum</i> Mill.)	移植苗	2	1.91	0.85	0.73
18	尾叶桉 (<i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake)	移植苗	2	1.33	1.00	0.65
19	兰桉 (<i>Eucalyptus globulus</i> Labill.)	移植苗	2	1.66	1.46	0.42
20	黄花槐 (<i>Sophora xanthantha</i> C. Y. Ma.)	移植苗	2	1.40	1.14	0.53
21	赤桉 (<i>Eucalyptus camaldolensia</i> Dehn.)	移植苗	2	1.54	1.40	0.53
22	黑荆 (<i>Acacia meamsii</i> De Wild.)	移植苗	2	1.16	1.07	0.64
23	新银合欢 (<i>Leucaena leucocephala</i> cv. <i>Salvador</i>)	播种苗	1	1.66	1.66	0.70
24	车桑子 (<i>Dodonaea viscosa</i> (L.) Jacq.)	移植苗	2	1.36	0.86	0.62
25	山毛豆 (<i>Tephrosia candida</i> DC.)	播种苗	1	0.90	1.21	0.67
26	小桐子 (<i>Jatropha curcas</i> L.)	扦插苗	1	3.14	0.79	0.48
27	印楝 (<i>Azadirachta indica</i> A. Juss)	移植苗	2	1.82	0.85	0.46
28	酸角 (<i>Tamarindus indica</i> L.)	移植苗	2	1.04	0.61	0.43
29	木豆 (<i>Caajanus cajan</i> (L.) Mill.)	播种苗	1	0.96	1.27	0.77

注:表中苗木年龄为测定时苗龄。

3 月份与 10 月份时采用 HH2 型土壤湿度计测定苗木土壤含水量,然后采用烘干法与仪器快速测定法分别测得的土壤含水量绘制 2 种方法的相关曲线,校正仪器快速测定的土壤水分值,5 月份时采用烘干法测定土壤含水量;取盆植土壤原状土 3 份,使其自然失水,采用万分之一天平多次称质量,同时用 WP4 土壤水势仪测定水势,绘制土壤含水量与水势的关系曲线,以此推算土壤水势(图 1)。

3 月份与 10 月份 2 次试验树种的叶面积采用叶片计数法和抽样扫描法测定,5 月份 4 个试验树

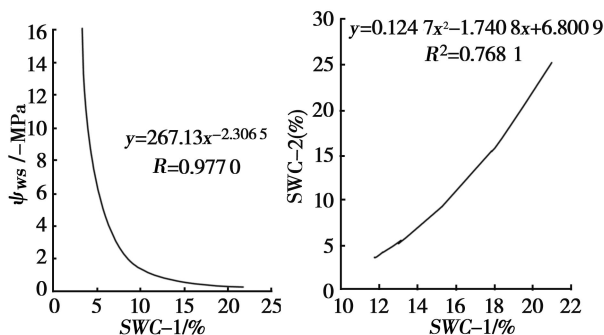


图 1 盆中土壤水势 (ψ_{ws}) 与土壤含水量 SWC-1 (干燥法) 的关系以及土壤含水量 SWC-2 (仪器快速测定法) 与 SWC-1 (干燥法) 的关系

种叶面积采用全部收获法及抽样扫描法测定;云南松叶面积采用排水法测定^[2];圆柏、干香柏、墨西哥柏及木麻黄的叶面积采用双面叶面积仪扫描法予以估算。

3 结果与分析

3.1 盆植土壤含水量与干旱处理天数的关系

覆膜套盆处理后,幼苗蒸腾耗水成为盆植土壤中水分丧失的唯一途径。从图 2 可以看出,随着干旱处理天数的增加,土壤含水量呈线性持续下降,且不同树种的下降幅度具有明显差异。经过连续 6 个元谋干热河谷区典型晴天的高强度失水,3 月份 25 种幼苗盆植土壤含水量下降了 5.10%~19.38%,下降率为 28.48%~92.76%,其中,圆柏、干香柏、苏门答腊金合欢、大叶相思、赤桉与木麻黄下降幅度最大,分别达到了 92.76%、90.31%、89.42%、87.05%、79.84%和 79.79%,云南松、聚果榕、夹竹桃、山毛豆与马占相思下降幅度最小,分别为 28.48%、33.65%、36.38%、42.78%和 46.46%,其它树种的下降幅度居中。不覆膜的盆中土壤含水量下降均接近 100%。这表明不同种类幼苗的蒸腾耗水量具有明显的差异,覆膜减少或延迟了土壤失水。供试幼苗的生长状况均符合造林

所要求的规格,由于,不同幼苗对造林地的水分消耗不同,这必将导致高强度蒸腾失水的幼苗在极度干热的环境中更易受到干旱的胁迫。

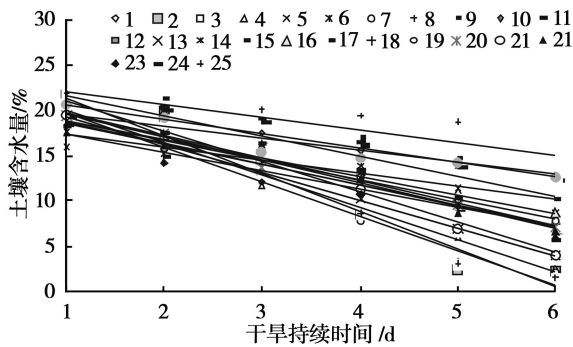


图 2 3 月份 25 种盆植苗的土壤含水量与干旱持续时间的关系

3.2 不同土壤干旱天数对幼苗连日蒸腾耗水量的影响

从图 3 可知:不同幼苗白天的蒸腾耗水量均随干旱时间的延长而持续下降,但不同幼苗下降的幅度具有极显著差异 ($P < 0.01$)。结合表 2 可以看到,幼苗连日白天蒸腾耗水量与干旱时间呈很强的线性相关性,相关系数均在 0.6 之上,且绝大部分在 0.9 以上,表明在环境因子基本相同的条件下,幼苗连日蒸腾耗水量可由干旱的天数予以预估,这样一种关系可为干热河谷区造林前幼苗的水分管理提供借鉴与参考。

表 2 中各方程的参数 k 为不同幼苗拟合直线的斜率,指示幼苗连日蒸腾量随干旱时间下降的大小程度, k 越小,幼苗连日蒸腾量随干旱时间下降的速度越快; k 越大,幼苗连日蒸腾量随干旱时间下降的速度越慢。25 种幼苗 k 值的排序为:黑荆 < 兰桉 < 大叶相思 < 新银合欢 < 赤桉 < 黄花槐 < 干香柏 < 木麻黄 < 杞木 < 聚果榕 < 墨西哥柏 < 尾叶桉 < 车桑子

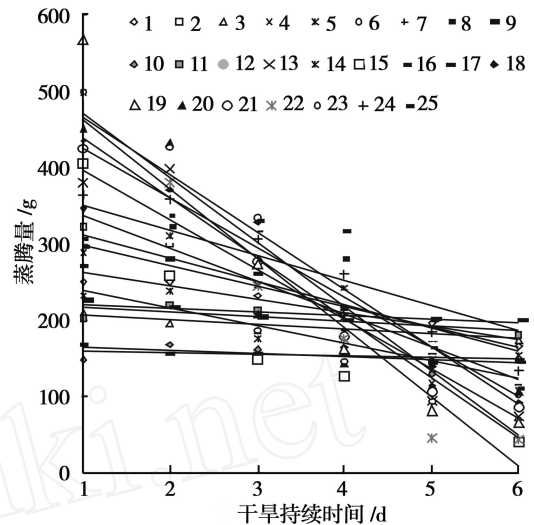


图 3 25 种盆植幼苗白天的蒸腾耗水量随干旱持续时间的变化

< 苏门答腊金合欢 = 圆柏 < 大叶女贞 < 余甘子 < 夹竹桃 < 马占相思 < 滇刺枣 < 山合欢 < 久树 < 山毛豆 < 攀枝花 < 云南松,排在前面的黑荆等树种的连日蒸腾量下降明显,连日水分丧失量差距较大,控制失水的能力较弱,而排在后面的云南松等树种下降趋势缓慢,连日水分丧失量差异较小,控制失水的能力较强。聚类分析结果表明:干旱 6 d 后,黑荆、新银合欢、杞木和兰桉实际蒸腾量下降幅度最大,达 85.78% ~ 93.11%;木麻黄、赤桉、大叶相思、聚果榕、黄花槐、尾叶桉、墨西哥柏、干香柏、苏门答腊金合欢、圆柏以及车桑子下降幅度其次,为 62.92% ~ 80.73%;大叶女贞、余甘子、夹竹桃、马占相思及滇刺枣下降幅度较小,为 33.76% ~ 51.18%;久树、攀枝花、山毛豆、山合欢及云南松下下降幅度最小,仅为 6.37% ~ 17.42%。蒸腾量下降率的聚类结果与幼苗 k 值大小排列顺序基本一致。

表 2 干季 3 月份时 25 种幼苗白天蒸腾耗水量与干旱持续时间的关系

树种	$y = kx + b$	相关系数 (r)	树种	$y = kx + b$	相关系数 (r)
滇刺枣	$y = -17.310 0x + 278.48$	0.974 8**	余甘子	$y = -30.453 0x + 342.60$	0.940 6**
苏门答腊金合欢	$y = -42.974 0x + 379.25$	0.976 0**	杞木	$y = -68.632 0x + 414.97$	0.940 8**
久树	$y = -5.825 7x + 211.25$	0.884 7*	大叶女贞	$y = -32.610 0x + 382.31$	0.789 9
大叶相思	$y = -95.545 0x + 620.74$	0.932 4**	夹竹桃	$y = -26.894 0x + 325.62$	0.893 8*
马占相思	$y = -22.540 0x + 259.64$	0.947 4**	尾叶桉	$y = -59.145 0x + 455.63$	0.950 3**
墨西哥柏	$y = -64.796 0x + 488.99$	0.953 3**	兰桉	$y = -108.890 0x + 652.97$	0.968 9**
干香柏	$y = -74.923 0x + 539.04$	0.933 2**	黄花槐	$y = -78.168 0x + 515.83$	0.924 7**
圆柏	$y = -42.974 0x + 379.25$	0.976 0**	赤桉	$y = -83.946 0x + 553.79$	0.937 0**
攀枝花	$y = -4.302 9x + 169.29$	0.930 2**	黑荆	$y = -114.610 0x + 654.81$	0.954 5**
云南松	$y = -1.982 9x + 161.15$	0.625 1	新银合欢	$y = -90.589 0x + 553.46$	0.939 3**
山合欢	$y = -6.157 1x + 222.77$	0.774 7	车桑子	$y = -48.872 0x + 438.80$	0.981 0**
聚果榕	$y = -64.868 0x + 461.4$	0.971 1**	山毛豆	$y = -5.038 1x + 225.74$	0.898 9*
木麻黄	$y = -72.725 0x + 496.33$	0.967 2**			

注: *表示关系式呈显著相关; **表示关系式达极显著相关;自变量自由度均为 4; y 为白天蒸腾耗水量 (g); x 为干旱处理天数 (d)。

从表 3 可以看到,干旱 6 d 后,大多数幼苗的总蒸腾耗水量为 1 400 ~ 1 600 g, 25 种幼苗白天的总蒸腾耗水量与各自的 k 值呈明显的负线性相关, 这表明, 幼苗的 k 值越小, 幼苗在 6 d 中的总蒸腾耗水量也越大; 幼苗在干旱失水前 3 d 的蒸腾量与 k 呈逐渐松散的负线性相关, 在干旱失水的后 3 d, 幼苗的蒸腾量则与 k 呈逐渐紧密的正相关, 这主要是由于幼苗前期蒸腾量较大的树种在后期蒸腾量较小,

而前期蒸腾量较小的树种在后期蒸腾量相对较大的缘故; 由于幼苗第 1 天的蒸腾量与 k 呈最紧密的线性相关, 且正负相关性与总蒸腾量一致, 故幼苗第 1 天的蒸腾量大小至关重要, 决定了定量供水时幼苗蒸腾失水的动态变化趋势。

当假设线性方程中的变量 x 等于 0 d 时, 表 2 中参数 b 即可看作幼苗白天潜在蒸腾耗水量的大小, 对于比较不同种幼苗的饱和蒸腾耗水量具有指示价值。

表 3 不同干旱天数时 25 种幼苗蒸腾量与 k 的相关关系

干旱天数 / d	$y = px + q$	相关指数 (R^2)	干旱天数 / d	$y = px + q$	相关指数 (R^2)
1	$y = -0.2799x + 46.0340$	0.9588**	5	$y = 0.6547x - 140.54$	0.6663**
2	$y = -0.2995x + 49.8590$	0.7862**	6	$y = 0.6520x - 128.3$	0.7544**
3	$y = -0.2048x + 1.9529$	0.1233	总和	$y = -0.1112x + 107.46$	0.4270*
4	$y = 0.2620x - 103.3600$	0.1213			

注: *表示关系式呈显著相关, **表示关系式达极显著相关自变量自由度均为 24; y 为白天蒸腾耗水量 (g), x 为斜率 k 。

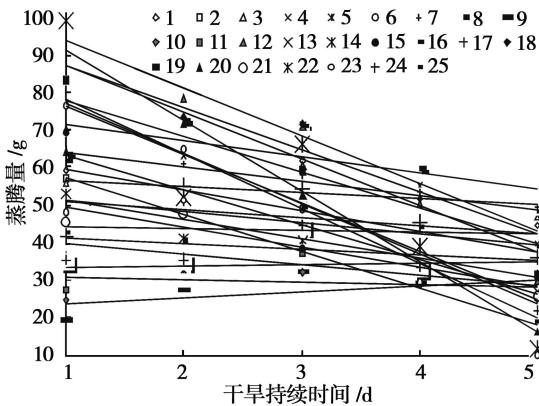


图 4 25 种盆植幼苗夜间的蒸腾耗水量随干旱持续时间的变化

从图 4 可知: 绝大部分幼苗夜晚的蒸腾耗水量随干旱天数的增加呈明显下降趋势, 不同幼苗的下降幅度不一, 仅攀枝花、云南松、山合欢、山毛豆和夹竹桃变化相对稳定。在度过 5 个高强度蒸腾失水日后, 黑荆、新银合欢、黄花槐、兰桉、墨西哥柏和尾叶桉夜晚蒸腾量下降较大, 下降幅度为 61.51% ~ 88.12%; 杞木、聚果榕、大叶相思、圆柏、干香柏、赤桉、苏门答腊金合欢、车桑子、木麻黄和余甘子下降了 31.44% ~ 55.20%; 滇刺枣、大叶女贞、马占相思和久树下降了 17.23% ~ 24.83%。总的来看, 白天蒸腾耗水量下降幅度大的幼苗其夜晚蒸腾量下降幅度亦大。在干旱失水的各个时段, 幼苗夜晚蒸腾耗水量一直为全天蒸腾耗水总量的重要组成部分, 幼苗在第 1 个夜晚的蒸腾耗水量占全天蒸腾量的 8.84% ~ 21.17%, 第 5 个夜晚的蒸腾量占全天蒸腾

量的 10.70% ~ 27.21%, 这表明随着干旱胁迫的延伸, 幼苗夜晚蒸腾量占全天蒸腾量的比例没有明显变化, 这主要是幼苗白天蒸腾耗水量下降的幅度比夜晚下降的幅度高的缘故, 而夜晚的蒸腾耗水可能与植物叶片的角质层蒸腾有关。

3.3 不同土壤干旱胁迫梯度对幼苗蒸腾耗水量及耗水速率的影响

3.3.1 不同土壤干旱胁迫梯度对幼苗蒸腾耗水量的影响 从表 4 可知: 幼苗白天蒸腾耗水量随土壤含水量及水势的下降而降低, 但不同幼苗下降的速率及幅度不一样, 幼苗蒸腾耗水量与土壤含水量及水势的这种关系可分别由线性和指数函数给予高精度的拟合。指数函数反应出幼苗蒸腾耗水量与土壤水势的关系: 在干旱胁迫的初期, 轻度水分胁迫的幼苗蒸腾耗水量下降速度较快, 随着水分胁迫的加重, 幼苗蒸腾耗水量下降速度减缓。指数方程中参数 a 的生理涵义是幼苗完全供水条件下的潜在白天蒸腾耗水量, 其值愈大, 表示幼苗潜在白天蒸腾耗水量愈大; 参数 b 决定了拟合曲线的形状, b 越大, 表示幼苗蒸腾耗水量下降速度越快。

当幼苗水分供给良好时 (水势 $w_s = -0.5$ MPa, 土壤含水量 $SWC = 15.23\%$), 在干热季节的 3 月份的典型晴天里, 25 种供试幼苗的白天蒸腾耗水量按大小可分为 5 类: 干香柏、大叶相思 > 木麻黄、墨西哥柏、聚果榕、圆柏、兰桉 > 车桑子、大叶女贞、尾叶桉、黑荆、苏门答腊金合欢、赤桉、黄花槐、新银合欢、余甘子、滇刺枣 > 杞木、夹竹桃、山毛豆、山合

欢、马占相思、久树 > 攀枝花、云南松。此时, 5 月份的 4 个供试幼苗中, 酸角和木豆白天蒸腾耗水量较大, 分别为 257.29、219.07 g, 印楝与小桐子较小, 耗水量分别为 110.11、85.96 g

当幼苗受到中度水分胁迫时 ($w_s = -1.0$ MPa, $SWC = 11.27\%$), 在干热季节 3 月份的典型晴天里, 25 种供试幼苗白天的蒸腾耗水量均有不同程度的下降, 下降幅度为 2.44% ~ 44.57%。其中, 夹竹桃和兰桉下降幅度最大, 分别下降了 44.57%、40.92%; 下降幅度最小的 11 个树种为: 久树 (2.44%)、山合欢 (3.55%)、攀枝花 (4.60%)、山毛豆 (5.38%)、赤桉 (5.99%)、苏门答腊金合欢 (6.45%)、车桑子 (9.23%)、圆柏 (10.56%)、云南松 (11.33%)、滇刺枣 (13.04%) 以及马占相思 (15.27%); 其余 12 个树种下降幅度居中: 黑荆 (31.79%)、尾叶桉 (26.30%)、杞木 (26.12%)、木麻黄 (23.45%)、黄花槐 (23.31%)、墨西哥柏 (23.25%)、大叶女贞 (22.99%)、聚果榕 (21.72%)、新银合欢 (19.31%)、干香柏 (19.06%)、大叶相思 (17.56%)、余甘子 (17.54%)。同样, 在 5 月份, 酸角和木豆的耗水量下降幅度最大, 分别为 14.79% 和 7.62%; 印楝和小桐子的下降幅度接近, 分别为 5.40%、5.31%。

25 种供试幼苗在 3 月份受到严重水分胁迫时 ($w_s = -1.5$ MPa, $SWC = 9.46\%$), 白天的蒸腾耗水量下降幅度的排序与中度水分胁迫时一致, 且中度胁迫时下降幅度越大的幼苗, 其下降速率越小。当受到严重水分胁迫时, 幼苗的总体下降幅度为 4.82% ~ 69.27%, 其中, 夹竹桃、兰桉和黑荆的下降幅度超过了 50%, 分别达 69.27%、65.09%、53.48%, 表明这 3 个树种的白天蒸腾耗水量已受到严重制约; 下降幅度最小的 9 个树种: 久树 (4.82%)、山合欢 (6.97%)、攀枝花 (8.99%)、山毛豆 (10.46%)、赤桉 (11.63%)、苏门答腊金合欢 (12.49%)、车桑子 (17.60%)、圆柏 (20.00%)、云南松 (21.37%); 其余 13 个树种下降幅度居中: 尾叶桉 (45.69%)、杞木 (45.42%)、木麻黄 (41.40%)、黄花槐 (41.19%)、墨西哥柏 (41.09%)、大叶女贞 (40.70%)、聚果榕 (38.72%)、新银合欢 (34.88%)、干香柏 (34.49%)、大叶相思 (32.04%)、余甘子 (32.01%)、马占相思 (28.21%) 以及滇刺枣 (24.38%)。在 5 月份, 酸角和木豆的

下降幅度最大, 分别为 27.39% 和 14.66%; 印楝和小桐子的下降幅度接近, 分别为 10.52%、10.34%。

从表 4 中有关幼苗白天蒸腾耗水量与土壤水势的关系式可以得到, 当幼苗白天蒸腾耗水量下降 80% 时, 所有供试幼苗均在土壤严重干旱胁迫下, 各幼苗盆植土壤水势由大到小依次为: 夹竹桃 (-1.86 MPa)、兰桉 (-2.03 MPa)、黑荆 (-2.60 MPa)、尾叶桉 (-3.14 MPa)、杞木 (-3.16 MPa)、木麻黄 (-3.51 MPa)、黄花槐 (-3.53 MPa)、墨西哥柏 (-3.54 MPa)、大叶女贞 (-3.58 MPa)、聚果榕 (-3.79 MPa)、新银合欢 (-4.25 MPa)、干香柏 (-4.31 MPa)、大叶相思与余甘子 (-4.67 MPa)、马占相思 (-5.36 MPa)、酸角 (-5.53 MPa)、滇刺枣 (-6.26 MPa)、云南松 (-7.19 MPa)、圆柏 (-7.71 MPa)、车桑子 (-8.81 MPa)、木豆 (-10.65 MPa)、苏门答腊金合欢 (-12.56 MPa)、赤桉 (-13.52 MPa)、印楝 (-14.99 MPa)、山毛豆 (-15.07 MPa)、小桐子 (-15.24 MPa)、攀枝花 (-17.59 MPa)、山合欢 (-22.79 MPa)、久树 (-33.08 MPa)。排序结果与幼苗受到干旱胁迫时蒸腾耗水量下降幅度的顺序一致。这一结果表明: 当幼苗白天蒸腾耗水量下降 80% 时, 各树种土壤水势值存在很大差异, 而不同的土壤水势对幼苗生理活动影响很大。盆中土壤水势较高的夹竹桃、兰桉、黑荆等幼苗的气孔会完全或大部分关闭, 以维护体内水分平衡; 而久树、山合欢、银荆等树种的土壤水势降至很低程度, 表明这些树种在受到干旱胁迫时具有一个更长的气孔关闭反应期, 其控制失水的能力相对较差。当然, 这一排序是相对的, 因为即使是在干热的 3 月份, 亦很难出现连续更多的典型晴天, 以保证拟合曲线更为准确。

3.3.2 不同土壤干旱胁迫梯度对幼苗蒸腾耗水速率的影响 一定环境条件下, 幼苗蒸腾耗水速率是幼苗自有特性的外在表现, 具有相对的稳定性和可比性。从表 5 或图 6 可看到, 随着土壤干旱胁迫的加深, 幼苗蒸腾耗水速率逐渐降低, 且在干旱胁迫初期下降速率较大, 而在干旱胁迫后期下降速率呈递减趋势。在干旱胁迫过程中, 同一种幼苗蒸腾耗水速率下降的幅度与蒸腾耗水量下降的幅度相近, 表现在模拟模型上即为参数 b 相同或甚为接近, 但幼苗耗水速率的大小排序与耗水量具有很大差别, 因

表 4 幼苗白天蒸腾耗水量与土壤含水量及土壤水势的关系

树种	方程 1 ($y = mx + n$)	相关系数 (r)	方程 2 ($y = ae^{-b}$)	相关系数 (r)
滇刺枣	$y = 8.0311x + 107.04$	0.9363**	$y = 270.66e^{-0.2794x}$	0.9757**
苏门答腊金合欢	$y = 9.3314x + 121.33$	0.9579**	$y = 304.51e^{-0.1334x}$	0.7575
久树	$y = 2.2326x + 161.12$	0.8605*	$y = 201.33e^{-0.0494x}$	0.8312*
大叶相思	$y = 27.5440x - 19.535$	0.9521**	$y = 481.17e^{-0.3863x}$	0.9040**
马占相思	$y = 12.7950x + 10.754$	0.8256*	$y = 232.63e^{-0.3314x}$	0.7742
墨西哥柏	$y = 31.4750x - 124.3$	0.9387**	$y = 429.67e^{-0.5292x}$	0.8952**
干香柏	$y = 19.4540x + 78.639$	0.9331**	$y = 496.79e^{-0.4229x}$	0.9501**
圆柏	$y = 10.6530x + 135.17$	0.9014**	$y = 356.58e^{-0.2231x}$	0.9220**
攀枝花	$y = 1.6342x + 126.01$	0.8059	$y = 161.31e^{-0.0942x}$	0.6685
云南松	$y = 2.6145x + 111.63$	0.6184	$y = 172.01e^{-0.2404x}$	0.4703
山合欢	$y = 2.9173x + 154.17$	0.9166**	$y = 211.2e^{-0.0722x}$	0.7852
聚果榕	$y = 21.1550x - 11.168$	0.9688**	$y = 417.51e^{-0.4897x}$	0.9929**
木麻黄	$y = 23.6730x - 32.963$	0.9630**	$y = 449.25e^{-0.5345x}$	0.9893**
余甘子	$y = 16.2090x + 11.707$	0.8008	$y = 307.86e^{-0.3858x}$	0.7783
杞木	$y = 26.5100x - 167.95$	0.8461*	$y = 292.13e^{-0.6055x}$	0.8947**
大叶女贞	$y = 13.2030x + 71.552$	0.8068	$y = 381.62e^{-0.5225x}$	0.9508**
夹竹桃	$y = 16.9350x - 50.755$	0.9561**	$y = 388.15e^{-1.18x}$	0.9813**
尾叶桉	$y = 22.9590x - 69.924$	0.9359**	$y = 397.31e^{-0.6104x}$	0.9531**
兰桉	$y = 47.5300x - 370.13$	0.9338**	$y = 535.16e^{-1.0525x}$	0.8896**
黄花槐	$y = 32.1700x - 181.05$	0.9549**	$y = 362.57e^{-0.5308x}$	0.8003
赤桉	$y = 25.1730x - 57.681$	0.9544**	$y = 300.23e^{-0.1236x}$	0.7632
黑荆树	$y = 43.3030x - 306.96$	0.8669*	$y = 422.57e^{-0.7652x}$	0.8669*
新银合欢	$y = 39.3080x - 227.38$	0.9338**	$y = 342.71e^{-0.429x}$	0.7953
车桑子	$y = 18.8710x + 11.732$	0.9855**	$y = 325.86e^{-0.1936x}$	0.8769*
山毛豆	$y = 1.9077x + 172.62$	0.5797	$y = 216.35e^{-0.1105x}$	0.4735
酸角	$y = 18.6720x - 20.182$	0.8769*	$y = 301.93e^{-0.32x}$	0.9608**
小桐子	$y = 10.5580x - 23.108$	0.8917**	$y = 90.784e^{-0.1092x}$	0.8495*
印楝	$y = 5.3381x + 21.314$	0.9016**	$y = 116.4e^{-0.1111x}$	0.9885**
木豆	$y = 9.1601x + 87.815$	0.8910**	$y = 237.14e^{-0.1585x}$	0.9820**

注: *表示关系式呈显著相关, **表示关系式达极显著相关, 自变量自由度均为 4。方程 1 中 y 为白天蒸腾耗水量 (g), x 为土壤含水量 (%); 方程 2 中 y 为白天蒸腾耗水量 (g), x 为土壤水势 (-MPa)。

后者还受幼苗叶面积大小的控制。

当幼苗水分供给良好时 (水势 $w_s = -0.5$ MPa), 在干热季节 3 月份的典型晴天里, 24 种供试幼苗的白天平均蒸腾耗水速率为 $0.84 \sim 6.48$ $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 其中, 滇刺枣、聚果榕和黄花槐蒸腾耗水速率最高; 其次为攀枝花、山毛豆、车桑子、苏门答腊金合欢及山合欢; 云南松、夹竹桃、马占相思、干香柏、余甘子等 5 树种的蒸腾耗水速率较低; 其余 11 个树种的蒸腾耗水速率最低, 由大到小依次为新银合欢、杞木、大叶相思、尾叶桉、赤桉、久树、兰桉、圆柏、大叶女贞、墨西哥柏与黑荆树。5 月份测定的 4 个供试树种中, 木豆和酸角的蒸腾耗水速率最大, 小桐子最小, 印楝居中。不同幼苗蒸腾耗水速率的大小差异是幼苗对环境适应的综合作用结果, 反映了干热环境条件下不同树种维持体内水分平衡的驱动机制的多样化。

当幼苗受到土壤中度水分胁迫及严重水分胁迫时, 幼苗白天蒸腾耗水速率分别下降了 2.61% ~ 44.57% 和 5.14% ~ 69.27%, 下降幅度与蒸腾耗水量的降幅接近 (表 5 或图 6)。依据幼苗白天蒸腾耗

水速率与土壤水势的数量关系, 应用 SPSS 统计软件中的系统聚类法可将所有 29 种供试幼苗分为高、亚高、亚低及低蒸腾耗水速率等 4 类, 其中的每一类又根据指数方程的性质按参数 b 的大小进行细分, 设定参数 b 在 (0, 0.2) 内时, 幼苗属弱度干旱敏感型树种, 参数 b 落在 [0.2, 0.6) 之内时, 幼苗属中度干旱敏感型树种, 如当参数 $b > 0.6$ 时, 幼苗属强度干旱敏感型树种。依此方法可对供试幼苗作如下划分:

高蒸腾耗水速率中度干旱敏感型树种: 木麻黄、滇刺枣、聚果榕及黄花槐; 亚高蒸腾耗水速率弱度干旱敏感型树种有攀枝花、山毛豆、车桑子、苏门答腊金合欢、山合欢、印楝及木豆; 亚低蒸腾耗水速率树种, 包括中度干旱敏感型树种和弱度干旱敏感型树种, 其中中度干旱敏感型树种有云南松、酸角、马占相思、干香柏和余甘子, 弱度干旱敏感型树种有赤桉和久树; 低蒸腾耗水速率树种, 包括强度干旱敏感型树种、中度干旱敏感型树种及弱度干旱敏感型树种, 其中强度干旱敏感型树种有夹竹桃、兰桉、黑荆、尾叶桉和杞木, 中度干旱敏感型树种有新银合欢、墨西哥柏、大叶女贞、大叶相思和圆柏, 弱度干旱

敏感型树种有小桐子。需指出的是,这里阐述的不同强度的干旱敏感型与树种耐旱能力的强弱无关,特指幼苗蒸腾耗水速率随水分胁迫的加剧而下降速率的大小。

表 5 幼苗白天蒸腾耗水速率与土壤含水量、土壤水势的关系

树种	方程 1 ($y = cx + dn$)	相关系数 (r)	方程 2 ($y = ce^{-dx}$)	相关系数 (r)
滇刺枣	$y = 3.5052e^{0.0382x}$	0.9253**	$y = 7.455e^{-0.2794x}$	0.8757*
苏门答腊金合欢	$y = 1.2894e^{0.0451x}$	0.9217**	$y = 3.0786e^{-0.1334x}$	0.7575
久树	$y = 1.0628e^{0.013x}$	0.9589**	$y = 1.3409e^{-0.0528x}$	0.8882*
大叶相思	$y = 0.2700e^{0.1036x}$	0.9655**	$y = 1.7582e^{-0.3863x}$	0.9040*
马占相思	$y = 0.7090e^{0.0728x}$	0.8646**	$y = 2.4605e^{-0.3314x}$	0.7742
墨西哥柏	$y = 0.1039e^{0.1417x}$	0.9245**	$y = 1.1e^{-0.5292x}$	0.8952*
干香柏	$y = 0.5507e^{0.0748x}$	0.9533**	$y = 2.4121e^{-0.4229x}$	0.9501**
圆柏	$y = 0.4970e^{0.0507x}$	0.8763**	$y = 1.3215e^{-0.2231x}$	0.9220**
攀枝花	$y = 2.8666e^{0.0111x}$	0.8518*	$y = 3.651e^{-0.1032x}$	0.7327
云南松	$y = 1.7399e^{0.0175x}$	0.5967	$y = 2.589e^{-0.2404x}$	0.5503
山合欢	$y = 2.1987e^{0.0148x}$	0.9240**	$y = 2.9354e^{-0.0722x}$	0.7852
聚果榕	$y = 1.0176e^{0.1079x}$	0.9537**	$y = 7.4011e^{-0.4897x}$	0.9429**
木麻黄	$y = 2.4191e^{0.121x}$	0.9534**	$y = 20.8600e^{-0.5345x}$	0.9309**
余甘子	$y = 0.5856e^{0.0747x}$	0.8187*	$y = 2.2115e^{-0.3858x}$	0.7783
杞木	$y = 0.0827e^{0.1848x}$	0.9469**	$y = 2.0168e^{-0.6055x}$	0.8947*
大叶女贞	$y = 0.3569e^{0.0583x}$	0.8145*	$y = 1.2633e^{-0.5225x}$	0.8508*
夹竹桃	$y = 0.6002e^{0.0809x}$	0.9480**	$y = 3.9888e^{-1.18x}$	0.9213**
尾叶桉	$y = 0.2208e^{0.1109x}$	0.9345**	$y = 1.8483e^{-0.6104x}$	0.9531**
兰桉	$y = 0.0450e^{0.2108x}$	0.9709**	$y = 2.0697e^{-1.0525x}$	0.8896*
黄花槐	$y = 0.6044e^{0.1242x}$	0.9871**	$y = 6.1468e^{-0.5059x}$	0.9130**
赤桉	$y = 0.1682e^{0.1119x}$	0.9930**	$y = 1.4280e^{-0.1236x}$	0.7632
黑荆	$y = 0.0224e^{0.2372x}$	0.9707**	$y = 1.2292e^{-0.7652x}$	0.8669*
新银合欢	$y = 0.1096e^{0.1766x}$	0.9575**	$y = 1.6470e^{-0.429x}$	0.7953
车桑子	$y = 0.8279e^{0.081x}$	0.9956**	$y = 3.2098e^{-0.1936x}$	0.8769*
山毛豆	$y = 2.7125e^{0.0091x}$	0.5839	$y = 3.3417e^{-0.1108x}$	0.5231
酸角	$y = 0.2917e^{0.1449x}$	0.8422*	$y = 3.0082e^{-0.3643x}$	0.8297*
小桐子	$y = 0.0894e^{0.1263x}$	0.8178*	$y = 0.5562e^{-0.1046x}$	0.8170*
印楝	$y = 0.4283e^{0.1188x}$	0.9051**	$y = 2.4122e^{-0.1111x}$	0.9046**
木豆	$y = 1.0434e^{0.0492x}$	0.6279	$y = 2.5137e^{-0.1921x}$	0.8119*

注: *表示关系式呈显著相关, **表示关系式达极显著相关,自变量自由度均为 4。方程 1 中 y 为白天蒸腾耗水速率 (g), x 为土壤含水量 (%); 方程 2 中 y 为白天蒸腾耗水速率 ($mmol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), x 为土壤水势 (-MPa)。

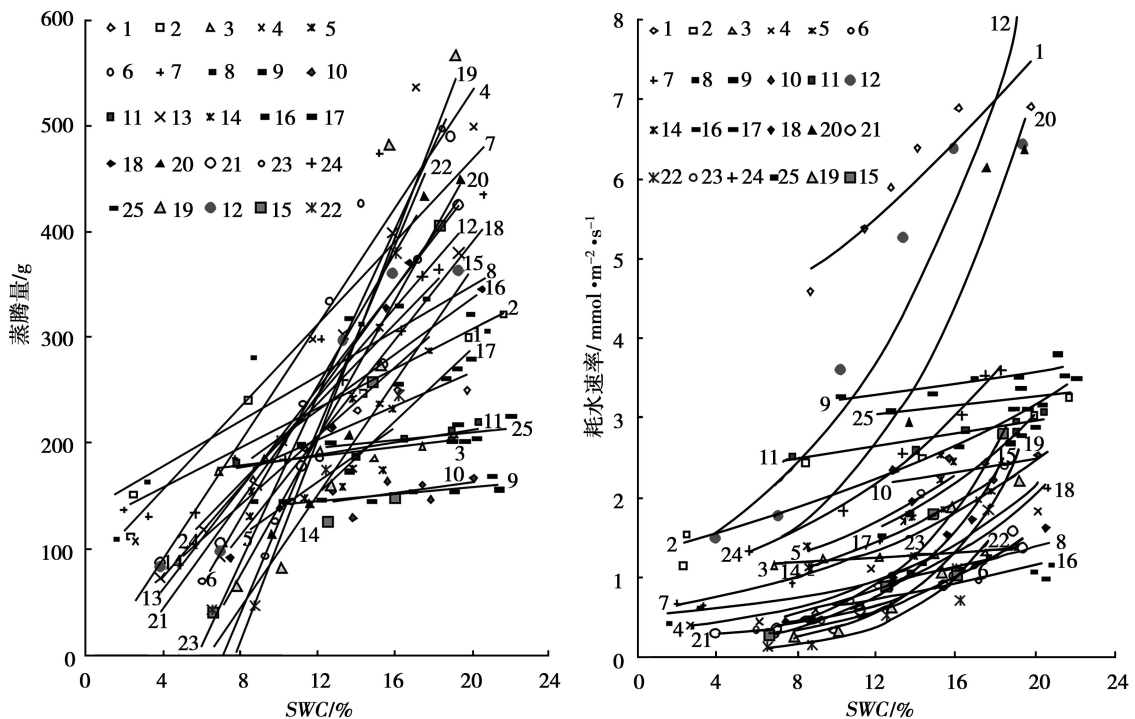


图 5 幼苗蒸腾耗水量和耗水速率与土壤含水量 SWC 的关系

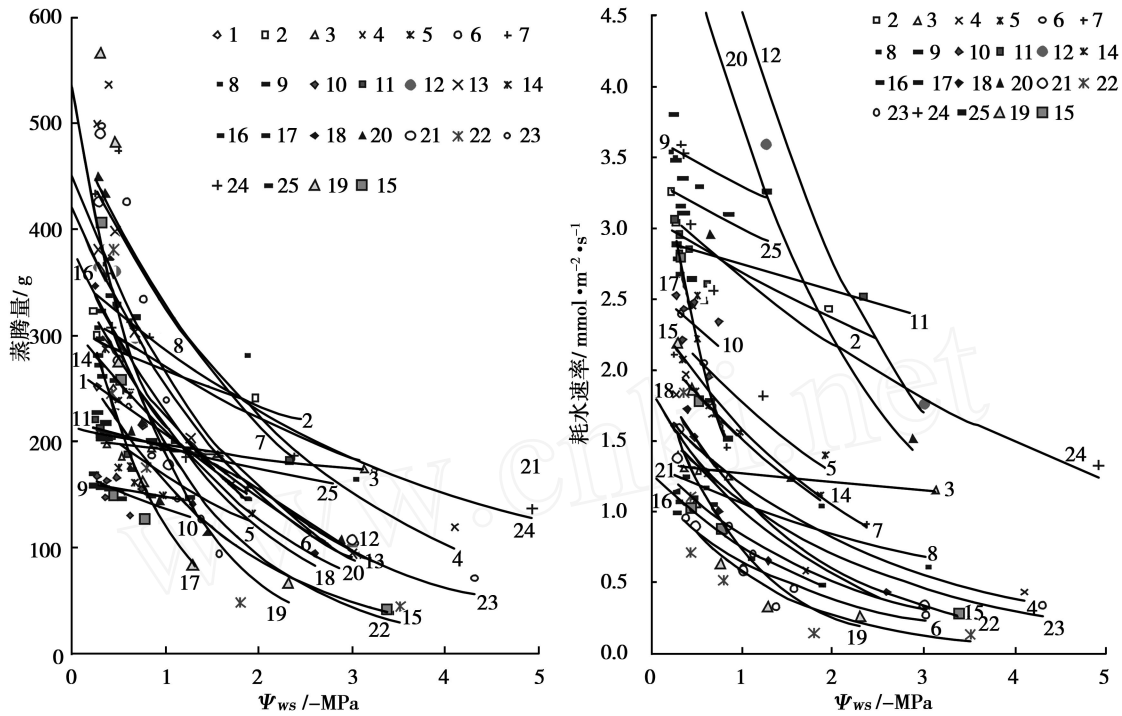


图 6 幼苗蒸腾耗水量和蒸腾耗水速率与土壤水势 Ψ_{ws} 的关系

4 结论与讨论

在土壤干旱胁迫条件下,金沙江干热河谷区 29 个植被恢复树种盆植苗蒸腾耗水特性为:(1)不同幼苗的白天蒸腾耗水量均随干旱时间的延长而持续下降,不同树种幼苗下降的幅度具有极显著差异;高强度蒸腾失水的幼苗在极度干热的天气里更易亦更快地受到干旱的胁迫。(2)干旱 6 d 后,黑荆、新银合欢、杞木和兰桉实际蒸腾量下降幅度最大,达 85.78%~93.11%;木麻黄、赤桉、大叶相思、聚果榕、黄花槐、尾叶桉、墨西哥柏、干香柏、苏门答腊金合欢、圆柏以及车桑子下降幅度其次,为 62.92%~80.73%;大叶女贞、余甘子、夹竹桃、马占相思及滇刺枣下降幅度较小,为 33.76%~51.18%;久树、攀枝花、山毛豆、山合欢及云南松下降幅度最小,仅为 6.37%~17.42%。蒸腾量下降比例的聚类结果与幼苗 k 值大小比较结果基本一致。(3)幼苗第 1 天的蒸腾量大小决定了定量供水条件下幼苗蒸腾失水的动态变化趋势。随着干旱胁迫的延伸,幼苗夜晚蒸腾量占全天蒸腾量的比例不但没有减少,反而有所增加。(4)3 月份测定的 25 种供试幼苗白天蒸腾耗水量下降幅度的大小排序与中度水分胁迫时一致,即中度胁迫时幼苗下降幅度越大,其在受到严重

胁迫时下降幅度也越大,且在向严重胁迫过渡的过程中,中度胁迫时下降幅度越大的幼苗的下降速率越小。(5)依据幼苗白天蒸腾耗水速率与土壤水势的数量关系,应用系统聚类法将 29 种供试幼苗分为高、亚高、亚低及低蒸腾耗水速率等 4 类:高蒸腾耗水速率中度干旱敏感型树种:木麻黄、滇刺枣、聚果榕及黄花槐;亚高蒸腾耗水速率弱度干旱敏感型树种:攀枝花、山毛豆、车桑子、苏门答腊金合欢、山合欢、印楝及木豆;亚低蒸腾耗水速率树种:云南松、酸角、马占相思、干香柏、余甘子、赤桉和久树;低蒸腾耗水速率树种:夹竹桃、兰桉、黑荆、尾叶桉、杞木、新银合欢、墨西哥柏、大叶女贞、大叶相思、圆柏和小桐子。

滇刺枣、聚果榕和黄花槐属高蒸腾耗水树种,对干旱胁迫具有中度敏感性,根系对土壤水分的要求高,这几个树种对干热河谷的水分生态承载力具有很大的压力;车桑子、山毛豆、山合欢、苏门答腊金合欢、印楝及木豆为亚高蒸腾耗水树种,对干旱胁迫具有弱度敏感性,根系的供水机制良好,抗干旱,在干热河谷植被恢复造林试验中生长良好;亚低、低蒸腾耗水树种比较符合干热河谷区环境,如小桐子属于弱度干旱敏感型树种,在典型的金沙江干热河谷区元谋县境内生长良好,且萌芽更新或天然更新能力

很强,是优良的植被恢复树种,而赤桉等桉属树种可能是因为在盆植条件下主根的生长受到限制,吸水能力未能充分发挥,致使盆植幼苗蒸腾耗水速率较低^[13];再如干香柏、圆柏及墨西哥柏等属于中度干旱敏感型树种,在云南鹤庆县干热河谷区生长良好,银合欢、余甘子、云南松则是金沙江干热河谷区植被恢复的重点树种;但杞木、兰桉属于低蒸腾耗水型中的强度干旱敏感型树种,在干旱胁迫时蒸腾耗水过大,以至于在受到严重水分胁迫时不能维持正常的生理代谢,不适于或相对不适于干热河谷区的荒山造林,兰桉只适宜于水分条件较好的房前屋后栽植。这一结果亦表明:幼苗蒸腾作用与抗旱性的关系不是简单的正相关或负相关,而是因树种而异,蒸腾耗水较大的树种可选作干热河谷区植被恢复树种,如亚高蒸腾耗水较大的树种,而低蒸腾耗水树种中亦有不适于干热区造林的,如强度干旱敏感型树种

参考文献:

- [1] 张建国,李吉跃,沈国舫,等. 树木耐旱特性及其机理研究 [M]. 北京:中国林业出版社,2000
- [2] 周平,李吉跃,招礼军. 北方主要造林树种幼苗蒸腾耗水特性研究 [J]. 北京林业大学学报,2002,24(6): 50 - 55
- [3] 胡新生,王世绩. 树木水分胁迫生理与耐旱性研究进展及展望 [J]. 林业科学,1998,34(2): 77 - 89
- [4] 郭连生,田有亮. 9种针阔叶幼树的蒸腾速率、叶水势与环境因子关系的研究 [J]. 生态学报,1992,12(1): 47 - 52
- [5] 张荣祖. 横断山区干旱河谷 [M]. 北京:科学出版社,1996
- [6] 李昆,张春华,崔永忠,等. 金沙江干热河谷区退耕还林适宜造林树种筛选研究 [J]. 林业科学研究,2004,17(5): 555 - 563
- [7] 高洁,曹坤芳,王焕校. 干热河谷 9种造林树种在旱季的水分关系和气孔导度 [J]. 植物生态学报,2004,28(2): 186 - 190
- [8] 段爱国,张建国,张俊佩,等. 金沙江干热河谷主要植被恢复树种叶水势的时空变化规律 [J]. 林业科学研究,2007,20(2): 151 - 159
- [9] 周蛟,马焕成,胥辉. 元谋干热河谷引种造林试验及树种选择研究 [J]. 西南林学院学报,2000,20(2): 78 - 84
- [10] 巨关升,刘奉觉,邓世锴. 选择树木蒸腾耗水测定方法的研究 [J]. 林业科技通讯,1998(10): 12 - 14
- [11] 刘海军,Shabtai C, Josef T,等. 应用热扩散法测定香蕉树蒸腾速率 [J]. 应用生态学报,2007,18(1): 35 - 40
- [12] 岳广阳,张铜会,赵哈林,等. 科尔沁沙地黄柳和小叶锦鸡儿茎流及蒸腾特征 [J]. 生态学报,2006,26(10): 3206 - 3213
- [13] 马焕成,Jack A C M,陈德强. 元谋干热河谷相思树种和桉树类抗旱能力分析 [J]. 林业科学研究,2002,15(1): 101 - 104