

干热河谷主要植被恢复树种蒸腾作用

段爱国, 张建国*, 张守攻, 张俊佩, 王军辉, 何彩云, 李 燕

(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:以金沙江干热河谷区 10 多种自然生长树种为试材,探讨了不同季节典型晴天里各树种叶片水平的蒸腾速率日动态规律,以揭示极端干热生境条件下供试树种蒸腾作用的动态特征。实验结果表明:在干旱生境(3 月份)转向干热生境(5 月份)时,大多数供试树种蒸腾速率的日变化峰值有所提前,蒸腾作用受到明显限制,而当干热胁迫解除、湿润生境(10 月份)来临时,蒸腾作用受限程度减轻或消失,多数供试树种呈现出比较典型的峰状曲线;在干旱、干热以及湿润季节里,供试树种均可分为高、亚高、亚低和低蒸腾速率树种等 4 个类别,且随着季节的变化,树种所属类别或蒸腾速率大小排序存在明显变动,体现了树种特性在水分生理反应上的多样性表达;随着干热胁迫的加深,供试树种蒸腾速率的变化可分为增强型、减弱型及稳定型 3 种;树种蒸腾速率的变化方向与气孔导度的变化方向存在不一致的现象,树种蒸腾速率的季节性增减可能表现为气孔因素为主与非气孔因素为主两种控制形式。

关键词:干热河谷;植被恢复;蒸腾作用;日变化;季节变化

文章编号:1000-0933(2009)12-6691-11 中图分类号:Q948 文献标识码:A

Transpiration of tree species for vegetation restoration in dry-hot river valleys

DUAN Ai-Guo, ZHANG Jian-Guo*, ZHANG Shou-Gong, ZHANG Jun-Pei, WANG Jun-Hui, HE Cai-Yun, LI Yan

Research Institute of Forestry, CAF; Key Laboratory of Forest Silviculture of the State Forestry Administration, Beijing 100091, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6691 ~ 6701.

Abstract: Transpiration of more than 10 tree species naturally occurring in the dry-hot valleys of Jinsha River was measured on typical sunny days in different seasons in order to reveal their dynamic patterns of transpiration under extreme dry and hot habitat conditions. During the transition period from dry in March to dry and hot in May, the daily peak time of transpiration rate of most tree species appeared earlier, indicating obvious transpiration depression. When drought and heat stress was relieved and wet season came, the transpiration depression became lightened or disappeared, and most tree species displayed typical peak-shape curves again. In drought, dry and hot and wet seasons, the tested species can be classified into 4 groups respectively with high, sub-high, sub-low and low average daily transpiration rate. The grouping of species and the ranks of transpiration rates displayed significant changes among different seasons, indicating diversified physiological responses to water stress. With intensified drought and heat stress, 3 patterns of change, enhanced, weakened and stable, were found of the transpiration rates. The direction of seasonal change of transpiration rate was inconsistent with that of stoma conductance, the seasonal change of transpiration rate was probably controlled by both stoma-related and non stoma-related factors.

Key Words: dry-hot river valley; vegetation restoration; transpiration; daily change; seasonal change

干热河谷的概念最早来源于云南当地所称的“干坝子”或“干热坝子”^[1]。有关干热河谷的明确定论是由中国科学院青藏高原综合考察队横断山山区河谷综合考察组在 1981 年至 1984 年的考察后提出^[2]。干热河

基金项目:国家林业局林业重点工程科技支撑资助项目

收稿日期:2008-09-26; 修订日期:2009-01-21

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

谷在世界统一划分的三大类干旱地区中,既不属于大陆中心荒漠,也不是副热带稀疏草原,而是属于局部的干旱生境。我国干热河谷的分布主要集中在云南省境内^[3]。干热河谷生态恶化,植被覆盖率低,水土流失严重,已经成为我国典型的生态脆弱区和造林困难地带,是全国生态环境建设的重点。

干热河谷区气候干旱炎热,降雨量较少且分配不均,全年蒸发量为降水量的 6 倍左右,地表土壤水分亏缺严重,是该区植被恢复的主要限制因子,耐干热、蒸腾失水量少的适生树种的选择与造林是该区生态植被恢复的主要手段和途径。围绕干热河谷区生态植被的恢复,自 1986 年以来,我国学者在立地分类评价^[4,5]、造林树种选择^[6~8]及造林技术^[9,10]等方面开展了大量的科学研究工作,取得较大成绩。但由于研究工作的阶段性和研究手段的缺乏,以往的研究对干热河谷特定生境条件下恢复造林树种的适生机制缺乏足够探讨,局限于桉树、相思类等少数造林树种在某一季节的水分生理生态特性的研究,致使研究成果难以反映多树种在不同阶段的生理反应特性,亦因此难以制定科学有效的造林规划,并难以实现不同植被恢复树种适宜性的准确评价。

蒸腾是植物耗水特征的主要方式,是土壤-植物-大气系统 (SPAC) 中水分运转的关键环节或枢纽^[11,12]。蒸腾速率是衡量树木水分平衡的一个重要生理指标和重要水分参数,可以反映树种调节自身水分损耗能力及适应干旱环境的不同能力。鉴于此,本研究以金沙江干热河谷区 10 余种野外生长树种为试材,探讨了不同季节典型晴天里各树种叶片水平的蒸腾速率日动态规律,以揭示干热生境条件下供试树种蒸腾作用的动态特征,为该区造林树种水分生理平衡机理研究及适生树种选择提供理论与实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验区位于云贵高原云南省境内金沙江中段的元谋县。元谋县地处云南省北部,位于东经 101°52' ~ 102°00',北纬 25°40' ~ 26°00'之间,海拔约 1 100 m,属典型的干热河谷气候特征,雨季约 5 个月(6 ~ 10 月份),降水集中,但连续降雨日数较少,昼夜温差不大,空气闷热;干季 6 ~ 7 个月(11 月至翌年 5 月份),主要为 3、4、5 月份,年降水量 613.9 mm,其中 6 ~ 10 月份降雨占全年降水量的 92%,年蒸发量 3 847.8 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。

1.2 试验材料

共选用 14 个野外试验树种,均自然生长于坡度较为平缓的南向坡中上部位,其中,印楝、新银合欢、苏门答腊金合欢、木豆、山毛豆、久树、马占相思及大叶相思等 8 个植被恢复造林树种均人工栽植于 2002 年,测定时林龄为 5 a,山合欢、车桑子、余甘子、小桐子及川楝等 5 个树种为野生树种,赤桉林为 2002 年砍伐后的萌生林分。所有供试树种均生长发育良好,各项生长指标如地径(D_g)、株高(H)、冠幅(CW)如表 1 所示。

表 1 14 个野外供试树种生长情况

Table 1 Growth index of 14 tested tree species in field of Yuanmou dry-hot river valley

树种 Species	地径 D_g (mm)	株高 H (m)	冠幅 CW (m)	树种 Species	D_g (mm)	H (m)	CW (m)
印楝 <i>Azadirachta indica</i> A. Juss	53.68	3.03	1.58	赤桉 <i>Eucalyptus camaldolensis</i> Dehn.	43.86	4.14	1.58
山合欢 <i>Albizia kalkora</i> (Roxb.) Prain	50.00	1.60	1.50	马占相思 <i>Acacia mangium</i> Wild.	31.58	2.03	1.49
新银合欢 <i>Leucaena glauca</i> (L.) Benth.	47.63	3.82	2.75	大叶相思 <i>Acacia auriculiformis</i> A. Cunn.	48.54	3.21	2.24
苏门答腊金合欢 <i>Acacia glauca</i> (L.) Moelichl	30.03	2.32	2.56	川楝 <i>Melia toosenden</i> Sieb. et Zucc.	85.00	4.10	3.52
木豆 <i>Cajanus cajan</i> (L.) Millsp.	16.55	2.10	0.80	车桑子 <i>Dodonaea viscosa</i> (L.) Jacq.	16.86	1.50	1.02
山毛豆 <i>Tephrosia candida</i> DC.	35.00	2.14	2.07	余甘子 <i>Phyllanthus emblica</i> L.	32.75	1.39	1.17
久树 <i>Schleichera oleosa</i> (Lour.) Oken.	13.67	0.85	0.43	小桐子 <i>Jatropha curcas</i> L.	51.1	2.75	3.15

1.3 研究方法

于 2005、2006 年选择干季(3 月份)、热季(5 月份)及雨季后(10 月份)的典型晴天采用 Licor-6400 便携式

光合测定系统测定供试树种的蒸腾速率和气孔导度。由于元谋试验区的余甘子、小桐子两树种展叶较晚,故 3 月份测定的树种为 12 个。选取各供试树种典型单株并挂牌,测定前先固定各单株树冠中部四周 2~5 个典型小枝上的健康叶片,其中,对于冠层较小的树种如车桑子选取 2 片叶,冠层较大的树种如大叶相思、马占相思则在 4 个方位均选取一个叶片,另在树冠内层选取 1 片处于遮荫状态的叶片,采用红线予以标记作长期观测。每个树种在 3 个不同的季节均进行一个典型晴天的测试,一个典型晴天测定 6~7 个树种,每个季节均进行两个相似典型晴天的测量。3、5 月份典型晴天的日变化测定时间为 8:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00、20:00,10 月份因傍晚来临的早,测定时间为 8:00 点至 18:00 点。对各树种树冠外围叶片蒸腾速率日变化平均值采用 SPSS 统计软件进行差异显著性分析及聚类分析,运用 SAS 软件进行数据回归分析。

表 2 元谋干热河谷不同季节典型晴天主要气象因子概况

Table 2 The main weather factors of Yuanmou County Dry-Hot River Valley on typical sunny day in different seasons

时间 Time	3 月份 March			5 月份 May			10 月份 October		
	温度 Temperature (℃)	相对湿度 Relative humidity (%)	光照强度 Light intensity ($\mu\text{mol m}^{-1} \text{s}^{-1}$)	温度 Temperature (℃)	相对湿度 Relative humidity (%)	光照强度 Light intensity ($\mu\text{mol m}^{-1} \text{s}^{-1}$)	温度 Temperature (℃)	相对湿度 Relative humidity (%)	光照强度 Light intensity ($\mu\text{mol m}^{-1} \text{s}^{-1}$)
8:00	18.22	31.59	221.70	33.20	21.75	1185.29	24.22	53.55	108.33
10:00	26.60	29.08	1580.63	37.31	16.61	1649.80	33.13	41.62	689.67
12:00	38.27	15.15	1800.67	40.13	10.76	1804.00	32.25	33.24	1348.00
14:00	36.72	14.89	1917.00	40.52	10.57	1783.50	35.91	36.38	1835.33
16:00	35.57	14.20	1621.20	39.62	11.69	1531.90	35.67	35.66	1331.75
18:00	34.97	14.64	1177.40	35.79	15.08	1150.00	30.00	36.83	115.20
20:00	25.36	25.30	0.00	32.74	19.62	5.00			

2 结果与分析

2.1 干热河谷 3 月干季时植被恢复树种蒸腾速率日动态

从图 1 可以明显看出,12 个供试树种的蒸腾速率在一天的变化中均具有明显高峰值,总体上表现为先上升后下降,不同树种不同方位的叶片的高峰值出现的时刻不尽相同,且峰值次数亦有所差异,体现了树种特性和叶方位差异在树种水分生理反应上的多样性表达。多数树种多数叶片的蒸腾速率日变化呈双峰态,少数呈单峰态,个别呈现 3 峰态如大叶相思的 3 号叶。多数树种多数叶片的蒸腾速率日变化最高峰出现在 12:00,少数出现在 10:00,亦有个别出现在 14:00 或 10:00,这表明,在 3 月份干季各试验树种通过叶片丧失水分最快的时刻主要发生在 12:00 及 10:00。由于受到高温、低湿、高光强胁迫,下午部分树种蒸腾速率日变化出现明显的低谷,呈双峰态分布的各树种不同方位叶片蒸腾速率的“低谷”多数出现在 14:00,少数出现在 16:00。

在干季 3 月份,以各树种 8:00 至 18:00 时段蒸腾速率的平均值为日变化均值,对不同树种蒸腾速率日平均值的系统聚类分析结果表明,在干季里 12 个树种可分为大小 4 类:①高蒸腾速率树种,包括新银合欢一个树种,其蒸腾速率日均值达 $3.64 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,在 $3.29 \sim 3.85 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 间变动;②亚高蒸腾速率树种,包括苏门答腊金合欢、赤桉和久树,蒸腾速率日均值及变动范围分别为 $3.22 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($2.15 \sim 4.06 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $3.01 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($2.46 \sim 3.65 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $2.53 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1.60 \sim 3.90 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$);③亚低蒸腾速率树种,包括大叶相思、马占相思、山毛豆、车桑子、山合欢及川楝等 6 个树种,它们的蒸腾速率日均值及变动范围分别为 $2.21 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1.74 \sim 3.06 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $2.01 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1.26 \sim 2.52 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $2.00 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1.54 \sim 2.51 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $1.93 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1.88 \sim 1.98 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $1.77 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1.19 \sim 2.92 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $1.65 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1.27 \sim 1.91 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$);④低蒸腾速率树种,包括印楝与木豆,其蒸腾速率日均值及变动范围分别为 $0.69 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($0.33 \sim 1.05 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $0.35 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($0.35 \sim 0.36 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。Duncan 多重比较结果表明(表 2),属于高蒸腾速率树种类别的新银合欢显著高于属于亚高蒸腾速率树种的苏门答腊金合

欢、赤桉、久树以及属于亚低蒸腾速率树种的大叶相思、山毛豆、山合欢、马占相思与车桑子;属于亚高蒸腾速率树种类别的赤桉及苏门答腊金合欢显著高于同一类别的久树以及属于亚低蒸腾速率树种类别的大叶相思、山毛豆、山合欢、马占相思、车桑子及川楝;而久树、大叶相思、山毛豆、山合欢、马占相思及车桑子显著高于印楝;属于亚低蒸腾速率树种类别的川楝显著高于属于低蒸腾速率树种类别的木豆。

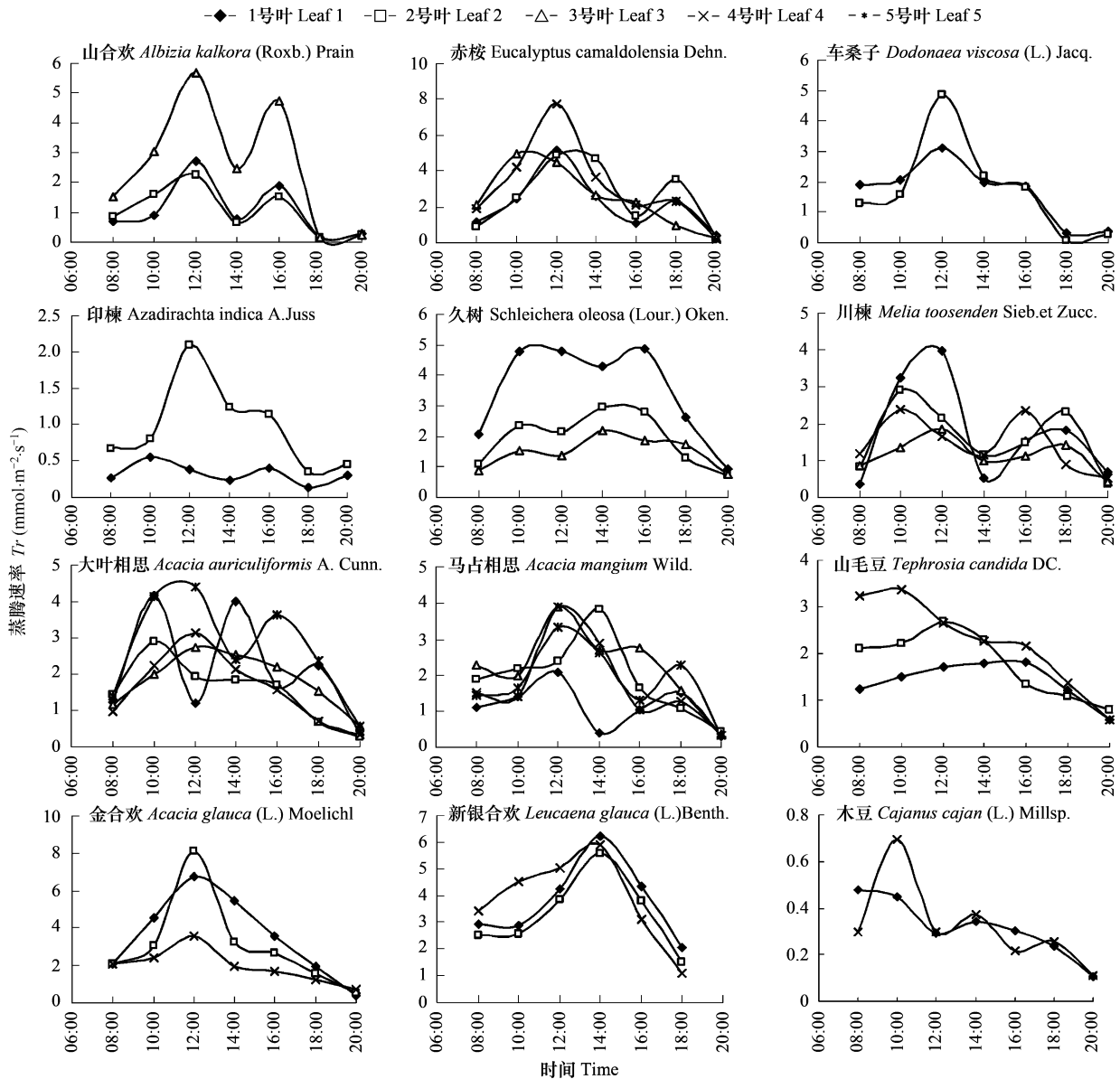


图1 2005年3月典型晴天里元谋干热河谷区野外12个树种蒸腾速率的日变化

Fig. 1 Daily change of transpiration rate of 12 kinds of tree species in dry-hot river valley on typical sunny day of March in 2005

2.2 干热河谷5月份干热季节时植被恢复树种蒸腾速率日动态

3月份过后,干热河谷气候持续干燥,且温度增高,当进入5月份时,气候表现为干热型,是植被恢复树种能否存活及良性生长的关键时期,这一时期树种的蒸腾失水响应机制一定程度上体现了树种持续耐旱方式及作为干热河谷特定生境条件下植被恢复树种的选择潜力。由图2可知,与3月份干季不同,在5月份干热环境里,多数供试树种的蒸腾速率最大值均出现在8:00或10:00,整个日变化进程呈明显的下降趋势,尤其是苏门答腊金合欢、木豆、赤桉、印楝、余甘子、车桑子、大叶相思和山合欢等8个树种。久树的蒸腾速率最大值出现在8:00,新银合欢出现在12:00。这一现象表明,随着干热胁迫的加深,植被恢复树种蒸腾作用主要时期

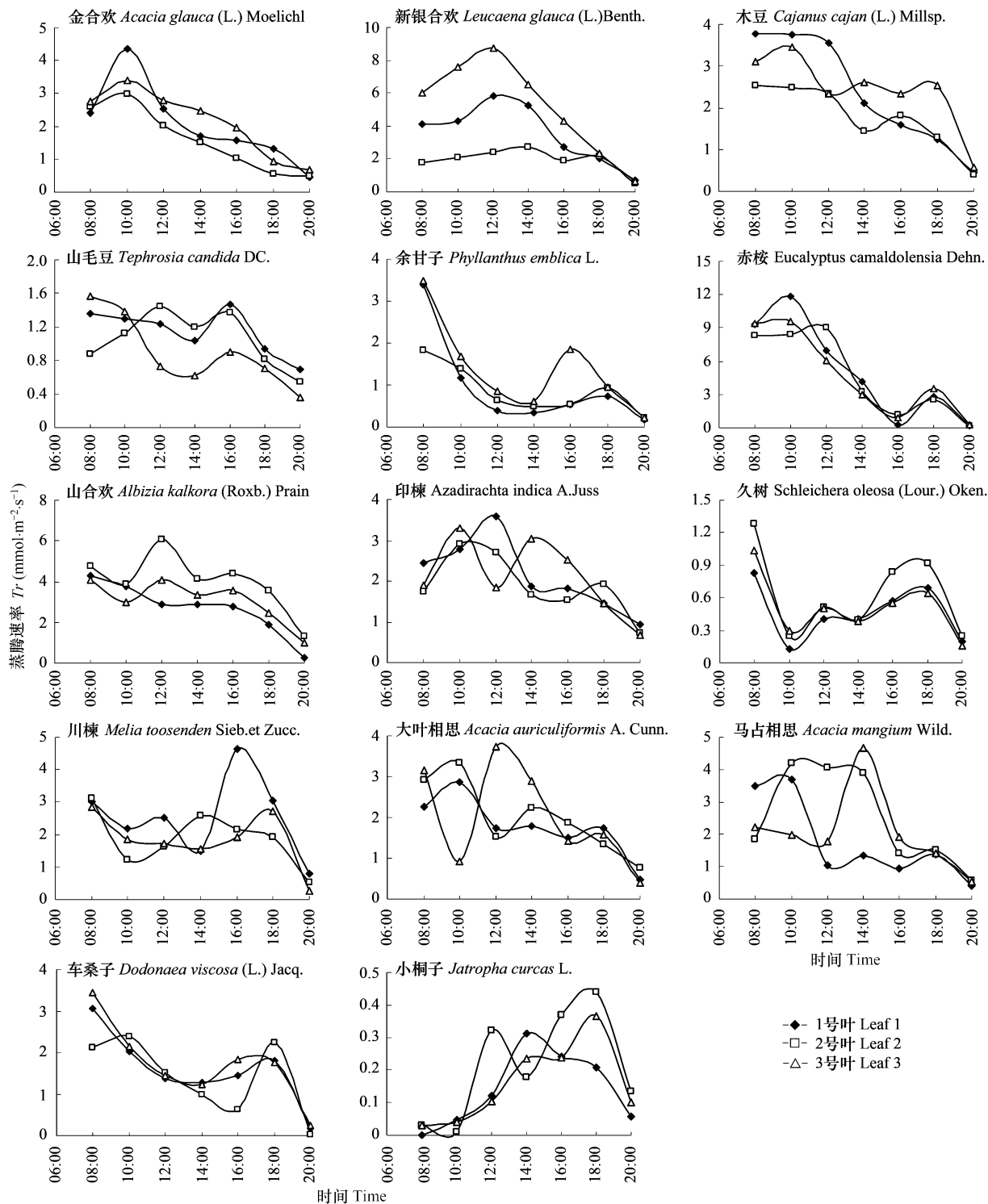


图2 2005年5月典型晴天里元谋干热河谷区野外14个树种蒸腾速率的日变化

Fig. 2 Daily change of transpiration rate of 14 kinds of tree species in field in dry-hot river valley on typical sunny day of May in 2005

较干季3月份提前,且随后在高温、低湿、高光强等因子的综合作用下叶片气孔部分关闭或叶片自动闭合,蒸腾作用受到深度限制,而这种限制很可能是树种为防止进一步失水而被迫启动的一种自我保护机制。久树、车桑子、余甘子、山毛豆、川楝等5个树种的蒸腾速率在18:00或16:00具有一个明显的亚高峰或高峰,主要是由于此时温度及湿度有个明显的下降且光照强度虽下降但仍维持在不低的水平,蒸腾速率的大幅或小幅上升体现了蒸腾限制得到了某种程度的解除。小桐子属大戟科树种,叶水势较高,其蒸腾速率日变化进程较为

独特,不同方位叶片蒸腾速率最大值出现在 18:00 或 14:00,这也许与该树种叶片气体交换大量发生所需的诱导期较长及独特自我保护机制有关。

在 5 月份的干热季节里(图 2),12 个供试树种的蒸腾速率亦可划分为大小 4 个类别:①高蒸腾速率树种,仅赤桉一个树种,其蒸腾速率日均值达 $5.58 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,变动范围为 $5.39 \sim 5.89 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;②亚高蒸腾速率树种,包括新银合欢和山合欢 2 个树种,其蒸腾速率日均值分别为 $4.05 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $3.66 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,变动范围分别为 $2.17 \sim 5.92 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $3.08 \sim 4.07 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;③亚低蒸腾速率树种,包括木豆、马占相思、川楝、大叶相思、苏门答腊金合欢、印楝及车桑子等 7 个树种,它们的蒸腾速率日均值及变动范围分别为 $2.46 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1.98 \sim 2.73 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $2.37 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1.98 \sim 2.81 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $2.34 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($2.10 \sim 2.81 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $2.16 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1.98 \sim 2.29 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $2.16 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1.77 \sim 2.38 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $2.05 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1.52 \sim 2.49 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 及 $1.82 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1.65 \sim 1.98 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$);④低蒸腾速率树种,包括余甘子、山毛豆、久树及小桐子等 4 个树种,其蒸腾速率日均值及变动范围分别为 $1.21 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($0.97 \sim 1.57 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $1.11 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($0.98 \sim 1.22 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $0.59 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($0.51 \sim 0.70 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $0.18 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($0.16 \sim 0.22 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。多重比较结果表明(表 2),属于高蒸腾速率树种的赤桉显著高于属于亚高蒸腾速率树种的新银合欢和山合欢;而新银合欢和山合欢显著高于属于亚低蒸腾速率树种的木豆、马占相思、川楝、大叶相思、苏门答腊金合欢、印楝及车桑子等 7 个树种;属于亚低蒸腾速率树种的木豆、马占相思及川楝显著高于属于低蒸腾速率树种的余甘子及山毛豆;大叶相思、苏门答腊金合欢、印楝及车桑子显著高于属于低蒸腾速率树种的久树和小桐子。蒸腾速率的大小反映了树种在干热环境中减少水分损失能力的大小,赤桉、新银合欢和山合欢属于高或亚高蒸腾速率树种类别,表明这 3 个野外生长的树种减少水分损失能力较弱,而余甘子、山毛豆、久树及小桐子属于低蒸腾速率树种,说明它们控制失水的能力相对较强。

2.3 干热河谷 10 月份湿润季节时植被恢复树种蒸腾速率日动态

10 月份为金沙江干热河谷区的降雨末期,在这一时期,干热胁迫已解除,是植物生长良好的季节,该季节植被恢复树种蒸腾作用状况直接反映了树种恢复正常生理反应后的水分利用机制,亦是树种适应能力的重要评判依据。从图 3 可以明显看出,随着干热胁迫的解除,多数供试树种蒸腾速率日变化进程呈现出比较典型的峰状曲线,即表现为单峰的树种的峰值一般都出现在 12:00 或 10:00、14:00,如山合欢、赤桉、大叶相思、马占相思、小桐子、川楝;车桑子亦表现为单峰状曲线,但峰值出现在 8:00,略显异常;明显表现为双峰的树种的蒸腾速率在中午出现低谷,如印楝、久树、苏门答腊金合欢和余甘子;另外新银合欢、木豆、山毛豆等树种的叶片同时具有单峰和双峰特征,但双峰曲线具有不典型性和不对称性,峰谷不明显。这一现象表明湿润季节时供试树种摆脱了干热季节里出现的蒸腾深度限制,树种恢复了正常生长,而这正是干热河谷区植被恢复的重要必要条件。

在 10 月份的湿润季节,14 个树种蒸腾速率日均值的系统聚类结果为:①高蒸腾速率树种,为赤桉,其蒸腾速率日均值达 $5.35 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,在 $5.01 \sim 6.01 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 间变动;②亚高蒸腾速率树种,包括川楝和久树,其蒸腾速率日均值及变动范围分别为 $3.77 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($3.14 \sim 4.25 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $3.45 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($3.17 \sim 3.87 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$);③亚低蒸腾速率树种,包括木豆、山合欢、马占相思、大叶相思、小桐子、车桑子和印楝等 7 个树种,它们的蒸腾速率日均值及变动范围分别为 $3.02 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($2.12 \sim 3.73 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $2.69 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($2.23 \sim 3.07 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $2.29 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1.88 \sim 2.78 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $2.22 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($2.10 \sim 2.34 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $1.90 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1.49 \sim 2.28 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $1.66 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1.52 \sim 1.80 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)、 $1.39 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1.01 \sim 1.76 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$);④低蒸腾速率树种,包括新银合欢、余甘子、苏门答腊金合欢和山毛豆,其中,新银合欢的蒸腾速率日均值为 $1.38 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,变动范围为 $0.97 \sim 1.83 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,余甘子为 $1.34 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,变动范围为 $1.27 \sim 1.40 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,苏门答腊金合欢为 $1.32 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,变动范围为 $0.94 \sim 2.00 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,山毛豆为 $1.19 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,变

动范围为 0.67 ~ 1.78 mmol·m⁻²·s⁻¹。多重比较结果表明(表 3),属于高蒸腾速率树种的赤桉显著高于属于亚高蒸腾速率树种的川楝、久树以及属于亚低蒸腾速率树种的木豆;川楝与久树显著高于属于亚低蒸腾速率树种的山合欢、马占相思及大叶相思;亚低蒸腾速率树种类别中的木豆显著高于小桐子,山合欢显著高于车桑子,马占相思显著高于属于亚低蒸腾速率树种的苏门答腊金合欢和属于低蒸腾速率树种的新银合欢及印楝;大叶相思显著高于余甘子和山毛豆。

表 2 干季与干热季节时试验树种蒸腾速率日变化平均值的多重比较分析结果*

Table 2 Analysis of multi-layer compare for daily averages of water consumption rate of tree species tested in field in dry March and dry and hot May

3 月份干季 Dry March						5 月份干热季节 Dry and hot May					
树种 Tree species	多重比较结果 Results of multi-layer compare					树种 Tree species	多重比较结果 Results of multi-layer compare				
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
木豆 ^d <i>Cajanus cajan</i>	0.3534					小桐子 ^d <i>Jatropha curcas</i>	0.1877				
印楝 ^d <i>Azadirachta indica</i>	0.6908	0.6908				久树 ^d <i>Schleichera oleosa</i>	0.5985				
川楝 ^c <i>Melia toosenden</i>		1.6103	1.6103			山毛豆 ^d <i>Tephrosia candida</i>	1.1061	1.1061			
车桑子 ^c <i>Dodonaea viscosa</i>			1.9274	1.9274		余甘子 ^d <i>Phyllanthus emblica</i>	1.2502	1.2502			
马占相思 ^c <i>Acacia mangium</i>			1.9287	1.9287		车桑子 ^c <i>Dodonaea viscosa</i>		1.8149	1.8149		
山合欢 ^c <i>Albizia kalkora</i>			1.9590	1.9590		印楝 ^c <i>Azadirachta indica</i>		2.0209	2.0209		
山毛豆 ^c <i>Tephrosia candida</i>			2.0177	2.0177		苏门答腊金合欢 ^c <i>Acacia glauca</i>		2.1031	2.1031		
大叶相思 ^c <i>Acacia auriculiformis</i>			2.3382	2.3382		大叶相思 ^c <i>Acacia auriculiformis</i>		2.1422	2.1422		
久树 ^b <i>Schleichera oleosa</i>			2.6784	2.6784	2.6784	川楝 ^c <i>Melia toosenden</i>			2.3897		
赤桉 ^b <i>Eucalyptus camaldolensia</i>				3.0415	3.0415	马占相思 ^c <i>Acacia mangium</i>			2.3915		
苏门答腊金合欢 ^b <i>Acacia glauca</i>				3.1417	3.1417	木豆 ^c <i>Cajanus cajan</i>			2.4164		
新银合欢 ^a <i>Leucaena glauca</i>					3.5969	山合欢 ^b <i>Albizia kalkora</i>				3.7334	
						新银合欢 ^b <i>Leucaena glauca</i>				4.0467	
						赤桉 ^a <i>Eucalyptus camaldolensia</i>					5.6209
显著水平 Significant level	0.520	0.088	0.082	0.051	0.115	显著水平 Significant level	0.055	0.071	0.294	0.527	1.000

* 表中字母 a、b、c、d 分别代表系统聚类分析的 4 个类别,即高、亚高、亚低和低蒸腾速率树种;显著性检验水平设为 0.05 a, b, c and d in above table stand for four different sorts from systematical classification analysis, respectively high, sub-high, sub-low, and low transpiration rate; the test level of significance is 0.05

2.4 干热河谷植被恢复树种蒸腾速率日动态的季节效应

季节效应源于树种生长外界环境条件的改变及树种内在生长发育特性及阶段的不同。在季节性干热气候鲜明的元谋干热河谷,树种的生理生态特性必定会呈现出一定的差异。从前面的分析可知,供试树种蒸腾速率随季节的变化具有不同程度的改变,且不同树种的蒸腾速率大小在不同季节里的所属类别或排序亦有明显变动(图 4)。在 3 月份干季转向 5 月份干热季节阶段,木豆、印楝、山合欢、赤桉、川楝、马占相思及新银合

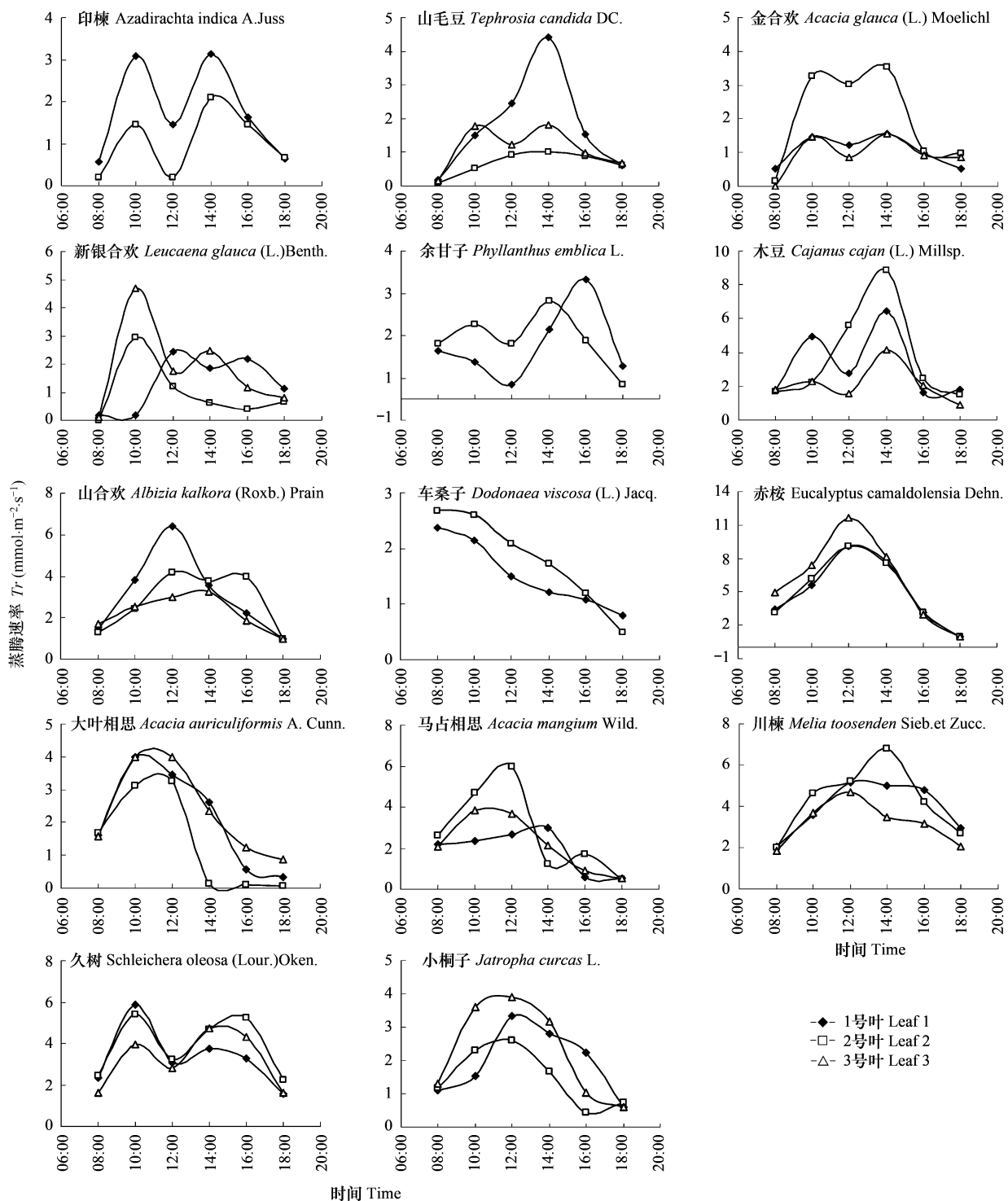


图3 2005年10月典型晴天里元谋干热河谷区野外14个树种蒸腾速率的日变化

Fig. 3 Daily change of transpiration rate of 14 kinds of tree species in field in Yunmou dry-hot river valley on typical sunny day of October in 2005

欢等7个树种的蒸腾速率明显增大,其中,木豆蒸腾速率日均值增幅最大,达596.24%,增加了 $2.11 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,印楝、山合欢及赤桉增幅居中,分别达197.09%、106.94%及85.44%,蒸腾速率日均值分别增加了 1.36 、 1.89 、 $2.57 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,川楝、马占相思和新银合欢增幅相对较小,分别为41.77%、18.26%、11.12%,蒸腾速率日均值分别增加了 0.69 、 $0.37 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.41 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;久树、山毛豆、苏门答腊金合欢、车桑子及大叶相思的蒸腾速率日均值下降,其中,久树下降幅度最大,为76.68%,下降值为 1.94

$\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 山毛豆与苏门答腊金合欢下降幅度其次, 分别为 44.34% 和 33.05%, 下降值分别为 0.89、1.06 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 车桑子和大叶相思下降幅度最小, 分别为 5.59%、2.25%, 下降值仅为 0.11 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 0.05 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。随着干热胁迫的持续与加深, 蒸腾速率的增加与减小反映了树种适应干热逆境的水分控制机制。可以看到, 干热胁迫下, 供试树种蒸腾速率的变化可分为增强型、减弱型及稳定型 3 种。木豆、印楝、山合欢及赤桉等 4 个树种的蒸腾速率增幅最大, 与它们的气孔导度随干热胁迫的加深而增大的现象表现一致, 这说明此 4 个树种是以主动失水来满足自身正常生理活动的需要及抵抗干热环境; 川楝、马占相思和新银合欢蒸腾速率增大, 但气孔导度却不同程度下降, 表明此 3 个树种的蒸腾失水具有很强的被动性; 而久树、山毛豆及苏门答腊金合欢则为减弱型树种, 意味着此 3 个树种对干热逆境具有一定的主动避让性。

表 3 湿润季节 14 个野外试验树种蒸腾速率日变化平均值的多重比较分析结果*

Table 3 Analysis of multi-layer compare for daily averages of water consumption rate of 14 kinds of tree species in wet October

树种 Tree species	多重比较结果 Results of multi-layer compare						
	1	2	3	4	5	6	7
山毛豆 ^d <i>Tephrosia candida</i>	1.2157						
余甘子 ^d <i>Phyllanthus emblica</i>	1.3361						
印楝 ^d <i>Azadirachta indica</i>	1.3851	1.3851					
新银合欢 ^d <i>Leucaena glauca</i>	1.3947	1.3947					
苏门答腊金合欢 ^c <i>Acacia glauca</i>	1.4203	1.4203					
车桑子 ^c <i>Dodonaea viscosa</i>	1.6581	1.6581	1.6581				
小桐子 ^c <i>Jatropha curcas</i>	1.8875	1.8875	1.8875	1.8875			
大叶相思 ^c <i>Acacia auriculiformis</i>		2.2218	2.2218	2.2218	2.2218		
马占相思 ^c <i>Acacia mangium</i>			2.3163	2.3163	2.3163		
山合欢 ^c <i>Albizia kalkora</i>				2.6627	2.6627		
木豆 ^c <i>Cajanus cajan</i>					2.9595	2.9595	
久树 ^b <i>Schleichera oleosa</i>						3.4972	
川楝 ^b <i>Melia toosenden</i>						3.7204	
赤桉 ^a <i>Eucalyptus camaldolensia</i>							5.4546
显著水平 Significant level	0.122	0.053	0.112	0.062	0.076	0.059	1.000

* 表中字母 a、b、c、d 指代类别与表 3 相同 The means of a, b, c and d are same as those in Table 2

在干热季节转向湿润季节的阶段, 小桐子、久树、川楝、木豆、余甘子、山毛豆及大叶相思的蒸腾速率具有不同程度的增加(见图 4), 其中, 小桐子和久树蒸腾速率日均值增幅最大, 分别达 938.06%、484.13%, 增加值分别为 1.72、2.86 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 川楝其次, 增幅为 61.27%, 增加了 1.43 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 木豆、余甘子、山毛豆及大叶相思变化相对稳定, 增幅较小, 分别为 22.84%、10.48%、6.71% 和 2.95%, 增加值分别为 0.56、0.13、0.07 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 及 0.06 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 新银合欢、苏门答腊金合欢、印楝、山合欢、车桑子、赤桉及马占相思的蒸腾速率反而有所下降, 其中, 新银合欢下降幅度最大, 降幅达 66.00%, 下降值达 2.67 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 苏门答腊金合欢、印楝及山合欢下降幅度居中, 降幅分别为 38.57%、32.51%、26.49%, 下降值分别为 0.83、0.67、0.97 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 车桑子、赤桉及马占相思变化较为稳定, 下降幅度最小, 降幅仅分别为 8.88%、4.07%、3.72%, 下降值分别为 0.16、0.23、0.09 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。随着湿润季节的来临, 供试树种气孔导度均增大, 而这里 14 个树种中蒸腾速率增加与减少的各占一半, 表明树种蒸腾速率的变化方向与气孔导度的变化方向存在不一致的现象, 树种蒸腾速率的季节性增减可能表现为气孔因素为主与非气孔因素为主两种控制形式, 且当 *Cond* 增大, 而 *Tr* 减弱, 或 *Cond* 减小, 而 *Tr* 增强时, 表现为非气孔因素为主, 如新银合欢、苏门答腊金合欢和印楝。这与不同季节时树种蒸腾速率受气孔导度影响的强弱程度不一致有关。

3 讨论

本文以地处长江上游的金沙江干热河谷植被恢复试验树种为研究对象, 从植物水分生理生态的角度, 较为深入地探讨了试验树种在生境由干旱转向干热再转向湿润的特殊季节变化过程中的蒸腾速率动态变化特

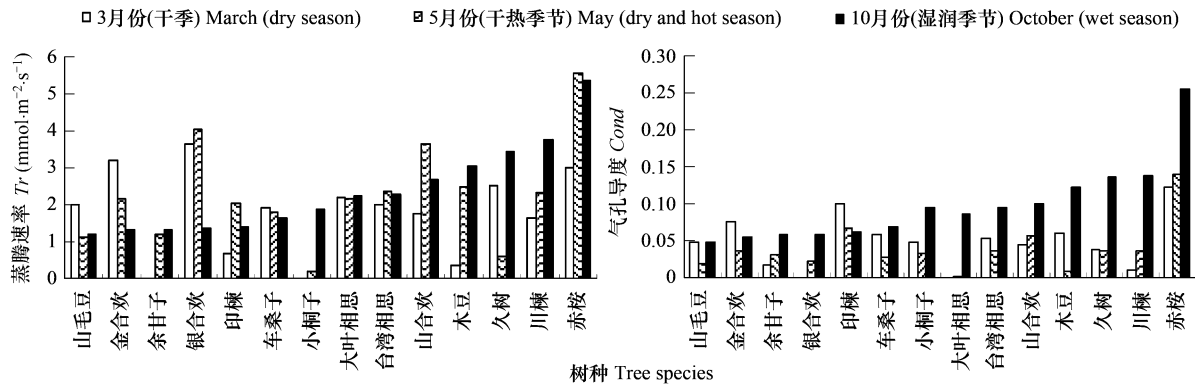


图4 14个供试树种在不同季节里的蒸腾速率、气孔导度日均值比较

Fig. 4 Compare of daily average of transpiration rate, stomatal conductance in March, May and October for 14 tree species

征。可以明显看到,大多数供试树种在不同季节里的蒸腾速率具有明显差异,表明树种在不同季节里的控制失水能力存在很大差别,而且供试树种在不同季节里的蒸腾速率大小排序结果不一,所属类别亦具有不同程度的差异,表明供试树种在不同季节里的相对控制失水能力也是不一样的。赤桉在3个季节里的蒸腾速率均较高,归属于高或亚高蒸腾速率树种,表明赤桉控制蒸腾能力较弱,生态需水量相对较大,这与干旱缺水的河谷生境形成鲜明的水分供需矛盾,亦因此类似赤桉耗水量大的树种不太适宜在干热河谷区大面积造林^[13];新银合欢在干季和干热季节属于高或亚高蒸腾速率树种,而在湿润季节时却属于低蒸腾速率树种,与之类似,苏门答腊金合欢在干季及干热季节时分属亚高、亚低蒸腾速率树种,在湿润季节时属于低蒸腾速率树种,这表明此2个树种在干热逆境中控制蒸腾能力较强,这种增强蒸腾失水的特性很可能是一种被动的抗干热性,以此降低叶温,并与它们在午后主动合拢叶片的习性一起共同构筑保护自身光合机构的抗逆机制,这2个树种在相对较长的湿润季节里的低蒸腾速率却无疑有助于降低它们全年的生态需水量;山合欢与另外2个合欢相似,其在干热季节里的蒸腾速率较高,而在湿润季节有较大幅度的降低,故它们适应干旱的机制一致,但山合欢的生态需水量可能更高,这与新银合欢和苏门答腊金合欢在干季生长良好而山合欢仅在低洼处生长良好的实际情况相吻合;木豆与小桐子在干季与干热季节属低或亚低蒸腾速率树种,而在湿润季节则为高蒸腾速率树种,表现出明显的避旱特性,这非常有利于它们在季节性干热逆境中生存;川楝与久树在旱季里的蒸腾速率明显低于湿润季节,亦表现出了一定的避旱特性;虽然印楝表现出类似山合欢的变化特征,即在干热季节蒸腾量最大,但山毛豆、余甘子和印楝等3个树种在3个季节里的蒸腾速率均属于低或亚低蒸腾速率树种,它们蒸腾失水且蒸腾速率变化较小,故生态需水量相对较低,适合干热河谷区植被恢复树种的选择方向;车桑子、大叶相思与马占相思一直属于亚低蒸腾速率树种,蒸腾速率变化较为稳定,表现出对干热河谷区特殊气候环境的适应性,其中车桑子属灌木树种,叶面积相对2个相思树种而言要小很多,故生态需水量亦低,而2个相思叶面积较大,生态需水量亦高出许多,在试验区乔木树种中的生态需水量可能仅次于赤桉^[7]。

可见,供试树种适应季节性极端干热环境时其蒸腾耗水机制具有非常多样化的表现方式。全面衡量一个树种的生态需水量不仅需要从树种控制蒸腾失水能力的季节性转变机制方面考虑,而且尚需考量树种的相对蒸腾失水类别,如此才能对树种的蒸腾抗干热特性作出科学、合理的评价。对于干热河谷区植被恢复树种蒸腾作用的研究,本文亦是作了初步探讨,尚需进一步从单株、林分水平上展开研究,并系统性地探索整个SPACE系统中的水分储存、运转和消耗动态特征,这有待通过对该地区植被恢复林分的长期定位观测研究予以解决,并为区域植被恢复树种选择及稳定性评价奠定坚实基础。

References:

- [1] Zhao J C. Studies on economics of Dry-Hot River Valley. Hongkong: Culture Publishing house of China, 1992. 1—3.

- [2] Zhang R Z. Dry-Hot River Valley in crossing mountainous area. Beijing: Science Publishing House, 1996.
- [3] Zhao L, Lang N J, Zheng K, Peng M J. A study on eco-environmental characteristics of Dry and Hot Valley of Yunnan Province. Forest Inventory and Planning, 2006.
- [4] Zhang C Y. Soil resource and exploitation potential of the Dry-Hot River Valley in Jinsha River. Mountainous Region Research, 1996,14(3):188—193.
- [5] Yang Z Q, Wang L X, Pang B C. Site type division for conversion of cropland to forestland and management pattern of Dry-Hot River Valley in the west of Pangzhihua City. Sichuan Forestry Exploration and Design, 2003,2(2):33—35.
- [6] Li K, Zhang C H, Cui Y Z. A study on the fitting afforestation tree species during covering the Land for Forestry in Hot and Dry Valley of Jinsha-river. Forest Research, 2004, (175):555—563.
- [7] Ma H C, Xu H, Cheng D Q. Estimation of water consumption of a few kinds of Acacia and Eucalyptus in Yuanmou Dry-Hot River Valley. Forest Science and Technology, 2000,(4):9—11.
- [8] Gao J. Estimation of drought tolerance of main silvicultural species in Dry-Hot River Valley of Yuanmou. Journal of Southwest Forest College, 1997,17(2):19—23.
- [9] Zhang X B, Yang Z, Wen A B. Micro-water harvesting technique to establish ever-green forests in the view area from Panzhihua City Urban. Journal of Soil Water Conservation, 2001,15(4):6—9.
- [10] Lin W J, Ma H C, Zhou J. Study on Water Dynamics of Different Hydrogel Treatments Under Drought Stress. Research of Soil and Water Conservation, 2004,11(2):121—123.
- [11] Zhang J G, Li J Y, Sheng G F. Studies on tree drought tolerance characteristics and mechanism. Beijing: Forest Publishing House of China, 2000.
- [12] Zhang Z S, Li X R, Wang X P. Evaporation and transpiration in re-vegetated desert area. Acta Ecologica Sinica, 2005,25(10):2484—2490.
- [13] Wang K Q, Qi J C. Study on growth law of *Eucalyptus Camaldolensia* in the dry-hot river valley in Yuanmou County. Journal of Southwest Forestry College, 2000,20(2):72.

参考文献:

- [1] 赵俊臣. 干热河谷经济学初探. 香港: 中国文化出版社, 1992. 1~3, 31(3): 114~117.
- [2] 张荣祖. 横断山区干旱河谷. 北京: 科学出版社, 1996.
- [3] 赵琳, 郎南军, 郑科, 彭明俊. 云南干热河谷生态环境特性研究. 林业调查规划, 2006, 31(3): 114~117.
- [4] 张映翠. 金沙江干热河谷土地资源及其开发潜力. 山地研究, 1996, 14(3): 188~193.
- [5] 杨再强, 王立新, 潘步昌, 等. 攀西干旱干热河谷退耕还林立地类型的划分及经营模式探讨. 四川林勘设计, 2003, 2(2): 33~35.
- [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. 林业科学研究, 2004, 17(5): 555~563.
- [7] 马焕成, 胥辉, 陈德强. 元谋干热河谷几种相思和桉树水分消耗量估测. 林业科技通讯, 2000, (4): 9~11.
- [8] 高洁. 元谋干热河谷主要造林植物的耐旱性评估. 西南林学院学报, 1997, 17(2): 19~23.
- [9] 张信宝, 杨忠, 文安邦. 微水造林建设攀枝花市视野区常绿森林植被. 水土保持学报, 2001, 15(4): 6~9.
- [10] 林文杰, 马焕成, 周蛟. 干旱胁迫下不同保水剂处理的水分动态研究. 水土保持研究, 2004, 11(2): 121~123.
- [11] 张建国, 李吉跃, 沈国舫, 等. 树木耐旱特性及其机理研究. 北京: 中国林业出版社, 2000.
- [12] 张志山, 李新荣, 王新平. 沙漠人工植被区的蒸发蒸腾. 生态学报, 2005, 25(10): 2484~2490.
- [13] 王克勤, 起家聪. 元谋干热河谷赤桉林生长规律研究. 西南林学院学报, 2000, 20(2): 72.