

# 陇东黄土高原区人工刺槐林树干液流数据集 (2017–2019)

张 军<sup>1</sup>, 邸 利<sup>1\*</sup>, 陈徵尼<sup>2</sup>, 王安民<sup>3</sup>, 倪 帆<sup>1</sup>, 任艺彬<sup>4</sup>, 费俊娥<sup>1</sup>,  
吴贤忠<sup>5</sup>, 王正安<sup>6</sup>, 韩 芬<sup>3</sup>, 汝海丽<sup>3</sup>, 景贯阳<sup>1</sup>

1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省林业科学研究院, 兰州 730000;  
3. 平凉市水土保持科学研究所, 平凉 744000; 4. 陇东学院农林科技学院, 庆阳 745000;  
5. 兰州城市学院, 兰州 730070; 6. 宁夏农林科学院固原分院, 固原 756000

**摘 要:** 依托国家自然科学基金项目(41461112, 31660235), 在陇东黄土高原中沟小流域(35°19'N–35°20'N, 107°30'E–107°31'E), 选取20世纪70年代中后期大面积种植的人工刺槐林植被, 根据热平衡原理, 采用热扩散探针技术对所选样树的树干液流进行持续监测, 并同时测定气象因子。该数据集包括: 2017年5月19日–2019年12月10日陇东黄土高原中沟小流域常规样地树干液流监测数据(数据监测频率为10分钟), 数据的存储形式为: .xlsx格式, 压缩后数据量为6.59 KB。该数据集部分数据(2017年生长季树干液流数据)的分析研究成果(甘肃泾川中沟小流域刺槐生长盛期树干液流动态分析与陇东黄土高原区人工刺槐林树干液流特征研究)已完成。

**关键词:** 树干液流; 监测数据; 人工刺槐林; 陇东黄土高原

**DOI:** 10.3974/geodp.2020.01.09

## 1 前言

森林生态系统水量平衡是影响局部和全球气候的重要因子, 蒸腾是森林生态系统向大气输送水分的主要过程, 在土壤-植被-大气水分传输过程中起着重要作用<sup>[1–2]</sup>, 在森林水分循环中占最大比重<sup>[3]</sup>。树木根系从土壤中吸收的水分通过树干通道不断输送至冠层, 其中大部分通过气孔蒸腾作用散失到大气中<sup>[4]</sup>。树干液流(Sap Flow)是蒸腾作用在单木水平上的表现形式<sup>[5]</sup>, 99.8%以上的液流用于蒸腾耗水<sup>[6]</sup>, 是土壤-植物-大气连续体(Soil-Plant-Atmosphere Continuum, SPAC)水流路径中一个关键链接, 承接地下根系所吸收、汇集的土壤水, 决定了整个树冠的蒸腾量, 可反映植物体内的水分传输状况<sup>[7–8]</sup>。液流沿着植物导管自根部向茎叶运动, 对维持土壤和大气的水文连接至关重要<sup>[9]</sup>, 既可以提供氧气给木质部薄壁细胞, 又能促进养分吸收<sup>[10]</sup>, 其传输运动的主要动力包括根系压力、水分子内聚力、蒸

收稿日期: 2019-12-26; 修订日期: 2020-02-23; 出版日期: 2020-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(41461112, 31660235)

\*通讯作者: 邸利, 甘肃农业大学资源与环境学院, dili@gsau.edu.cn

数据引用方式: [1] 张军, 邸利, 陈徵尼等. 陇东黄土高原区人工刺槐林树干液流数据集(2017–2019) [J]. 全球变化数据学报, 2020, 4(1): 60–67. DOI: 10.3974/geodp.2020.01.09.

[2] 张军, 邸利, 陈徵尼等. 陇东黄土高原人工刺槐林样木树干液流实测数据集[DB/OL]. 全球变化数据仓储, 2019. DOI: 10.3974/geodb.2019.06.17.V1.

腾拉力等<sup>[11]</sup>。树干液流与植物蒸腾作用等活动息息相关，通过对树干液流监测可以估算树木蒸腾量，随着树干液流监测方法的日益完善，树干液流已经成为自动长期监测植物水分状态的首选指标<sup>[12–13]</sup>。

近年来，国内许多学者以树干液流为手段，在黄土高原不同区域开展了不同树种耗水特性研究<sup>[14–15]</sup>。陇东黄土丘陵区气候干旱，降水量少且分配不均，森林植被覆盖率低，生态环境恶劣，水土流失严重。国家先后投入一系列重点林业生态工程，营造了大面积的刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Biota orientalis*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides linn*)、柠条(*Caragana korshinskii Kom*)等生态林木；人工刺槐林主要为纯林，其结构单一，林下植被稀疏，大量消耗土壤水分，加上该地区降水量少，不能及时补充土壤水分，形成林下土壤干层<sup>[16]</sup>，土壤干层削弱了生态系统的水文循环过程，造成人工刺槐林在 30 年后大面积衰败<sup>[17–18]</sup>。刺槐是一种典型的中生树种，既喜湿润肥沃，又耐旱耐瘠薄，生长迅速，是优良造林树种<sup>[19]</sup>。已成为我国黄土高原水土保持造林的主要树种之一<sup>[20]</sup>。在早期大面积营造人工林实施植被生态恢复的过程中，忽视了区域本底自然环境条件及土壤水分时空分布特征，树种选择也不够科学，导致森林结构不合理，树种单一，种植密度过大，造林成活率与保存率低，而成活林木的生长速度十分缓慢，且提早进入退化期，从而使林业生态系统稳定性差，林木生长及更新停滞，生态效应低下。为此，深入研究该区域典型人工林的生态水文过程，确切掌握该区域林木蒸腾耗水状况，对指导该地区人工林植被恢复和可持续发展具有重要理论意义。

## 2 数据集元数据简介

《陇东黄土高原人工刺槐林样本树干液流实测数据集》<sup>[21]</sup>的名称、作者、地理区域、数据年代、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

## 3 研究区概况与数据研发方法

### 3.1 研究区概况与样地信息

研究地点(图 1)位于陇东黄土高原中沟小流域(35°19'N–35°20'N, 107°30'E–107°31'E)占地面积 2.09 km<sup>2</sup>，海拔 1,072–1,351 m，属于典型的黄土丘陵沟壑区，主要地貌类型为塬面、梁坡、沟台和沟谷四大类型，局部有一些破碎塬，沟壑发育完全，坡面陡峭，土壤侵蚀较为严重，侵蚀模数为 4,500–4,800 t km<sup>-2</sup><sup>[23]</sup>。土壤母质为原生黄土和次生黄土，土壤为黑垆土、黄绵土与褐土。气候为典型的大陆性气候，年均温 10.7 °C，年日照时数 2,315.4 h，无霜期 174 d，降雨量分布不均且年际变化大，年均降雨量 555 mm，多集中在 7–9 月，年蒸发量 1,181.6 mm，干燥度 0.95–1.28<sup>[24]</sup>。研究区处于森林草原过渡带，长期农垦及人类过度干扰造成植被破坏严重，覆盖率较低。自 20 世纪 70 年代中后期开始大面积退耕还林，现有植被均是近 40 年来人工营造，目前林地面积 5,420 km<sup>2</sup>，森林覆盖率 37.13%，刺槐是该区主要的乔木树种，占整个林分面积的 92%；其他造林树种有杨树(*Populus davidiana*)、旱柳(*Salix matsudana*)、泡桐(*Paulownia fortunei*)、侧柏(*Biota orientalis*)和华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)等；林下草本植物较少，主要有铁杆蒿(*Artemisa vestita*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides linn*)、白羊草(*Bothriochloa*

*ischaemum*)、狗尾草 (*Setaria faberii*)、多花胡枝子 (*Lespedeza fioribunda*) 等<sup>[25]</sup>。

表1 陇东黄土高原树干液流数据集元数据简表

条目	描述
数据集名称	陇东黄土高原人工刺槐林样本树干液流实测数据集
数据集短名	StemSapFlowR.pseudoacaciaLoessPlateau
地理区域	陇东黄土高原中沟小流域 (35°19'N-35°20'N, 107°30'E-107°31'E)
数据年代	2017-2019
作者信息	张军 AAA-5731-2019, 甘肃农业大学, zhangjun@gsau.edu.cn 邸利, 甘肃农业大学, dili@gsau.edu.cn 陈微尼, 甘肃省林业科学研究院, chen.zhengni@gmail.com 王安民, 平凉市水土保持研究所, 593928177@qq.com 倪帆, 甘肃农业大学, 1356159486@qq.com 任艺彬, 陇东学院, 171344121@qq.com 费俊娥, 甘肃农业大学, 943416926@qq.com 吴贤忠, 兰州城市学院, wxz315@163.com 王正安, 宁夏农林科学院固原分院, 1731967640@qq.com 韩芬, 平凉市水土保持研究所, 455573021@qq.com 汝海丽, 平凉市水土保持研究所, 1175332809@qq.com 景贵阳, 甘肃农业大学, 960249539@qq.com
数据格式	.xlsx 格式 数据量 6.59 MB
数据集组成	监测样地基本信息数据; 2017年5月19日-11月30日8棵样树树干液流数据; 2018年4月24日-2019年9月10日7棵样树树干液流数据(胸径17.6cm的0663号样树探头损坏); 2019年9月11日-12月10日6棵样树树干液流数据(胸径20.0cm的0665号样树探头损坏)
基金项目	国家自然科学基金(41461112, 31660235)
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 <a href="http://www.geodoi.ac.cn">http://www.geodoi.ac.cn</a>
地址	北京市朝阳区大屯路甲11号100101, 中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括实体数据(中英文)和通过《全球变化数据学报》(中英文)发表的数据论文。其共享政策如下: (1)“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放, 用户免费浏览、免费下载; (2)最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源; (3)增值服务用户或以任何形式散发和传播(包括通过计算机服务器)“数据”的用户需要与《全球变化数据学报》(中英文)编辑部签署书面协议, 获得许可; (4)摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循10%引用原则, 即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的10%, 同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 <sup>[22]</sup>
数据和论文检索系统	DOI, DCI, CSCD, WDS/ISC, GEOSS, China GEOSS, Crossref



图 1 研究区位置示意图

2017 年 5 月在前期踏查基础上, 在小流域内选取典型地段设置标准样地, 面积 20 m×20 m, 对该样地(表 2)进行林分调查: 25 年生人工刺槐林林分密度为 750 株  $\text{hm}^{-2}$ , 平均树高 14.88 m, 平均胸径 16.81 cm, 郁闭度为 0.8。受电缆长度影响, 在样地内比较集中的区域选择不同径级生长良好、树干通直圆满、树冠适中的标准木 8 株作为样树, 样树基本情况见表 3。

表 2 样地基本情况

样地类型	林龄 (a)	经纬度	地貌部位	坡向	海拔 (m)	密度 (株 $\text{hm}^{-2}$ )	平均胸径 (cm)	树高 (m)	郁闭度
刺槐人工林	25	35°20'41.4"N, 107°31'11.5"E	塬面	332°, 半阴坡	1,237	750	16.81	14.88	0.8

表 3 样木树形基本特征

样木编号	胸径 (cm)	树高 (m)	冠幅 (m×m)	边材厚度 (cm)
0666	16.7	13.2	5.4×5.2	1.0
0662	14.2	15.1	6.5×7.8	1.5
0660	12.9	16.8	6.5×8.4	1.6
0665	20.0	15.7	4.2×5.3	1.7
0658	15.2	13.9	4.2×5.6	0.7
0663	17.6	16.5	5.8×6.3	2.3
0659	19.4	13.7	5.2×6.1	2.0
0664	18.5	14.2	4.5×7.6	1.3

## 3.2 数据采集

树木根系吸收的土壤液态水, 由茎疏导组织向上运输在木质部形成上升液流, 液流运达冠层, 经气孔蒸腾转化为气态水扩散至大气, 因而可用测定树干液流的方法估计整株树木的蒸腾量<sup>[26]</sup>。由于树木的边材部分是树体内水分由根系向树冠输导的通道, 因此流经树干的液流量可近似等于树木冠层蒸腾耗水量, 通过测定树干液流的流量即可得到整株树木的蒸腾耗水量<sup>[4]</sup>。树干液流量已成为分析树木耗水特性、研究树木水分传输机理的关键指标之一<sup>[27]</sup>, 目前测定树干木质部边材液流通量密度的方法很多, 其中, 热技术法是国际上研究植物水分传输与消耗的先进方法, 该方法可实现树木活体液流连续自动监测, 时间分辨率高, 且不会破坏植物的正常生理活动, 不改变原有环境和树木结构, 同时具有简单经济、可重复监测、野外操作方便等优点<sup>[28]</sup>。根据不同的原理又可分为热脉冲速率法 (HPV)、热平衡法 (SHB)、热扩散法 (TDP)、激光热脉冲法 (LHPG)、热变形法 (HFD)。本研究采用的热扩散探针 (Thermal Dissipation Probe, TDP) 法, 可实现数据自动化采集、准确度和可靠性较高、可操作性相对较好、价格相对廉价、安装容易、计算较为简便, 已成为树木耗水研究中常用研究方法之一。

### 3.2.1 TDP 工作原理

热扩散探针法是由 Granier 在 1985 年发明的树木边材液流测定系统<sup>[29–30]</sup>。通过监测树干边材液流的热扩散引起的上、下两探头间的温度差, 并根据该温度差与树木边材液流通

量密度的关系可以连续测定树干边材液流通量密度的变化,进而计算整株边材液流。该方法是将一根线性加热探针插入树干的木质部,将另一根不加热探针插入它下方一定距离的木质部作为参考探针,并测量两探针间的温差。加热探针的热量随着树干液流的流动向上扩散,从而导致了加热探针的冷却。当树干液流密度为零或最小时,两探针间的温差( $dT$ )最大。随着树干液流密度增大,树干木质部的导热率也将增大,则两探针间的温差将减小。

每套 TDP 探针均包含一对圆柱形探头,一个安装于树干上侧,为加热探头(内含加热元件和热电偶);另一个则安装于树干下侧,为参考探头(仅含热电偶)。本试验采用了长度为 1 cm 的热扩散探针(两探头均为 1 cm 长,直径 2 mm,并在外面套一铝管以保证探头温度均一)对外侧边材的液流通量密度进行监测(图 2),参考探针与加热探针间相距 10 cm,采用专用电流调节装置连接 12 V 直流电源,供给加热探针恒定电流以达到 0.15 W 的持续加热。为了避免太阳辐射引起的测量误差,将探针安装在树干北侧并用防辐射铝箔覆盖。采用 RR-1016 数据采集器,每 10 min 采集数据一次,液流通量密度根据通用的 Granier 经验公式来计算。



图2 树干液流仪器设置与安装

### 3.2.2 仪器安装

(1) 根据试验要求在样地内选取不同径级的树干较为通直圆满、不偏心和树冠适中的树木作为标准样木(树干组织均匀,没有非正常结节,无机械或生物损伤或其他会影响木质部正常液流通道的障碍),然后测量树皮和韧皮部的厚度(若厚度不均一,打磨树干。注意不要损伤树皮底下的软木);

(2) 在样木树干被测 1.3 m 处用小刀沿树干垂直方向将树皮刮成两个 4×5 cm 的矩形(刮树皮时防止树干韧皮部的损坏)两探针上下间距为 10 cm;

(3) 用直径 1.5 mm 的钻头,在两个矩形中钻两个一定规格的孔洞,将热源探针与感应探针分别插入上下孔洞;

(4) 用玻璃胶封死探针与树干之间的空隙,防止雨水渗入对其影响。为避免太阳辐射的影响,安装好探针后,整个探头及其邻近区域用防辐射铝箔包裹起来,并将上方完好封

闭, 不要让雨水进入液流计安装部位;

(5) 利用 12 V 电池为加热器供电, 使用交流电充电器为电池充电 (在野外同时安装有太阳能板连接太阳能电池控制器作为备用电源);

(6) 探针一端用数据采集器进行数据采集, 通过电脑程序进行数据下载<sup>[4]</sup>。

### 3.2.3 树干液流测定

2017 年 5 月安装了数据无线传输系统 (北京雨根科技有限公司生产的 DTU900C)。为避免太阳直射引起的测量误差, 探针均匀的安装在 1.3 m 的刺槐树干北侧。沿树干垂直方向 10 cm 的距离利用一定规格的钻头钻取直径为 1.5 mm 的孔洞, 插入 TDP 探针, 探针固定好后整个探头及其邻近区域用防辐射铝箔覆盖, 并用胶带固定其上下端, 然后将覆盖层的上端与树皮之间用透明玻璃胶密封, 防止环境温度变化和雨水渗入对测定结果的影响。在测定树干液流 (数据采集时间间隔设定为 10 min) 的同时, 利用样地内安装的自动气象站, 连续采集太阳有效辐射、空气温度、风速、空气相对湿度等气象要素数据, 同时监测的土壤温度和土壤湿度。

## 4 数据结果

本实验通过热扩散式液流探针 (TDP) 对生长季树干液流进行连续监测, 就 2017 年数据分析得出的研究结果显示: (1) 刺槐林树干液流日变化存在“昼高夜低”的趋势; (2) 刺槐树干液流速率在晴天呈“单峰型”变化, 阴天呈“多峰型”变化, 雨天呈不规则波动; (3) 刺槐林树干液流速率月均值呈“低–高–低”变化趋势, 且 10 月份液流速率最小 ( $193.19 \text{ g h}^{-1}$ ), 8 月份液流速率最大 ( $652.31 \text{ g h}^{-1}$ ); (4) 不同生长时期液流启动时间、到达峰值时间和下降时间有显著季节差异, 生长初期液流一般在 7:00 左右启动, 到达峰值的时间在 13:00 左右, 均滞后于生长中期一个小时, 而生长盛期树干液流从 6:00 开始启动, 基本在 11:00–12:00 到达峰值, 生长末期变化规律与初期基本一致; (5) 不同生长时期影响树干液流变化的因子不同, 但都与空气温度、太阳辐射和空气湿度显著相关, 其他影响因子随季节变化对树干液流影响存在差异。表 4 为 2017 年 5 月 19 日对生长季树干液流连续监测数据节选, 其中  $Fd_1$  为 666 号样树监测所得数据,  $Fd_2$  为 662 号样树监测所得数据,  $Fd_3$  为 660 号样树监测所得数据,  $Fd_4$  为 665 号样树监测所得数据,  $Fd_5$  为 658 号样树监测所得数据,  $Fd_6$  为 663 号样树监测所得数据,  $Fd_7$  为 659 号样树监测所得数据,  $Fd_8$  为 664 号样树监测所得数据。

表 4 2017 年 5 月 19 日对生长季树干液流连续监测数据 (节选)

接收时间	电池电压 (V)	$Fd_1$ (°C)	$Fd_2$ (°C)	...	$Fd_8$ (°C)
2017/5/19 17:30	12.899	5.101,9	5.231,5	...	5.251,6
2017/5/19 17:40	12.878,9	5.110,9	5.216,3	...	5.230,4
...	...	...	...	...	...
2017/5/19 23:40	14.201,8	5.540,3	6.048,1	...	5.839,9
2017/5/19 23:50	14.201,8	5.545,9	6.061	...	5.838,2

## 5 总结

采用热扩散式液流探针 (TDP) 对泾川县中沟小流域人工刺槐林生长季树干液流进行连续监测, 并同步监测有效太阳辐射、空气温度、相对湿度和风速等气象因子, 可以揭示该区域林分蒸腾耗水及其适应环境因子的内在机理。连续多年的观测完全可以作为该区域生态环境变化的一项重要指标数据, 并作为气候模型、水文模型及植被生长变化分析的基础输入数据。

生长盛期人工刺槐林树干液流速率的连续观测结果表明: 刺槐生长盛期晴天树干液流速率呈单峰型曲线, 日平均液流速率分别为 22.09、22.43、20.66  $\text{g h}^{-1}$ , 生长盛期日平均液流速率为 17.07  $\text{g h}^{-1}$ ; 刺槐树干单位边材面积的液流速率与空气温度、太阳有效辐射、水汽压亏缺呈极显著正相关, 与相对湿度呈极显著负相关, 其相关程度绝对值依次为光合有效辐射>水汽压亏缺>空气温度>相对湿度>风速; 单位边材面积的液流速率随胸径的增大而减小。

**作者分工:** 邱利对数据集的开发做了总体设计; 陈徽尼、王安民、任艺彬、费俊娥、吴贤忠、王正安、韩芬、汝海丽和景贵阳采集和处理液流监测数据; 张军、邱利和倪帆撰写了数据论文。

## 参考文献

- [1] Sevanto, S., Nikinmaa, E., Riikonen, A., *et al.* Linking xylem diameter variations with sap flow measurements [J]. *Plant and Soil*, 2008, 305(1/2): 77–90. DOI: 10.1007/s11104-008-9566-8.
- [2] 韩春, 陈宁, 孙杉等. 森林生态系统水文调节功能及机制研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, 38(7): 2191–2199. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201907.019.
- [3] 周晓峰. 中国森林与生态环境[M]. 北京: 中国林业出版社, 1999.
- [4] 张建国. 黄土丘陵区两典型森林群落蒸腾耗水特性研究[D]. 杨凌: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2014.
- [5] Daley, M. J., Phillips, N. G. Interspecific variation in nighttime transpiration and stomatal conductance in a mixed New England deciduous forest [J]. *Tree Physiology*, 2006, 26(4): 411–419. DOI: 10.1093/treephys/26.4.411.
- [6] 隋旭红. 陕西黄土区主要树种蒸腾特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [7] Nadezhdina, N. Sap flow index as an indicator of plant water status [J]. *Tree Physiology*, 1999, 19(13): 885–891. DOI: 10.1093/treephys/19.14.960.
- [8] Cohen, M. E., Goldhamer, D. A., Fereres, E., *et al.* Assessment of peach tree responses to irrigation water deficits by continuous monitoring of trunk diameter changes [J]. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 2001, 76(1): 55–60.
- [9] Steppe, K., Vandegehuchte, M. W., Tognetti, R., *et al.* Sap flow as a key trait in the understanding of plant hydraulic functioning [J]. *Tree Physiology*, 2015, 35(4): 341–345. DOI: 10.1093/treephys/tpv033.
- [10] Hubbart, J. A., Kavanagh, K. L., Pangle, R., *et al.* Cold air drainage and modeled nocturnal leaf water potential in complex forested terrain [J]. *Tree Physiology*, 2007, 27(4): 631–639. DOI: 10.1093/treephys/27.4.631.
- [11] 李守中, 郑怀舟, 陈金梅等. 环境因子对树干液流的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(25): 10758–10759, 10762. DOI: 10.3969/j.issn.0517-6611.2008.25.015.

- [12] Nadezhdina, N. Sap flow index as an indicator of plant water status [J]. *Tree Physiology*, 1999, 19(13): 885–891. DOI: 10.1093/treephys/19.14.960.
- [13] 虞沐奎, 姜志林, 鲁小珍等. 火炬松树干液流的研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2003, 27(3): 7–10. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2003.03.002.
- [14] 王进鑫, 黄宝龙, 王明春等. 不同供水条件下侧柏和刺槐幼树的蒸腾耗水与土壤水分应力订正[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 419–425.
- [15] 周海光, 刘广全, 焦醒等. 黄土高原水蚀风蚀复合区几种树木蒸腾耗水特性[J]. 生态学报, 2008, 28(9): 4568–4574.
- [16] Jia, X. X., Shao, M., Zhu, Y. J., *et al.* Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 113–122. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.01.011.
- [17] Du, S., Wang, Y. L., Kume, T., *et al.* Sap flow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(1): 1–10. DOI: 10.1016/j.agrformet.2010.08.011.
- [18] Ma, C., Luo, Y., Shao, M., *et al.* Environmental controls on sap flow in black locust forest in Loess Plateau, China [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 13160. DOI: 10.1038/s41598-017-13532-8.
- [19] 俞德浚. 《中国树木志》第一卷出版[J]. 林业科学, 1985, 21(2): 225–226.
- [20] 马昌坤. 黄土高原人工刺槐林地生态水文过程研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [21] 张军, 邴利, 陈微尼等. 陇东黄土高原区人工刺槐林树干液流数据集(2017–2019) [DB/OL]. 全球变化数据仓储, 2019. DOI: 10.3974/geodb.2019.06.17.V1.
- [22] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. DOI: 10.3974/dp.policy.2014.05 (2017 年更新).
- [23] 景贵阳. 陇东黄土高原人工刺槐林枯落物层和土壤层生态水文功能研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2017.
- [24] 王安民, 任焯, 王彦辉等. 甘肃泾川 3 种径级刺槐林的冠层截留降雨作用[J]. 林业科学, 2014, 50(3): 16–21. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20140303.
- [25] 韩芬, 任焯, 王彦辉等. 甘肃泾川刺槐林地穿透雨对降雨的响应[J]. 人民黄河, 2015, 37(7): 90–94. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2015.07.023.
- [26] 王胜, 樊军. 热脉冲技术 3 种方法组合在测量树干液流中的应用[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2244–2252.
- [27] 尹光彩, 周国逸, 王旭等. 应用热脉冲系统对桉树人工林树液流通量的研究[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 1984–1990. DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2003.10.005.
- [28] Edwards, W., Booker, R. Radial variation in the axial conductivity of *Populus* and its significance in heat pulse velocity measurement [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1984, 35(153): 551–561.
- [29] Granier, A. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres [C]. *Annales des Sciences forestières*, EDP Sciences, 1985, 42(2): 193–200.
- [30] Granier, A. Sap flow measurements in Douglas-fir tree trunks by means of a new thermal method [J]. *Annales des Sciences Forestières*, 1987, 44(1): 1–14.