

网络出版时间:2018-12-04 10:11

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2019.06.003

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20181204.1010.006.html

雷州半岛粗皮桉蒸腾耗水特征及其与土壤水吸力的关系

王志超,许宇星,竹万宽,杜阿朋

(国家林业和草原局桉树研究开发中心 广东湛江桉树林生态系统国家定位观测研究站,广东 湛江 524022)

【摘 要】 【目的】正确认识桉树旱雨季蒸腾耗水规律及其与土壤水分的关系,为桉树栽培抚育提供指导。【方法】在广东雷州半岛地区选择 11 a 生桉树林设置 20 m×20 m 样地,根据每木检尺结果按径阶选择生长状况良好的粗皮桉样木 3 株,于 2017 年 6—10 月(雨季)和 2017 年 11 月至 2018 年 1 月(旱季),采用热扩散茎流计(德国,SF-G)对样木的蒸腾速率进行连续监测,并同步观测林分气象因子、林内降雨及土壤水吸力动态,分析 0~100 cm 土层土壤水吸力与降雨量及粗皮桉蒸腾耗水与日潜在蒸散量和土壤水吸力的关系。【结果】各土层(0~100 cm 土层每 20 cm 为一个土层)土壤水吸力与降雨量均呈极显著负相关,受降雨影响,雨季平均土壤水吸力(21.28 kPa)显著小于旱季(510.44 kPa);不同土层水吸力在观测期内变化趋势相同,但变化幅度差异较大。粗皮桉蒸腾速率存在明显的季节变化特征,雨季是桉树蒸腾耗水的主要时期,日平均蒸腾速率是旱季的 1.8 倍,各月平均单株蒸腾耗水量 9 月>8 月>7 月>6 月>10 月>11 月>12 月>1 月,雨季显著大于旱季;无论是旱季还是雨季,日潜在蒸散量均与蒸腾速率呈极显著正相关。雨季蒸腾速率与各层土壤水吸力无显著相关性,但旱季与土壤水吸力呈极显著线性负相关,土壤水分在旱季成为粗皮桉蒸腾耗水的主要限制因子;旱季不同土层土壤水吸力与蒸腾速率相关性差异较大,相关系数大小为 40~60 cm>20~40 cm>60~80 cm>80~100 cm>0~20 cm。20~80 cm 土层是 11 a 生粗皮桉的主要水分利用层。【结论】在雷州半岛地区,旱季土壤水分是限制粗皮桉蒸腾的主要因子,与潜在蒸散共同决定粗皮桉蒸腾;在无法改变光热的条件下,旱季适当补充水分,可有效提高桉树林分蒸腾,进而提高林分生产力。

【关键词】 土壤水吸力;粗皮桉;林分蒸腾;广东雷州半岛

【中图分类号】 S792.39;S715.4

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2019)06-0014-09

Transpiration characteristics of *Eucalyptus pellita* in Leizhou Peninsula and its relationship with soil water suction

WANG Zhichao, XU Yuxing, ZHU Wankuan, DU Apeng

(Guangdong Zhanjiang Eucalyptus Plantation Ecosystem Research Station, China Eucalypt Research Centre, Zhanjiang, Guangdong 524022, China)

Abstract: 【Objective】 This study investigated the transpiration and water consumption of *Eucalyptus* in dry and rainy seasons and its relationship with soil moisture to provide guidance for *Eucalyptus* cultivation. 【Method】 In the Leizhou Peninsula area of Guangdong, an 11-year-old *Eucalyptus* forest was selected to set up a 20 m×20 m plot. According to sample-plot survey, 3 sample trees with good growth were selected. From June to October 2017 (rainy season) and November 2017 to January 2018 (dry season), the transpiration rates were continuously monitored using a thermal diffusion shale flow meter (Germany, SF-G),

【收稿日期】 2018-05-04

【基金项目】 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(CAFYBB2017QA033, CAFYBB2017QA032);“十三五”国家重点研发计划课题(2016YFD0600505);广东省林业科技创新项目(2017KJCX020);广东湛江桉树林生态系统国家定位观测研究站项目(2018-LYPT-DW-141)

【作者简介】 王志超(1988—),男,山东聊城人,助理研究员,硕士,主要从事生态水文研究。E-mail:wzc2254@163.com

【通信作者】 杜阿朋(1979—),男,河北定州人,副研究员,博士,主要从事森林生态学研究。E-mail:dapzj@163.com

and the meteorological factors, forest rainfall and soil water suction dynamics were simultaneously observed. The relationship between soil water suction in 0—100 cm soil layer and rainfall, the relationship between transpiration water consumption and daily evapotranspiration, and the relationship between transpiration water consumption and soil water suction were then studied. 【Result】 The soil water suction of each soil layer (every 20 cm as a soil layer in the depth of 0—100 cm) had significantly negative correlation with rainfall. Affected by rainfall, the average soil water suction in the rainy season (21.28 kPa) was significantly lower than that in the dry season (510.44 kPa). The changing trend was same for water suction in different soil layers during the observation period, but the variation ranges were quite different. The transpiration rates of *E. pellita* had seasonal variations. The rainy season was the main period of transpiration and water consumption of *Eucalyptus* with daily average transpiration rate of 1.8 times that of the dry season. The average individual transpiration water consumption was in the order of September > August > July > June > October > November > December > January and the values in rainy season were significantly greater than in the dry season. The daily potential evapotranspiration had significantly positive correlation with transpiration rate in both seasons. There was no significant correlation between transpiration rate of the rainy season and soil water suction in each layer, but there was very significant negative linear correlation between dry season transpiration rate and soil water suction. Soil moisture was the major limiting factor for transpiration and water consumption of the *Eucalyptus* in the dry season. The relationships between dry season transpiration rate and water suction of different soil layers were quite different. The correlation coefficient was in the order of 40—60 cm > 20—40 cm > 60—80 cm > 80—100 cm > 0—20 cm. The soil layer of 20—80 cm was the main water use layer of the 11-year-old *E. pellita*. 【Conclusion】 In the dry season of the Leizhou Peninsula, soil moisture was the main factor limiting the transpiration of the *E. pellita*, and it determined the transpiration together with potential evapotranspiration. With constant light and heat condition, proper water supplement measures in the dry season can effectively increase the transpiration and forest productivity of the *Eucalyptus* forest.

Key words: soil water suction; *Eucalyptus pellita*; forest transpiration; Leizhou Peninsula area of Guangdong

土壤水分是影响植物生长的重要因素之一,在一定程度上决定着植物的光合动态,并影响植物的蒸腾^[1-2]。尤其是在干旱胁迫下,土壤水分成为限制植物生理过程的主要因子^[3]。桉树是我国南方的重要战略树种,但其种植区由于受季风、海陆位置、热带气旋等要素的影响,旱雨两季分化明显^[4]。国内学者研究发现,桉树旱雨季的蒸腾及生长差异较大,如对广东地区柠檬桉(*Eucalyptus citriodora*)^[5]、尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)^[6]、尾巨桉(*E. urophylla* × *E. grandis*)^[6-7]蒸腾耗水季节变异特征的研究发现,雨季蒸腾速率均显著大于旱季,液流月通量是旱季的 1.53 倍;另外,林木蒸腾与生长密切相关,雷州半岛雨季桉树幼林高生长增幅可达旱季的 4 倍以上^[8-9];海南 1~5 a 生桉树胸径 7—10 月(雨季)增长最快,11 月至次年 4 月(旱季)增长较慢,平均单株材积增加量 1—4 月(0.002 3 m³)年内最低,7—10 月(0.006 1 m³)年内最高^[10];可见在旱季桉

树的生长及蒸腾均受到限制。目前国内对影响桉树旱季蒸腾及生长的因素研究较少,仅有对桉树林下土壤水分季节动态^[11]及盆栽桉树幼苗水分胁迫下生理指标响应^[12-13]的研究,而针对野外季节性干旱条件下,桉树林下土壤水分含量是否达到其生长胁迫程度,及是否成为限制其生长与蒸腾主要因子的研究,尚未见报道。因此,本试验在因降雨时空分布不均造成季节性干旱的雷州半岛地区,研究桉树林下土壤水吸力季节动态规律及其与蒸腾速率的关系,掌握桉树生长耗水规律,确立水分是否是桉树旱季生长的限制因子,从而为合理调控林水关系、实现科学经营提供依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于广东省雷州半岛地区,试验样地设置在广东湛江桉树森林生态系统国家定位观测站

(21°30'N,111°38'E)内,海拔 90 m,地势平坦,属海洋性季风气候,年均降雨量约 1 500 mm,多集中在 5—10 月份,此时段为雨季,占全年降雨量的 77%~85%;年均温度 23 ℃,年总辐射量 4 240 MJ/m²,年均相对湿度 80.4%。试验区土壤类型主要是玄武岩砖红壤,土层厚度 2 m 以上,0~80 cm 土层内平均有机质含量 16 g/kg 以上,pH 4.5~5.3,土壤肥力属中等水平。乔木层树种主要有粗皮桉(*Eucalyptus pellita*)和托里桉(*Eucalyptus torelliana*);林下植被丰富,主要灌木有五色梅(*Common lantana*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、白背叶(*Mallotus apelta*)等,主要草本植物有飞扬草(*Euphorbia hirta*)、飞机草(*Eupatorium odoratum*)和白花鬼针草

(*Herba bidentis* Pilosa)等。

试验地造林树种为粗皮桉,造林时间为 2006 年 5 月,现存密度 970 株/hm²,平均胸径 23.55 cm,平均树高 21.67 m,平均冠幅 3.25 m×4.12 m(东西×南北),叶面积指数为 1.24。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与样本选取 设置 20 m×20 m 的试验样地,根据每木检尺结果,按径阶选择生长状况良好、树干通直无挤压、无病虫害且距离较近的粗皮桉样木 3 株实施蒸腾速率的连续监测,监测时间为 2017 年 6 月至 2018 年 1 月。样木各项参数见表 1。

表 1 粗皮桉样木的基本情况

Table 1 Basic conditions of the sampling trees of *Eucalyptus pellita*

样木编号 Sample wood number	林龄/a Age	胸径/cm DBH	树高/m Tree height	冠幅/(m×m) Crown width	边材面积/cm ² Sapwood area	树干位点高度/m Tree stem height	测定方位 Position
1	11	28.25	25.0	3.8×4.0	190.45	1.3	北 North
2	11	16.35	18.1	2.5×3.0	43.43	1.3	北 North
3	11	23.89	21.9	3.2×3.6	161.07	1.3	北 North

1.2.2 蒸腾速率的测定和单株日蒸腾量的计算 采用 Granier 热扩散探针法测定蒸腾速率,茎流传感器采用德国 Ecomatik 公司 2 针型探针传感器(型号 SF-G,探针长度 33 mm),在树木胸径处安装。为避免不同方向上的液流差异及日晒的影响,探针均安装在树干阴面,且用防辐射铝箔覆盖。采用美国 Campbell 公司的 CR3000 数据采集器采集数据,自动采集间隔时长为 30 min。蒸腾速率计算公式参考通用的 Granier 液流公式^[14]:

$$J_s=0.714\times K^{1.231};$$
$$K=(\Delta T_{\max}-\Delta T)/\Delta T。$$

式中: J_s 为蒸腾速率,指单位边材面积单位时间内的液流量(mL/(min·cm²)),即 cm/min; $\Delta T_{\max}$ 为无液流时加热探针与参考探针的最大温差值; ΔT 为测定温差值。

单株日蒸腾量按下式计算:

$$\text{单株日蒸腾量(mL/d)}=\text{蒸腾速率(mL/(min}\cdot\text{cm}^2\text{))}\times 60(\text{min})\times 24(\text{h})\times \text{边材面积(cm}^2\text{)}。$$

1.2.3 降雨量及潜在蒸散量的测定 在试验地附近开阔地带架设自动气象观测系统(美国 Campbell 公司的 CR3000),同步监测大气温度、空气湿度、太阳辐射、风速、降雨量、水汽压、土壤热通量等指标,自动采集间隔时长为 10 min。潜在蒸散量采用 FAO 推荐的彭曼-蒙蒂斯(Penman-Monteith)公式^[15]进行计算。

1.2.4 土壤吸水力的测定 在试验样地 3 株样树组成的三角形的重心位置,利用平衡式(EQ15 型)土壤水势张力计(德国 Ecomatik 公司,数据采集器型号 DL6,有效测定范围 0~1.5 MPa),分别在 0~20,20~40,40~60,60~80 和 80~100 cm 土层安装土壤水势探头进行土壤水吸力测定,自动记录时间间隔为 10 min。

1.3 数据处理

采用 Excel 2016 及 SPSS 19.0 统计软件,对所有数据进行整理及方差分析、相关性分析、线性回归拟合并制图。

2 结果与分析

2.1 粗皮桉林下土壤水吸力的季节动态及其与降雨量的关系

图 1 是观测期间降雨量及粗皮桉林下各层土壤水吸力的动态变化,为较好地展示雨季水吸力的动态特征,利用土壤水吸力的常用对数值为纵坐标制图。由图 1 可以看出,雷州半岛地区降雨存在典型的季节性分布不均现象,观测期间 6—10 月的总降雨量高达 810.7 mm,月均降雨量 162 mm,而 11 月至次年 2 月的总降雨量为 21.5 mm,月均降雨量仅 5.4 mm。降雨是土壤水分的主要来源,是土壤水分含量的决定性因素^[16],通过对降雨量与各土层水吸力间的 Pearson 相关分析(表 2)发现,各土层间土壤

水吸力均存在极显著正相关关系($P<0.01$),且相关系数均达到 0.9 左右;各土层土壤水吸力与降雨量均存在极显著负相关关系。因此受降雨的影响,各土层土壤水吸力 6—10 月均保持较低水平,0~100 cm 土层土壤平均水吸力为 21.28 kPa,最大值为 109.05 kPa,最小值为 9.91 kPa,属土壤水分充足期;10 月底开始,随着降雨量的减少,土壤水吸力逐渐上升,11 月至次年 2 月 0~100 cm 土层土壤平

均水吸力为 510.44 kPa,最大值为 1 118.35 kPa,最小值为 118.28 kPa。各土层土壤水吸力变化趋势相同,但变化幅度差异较大,随着土层加深,土壤水吸力变化幅度呈逐渐减小的趋势,这是由于越靠近土壤表层,其受外界环境如降雨、入渗、蒸发等因素的干扰越剧烈,导致其土壤水吸力的变化幅度也越大。

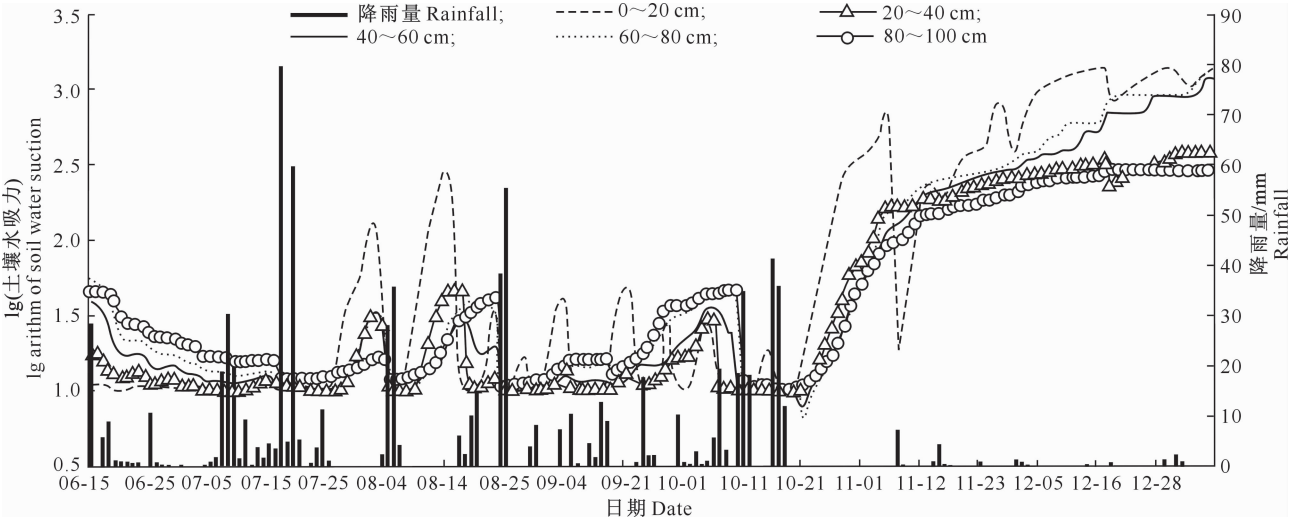


图 1 粗皮桉林下各土层土壤水吸力的动态变化及降雨特征

Fig. 1 Characteristics of rainfall and dynamic changes of soil water suction in different soil layers in *Eucalyptus pellita* forest

表 2 粗皮桉林下各层土壤水吸力与降雨量的 Pearson 相关分析

Table 2 Pearson correlation of rainfall and soil water suction at each layer in *Eucalyptus pellita* forest

指标 Index	土层/cm Soil layer	各土层土壤水吸力 Soil water suction in all soil layers					
		0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm	0~100 cm
土壤水吸力 Soil water suction	0~20	1					
	20~40	0.885 **	1				
	40~60	0.911 **	0.947 **	1			
	60~80	0.922 **	0.923 **	0.991 **	1		
	80~100	0.917 **	0.927 **	0.977 **	0.988 **	1	
	0~100	0.962 **	0.957 **	0.985 **	0.986 **	0.981 **	1
降雨量 Rainfall		-0.232 **	-0.197 **	-0.198 **	-0.205 **	-0.220 **	-0.218 **

注: * 代表在 $P<0.05$ 水平(双侧)上显著相关, ** 代表在 $P<0.01$ 水平(双侧)上极显著相关。表 3 同。
Note: * represents significant correlation at the $P<0.05$ level (bilateral), ** represents significant correlation at the $P<0.01$ level (bilateral). The same for Table 3.

2.2 粗皮桉蒸腾速率的季节动态及其与日潜在蒸散量的关系

对 2017 年 6 月至 2018 年 1 月 3 株样树日平均蒸腾速率的平均值及日潜在蒸散量进行汇总分析,得出粗皮桉蒸腾速率和日潜在蒸散量的时间动态特征,结果见图 2。由图 2 可以看出,两者均存在明显的季节变化特征,6—10 月(雨季)是桉树蒸腾耗水的主要时期,其中 8—9 月最高,其日平均蒸腾速率

为 0.065 4 cm/min,显著大于旱季的 0.035 9 cm/min;日平均蒸腾速率最大值出现在雨季 8 月(0.095 5 cm/min),是旱季最大值(0.060 cm/min, 11 月)的 1.59 倍。

根据 3 株样树日平均蒸腾速率的平均值统计各月单株日蒸腾量,结果(图 3)发现,各月平均单株蒸腾量存在显著差异,其中 8 月(20.19 L/d)和 9 月(20.57 L/d)极显著($P<0.01$)大于 10 月(15.04

L/d)、11 月(11.63 L/d)、12 月(10.37 L/d)和 1 月(7.78 L/d),而与 7 月(17.49 L/d)未达到差异显著水平,但显著大于 6 月(16.21 L/d)($P<0.05$)。整体来看,雨季各月的单株平均日蒸腾量均显著大于旱季各月($P<0.05$)。日平均潜在蒸散量雨季(3.21 mm/d)是旱季(1.92 mm/d)的 1.67 倍,雨季最大日潜在蒸散量为 6.68 mm/d,是旱季最大值的

1.95 倍。为充分了解桉树蒸腾耗水与潜在蒸散量间的关系,分别对旱季和雨季的日平均蒸腾速率与日潜在蒸散量进行 Pearson 相关分析,结果发现,无论旱季还是雨季,其日平均蒸腾速率均与日潜在蒸散量呈极显著正相关关系($P<0.01$),相关系数分别为 0.499 和 0.376,可见潜在蒸散无论在旱季还是雨季,都是桉树蒸腾的主要能量限制因素。

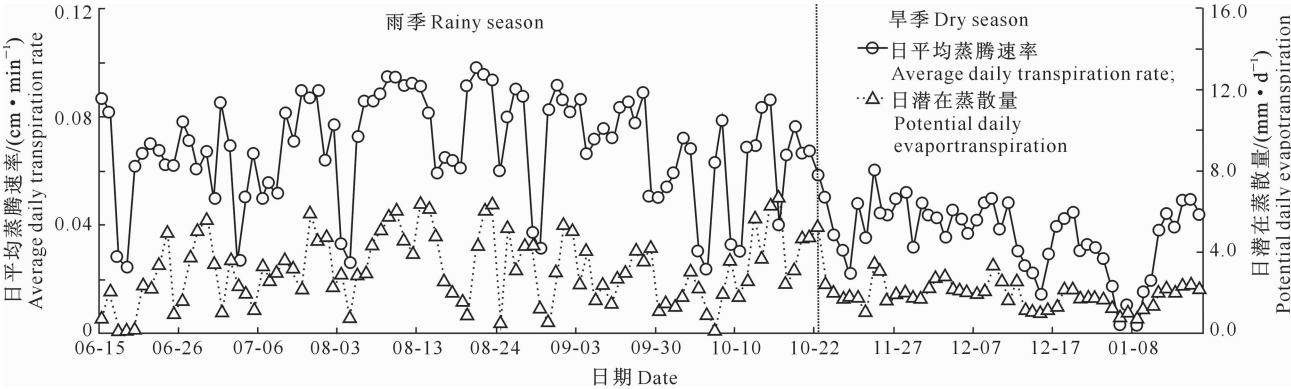
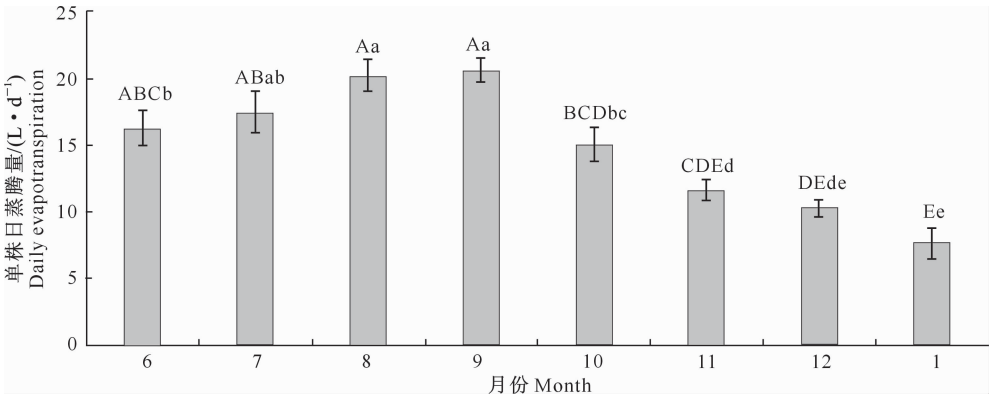


图 2 粗皮桉日平均蒸腾速率及日潜在蒸散量的动态变化特征

Fig. 2 Dynamic changes of daily average transpiration rate and evapotranspiration characteristics of *Eucalyptus pellita*



图柱上不同大写字母表示在 $P<0.01$ 水平差异显著,小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著
Different uppercase letters indicate significant differences at the $P<0.01$ level, and lowercase letters indicate significant differences at $P<0.05$ level

图 3 粗皮桉各月的单株日平均蒸腾量

Fig. 3 Average water consumption per plant per day of *Eucalyptus pellita* in each month

2.3 粗皮桉蒸腾速率与土壤水吸力的关系

为进一步认识粗皮桉蒸腾速率与土壤水吸力间的关系,分别选取旱季和雨季典型晴天下的日平均蒸腾速率及 0~100 cm 土层土壤平均水吸力制图并进行线性回归拟合,结果见图 4。图 4 显示,经 F 检验,旱季蒸腾速率与土壤水吸力的回归方程达到极显著水平($P<0.01$),二者具有较好的线性关系;而雨季拟合效果较差,未达到显著水平。

对粗皮桉日平均蒸腾速率与各土层土壤水吸力进行 Pearson 相关分析,结果(表 3)发现,雨季粗皮桉蒸腾速率与各土层土壤水吸力的相关性均未达到

显著水平,而旱季粗皮桉蒸腾速率与 0~100 cm 土层土壤平均水吸力呈极显著负相关($P<0.01$),可见在水分充足的雨季,土壤水分并不是影响桉树蒸腾的限制因子,而到旱季土壤水分转变为影响桉树蒸腾的主要限制因子。另外,旱季粗皮桉的蒸腾速率与各土层土壤水吸力的相关性也有差异,其中与 0~20 cm 土层土壤水吸力相关性未达到显著水平,与 80~100 cm 土层土壤水吸力呈显著负相关($P<0.05$),而与 20~40,40~60,60~80 cm 土层土壤水吸力均呈极显著负相关($P<0.01$),且相关系数由大到小排序为 40~60 cm>20~40 cm>60~80

cm。由于树木蒸腾耗水主要源自根系对水分的吸收,由此推测 11 a 生粗皮桉根系的主要水分利用层可能为 20~80 cm 土层,且根系的分布量以 40~60

cm 土层最多,20~40 cm 次之,60~80 cm 再次,而 80~100 cm 最少。

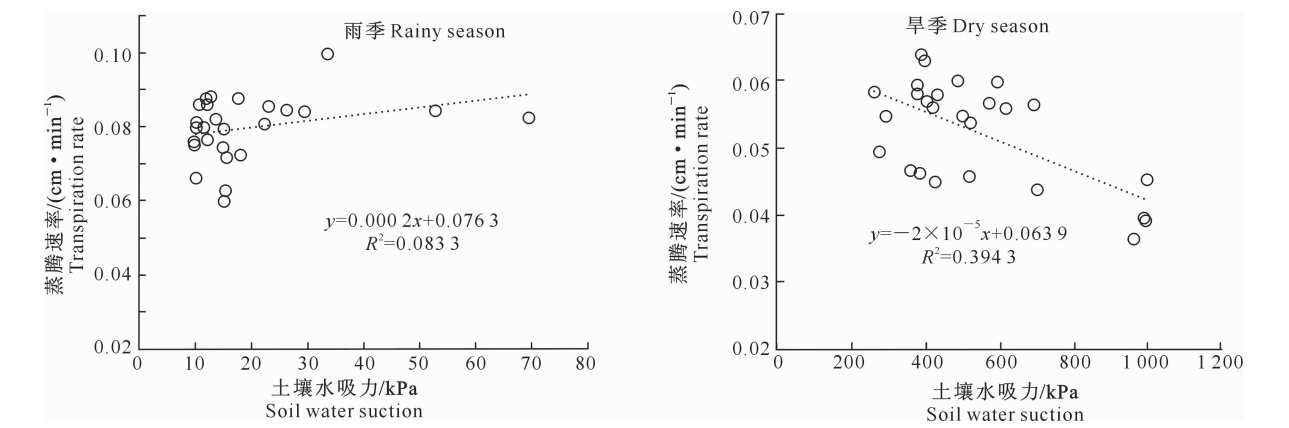


图 4 雨季和旱季粗皮桉蒸腾速率与土壤水吸力关系的拟合

Fig. 4 Relationship between transpiration rate and soil water suction in the rainy season and dry season of *Eucalyptus pellita*

表 3 雨季和旱季粗皮桉蒸腾速率与各层土壤水吸力的 Pearson 相关分析

Table 3 Pearson correlation analysis between transpiration rate of *Eucalyptus pellita* and soil water suction in each layer during the rainy and dry seasons

时期 Period	土层深度/cm Soil depth					
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	0~100
雨季 Rainy season	0.131	0.141	0.362	0.325	0.171	0.238
旱季 Dry season	-0.436	-0.634 **	-0.689 **	-0.611 **	-0.558 *	-0.501 **

3 讨 论

本研究通过热扩散探针法对 11 a 生粗皮桉的蒸腾耗水规律进行持续观测,发现粗皮桉的蒸腾耗水存在明显的季节变化,且雨季是桉树蒸腾耗水的主要时期,其日平均蒸腾速率显著大于旱季,最大值是旱季的 1.59 倍;观测期间各月蒸腾耗水量差异显著,大小排序为 9 月>8 月>7 月>6 月>10 月>11 月>12 月>1 月,雨季各月的平均单株日蒸腾量均显著大于旱季。王小菲等^[17]认为,雨季的高光照、高温度、高相对湿度以及高土壤含水量,是造成蒸腾速率及蒸腾量大于旱季的主要原因,对马占相思(*Acacia mangium*)^[18]、山合欢(*Albizia kalkora*)^[19]等树种的研究均得出相似的结论。但是由于生物学特性的差异,不同树种的蒸腾对旱雨季的响应也会有所差异,如倪广艳等^[20]研究得出华南地区的季节性降雨形成的干湿季,并未导致荷木(*Schima* spp.)的蒸腾产生明显差异,认为荷木可以通过自身的水力结构来减弱对干旱的敏感性,从而使得干湿季对其蒸腾影响的差异不显著。

本研究通过观测期降雨量及土壤水吸力的分析发现,降雨量与土壤水吸力呈极显著负相关,说明降

雨是土壤水分的主要来源,是土壤水分含量的决定性因素,这也与赵荣玮等^[21]的观点一致。受雷州半岛降雨时空特征的影响,土壤水吸力表现出明显的季节变化特征,6—10 月(雨季)为水分充足期,0~100 cm 土层土壤水吸力均值为 21.28 kPa;而 11 月至次年 2 月(旱季)为水分胁迫期,水吸力均值高达 510.44 kPa。不同土层土壤水吸力变化趋势相同,但变化幅度差异较大,其中表层土壤水吸力变化幅度最大,波动也最为剧烈。韩湘云等^[22]在对土壤水分变化的气象因素冗余分析中认为,降雨、蒸发等因素直接作用于表层土壤,而深层土壤水分受外界干扰小,因此土壤水分的变化随着土层的加深逐渐减小,这与本研究结果一致。

林木蒸腾耗水的影响因素较为复杂,除了树木本身的生物学特性外,还受气象因子的制约^[23-24]。王志超等^[25]在对雷州半岛尾巨桉液流速率与气象因子的关系分析中发现,液流速率与太阳辐射、水汽压亏缺、大气温度、风速呈极显著正相关($P<0.01$),与空气湿度呈极显著负相关($P<0.01$)。万艳芳^[26]在对青海云杉林分蒸腾量与气象因子和土壤水分的关系分析中发现,林分蒸腾量主要受潜在蒸散和土壤水分的影响,林分日蒸腾量与潜在蒸散

和土壤体积含水量均呈正相关关系。由此也可看出,土壤水分对树木蒸腾起着至关重要的作用^[27]。刘建立等^[28]对华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)生长季树干液流的研究发现,土壤水分与树干液流间存在极显著正相关关系;Eberbach等^[29]、Wildy等^[30]及闫俊华等^[31]在研究中也发现,土壤水分亏缺会影响叶片水势,从而影响气孔张度,限制树木蒸腾。本研究对粗皮桉旱雨季日平均蒸腾速率与日潜在蒸散量及各土层土壤水吸力的关系进行研究后发现,无论是旱季还是雨季,粗皮桉蒸腾速率均与日潜在蒸散量呈极显著正相关关系($P < 0.01$);而土壤水吸力与雨季蒸腾速率间无显著相关性,此时土壤水分并不是粗皮桉蒸腾的限制因子,但在旱季,蒸腾速率与 0~100 cm 土层土壤的平均水吸力呈极显著线性负相关关系,可见雷州半岛地区旱季粗皮桉林下土壤水分已达到其水分胁迫程度,成为限制粗皮桉蒸腾的主要因子。Cermák 等^[32]研究发现,林木在水分胁迫状态下,蒸腾量会减少 15%~20%;但在土壤水分充足甚至饱和时,土壤水分对蒸腾的影响反而不大,这也与本研究结果相符。但冯永建等^[33]在对华北落叶松液流速率与土壤水势关系的研究中发现,在湿润条件下两者呈极显著负相关,这与本研究结论有所不同,可能与树种及环境不同有关;但水分亏缺状态下其研究结果与本研究结果相似,其他树种如刺槐(*Robinia pseudoacacia*)^[34]也存在相同的研究结论。由此可见,无论是旱季还是雨季,日潜在蒸散均是粗皮桉蒸腾的能量限制因子,而土壤水分只有在亏缺时(旱季),才成为树木蒸腾的主要限制因子。因此,对旱季雷州半岛桉树林采取适当的水分调控措施,将有助于提高林分的生产力。

本研究通过分析旱季不同土层土壤水吸力与蒸腾速率的关系发现,不同土层土壤水吸力与蒸腾速率的相关性不同,其中与表层土壤的相关性未达到显著水平,而与 20~40, 40~60 和 60~80 cm 土层的土壤水吸力均呈极显著负相关,相关系数由大到小排序为 40~60 cm > 20~40 cm > 60~80 cm,而与 80~100 cm 土层的土壤水吸力呈显著负相关,由此得出 11 a 生粗皮桉根系的主要水分利用层为 20~80 cm 土层;由于树木蒸腾耗水的主要来源为根系吸收的水分,各土层水分吸收量与根系量密切相关,因此根据各土层水吸力与蒸腾速率的相关性系数大小,也可以推测出 11 a 生粗皮桉各土层的根系分布量大小排序为 40~60 cm > 20~40 cm >

60~80 cm > 80~100 cm,具体还需通过相关试验进行验证。

4 结 论

粗皮桉蒸腾耗水存在明显的季节变化,雨季是其蒸腾耗水的主要时期,日平均蒸腾速率是旱季的 1.8 倍;无论旱季还是雨季,日潜在蒸散均是其蒸腾的能量限制因素;雨季土壤水分与粗皮桉蒸腾关系不大,但旱季粗皮桉林下土壤水分已达到其水分胁迫程度,成为限制粗皮桉蒸腾的主要因子,此时土壤含水量(吸力或水势)与潜在蒸散共同决定粗皮桉的蒸腾耗水量。因此,在无法改变光热的条件下,旱季内对雷州半岛桉树林分采取适当的水分调控措施,将有助于提高林分的生产力。

[参考文献]

- [1] 贾海坤,刘颖慧,徐霞,等.皇甫川流域柠条林地水分动态模拟:坡度、坡向、植被密度与土壤水分的关系[J].植物生态学报,2005,29(6):910-917.
Jia H K, Liu Y H, Xu X, et al. Simulation of soil water dynamics in a *Caragana intermedia* woodland in Huangfuchuan watershed: relationships among slope, aspect, plant density and soil water content [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29 (6):910-917.
- [2] 王健波,严昌荣,刘恩科,等.长期免耕覆盖对旱地冬小麦旗叶光合特性及干物质积累与转运的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):296-305.
Wang J B, Yan C R, Liu E K, et al. Effects of long-term no-tillage with straw mulch on photosynthetic characteristics of flag leaves and dry matter accumulation and translocation of winter wheat in dryland [J]. Journal of Plant Nutrition & Fertilizer, 2015, 21(2):296-305.
- [3] 郭有燕,刘宏军,孔东升,等.干旱胁迫对黑果枸杞幼苗光合特性的影响[J].西北植物学报,2016,36(1):124-130.
Guo Y Y, Liu H J, Kong D S, et al. Effect of drought stress on photosynthesis characteristics of *Lycium ruthenicum* seedlings [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2016, 36 (1): 124-130.
- [4] 丁玲玲,郑景云,傅辉.基于历史文献的华南地区气候变化研究进展[J].热带地理,2015,35(6):890-894.
Ding L L, Zheng J Y, Fu H. Progress in research of climate change in south China based on historical documents [J]. Tropical Geography, 2015, 35(6):890-894.
- [5] 孙振伟,赵平,牛俊峰,等.外来引种树种大叶相思和柠檬桉树干液流和蒸腾耗水的季节变异[J].生态学杂志,2014,33 (10):2588-2595.
Sun Z W, Zhao P, Niu J F, et al. Seasonal variations of sap flow and transpiration water consumption of introduced tree species *Acacia auriculaeformis* and *Eucalyptus citriodora* [J]. Chi-

- nese Journal of Ecology, 2014, 33(10): 2588-2595.
- [6] 张宁南. 广东桉树人工林耗水量研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- Zhang N N. Studies on water use of *Eucalyptus* plantations in Guangdong [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2010.
- [7] 王志超, 竹万宽, 杜阿朋. 尾巨桉旱雨两季树干液流特征分析 [J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(2): 319-325.
- Wang Z C, Zhu W K, Du A P. Variation in stem sap flow of *E. urophylla* $\times$ *E. grandis* during rainy and dry seasons [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2017, 34(2): 319-325.
- [8] 王志超. 不同整地措施对桉树幼林生长及林地环境变化的影响 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- Wang Z C. The impact of different soil preparation measures on the growth and environment change of young *Eucalypt plantation* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014.
- [9] 刘国粹. 3种整地措施下尾巨桉人工林生长固碳及耗水特征 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.
- Liu G C. The characteristics of growth carbon sequestration and water consumption in *E. urophylla* $\times$ *E. grandis* plantations under three different site preparation measures [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2015.
- [10] 范文斌, 赵从举, 林智, 等. 海南西部桉树人工林生长特征及其对气候环境的响应 [J]. 林业资源管理, 2013(2): 77-82.
- Fan W B, Zhao C J, Lin Z, et al. Growth characteristics of *Eucalyptus* plantation and their responses to climate environment in western Hainan Island [J]. Forest Resources Management, 2013(2): 77-82.
- [11] 赵从举, 吴浩喆, 康慕谊, 等. 海南西部桉树人工林土壤水分变化特征及其对林龄的响应 [J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1734-1742.
- Zhao C J, Wu Z Y, Kang M Y, et al. Variation of soil moisture content for *Eucalyptus* forests and its response to stand ages in western Hainan [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): 1734-1742.
- [12] 钟继洪, 廖观荣, 郭庆荣, 等. 不同土壤水分条件下幼龄桉树生理生态特点分析 [J]. 水土保持学报, 2003, 17(5): 126-128.
- Zhong J H, Liao G R, Guo Q R, et al. Physio-ecological characteristics of young *Eucalyptus* under different soil water condition [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2003, 17(5): 126-128.
- [13] 廖观荣, 钟继洪, 郭庆荣, 等. 土壤水分对幼龄桉树蒸腾和生长的影响 [J]. 生态环境学报, 2001, 10(4): 285-288.
- Liao G R, Zhong J H, Guo Q R, et al. Effects of soil water on transpiration and growth of young *Eucalyptus* [J]. Soil & Environmental Sciences, 2001, 10(4): 285-288.
- [14] Granier A. Evaluation of transpiration in a douglas-fir stand by means of sap flow measurements [J]. Tree Physiology, 1987, 3(4): 309-320.
- [15] Richard G. Crop evapotranspiration; guidelines for computing crop water requirements [R]. Rome, Italy: FAO Irrigation & Drainage Paper, 1998.
- [16] 王红梅, 谢应忠, 陈来祥. 黄土高原坡地土壤水分动态特征及影响因素 [J]. 农业科学研究, 2004, 25(4): 62-66.
- Wang H M, Xie Y Z, Chen L X. Review on soil moisture dynamic characteristics of hill-slope and its influential factors in Loess Plateau [J]. Journal of Agricultural Sciences, 2004, 25(4): 62-66.
- [17] 王小菲, 孙永玉, 李昆, 等. 干热河谷大叶相思树干液流季节动态及其与气象因子的关系 [J]. 林业科学研究, 2013, 26(2): 145-150.
- Wang X F, Sun Y Y, Li K, et al. Stem sap flow characteristics of *Acacia auriculaeformis* in dry-hot valley and their relations to meteorological factors [J]. For Res, 2013, 26(2): 145-150.
- [18] 马玲, 赵平, 饶兴权, 等. 马占相思树干液流特征及其与环境因子的关系 [J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2145-2151.
- Ma L, Zhao P, Rao X Q, et al. Effects of environmental factors on sap flow in *Acacia mangium* [J]. Acta Ecol Sin, 2005, 25(9): 2145-2151.
- [19] 王小菲, 孙永玉, 李昆, 等. 山合欢树干液流的季节变化 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(3): 597-603.
- Wang X F, Sun Y Y, Li K, et al. Seasonal dynamics of *Albizia kalkora* stem sap flow in Yunmou dry-hot valley of Southwest China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(3): 597-603.
- [20] 倪广艳, 赵平, 朱丽薇, 等. 荷木整树蒸腾对干湿季土壤水分的水力响应 [J]. 生态学报, 2015, 35(3): 652-662.
- Ni G Y, Zhao P, Zhu L W, et al. Hydraulic responses of whole tree transpiration of *Schima superba* to soil moisture in dry and wet seasons [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 652-662.
- [21] 赵荣玮, 张建军, 李玉婷, 等. 晋西黄土区人工林地土壤水分特征及其对降雨的响应 [J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 178-183.
- Zhao R W, Zhang J J, Li Y T, et al. Soil moisture characteristics and its response to rainfall in artificial forests in Loess Region of Western Shanxi Province [J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2016, 30(1): 178-183.
- [22] 韩湘云, 景元书, 李根. 低丘红壤坡面土壤水分变化的气象因素冗余分析 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(9): 2368-2374.
- Han X Y, Jing Y S, Li G. Relationships between soil moisture variability and meteorological factors on low hill red soil slope: a redundancy analysis [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(9): 2368-2374.
- [23] 孙鹏森, 马履一, 王小平, 等. 油松树干液流的时空变异性研究 [J]. 北京林业大学学报, 2000, 22(5): 1-6.
- Sun P S, Ma L Y, Wang X P, et al. Temporal and spacial variation of sap flow of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) [J]. J Beijing For Univ, 2000, 22(5): 1-6.
- [24] 张建国, 久米朋宣, 大槻规一, 等. 黄土高原半干旱区辽东栎的树干液流动态 [J]. 林业科学, 2011, 47(4): 63-69.
- Zhang J G, Kume T, Otsuki K, et al. Sap flow dynamics of dominant trees of *Quercus liaotungensis* forest in the semiarid Loess Plateau Region [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(4): 63-69.
- [25] 王志超, 杜阿朋. 尾巨桉树干液流动态及其影响因子分析

[J]. 东北林业大学学报,2016,44(5):24-28.

Wang Z C,Du A P. Characteristics of stem sap flow of *Eucalypt* and its relation to environmental factors [J]. Journal of Northeast Forestry University,2016,44(5):24-28.

[26] 万艳芳. 祁连山青海云杉林蒸腾特征及影响因素分析 [D]. 兰州:甘肃农业大学,2017.

Wan Y F. Characteristics of transpiration of *Picea crassifolia* forest and relevant factors analysis in the Qilian Mountains [D]. Lanzhou:Gansu Agricultural University,2017.

[27] 温 杰,陈云明,唐亚坤,等. 黄土丘陵区油松、沙棘生长旺盛期树干液流密度特征及其影响因素 [J]. 应用生态学报,2017,28(3):763-771.

Wen J,Chen Y M,Tang Y K,et al. Characteristics and affecting factors of sap flow density of *Pinus tabulaeformis* and *Hippophae rhamnoides* in growing season in the hilly region of the Loess Plateau, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(3):763-771.

[28] 刘建立,王彦辉,管 伟,等. 六盘山北侧生长季内华北落叶松树干液流速率研究 [J]. 华中农业大学学报,2008,27(3):434-440.

Liu J L,Wang Y H,Guan W,et al. Stem sap flux velocity of individual trees of *Larix principis-rupprechtii* in rainy season in the north of Liupan Mountain [J]. Journal of Huazhong Agricultural University,2008,27(3):434-440.

[29] Eberbach P L,Burrows G. The transpiration response by four topographically distributed *Eucalyptus* species, to rainfall occurring during drought in south eastern Australia [J]. Physiologia Plantarum,2006,127:483-493.

[30] Wildy D T,Pate J S,Bartle J R. Budgets of water use by *Eucalyptus kochii* tree belts in the semi-arid wheatbelt of western Australia [J]. Plant and Soil,2004,262:129-149.

[31] 闫俊华,周国逸,黄忠良. 鼎湖山亚热带季风常绿阔叶林蒸散研究 [J]. 林业科学,2001,37(1):37-45.

Yan J H,Zhou G Y,Huang Z L. Evapotranspiration of the monsoon evergreen broad-leaf forest in Dinghushan, Guangdong Province [J]. Scientia Silvae Sinicae,2001,37(1):37-45.

[32] Cermák J,Huzulák J,Penka M. Water potential and sap flow rate in adult trees with moist and dry soil as used for the assessment of root system depth [J]. Biologia Plantarum,1980,22(1):34-41.

[33] 冯永建,马长明,王彦辉,等. 华北落叶松人工林蒸腾特征及其与土壤水势的关系 [J]. 中国水土保持科学,2010,8(1):93-98.

Feng Y J,Ma C M,Wang Y H,et al. Relationship between the characteristics of transpiration of *Larix principis-rupprechtii* forest and soil water potential [J]. Science of Soil & Water Conservation,2010,8(1):93-98.

[34] 张 华,王百田,郑培龙. 黄土半干旱区不同土壤水分条件下刺槐蒸腾速率的研究 [J]. 水土保持学报,2006,20(2):122-125.

Zhang H,Wang B T,Zheng P L. Study on transpiration rate of black locust under different soil water content in semi-arid region Loess Plateau [J]. Journal of Soil & Water Conservation,2006,20(2):122-125.

(上接第 13 页)

[25] 钟 华. 晋中地区不同秋眠级紫花苜蓿品种生产性能研究 [D]. 山西太谷:山西农业大学,2005.

Zhong H. A study on the productive performance of alfalfa at different fall dormancy in Jinzhong region [D]. Taigu,Shanxi: Shanxi Agricultural University,2005.

[26] 刘艺杉,刘自学,苏爱莲,等. 北京地区不同秋眠级苜蓿品种适应性评价 [J]. 草业科学,2008,25(2):60-63.

Liu Y S,Liu Z X,Su A L,et al. Comparison of the adaptation of fourteen alfalfa varieties with different fall-dormancy in Beijing area [J]. Pratacultural Science,2008,25(2):60-63.

[27] 王晓俊,魏臻武,杜广明,等. 不同秋眠级苜蓿在辽宁地区生产性能的比较分析 [J]. 草原与草坪,2006,26(4):28-32.

Wang X J,Wei Z W,Du G M,et al. Study on the productivity of alfalfa at different level of fall-dormancy in Liaoning Province [J]. Grassland and Turf,2006,26(4):28-32.