

DOI: 10.5846/stxb201504160781

王亚蕊, 王彦辉, 于澎涛, 熊伟, 杜阿朋, 李振华, 刘泽彬, 任璐, 徐丽宏, 左海军. 华北落叶松人工林蒸散及产流对叶面积指数变化的响应. 生态学报, 2016, 36(21): - .

Wang Y R, Wang Y H, Yu P T, Xiong W, Du A P, Li Z H, Liu Z B, Ren L, Xu L H, Zuo H J. Simulated responses of evapotranspiration and runoff to changes in the leaf area index of a *Larix principis-rupprechtii* plantation. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(21): - .

华北落叶松人工林蒸散及产流对叶面积指数变化的响应

王亚蕊¹, 王彦辉¹, 于澎涛¹, 熊伟^{1,*}, 杜阿朋², 李振华¹, 刘泽彬¹, 任璐³, 徐丽宏¹, 左海军¹

1 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

2 国家林业局桉树研究开发中心, 湛江 524022

3 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083

摘要: 定量评价林地蒸散和产流等水文过程对冠层叶面积指数(leaf area index, LAI)的响应, 对于深入认识森林植被的生态水文过程及其发生机制, 实现半干旱区林水综合管理和区域可持续发展是非常必要的。本文应用集总式生态水文模型 BROOK90, 模拟分析了不同降水年型(丰水年、平水年、枯水年)下, 位于半干旱区的宁夏六盘山叠叠沟小流域内华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)人工林的水文过程对冠层 LAI 变化的响应关系。结果发现: 林分总蒸散量、冠层截留量、蒸腾量与 LAI 都呈显著的正相关关系($R^2 > 0.99, P < 0.01$), 而土壤蒸发量、产流量则与 LAI 均呈显著的负相关关系($R^2 > 0.99, P < 0.01$); 在不同的降水年型下, 各水文过程变量与 LAI 的关系都可以很好地用指数函数来表达, 且都存在着一个 LAI 阈值。当 LAI 低于阈值时, 各水文过程变量随 LAI 的变化幅度较大; 但高于阈值时, 各变量的变化十分缓慢并趋于稳定。在不同降水年型下, 各变量 LAI 阈值之间存在着一定的差异。一般地, 丰水年各变量的 LAI 阈值要大于枯水年, 尤其是冠层截留和土壤蒸发。在丰水年, 各水文过程变量随 LAI 增加而变化的速率要比在平水年、枯水年更快, 说明在水分充足年份中各变量的波动更多取决于 LAI 变化, 而在水分亏缺的年份中则可能更多地受到水分条件的限制。模拟结果表明, 通过减少冠层 LAI(如间伐)导致的林分的降低蒸散耗水和增加产流的作用是有限的, 这是由于林分蒸散降低的幅度要比 LAI 降低的幅度小。例如, 在平水年, 当 LAI 从 4.2 变为 2.0(减少幅度 52.4%)时, 林分年蒸散仅从 357.2 mm 减少至 333.9 mm(减少幅度 6.5%)。

关键词: 半干旱地区; 华北落叶松; 蒸散; 产流; 叶面积指数; 阈值; BROOK90

Simulated responses of evapotranspiration and runoff to changes in the leaf area index of a *Larix principis-rupprechtii* plantation

WANG Yaru¹, WANG Yanhui¹, YU Pengtao¹, XIONG Wei^{1,*}, DU Apeng², LI Zhenhua¹, LIU Zebin¹, REN Lu³, XU Lihong¹, ZUO Haijun¹

1 Key Laboratory of Forestry Ecology and Environment of State Forestry Administration, The Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 China Eucalypt Research Centre, Zhanjiang 524022, China

3 College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: A quantitative evaluation of the effects of the leaf area index (LAI) of the forest canopy on evapotranspiration and runoff from a forest is necessary for a deeper understanding of eco-hydrological processes and their mechanisms, with

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2015BAD07B03-03); 国家自然科学基金(41230852, 41390461)

收稿日期: 2015-04-16; **网络出版日期:** 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xwcaf@163.com

the aim to achieve integrated management of forests and water resources and regional sustainable development in semi-arid regions. In this study, the lumped eco-hydrological BROOK90 model was used to simulate the responses of hydrological processes to varying canopy LAI of a *Larix principis-rupprechtii* plantation in the small semi-arid watershed of Diediegou, in the northern region of the Liupan Mountains in Ningxia, under various conditions of annual precipitation (wet, normal, and dry years). Annual evapotranspiration, annual canopy interception, and annual forest transpiration were all significantly positively correlated with the canopy LAI of the plantation ($R^2 > 0.99$, $P < 0.01$), while both annual soil evaporation and annual runoff were significantly negatively correlated with canopy LAI ($R^2 > 0.99$, $P < 0.01$). All hydrological processes that we studied varied with canopy LAI as exponential functions regardless of the annual precipitation in the year of study. The response of each variable to canopy LAI was associated with a threshold canopy LAI. When the canopy LAI was below this threshold, the change in each variable with respect to LAI was rapid; however, when the canopy LAI was above the threshold, the change in each variable was measurably slow, and gradually stabilized. Additionally, the thresholds for canopy LAI differed with differences in annual precipitation. In general, the thresholds of canopy LAI for the variables studied were higher in wet years than in dry years, especially for canopy interception and soil evaporation. For example, the threshold of canopy LAI for annual evapotranspiration was 1.6, 1.5, and 1.3 in wet, normal, and dry years, respectively; the threshold of canopy LAI for canopy interception in dry years (4.3) was significantly lower than that in wet (6.2) and normal years (6.4), and the threshold of canopy LAI for soil evaporation was distinctly higher in wet years (4.3) than in dry (3.1) and normal years (3.0). Moreover, the rates of change of each variable with increasing LAI were higher in wet years than in normal and dry years, indicating that change in each variable was more dependent on canopy LAI in wetter years, but more limited by insufficient precipitation and soil water in drier years. Meanwhile, our results indicated that the effects of the decrease in evapotranspiration and increase in water yield in a given forest stand caused by a reduction in canopy LAI (such as by thinning of the leaf canopy) are less than expected, because the decrease in the rate of annual evapotranspiration was smaller than the rate of decrease of canopy LAI. For example, when canopy LAI reduced from 4.2 to 2.0 (a relative reduction of 52.4%) in a normal year with an annual precipitation of 418.5 mm, the annual evapotranspiration decreased from 357.2 mm to 333.9 mm (an absolute reduction of 23.3 mm and a relative reduction of 6.5%). The results of this study can provide guidance to scientific forest management in semi-arid regions.

Key Words: semi-arid regions; *Larix principis-rupprechtii* plantation; evapotranspiration; runoff; leaf area index; threshold; BROOK90

森林植被在西北生态环境恢复与重建中发挥着举足轻重的作用,如涵养水源、保持水土、调洪削峰等调控功能^[1]。森林虽然可以通过林冠、枯落物及土壤各个层次对大气降水进行再分配从而有效地发挥其水源涵养功能^[2]。然而,作为陆地生态系统的主体,森林的生长与蒸散却不可避免地需要消耗大量的水分^[3],这会使林地产流量减少^[4],从而危及区域水安全和可持续发展^[5-8]。文献表明:不同密度人工林的水分消耗已经成为目前生态水文学研究中的一个热点问题^[9,10]。如熊伟^[11]对宁夏六盘山北侧华北落叶松人工林、山桃人工林、天然沙棘林的研究发现:由于间伐引起的林分密度下降不同程度地导致了典型林分总蒸散量及其分量组成比例的改变。又如 Giambelluca *et al.*^[12]对巴西塞拉多两个林分密度不同(2800 株/hm²和 1700 株/hm²)的样地的研究,发现密度较小的林分蒸散量小于或相似于密度较大的林分蒸散量,在干早期两者差异最大。究其本质,不同密度人工林耗水问题可以归纳为森林蒸散量、林地产流量与其叶面积指数(leaf area index, LAI)的关系问题。

目前,国内外关于森林蒸散量和 LAI 关系的研究结果不尽相同。根据 Testi *et al.*^[13]对西班牙南部的橄榄树(*Canarium album*)、Almeida *et al.*^[14]对巴西大西洋海岸的巨桉(*Eucalyptus grandis*)和 Gong *et al.*^[15]对我国西北半干旱地区苹果树(*Malus pumila*)的研究表明:森林蒸散与 LAI 两者之间呈现正相关的关系;然而,

Limpens *et al.*^[16]对荷兰泥炭地垂枝桦(*Betula pendula*)的研究发现:森林蒸散与 LAI 之间表现为明显的负相关关系。与此相类似,LAI 对蒸散各分量组成影响的研究结果也不一致。很多研究发现林冠层蒸腾量与 LAI 呈正相关关系^[17-21],如 Benyon *et al.*^[22]对澳大利亚东南部辐射松(*Pinus radiata*)和蓝桉(*Eucalyptus globulus* Labill.)的研究表明:林冠层蒸腾量与 LAI 两者之间呈正相关关系,并随 LAI 的增加趋势逐渐变缓。但也有研究^[23,24]认为蒸腾随 LAI 呈现为先增加后减小的趋势。一般认为,冠层截留量和 LAI 的关系是正相关关系^[25-27]。如 Limousin *et al.*^[28]对法国南部的冬青栎(*Quercus ilex*)进行研究发现,间伐样地(LAI 为 1.6)的冠层截留量比对照样地(LAI 为 3.1)的冠层截留量少了 34.6%。相反地,土壤蒸发量与 LAI 表现为显著地负相关关系^[29,30]。

已有研究认为:林地产流量与 LAI 两者之间表现为明显的负相关关系。张娜等^[31]运用景观尺度的生态系统生产力过程模型 EPPML 对长白山自然保护区林地地表径流量的季节动态进行了模拟,发现年地表径流量与年均 LAI 呈极显著地负相关指数关系。黄枝英^[32]通过对北京鹫峰国家森林公园境内山区刺槐林的生态水文研究发现,林地地表径流量与 LAI 也呈现为负相关关系。然而,赖格英等^[33]应用 SWAT 模型模拟了梅江流域植被变化导致的水文响应,发现年径流量随着 LAI 而增大。

在黄土高原等水资源匮乏地区^[34],森林生态系统十分脆弱^[35],造林和森林经营管理中存在许多诸如高密度造林、间伐不及时等的问题。定量评价林地蒸散和产流等水文指标对林分结构(LAI)的响应,对于实现该区林水综合管理、保障区域水安全和改善森林生态系统都是非常必要的。因此,本文采用集总式生态水文模型 BROOK90,通过林地水文过程变量与 LAI 的关系分析,来量化认识不同降水年型(丰水年、平水年、枯水年)下主要造林树种华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)人工林的水文响应,以期了解 LAI 对其林地蒸散及产流特征的影响,为该区人工林的科学管理与经营提供理论依据。

1 研究区概况

研究地点为位于黄土高原中西部的六盘山北侧半干旱区的叠叠沟小流域(106°4′55″—106°9′15″ E, 35°54′12″—35°58′33″ N),隶属宁夏回族自治区固原市。该小流域面积 25.4 km²,海拔 1975—2615 m,具典型大陆性季风气候,年均气温 6—7 °C,无霜期 130 天左右,降水量 432 mm,主要集中在 6—9 月份。植被分区在水平带上属于温带草原区的南部森林草原地带,是森林草原向典型草原的过渡区。乔木林主要是华北落叶松人工林和少量山杨(*Populus davidiana*)林,灌丛有虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、绣线菊(*Spiraea* sp.)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等。土壤类型以灰褐土为主,黄土次之。

在叠叠沟小流域下游,选择生长良好的华北落叶松人工林,建立了 1 个 30 m×30 m 的样地(35°58′18″ N, 106°08′50″ E)。该样地海拔 2041 m,位于阴坡(北偏西 30°)下部,坡度 11°,林分密度 1600 株/hm²,林龄 24 a,林冠郁闭度 0.72。林下灌木层不明显,盖度仅约 2%,生长有极少量沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、二色胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、高山绣线菊(*Spiraea alpina* Pall.)等。林下草本层发育相对较好,盖度达到 95%,主要有铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、茭蒿(*Artemisia giraldii*)、羽叶风毛菊(*Saussurea maximowiczii*)、白颖苔草(*Carex rigescens*)等。土层较厚,大于 2 m。

2 研究方法

2.1 BROOK90 模型构建与检验

本文运用的 BROOK90 是一个广泛应用于模拟、预测和评价森林植被影响蒸散、土壤水分和径流的集总式生态水文模型^[36]。该模型虽没有考虑水平方向的水文要素差异和模拟对象与相邻区域的水分交换,但它详细刻画了植被冠层截留、植物蒸腾、土壤和积雪的蒸发、地表和地下径流等垂直方向的水分运动与传输。该模型主要输入变量为气象数据(包括日辐射总量、日最高温度与最低温度、日平均水汽压、日平均风速和日降雨量等)和地形、土壤、植被、水文等参数;其输出变量则包括日、月、年等时间尺度上的蒸散量、径流量、土壤

含水量等系统水分平衡的各个分量,其中,月和年尺度的值是日尺度值的累加。BROOK90 对各分量具体计算如下。

1)冠层截留由降雨捕获率、截持雨的蒸发速率及冠层容量来计算,详见下式:

$$INTR/dt = RINT - IRVP \quad (1)$$

式中, $INTR$ 为冠层蓄水量(mm),实际上可以理解为冠层截留,其值不会大于冠层容量; $IRVP$ 为蒸发速率(mm/d); $RINT$ 为降雨捕获率(mm/d)。

2)冠层蒸腾速率是用 Shuttleworth-Wallace 模型来计算的,它由潜在蒸腾速率和供水能力来确定。其中,潜在蒸腾计算公式如下:

$$L_v \rho_w E_c = \frac{\Delta(A - A_s) + C_p \rho D/r_{ac}}{\Delta + \gamma(1 + r_{sc}/r_{ac})} \quad (2)$$

式中, E_c 为潜在蒸腾速率(mm/d); L_v 为水的汽化潜热(MJ/Mg); ρ_w 为水的密度(Mg/m³); Δ 为饱和水汽压斜率; A 为冠层接受的热量(W/m²); A_s 为林地接受的热量(W/m²); C_p 空气定压比热(J m⁻³ K⁻¹); ρ 空气密度(Kg/m³); D 为饱和水汽压差(KPa); γ 为湿度计常数; r_{sc} 和 r_{ac} 分别是冠层阻力和空气动力学阻力(s/m)。

3)土壤蒸发计算公式如下:

$$L_v \rho_w E_s = \frac{\Delta A_s + c_p \rho D_o/r_{as}}{\Delta + \gamma + \gamma(r_{ss}/r_{as})} \quad (3)$$

式中, E_s 为土壤蒸发速率(mm/d), D_o 为有效资源高度的水压差(KPa), r_{as} 是土壤表层水汽向外扩散的阻力(s/m)。 r_{ss} 是土壤水分运动到土壤表面时的阻力(s/m)。

4)产流量计算公式如下:

$$R_{\text{总}} = R_{\text{地表}} + R_{\text{垂直}} + R_{\text{沿坡}} + R_{\text{地下}} \quad (4)$$

式中, $R_{\text{总}}$ 为日产流量(mm/d), $R_{\text{地表}}$ 为日地表径流量(mm/d), $R_{\text{垂直}}$ 为日土层垂直方向基质流量(mm/d), $R_{\text{沿坡}}$ 为日沿坡方向基质流量(mm/d), $R_{\text{地下}}$ 为日地下径流量(mm/d)。

2.1.1 数据来源

本研究中的空间、气象、水文、植被、土壤等数据是基于叠叠沟小流域华北落叶松人工林样地中的实测结果。用 2005 年华北落叶松样地生长季的土壤数据和水文数据、2005 年生长季的植被数据来率定模型的参数;2005 和 2006 年生长季的气象数据分别用于模型率定和检验期间的输入;采用相对稳定且便于测定的 2005 和 2006 年土壤含水量数据分别进行模型参数的率定和检验,通过土壤含水率模拟值和实测值的比较来评价模型模拟的精度。现将原始数据的采集方法介绍如下。

空间数据:利用手持罗盘确定样地的坡向和坡度,采用 GPS 测定经纬度、海拔。

气象数据:气象数据为模型的主要输入,包括日辐射总量、日最高温度与最低温度、日平均水汽压、日平均风速和日降雨量,并有一定的格式要求。在华北落叶松林外设置了小型自动气象站(LI-1401,美国 LI-COR 公司),连续测定了 2005 和 2006 年 5—10 月份的气象数据,包括降雨量(mm)、太阳辐射强度(W/m²)、空气温度(℃)、空气相对湿度(%)、风速(m/s)、水汽压(KPa)。5 min 自动采集一次数据。饱和水汽压的计算如下:

$$e_s = 0.6108 e^{\left(\frac{17.502 T}{T+240.97}\right)} \quad (5)$$

式中, e_s 为当时温度下空气中的饱和水汽压(KPa); T 为空气温度(℃)。

模型模拟所用的 1993—2002 年的气象数据来源于固原气象局,主要包括日太阳总辐射(MJ/m²)、日最高气温(℃)、日最低气温(℃)、日平均水汽压(KPa)、日平均风速(m/s)、日降雨量(mm)。

植被数据:主要包括华北落叶松人工林在 2005 年的 5—10 月期间的 LAI 和植被高度等。其中,LAI 使用冠层分析仪(LAI 2000,美国 LI-COR 公司)测定,每 15 天观测一次,每次观测时,沿蛇形曲线在随机布置的 11 个固定测点测定,记录整个样地的 LAI 平均值的仪器读数;每木检尺,调查株数、树高、枝下高等指标。

土壤数据:在 2005 年华北落叶松人工林样地中选取了 6 个有代表性的样点,挖土壤剖面(上、中、下坡各两个),利用环刀法测定土层厚度、容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、饱和持水量、田间持水量、土壤导水率、土壤入渗速率、石砾含量等指标。由于本样地土地利用并未发生改变,土壤状况已经基本稳定,一次测定的土壤数据可代表全年乃至临近几年的状况。各指标的具体测定方法参考《森林生态系统定位研究方法》(林业部科技司,1994)。土壤水分特征曲线采用离心机(CR22G,日本日立工机株式会社)法测定。

水文数据:土壤体积含水率是用 TRIME 管状土壤含水量测试仪(TRIME-T3,德国)测定。在样地内埋设 3 根 1 m 长的探管、1 根 2 m 长的探管,于 2005 和 2006 年 5—10 月,每周 1 次定点分层测定各样地的土壤含水量动态变化,测定时探头每向下移动 10cm 记录一个含水量。土壤重量含水量是用烘干法(105℃)测定,在样地内设 9 个样点,于 2005 和 2006 年 5—10 月,土钻法分层取土,时间间隔为 10 天,每层设三个重复,烘干称重,取其平均值。土壤水势是应用土壤水势仪(EQ15,德国 Ecomatik 公司)自动观测。使用 12 个探头,分为 4 组,分别埋在样地内 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 的土层中观测 2005 和 2006 年 5—10 月份的土壤水势,数据采集间隔为 5 min。

2.1.2 模型率定和检验

参数率定期间该华北落叶松人工林样地模拟绝对误差在 0.0002—0.086 cm³/cm³之间,平均绝对误差为 0.020 cm³/cm³,平均相对误差为 9.1%,模型参数率定结果较好。在检验期间,该样地模拟的绝对误差在 0.0003—0.059 cm³/cm³之间,平均绝对误差 0.020 cm³/cm³,平均相对误差 8.6%。总之,该模型模拟效果较好,可用于描述华北落叶松样地的生态水文过程和预测林分结构变化的水文影响,具体 BROOK90 模型的率定和检验过程请见杜阿朋^[37]。

2.2 情景制定

为研究华北落叶松人工林蒸散及产流对最大 LAI 变化的响应,基于以前在六盘山叠叠沟小流域对华北落叶松生态水文的研究结果,来制定本研究的情境假设。叠叠沟小流域内华北落叶松人工林 LAI 的实测最大值约为 4.2,由于该区树木生长常受到大气干旱及土壤水分胁迫的双重影响,故应模拟较小 LAI 的林地水文过程变量。在模拟中,保持模型中率定后的地形、土壤及土壤初始水分等参数值不变,以 LAI 为 4.2 作为对照,将样地上原有植被参数 MAXLAI 4.2 变换为情景 1、2、3,具体模拟情景列表如下:

表 1 模拟情景列表
Table 1 List of modeling scenarios

情景代码 code	情景 scenarios	代表具体情景 specific scenarios represented
情景 1 Scenario 1	华北落叶松最大叶面积指数 LAI 为 3.0	原叶面积指数变为 3.0
情景 2 Scenario 2	华北落叶松最大叶面积指数 LAI 为 2.0	原叶面积指数变为 2.0
情景 3 Scenario 3	华北落叶松最大叶面积指数 LAI 为 1.0	原叶面积指数变为 1.0
对照情景 The control scenario	华北落叶松最大叶面积指数 LAI 为 4.2	样地现最大叶面积指数

用 1993—2002 年共 10 年的生长季实测气象数据,代入率定、检验后的 BROOK90 模型中,模拟不同情景时该华北落叶松人工林固定样地在 1993—2002 年的蒸散和产流,同时,也模拟了 LAI 在 1—4.2 之间每间隔 0.1 时该华北落叶松人工林固定样地在 1993—2002 年的蒸散及其分量和产流。

2.3 数据处理

数据统计分析应用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件。使用单因素方差分析(one-way ANOVA)揭示不同降水年型下各情景对产流量、蒸散量的影响,并采用 Tukey HSD 多重分析检验法确定产流量、蒸散量在各情景间的差异显著性($\alpha=0.05$)。利用 Microsoft Excel 2010 和 SigmaPlot 11.0 软件进行制图。

考虑到年降水量对于华北落叶松人工林生态水文过程的影响,本研究根据研究区内多年平均降水量(432 mm)及其年降水量的标准差(87.2 mm),将模拟年份划分为以下降水年型:

$$\begin{cases} P_i > P + 0.33\sigma, \text{丰水年} \\ P - 0.33\sigma \leq P_i \leq P + 0.33\sigma, \text{平水年} \\ P_i < P - 0.33\sigma, \text{枯水年} \end{cases} \quad (6)$$

式中, P_i 为当年降水量 (mm); P 为多年平均降水量 (mm); σ 为多年降水量的标准差 (mm)。

对各水文过程变量的 LAI 阈值的计算参照 Lagergren *et al.*^[38] 的阈值计算公式, 对其公式稍加改动后如下:

$$R = \left(\frac{LAI}{x} \left(\frac{|x - LAI|}{(x - LAI)} + 1 \right) + \frac{|LAI - x|}{(LAI - x)} + 1 \right) \times 0.5 \quad (7)$$

$$R = \left(\frac{x}{LAI} \left(\frac{|x - LAI|}{(x - LAI)} + 1 \right) + \frac{|LAI - x|}{(LAI - x)} + 1 \right) \times 0.5 \quad (8)$$

式中, R 为水文过程变量的相对值, x 为水文过程变量的 LAI 阈值。公式 (12) 适用于与 LAI 呈正相关关系的水文过程变量, 公式 (13) 适用于与 LAI 呈负相关关系的水文过程变量。

3 结果与分析

3.1 不同降水年型下各情景华北落叶松人工林蒸散、产流比较

降水年型划分结果为: 1994、1996 年为丰水年, 年均降水量为 485.2 mm; 1995、1998、2000 和 2001 年为平水年, 其年均降水量为 418.5 mm; 1993、1997、1999 和 2002 年为枯水年, 其年均降水量为 365.3 mm。

图 1 表明: 虽然不同降水年型条件下华北落叶松人工林年均总蒸散量的差异较大, 但在各降水年型其年均总蒸散量总体表现为: 情景 3 < 情景 2 < 情景 1 < 对照情景, 其中情景 3 的总蒸散量要显著低于其它情景 ($P < 0.05$)。在各降水年型下, 与对照情景相比, 各情景华北落叶松人工林总蒸散量的减小率均小于其 LAI 的减小率。例如: 在平水年, 情景 1、2、3 的总蒸散量减小率分别为 2.2%、6.5% 和 20.8% 低于其 LAI 的减小率 28.6%、52.4% 和 76.2%。

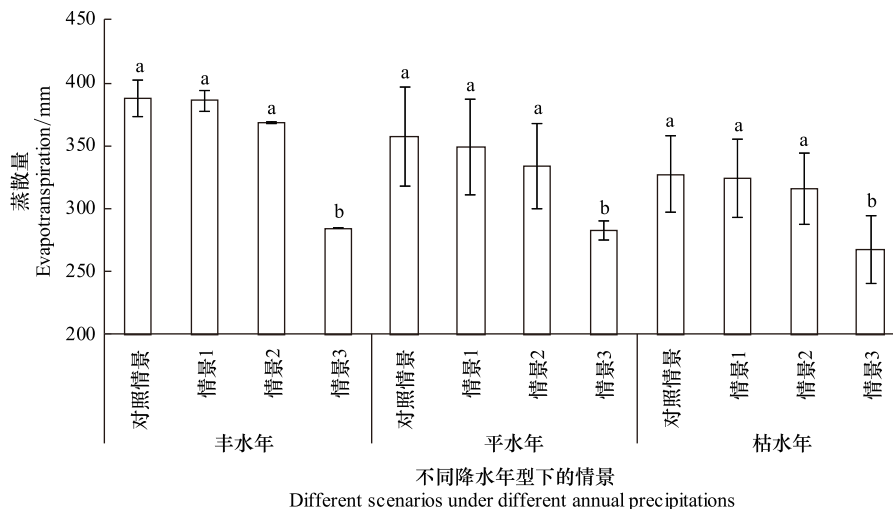


图 1 各降水年型华北落叶松人工林不同情景下的年均蒸散量

Fig.1 Annual evapotranspiration of *Larix principis-rupprechtii* plantation of various scenarios under different annual precipitations

不同小写字母表示情景间的差异显著 ($P < 0.05$)

在不同降水年型, 华北落叶松人工林年均产流量的变化与年均总蒸散量相反, 均是对照情景 < 情景 1 < 情景 2 < 情景 3 (图 2), 且情景 3 的年均产流量显著高于其它情景 ($P < 0.05$)。在各降水年型, 与对照情景相比, 均是情景 1 和 2 的年均产流量的增加率小于 LAI 的减小率, 而情景 3 的年均产流增加率大于 LAI 的减小率。在各降水年型下, 各情景的年均产流量的增加率如下: 在丰水年, 情景 1、2、3 年均产流量的增加率分别为 8.2%、

25.6%、129.9%;在平水年,情景1、2、3的增加率分别为9%、29.8%、130.3%;在枯水年,情景1、2、3年均产流量的增加率分别为8.5%、28.1%和107.8%。

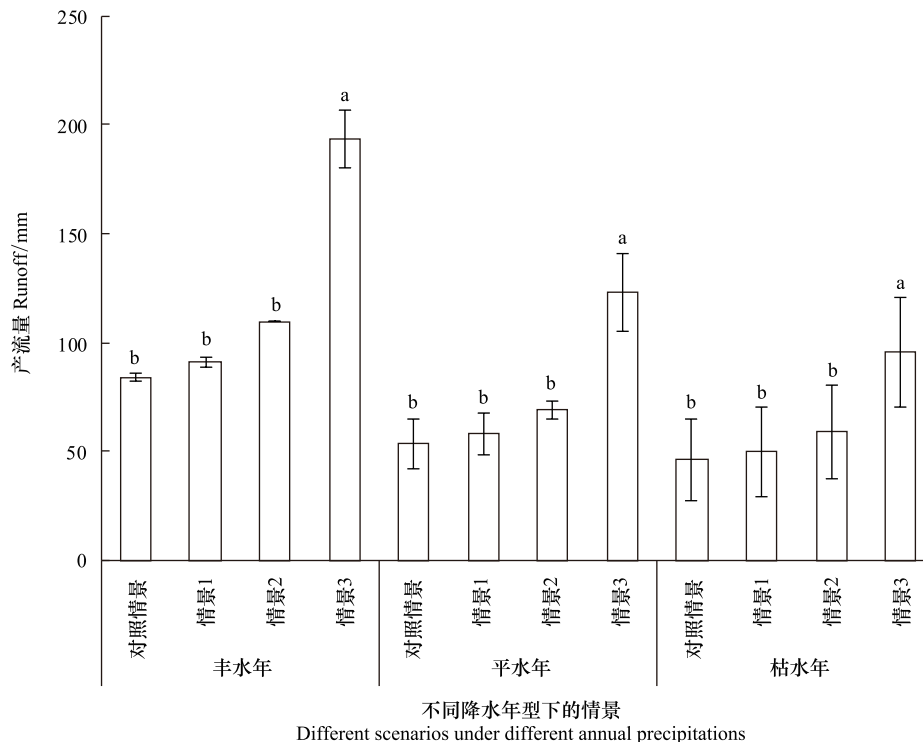


图2 各降水年型华北落叶松人工林不同情景下的年均产流量

Fig.2 Annual runoff of *Larix principis-rupprechtii* plantation of various scenarios under different annual precipitations

各降水年型下,华北落叶松人工林 LAI 越大,年均蒸散量越大、年均产流量越小,但各情景下的年均蒸散量和产流量并不与 LAI 呈比例地变化。对蒸散量来说,各情景总蒸散量的减小率均小于其 LAI 的减小率;对产流量来说,情景1和2的增加率较其 LAI 的减小率小,而情景3的增加率较大。这表明通过降低冠层 LAI 减少林分蒸散耗水的作用是有限的。

3.2 LAI 对华北落叶松人工林蒸散及其分量的影响

华北落叶松人工林年均冠层截留量、蒸腾量与 LAI 都呈较好的指数增长关系 ($R^2 > 0.99, P < 0.01$), 增长趋势逐渐缓慢,逐渐趋于一个极限值,但不同降水年型间的关系曲线略有差异(图3和4)。华北落叶松人工林冠层截留量在各降水年型的大小排序为:平水年>丰水年>枯水年(图3),这可能是因为平水年的降水强度小于丰水年的,且降水时间分配较均匀。冠层截留量随 LAI 的变化幅度在各降水年型总体也表现为平水年>丰水年>枯水年。根据曲线函数求得其在丰水年、平水年和枯水年的最大值分别为 62.87 mm、74.93 mm、37.63 mm,这与 LAI 为 4.2 时的值相差 65.9%、75.0%和 22.7%。用公式(12)计算得出,不同降水年型下决定冠层截留量的 LAI 阈值差异较大,在丰水年、平水年和枯水年分别为 6.2、6.4、4.3,说明冠层截留量受 LAI 的影响较大;枯水年冠层截留量的 LAI 阈值明显小于其他降水年型。

相对而言,华北落叶松人工林冠层蒸腾量在各降水年型的大小排序大致为:丰水年>平水年>枯水年(图4)。冠层蒸腾量随 LAI 的变化幅度随各降水年型表现为丰水年>平水年>枯水年。根据拟合函数求得丰水年、平水年和枯水年的冠层蒸腾量的极限值分别为 329.5 mm、289.4 mm 和 273.9 mm。从模拟看,丰水年的冠层蒸腾量在 LAI 约为 3.5 处开始有略微的下降。不同降水年型下冠层蒸腾量 LAI 的阈值稍有不同,在丰水年、平水年和枯水年分别为 2.0、1.7、1.6,这说明冠层蒸腾量受 LAI 增加的影响越来越小,很快就到达阈值;冠层蒸腾量的 LAI 阈值受年降水量一定的影响。

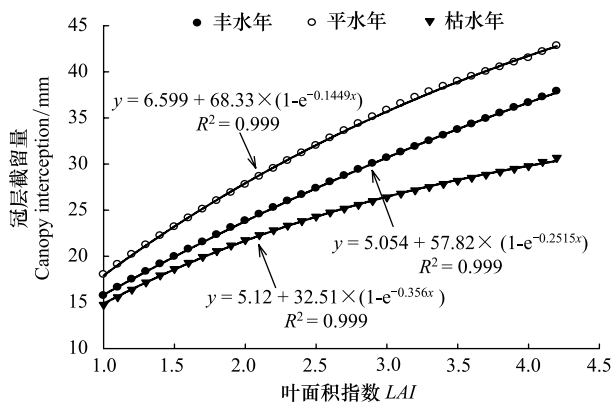


图3 不同降水年型下华北落叶松林冠层截留量随 LAI 的变化

Fig.3 Variation of canopy interception along with change in LAI of *Larix principis-rupprechtii* plantation under different annual precipitations

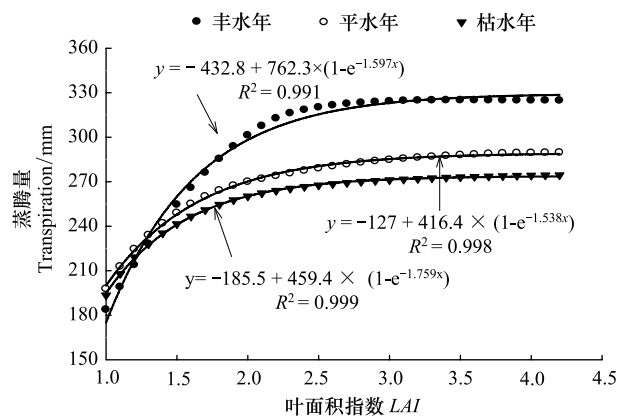


图4 不同降水年型下华北落叶松林蒸腾量随 LAI 的变化

Fig.4 Variation of transpiration along with change in LAI of *Larix principis-rupprechtii* plantation under different annual precipitations

如图 5, 华北落叶松人工林年均土壤蒸发量与 LAI 呈指数下降关系 ($R^2 > 0.99$, $P < 0.01$)。土壤蒸发量随 LAI 增加先快速下降而后趋于稳定, 且两者的关系曲线在丰水年与平水年和枯水年之间的差异明显。土壤蒸发量随 LAI 的变化速率在丰水年明显大于平水年和枯水年, 其在各降水年型的最小值经计算得出分别为 18.7 mm、21.43 mm、19.73 mm。LAI 阈值在丰水年、平水年和枯水年分别为 4.3、3.0、3.1, 这说明土壤蒸发量在丰水年受 LAI 的影响与其他降水年型明显不同, 但在各降水年型的最小值几乎一致。

由图 6 知, 华北落叶松人工林的年均总蒸散量与 LAI 的关系也十分紧密 ($R^2 > 0.99$, $P < 0.01$), 两者在不同降雨条件下呈指数增长关系, 但增长逐渐缓慢, 存在极限值, 在不同降水年型的关系曲线差异较明显。蒸散量随 LAI 的变化速率大小在各降水年型表现为丰水年 > 平水年 > 枯水年, 其最大值在丰水年、平水年、枯水年分别为 390.5 mm、358 mm、326.13 mm, 其 LAI 阈值在丰水年、平水年和枯水年分别为 1.6、1.5、1.3。蒸散量的 LAI 阈值与蒸腾量的比较接近, 可能因为蒸腾是蒸散的最大支出分量。

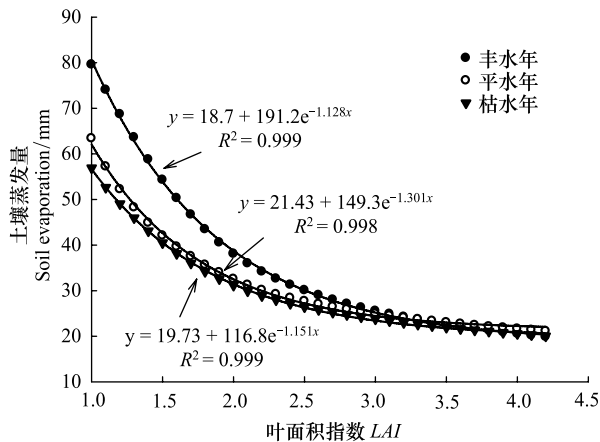


图5 不同降水年型下华北落叶松林土壤蒸发量随 LAI 的变化

Fig.5 Variation of soil evaporation along with change in LAI of *Larix principis-rupprechtii* plantation under different annual precipitations

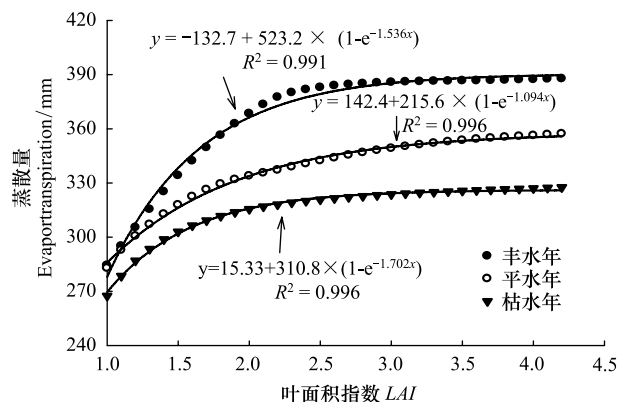


图6 不同降水年型下华北落叶松林蒸散量随 LAI 的变化

Fig.6 Variation of evapotranspiration along with change in LAI of *Larix principis-rupprechtii* plantation under different annual precipitations

3.3 LAI 对华北落叶松林地产流的影响

由图 7 知,在各降水年型,华北落叶松人工林的年均产流量与 LAI 呈现紧密的负相关指数关系 ($R^2 > 0.99$, $P < 0.01$),但在不同降水年型的关系曲线有些差异。年均产流量在各降水年型的大小排序为:丰水年 > 平水年 > 枯水年,其随 LAI 的变化幅度大小也是丰水年 > 平水年 > 枯水年。其最小值分别是 83.4 mm、54.45 mm、46.07 mm, LAI 阈值分别为 2.5、2.3、2.3,说明产流量的 LAI 阈值在丰水年略大于平水年和枯水年;无论 LAI 值多大,样地始终存在一定的产流量。

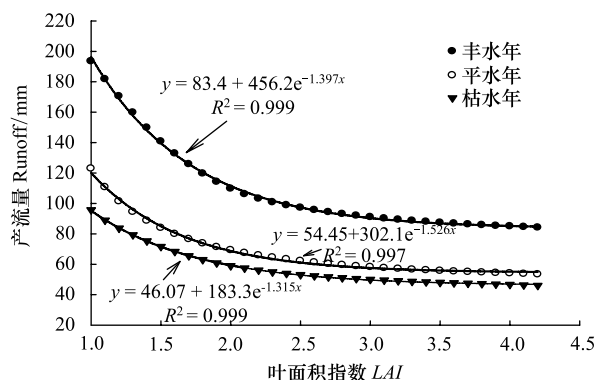


图 7 不同降水年型下华北落叶松林产流量随 LAI 的变化

Fig.7 Variation of runoff along with change in LAI of *Larix principis-rupprechtii* plantation under different annual precipitation

4 讨论

4.1 华北落叶松人工林总蒸散及蒸腾量与 LAI 的关系

本文认为华北落叶松人工林蒸散量和 LAI 呈正相关关系,这与对其它森林生态系统的研究结果相一致^[13-15]。然而,这些研究多认为两者之间是线性关系,而非曲线关系。Testi *et al.*^[13]对西班牙南部的橄榄树 (*Canarium album*) 的研究表明,在不受水分限制的夏季,橄榄林蒸散与 LAI 之间存在明显的线性增长关系。又如, Gong *et al.*^[15]对我国西北灌溉试验站的苹果树 (*Malus pumila*) 的研究也发现,在没有水分胁迫情况下,苹果林蒸散和 LAI 有很好的线性增长关系。以上事实说明,供水条件是决定蒸散的关键环境因子^[39],它可能会直接影响到林分蒸散与 LAI 之间的关系曲线。本研究区位于半干旱区,经常由于降雨稀少而导致土壤水分亏缺,这可能也是导致华北落叶松林分蒸散随 LAI 出现曲线增长的原因之一。研究表明:林分蒸腾量与 LAI 为正相关关系^[17-22],但随着土壤水分有效性的减少,蒸腾量可能会有所下降^[40]。如, Forrester *et al.*^[20]研究了澳大利亚东南部的蓝桉 (*Eucalyptus globulus*),结果发现冠层蒸腾量和 LAI 呈显著地线性增长关系。然而, Bréda *et al.*^[23]对法国 35 年树龄的无梗花栎 (*Quercus petraea*) 进行地间伐试验发现:林分蒸腾量随 LAI 先线性增长后减少。除植被类型的原因外,这些结果不同的原因可能归结为土壤水分有效性的差异。前者研究区的年降水量约 700 mm,土壤水分有效性较高,根系吸取土壤水分的速率能平衡叶片蒸腾损耗水分的速率^[41],所以蒸腾和 LAI 呈线性增长关系;而后者研究区间伐后初期的土壤水分有效性较高,表现为较快的林分生长和蒸腾,但后期随着土壤水分有效性降低,严重遏制了树木的蒸腾,故蒸腾随着 LAI 先增加后下降。本研究中华北落叶松人工林冠层蒸腾随着 LAI 增加逐渐缓慢再次说明了土壤水分有效性对于林分水分利用的限制作用。

不同降水条件下,模拟华北落叶松人工林的蒸腾随 LAI 的增加逐渐变缓,甚至达到一定 LAI 阈值后开始有略微的下降趋势(图 4),这可能与树木竞争对冠层蒸腾的影响有关。王彦辉等^[42]总结在宁夏固原六盘山的赵千户林场对华北落叶松和山桃林分的研究发现,虽然林木蒸腾量随密度降低也有减少,但减少率远低于密度降低率,认为是因密度减小后林木个体蒸腾增大。本模拟研究中,随着 LAI 的增加,受土壤水分有效性等限制树木竞争加剧,林木个体蒸腾量因而逐渐减小,导致林分总体蒸腾量增加率小于其 LAI 的增加率,蒸腾量增加趋势逐渐变缓,甚至出现降低的情况^[43]。

4.2 华北落叶松人工林产流与其 LAI 的关系

本文研究发现产流量和林冠层 LAI 两者为负相关指数关系,这与张娜等^[31]对长白山自然保护区内林地模拟研究结果一致,但与赖格英等^[33]的研究结果(即产流和 LAI 为正相关关系)不一致,这可能与各自研究地区的气象条件、地质和土壤条件等有关。本研究区位于半干旱土石山区,土层较厚,年降水量为 432 mm,而赖格英等^[33]的研究区位于湿润区,年降水量约 1520 mm,由于各地区降水特征、森林类型、地质地貌条件和土壤结构等因素的差异,导致研究结果不尽相同。总之,产流量和林冠层 LAI 的关系还需深入探究以得到较普适

的结论。

4.3 华北落叶松人工林生态水文过程中的 LAI 阈值

生态阈值是指某一或某一系列生态参数达到某一点的值,当低于或高于这个点时将引起某个或某些性状或过程的急剧变化^[44]。LAI 是反映植被冠层结构的重要参数,因此, LAI 阈值不仅对于深入系统认识森林植被结构对水文过程的影响机制具有十分重要的作用,而且对于科学指导林分经营管理、保证林分可持续发展具有重要的实践价值。本文参照 Lagergren *et al.*^[38]的阈值公式计算了华北落叶松人工林冠层 LAI 响应于产流量、总蒸散量及其分量的阈值,结果发现: LAI 阈值以下,各水文过程变量随 LAI 的增加或减小迅速; LAI 阈值以上,各变量随 LAI 的增加或减小缓慢,趋于稳定。同时,各变量在不同降水年型的 LAI 阈值有所不同。对于总蒸散量、蒸腾量和产流量来说,其阈值大小在各降水年型表现为丰水年>平水年≥枯水年;而其它变量在不同降水年型的 LAI 阈值表现并不如此,冠层截留量的 LAI 阈值在枯水年(4.3)明显小于在丰水年(6.2)和平水年(6.4)的值,土壤蒸发量的 LAI 阈值在丰水年(4.3)明显大于在其他降水年型(平水年,3;枯水年,3.1)。一般地,在 LAI 低于阈值时,各变量变化的幅度在丰水年要大于平水年和枯水年,这说明,各变量的变化在水分较充足的年份中更多取决于冠层 LAI 的变化,而在水分较亏缺的年份中,可能更多受水分条件的限制。

5 结论

1)情景模拟发现:华北落叶松人工林年蒸散量和产流量的变化率与冠层 LAI 的变化率并不一致。在不同降水年型下,以冠层 LAI 等于 4.2 为对照,各情景总蒸散量的减小率均小于其 LAI 的减小率;对年产流量来说,其在 LAI 降低为 3、2 时的增加率小于 LAI 的减小率,其在 LAI 降低为 1 时的增加率大于 LAI 的减小率,这表明通过减少冠层 LAI 来降低林分蒸散的作用是有限的。

2)对不同降水年型下各水文过程变量与冠层 LAI 的关系拟合表明:林分蒸散量、冠层截留量、蒸腾量与 LAI 都呈显著的正相关关系($R^2>0.99, P<0.01$),而土壤蒸发量、产流量与 LAI 呈显著的负相关关系($R^2>0.99, P<0.01$);且各变量随着 LAI 的增加或减少逐渐缓慢,趋于一个极限值,产生这一结果的主要原因可能是本研究区受降水条件、立地水分等的限制作用较大。

3)本文计算了不同降水年型下华北落叶松人工林年均产流量、总蒸散量及其分量的 LAI 阈值,结果表明:当 LAI 小于阈值时,各水文过程变量都随 LAI 迅速地增加或减小;当 LAI 大于阈值时,各变量随 LAI 的增加或减小缓慢,趋于稳定。各水文过程变量 LAI 阈值对降水年型的响应不同,一般在丰水年要大于枯水年。各变量随 LAI 的变化幅度多表现为丰水年大于平水年和枯水年,说明它在水分较充足的年份中更多取决于冠层 LAI 的变化,而在水分较亏缺的年份中,可能更多受水分条件的限制。

参考文献(References):

- [1] 王礼先, 张志强. 干旱地区森林对流域径流的影响. 自然资源学报, 2001, 16(5): 439-444.
- [2] 时忠杰, 王彦辉, 于澎涛, 熊伟, 郭浩, 郭明春. 宁夏六盘山林区几种主要森林植被生态水文功能研究. 水土保持学报, 2005, 19(3): 134-138.
- [3] 马履一, 王华田, 林平. 北京地区几个造林树种耗水性比较研究. 北京林业大学学报, 2003, 25(2): 1-7.
- [4] Wang Y H, Yu P T, Feger K H, Wei X H, Sun G, Bonell M, Xiong W, Zhang S L, Xu L H. Annual runoff and evapotranspiration of forestlands and non-forestlands in selected basins of the Loess Plateau of China. *Ecohydrology*, 2011, 4(2): 277-287.
- [5] 王清华, 李怀恩, 卢科锋, 蔡明, 李越. 森林植被变化对径流及洪水的影响分析. 水资源与水工程学报, 2004, 15(2): 21-24.
- [6] Farley K A, Jobbágy E G, Jackson R B. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology*, 2005, 11(10): 1565-1576.
- [7] 张晓明, 余新晓, 武思宏, 刘卉芳, 张学培, 魏天兴. 黄土区森林植被对流域径流和输沙的影响. 中国水土保持科学, 2006, 4(3): 48-53.
- [8] Sun G, Zhou G Y, Zhang Z Q, Wei X H, McNulty S G, Vose J M. Potential water yield reduction due to forestation across China. *Journal of Hydrology*, 2006, 328(3/4): 548-558.
- [9] 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.

- [10] 郭忠升, 邵明安. 黄土丘陵半干旱区柠条锦鸡儿人工林对土壤水分的影响. 林业科学, 2010, 46(12): 1-7.
- [11] 熊伟. 六盘山北侧主要造林树种耗水特性研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2003.
- [12] Giambelluca T W, Scholz F G, Bucci S J, Meinzer F C, Goldstein G, Hoffmann W A, Franco A C, Buchert M P. Evapotranspiration and energy balance of Brazilian savannas with contrasting tree density. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(8): 1365-1376.
- [13] Testi L, Villalobos F J, Orgaz F. Evapotranspiration of a young irrigated olive orchard in southern Spain. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 121(1/2): 1-18.
- [14] Almeida A C, Soares J V, Landsberg J J, Rezende G D. Growth and water balance of *Eucalyptus grandis* hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. Forest Ecology and Management, 2007, 251(1/2): 10-21.
- [15] Gong D Z, Kang S Z, Yao L M, Zhang L. Estimation of evapotranspiration and its components from an apple orchard in northwest China using sap flow and water balance methods. Hydrological Processes, 2007, 21(7): 931-938.
- [16] Limpens J, Holmgren M, Jacobs C M J, Van Der Zee S E A T M, Karofeld E, Berendse F. How does tree density affect water loss of peatlands? A mesocosm experiment. PLoS One, 2014, 9(3): e91748.
- [17] Köstner B. Evaporation and transpiration from forests in Central Europe - relevance of patch-level studies for spatial scaling. Meteorology and Atmospheric Physics, 2001, 76(1/2): 69-82.
- [18] 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. 生态学报, 2008, 28(4): 1376-1382.
- [19] Bucci S J, Scholz F G, Goldstein G, Hoffmann W A, Meinzer F C, Franco A C, Giambelluca T, Miralles-Wilhelm F. Controls on stand transpiration and soil water utilization along a tree density gradient in a Neotropical savanna. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(6/7): 839-849.
- [20] Forrester D I, Collopy J J, Morris J D. Transpiration along an age series of *Eucalyptus globulus* plantations in southeastern Australia. Forest Ecology and Management, 2010, 259(9): 1754-1760.
- [21] Forrester D I, Collopy J J, Beadle C L, Warren C R, Baker T G. Effect of thinning, pruning and nitrogen fertiliser application on transpiration, photosynthesis and water-use efficiency in a young *Eucalyptus nitens* plantation. Forest Ecology and Management, 2012, 266: 286-300.
- [22] Benyon R G, Theiveyanathan S, Doody T M. Impacts of tree plantations on groundwater in south-eastern Australia. Australian Journal of Botany, 2006, 54(2): 181-192.
- [23] Bréda N, Granier A. Intra- and interannual variations of transpiration, leaf area index and radial growth of a sessile oak stand (*Quercus petraea*). Annals of Forest Science, 1996, 53(2/3): 521-536.
- [24] 高照全, 张显川, 王小伟. 桃树冠层蒸腾动态的数学模拟. 生态学报, 2006, 26(2): 489-495.
- [25] Park H, Hattori S, Kang H O. Seasonal and inter-plot variations of stemflow, throughfall, and interception loss in two deciduous broad-leaved forests. Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources, 2000, 13(1): 17-30.
- [26] Gómez J A, Giráldez J V, Fereres E. Rainfall interception by olive trees in relation to leaf area. Agricultural Water Management, 2001, 49(1): 65-76.
- [27] Fleischbein K, Wilcke W, Goller R, Boy J, Valarezo C, Zech W, Knoblich K. Rainfall interception in a lower montane forest in Ecuador: effects of canopy properties. Hydrological Processes, 2005, 19(7): 1355-1371.
- [28] Limousin J -M, Rambal S, Ourcival J -M, Joffre R. Modelling rainfall interception in a mediterranean *Quercus ilex* ecosystem: Lesson from a throughfall exclusion experiment. Journal of Hydrology, 2008, 357(1/2): 57-66.
- [29] 孙浩, 杨民益, 余杨春, 熊伟, 王彦辉, 曹恭祥, 杜敏, 王云霓, 于澎涛, 徐丽宏, 左海军. 宁夏六盘山几种典型水源涵养林林分结构与水文功能的关系. 中国水土保持科学, 2014, 12(1): 10-18.
- [30] 张娜, 于贵瑞, 于振良. 异质景观年平均蒸发量空间格局模拟. 生态学报, 2004, 24(11): 2524-2534.
- [31] 张娜, 于贵瑞, 于振良, 赵士洞. 基于景观尺度过程模型的长白山地表径流量时空变化特征的模拟. 应用生态学报, 2003, 14(5): 653-658.
- [32] 黄枝英. 北京山区典型林分水分循环与水量平衡研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [33] 赖格英, 刘志勇, 刘胤文. 流域土地利用/覆盖与植被变化的水文响应模拟研究. 水土保持研究, 2008, 15(4): 10-14.
- [34] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林. 自然资源学报, 2001, 16(5): 433-438.
- [35] 许炯心. 黄土高原植被-降水关系的临界现象及其在植被建设中的意义. 生态学报, 2005, 25(6): 1233-1239.
- [36] Federer C A. BROOK90: A Simulation Model for Evaporation, Soil Water, and Streamflow, Version 3.1. Computer Freeware and Documentation. USDA Forest Service, PO Box 640, Durham NH, 03824, 1995.
- [37] 杜阿朋. 六盘山叠叠沟小流域坡面植被水文影响与模拟 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
- [38] Lagergren F, Lindroth A. Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 112(2): 67-85.

- [39] 李修仓, 姜彤, 温姗姗, 王艳君, 邱新法. 珠江流域实际蒸散发的时空变化及影响要素分析. 热带气象学报, 2014, 30(3): 483-494.
- [40] 杨锋伟, 陈丽华, 朱清科, 毕华兴. 晋西黄土区主要造林树种耗水特性分析. 水土保持研究, 2008, 15(1): 41-45.
- [41] 郭庆荣, 张秉刚. 土壤水分有效性研究综述. 热带亚热带土壤科学, 1995, 4(2): 119-124.
- [42] 王彦辉, 熊伟, 于澎涛, 沈振西, 郭明春, 管伟, 马长明, 叶兵, 郭浩. 干旱缺水地区森林植被蒸散耗水研究. 中国水土保持科学, 2006, 4(4): 19-25.
- [43] Xiong W, Oren R, Wang Y H, Yu P T, Liu H L, Cao G X, Xu L H, Wang Y N, Zuo H J. Heterogeneity of competition at decameter scale: patches of high canopy leaf area in a shade-intolerant larch stand transpire less yet are more sensitive to drought. Tree Physiology, 2015, 35(5): 470-484.
- [44] 许振柱, 周广胜, 王玉辉. 植物的水分阈值与全球变化. 水土保持学报, 2003, 17(3): 155-158.