

宁夏六盘山人工林和天然林生长季的蒸散特征*

曹恭祥¹ 王绪芳² 熊伟^{1**} 王彦辉¹ 于澎涛¹ 王云霓¹ 徐丽宏¹ 李振华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宁夏回族自治区固原市六盘山林业局, 宁夏泾源 756400)

摘要 为了系统地认识森林生态系统结构对蒸散特征的影响, 2009年5—10月, 应用热扩散技术和传统水文学方法, 对六盘山香水河小流域华北落叶松人工林和华山松天然林的蒸散及分量进行对比研究. 结果表明: 华北落叶松人工林生长季总蒸散量为 518.2 mm, 是同期降雨量的 104.6%, 远高于天然林蒸散量 420.5 mm. 两种林分总蒸散量在其垂直层次上的分配比例相近, 表现为冠层蒸腾量>草本+土壤层蒸散量>灌木蒸腾量, 但林分各组成分量占总蒸散量的比例明显不同. 其中, 人工林冠层月均截留量和蒸腾量为 19.6 和 25.2 mm, 分别是天然林的 1.2 和 1.9 倍; 人工林灌木层月均蒸腾量为 4.4 mm, 占天然林的 23.4%; 人工林草本+土壤层月均蒸散量为 37.1 mm, 是天然林的 1.8 倍. 采用 Penman-Monteith 方程对林分的实测蒸散量进行对比检验, 两种方法对林分蒸散量的估计值基本接近.

关键词 六盘山 华北落叶松人工林 华山松天然林 热扩散技术 蒸散

文章编号 1001-9332(2013)08-2089-08 **中图分类号** S715.4 **文献标识码** A

Evapotranspiration characteristics of artificial and natural forests in Liupan Mountains of Ningxia, China during growth season. CAO Gong-xiang¹, WANG Xu-fang², XIONG Wei¹, WANG Yan-hui¹, YU Peng-tao¹, WANG Yun-ni¹, XU Li-hong¹, LI Zhen-hua¹ (¹State Forestry Administration Key Laboratory of Forestry Ecology and Environment, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; ²Liupan Mountain Forestry Bureau of Guyuan City in Ningxia Autonomous Region, Jingyuan 756400, Ningxia, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(8): 2089–2096.

Abstract: In order to understand the effects of the structure of forest ecosystem on the hydrological processes, a comparative study by using thermal dissipation technique and hydrological methodology was made on the evapotranspiration (ET) and its components of *Larix principis-rupprechtii* plantation and *Pinus armandi* natural forest in two adjacent stands in a small catchment Xiangshuihe of Liupan Mountains during the growth season (May–October) in 2009. Throughout the growth season, the total ET from the plantation was 518.2 mm, which accounted for 104.6% of the precipitation and was much higher than that (420.5 mm) of the natural forest. The allocation of ET in the vertical layers performed similarly between the two stands, with the order of canopy layer > herb and soil layer > shrub layer, but the ratio of each component to total ET differed significantly. The plantation consumed 0.2 and 0.9 times more water for canopy interception (19.6 mm per month) and tree transpiration (25.2 mm per month) than the natural forest, respectively. However, the transpiration from the plantation was 4.4 mm per month, and took up 23.4% of the natural forest. In contrast, the sum of soil evaporation and herbage evapotranspiration consumed 37.1 mm water per month in the plantation, which was 0.8 times higher than that in the natural forest. The ET was calculated by Penman-Monteith equation to compare the results estimated by sap flow measurements, and the values estimated by the two methods were similar.

Key words: Liupan Mountains; *Larix principis-rupprechtii* plantation; *Pinus armandii* natural forest; thermal dissipation technique; evapotranspiration.

* “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD38B0503, 2012BAD22B030102)、林业公益性行业科研专项(200904056, 201104005-02)和国家自然科学基金项目(41230852, 41071023)资助.

** 通讯作者. E-mail: xwcaf@163.com

2012-09-29 收稿, 2013-05-29 接受.

森林蒸散是地球表面水量平衡和能量平衡的重要组成部分,也是森林生态系统研究的基础^[1],对于局部地区的气候变化起着至关重要的作用^[2]。森林蒸散包括植被蒸腾、冠层/地被物截持和土壤水分蒸发 3 部分^[3]。森林蒸散及其分量组成不仅受林木冠层生理^[4]、形态特征^[5]、土壤^[6]和微气象等因素的影响^[7-8],而且与林分类型和结构有着密切的关系^[9-10]。Ewers 等^[11]研究表明,阔叶林(美洲山杨 *Populus tremuloides*)比针叶林(黑云杉 *Picea mariana*)具有更高的蒸腾速率,不同林型的蒸散量差异很大;Iida 等^[12]研究表明,在同一地区不同时期的赤松(*Pinus densiflora*)林中,随着林分结构的改变,各蒸散分量也发生明显的变化。因此,有必要系统认识林分结构对蒸散及其组成特征的影响,从而客观地评价森林蒸散对区域水量平衡及水资源形成中的作用。

人工林是森林资源重要的组成部分,对生态环境的恢复及经济发展发挥着巨大作用^[13]。我国是现今世界上人工林面积最大的国家^[14]。但是,由于其树种组成单一、结构不合理等原因,引发了一些生态环境问题。尤其是在我国北方的干旱缺水地区,人工林耗水问题更成为人们关注的焦点^[15]。一方面,人工林的高耗水可以引起土壤水分亏缺,导致“土壤干层”现象^[16];另一方面,土壤水分的过度消耗也会影响树木的正常生长,形成“小老头林”^[17]。目前,有关国内外人工林蒸散耗水的研究已有大量报道^[18-19],但对人工林与天然林蒸散的对比研究还较少,尤其是缺乏在同一气候和立地条件下的野外对比试验。开展相关研究,对于正确评价人工林水分消耗及其与天然林蒸散的关系,揭示森林生态系统结构对蒸散及组成特征的影响机制具有重要意义。

华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)是我国北方地区的主要造林树种,自 1964 年引入宁夏六盘山地区以来,在该地区生长良好且大多郁闭成林,目前,面积已达 15700 hm²^[20]。然而,大面积栽植人工林改变了土地利用类型的组成比例,而且由于人工林的过度耗水可能导致该区域水资源的安全问题。目前,虽然对华北落叶松人工林蒸散量的季节变化以及人工林与天然林部分蒸散组分特征已有报道^[21-22],但缺乏其与天然林蒸散及其组分的比较研究,还不能系统认识人工林结构对其耗水的影响,及其长期的生态水文效益进行合理评价。因此,本研究利用热扩散技术,结合传统水文学方法,对六盘山香水河小流域内的华北落叶松人工林和华山松(*P.*

armandii)天然林蒸散及其分量进行了定位观测,并用 Penman-Monteith 方程进行了检验,旨在对比两种不同起源林分的蒸散及其分量组成特征的差异,分析林分结构对蒸散及组分的影响,为促进半干旱地区森林植被建设和完善林水综合管理技术提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏六盘山自然保护区(35°27′22″—35°33′29″ N,106°12′10″—106°16′30″ E)南部核心地带的香水河小流域,海拔 2040 ~ 2942 m。该地区年均气温 5.8 ℃,最热月(7 月)平均气温 17.4 ℃,最冷月(1 月)平均气温 -7.0 ℃,年均降水量 710 mm,多集中于 7—9 月,干燥度 < 1.0,无霜期 100 ~ 130 d。土壤主要为山地灰褐土,厚度在 30 ~ 100 cm。该流域植被茂密,森林覆盖率在 70% 以上,植被以天然次生林为主,如华山松、白桦(*Betula platyphylla*)、红桦(*B. albo-sinensis*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)等,人工林主要是华北落叶松和油松(*P. tabulaeformis*)。

1.2 试验设计

在香水河小流域洪沟营林区内,选择相邻的华北落叶松人工林(35°30′50″ N,106°13′30″ E)和华山松天然林(35°30′52″ N,106°13′30″ E)作为研究对象。在 2 种林分内各建立 1 个 20 m×20 m 的固定样地,分别对样地内的冠层截留、乔木蒸腾、灌木蒸腾、草本+土壤层蒸散等分量进行定位观测,各分量累加后为总蒸散量,并用 Penman-Monteith 方程对蒸散量进行验证。2 个固定样地水平距离在 70 m 左右。华北落叶松人工林为纯林,华山松天然林以华山松为优势树种,伴生树种有白桦和红桦。样地的基本特征见表 1。

1.3 研究方法

1.3.1 林冠截留测定 1) 林外降水:在样地附近的空地上采用标准雨量筒进行测定;2) 林内降水:在各样地内分别布设 24 个雨量筒进行测定;3) 树干茎流:按树木径阶(按 4 cm 划分)进行测定,每个径级选 1 ~ 2 株标准木,用塑胶管做成蛇形管收集树干茎流。树干茎流量(*C*, mm)和乔木冠层截留量(*I*, mm)计算公式为:

$$C = \sum_{i=1}^n \frac{C_n \cdot M_n}{S \cdot 10^4}$$

(1)

$$I = P - T - C$$

(2)

表 1 华北落叶松人工林与华山松天然林样地的主要特征
Table 1 Main characteristics of the plots in the *Larix principis-rupprechtii* plantation and *Pinus armandii* stand

林型 Forest type	海拔 Altitude (m)	坡度 Slope degree	坡向 Slope aspect	乔木层 Tree layer				灌木层 Shrub layer		草本层 Herbage layer	
				密度 Density (stem · hm ⁻²)	胸径 DBH (cm)	高度 Height (m)	郁闭度 Canopy density	高度 Height (m)	盖度 Coverage (%)	高度 Height (cm)	盖度 Coverage (%)
A	2278	37	东北 NE	1225	14.7±3.4	13.8±2.6	0.64	1.2±0.3	17	37.8±15.4	70
B	2263	39	东南 SE	725	12.1±6.6	6.9±2.6	0.35	1.5±0.8	77	27.7±18.3	25

A:华北落叶松人工林 *L. principis-rupprechtii* plantation; B:华山松天然林 *P. armandii* stand. 下同 The same below.

式中: n 为树干径级数; C_n 为每一径级的树干茎流量 (mL); M_n 为每一径级的树木株数; S 为样地面积 (m²); P 为大气降水量 (mm); T 为林内穿透降水量 (mm)。

1.3.2 单株蒸腾量测定及林分尺度转换 1) 乔木单株液流与蒸腾量的估计:2009 年 5—10 月,在华北落叶松人工林和华山松天然林样地内选择生长良好的样木,利用 SF-L 型热扩散液流探头(德国 Ecomatic 公司),连续测定 5 株华北落叶松、3 株华山松、1 株白桦、1 株红桦样木的树干液流,数据记录间隔为 5 min. 为避免太阳直接辐射引起的测定误差,树干液流的测定位置在树干北面的胸高处(1.3 m)。用生长锥抽取样品来确定树木边材面积,通过式(3)计算主要乔木树种的单株蒸腾量(E_s , mm · d⁻¹)。

$$E_s = J_s \cdot A_s$$

(3)

式中: J_s 为样木的液流速率 (mL · cm⁻² · min⁻¹); A_s 为样木的边材面积 (cm²)。

2) 灌木单株蒸腾量测定:在标准地选择主要灌木树种样木,用快速称量法测定典型天气下树冠不同部位叶片的蒸腾速率,计算单株蒸腾量 (W_T , mm · d⁻¹)^[23] :

$$W_T = E_l \cdot H \cdot O \cdot P \cdot C \cdot L$$

(4)

式中: E_l 为功能叶蒸腾速率的日平均值 (g · g⁻¹ · min⁻¹); H 为测定日实际日照时数 (h); O 为天气系数,本研究中:晴天为 1,下雨天为 0,多云天气为 0.7; P 为叶位系数,指同一枝条不同部位叶片日平均蒸腾速率与功能叶的比值; C 为树冠系数,指树冠不同方向和上下部位叶片日平均蒸腾速率与功能叶的比值; L 为树冠总鲜叶质量 (g)。

3) 单木到林分蒸腾量的尺度转换:用主要乔木树种的边材面积为空间纯量来实现林分蒸腾量的尺度放大,乔木层的林木蒸腾量 (E_c , mm · d⁻¹) 计算公式^[24] :

$$E_c = J_{\text{mean}} \cdot A_{\text{s-stand}}$$

(5)

式中: J_{mean} 为样木平均液流速率 (mL · cm⁻² · min⁻¹); $A_{\text{s-stand}}$ 为单位面积上累积的边材面积 (cm² · m⁻²)。

1.3.3 林下草本+土壤蒸散量测定 用自制微型蒸渗仪(直径 20 cm、高 30 cm) 24 h 连续测定其质量变化,分别在标准样地内的林窗和树冠下布设 9 个蒸渗仪,通过式(6)计算草本+土壤层的蒸散量 (ET , mm · d⁻¹)。

$$ET = \sum_{i=1}^n \Delta W_i / nS \times 10$$

(6)

式中: ΔW_i 为第 i 个微型蒸渗仪 2 次称量值之差 (kg); S 为蒸渗仪的开口面积 (m²); n 为测定个数。

1.3.4 气象因子测定 在林外空旷地设立 Weather-Hawk-232 型自动气象站(美国 Weatherhawk 公司),测定太阳辐射强度 (W · m⁻²)、空气温度 (°C)、空气相对湿度 (%)、风向 (deg)、风速 (m · s⁻¹) 和降水量 (mm) 等指标。

1.3.5 叶面积指数 (LAI) 测定 利用 LAI-2000 植物冠层分析仪(美国 LI-COR 公司)在生长季每月观测 3 次,并经过冠层分析仪校正。

1.3.6 Penman-Monteith 方程 森林生态系统蒸散理论公式^[25] :

$$E_0 = \frac{R_n \Delta + \rho C_p (e_a - e_d) / r_a}{\Delta + v(1 + r_s / r_a)}$$

(7)

式中: E_0 为森林生态系统蒸散力 (mm · d⁻¹); v 为干湿温度表湿度常数, $v = 0.61 \text{ mb} \cdot \text{°C}^{-1}$; Δ 为在平均湿球温度 t (°C) 时饱和水汽压曲线的斜率 (mb · °C⁻¹), $\Delta = 5430 e_s / 1.8 T^2$ ($T = t_a + 273.3$); e_s 为 t_a 时饱和水汽压 (kPa); e_d 为气温 t_a 时的实际水汽压 (kPa); C_p 为空气比热, $C_p \approx 1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$; ρ 为空气密度 (kg · m⁻³),查表可得; r_a 为空气动力学阻力; r_s 为冠层阻力 (r_a 、 r_s 数值和计算参见文献[26];为减少叶面积指数对气孔阻力的影响, r_s 的实际计算公式修正为: $r_s = r_{sp} / k \cdot \text{LAI}$, $k = 0.5$ ^[27]); R_n 为有效辐射量,计算公式如下:

$$R_n = R_0 - R_r - R_l = R_0(1 - \alpha) - R_l$$

(8)

式中: R_0 为总辐射; R_r 为反射辐射; α 为地面反射率; R_l 为热辐射,计算如下:

$$R_l = \varepsilon \sigma (t_a + 273)^4 \cdot (0.56 - 0.079 e_d^{0.5}) \cdot$$

$(0.1 + 0.9n/N)$ (9)

式中: ε 为灰度系数(≈ 0.95); $\sigma = 5.67 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; t_a 为近地表气温; n/N 为实际天文日照时数与可能时数的比, 反映云量情况. 如果大气总辐射(R_0) 和热辐射(R_1) 以能量密度单位 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 计, 则 R_n 是这些能量用于水分蒸发潜热的水当量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$), 考虑到水的汽化潜热 $L = 2500 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$, 则:

$$R_n = 864000 \cdot [R_0(1-\alpha) - R_1] \cdot L^{-1}$$
 (10)

1.4 数据处理

应用 Excel 和 SPSS 16.0 统计分析软件对数据进行处理. 乔木层蒸腾、灌木层蒸腾、土壤+草本层蒸散对比通过成对样本 T 检验分析差异是否显著 ($\alpha=0.05$), 单株日蒸腾量对比进行方差分析 (one-way ANOVA), 采用最小显著差数法 (LSD) 进行差异显著性检验 ($\alpha=0.05$). 文中数据均为平均值 \pm 标准差.

2 结果与分析

2.1 不同林分冠层截留量的月变化

通过对 2009 年 5—10 月 23 次单场降水的观测, 对比了 2 种林分每月的截留量 (图 1). 结果表明, 华北落叶松人工林与华山松天然林冠层截留量的变化趋势相同, 前者为 6.2~33.7 mm, 月平均截留率为 34.6%, 后者为 5.5~24.0 mm, 月平均截留率为 29.1%. 受 6 月降雨影响, 各林分冠层截留量为生长季最低值. 华北落叶松林冠层截留量明显高于华山松林, 这与 2 种林分的叶面积指数 (LAI) 差异有关 (表 2). 研究认为, 冠层截留量由降水量决定, 在降水量一定时, 林分 LAI 是影响冠层截留量的

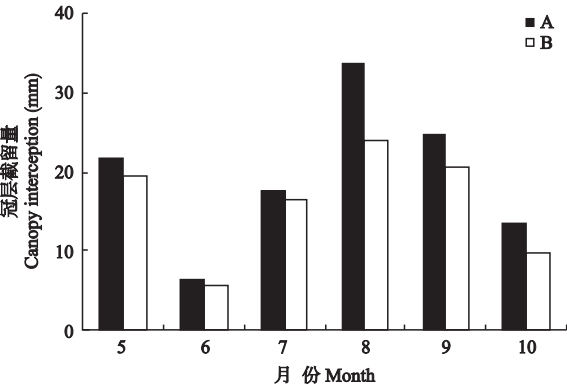


图1 不同林分冠层截留量的季节变化

Fig.1 Seasonal variation of canopy interception of different forest types.

A: 华北落叶松人工林 *L. principis-rupprechtii* plantation; B: 华山松天然林 *P. armandii* stand. 下同 The same below.

表2 不同林分叶面积指数的季节变化

Table 2 Seasonal variation of leaf area index (LAI) of different forest types

月份 Month	林型 Forest type	
	A	B
5	3.73±0.45	2.94±0.46
6	4.40±0.04	3.48±0.32
7	4.80±0.05	4.06±0.12
8	4.50±0.13	3.93±0.11
9	4.07±0.07	3.13±0.11
10	2.97±0.35	2.26±0.53

重要因素.

2.2 不同林分主要乔木树种的单株及林分蒸腾量

2.2.1 树干液流速率 华北落叶松、华山松和白桦的树干液流速率都呈明显的昼夜交替变化 (图 2). 通常, 日出后树干液流开始启动, 7:00—8:00 液流速率快速增强, 峰值多出现在 13:00—15:00, 19:00 以后液流速率减弱, 日落时液流速率降至最低.

各树种树干液流速率在白天基本表现为单峰曲线, 且峰值及形状受天气特征影响较大. 例如: 晴天 (8 月 4—5 日) 各树种的液流密度明显高于多云天气 (6 日) 和雨天 (7—9 日). 晴天时各树种树干液流速率的大小依次为: 白桦>华北落叶松>华山松; 而在阴雨天, 各树种液流速率差别较小. 这说明在湿润季节, 气象因子是树干液流速率的主要影响因素.

2.2.2 单株日均蒸腾量 由图 3 可以看出, 不同树种单株日均蒸腾量差异显著. 受树干液流速率和边材面积共同影响, 白桦单株日蒸腾远大于其他树种, 分别是华北落叶松、华山松、红桦的 2.0、2.2 和 4.3 倍. 华山松与华北落叶松相比, 5、6、10 月华山松日均蒸腾量较大, 7、8、9 月则是华北落叶松较大. 这与华山松为常绿树种有关.

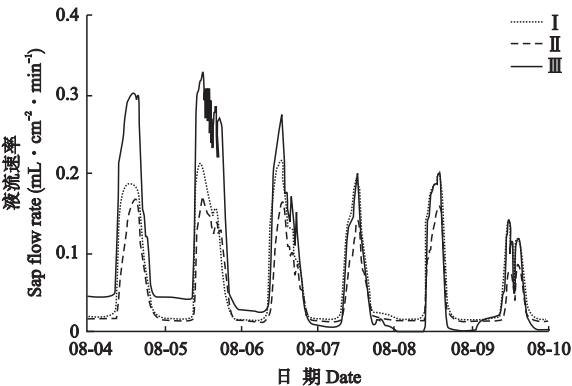


图2 主要乔木树种树干液流速率的日变化

Fig.2 Daily variation of sap flow rate of main tree species.

I: 华北落叶松 *L. principis-rupprechtii*; II: 华山松 *P. armandii*; III: 白桦 *B. platyphylla*. 下同 The same below.

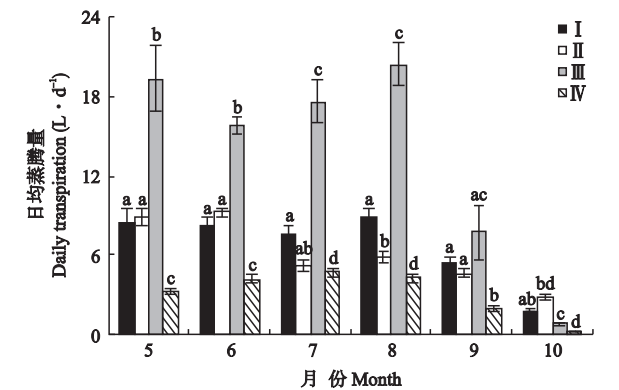


图3 主要乔木树种单株日均蒸腾量的季节变化
Fig.3 Seasonal variation of mean daily transpiration of main tree species.
IV: 红桦 *B. albo-sinensis*. 不同小写字母表示树种间的差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters indicated significant difference among tree species at 0.05 level.

2.2.3 冠层蒸腾量 两个样地主要乔木树种胸径-边材面积的相关性见表3. 对样地每木检尺算出样地的累积边材面积, 华北落叶松人工林固定样地的累积边材面积为 5195.4 cm², 是华山松天然林的 2.1 倍, 且由式(5)可知, 累积边材面积与蒸腾量成正相关.

在生长季, 2 种林分冠层日均蒸腾量差异极为显著(图4). 华北落叶松人工林冠层日均蒸腾量为

表3 主要乔木树种树干胸径(x)与边材面积(y)的关系
Table 3 Relationships between DBH (x) and sapwood area (y) of dominant tree species

树种 Tree species	回归方程 Regression	R^2	样品数 Sample number
I	$y = 1.17x^{1.6655}$	0.93	9
II	$y = 1.2125x^{1.7144}$	0.98	21
III	$y = 1.3262x^{1.6031}$	0.96	18
IV	$y = 1.2687x^{1.6046}$	0.89	11

I: 华北落叶松 *L. principis-rupprechtii*; II: 华山松 *P. armandii*; III: 白桦 *B. platyphylla*; IV: 红桦 *B. albo-sinensis*.

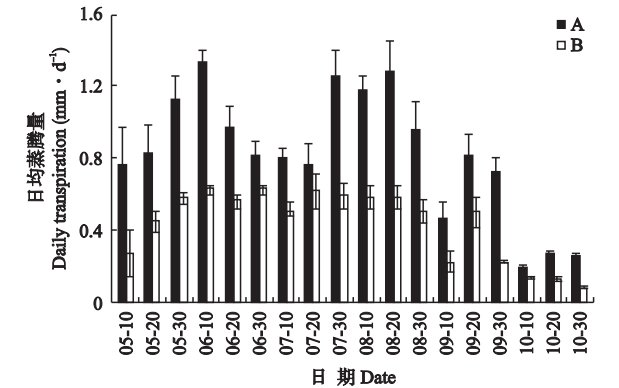


图4 不同林分的日均蒸腾量
Fig.4 Mean daily transpiration of different forest types.

0.25 ~ 1.33 mm · d⁻¹, 华山松天然林冠层日均蒸腾量为 0.07 ~ 0.63 mm · d⁻¹. 5 月各林分冠层日均蒸腾量随气温、太阳辐射回升而迅速增加; 受 6 月降雨影响, 2 种林分冠层蒸腾出现不同程度的回落, 进入雨季后蒸腾量迅速回升; 10 月降至生长季最低. 可以看出, 在少雨季节土壤水分是林分蒸腾量的限制因子; 当土壤水分较为充足时, 累积边材面积对林分蒸腾量影响较大.

2.3 不同林分的灌层蒸腾量和草本+土壤层蒸散量

不同林分灌层日均蒸腾量和草本+土壤层日均蒸散量差异显著(表4). 华北落叶松人工林中较低的灌木郁闭度使灌层蒸腾较低, 而草本+土壤层的蒸散较高, 这可能是由于林冠遮阴和较少降水可以补充浅层土壤水分, 使得林下蒸散受太阳辐射和土壤水分影响较小, 而受温度、湿度等影响较大, 使得灌木蒸腾量和草本+土壤层蒸散量与温度的季节变化一致.

2.4 不同林分的总蒸散量

华北落叶松人工林生长季总蒸散量 518.2 mm, 为同期降水量的 104.6%; 华山松天然林生长季总蒸散量 420.5 mm, 为同期降水量的 84.9%, 而且 2 种林分总蒸散量变化趋势相近(图5). 即 5 月随着气温回升和树木的快速生长, 总蒸散量较高; 6 月受降雨量的影响, 蒸散量较低; 7 月随着降水量增加, 总蒸散量回升, 至 8 月林分总蒸散量达到全年最大值; 到 9、10 月, 气温开始下降, 总蒸散量逐渐减小.

受林分垂直结构影响, 各蒸散分量所占比例存在明显差异. 华北落叶松人工林月均蒸散量为 86.4 mm, 其中, 冠层蒸散 44.8 mm (冠层截留 19.6 mm, 乔木蒸腾 25.2 mm), 灌木蒸腾量 4.4 mm, 草本+土壤层蒸散量 37.1 mm, 分别占 51.9%、5.1% 和

表4 不同林分灌层蒸腾量和草本+土壤层蒸散量季节变化
Table 4 Seasonal variation of mean daily transpiration of shrub layer and mean daily evapotranspiration of herbage and soil layer under different forest types

月份 Month	温度 Temperature (°C)	A		B	
		a	b	a	b
5	8.76	1.13±0.12	0.13±0.02	0.73±0.25	0.57±0.09
6	12.45	1.23±0.61	0.17±0.01	0.70±0.38	0.88±0.09
7	14.25	1.70±0.31	0.19±0.01	0.84±0.13	0.91±0.01
8	12.53	1.37±0.54	0.19±0.01	0.76±0.01	0.82±0.03
9	10.10	1.08±0.35	0.14±0.01	0.59±0.02	0.45±0.01
10	4.82	0.75±0.01	0.05±0.01	0.46±0.16	0.21±0.03

a) 草本+土壤层日均蒸散量 Mean daily evapotranspiration of herbage and soil layer; b) 灌木层日均蒸腾量 Mean daily transpiration of shrub layer.

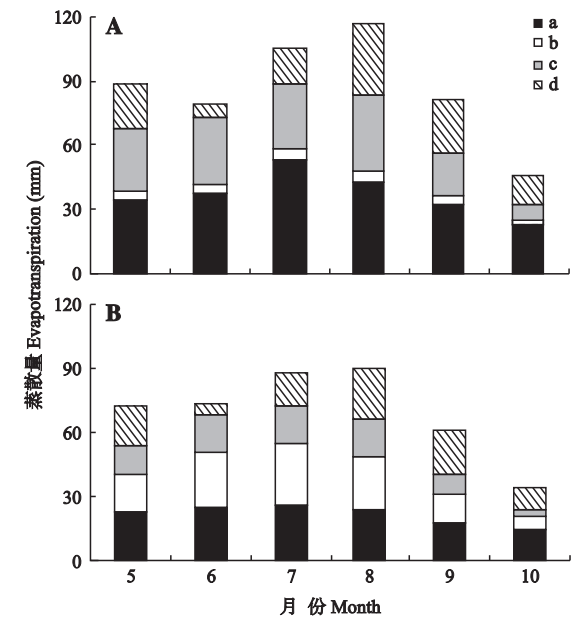


图5 不同林分的总蒸散量及组成的季节变化
Fig. 5 Seasonal variation of total evapotranspiration and its components under different forest types.

a) 草本+土壤层蒸散量 Evapotranspiration of herb and soil layer; b) 灌木层蒸腾量 Transpiration of shrub layer; c) 乔木层蒸腾量 Transpiration of tree layer; d) 冠层截留量 Canopy interception.

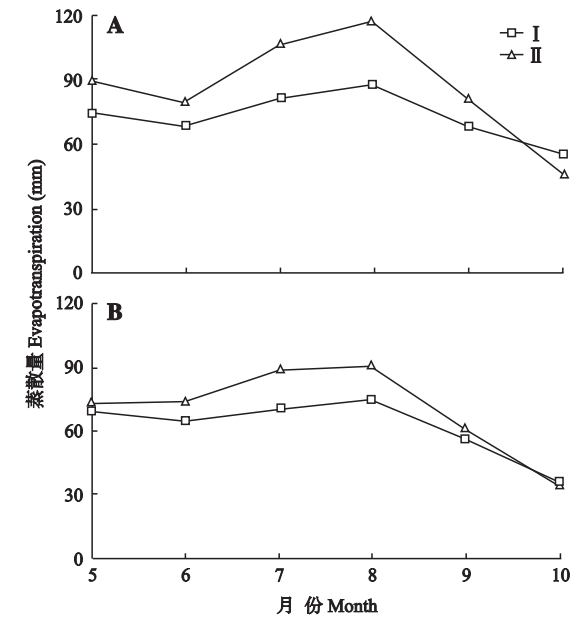


图6 不同林分蒸散的模拟值和实测值比较
Fig. 6 Comparison of evapotranspiration of different forest types between simulation and observation values.
I: 模拟值 Simulation value; II: 测量值 Observation value.

43.0%; 华山松天然林月均蒸散量 68.8 mm, 其中, 冠层蒸散 29.1 mm (冠层截留 15.9 mm, 乔木蒸腾 13.2 mm), 灌木蒸腾 19.6 mm, 草本+土壤层蒸散量 21.4 mm, 分别占 41.6%、27.9% 和 30.5%. 各分量对总蒸散量的贡献大小均为冠层蒸散>草本+土壤

层蒸散>灌木蒸腾.
2.5 Penman-Monteith 方程对林分蒸散的模拟
应用 Penman-Monteith 方程模拟的林分月蒸散量与其实测值具有较好的吻合度(图6). 整个生长季, 华北落叶松人工林和华山松天然林的模拟值较实测值低 82.1 和 49.3 mm, 相对误差分别为 15.8% 和 11.7%.
2.6 蒸散与降水的关系

由图7可以看出, 2种林分蒸散与降水之间可以通过线性方程进行较好地拟合($P<0.05$), 且其蒸散量均随降水量的增加而增加. 而且华北落叶松人工林中2个变量的斜率(0.33)明显大于华山松林(0.22), 说明华北落叶松人工林比华山天然林消耗更多的水分.

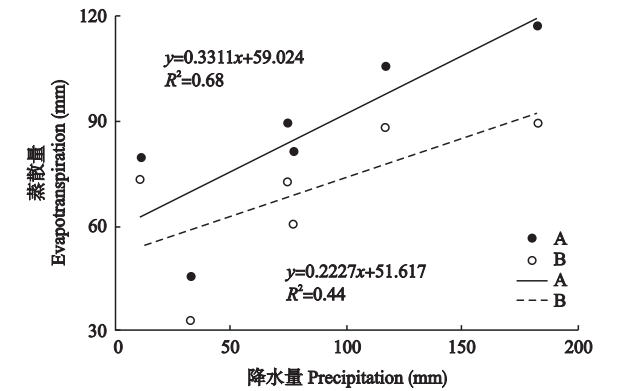


图7 不同林分蒸散量与降水量的相关关系
Fig. 7 Correlation of precipitation and evapotranspiration of different forest types.

3 讨 论

3.1 基于实测和模拟林分蒸散量的估计
有研究表明, 应用树干液流技术估算森林蒸散, 对地形起伏变化较大、下垫面情况复杂的山地森林具有不可替代的优势, 且可区分出蒸散的各个组分^[27-29]. 但是, 该方法存在着由于取样大小导致尺度上推结果的准确性问题. 与此相比, Penman-Monteith 方程理论比较完整, 考虑因素较为全面. 由于该方程对地形和下垫面的要求较高, 多用于草地和农作物蒸散的研究, 很难用于山地森林蒸散的研究之中. 近年来, 程根伟等^[25]采用 LAI 对该方程中的空气动力学阻力参数进行了修正, 并应用于贡嘎山亚高山林区冷杉林 (*Abies fabri*) 的森林蒸散研究中, 修正后的 Penman-Monteith 方程可以较为准确地估计山地森林蒸散. 本研究应用 2 种方法研究了华北落叶松人工林和华山松天然林的蒸散, 结果表明,

应用树干液流技术和 Penman-Monteith 方程对 2 种林分蒸散值之间的相对误差为 15.8% 和 11.7%，这与贺康宁等^[30]的可接受精度范围十分接近，说明树干液流测定技术可以用于估算山地林分蒸散及其分量。

3.2 人工林与天然林生长季的总蒸散量及其组成

有研究表明，与天然林相比，人工林一般具有较高的水分消耗总量^[31-32]。本研究对同一小流域内相邻华北落叶松人工林和华山松天然林蒸散的研究表明，人工林生长季总蒸散量(518.2 mm)远高于天然林(420.5 mm)，这与 Licata 等^[33]对北美黄松人工林(*Pinus ponderosa*)和天然柏木(*Austrocedrus chilensis*)林的水分利用特征研究结果基本一致。Licata 等^[33]发现，湿润年和干旱年黄松人工林的耗水量分别比柏木天然林高 64.0% 和 33.0%。黄松较高的单株蒸腾速率是引起人工林水分利用多于天然柏木林的主要原因^[33]。在本研究中，尽管华北落叶松的液流速率要低于华山松，但由于单位林地内的边材面积较大，导致输出更多的水分和较高的冠层蒸腾速率。王力等^[34]对子午岭刺槐(*Robinia pseudoacacia*)人工林和山杨(*Populus davidiana*)、辽东栎天然林的研究表明，郁闭度为 0.7 的人工林的耗水量明显大于郁闭度为 1.0 的天然林。Hebert 和 Jack^[35]对美国东德克萨斯州火炬松(*Pinus taeda*)林分冠层分析发现，LAI 与蒸散之间的相关性很低($R^2=0.06$)。本研究则认为，人工林较大的郁闭度和 LAI 可能是引起高蒸散量的重要原因。另外，王进鑫等^[36]、郭忠升和邵明安^[15]在黄土高原丘陵区的研究结果显示，人工林较高的耗水量会造成严重的水分亏缺、土壤干层和植被衰退。本研究中，华北落叶松人工林并没有造成林地严重的水分亏缺，可能因为研究地属于半湿润区，冬季降雪可以补充生长季的土壤水分亏缺有关。尽管如此，人工林快速生长及其较高的耗水量，可能使该区人工林可持续经营和区域用水资源安全存在隐患。

综上所述，同一小流域内华北落叶松人工林与华山松天然林的蒸散及其分量组成特征差异较大。除受树木生理特征的影响外，林分结构决定了林分总蒸散量及分量的组成比例。在同一气候类型下，华北落叶松人工林生长季的总蒸散量为 518.2 mm，其耗水量要远高于华山松天然林(420.5 mm)。人工林乔木层较大的密度结构不仅增加了水分消耗量，而且林下较低的覆盖也增加了土壤水分的蒸发。随着生长季内降雨量的增加，人工林将比天然林蒸散更

多的水分。目前，位于六盘山南侧半湿润区的华北落叶松人工林尚未引发明显的土壤水分亏缺等问题，但是人工林快速生长导致的耗水量增加可能成为影响该区森林可持续经营和区域用水资源安全的潜在隐患。

参考文献

[1] Zhang X-J (张新建), Yuan F-H (袁凤辉), Chen N-N (陈妮娜), et al. Energy balance and evapotranspiration in broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(3): 607-613 (in Chinese)

[2] Bonan GB. Forests and climate change: Forcings, feedbacks and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, **320**: 1444-1449

[3] Oishi AC, Oren R, Stoy PC. Estimating components of forest evapotranspiration: A footprint approach for scaling sap flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, **148**: 1719-1732

[4] Zhao P (赵平), Sun G-C (孙谷畴), Ni G-Y (倪广艳), et al. Seasonal differences in the leaf hydraulic conductance of mature *Acacia mangium* in response to its leaf water use and photosynthesis. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(1): 49-56 (in Chinese)

[5] Pfautsch S, Bleby TM, Rennenberg H. Sap flow measurements reveal influence of temperature and stand structure on water use of *Eucalyptus regnans* forests. *Forest Ecology and Management*, 2010, **259**: 1190-1199

[6] Baldocchi DD, Law BE, Anthoni PM. On measuring and modeling energy fluxes above the floor of a homogeneous and heterogeneous conifer forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, **102**: 187-206

[7] Liu Z-J (刘志军), Zhang W-J (张万军), Cao J-S (曹健生), et al. Evapotranspiration in *Punica granatum* stand in Lower Taihang Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(6): 879-881 (in Chinese)

[8] Staudt K, Serafimovich A, Siebicke L, et al. Vertical structure of evapotranspiration at a forest site: A case study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, **151**: 709-729

[9] Giambelluca TW, Scholz FG, Bucci SJ, et al. Evapotranspiration and energy balance of Brazilian savannas with contrasting tree density. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, **149**: 1365-1376

[10] Guo R-P (郭瑞萍), Mo X-G (莫兴国). Differences of evapotranspiration on forest, grassland and farmland. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(8): 1751-1757 (in Chinese)

[11] Ewers BE, Gower ST, Bond LB. Effects of stand age and tree species on canopy transpiration and average stomatal conductance of boreal forests. *Plant, Cell and Environment*, 2005, **28**: 660-678

[12] Iida S, Tanaka T, Sugita M. Change of evapotranspiration components due to the succession from Japanese red pine to evergreen oak. *Journal of Hydrology*, 2006, **326**: 166-180

- [13] Friedman ST. Environmental aspects of the intensive plantation/reserve debate. *Journal of Sustainable Forest*, 2006, **21**: 59–73
- [14] Peng S-L (彭舜磊), Wang D-X (王得祥), Zhao H (赵辉), *et al.* Discussion the status quality of plantation and near nature forestry management in China. *Journal of Northwest Forestry University* (西北林学院学报), 2008, **23**(2): 184–188 (in Chinese)
- [15] Guo Z-S (郭忠升), Shao M-A (邵明安). Effect of artificial *Caragana korshinskii* forest on soil water in the semiarid area of Loess hilly region. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2010, **46**(12): 1–7 (in Chinese)
- [16] Wang Y-H (王彦辉), Xiong W (熊伟), Yu P-T (于澎涛), *et al.* Study on the evapotranspiration of forest and vegetation in dryland. *Science of Soil and Water Conservation* (中国水土保持科学), 2006, **4**(4): 19–25 (in Chinese)
- [17] Li J-H (李俊辉), Li Y-Y (李秧秧), Zhao L-M (赵丽敏), *et al.* Effects of site conditions and tree age on *Robinia pseudoacacia* and *Populus simonii* leaf hydraulic traits and drought resistance. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(9): 2397–2403 (in Chinese)
- [18] Macfarlane C, Bonda C, White DA, *et al.* Transpiration and hydraulic traits of old and regrowth eucalypt forest in southwestern Australia. *Forest Ecology and Management*, 2010, **260**: 96–105
- [19] Xiong W (熊伟), Wang Y-H (王彦辉), Xu D-Y (徐德应). Regulations of water use for transpiration of *Larix principis-rupprechtii* plantation and its response on environmental factors in southern Ningxia hilly area. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2003, **39**(2): 1–7 (in Chinese)
- [20] Wang S-G (王双贵), Zhao X-E (张晓娥), Zhang J-J (张建军), *et al.* Research on *Larix principis-rupprechtii* artificial woods' reasonable density of partition in Liupan Mountains area. *Journal of Ningxia Agricultural College* (宁夏农学院学报), 2002, **23**(3): 12–14 (in Chinese)
- [21] Xiong W (熊伟), Wang Y-H (王彦辉), Yu P-T (于澎涛), *et al.* Variation of sap flow among individual trees and scaling up for estimation of transpiration of *Larix principis-rupprechtii* stand. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2008, **44**(1): 34–40 (in Chinese)
- [22] Xu L-H (徐丽宏), Shi Z-J (时忠杰), Wang Y-H (王彦辉), *et al.* Canopy interception characteristics of main vegetation types in Liupan Mountains of China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(10): 2487–2493 (in Chinese)
- [23] Xiong W (熊伟), Wang Y-H (王彦辉), Yu P-T (于澎涛), *et al.* Evapotranspiration of natural *Quercus liaotungensis* and *Tilia paucicostata* secondary stands in Liupan Mountains of Ningxia. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(9): 1628–1632 (in Chinese)
- [24] Kostner B. Evaporation and transpiration from forests in central Europe: Relevance of patch-level studies for spatial scaling. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2001, **76**: 69–82
- [25] Cheng G-W (程根伟), Yu X-X (余新晓), Zhao Y-T (赵玉涛), *et al.* Evapotranspiration simulation of sub-alpine forest area in Gongga Mountain. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2003, **25**(1): 23–27 (in Chinese)
- [26] Sun L (孙林), Xiong W (熊伟), Wang Y-H (王彦辉), *et al.* Use of storage water in *Larix principis-rupprechtii* and its response to soil water content and potential evapotranspiration: A modeling analysis. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2011, **35**(4): 411–421 (in Chinese)
- [27] Wullschlegel SD, Meinzer FC, Vertessy RA. A review of whole-plant water use studies in trees. *Tree Physiology*, 1998, **18**: 499–512
- [28] Liu J-T (刘京涛), Liu S-R (刘世荣). Advances and perspectives in evapotranspiration studies. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2006, **42**(6): 108–114 (in Chinese)
- [29] Rousseaux MC, Figuerola PI, Tedesco GC, *et al.* Seasonal variations in sap flow and soil evaporation in an olive (*Olea europaea* L.) grove under two irrigation regimes in an arid region of Argentina. *Agricultural Water Management*, 2009, **96**: 1037–1044
- [30] He K-N (贺康宁), Tian Y (田阳), Zhang G-C (张光灿). Modeling of the daily transpiration variation in locust forest by Penman-Monteith equation. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **32**(2): 251–258 (in Chinese)
- [31] Farley KA, Jobbagy EG, Jackson RB. Effects of afforestation on water yield: A global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology*, 2005, **11**: 1565–1576
- [32] Nosetto MD, Jobbagy EG, Paruelo JM. Land-use change and water losses: The case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina. *Global Change Biology*, 2005, **11**: 1101–1117
- [33] Licata JA, Gyenge JE, Fernandez ME, *et al.* Increased water use by ponderosa pine plantations in northwestern Patagonia, Argentina compared with native forest vegetation. *Forest Ecology and Management*, 2008, **255**: 753–764
- [34] Wang L (王力), Shao M-A (邵明安), Wang Q-J (王全九), *et al.* Comparison of soil desiccations in natural and acacia forests in the Ziwuling Mountain of the Loess Plateau. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* (西北植物学报), 2005, **25**(7): 1279–1286 (in Chinese)
- [35] Hebert MT, Jack SB. Leaf area index and site water balance of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) across a precipitation gradient in East Texas. *Forest Ecology and Management*, 1998: 273–282
- [36] Wang J-X (王进鑫), Huang B-L (黄宝龙), Luo W-X (罗伟祥). Compensation and rehabilitation characteristics of soil water deficit at a planted forest site of the drought-prone Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(11): 2395–2401 (in Chinese)

作者简介 曹恭祥, 1984年生, 男, 博士研究生。主要从事干旱、半干旱地区森林生态水文学、树木生理生态学研究, 发表论文4篇。E-mail: caogongxiang1984@163.com

责任编辑 李凤琴