

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2025.01.036

CSTR:32310.14.stbcb.2025.01.036

桂钰翔, 彭韬, 戴全厚, 等. 喀斯特坡地次生林常见树木蒸腾特征及其对气象因子的响应[J]. 水土保持学报, 2025, 39(1):

GUI Yuxiang, PENG Tao, DAI Quanhong, et al. Transpiration characteristics of common trees and their responses to meteorological factors in secondary forests on karst slopes [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(1):

喀斯特坡地次生林常见树木蒸腾特征及其对气象因子的响应

桂钰翔^{1,2,3}, 彭韬^{2,3}, 戴全厚¹, 李焱秋^{2,3,4}

(1. 贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; 3. 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 贵州 普定 562100; 4. 贵州省水利科学研究院, 贵阳 550002)

摘要: [目的] 探究喀斯特坡地次生林常见树木蒸腾特征及其对气象因子的响应规律。[方法] 采用热扩散探针法(TDP)对中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站内构树、栾树、乌桕、臭椿、苦楝树、香椿和盐肤木进行监测, 同时对气象因子进行监测, 分析树木蒸腾变化特征与气象因子的关系。[结果] 1) 构树、栾树、乌桕、臭椿、苦楝树、香椿和盐肤木的日平均蒸腾量分别为 $4\ 409.97 \pm 3\ 260.63$, $6\ 611.27 \pm 5\ 629.57$, $3\ 956.32 \pm 2\ 498.50$, $2\ 984.98 \pm 2\ 039.09$, $6\ 300.25 \pm 4\ 637.71$, 780.69 ± 738.80 , $2\ 320.73 \pm 1\ 717.18$ g/d。2) 构树、栾树、乌桕、臭椿、苦楝树、香椿和盐肤木的液流速率在晴天最大, 其次是阴天, 最小是雨天。3) 在晴天条件下, 大气温度(T)和饱和水汽压差(VPD)的变化对构树、栾树、乌桕、臭椿、苦楝树、香椿和盐肤木液流速率的影响最大, 相对湿度(RH)次之, 而总辐射照度(Eg)的影响相对较低。[结论] 喀斯特坡地次生林常见树木的蒸腾量因特殊的水分环境受到限制, 不同落叶乔木拥有着不同的水分利用策略, 液流速率主要受到 VPD 和 Eg 的影响。

关键词: 喀斯特; 树干液流; 气象因子

中图分类号: S792.99

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2025)01-0000-00

Transpiration Characteristics of Common Trees and Their Responses to Meteorological Factors in Secondary Forests on Karst Slopes

GUI Yuxiang^{1,2,3}, PENG Tao^{2,3}, DAI Quanhong¹, LI Yanqiu^{2,3,4}

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. State Key Laboratory of Environment Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 3. Puding Karst Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences,

Puding, Guizhou 562100, China; 4. Institute of Water Resources Science, Guiyang 550002, China)

Abstract: [Objective] To explore the transpiration characteristics of common trees and their responses to meteorological factors in secondary forests on karst slopes. [Methods] Heat diffusion probe method (TDP) was used to monitor *Broussonetia papyrifera*, *Koelreuteria paniculata*, *Triadica sebifera*, *Ailanthus altissima*, *Melia azedarach*, *Toona sinensis*, and *Rhus chinensis* in Puding karst ecosystem observation and research station of Chinese academy of sciences, and to study the relationship between tree transpiration characteristics and meteorological factors. [Results] 1) The average daily transpiration of *B. papyrifera*, *K. paniculata*, *T. sebifera*, *A. altissima*, *M. azedarach*, *T. sinensis*, and *R. chinensis* were $4\ 409.97 \pm 3\ 260.63$, $6\ 611.27 \pm 5\ 629.57$, $3\ 956.32 \pm 2\ 498.50$, $2\ 984.98 \pm 2\ 039.09$, $6\ 300.25 \pm 4\ 637.71$, 780.69 ± 738.80 , and $2\ 320.73 \pm 1\ 717.18$ g/d, respectively. 2) The sap flow rates of *B. papyrifera*, *K. paniculata*, *T. sebifera*, *A. altissima*, *M. azedarach*, *T. sinensis*, and *R. chinensis* were the highest in sunny days, followed by cloudy days, and the lowest in rainy days. 3) The influence of atmospheric temperature (T) and saturated

收稿日期: 2024-07-08 修回日期: 2024-10-15 录用日期: 2024-11-04 网络首发日期 (www.cnki.net):

资助项目: 国家自然科学基金项目(42077317, 42261144672); 国家重点研发计划子课题项目(2023YFF0806002); 贵州省科技厅基础研究重点项目(黔科合基础-ZK[2022]重点 048); 贵州省高层次(百层次)创新型人才项目(黔科合平台人才-GCC[2023]059)

第一作者: 桂钰翔(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事生态系统恢复治理研究。E-mail: 15329239365@163.com

通信作者: 彭韬(1984—), 男, 博士, 研究员, 主要从事喀斯特生态环境地球化学研究。E-mail: pengtao@mail.gyig.ac.cn

<http://stbcb.alljournal.com.cn>

vapor pressure difference (VPD) on *B. papyrifera*, *K. paniculata*, *T. sebifera*, *A. altissima*, *M. azedarach*, *T. sinensis*, and *R. chinensis* under sunny weather was the greatest, followed by that on relative humidity (RH) and total irradiance (Eg). [Conclusion] The transpiration of common trees in secondary forests on karst slopes is limited by special water environment. Different deciduous trees have different water use strategies, and the rate of sap flow is mainly affected by VPD and Eg.

Keywords: karst, sap flow, meteorological factors

Received: 2024-07-08

Revised: 2024-10-15

Accepted: 2024-11-04

Online(www.cnki.net):

我国西南地区的喀斯特地貌,尤以贵州省为中心,是全球岩溶地貌的三大重点分布区域之一^[1-2]。该岩溶地形多样丰富,但土壤结构严重退化,土壤保水能力受损,面临干旱和石漠化威胁^[3-4]。导致该地区的生态系统受到石漠化问题的严重制约,为推动西南地区的可持续性发展,必须把喀斯特地区生态系统的恢复和重建放在极其重要的位置。其中,植被的生态恢复建设无疑是重中之重^[5]。但喀斯特地区特殊的生态环境为岩石裸露、土层浅薄且分布不均、水分存储能力有限,给植被的生长带来极大的挑战,树木为生存而形成独特的生理特征和水分利用策略以适应严苛的水分条件^[6-7]。面对困境,更应深入思考如何科学合理地进行生态恢复,致力于喀斯特地区生态环境的保护与修复,促进生态系统的稳定与发展。

有学者^[8]将自然恢复作为喀斯特地区退化生态系统重建的核心策略,是由于喀斯特石灰岩坡地的植被分布格局展现出独特的面貌,为基岩裸露的生境且大多呈现出次生林的群落结构,而白云岩坡地的基岩裸露较少、土层虽薄但相对连续的地段,却长期处于灌木和草本占主导的初级阶段^[9]。对于白云岩坡地长期处于初级阶段的群落,要研究影响植被正向演替的关键因素,面对石灰岩坡地已经演化为次生林的群落,更需探索其稳定性的维持机制,特别是那些代表性树木对水分条件变化的响应,对于理解并指导石灰岩坡地植被恢复具有重大意义^[10]。树木对水分的响应,很大程度体现在蒸腾作用上,其中,茎流作用是关键的一环。当土壤水分被树木吸收后,大部分(高达 99%)通过叶片和茎部散发到空气中,仅有极小部分(仅 1%)被树木储存或转化为自身组织^[11-12]。因此,利用 TDP 技术从树木的地上部分入手,能够做到保护树木不受伤害,还克服喀斯特地区下垫面的特殊性,能更好的揭示典型喀斯特坡地生境下常见树木的水分利用特征,可展现出树木与环境相互作用机制。目前,研究学者^[6,13-16]对喀斯特地区的水因子展开不同的研究,但是由于出发点和终点的不同,因此所得观点不同,且相关喀斯特裸露坡地的基岩地区树木耗水特征相关方面的研究匮乏,所以,亟需获取喀斯特裸露坡地上树木耗水特征的情况。

由于石灰岩风化易形成较大、深的裂隙,导致填充进入深层裂隙的土层深厚,而裸露的基岩促进土壤水分、养分向深层裂隙汇聚,富含 N、P、K 及有机质,肥力高,水分丰富,且难以蒸发,进而保障树木生存率^[17]。因此,本文选择普定站上石灰岩坡地次生林中常见的 7 种树木进行研究,通过热扩散探针技术,连续监测树干液流动态。剖析喀斯特石灰岩裸露坡地次生林生态系统的蒸腾耗水特征,分析水分运移规律,探讨树木蒸腾耗水特征与气象因素的相互作用。以期为应对石灰岩地区生态系统恢复重建的挑战,提供科学的理论依据和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文所研究的对象位于中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站(26°14'~26°15'N,105°42'~105°43'E),坐落于贵州省安顺市普定县县城以北约 5 km 之处,站内多为石灰岩坡地,平均海拔高度为 1 158 m。普定站占地面积为 112 000 m²,地处我国南方喀斯特地区,普定县的多年平均温度在 15.1 °C,日照时间满足 1 000 h,年平均降水量为 1 315 mm。

1.2 样地调查与样木选择

该样地为石灰岩地区,石灰岩地区由于地下裂隙发育,导致土壤总量少。区域内适生植被的种群多样,而在人类活动的影响下,原生性的典型喀斯特常绿落叶阔叶混交林已被破坏,演变为次生性的、次顶极的常绿落叶阔叶混交林,故在普定站上选择石灰岩裸露坡地中较好的 2 个次生林样地。

样地 S1 乔木层有栎树、乌桕、香椿、构树,灌木层为酸藤子、珍珠菜、黑果菝葜、毛叶插田泡、勾儿茶、铁线莲等,群落结构完整,更新情况良好;样地 S2 乔木层为苦楝树、香椿、臭椿、盐肤木,灌木层为羊蹄甲,伴生有八角枫、水麻、千里光、石岩枫、野葡萄、南天竹、十大功劳、竹叶花椒、地果等,群落结构完整,灌木层物种丰富,更新情况良好。对样地中的乔木进行调查(表 1),共计 17 棵典型树木,4 棵构树、2 棵栎树、1 棵乌桕、2 棵香椿、2 棵臭椿、1 棵盐肤木、5 棵苦楝树。

表 1 样木基本情况

Table 1 Basic information of the sampled trees

样木编号	树种	胸径/cm	树高/m	边材厚度/cm	冠幅/m ²	边材面积/cm ²
1	构树	15.60	4.3m	2.50	43.44	102.87
2	构树	9.55	3.50	1.50	23.50	37.93
3	构树	13.05	8.00	2.30	35.91	77.68
4	构树	9.23	3.25	1.30	24.00	32.39
5	栾树	15.28	13.00	3.30	40.50	124.19
6	栾树	9.55	13.00	2.40	40.95	53.90
7	乌桕	15.92	13.00	1.40	23.05	63.84
8	香椿	12.10	7.00	2.30	6.13	70.78
9	香椿	19.74	9.00	3.20	15.60	166.23
10	臭椿	8.28	7.50	2.10	9.00	40.75
11	臭椿	10.19	7.00	2.30	6.36	56.98
12	盐肤木	8.28	6.00	0.80	16.61	18.79
13	苦楝树	19.74	9.30	2.50	59.04	135.37
14	苦楝树	8.59	7.70	1.30	36.52	29.79
15	苦楝树	8.91	7.70	1.20	36.52	29.08
16	苦楝树	9.23	7.00	1.40	41.33	34.44
17	苦楝树	9.23	7.00	1.40	31.00	34.44

1.3 研究方法

1.3.1 树干液流速率 在样地内,经过仔细筛选,选取 1~2 株生长状态优秀、树形端正、树冠分布均匀的树木作为本次研究的待测样木。该样木生长环境相似,树形特征稳定,具有代表性,能够较为准确地反映该区域树木的生长状况,从 2022 年 7 月开始进行连续监测,为确保对各样木树干液流的精确测量,采用来自美国 Dynamax 公司的热扩散探针进行连续测定。通过 Granier 热扩散探针的连续测定,能够获取各样木树干液流的详细数据,为相关研究和应用提供有力支持。在树木树高的 1.3 m 处,去除树皮,保留木质部,划定大约 25 cm² 的区域保证 TDP 探针能够打孔插入。同时为降低降雨和辐照度对测量结果的影响,在探针插入后使用泡沫加固,在 TPD 探针链接处包裹铝箔纸。在完成探针的安装后,与 CR1 000 X 数据采集器进行连接,使用 12 V 电压为系统供电,用太阳能板进行充电。为确保数据的准确性和稳定性,将程序设定为每 10 秒读取 1 次数据,并在每 30 min 的时间段内计算并记录数据平均值。计算公式为:

$$Fd=0.0119 \times \left(\frac{\Delta V_{\max} - \Delta V}{\Delta V} \right) 1.231 \quad (1)$$

式中: Fd 为液流速率, g/(cm² · s)(以 H₂O 计),是单位时间内流经边材面积的液体体积; ΔV_{max} 为液流速率等于零时,热电偶产生的热电动势值, uV/°C, ΔV 为当液流存在时,热电偶的热电动势值。利用测定得到的树干液流速率数据和算出的边材面积,通过公式

(2) 可计算得到单株林木蒸腾量 Eh, g/h:

$$Q = \sum_{i=1}^{48} Ehi \times A_s \times 1800 \quad (2)$$

式中: Q 为单株林木蒸腾量, g/d; A_s 为导水边材部分的横截面积, cm²。在本次试验中,设定每 10 秒读取 1 次数据,持续 30 min,并将这段时间内的平均值作为记录数据。由于试验采用的时间系数为 1800,因此,需要将所记录的数据乘以该时间系数以得到最终的试验结果。

1.3.2 气象因子测定 采用普定站上的气象观测场数据,主要监测指标有温度(T)、相对湿度(RH)、风速(Ws)、降雨量(P)和总辐照度(Eg),并通过温度(T)及相对湿度(RH)计算饱和水汽压差(VPD)采用文献形式表示:

$$VPD = a \times \exp\left(\frac{b \times T}{T + c}\right) \times (1 - RH) \quad (3)$$

式中: VPD 为饱和水汽压差, kPa; a、b、c 为常数,分别为 0.611、17.502、240.97; T 为大气温度, °C; RH 为相对湿度, %。

1.4 数据处理

在树木生长季中,为确保蒸腾特征分析的科学性和代表性,选取生长旺盛的阶段,避开贵州 7 月、8 月的降雨影响,且选择同 1 月的不同天气条件来进行数据分析。故选取 2022 年 9 月的典型晴天(9 月 7 日)、阴天(9 月 29 日)和雨天(9 月 22 日)进行数据分析,以绘制不同天气条件下典型树木的液流速率日变化。为深入研究气象因子对典型树木的影响,对

2022年7月1日至2023年6月30日的整年液流数据进行详尽分析,并同步监测不同天气条件下的气象数据,以进行偏相关分析。使用SPSS 26.0和WPS Office软件对数据进行处理。使用Origin 2021软件进行数据方差分析、相关分析、回归分析并作图。

2 结果与分析

2.1 气象因子

2022年7月至2023年6月,各月气象因子存在明显的变化(图1)。全年日平均温度为16.98℃,在生长季的主要阶段的4—9月,日平均值大气温度(T)为22.42℃,

最低温度(T)为0.15℃,最高温度为28.24℃。全年相对湿度(RH)的日平均值为69.15%,在生长季的主要阶段的4—9月,日平均相对湿度为74.11%。全年风速(W_s)日平均值为1.32 m/s,日平均风速在4月达到最大值。研究期样地累计降水量(P)为813.9 mm,降雨多集中在6—9月,分别累计降水量(P)为255、192、89和93 mm。总辐照度(E_g)日平均值为74.11 MJ/(m²·d),最大值为27.81 MJ/(m²·d),最小值为0.91 MJ/(m²·d)。饱和水汽压差的全年的日平均值为0.63 kPa,在12至翌年2月最小,3月突然增加达到最大值,之后持续下降。

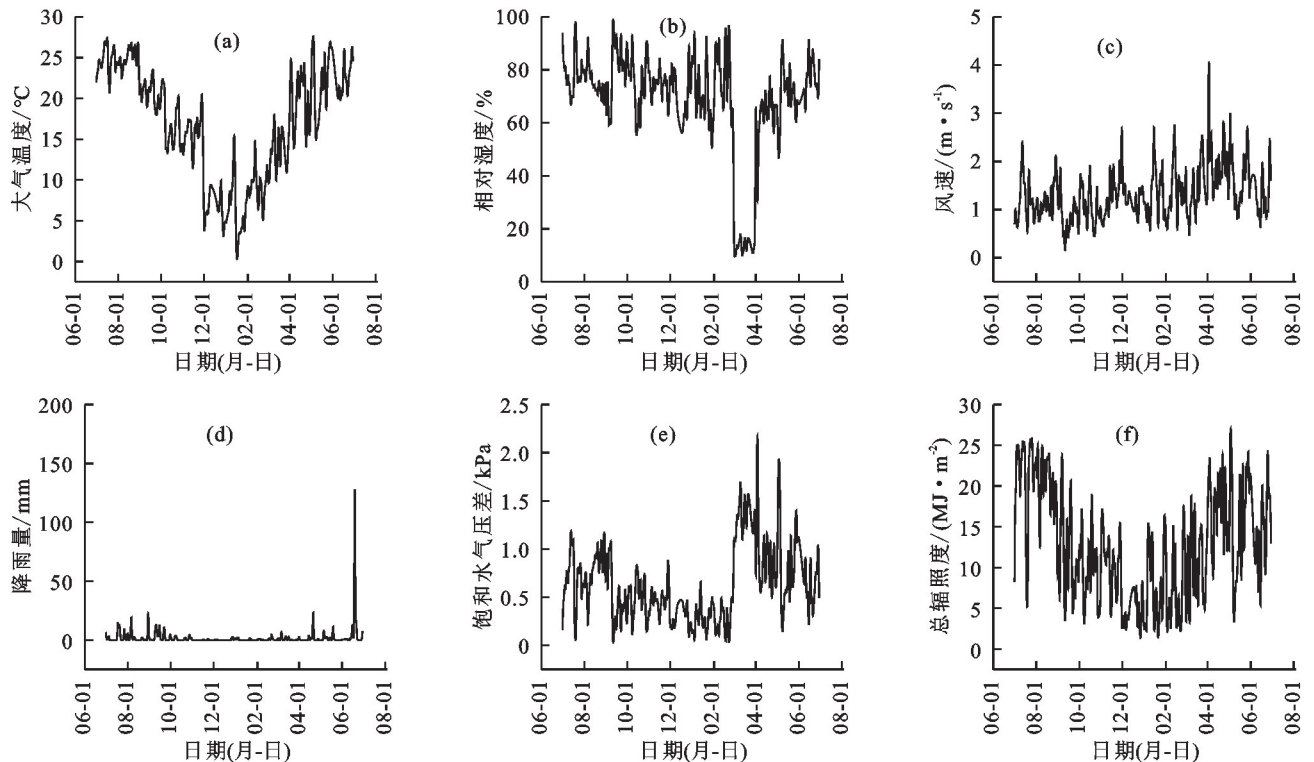


图1 气象因子变化情况

Fig.1 Changes in meteorological factors

2.2 树木液流速率及蒸腾量的日变化

由图2可以看出,2022—2023年不同树木的单株日平均蒸腾量有所不同,栾树(6 611.27±5 629.57 g/d)和香椿(6 300.25±4 637.71 g/d)的单株日平均蒸腾量较高,而构树(4 409.97±3 260.63 g/d)、乌桕(3 956.32±2 498.50 g/d)、苦楝树(2 984.98±2 039.09 g/d)、盐肤木(780.69±738.80 g/d)和臭椿(2 320.73±1 717.18 g/d)的日平均蒸腾量较低。

构树、栾树、乌桕、苦楝树、香椿、盐肤木和臭椿的单株日平均蒸腾量在观测期内都有明显的季节性变化,每个被测树木的日液流显示出相似的模式,其中栾树显示出最高的日液流。尽管7种树木的曲线是不同的,并且随着季节的变化而变化,但是峰值显示出相似的整体形状。

构树、栾树、乌桕、苦楝树、香椿、盐肤木和臭椿在

生长季(3—11月)蒸腾量占全年蒸腾量的比例分别为95.04%、96.05%、87.87%、92.38%、94.06%、97.80%、94.72%。在冬季(12月至次年2月)日平均蒸腾量达到最低水平。在生长季内,不同树木的单株日平均蒸腾量也有明显的季节性变化。乌桕在6月和8月的日平均蒸腾量最高,而香椿则在6月和7月的日平均蒸腾量最高。季节性变化可能与不同树木在不同季节内的生理活动和环境适应性有关。典型树木在12月至翌年1月日平均蒸腾量达到最低水平2—4月日平均蒸腾量处于上升阶段,6—10月的日平均蒸腾量维持在较高水平,日平均蒸腾量最高在6—8月,在到达11月后日平均蒸腾量快速下降。

2.3 不同天气条件下典型树木树干液流变化特征

由图3的日变化曲线波动可发现,树木液流速率的日变化在不同天气条件下均呈明显“昼高夜低”趋

势,液流速率整体变化规律相似,液流速率开始较低,启动之后迅速升高,升高到峰值后迅速降低,且夜间的液流速率较低。但是在液流速率启动时刻、上升速率、最大值、到达峰值时刻的时间和下降速率的过程存在着差异,即蒸腾于 6 : 00~9 : 30 启动,随着总辐照度(E_g)增强,温度(T)逐渐升高,空气相对湿度(RH)降低,从而导致饱和水汽压差(VPD)增大,冠层气孔导度不断升高,蒸腾速率逐渐增加。在 12 : 00~18 : 00 维持较高水平,到达峰值之后又随着总辐照度(E_g)和饱和水汽压差(VPD)的减小而迅速降低,于 21 : 00 后均呈较低值,存在明显的周期性变化。晴天蒸腾现象启动最早,雨天启动最晚。

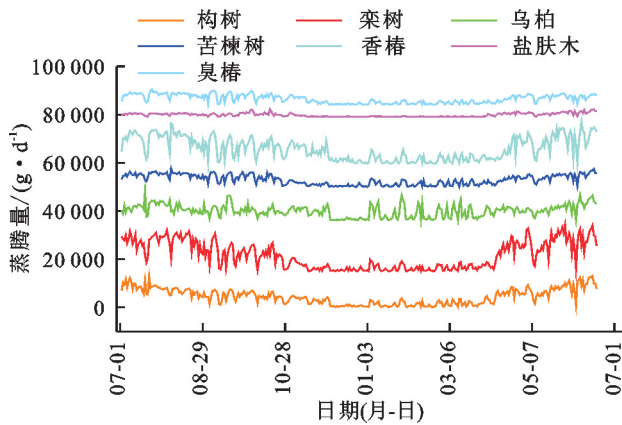


图 2 典型树木蒸腾量年变化

Fig.2 Annual variation of the transpiration of typical trees

对典型树木在不同天气条件下的液流速率数据进行分析,晴天的液流速率大于阴天液流速率,其次雨天的液流速率是 3 种天气中最低的。

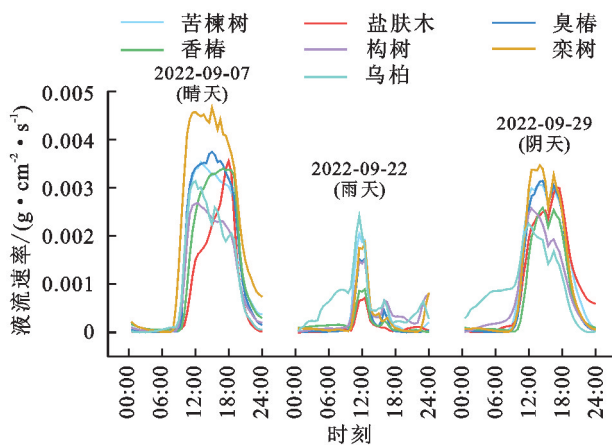


图 3 典型树木在不同天气条件下的液流速率

Fig.3 Sap flow rates of typical trees under different weather conditions

2.4 不同天气条件下树干液流与气象因子的响应

由表 2 可知,在晴天条件下构树、栾树和盐肤木的液流速率受饱和水汽压差的影响最大,呈极显著正相关,乌桕、苦楝树和香椿的液流速率受到总辐照度的影响最大,呈极显著正相关,而臭椿受相对湿度的

影响最大,呈极显著负相关;在雨天条件下,对乌桕、苦楝树、盐肤木、香椿和臭椿的液流速率影响最大的是总辐照度,呈极显著正相关。构树和栾树受饱和水汽压差的影响最大,呈极显著正相关;在阴天条件下对构树、栾树、盐肤木和臭椿的液流速率影响最大的是大气温度,呈极显著正相关。乌桕受相对湿度影响最大,呈极显著正相关。香椿在阴天条件下,与饱和水汽压差呈显著正相关,而气象因子在阴天条件下,对苦楝树的液流速率影响不大。总体来说,在晴天条件下,液流速率变化主要是受饱和水汽压差和总辐照度的驱动,在雨天条件下,液流速率变化主要是受总辐照度的驱动,而在阴天条件下,大气温度是驱动液流速率发生变化的主要因子。

为更精确地阐述气象因子对液流的影响,本研究采用多元线性逐步回归分析方法,构建典型树木液流与气象因子的多元线性回归方程。在此过程中,由于饱和水汽压差是温度和相对湿度共同作用的结果,加入饱和水汽压差可能引入平衡共线性问题,导致模型不稳定,因此,在回归分析中未将其纳入考虑范围。从表 3 可以看出,经过数据分析,典型树木的 R^2 均超过 0.389,模型的显著性水平均低于 0.001。充分表明因变量与自变量存在显著的线性关联,所构建的模型能够精准地揭示液流与气象因子的变化规律。

3 讨论

3.1 树木蒸腾耗水特征

在整个观测期内,蒸腾量最低水平的季节是在冬季,随后处于上升阶段,在春天蒸腾耗水处于较低水平,随着降雨量的逐渐增多,叶片开始生长,树木的蒸腾量逐渐增加,最终在秋季蒸腾耗水达到最大值,秋季过后树叶变黄并掉落,树木的蒸腾耗水也在下降,最后降低到最低点,第 2 年的开春发芽,树木的蒸腾耗水增加,此现象呈现出明显的季节变化规律,与已有研究^[18]结论相符。

石灰岩地区由于地下裂隙发育,导致表层土壤含量较少,土壤集中分布在裂隙中,所选取的构树、栾树、乌桕、苦楝树、香椿、盐肤木、臭椿在样地内属于生长在裂隙上的树木,但水分消耗特征存在明显差异。香椿和栾树的蒸腾量在典型树木中的蒸腾量相对较大,分别可达到 2 286.99、2 399.89 kg/a,盐肤木和臭椿拥有较小的蒸腾量,分别为 283.39、842.42 kg/a,其余的构树、乌桕和苦楝树的蒸腾量分别为 1 600.82、1 436.14、1 083.55 kg/a。在树木生长季,构树、栾树、苦楝树、香椿、盐肤木、臭椿的蒸腾量均可占全年蒸腾量的 90% 以上,分别为 95%、96%、92%、94%、98% 和 95%,只有乌桕的蒸腾量占全年蒸腾量的 88%,表明典型树木在水分消耗方面具有高度的同

一性,与气象因子的变化具有一致性。是由于喀斯特地区与非喀斯特地区相比,有着独特的特点,喀斯特地区雨热同季,雨量集中在生长季。造成树木在生长季蒸腾量占比大,才能保障生长季树木生长茂盛。非生长季时树木开始落叶,蒸腾速率急速降低,为适应环境,必须具备高效的水分利用能力。

表 2 不同天气条件下典型树木液流速率与气象因子的偏向关系数

Table 2 The deviation relationships between the sap flow rates of typical trees and meteorological factors under different weather conditions

天气	控制变量	分析变量	构树	栎树	乌桕	苦楝树	盐肤木	香椿	臭椿
晴天	RH,Eg	T	0.740***	0.686***	0.588***	0.264*	0.316**	0.397***	-0.445***
	Eg,T	RH	-0.714***	-0.831***	0.211	0.310	-0.243*	-0.134	-0.845***
	Eg	VPD	0.898***	0.927***	0.491***	0.292*	0.678***	0.646***	0.838***
	T,RH	Eg	0.602***	0.745***	0.611***	0.800***	0.595***	0.864***	0.139
雨天	RH,Eg	T	0.060	0.124	0.307*	-0.022	0.004	0.097	-0.054
	Eg,T	RH	-0.664***	-0.637***	-0.292*	-0.120	-0.305*	-0.234	-0.151
	Eg	VPD	0.669***	0.644***	0.261*	0.105	0.296*	0.217	0.150
	T,RH	Eg	0.452***	0.419***	0.478***	0.618***	0.611***	0.583***	0.464***
阴天	RH,Eg	T	0.734***	0.696***	0.593***	0.185	0.508***	0.314**	0.558***
	Eg,T	RH	-0.117	-0.237*	0.674***	0.010	0.131	-0.124	0.302*
	Eg	VPD	0.542***	0.603***	-0.331**	0.091	0.214	0.334**	0.066
	T,RH	Eg	-0.412***	-0.475***	0.466***	-0.080	-0.123	-0.276*	0.017

注: *、**、*** 分别表示在 0.05、0.01、0.001 水平(双尾)相关性显著。

表 3 不同天气条件下典型树木单位胸高面积蒸腾量与气象因子的多元线性逐步回归方程

Table 3 Multiple linear stepwise regression equation of transpiration per unit chest height area of typical trees and meteorological factors under different weather conditions

树木	天气	回归方程	R ²	F	p
构树	晴天	$Y=222.901T+56.012RH+174.230Eg-5461.603$	0.582	61.686	<0.001
	雨天	$Y=218.630T+21.208RH+180.462Eg-3052.917$	0.840	182.132	<0.001
	阴天	$Y=21.208T+218.630RH+180.462Eg-3052.917$	0.840	182.132	<0.001
栎树	晴天	$Y=450.024T+85.368RH+387.964Eg-12333.270$	0.651	82.705	<0.001
	雨天	$Y=356.733T+26.835RH+319.043Eg-5196.436$	0.744	100.623	<0.001
	阴天	$Y=26.835T+356.733RH+319.043Eg-5196.436$	0.744	100.623	<0.001
乌桕	晴天	$Y=-51.963T+14.633RH+135.231Eg+2990.587$	0.111	5.516	<0.001
	雨天	$Y=35.928T+15.500RH+326.637Eg-1404.624$	0.643	62.559	<0.001
	阴天	$Y=15.500T+35.928RH+326.637Eg-1404.624$	0.643	62.559	<0.001
苦楝树	晴天	$Y=150.950T+25.851RH+103.157Eg-2805.595$	0.558	55.924	<0.001
	雨天	$Y=185.204T-0.329RH+14.616Eg-396.494$	0.492	33.597	<0.001
	阴天	$Y=-0.329T+185.204RH+14.616Eg-396.494$	0.492	33.597	<0.001
盐肤木	晴天	$Y=58.771T+11.212RH+17.010Eg-1174.510$	0.389	28.238	<0.001
	雨天	$Y=67.091+3.799-12.467Eg-528.311$	0.414	24.519	<0.001
	阴天	$Y=3.799T+67.091RH-12.467Eg-528.311$	0.414	24.519	<0.001
香椿	晴天	$Y=372.904T+87.401RH+172.386Eg-7998.169$	0.570	58.824	<0.001
	雨天	$Y=383.978T+16.348RH+40.123Eg-2018.245$	0.536	40.124	<0.001
	阴天	$Y=16.348T+383.978RH+40.123Eg-2018.245$	0.536	40.124	<0.001
臭椿	晴天	$Y=113.231T+32.025RH+83.212Eg-2800.416$	0.555	55.396	<0.001
	雨天	$Y=178.038T+7.232RH-8.348Eg-1053.529$	0.549	42.131	<0.001
	阴天	$Y=7.232T+178.038RH-8.348Eg-1053.529$	0.549	42.131	<0.001

与同处亚热带气候区的其他树木研究结果相比,长旺季 6—8 月的平均液流速率分别为 8.07、12.60、本研究的构树、栎树、乌桕、苦楝树、盐肤木、臭椿在生 5.75、5.09、1.36、3.79 g/(m²·s)(以 H₂O 计),均低

于张慧玲等^[16]的菜豆树 $[11.93 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ (以 H_2O 计),圆叶乌桕 $[18.43 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$,均小于孙振伟等^[19]、蔡锡安等^[20]同处于亚热带季风区的广州,乔木在夏季的液流速率日平均值 $[19.7 \sim 29.6 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ 、以及周翠鸣等^[21]研究的广西喀斯特地区尾巨桉液流速率日平均值 $[9.60 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$,但香椿日平均蒸腾量 $(6.30 \text{ kg}/\text{d})$ 大于 DENG 等^[22]在桂林研究香椿的日平均蒸腾量 $(0.35 \sim 1.5 \text{ kg}/\text{d})$ 。本研究中,绝大部分树木的液流速率、蒸腾量小于亚热带季风区的树木。说明喀斯特地区石头裸露地表,坡地水文过程迅速,土壤存在于“鸡窝土”裂隙中,水分资源较低,所以,植被可获取水资源少,液流速率较低^[23-24]。本研究的香椿蒸腾量远大于桂林地区香椿蒸腾量,说明在树木蒸腾过程中要考虑到水源是否充足,同时,树木的胸径大小也很重要,贵州平均降水量 (P) 为 $1\ 315 \text{ mm}$,是树木蒸腾量产生差异的主要原因。

3.2 不同天气条件下树干液流变化特征

典型树木在晴天、阴天和雨天条件下,其树干液流速率表现出不同的日变化模式。在晴天条件下,典型树木的树干液流速率日变化曲线呈“单峰”特征;而在阴天和雨天,则呈“多峰”曲线。同时,典型树木的树干液流速率在不同天气条件下的表现也有所不同,晴天条件下的液流速率最大,阴天次之,雨天最小。国内研究^[25]表明,在正常的气象条件下,即未遭受干旱和高温胁迫时,树木在晴天的树干液流表现出单峰曲线特征。然而,当遇到阴雨天气时,由于气象因子的瞬时变化,树干液流往往呈多峰曲线形态^[11]。辽西北沙地樟子松树干液流速率的变化特征由大到小的顺序为晴天、阴天、雨天。对辽西北沙地樟子松树干液流速率研究^[26]发现,在不同的天气条件下,樟子松树干液流速率的大小顺序为晴天最高,阴天次之,雨天最低,与本研究结果高度一致。主要是因为树干液流速率在很大程度上受到气象因子的影响,在各种天气条件下,总辐照度、大气气温、相对湿度及饱和水汽压差均是导致树干液流速率发生变化的关键因素。

3.3 气象因子对树干液流的影响

经过一系列研究模型的深入模拟和分析^[27-29]发现,饱和水汽压差、总辐照度、大气温度及相对湿度等多个气象因素均与液流速率存在紧密的关联,为理解并预测液流速率的变化提供有力的科学支撑。本研究发现,典型树木的树干液流与总辐照度、饱和水汽压差、相对湿度、大气温度均呈极显著相关,但影响7种树木的主导气象因子存在较大差异。在晴天条件下,典型树木的树干液流主要是受到饱和水汽压差的

影响较大,但不同树木间受影响程度不同,其中,构树、栎树、盐肤木液流影响受到饱和水汽压差的影响最大,乌桕、苦楝树和香椿液流影响受到总辐照度的影响较大,臭椿液流影响受到相对湿度的情况较大。

在雨天条件下,典型树木的树干液流主要受总辐照度的影响较大,其中,总辐照度对乌桕、苦楝树、盐肤木、香椿和臭椿树干液流影响最大,饱和水汽压差对构树和栎树树干液流影响较大。雨天影响蒸腾作用。是因为下雨时,空气中湿度通常显著增加,导致树木表面的水分不易蒸发和散失,从而加强蒸腾作用的强度。同时,雨水还给叶片提供更多的水份以参与光合作用,使叶面更加湿润并降低温度 (T) ,有助于防止高温对细胞造成的损害。在多云天气下,总辐照度 (E_g) 相对较弱且光线透过云层的变化较大,也影响蒸腾速率及气孔开闭程度变化的情况。因此,可以说降水量 (P) 在一定程度上可促进或抑制蒸腾作用的发生和发展。

在阴天条件下,大气温度是影响典型树木的关键因素,对构树、栎树、苦楝树、盐肤木和臭椿树干液流影响最大,而乌桕与香椿树干液流主要是受到相对湿度和饱和水汽压差的影响。总体来说,构树、栎树和盐肤木对饱和水汽压差的响应较强可能随着辐射强度超过树木的耐受极限,树木可能通过关闭气孔来降低蒸腾速率,以减少水分损失。乌桕、苦楝树和香椿受到总辐照度影响较大,可能是由于树木角质层的厚度有关,厚的角质层可在一定程度上反射光照,减少光合作用过程中可能出现的光抑制。臭椿受到相对湿度的影响较大,可能随之空气中的水汽质量分数远低于饱和水汽质量分数,导致高饱和水汽压差,从而增加叶片与空气间的水分梯度,促进蒸腾。

4 结论

1) 栎树和香椿的蒸腾量较高,而构树、乌桕、苦楝树、盐肤木和臭椿的蒸腾量较低。且生长季与气象因子相对应,所以,在生态恢复过程中根据喀斯特区土少特点,优先选择蒸腾量小的树木,确保该地区的地下水能够维持树木的蒸腾,以保证树木的存活率。

2) 晴天蒸腾现象启动最早,雨天启动最晚。典型树木的树干液流在晴天呈“单峰”特征,而在阴天和雨天,则呈“多峰”曲线。其中,液流速率在不同天气条件下为晴天 $>$ 阴天 $>$ 雨天。

3) 在晴天条件下,树木的液流速率主要是受到大气温度、饱和水汽压差和总辐照度的影响,在雨天条件下树木主要受到相对湿度、饱和水汽压差和总辐照度

的影响,在阴天条件下,主要是受到大气温度、饱和水汽压差和总辐照度的影响。综合来看,饱和水汽压差与总辐照度是影响树木树干液流速率最关键的因子。

参考文献:

- [1] 戴全厚,严友进.西南喀斯特石漠化与水土流失研究进展[J].水土保持学报,2018,32(2):1-10.
DAI Q H, YAN Y J. Research progress of Karst rocky desertification and soil erosion in southwest China[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2018,32(2):1-10.
- [2] 邹军,喻理飞,李媛媛.退化喀斯特植被恢复过程中土壤酶活性特征研究[J].生态环境学报,2010,19(4):894-898.
ZOU J, YU L F, LI Y Y. Study on soil enzyme activity characteristics during succession of degraded karst vegetation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19 (4):894-898.
- [3] 王克林,岳跃民,陈洪松,等.喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应[J].生态学报,2019,39(20):7432-7440.
WANG K L, YUE Y M, CHEN H S, et al. The comprehensive treatment of karst rocky desertification and its regional restoration effects[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20):7432-7440.
- [4] 张信宝,王世杰,曹建华,等.西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J].中国岩溶,2010,29(3):274-279.
ZHANG X B, WANG S J, CAO J H, et al. Characteristics of water loss and soil erosion and some scientific problems on karst rocky desertification in Southwest China karst area[J]. Carsologica Sinica, 2010, 29(3):274-279.
- [5] 王建宇.贵州石漠化区植被恢复及树种选择技术研究进展[J].绿色科技,2018(4):18-24.
WANG J Y. Research progress on vegetation restoration and tree species selection techniques in Guizhou rocky desertification area [J]. Journal of Green Science and Technology, 2018(4):18-24.
- [6] 刘延惠,丁访军,舒德远,等.茂兰喀斯特原生林细叶青冈树干液流环境响应特征[J].南京林业大学学报:自然科学版,2017,41(3):77-85.
LIU Y H, DING F J, SHU D Y, et al. Characteristics of sap flow of *Cyclobalanopsis gracilis* in Maolan karst original forests and its response to environmental factors [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2017, 41(3):77-85.
- [7] YANG J, XU X L, LIU M X, et al. Effects of "Grain for Green" program on soil hydrologic functions in karst landscapes, southwestern China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2017, 247:120-129.
- [8] GUO K, LIU C C, DONG M. Ecological adaptation of plants and control of rocky-desertification on Karst region of South-west China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(10):991-999.
- [9] 陈洪松,聂云鹏,王克林.岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展[J].生态学报,2013,33(2):317-326.
CHEN H S, NIE Y P, WANG K L. Spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms in karst regions: A review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2):317-326.
- [10] WANG K L, YUE Y M, MA Z L, et al. Research and demonstration on technologies for rocky desertification treatment and ecosystem services enhancement in karst peak-cluster depression regions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22):7098-7102.
- [11] 凡超,邱燕萍,李志强,等.荔枝树干液流速率与气象因子的关系[J].生态学报,2014,34(9):2401-2410.
FAN C, QIU Y P, LI Z Q, et al. Relationships between stem sap flow rate of litchi trees and meteorological parameters [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(9):2401-2410.
- [12] 李宝,常顺利,孙雪娇,等.天山北坡雪岭云杉森林的蒸腾耗水规律[J].西部林业科学,2022,51(5):106-112.
LI B, CHANG S L, SUN X J, et al. Transpiration and water consumption patterns of *Picea schrenkiana* forests in northern Tianshan [J]. Journal of West China Forestry Science, 2022, 51(5):106-112.
- [13] 程娟,丁访军,谭正洪,等.贵州茂兰喀斯特森林两树种叶片气孔形态特征及其对蒸腾的影响[J].南京林业大学学报:自然科学版,2021,45(5):125-132.
CHENG J, DING F J, TAN Z H, et al. Leaf stomatal morphological characteristics and their effects on transpiration for two tree species in Maolan karst area, Guizhou Province [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2021, 45(5):125-132.
- [14] 李成龙,刘延惠,丁访军,等.茂兰喀斯特森林小果润楠蒸腾特征及影响因素[J].南京林业大学学报:自然科学版,2019,43(3):51-58.
LI C L, LIU Y H, DING F J, et al. Transpiration characteristics and influencing factors of the dominant species of *Machilus microcarpa* in Maolan Karst forest [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2019, 43(3):51-58.
- [15] 杨瑞,喻理飞,戴全厚.喀斯特区云南鼠刺树干液流及土壤水分动态[J].水土保持通报,2015,35(2):89-93.
YANG R, YU L F, DAI Q H. Dynamics of soil moisture and sap flow of *Itea yunnanensis* in karst region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(2):89-93.
- [16] 张慧玲,丁亚丽,陈洪松,等.喀斯特出露基岩生境两种

- 典型乔木的树干液流特征[J].应用生态学报,2017,28(8):2431-2437.
- ZHANG H L, DING Y L, CHEN H S, et al. Characteristics of sap flow of two typical trees in exposed bedrock habitat of karst region, China[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(8):2431-2437.
- [17] 张信宝,王世杰,贺秀斌,等.碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失[J].地球与环境,2007,35(3):202-206.
- ZHANG X B, WANG S J, HE X B, et al. Soil creeping in weathering crusts of carbonate rocks and underground soil losses on karst slopes[J].Earth and Environment,2007,35(3):202-206.
- [18] 屈柏林,郭延朋,杨晶雯,等.冀中平原速生杨树树干液流特征及驱动因子对其影响[J].东北林业大学学报,2020,48(12):18-22.
- QU B L, GUO Y P, YANG J W, et al. Characteristics of sap flow in fast-growing *Poplar* and its response to driving factors in the central Hebei Plain[J].Journal of Northeast Forestry University,2020,48(12):18-22.
- [19] 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]. Chinese Journal of Ecology,2014,33(10):2588-2595.
- [20] 蔡锡安,赵平,曾小平,等.两种木兰科植物的树干液流特征及其与环境因子的关系[J].生态学杂志,2012,31(9):2163-2169.
- CAI X A, ZHAO P, ZENG X P, et al. Dynamics of xylem sap flow of two *Magnoliaceae* tree species in relation to environmental factors[J].Chinese Journal of Ecology,2012,31(9):2163-2169.
- [21] 周翠鸣,黄玉清,顾大彤,等.尾巨桉液流特征分析[J].广西植物,2016,36(7):776-782.
- ZHOU C M, HUANG Y Q, GU D X, et al. Analysis on sap flow characteristics of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* [J].Guizhou,2016,36(7):776-782.
- [22] DENG Y, WU S, KE J, et al. Effects of meteorological factors and groundwater depths on plant sap flow velocities in karst critical zone[J].Science of the Total Environment,2021,781:e146764.
- [23] 彭旭东,戴全厚,李昌兰.中国西南喀斯特坡地水土流失/漏失过程与机理研究进展[J].水土保持学报,2017,31(5):1-8.
- PENG X D, DAI Q H, LI C L. Research progress on the process and mechanism of soil water loss or leakage on slope in southwest karst of China[J].Journal of Soil and Water Conservation,2017,31(5):1-8.
- [24] LI Y Q, WANG S J, PENG T, et al. Hydrological characteristics and available water storage of typical karst soil in SW China under different soil-rock structures[J].Geoderma,2023,438:e116633.
- [25] 姚依强,陈珂,王彦辉,等.华北落叶松树干液流速率主要影响因子及关系的时间尺度变化[J].干旱区资源与环境,2017,31(2):155-161.
- YAO Y Q, CHEN K, WANG Y H, et al. Relationships between sap flow velocity of *Larix principis-rupprechtii* and environmental factors and their variation with time scales[J].Journal of Arid Land Resources and Environment,2017,31(2):155-161.
- [26] 卢志朋,魏亚伟,李志远,等.辽西北沙地樟子松树干液流的变化特征及其影响因素[J].生态学杂志,2017,36(11):3182-3189.
- LU Z P, WEI Y W, LI Z Y, et al. Characteristics of sap flow and its influencing factors of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in sandy land of Northwest Liaoning[J]. Chinese Journal of Ecology,2017,36(11):3182-3189.
- [27] 陈宝强,张建军,张艳婷,等.晋西黄土区辽东栎和山杨树干液流对环境因子的响应[J].应用生态学报,2016,27(3):746-754.
- CHEN B Q, ZHANG J J, ZHANG Y T, et al. Whole-tree sap flow of *Quercus liaotungensis* and *Populus davidiana* in response to environmental factors in the Loess Plateau area of western Shanxi Province, Northern China[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(3):746-754.
- [28] 黄德卫,张德强,周国逸,等.鼎湖山针阔叶混交林优势种树干液流特征及其与环境因子的关系[J].应用生态学报,2012,23(5):1159-1166.
- HUANG D W, ZHANG D Q, ZHOU G Y, et al. Characteristics of dominant tree species stem sap flow and their relationships with environmental factors in a mixed conifer-broadleaf forest in Dinghushan, Guangdong Province of South China[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2012,23(5):1159-1166.
- [29] 吴旭,陈云明,唐亚坤.黄土丘陵区刺槐和侧柏人工林树干液流特征及其对降水的响应[J].植物生态学报,2015,39(12):1176-1187.
- WU X, CHEN Y M, TANG Y K. Sap flow characteristics and its responses to precipitation in *Robinia pseud-acacia* and *Platycladus orientalis* plantations[J].Chinese Journal of Plant Ecology,2015,39(12):1176-1187.