

土壤温度对油松树干液流启动与停止的影响

王玥 鄢春华 邱国玉[†]

北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 深圳 518055; [†] 通信作者, E-mail: qiugy@pkusz.edu.cn

摘要 利用 TDP (thermal dissipation probe) 技术, 对九寨沟次生优势树种油松进行连续观测和初步研究。在 2013—2015 年间, 利用土壤温度传感器采集其树下 3, 10, 20, 30, 40 和 50 cm 共 6 个深度的土壤温度数据, 分析温度与树干液流强度的关系。结果表明, 早春季节的 3 cm 浅层地表土壤温度和气温相比深层土壤对树干液流强度的影响更显著(相关系数为 0.852)。对不同土层温度与树干液流密度进行相关性分析, 得到油松根系的最适温度为 4.0~7.9℃。土壤温度通过对早春土壤水分要素的控制影响林下供水环境, 从而显著地影响蒸散发量。随着土壤温度升高, 油松在 3~4 月间启动树干液流, 加剧九寨沟早春径流的衰竭。

关键词 九寨沟; 油松; 树干液流; 土壤温度; 最适温度

Soil Temperature Triggers Sap Flow Onset and Offset of *Pinus tabulaeformis*

WANG Yue, YAN Chunhua, QIU Guoyu[†]

School of Environment and Energy, Peking University ShenZhen Graduate School, Shenzhen 518055;
[†] Corresponding author, E-mail: qiugy@pkusz.edu.cn

Abstract TDP (thermal dissipation probe) technology was used for continuous observation and preliminary study of the secondary dominant tree species *Pinus tabulaeformis* in Jiuzhai Valley. A temperature sensor was used to collect soil temperature gradients from 2013 to 2015 with 6 depth gradients at 3, 10, 20, 30, 40, and 50 cm below the tree. The analysis showed that the temperature of surface soil in the shallow 3 cm soil layer in early spring had a stronger influence on the sap flow intensity than the deep soil temperature and air temperature (correlation coefficient was 0.852). The temperature gradient analysis reported that the optimum temperature for the root system was 4.0–7.9°C. With the increase of soil temperature, the characteristics of sap flow initiated by *Pinus tabulaeformis* in March and April would exacerbate the decrease of early spring runoff in Jiuzhai Valley.

Key words Jiuzhai Valley; *Pinus tabulaeformis*; sap flow; soil temperature; optimum temperature

树干液流对环境因子(如净辐射、空气温度、饱和水汽压亏缺、光合有效辐射和土壤水分等)有不同的响应^[1-4], 受根系特征的影响, 不同的植被对于不同环境因子的响应也有所不同。北方油松春季受表层土温的影响, 夏季受深层土温的影响, 10.0~14.9℃的土壤温度对液流活动的影响最明显^[5]。马玲等^[6]认为华南马占相思树的树干液流强度与土壤温度和气温的相关性较弱, 与光合有效辐射的相关性最强。对不同植被树干液流的启动时间也有很多研究, 偏干旱区的植株(如宁夏枸杞^[7]、新疆胡杨^[8]

以及黄土高原地区刺槐^[9]等)多在 5 月较晚开启树干液流, 而九寨沟地区其他优势树种(如红桦和茶头槭)的液流启动时间也晚于油松^[10]。

树干液流指在叶片蒸腾作用下水分从木质部自下而上的运输过程, 树干液流量表征所测树木的蒸腾耗水量。流域优势树种的蒸腾耗水对流域蒸散量的影响较大。九寨沟地区地处内陆, 沟内产水依赖降水的补给和蒸散作用的留存, 沟内水量进一步影响景区的生态环境和旅游价值^[11]。作为九寨沟优势针叶树种之一, 油松的蒸腾量对九寨沟地区蒸散

发总量及区域水循环有重要影响。

1 材料与方法

1.1 研究地点

实验地位于四川省阿坝藏族羌族自治州九寨沟镇的九寨沟国家公园(图1)。选择位于五花海畔的针阔叶混交林(33°9.54'N, 103°52.86'E)布设实验仪器。该片树林海拔2478 m, 以红桦(*Betula albo-sinensis* Burk)、茶条槭(*Acer ginnala* Maxim.)、粗枝云杉(*Picea asperata* Mast.)和油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)为主要树种。九寨沟国家公园位于北方亚热带气候区与青藏高原温带季风气候区的交汇处, 气候类型随着海拔的升高而改变。年均降水量为762 mm, 大部分降水出现在4—10月的生长季。年平均气温为7.3℃, 最低月均温为3.7℃(1月), 最高月均温为16.8℃(7月)。

九寨沟的植被类型和组成随着海拔高度而改变。针阔叶混交林分布于海拔2800 m以下的山腰地带^[12-14], 这部分植被在20世纪70年代经历过大规模的人为采伐。目前, 该区域的标志性树种(针叶树种的油松和落叶树种红桦)是云杉及原生油松被砍伐之后的次生树种^[15]。

九寨沟地区原生林比次生林的土壤孔隙度高, 水文特性相对较好, 土壤成分以腐殖质为主^[16]。

1.2 研究方法

采用德国Ecomatik树干液流传感器探针SF-G,

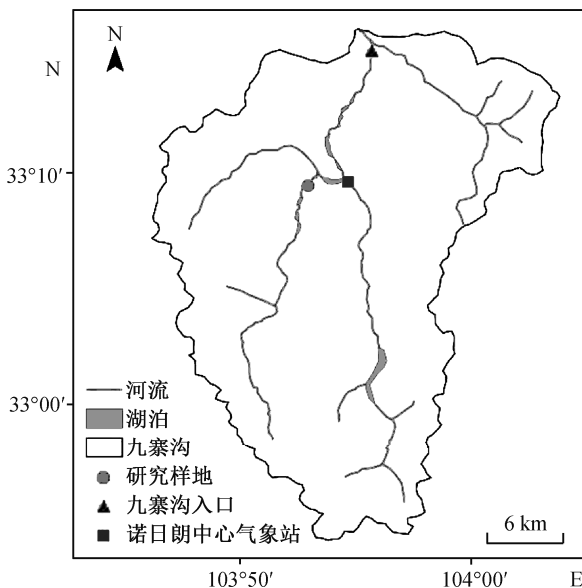


图1 九寨沟研究区域示意图

Fig. 1 Location of the study area in Jiuzhai Valley

对与土壤水分实验位于同一微气候区的目标树种进行连续的液流测量, 数据记录开始于2013年4月。探针(长20 mm, 直径为2 mm)布设在树干的南侧和北侧, 以防止方位角的变化。分别在各树种南北两个方位1.5 m树高处刮去树干粗皮, 用特定规格的钻头, 在竖直方向相隔15 cm的两处分别沿树横切向垂直钻取直径为1.2 mm、深30 mm的孔洞, 再分别插入SF-G传感器探针(Ecomatic, 德国)。传感器上覆防辐射罩, 以减少气温波动对边材的影响。防辐射罩周围用硅胶黏贴密封, 保障传感器不受滴落雨水的影响。利用CR1000数据采集器(CR1000, Campbell Scientific, 澳大利亚)采集树干液流树数据, 每1分钟采集一次, 并存储每10分钟的平均值。

树干液流密度 J_s (kg/m²s)用Granier经验公式计算得到:

$$J_s = 0.119 \times \left(\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T} - 1 \right)^{1.231}, \quad (1)$$

其中 ΔT (℃)是上下两个传感器的温度差, ΔT_{\max} 为昼夜最大瞬时温度差。本文将净辐射通量小于零(夜间)且连续两个小时内饱和水汽压差小于0.05 kPa时的 ΔT 取为0, 即此时无树干液流。当夜间液流量非零, 连续两个小时内饱和水汽压差大于0.05 kPa时, 使用此时段前最近一晚的夜间液流量为零时测得的 ΔT_{\max} 代替^[10]。

采用生长锥测定其胸高处边材厚度, 并测量其胸围, 再将其转化为胸径(diameter of breast height, DBH), 根据式(2), 对各树种的边材面积与胸径进行拟合, 最后利用实测的样树胸径得到边材面积:

$$A_{sj} = a \times \text{DBH}^b, \quad (2)$$

其中, a 和 b 是经验参数。

日总蒸腾量 T (kg/d)通过加和当日每一时刻的蒸腾量计算得到:

$$T = \sum \frac{J_{sj} \times A_{sj}}{A}, \quad (3)$$

其中, J_{sj} 是种类 j 的平均日液流密度, A_{sj} 是种类 j 的边材面积, A 是计算面积。

2 结果与讨论

2.1 油松蒸腾耗水特征

油松日均耗水计算结果如图2所示, 可以看出, 九寨沟地区油松树干液流的启动时间一般在3—4月, 到4月中旬快速升高, 稳定波峰达8~12 kg/d,

波谷受当日水热状况的影响,普遍接近0。就季节而言,早春季节液流快速爬升,春夏之交的5—6月达到较高的水平,夏季有轻微的下降。结合2014和2015年九寨沟的降水情况可以看出年际波动的相似趋势,秋季达到一年中的最高值11.28 kg/d,随后快速下降,冬季又稳定在比较低的水平。

如图3所示,九寨沟地区的油松液流在年内呈现双峰状态。可以看出,月液流量在每年的6月与7月间出现一个极小值波谷,在其前后形成两个液流量的波峰,最高月均液流量可达213.05 kg(2014年7月)。不同年份间由于水热条件的差别会有显著的差异,2013年的最高值可达393.13 kg(8月),是2014年的180%。相对而言,在同纬度平原丘陵区,如秦岭地区的油松生长季(5—10月),随着气温的先升后降,油松的月均液流速度呈单峰状态,最高液流速率可达41 cm/h(8月)^[10]。这样的液流双峰构成油松季节耗水在九寨沟海拔2000 m左右亚高山

地区的变化特征^[13]。

2.2 不同深度、不同温度范围的土壤对油松树干液流启动与停止的影响

温度(气温或土壤温度)是启动或停止树干液流的主导因素,而在生长季,土壤温度对油松树干液流无影响。徐军亮等^[2]对北方油松的研究表明,夏秋季土壤温度与油松树干液流的相关性较弱,但早春季节相关性较强,因而需进一步探讨气温或土壤温度对九寨沟地区树干液流的启动或停止的作用。

气温部分地影响树干液流的瞬时变动性,大多数研究者认为,与土壤温度相比,气温对树干液流的启动与停止以及液流强度影响更大。所以,在分析土壤温度的影响时,应剔除当前气温的影响。

根据图4,土壤温度在较短的时间内成为树干液流的限制因素,在一定的时段内成为九寨沟亚高山油松种群液流状况的主要控制因素。下面讨论油松树干液流的启动时间以及气温与土壤温度的控制。

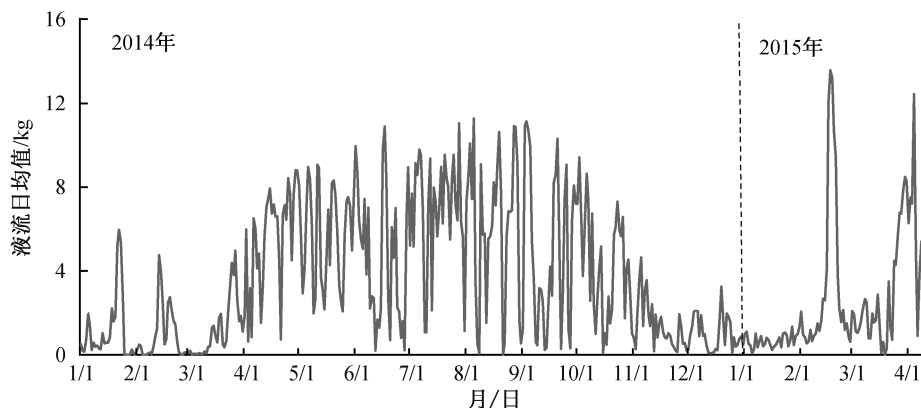


图2 2014—2015年油松树干液流日均值

Fig. 2 Daily mean value changes of sap flow of *P. tabulaeformis* in 2014–2015

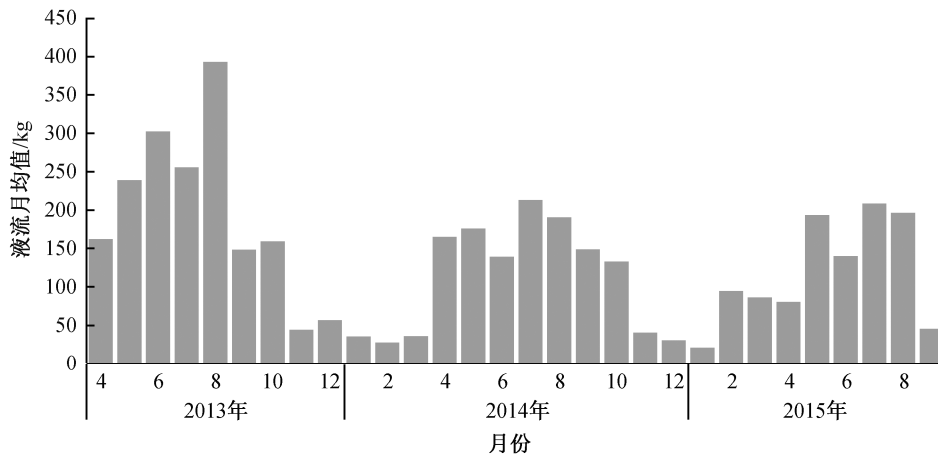


图3 2013年4月—2015年9月油松树干液流月均值

Fig. 3 Monthly mean value of sap flow in *P. tabulaeformis* from April 2013 to September 2015

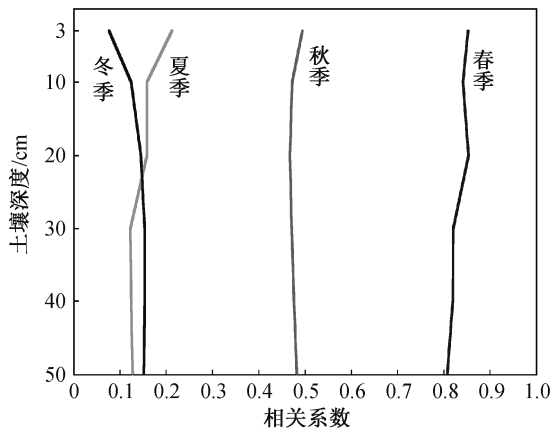


图4 油松树干液流密度与各季节土层温度间相关系数与土壤深度的关系

Fig. 4 Correlation depth curves of sap flow density in *P. tabulaeformis* and soil temperature in different seasons

不同季节3、10、20、30、40和50 cm土层深度的土壤温度与油松树干液流密度的关系如表1所示。可以看出,不同季节影响油松边材液流速率变化的土壤温度在深度上是有差异的。春、秋季,液流速率与表层(3 cm)土壤温度的相关性最显著,液流速率随着土壤温度的增加而增加,这种正相关效应随着土壤深度的增加而逐渐减弱。夏季,树干液流密度与不同土层温度均无显著关系。冬季,液流与不同土层温度的相关系数均小于0.2,因为土壤结冻,液流在不同深度处于比较微弱的状态。总体来说,在春、夏季,表层土壤温度均对树干液流活动有显著影响,秋、冬季影响不显著。

植物从温暖土壤中吸水比冷凉土壤中吸水更容易,所以根生长的最适土温为20~25℃。春季,表层土壤温度最高(比其他深度土层高0.75~2.24℃),最接近根系吸收水分和生长的最适温度,所以春季表层土壤温度对液流速率的影响最显著。夏、秋两季,土壤的平均温度都处于根系最适宜生长的温度范围,植物根系的主体分布范围(多在35 cm左右)

成为影响树木吸水量的主要因素。油松为深根性树种,所以可以从深层土壤中吸取更多的水分。秋季,随着太阳辐射对表层土壤增温作用的减弱,最适宜植物吸收水分的土壤深度逐渐上移至10~20 cm。图5展示春季不同深度土壤温度随树干液流强度的变化趋势。从表1可以看出,在春季土壤解冻时期,3 cm深度(表层)土壤温度对树干液流活动的影响最剧烈。因此,下面主要分析春季土壤温度与树干液流活动之间的关系。

对春季各深度传感器测得土壤温度的相关性以3℃为梯度进行分析,结果如表2所示。可以看出11.0~13.9℃的土壤与油松的树干液流强度相关性最强,为显著负相关,相关系数为-0.890。4.0~7.9℃土壤温度与液流强度正相关,且相关度最高(相关系数为0.401),在0.01的检验水平上显著相关。在所有梯度的土壤温度中,处于11.0~13.9℃的土壤样本最多(525个),高于13.9℃的土壤样本35个,说明春季九寨沟土壤主要在14℃左右,比较温暖。

图6展示对气温和土壤传感器2014全年的数据统计结果。可以看出,春季表层土壤温度大于0℃的时间、气温稳定大于0℃的时间以及树干液流的启动时间有显著的同步性,4—11月液流处于高值范围的时段与土壤和气温的高值时段基本上相同。因此,研究液流与土壤温度和大气温度的相关性十分必要。

如图7所示,在不同地区,受到作物生长状况和土壤水分条件的影响,实际蒸散发与潜在蒸散发的关系有所不同。九寨沟地区的实际蒸散发ET受到潜在蒸散发量ET₀的控制,ET与ET₀的比值反映植物的生长状态和土壤的水分条件。

同一气温和土温条件下,潜在蒸散发值是一定的,3 cm深度土壤温度是影响实际蒸散发量的关键因素。早春季节,实际蒸发量与3 cm深度土壤温度的相关系数达到0.9,远远超过与同一时段气温的

表1 油松树干液流密度与气温及不同土层温度间的相关性
Table 1 Correlation coefficients between sap flux density of *P. tabulaeformis*, air temperature and soil temperatures of different soil depths

季节	AT	ST-3 cm	ST-10 cm	ST-20 cm	ST-30 cm	ST-40 cm	ST-50 cm
春季	0.845**	0.852**	0.841**	0.825**	0.820**	0.819**	0.817**
夏季	0.460**	0.212*	0.158	0.129	0.122	0.124	0.127
秋季	0.590**	0.494**	0.472**	0.467**	0.471**	0.476**	0.482**
冬季	0.251	0.076	0.124	0.145	0.153	0.153	0.151

说明:** $\alpha < 0.01$, * $\alpha < 0.05$, AT表示空气温度,ST表示土壤温度。

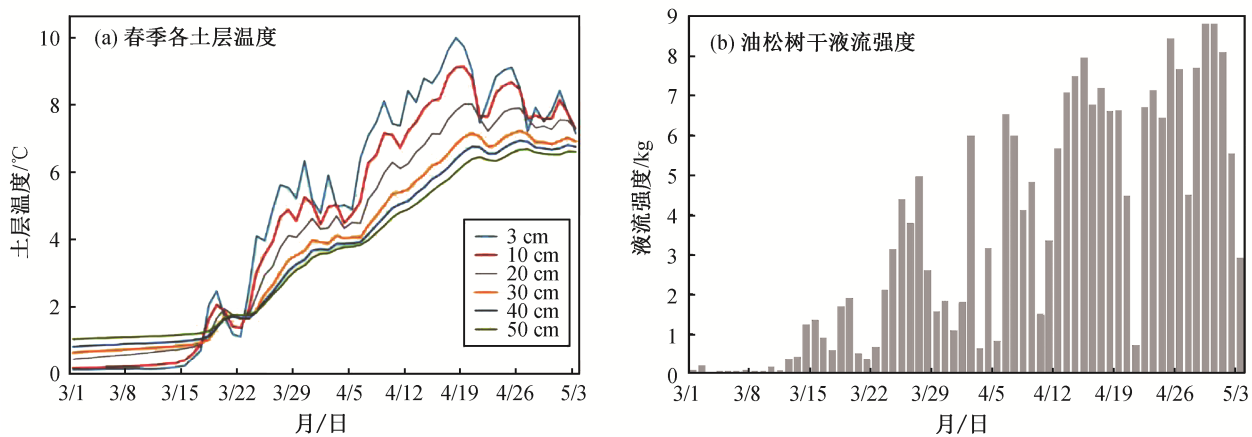


图 5 春季各土层温度与树干液流强度对比
 Fig. 5 Comparison of the temperature of the soil layers in the spring and the intensity of the sap flow of *P. tabulaeformis* at the same time

表 2 油松树干液流密度与不同土层温度梯度间的相关性和样本量

Table 2 Correlation and sample size of sap flow density in *P. tabulaeformis* with different soil temperature gradients

土壤温度梯度/°C	样本量	相关系数	显著性水平	土壤温度梯度/°C	样本量	相关系数	显著性水平
-2.0~0.9	388	-0.183**	0.01	8.0~10.9	444	0.370	
1.0~3.9	303	0.266**	0.01	11.0~13.9	525	-0.890*	0.05
4.0~7.9	482	0.401**	0.01	14.0~16.9	35	0.120	

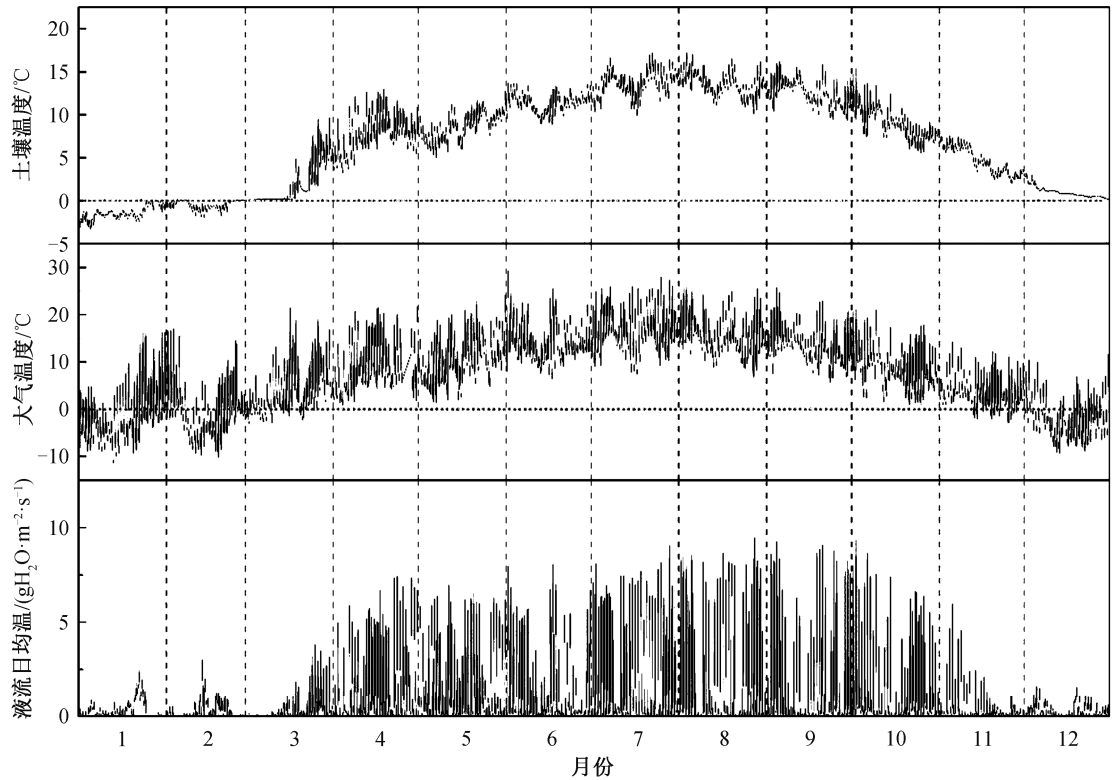


图 6 2014 年全年土壤、大气温度和树干液流日均值
 Fig. 6 Daily mean value of soil, atmospheric temperature and sap flow in 2014

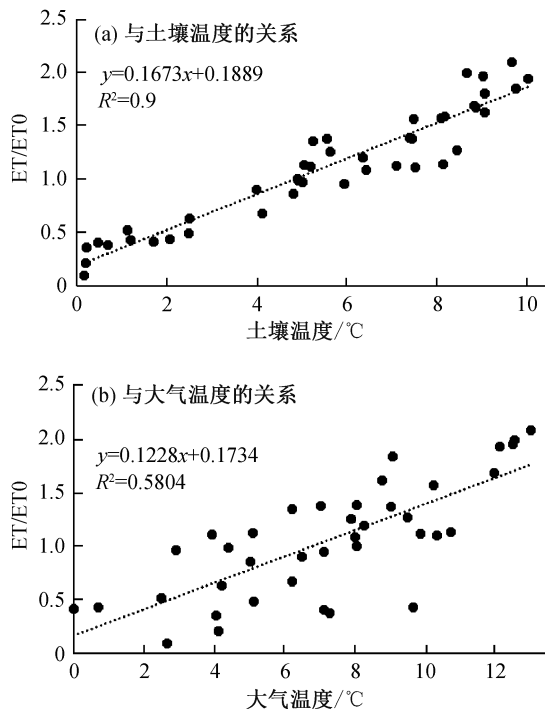


图7 ET/ET0与土壤温度和大气温度的关系

Fig. 7 Relationship between ET/ET0 and soil/air temperature

相关系数0.58。因此,3—5月林下土壤温度对油松树种的早春径流启动有较大的影响,控制了树木的蒸腾作用和液流强度,气温的影响则较弱。其机理与土壤温度在初春季节对土壤内部水分的控制有关,土壤温度直接作用于近地面冰雪消融和土壤解冻,塑造九寨沟亚高山油松的林下水分供给环境,从而影响早春时节油松林的水分供给量。

2.3 油松蒸腾耗水与早春径流变化

森林系统的水量平衡方程^[17]为

$$P = ET + R + \Delta W, \quad (4)$$

其中, P 为森林区域降水量,ET为森林蒸散量, R 为

径流量, ΔW 为土壤储水量变化。

2014年4月,九寨沟流域降水量为69.94 mm。虽然降水量比3月的32.23 mm增长117%,但径流量比3月下降4%,到达一年的最小值5.82 m³/s。依据已有的两年树干液流观测数据(图8),油松树干液流在2014年3月中旬启动,3月底达到较高的水平,4月单株油松树干液流量达165.22 kg,是3月此株油松的液流总量(36.24 kg)的4.55倍。作为九寨沟乔木的优势树种,油松树干液流的全面启动使得植被蒸腾作用形成的蒸散发项在4月份对九寨沟水量平衡中流入项的消耗明显,从而导致径流项总量的减少。

基于全球气温变暖的大趋势,土壤温度高于0℃的时间可能提前。由此导致的油松树干液流启动提前,油松维持高耗水量时间增加,使得早春乃至雨季径流枯竭更加严重,可能造成区域的早春干旱现象。

3 结论

本文利用TDP技术,在2013—2015年对九寨沟地区次生优势树种油松进行连续观测,发现油松树干液流日均值在3—4月从比较低的水平开始启动,快速提高至波峰值8~12 kg/d,秋季达到一年中的最高值(2014年为11.28 kg);树干液流的月均值受年际水热差异的影响,不同年份间差异可达180%以上,年内呈现出双峰状态,在6月与7月间出现一个极小值波谷,在其前后形成两个液流量的波峰。2014年月均树干液流量最大值为213.05 kg。

春季九寨沟浅层土壤温度高出其他深度土层0.75~2.24℃,最接近植物根部吸水的最适温度,油松与春季根部3~50 cm深度土层温度的相关系数>0.8;春秋两季土壤温度与油松树干液流强度的

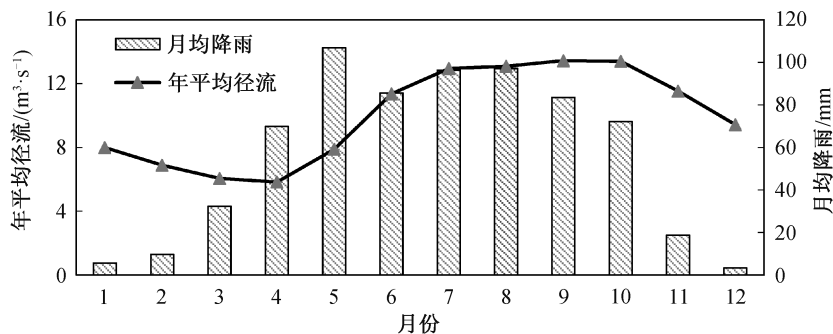


图8 2014年九寨沟全年月降雨径流

Fig. 8 Monthly rainfall map of Jiuzhai Valley in 2014

相关性较强,其中3 cm深度的表层土壤相关性均最强,分别为0.852和0.494;春、夏、秋季表层土向深层土过渡,对液流的影响逐渐减小,冬季则相反,体现表层土壤温度的较大变化。

对春季土壤温度进行梯度分析可知,11.0~13.9℃时,土壤与油松树干液流强度的相关性最强,但显著负相关,相关系数为-0.890。4.0~7.9℃时,土壤温度与液流强度正相关度最高,相关系数为0.401,体现出九寨沟地区油松树种根部吸水比较适宜的温度为4.0~7.09℃,并且受过高温度的影响。

早春季节土壤温度对土壤水分的影响显著,影响油松的蒸散发状况,而同一时段气温的影响不大。4月的观测降水量比3月增加117%,径流量减少4%。根据水量平衡原理,植被蒸腾总量的增加对其有重要影响。九寨沟地区优势树种油松的树干液流启动时间较早,4月已达到较高水平,加剧了区域早春径流的衰竭和春季干旱的发生。

参考文献

- [1] 孙鹏森,马履一,王小平,等.油松树干液流的时空变异性研究.北京林业大学学报,2000,22(5): 1-6
- [2] 徐军亮,马履一,阎海平.油松树干液流进程与太阳辐射的关系.中国水土保持科学,2006,4(2): 103-107
- [3] 殷秀辉,程飞,张硕新.油松树干液流特征及其与环境因子的关系.西北林学院学报,2011,26(5): 24-28
- [4] 王华田,马履一,徐军亮.油松人工林SPAC水势梯度时空变化规律及其对边材液流传输的影响.植物生态学报,2004,28(5): 637-643
- [5] 徐军亮,马履一.土壤温度对油松(*Pinus tabulaeformis*)树干液流活动的影响.生态学报,2008,28(12): 6107-6112.
- [6] 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.生态学报,2005,25(9): 2145-2151
- [7] 徐利岗,苗正伟,杜历,等.干旱区枸杞树干液流变化特征及其影响因素.生态学报,2016,36(17): 5519-5527
- [8] 赵春彦,司建华,冯起,等.胡杨(*Populus euphratica*)树干液流特征及其与环境因子的关系.中国沙漠,2014,34(3): 718-724
- [9] 胡伟,杜峰,徐学选,等.黄土丘陵区刺槐树干液流动态分析.应用生态学报,2010,21(6): 1367-1373
- [10] Yan Chunhua, Zhao Wenli, Wang, Yue, et al. Effects of forest evapotranspiration on soil water budget and energy flux partitioning in a subalpine valley of China. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 246: 207-217
- [11] 周长艳,彭俊,李跃清.九寨沟、黄龙地区水资源的变化特征及成因分析.资源科学,2007,29(2): 60-67
- [12] Hao Y, Wang J, Jiang H. The dynamics of land cover change pattern and landscape fragmentation in Jiuzhaigou Nature Reserve, China // Remote Sensing and GIS Data Processing and Other Applications. Yichang, 2009: doi: 10.1117/12.830050
- [13] Dai X, Yang D, Tang J. Analysis of landscape spatial pattern changes using remote sensing in Jiuzhaigou Valley, Northwestern Sichuan Province, China // 2010 International Conference on Multimedia Technology. Ningbo, 2010: 1-4
- [14] Oishi A C, Oren R, Stoy P C. Estimating components of forest evapotranspiration: a footprint approach for scaling sap flux measurements. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(11): 1719-1732
- [15] Yan Chunhua, Wang Bei, Zhang Yang, et al. Responses of sap flow of deciduous and conifer trees to soil drying in a subalpine forest. Forests, 2018, 9(1): no. 32
- [16] 庞学勇,包维楷,江元明.九寨沟和黄龙自然保护区原始林与次生林土壤物理性质比较.应用与环境生物学报,2009,15(6): 768-773
- [17] 朱劲伟,崔启武,史继德,等.红松林和采伐迹地的水量平衡分析.生态学报,1982,2(4): 335-344