

DOI:10.13759/j.cnki.dlxb.2018.05.005

兴安落叶松树干液流与太阳辐射的时滞效应¹⁾

田原 张秋良 刘璇

(内蒙古农业大学,呼和浩特,010020)

张永亮

(内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外观测研究站)

摘要 为了系统研究大兴安岭地区兴安落叶松树干液流与太阳辐射的时滞效应,采用热扩散技术测定树干液流,使用自动气象仪器测定辐射因子,利用逐行错位分析及相关分析法,分析兴安落叶松树干液流日变化和时期变化对总辐射(GR)、净辐射(Rn)、光合有效辐射(PAR)的时滞效应。结果表明:树干液流日变化对GR、Rn、PAR的响应不是同步进行,响应存在140~150 min的时滞,时滞效应显著;树干液流与Rn的相关性最好($R^2=0.465$),时滞最短(滞后140 min);生长季树干液流变化与GR的相关性高于Rn、PAR,树干液流与GR、Rn、PAR的时滞性的相关性不显著;树干液流对Rn的响应存在时滞,树干液流时期变化与太阳辐射的时滞效应的相关性不显著。

关键词 树干液流;热扩散法;太阳辐射;时滞效应;兴安落叶松
分类号 S715.2

Time Lag Effect between Stem Sap Flow and Solar Radiation in Larch//Tian Yuan, Zhang Qiuliang, Liu Xuan (Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010020, P. R. China); Zhang Yongliang (Inner Mongolia Greater Khingan Ecological Station of Forest) //Journal of Northeast Forestry University 2018, 46(5): 23-26.

In order to systematically study the time lag effect of daily and period between stem sap flow and solar radiation including general radiation (GR), net radiation (Rn) and photosynthetic active radiation (PAR) in Larch forest of the Greater Khingan Mountains, we analyzed the data which include stem sap flow based on the measurement of the technology of thermal dissipation and radiation factors measured by the instrumentation of automatic meteorological station based on the cross-correlation and correlation analysis. It was not synchronous to the daily change of stem sap flow and solar radiation which include GR, Rn and PAR, which had a significant lag effect for about 140-50 min in response. Stem sap flow had the best correlation ($R^2=0.465$) and the minimum time delay (lagged for 140 min) with Rn in the daily change. The correlation of stem sap flow and solar radiation indicated that GR had a higher correlation than Rn or PAR, and the time lag of them was not significant in period change of growth season. There was a time lag effect between stem sap flow and Rn in daily change, and there was not a significant time lag effect between stem sap flow and solar radiation in period change.

Keywords Stem sap flow; TDP (thermal dissipation); Radiation; Time Lag; *Larix gmelini* Rupr.

树干液流是测算树木单株耗水量的重要指标,也是土壤-植物-大气系统(SPAC)水循环的关键通道。兴安落叶松(*Larix gmelini* Rupr.)是大兴安岭地区的建群树种,兴安落叶松树干液流对太阳辐射的响应及时滞的研究已经取得许多成果^[1-6]。但是这些研究成果中,树干液流对太阳辐射的响应有不同观点,对总辐射(GR)、净辐射(Rn)、光合有效辐射(PAR)作为树干液流驱动因子的报道皆有出现,比较树干液流响应不同辐射因子的文献较少,考虑树干液流日变化、时期变化对太阳辐射时滞的报道更为稀少。本文依托内蒙古大兴安岭森林国家野外科学观测站,于2017年6—10月对兴安落叶松树干液流及相关太阳辐射进行测定,探讨兴安落叶松树干液流日变化、时期变化对太阳辐射的时滞效应,为探讨森林生态系统的水分运移规律提供理论支持。

1 研究区概况

研究区位于内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测站内,该区属于寒温带湿润气候区,平均海拔976.5 m,年均气温-5.4℃,年均日照时间2 594 h,活动温度总和1 403℃,结冻期210 d以上,年均降水量500 mm,主要集中在6—9月^[7]。该区森林覆盖率为75%,乔木以兴安落叶松为主,伴生白桦、山杨等。植被5月中旬开始生长,7—8月份为兴安落叶松主要的生长时期,9月中旬开始凋落枯萎进入生长末期^[8]。该区是我国多年冻土的主要发育地之一,兴安落叶松林与冻土共同维系着寒温带针叶林冷湿的环境条件。

2 研究方法

2.1 数据采集

在兴安落叶松天然林内设立一块25 m×25 m样地,并对样地进行基本信息调查。样地海拔为845.1~853.8 m,南北坡度为4°,东西坡度为1°,树种组成为兴安落叶松纯林,共86株,平均胸径19.6 cm,平均树高16.6 m。

采用样地附近的气象通量观测塔进行辐射因子

1) “十三五”国家重点研发计划(2017YFC0504003)。

第一作者简介:田原,男,1990年12月生,内蒙古农业大学林学院,博士研究生。E-mail: 151494268@qq.com。

通信作者:张秋良,内蒙古农业大学林学院,教授。E-mail: 18686028468@163.com。

收稿日期:2017年12月11日。

责任编辑:王广建。

的测定,仪器均为 Campbell 公司生产。总辐射 (GR)、净辐射 (Rn)、光合有效辐射 (PAR) 的观测仪器分别为 CM11、CNR-1、PAR-LITE; CR6 数据采集器对每半小时获取的 10 Hz/s 采样数据进行记录。

应用 Granier 热扩散法^[9]测定兴安落叶松树干液流。根据林分平均胸径,选取长势良好、无结疤的树木进行测量。传感器安装在树干 1.5 m 高处,面朝北面,传感器外部包覆铝质泡沫膜,避免传感器受到降水、太阳辐射的影响。CR1000 数据采集器每 10 min 对数据记录 1 次。

径流密度: $U = 0.714 \times [(\Delta T_{\max} - \Delta T) / \Delta T]^{1.231}$ 。式中: U 为径流密度; ΔT 为两根探针间的温度差值; ΔT_{\max} 为每天夜间温差的极大值。

树干液流: $F = U \times S_A$ 。式中: F 为径流量; U 为径流密度; S_A 为边材面积。

2.2 数据统计与处理

由于当地特殊的地理环境,兴安落叶松生长季天亮时间为凌晨 4 点左右,以每日 03:00—17:00 点作为树干液流的白昼时段,其它时间为夜晚。按观测时间顺序,建立白昼液流密度与不同辐射的数据列,按 10 min 尺度进行逐行错位分析,并采用相关分析法进行线性方程、二次函数、三次函数、幂函数

的拟合,当调整系数 (R^2) 达到最大值时,对应的错位时间即为树干液流密度的时滞时间。

采用 SPSS 13.0 进行数据相关性分析,采用 Origin 8.0 进行制图。

3 结果与分析

3.1 兴安落叶松林树干液流日变化特征

7—9 月份,每月选取 3 个连续晴天对兴安落叶松树干液流密度与太阳辐射进行对比(见图 1)。由图 1 可知,兴安落叶松树干液流密度日变化具有明显的昼夜变化特征,与 GR、Rn、PAR 的日变化并不同步。树木蒸腾对 GR、Rn、PAR 的响应作用于树冠层,树冠蒸腾到蒸腾拉力使树干液流上升的过程产生了时滞。一天中,树干液流密度的启动时间比 GR、Rn、PAR 滞后 2.0~3.5 h,峰值滞后 0.5~3.0 h,结束时间滞后 3~10 h。每日树干液流峰值随 GR、Rn、PAR 变化不明显,中午高温炎热,兴安落叶松具有光合午休现象,气孔关闭降低了针叶的蒸散量,从而使树干液流密度的变化趋于稳定。树干液流密度日变化对 GR、Rn、PAR 持续的较大波动响应明显,树干液流密度变化幅度低于 GR、Rn、PAR,这是由于树干液流响应了饱和水汽压差 (VPD) 的变化。

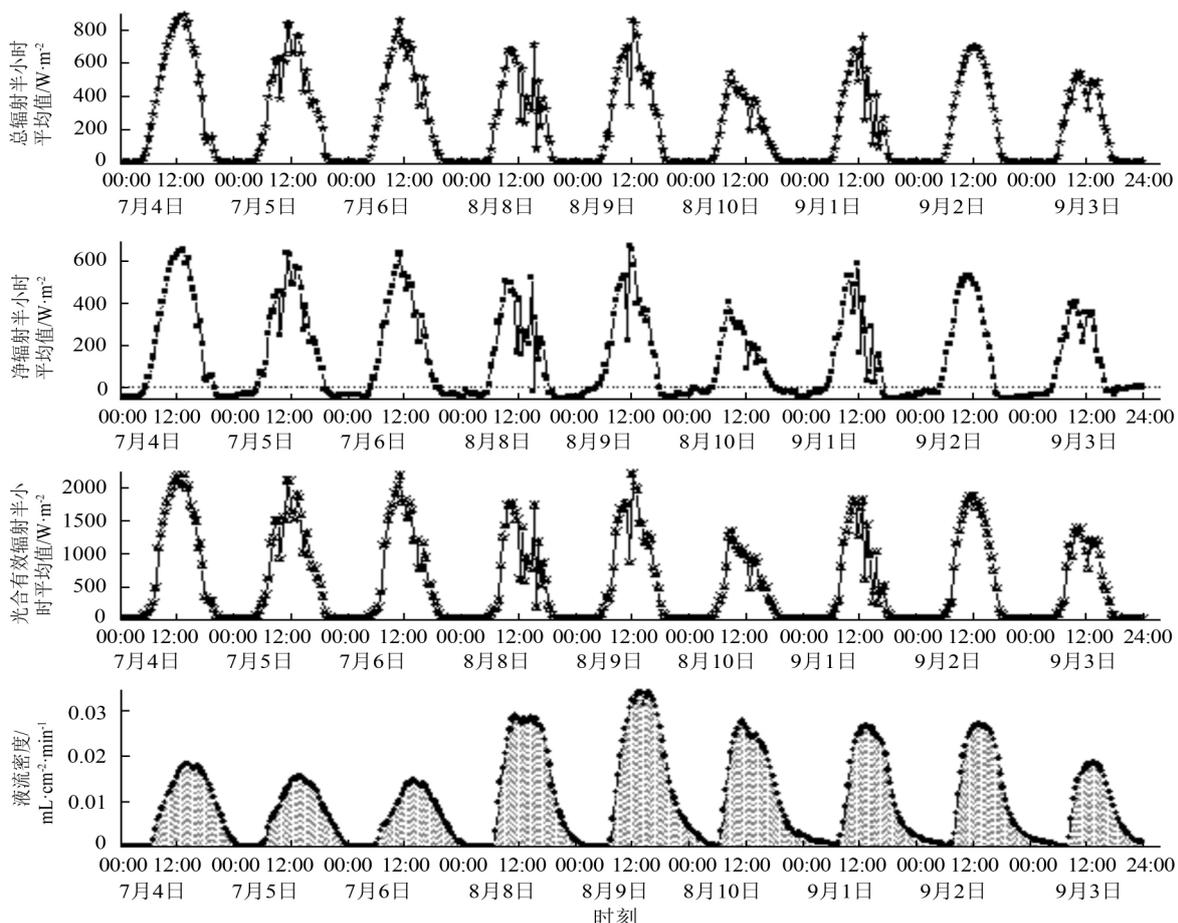


图 1 兴安落叶松林树干液流密度与太阳辐射连续日变化

3.2 兴安落叶松林树干液流日变化对辐射响应的时滞性

采用错位分析法分别进行树干液流密度日变化随着 GR、Rn、PAR 变化的拟合(见表 1)。由表 1 可知,线性方程的拟合程度较差,三次、二次函数的拟合程度仅次于幂函数,二者时滞时间与相关系数均呈单峰曲线。幂函数拟合有两个峰值,滞后 60 min

时出现一个低峰,滞后 140、150 min 出现高峰,随后拟合相关系数持续下降,树干液流对 Rn 的时滞为 140 min,对 GR、PAR 的时滞为 150 min。

不同拟合均以幂函数的拟合相关系数最高,树干液流密度和 Rn 拟合相关系数最高,拟合程度较好,树干液流对 Rn 时滞性稍低于对 GR、PAR 的时滞性(见表 2)。

表 1 兴安落叶松树干液流与太阳辐射相关性分析的 R² 值

| 时滞/ min | 净辐射 | | | | 总辐射 | | | | 光合有效辐射 | | | |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| | 线性方程 | 二次函数 | 三次函数 | 幂函数 | 线性方程 | 二次函数 | 三次函数 | 幂函数 | 线性方程 | 二次函数 | 三次函数 | 幂函数 |
| -60 | 0.005 | 0.008 | 0.040 | 0.039 | 0.004 | 0.012 | 0.050 | 0.042 | 0.003 | 0.034 | 0.092 | 0.072 |
| -50 | 0.001 | 0.003 | 0.026 | 0.042 | 0.001 | 0.006 | 0.034 | 0.044 | 0 | 0.029 | 0.076 | 0.085 |
| -40 | 0 | 0.002 | 0.023 | 0.056 | 0 | 0.006 | 0.034 | 0.057 | 0.001 | 0.038 | 0.096 | 0.116 |
| -30 | 0.001 | 0.007 | 0.030 | 0.091 | 0.001 | 0.011 | 0.041 | 0.093 | 0.003 | 0.045 | 0.102 | 0.153 |
| -20 | 0.007 | 0.012 | 0.023 | 0.092 | 0.004 | 0.012 | 0.029 | 0.090 | 0.012 | 0.057 | 0.107 | 0.178 |
| -10 | 0.013 | 0.018 | 0.028 | 0.112 | 0.008 | 0.017 | 0.032 | 0.107 | 0.016 | 0.057 | 0.104 | 0.176 |
| 0 | 0.020 | 0.030 | 0.040 | 0.149 | 0.014 | 0.029 | 0.044 | 0.144 | 0.023 | 0.068 | 0.111 | 0.202 |
| 10 | 0.036 | 0.047 | 0.051 | 0.148 | 0.026 | 0.040 | 0.045 | 0.141 | 0.044 | 0.096 | 0.133 | 0.237 |
| 20 | 0.047 | 0.058 | 0.061 | 0.167 | 0.034 | 0.048 | 0.051 | 0.154 | 0.055 | 0.104 | 0.131 | 0.234 |
| 30 | 0.058 | 0.076 | 0.080 | 0.233 | 0.044 | 0.066 | 0.071 | 0.212 | 0.065 | 0.119 | 0.145 | 0.265 |
| 40 | 0.093 | 0.124 | 0.128 | 0.295 | 0.076 | 0.111 | 0.114 | 0.257 | 0.104 | 0.178 | 0.205 | 0.336 |
| 50 | 0.108 | 0.141 | 0.143 | 0.324 | 0.088 | 0.126 | 0.127 | 0.267 | 0.124 | 0.204 | 0.228 | 0.358 |
| 60 | 0.116 | 0.153 | 0.155 | 0.353 | 0.095 | 0.137 | 0.138 | 0.290 | 0.132 | 0.216 | 0.236 | 0.358 |
| 70 | 0.152 | 0.204 | 0.206 | 0.396 | 0.129 | 0.188 | 0.189 | 0.325 | 0.170 | 0.268 | 0.288 | 0.388 |
| 80 | 0.156 | 0.205 | 0.206 | 0.273 | 0.129 | 0.184 | 0.184 | 0.228 | 0.174 | 0.267 | 0.281 | 0.318 |
| 90 | 0.168 | 0.224 | 0.224 | 0.287 | 0.139 | 0.202 | 0.202 | 0.242 | 0.187 | 0.283 | 0.295 | 0.339 |
| 100 | 0.192 | 0.258 | 0.259 | 0.273 | 0.163 | 0.238 | 0.238 | 0.266 | 0.210 | 0.312 | 0.322 | 0.330 |
| 110 | 0.213 | 0.290 | 0.291 | 0.293 | 0.185 | 0.272 | 0.272 | 0.303 | 0.231 | 0.338 | 0.346 | 0.347 |
| 120 | 0.221 | 0.304 | 0.304 | 0.323 | 0.191 | 0.285 | 0.285 | 0.323 | 0.237 | 0.346 | 0.351 | 0.377 |
| 130 | 0.244 | 0.339 | 0.340 | 0.396 | 0.216 | 0.322 | 0.322 | 0.398 | 0.258 | 0.369 | 0.374 | 0.402 |
| 140 | 0.262 | 0.364 | 0.366 | 0.461 | 0.235 | 0.350 | 0.350 | 0.454 | 0.274 | 0.385 | 0.389 | 0.439 |
| 150 | 0.259 | 0.365 | 0.366 | 0.465 | 0.232 | 0.349 | 0.349 | 0.453 | 0.269 | 0.378 | 0.380 | 0.453 |
| 160 | 0.259 | 0.361 | 0.362 | 0.454 | 0.230 | 0.343 | 0.343 | 0.437 | 0.266 | 0.362 | 0.363 | 0.441 |
| 170 | 0.254 | 0.352 | 0.353 | 0.432 | 0.225 | 0.332 | 0.332 | 0.408 | 0.257 | 0.344 | 0.344 | 0.417 |
| 180 | 0.244 | 0.339 | 0.339 | 0.401 | 0.214 | 0.317 | 0.317 | 0.373 | 0.244 | 0.323 | 0.323 | 0.383 |
| 190 | 0.234 | 0.321 | 0.321 | 0.360 | 0.203 | 0.296 | 0.298 | 0.334 | 0.231 | 0.296 | 0.297 | 0.342 |
| 200 | 0.224 | 0.301 | 0.301 | 0.319 | 0.193 | 0.276 | 0.278 | 0.295 | 0.219 | 0.271 | 0.273 | 0.301 |
| 210 | 0.209 | 0.279 | 0.279 | 0.282 | 0.178 | 0.252 | 0.255 | 0.261 | 0.201 | 0.244 | 0.248 | 0.263 |
| 220 | 0.195 | 0.256 | 0.256 | 0.247 | 0.164 | 0.228 | 0.233 | 0.230 | 0.185 | 0.218 | 0.225 | 0.230 |
| 230 | 0.178 | 0.232 | 0.232 | 0.218 | 0.149 | 0.204 | 0.210 | 0.203 | 0.168 | 0.192 | 0.202 | 0.199 |
| 240 | 0.163 | 0.210 | 0.210 | 0.193 | 0.134 | 0.182 | 0.189 | 0.180 | 0.151 | 0.169 | 0.182 | 0.175 |

表 2 兴安落叶松树干液流随太阳辐射变化的曲线拟合

| 拟合因子 | 时滞/min | 拟合方程 | R ² | P |
|--------------|--------|------------------------------|----------------|-------|
| 总辐射(GR) | 150 | $F = 0.00018x_{GR}^{0.742}$ | 0.454 | <0.01 |
| 净辐射(Rn) | 140 | $F = 0.0018x_{Rn}^{0.401}$ | 0.465 | <0.01 |
| 光合有效辐射(PAR) | 150 | $F = 0.00052x_{PAR}^{0.509}$ | 0.453 | <0.01 |

注:表中 F 树干液流, x_{GR} 表示太阳总辐射量, x_{Rn} 表示太阳净辐射量, x_{PAR} 表示光合有效辐射量。

3.3 兴安落叶松林树干液流时期变化特征

由图 2 可知,树干液流量时期变化与 GR、Rn、PAR 对比,未发现直观的液流量随太阳辐射变化的

特征。进行相关分析后,发现日树干液流量与 GR、PAR 相关性为弱相关,均只能解释很少一部分树干液流量的变化。液流量与 GR、PAR 的 R² 分别为 0.059、0.043, Rn 与液流量相关性不显著 (P>0.05)。日尺度进行逐行错位分析和相关性分析发现,树干液流量与前后 3 天的 GR、Rn、PAR 的相关性均达不到显著性水平 (P>0.05)。树干液流量与 GR、Rn、PAR 无时滞效应。这可能是由于一天中的树干液流启动、高峰、结束时间都滞后于 GR、Rn、PAR,日尺度的统计消除了这种时滞效应。

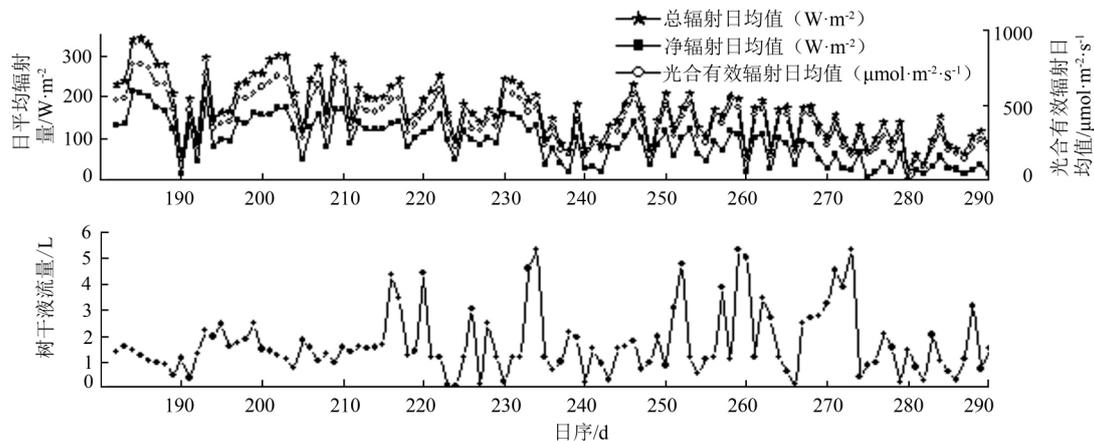


图 2 兴安落叶松林树干液流量时期变化

4 结论与讨论

兴安落叶松树干液流日变化响应 GR、Rn、PAR 的变化,采用 Rn 作为树干液流日变化的驱动因子进行研究取得了较好效果。赵春彦等^[10]、孙龙等^[11]、涂洁等^[12]、韩辉等^[13]、王华等^[14]的研究结果已经表明树干液流响应太阳辐射的变化,与本研究结果一致。王文杰等^[1]、池波等^[2]、王慧梅等^[3]等研究结果表明液流对 PAR 响应显著,刘家霖等^[4-5]研究结果表明液流对 Rn 响应显著,王翠等^[6]研究结果表明液流对 GR 响应显著。本研究表明兴安落叶松树干液流对 Rn 响应显著,Rn 拟合程度优于 GR、PAR; GR、Rn、PAR 是组间差异的显著因子,响应及时滞不同,但 GR、Rn、PAR 与树干液流拟合的相关系数基本相同。

树干液流日变化对 GR、Rn、PAR 的响应存在滞后效应,考虑时滞因素可以提升响应的相关性。徐丹丹等^[15]通过研究发现毛乌素沙地旱柳和小叶杨树干液流与 Rn 在小时尺度不存在时滞现象;徐军亮等^[16]认为油松树干液流与 GR 进行比较,在启动、高峰、停止时间进程特征量间表现出定量相关,与本研究结果不一致。原因是树干液流日变化对 GR、Rn、PAR 的响应是不同步进行的,响应存在 140~150 min 滞后,另一个原因是采用的方法不同。徐丹丹等^[15]只对 7 月份典型天气 1 d 的数据进行了直观比较分析,徐军亮等^[16]则采用了启动、峰值、结束时间进行了特征量定义,然后进行特征量的比较。王慧梅等^[3]研究结果表明兴安落叶松树干液流日变化相对 PAR 滞后 0.5~1.0 h,本研究结果得出滞后 150 min,造成该现象的原因是由于数据错位分析时,采用的时间间隔不一样(其采用 30 min 间隔,本论文采用的 10 min),另一个原因是所采用的兴安落叶松林的林分起源不同。

树干液流量生长季的变化与 GR 的相关性高于

Rn、PAR,树干液流量与 GR、Rn、PAR 的时滞效应不显著。李雯雯等^[17]研究结果表明日尺度液流变化与环境因子的响应不存在时滞情况,与本研究结果一致。池波等^[2]研究结果表明兴安落叶松树干液流主要响应因子为太阳辐射与饱和水汽压差(VPD)。本研究在日尺度的树干液流量对太阳辐射的响应并没有剔除饱和水汽压差(VPD),液流量对饱和水汽压差(VPD)响应剔除后,树干液流对于太阳辐射的响应是否存在时滞性有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 王文杰,孙伟,邱岭,等.不同时间尺度下兴安落叶松树干液流密度与环境因子的关系[J].林业科学,2012,48(1):77-85.
- [2] 池波,蔡体久,满秀玲,等.大兴安岭北部兴安落叶松树干液流规律及影响因子分析[J].北京林业大学学报,2013,35(4):21-26.
- [3] 王慧梅,孙伟,祖元刚,等.不同环境因子对兴安落叶松树干液流的时滞效应复杂性及其综合影响[J].应用生态学报,2011,22(12):3109-3116.
- [4] 刘家霖,满秀玲,胡悦.兴安落叶松天然林不同分化等级林木树干液流对综合环境因子的响应[J].林业科学研究,2016,29(5):726-734.
- [5] 刘家霖,满秀玲.降雨和非降雨日兴安落叶松天然林蒸腾及蒸散发特征[J].生态学报,2017,37(15):5059-5069.
- [6] 王翠,王传宽,孙慧珍,等.移栽自不同纬度的兴安落叶松(*Larix gmelinii* Rupr.)的树干液流特征[J].生态学报,2008,28(1):136-144.
- [7] 张秋良,王立明.内蒙古大兴安岭森林生态系统研究[M].北京:中国林业出版社,2014.
- [8] 田原,张秋良,巴特,等.兴安落叶松林生长季土壤水势动态特征[J].Advance in Forestry Research,2016,4:14-22.
- [9] GRANIER A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology,1988,3(4):309-320.
- [10] 赵春彦,司建华,鱼腾飞,等.胡杨树干液流进程与太阳辐射的关系[J].干旱区资源与环境,2015,29(5):99-104.
- [11] 孙龙,王传宽,杨国亭,等.生长季红松树干液流密度的特征[J].东北林业大学学报,2006,34(1):12-14.
- [12] 涂洁,刘琪璟,王辉民,等.亚热带红壤区青冈栎液流特征及其与气象因子的相关性[J].东北林业大学学报,2013,41(9):38-41,49.
- [13] 韩辉,白雪峰,徐贵军,等.章古台樟子松树干液流的密度特征[J].东北林业大学学报,2013,41(4):27-31,82.
- [14] 王华,赵平,蔡锡安,等.马占相思树干液流与光合有效辐射和水汽压亏缺的时滞效应[J].应用生态学报,2008,19(2):225-230.
- [15] 徐丹丹,伊立河,侯光才,等.毛乌素沙地旱柳和小叶杨树干液流密度及其与气象因子的关系[J].干旱区研究,2017,34(2):375-382.
- [16] 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[J].中国水土保持科学,2006,4(2):103-107.
- [17] 李雯雯,徐业勇,魏雅君,等.干旱区杏李树干液流时滞特征研究[J].经济林研究,2017,35(2):138-144.