

# 黄土高原主要树种树干液流研究进展

刘潇潇<sup>1,2</sup>, 李国庆<sup>1,2</sup>, 闫美杰<sup>1,2</sup>, 杜盛<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**为了明晰黄土高原主要树种树干液流的动态特征, 该文通过对已发表相关文献搜集与整理(19篇涉及11个树种), 采用meta分析手段归纳黄土高原主要树种树干液流动态、耗水规律及其影响因素。研究发现:(1)该区主要树种树干液流存在明显的昼夜变化规律;(2)太阳辐射、水汽压亏缺、土壤含水率是影响树干液流的主要环境因素;(3)树干液流测量手段、树木生长阶段以及测量时的天气条件会给树木蒸腾耗水估算带来不确定性;(4)11个树种的蒸腾耗水量大小的顺序为: 针叶树种(侧柏、油松) < 乡土阔叶树种(白榆、辽东栎、旱柳、柠条、河北杨、小叶杨、山杏) < 外来阔叶树种(刺槐、苹果)。本研究为黄土高原地区造林树种的合理选择及树种耗水评价提供参考。

**关键词:**黄土高原; 树干液流; 蒸腾耗水; 人工造林

中图分类号: S715

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)03-0369-05

## Research Progress on Stem Sap Flow in Major Tree Species on the Loess Plateau

LIU Xiaoxiao<sup>1,2</sup>, LI Guoqing<sup>1,2</sup>, YAN Meijie<sup>1,2</sup>, DU Sheng<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** To clarify the sap flow dynamic characteristics of main tree species on the Loess Plateau, we collected and arranged the relevant 19 published literatures with 11 tree species and a meta analysis was used to summarize the daily dynamics of stem sap flow, water consumption situation and their influence of environmental factors of the 11 tree species. The results suggested that: (1) stem sap flow of the main tree species exhibited diurnal patterns in this area; (2) solar radiation, vapor pressure deficit and soil moisture were the principal factors affecting stem sap flow; (3) estimate of tree water-consumption for transpiration always had uncertainty because of the difference in the methods of measurement, trees growing stage and the weather condition of the measurement; (4) the order of the transpiration in 11 tree species was as following: native coniferous species (*Platycladus orientalis*, *Pinus tabulaeformis*) < native broadleaved species (*Ulmus pumila*, *Quercus liaotungensis*, *Salix matsudana*, *Caragana korshinskii*, *Populus hopeiensis*, *Populus simonii*, *Armeniaca sibirica*) < exotic broadleaved species (*Robinia pseudoacacia*, *Malus pumila*). This study will provide the reference for selection of afforestation tree species and evaluation of tree water consumption on the Loess Plateau of China.

**Keywords:** Loess Plateau; sap flow; transpiration water use; artificial afforestation

树木和林分的蒸腾耗水一直以来受到林木生理生态学家、森林水文学家的高度关注。如何确定单木耗水, 进而估算整个林分的耗水对于造林中树种的选择、确定合理的造林密度、建立合理的耗水模型具有重要的意义。树干液流是由于叶片的蒸腾拉力作用引起植物体水分通过木质部传输到叶片的过程。树干液流可以准确测量单木蒸腾耗水量, 通过尺度上推可以估算整个林分的蒸腾耗水量。因此树干液流已经成为评估树木耗水特性, 估测林分耗水的关键指标之一。

水分是黄土高原森林植被恢复的关键限制因子, 因此在造林的树种选择中应该选择耗水量低的树种。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大量的树种耗水特性研究<sup>[1,2]</sup>。然而由于财力、物力、人力的局限性, 这些研究仅限于单一地点的单一树种(或几个树种), 从而限制了我们对不同树种差异性的理解。为了升华对黄土高原主要树种耗水特性差异性的认识, 本文总结近年来黄土高原主要树种树干液流的研究结果, 比较不同树种

的蒸腾耗水特性及其影响因素,筛选低耗水的树种,为该地区造林树种的选择及配置提供科学依据。

## 1 资料获取

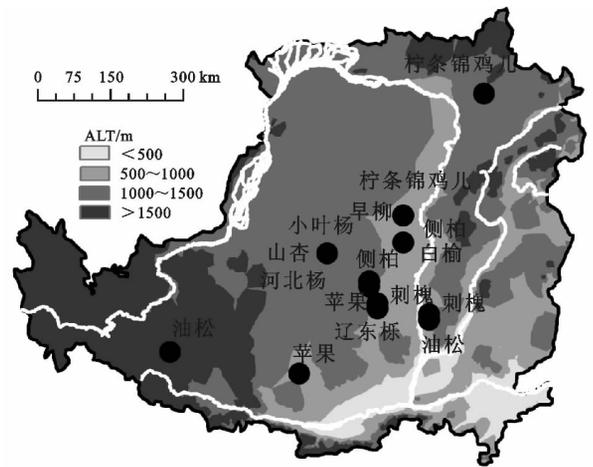
主要通过中国知网数据库,以“黄土高原”、“蒸腾耗水”、“树干液流”等关键词进行文献的收集,选择文献的标准为研究地点位于黄土高原地区且树种为该地区的主要树种。总结 19 篇相关文献,涉及 11 个树种的研究结果,分别为油松(*Pinus. tabuli formis*)(4 篇)、刺槐(*Robinia. pseudoacacia*)(5 篇)、侧柏(*Platycladus. orientalis*)(3 篇)、白榆(*Ulmus. pumila*)(1 篇)、苹果(*Malus. pumila*)(2 篇)、辽东栎(*Quercus. liaotunggensis*)(2 篇)、柠条锦鸡儿(*Caragana. korshinskii*)(2 篇)、旱柳(*Salix. matsudana*)3 篇、河北杨(*Populus. hopeiensis*)小叶杨(*Populus. simonii*)和山杏(*Armeniaca. sibirica*)(1 篇)。所搜集的 19 篇文献(包括 11 种树种)的研究地点分布见图 1。研究树木蒸腾耗水特性的方法,主要有茎热平衡法(Trunk heat balance)<sup>[3-4]</sup>、热场变形法(Heat field deformation)<sup>[5,6]</sup>、热扩散法(Thermal dissipation)<sup>[7]</sup>、热脉冲法(Heat pulse velocity)<sup>[8-10]</sup>和树干热平衡法(Stem heat balance)<sup>[11-13]</sup>。其中以热脉冲法<sup>[14-16]</sup>、热扩散法<sup>[7]</sup>和热平衡法<sup>[17]</sup>以其在不破坏植株正常生长状态下连续自动精确测量而在试验中广泛应用。

## 2 研究内容及结果

### 2.1 树干液流昼夜变化规律

不同研究者对黄土高原主要树种树干液流的变

化规律进行了研究。虽然不同树种之间树干液流昼夜变化规律存在不同程度的差异,但总体而言,树干液流存在明显的昼夜变化规律。表 1 对各树种是否存在昼夜变化规律进行了归纳总结,大部分树种如油松、侧柏、苹果树、刺槐等,均存在树干液流的昼夜变化规律,呈单峰型曲线或单双峰规律不明显。张建国等<sup>[18]</sup>对辽东栎的研究发现,在特殊情况下(6 月下旬),树干液流在午后会出现另一个小高峰,形成双峰型曲线。所以,不同月份及生长季对树干液流的昼夜变化规律存在影响,不同天气条件也会在不同程度上影响树干液流速率。树干液流速率时刻处于动态变化之中,各种环境因子对其有不同程度的影响,因此树干液流速率的昼夜变化规律仍是我们今后所要研究的重点内容。



注:搜集文献的研究地点包括定西市、吉县、安塞县、方山县、延安市、和林格尔木县、神木县、吴起县。

图 1 搜集文献的研究地点空间分布

表 1 各树种昼夜变化规律

| 树种         | 测量方法             | 昼夜变化规律  | 参考文献     |
|------------|------------------|---|----------|
| 侧柏         | 热扩散式树干径流计法       | 晴天具有明显的昼夜节律性,呈单峰曲线                              | [19]     |
| 油松         | 四针式热扩散探针法        | 日液流速率变化呈现昼高夜低的趋势,呈规律性的昼夜变化                      | [20]     |
| 白榆         | —                | —   | —        |
| 辽东栎        | Granier 树干液流测定系统 | 液流日变化曲线为单峰型,偶尔会在午后出现另一个小高峰,形成双峰型曲线(如六月下旬)       | [18][21] |
| 旱柳         | 热扩散式树干茎流计法       | 具明显昼夜变化规律,呈单峰或双峰型曲线                             | [22]     |
| 柠条         | Granier 热扩散探针技术  | 树干液流日际变化趋势呈明显宽峰曲线,在一天中会出现多个峰值                   | [23]     |
| 河北杨、山杏、小叶杨 | PT 茎流仪           | 3 种树种树干液流昼夜节律明显                                 | [2]      |
| 刺槐         | 热扩散探针法           | 5 月上旬仅产生微弱液流,无明显昼夜变化规律。五月下旬,刺槐呈现明显的昼夜变化规律,呈单峰曲线 | [24,25]  |
| 苹果树        | 热扩散式树干茎流计法       | 蒸腾速率有明显的昼夜变化规律,呈双峰变化趋势或单峰曲线                     | [26,27]  |

### 2.2 影响树干液流的环境因素

树干液流受多种因素的影响,在诸多影响因子中,不同因子对树干液流的影响方式不同,处于动态变化之中。树木蒸腾耗水的主要影响因素分为内部因素和外部因素。内部因素为生物学结构因素、外部因素主要有土壤供水因素和气象因素。生物学结构决定液流的潜在能力,土壤供水决定液流的总体水平,而气象因素主要决定液流的瞬间变动<sup>[28]</sup>。影响树干液流的气象因素主要有:太阳辐射、空气水汽压

亏缺、光合有效辐射、相对湿度、大气温度、作物参考蒸腾、风速、大气相对湿度等。研究表明,树木蒸腾由光合有效辐射、湿度、温度等因子共同决定。表 2 总结了各树种树干液流的主要影响因素以及树干液流与各环境因子的相关关系。结果显示,太阳辐射、水汽压亏缺是影响树干液流的两大主要影响因素。太阳辐射不仅直接影响树干液流速率,而且还会通过影响大气温度及湿度间接对树干液流产生影响,因此太阳辐射对树干液流速率的影响较大。水汽压亏缺是

温度与湿度的耦合因子,由于温度与湿度在一定程度上相互联系、相互作用,因此通过水汽压亏缺这一影响因子可以客观地表现出大气温度与湿度对树干液

流速率的影响。风速对树干液流速率的影响目前还未形成定论,大部分研究者认为风速的影响很小,可忽略不计。

表2 各树种树干液流的主要影响因素

| 树种         | 主要影响因素                   | 树干液流与各因子之间的关系                              | 参考文献         |
|------------|--------------------------|--|--------------|
| 侧柏         | 光合有效辐射、水汽压差、大气温度、相对湿度    | 与光合有效辐射,大气温度,水汽压差呈极显著正相关,与相对湿度呈非相关         | [19]         |
| 油松         | 太阳总辐射、大气温度、大气相对湿度        | 影响强度依次为:太阳总辐射>大气温度>大气相对湿度                  | [24]         |
| 白榆         | —                        | —  | —            |
| 辽东栎        | 日总太阳辐射、日均白天空气水汽压亏缺       | 单株日蒸腾耗水量与日总太阳辐射和日均白天空气水汽压亏缺指数饱和曲线拟合效果较好    | [18][21][29] |
| 旱柳         | 太阳辐射、水汽压亏缺、空气温度、相对湿度     | 旱柳树干液流的变化趋势与太阳辐射、水汽压亏缺、空气温度和相对湿度的变化趋势基本一致  | [22][30]     |
| 柠条         | 太阳辐射、大气温度、水汽压亏缺、风速       | 与太阳辐射、大气温度、饱和水汽压亏缺呈显著正相关,与相对湿度呈负相关,与风速无相关性 | [23],[31]    |
| 河北杨、山杏、小叶杨 | 太阳辐射、大气温度、大气相对湿度、风速、土壤温度 | 与光合有效辐射、大气温度及风速呈显著正相关,与大气相对湿度呈显著负相关        | [2]          |
| 刺槐         | 太阳辐射、大气温度、大气相对湿度、水汽压亏缺   | 与光合有效辐射、大气温度、水汽压差呈极显著正相关关系,与相对湿度呈负相关关系     | [24],[32]    |
| 苹果树        | 太阳辐射、水汽压亏缺、大气温度、空气相对湿度   | 与太阳辐射、水汽压差、大气温度呈显著正相关,与空气相对湿度呈显著负相关        | [27]         |

### 2.3 影响树干液流的其他因素

随着技术的进步,越来越多的树干液流测量技术被应用在树木蒸腾耗水估算方面。虽然测定不断的精确化,但不同的测定技术原理不尽相同,因此,之间存在较大差异,测定的不确定性概率变大。另一方面,实时测定时,天气状况对树干液流速率有一定程度的影响。臧春鑫等<sup>[23]</sup>研究发现,在晴天的天气条件下柠条锦鸡儿液流变化幅度较大,而雨天和阴天较晴天变化幅度小,但仍有液流出现。王力等<sup>[27]</sup>研究发现,晴天和阴雨天树干液流速率变化一致,均呈明显的昼夜变化单峰曲线。但在典型的阴雨天气条件下,苹果树树干液流速率明显低于晴天。彭小平等<sup>[22]</sup>对坡地与坝地的旱柳树干液流进行连续监测。发现晴天和阴天旱柳树干液流速率变化规律存在一定程度上的差异。由于在不同天气状况下,树木蒸腾强度不同,晴天较阴天或雨天蒸腾作用较为强烈,树干液流量较大,研究晴天天气条件下的树干液流可能会得到较为理想的结果,因此,在研究不同天气状况下的树干液流时,应着重研究典型天气条件下的树干液流,以其得到较为科学的试验结果。

树木生长的不同阶段,液流速率也存在一定的差异。于占辉等<sup>[33]</sup>对黄土高原半干旱区安塞县人工林刺槐芽期、展叶初期、中期和全叶期树干液流进行了研究。在芽期,刺槐树干液流速率日变化无明显昼夜波动;在展叶初期至全叶期日变化呈现出从微弱波动逐渐增大到趋于平稳的剧烈波动。孟秦倩等<sup>[26]</sup>对苹果树干液流进行了测定,结果表明,各个生长阶段,苹果树蒸腾耗

水变化规律较为相似,不同生育阶段差异较大。初始生长期、快速发育期和生育中期果树蒸腾速率较大。

不同影响因子对树种树干液流速率均存在不同程度上的影响。黄土高原地区干旱少雨,外界环境因素对树干液流的影响较为明显,但内部等其他因素对树干液流也存在影响。各因子对树干液流的影响存在交互效应,因此,增加了树木蒸腾耗水估算的不确定性。目前,研究单一因子对树干液流变化规律还存在一定的难度。而通过研究单一因子对树干液流速率的影响,可以清楚地了解各环境因子对树干液流的影响,掌握液流变化的内在机理,从而加深对树木蒸腾耗水规律的理解。因此,树干液流速率的影响因素及各因素对树干液流速率的单独影响规律仍是今后研究的重点内容。

### 2.4 夜间树干液流

树干液流昼夜变化规律既包括白天的液流变化规律也包含晚上的液流变化规律,但是,日落后叶片气孔关闭,树木蒸腾微弱,树干液流很小(接近于0),难以用仪器检测出来,因此,往往不是研究的重点内容。而从日落到早晨的时段内,若树体在白天过多地消耗水分,在夜晚树体会补充丢失的水分并产生少量的蒸腾耗水,液流并非完全为0,说明在夜晚,树干内部存在少部分的液流。随着测定技术的改进和发展,近年来人们对此项研究也逐渐予以关注。研究发现,夜间液流有助于树木物质养分的运输及体内水分的补充,对植物的生长发育具有重要生理生态意义。表3说明了各树种夜间液流的存在情况。

表3 各树种夜间液流存在情况

| 树种         | 是否有夜间树干液流                        | 参考文献      |
|------------|----------------------------------|-----------|
| 侧柏         | 夜间液流通量密度很小,但并不为0                 | [34]      |
| 油松         | 夜间存在一定的树干液流,油松到21:00以后不再有明显的液流产生 | [24],[35] |
| 白榆         | 夜间液流通量密度很小                       | [34]      |
| 辽东栎        | 夜间液流很小,于次日凌晨达到最低值                | [21]      |
| 旱柳         | 夜间液流速率很微弱,于午夜或次日凌晨降到最低值          | [22][30]  |
| 柠条         | 夜间液流较低,处于稳定阶段                    | [23]      |
| 河北杨、山杏、小叶杨 | 夜晚有微弱的树干液流存在                     | [2]       |
| 刺槐         | 刺槐没有明显的液流停止界限,夜间仍有液流存在           | [24],[32] |
| 苹果树        | 夜间树干液流量较低,变化幅度较小                 | [26]      |

夜晚存在液流主要有以下几个方面的原因。(1)白天蒸腾作用强烈,消耗大量水分,土壤导水率较低,迫使水分无法运送到树冠上部,夜间水势差变小,植物为补充体内组织器官水分亏缺,通过根压作用驱动液流缓慢移动进入植物体内补充白天蒸腾失水,以恢复植物体内水分平衡<sup>[36]</sup>。这与 Ford 等<sup>[37]</sup>的研究结果一致。(2)夜晚,树木冠层叶片进行轻微的水分散发,驱使液流向上运动,从而驱动夜间液流的缓慢发生。(3)研究表明<sup>[38]</sup>,树冠和大的枝条是树体的主要储水部位,树木在夜间仍有微弱的液流是由于夜间水流由根部上升至树冠进行储存,为下一阶段的蒸腾做好准备。针对黄土高原地区主要树种,由于该地区降雨量少,土壤水分含量不足,因此大部分树种夜间需补充白天蒸腾所耗散的水分,在根压的作用下,夜间就存在微弱的液流现象。但夜间液流量相比较于白天树干液流量微乎其微,对于夜间树干液流的测定需要精确的测量设备及技术。如果测定技术低,所得数据可能会不可靠,因此针对夜间树干液流的研究仍需要继续探索。

### 2.5 树种耗水比较

黄土高原地区各树种的耗水特性存在一定的差异。若对11种树种按使用功能性状进行划分,针叶树种有油松和侧柏,阔叶树种有刺槐、白榆、苹果、辽东栎、柠条锦鸡儿、旱柳和河北杨、小叶杨、山杏。韩蕊莲等<sup>[39]</sup>研究表明,黄土高原6个适生树种中,高耗水树种为刺槐,柠条次之,油松、侧柏的耗水量最低,周平等<sup>[40]</sup>对北方主要造林树种苗木蒸腾耗水特性进行了研究,试验表明,阔叶树种的蒸腾速率大于针叶树种,针叶树种中侧柏的蒸腾速率略大于油松,油松和侧柏是耗水较少的树种。阔叶树种液流运动速率较针叶树种快,相对而言,蒸腾耗水量也比较大,其可能的原因为第一阔叶树种对土壤水分吸收速率较快,并且消耗量大,使根系土壤环境中的有效水分被快速消耗,而相比较下的针叶树种水分消耗速率较慢,吸水能力较弱,耗水量少;第二阔叶树种的叶面积较针叶树种大,在相等的环境条件下,阔叶树种光合作用强烈、气孔蒸腾速率较针叶树种大,因而在相等的光

照及时间条件下,阔叶树种会消耗比针叶树种更多的水分。在阔叶树种中按照乡土树种和外来种对其进行进一步划分,乡土树种有白榆、辽东栎、柠条锦鸡儿、旱柳和河北杨、小叶杨、山杏,外来种有刺槐和苹果,对其结果进行归纳总结,发现乡土树种适应环境的能力较强,在黄土高原地区分布较为广泛,而外来种的生长需要更多的水分来维持生命活动,对水分条件的要求比乡土树种更高。

## 3 结论

通过对黄土高原主要树种树干液流动态、耗水规律及其影响因素的分析,认为该区主要树种树干液流存在明显的昼夜变化规律;太阳辐射、水汽压亏缺、土壤含水率是影响树干液流的主要环境因素;树干液流测量手段、树木生长阶段以及测量时的天气条件会给树木蒸腾耗水估算带来不确定性;11个树种的蒸腾耗水量大小的顺序为:针叶树种(侧柏、油松)<乡土阔叶树种(白榆、辽东栎、旱柳、柠条、河北杨、小叶杨、山杏)<外来阔叶树种(刺槐、苹果)。本研究为黄土高原地区造林树种的合理选择及树种耗水评价提供参考。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Čermák J, Deml M, Penka M. A new method of sap flow rate determination in trees[J]. Biologia plantarum, 1973,15(3):171-178.
- [4] Grime V L, Morison J I L, Simmonds L P. Sap flow measurements from stem heat balances: A comparison of constant with variable power methods[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995,74(1):27-40.
- [5] Nadezhdina N E. Apple tree water relations studied by means of the relative rate of water flow in the trunk xylem [J]. Biologia plantarum, 1992,34(5/6):431-437.

- [6] Nadezhdina N, Vandegehuchte M W, Steppe K. Sap flux density measurements based on the heat field deformation method[J]. *Trees*, 2012,26(5):1439-1448.
- [7] Köstner B, Biron P, Siegwolf R et al. Estimates of water vapor flux and canopy conductance of Scots pine at the tree level utilizing different xylem sap flow methods[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 1996,53(1/3):105-113.
- [8] Morikawa Y, Hattori S, Kiyono Y. Transpiration of a 31-year-old *Chamaecyparis obtusa* Endl stand before and after thinning[J]. *Tree physiology*, 1986,2(1/2/3):105-114.
- [9] Misra R K, Sands R. A comparison of sap flux and water relations of leaves of various isolated trees with special reference to foundation movement in clay soil[J]. *Plant and Soil*, 1992,140(2):269-278.
- [10] Grime V L, Morison J I L, Simmonds L P. Including the heat storage term in sap flow measurements with the stem heat balance method[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995,74(1):1-25.
- [11] Lundblad M, Lagergren F, Lindroth A. Evaluation of heat balance and heat dissipation methods for sapflow measurements in pine and spruce[J]. *Annals of Forest Science*, 2001,58(6):625-638.
- [12] Ktjč era J, Čermák J, Penka M. Improved thermal method of continual recording the transpiration flow rate dynamics[J]. *Biologia Plantarum*, 1977,19(6):413-420.
- [13] Braun P, Schmid J. Sap flow measurements in grapevines(*Vitis vinifera* L.) Stem morphology and use of the heat balance method[J]. *Plant and Soil*, 1999,215(1):39-45.
- [14] Burgess S S O, Adams M A, Turner N C, et al. An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants[J]. *Tree Physiologist*, 2001,21(9):589-598.
- [15] González-Altozano P, Pavel E W, Oncins J A, et al. Comparative assessment of five methods of determining sap flow in peach trees[J]. *Agricultural Water Management*, 2008,95(5):503-515.
- [16] Poblete-Echeverría C, Ortega-Farías S, Zuñiga M, et al. Evaluation of compensated heat-pulse velocity method to determine vine transpiration using combined measurements of eddy covariance system and microlysimeters[J]. *Agricultural Water Management*, 2012,109:11-19.
- [17] Weibel F P, Boersma K. An improved stem heat balance method using analog heat control[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995,75(1):191-208.
- [18] 张建国,久米朋宜,大规模恭一,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.
- [19] 于占辉,陈云明,杜盛. 黄土高原半干旱区侧柏树干液流动态[J]. *生态学报*, 2009,29(7) 3970-3976.
- [20] 张涵丹,卫伟,陈利顶,等. 典型黄土区油松树干液流变化特征分析[J]. *环境科学*, 2015,36(1):349-356.
- [21] 张建国. 黄土高原半干旱区天然辽东栎林蒸腾耗水研究[D]. 陕西杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2011.
- [22] 彭小平. 水蚀风蚀交错区不同立地条件下柳树树干液流差异研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2014.
- [23] 臧春鑫,杨劫,袁劫,等. 黄土丘陵沟壑区中间锦鸡儿整株丛树干液流特征与环境因子的关系[J]. *生态学杂志*, 2010,29(3):420-426.
- [24] 郭宝妮,张建军,王震,等. 晋西黄土区刺槐和油松树干液流比较[J]. *中国水土保持科学*, 2012,10(4):73-79.
- [25] 郭宝妮,张建军,王震,等. 晋西黄土区刺槐林耗水特征[J]. *生态学杂志*, 2012,31(11):2736-2741.
- [26] 孟秦倩,王健,张青峰,等. 黄土山地苹果树树体不同方位液流速率分析[J]. *生态学报*, 2013,33(11):3555-3561.
- [27] 王力,王艳萍. 黄土塬区苹果树干液流特征[J]. *农业机械学报*, 2013,44(10):152-158.
- [28] 吴芳,陈云明,于占辉. 黄土高原半干旱区刺槐生长盛期树干液流动态[J]. *植物生态学报*, 2010,34(4):469-476.
- [29] 张建国,闫美杰,时伟宇,等. 辽东栎不同方位边材液流季节动态及其对蒸腾耗水测算的影响[J]. *水土保持学报*, 2011,25(3):193-197.
- [30] 彭小平,樊军,米美霞,等. 黄土高原水蚀风蚀交错区不同立地条件下旱柳树干液流差异[J]. *林业科学*, 2013,49(9):38-45.
- [31] 夏永秋,邵明安. 黄土高原半干旱区柠条(*Caragana korshinskii*)树干液流动态及其影响因子[J]. *生态学报*, 2008,28(4):1376-1382.
- [32] 胡伟,杜峰,徐学选,等. 黄土丘陵区刺槐树干液流动态分析[J]. *应用生态学报*, 2010,21(6):1367-1373.
- [33] 于占辉,陈云明,杜盛. 黄土高原半干旱区人工林刺槐展叶期树干液流动态分析[J]. *林业科学*, 2009,45(4):53-59.
- [34] 胡兴波,韩磊,张东,等. 黄土半干旱区白榆和侧柏夜间液流动态分析[J]. *中国水土保持科学*, 2010,8(4):51-56.
- [35] 刘彩凤,张志强,郭军庭,等. 晋西黄土丘陵沟壑区油松刺槐混交林蒸腾耗水[J]. *中国水土保持科学*, 2010,8(5):42-48.
- [36] 王华,赵平,王权,等. 马占相思夜间树干液流特征和水分补充现象的分析[J]. *生态学杂志*, 2007,26(4):476-482.
- [37] Ford C R, Goranson C E, Mitchell R J, et al. Diurnal and seasonal variability in the radial distribution of sap flow: predicting total stem flow in *Pinus taeda* trees[J]. *Tree Physiology*, 2004,24(9):951-960.
- [38] 刘静,孙旭,布和. 河套灌区节水措施与黄河下游农业可持续发展[J]. *生态农业研究*, 2000,8(4):64-66.
- [39] 韩蕊莲,梁宗锁,侯庆春,等. 黄土高原适生树种苗木的耗水特性[J]. *应用生态学报*, 1994,5(2):210-213.
- [40] 周平,李吉跃,招礼军. 北方主要造林树种苗木蒸腾耗水特性研究[J]. *北京林业大学学报*, 2002,24(5):50-55.