

DOI:10.12403/j.1001-1498.20220218

六盘山华北落叶松林的结构随林龄变化及其水文影响

徐小勤, 于澎涛*, 王彦辉, 徐丽宏, 于艺鹏, 刘泽彬

(中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 北京 100091)

摘要: [目的] 探讨林分结构随林龄的变化及其所带来的水文影响, 为六盘山半干旱区森林植被建设和经营管理提供理论依据。[方法] 在六盘山半干旱区叠叠沟小流域, 以主要人工林类型—华北落叶松人工林为研究对象, 基于 1993—2002 年的日气象数据, 应用林分结构耦合模型和 BROOK90 生态水文模型, 通过情景模拟, 得到植被结构 (平均树高、胸径、郁闭度、LAI) 随林龄的变化, 及其对水分平衡分量 (截留量、蒸腾量、土壤蒸发量、产流量) 的影响。[结果] 华北落叶松林随林龄的增加可分为快速生长期 (林龄 5~15 a)、缓慢生长期 (林龄 15~40 a) 和稳定期 (林龄大于 40 a)。在快速生长期, 林分平均树高、平均胸径、郁闭度和冠层 LAI 均随林龄的增加而快速增大, 年均增长率分别为 $0.48 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $0.54 \text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ 、0.03、0.19; 在缓慢生长期, 林分平均树高、平均胸径和郁闭度呈缓慢增大趋势, 而冠层 LAI 则呈先增大后减小的趋势; 在稳定期, 林分结构基本稳定。在快速生长期, 年均截留量和蒸腾量随林龄增加而快速增大, 年均增长率分别为 1.91 、 $24.13 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$; 年均土壤蒸发量和产流量随林龄增加快速减小, 其年均减小速率为 10.58 、 $14.88 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。在缓慢生长期, 年均蒸腾量、土壤蒸发量和产流量随林龄的变化减慢, 并在林龄 30 a 时趋于稳定, 其年均变化率分别为 0.62 、 -0.75 、 $-0.76 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。[结论] 六盘山半干旱区华北落叶松人工林在林龄小于 30 a, 特别是林龄小于 15 a 时, 林分结构不断变化, 显著影响人工林的生态水文功能。在林龄 30 a 后, 林分结构稳定, 水分平衡分量也趋于稳定, 在林业综合管理中可不必再考虑林龄的影响。

关键词: 华北落叶松林; 林龄; 水文功能; BROOK90 模型

中图分类号: S718.54, S715

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2023)01-0109-08

宁夏六盘山作为我国西北半干旱地区植被建设的关键区, 自上世纪 80 年代后期就开始了长期的造林活动。虽然造林后植被覆盖有了明显提高, 但是也造成了径流的显著减少, 且这种径流减少在我国半干旱区更明显, 可达到 50% 以上^[1-3]。要协调林水之间这个矛盾, 需要厘清造林对水文功能的影响, 尤其是植被结构的改变如何影响水文功能。

研究表明, 林分结构会影响森林的生态水文功能^[4]。林冠的截留再分配过程受树高、胸径、LAI 等林分特征^[5-7] 和降水量、降水强度等因素^[6,8-9] 的

影响, 其中, 降水量和林冠 LAI 是主要影响因素^[10-11]。王磊等^[12] 对华北石质山区不同郁闭度的侧柏人工林的研究发现, 随着郁闭度的增加, 林冠截留量逐渐增大。此外, 林冠结构不仅影响冠层截留, 也会影响到林分的蒸散^[13-14], 而且林分的类型和结构也与蒸散及其组成分量有密切的关系^[15-16], 如 lida 等^[17] 研究同一地区不同时期的红松林, 发现各蒸散分量随林分结构的改变而发生明显的变化。林分结构也会直接或间接地影响到产流量, 如魏曦等^[18] 在晋西黄土区油松人工林的量化研究发

收稿日期: 2022-04-28 修回日期: 2022-05-12

基金项目: 中国林业科学研究院基金项目 (CAFYBB2021ZW002); 国家自然科学基金项目 (U20A2085、U21A2005、42161144008、41971038、32171559)

* 通讯作者: 于澎涛, 博士, 研究员。主要研究方向: 森林水文。Email: yupt@caf.ac.cn

现,产流量受林分结构的影响较大,总影响系数为0.986;尤海舟等^[19]研究冀北山地的蒙古栎天然次生林的产流量,发现除降水外,郁闭度、冠幅、枯落物厚度等因素都会影响产流量,且郁闭度的影响比冠幅大。

上述研究多是通过对比研究得到的,直接比较了不同林分结构下的水文影响。然而,林分结构随林龄在不断变化,这包括林冠层、林下层及土壤层等一系列的林分结构指标^[20-22]和树高、胸径等的变化^[23-24]。由于这些林分结构指标随林龄的变化,森林的水文功能也在不断变化,然而,有关人工林随林龄所发生的结构变化和其水文影响却由于森林的寿命较长,常常几十年,甚至更长,难以连续同步观测其结构和其水文功能在整个生命过程中的变化,但这对预测和管理林水关系又是十分必要的;作为管理者,如果在造林之前就能了解和预测森林结构和水文功能随林龄的变化,那么造林等森林管理行为将会更加有效和有的放矢。因此,通过生态水文模型等方法,模拟森林的结构随林龄的变化和该变化所带来的水文影响就显得十分必要。

叠叠沟小流域是六盘山典型的半干旱区,而华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr.)是该流域的主要造林树种,也是目前主要的人工林类型。在该区域现有的林水关系研究中,多是研究某一个时段或近几年的变化,不能反映人工林的结构随林龄的变化所带来的水文影响。因此本研究以叠

叠沟小流域的华北落叶松人工林为研究对象,应用前人构建的该小流域华北落叶松人工林的林分结构耦合模型和生态水文模型 BROOK90,模拟植被结构(平均树高、胸径、郁闭度、LAI)随林龄的变化及其对各水分平衡分量(截留量、蒸腾量、土壤蒸发量、产流量)的影响,旨在为六盘山半干旱区的植被建设和经营管理提供理论依据。

1 研究区概况

叠叠沟小流域(106°4′~106°9′ E, 35°54′~35°58′ N),是六盘山西北部一个具有代表性的小流域,海拔1 973~2 615 m,为典型的半干旱大陆性季风气候,年平均气温5.9℃,年均降水量445 mm,其中80%集中在6—10月的雨季。土壤类型以黄土和灰褐土为主,且土壤厚度变化大,从上坡的20 cm到坡脚的2 m以上不等。

在叠叠沟小流域下游的阴坡坡脚处,设置了一个30 m×30 m的固定样地(表1)。样地植被为1982年种植的华北落叶松林,林下没有灌木生长,主要是草本,如蒿属植物(*Artemisia* spp.)等。土壤为砂壤土,且土壤较厚,大于1 m。2018年,林分密度为1 300株·hm⁻²,平均胸径为12.1 cm,平均树高为11.5 m,林分冠层LAI约为4.3,林冠郁闭度0.8,草本覆盖度约0.8。本研究 BROOK90模型的率定和检验均以此样地的实测数据进行。

表1 华北落叶松人工林固定样地基本信息

Table 1 Basis information of the fixed Larch plantation plot

经度 Longitude (°E)	纬度 Latitude (°N)	海拔 Elevation/ m	坡向 Aspect/°	坡度 Slope/°	坡位 Slope position	平均胸径 Mean DBH/ cm	平均树高 Mean tree height/m	LAI	郁闭度 Canopy density	林分密度 Stand Density/ (tree·hm ⁻²)	土壤厚度 Soil Thickness/ cm
106.147	35.972	2 050	330	11	下	12.1	11.5	4.3	0.8	1 300	>200

2 研究方法

2.1 林分结构耦合模型

本研究引用韩新生基于叠叠沟小流域实地调查的华北落叶松林的基本林分结构特征(树高、胸径、郁闭度、LAI)所构建的林分结构多因子耦合模型^[25],模型中的函数关系如表2所示。本研究中植被结构的变化为该模型的计算结果。

2.2 BROOK90模型

2.2.1 模型简介 BROOK 90模型是确定的、基

于过程的集总式生态水文模型,它不考虑水平方向上流域或者其他模拟对象的差异和相邻区域间横向的水分交换,只在垂直方向上详细刻画水分的运动与传输。该模型在一个点尺度上或在一个小而均匀的流域内,在一天的时间步长上估计水文循环中降水-蒸发-径流部分的陆地阶段。

BROOK90通过叶面积指数和植被冠层截留容量的函数计算截留量,利用改进的Penman-Monteith方法——Shuttleworth-Wallace方程计算

表 2 林分结构耦合模型的表达式^[25]

Table 2 Expressions for the coupled model of the stand structure

林分结构指标 Stand structure index	模型表达式 Model expression	R^2
平均树高 Average tree height (H)	$H = 33 \times [1 - \exp(-0.0276 \times \text{age}^{1.41})] \times \exp(-4.24 \times 10^{-29} \times \text{den}^{7.27}) \times \exp(-1.13 \times 10^{-8} \times \text{sa}^{3.56}) \times [1 - \exp(-0.142 \times \text{sth}^{0.201})]$	0.804
平均胸径 Mean diameter at breast height (DBH)	$DBH = 110 \times [1 - \exp(-0.0206 \times \text{age}^{1.38})] \times \exp(-0.00015 \times \text{den}^{0.969}) \times \exp(-5.93 \times 10^{-5} \times \text{sa}^{1.62}) \times [1 - \exp(-0.101 \times \text{sth}^{0.969})]$	0.716
郁闭度 Canopy density (CD)	$CD = [1 - \exp(-0.0151 \times (\text{den}^{0.684}))] \times [1 - \exp(-0.0446 \times \text{age}^{1.16})] \times \exp(-3.16 \times 10^{-10} \times \text{sa}^{4.36}) \times [1 - \exp(-0.0365 \times \text{sth}^{0.914})]$	0.736
叶面积指数 Leaf area index (LAI)	$LAI = 5.5 \times [1 - \exp(-0.584 \times \text{den}^{0.26})] \times \left\{ \begin{array}{l} 1.1 \times [1 - \exp(-0.0756 \times \text{age})]^{1.75} \\ -0.55 \times [1 - \exp(-0.0878 \times \text{age})]^{17.1} \end{array} \right\} \times \exp(-5.22 \times 10^{-15} \times \text{sa}^{6.74}) \times [1 - \exp(-0.0529 \times \text{sth}^{0.769})]$	0.846

注: 模型表达式中的“age、den、sa、sth”分别表示“林龄、林分密度、坡向、土壤厚度”

Note: "age, den, sa, sth" in the model expression represent "stand age, stand density, slope aspect, soil thickness" respectively.

蒸腾和蒸发, 根据 Brooks 和 Corey 改进的方法定义土壤-水分特征^[26]。通过 Darcy-Richards 方程模拟土壤中的水分运动^[27]。

2.2.2 模型率定和检验 主要地形、土壤参数 (如纬度、坡度、土壤厚度、石砾含量、田间持水量) 和植被参数 (如树高、LAI、郁闭度、根生物

量及其垂直分布) 由华北落叶松人工林固定样地实测所得 (表 1), 无法直接测量得到的参数 (如植被最大导水率、快速径流系数 QFPAR 和 QFFC) 通过固定样地实测的土壤含水量进行校准得到 (表 3)。其余参数由于对华北落叶松人工林的水文变化不敏感, 根据 BROOK 90 模型手册设为默认值。

表 3 叠叠沟小流域 BROOK90 参数率定值

Table 3 The values of parameters calibrated by BROOK90 at Diediegou

最大叶片导度 GLMAX/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	植被最大导水率 MXKPL/ ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{mpa}^{-1}$)	土壤含水量大于田间持水量时的 快速径流系数 QFPAR	田间持水量时的快速 径流系数 QFFC	入渗系数 INFEXP
2	12	0.35	0.3	0.1

利用华北落叶松人工林样地 2018 年的实测土壤含水量数据进行模型率定, 2019 年的土壤含水量数据验证模型。在模型率定和检验期间, 用 2018 年和 2019 年叠叠沟的气象数据驱动模型。采用 Nash-Sutcliffe 效率系数 (E)、绝对误差 (A) 和相对误差 (B) 来评价模型率定和检验的精度。计算公式如下:

$$E = 1 - \frac{\sum (MW_i - SW_i)^2}{\sum (MW_i - MW_{av})^2} \quad (1)$$

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n |MW_i - SW_i|}{n} \quad (2)$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n |MW_i - SW_i| / MW_i}{n} \quad (3)$$

式中: MW_i 为实测土壤含水量, SW_i 为模型模拟土壤含水量, MW_{av} 为整个模拟期间实测土壤含水量的平均值, n 为实测次数。

2.3 情景制定

为了厘清林龄对林分结构和各水分平衡分量的影响, 以华北落叶松人工林固定样地为例, 制定了包含不同林龄的情景。在该情景中, 坡向为 22.5° , 林分密度为 $1\ 300 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$, 土壤厚度为 100 cm , 设置了 12 种林龄情景, 其中, 林龄的变化范围为 $5 \sim 60 \text{ a}$, 每 5 a 为一个时间步长。

2.4 情景模拟

先用林分结构耦合模型计算得到每个林龄情景下的森林结构参数, 如树高、胸径、郁闭度和 LAI 等, 再将上述结构参数代入到 BROOK90 模型中, 模拟每个情景下的水文过程。所有的模拟均基于 1993—2002 年固原气象站的日气象数据进行, 然后再基于每日的水文过程得到年尺度上的截留量、蒸腾量、土壤蒸发量等各水分平衡分量。

3 结果与分析

3.1 模型率定和检验

图 1 表明, 在华北落叶松人工林固定样地内, BROOK90 模型模拟的土壤含水量与实测土壤含水量的变化趋势和峰值基本一致。率定期间 (2018-06-10—2018-10-27) 和检验期间 (2019-05-28—2019-11-01) 的 Nash-Sutcliffe 效率系数分别为 0.72 和 0.69。样地各土层土壤水分的模拟相对误差均不超过 15%, 绝对误差均小于 5% (表 4)。

3.2 林分结构随林龄的变化

基于林分结构耦合模型模拟结果表明, 本华北落叶松人工林的林分平均树高和郁闭度随林龄的变

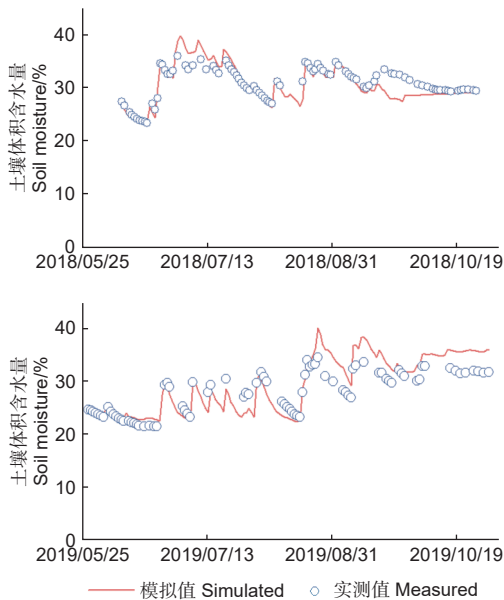


图 1 率定和检验期间华北落叶松人工林样地 0~60 cm 土层土壤体积含水量实测值与模拟值

Fig. 1 The value of measured and simulated soil moisture in 0~60 cm of larch plantation plot in the calibration and validation period

化均表现为林龄 5~15 a 时随林龄的增加快速增大, 之后增速变缓, 在 35 a 之后, 平均树高随林龄的增加不再发生明显变化, 而林分郁闭度则比平均树高晚 5 a 达到稳定; 平均胸径在林龄 5~20 a 时随林龄的增加而快速增大, 在林龄 45 a 之后达到稳定; 冠层 LAI 随林龄的变化趋势为, 在林龄 5~20 a 时随林龄的增加快速增大, 之后增速渐缓, 在林龄 30 a 达到最大值, 之后逐渐减小, 在林龄 60 a 后稳定在最大值的约 3/4 处 (图 2)。在快速生长期 (林龄 5~15 a), 林分平均胸径的增长速率最快, 为 $0.54 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$; 其次是平均树高, 为 $0.48 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$; 冠层 LAI 和郁闭度的增长速率较慢, 年均增长率分别为 0.19 和 0.03。在林龄 5~60 a 时, 林分平均树高、平均胸径、郁闭度和冠层 LAI 的变化范围分别为 2.3~10.0 m、2.3~13.3 cm、0.20~0.80、0.65~3.40。

3.3 水分平衡分量随林龄的变化

林分结构的变化会改变水文过程和各水分平衡分量。因此, 年均截留量随林龄的变化表现为林龄 5~20 a 时随林龄的增加快速增大, 之后增速变缓, 在林龄 30 a 达到最大, 之后随林龄的增加而略减小, 在林龄 60 a 之后趋于稳定。年均蒸腾量随林龄的变化表现为林龄 5~10 a 时随林龄的增加而快速增大, 在 10~25 a 时增速变缓, 25 a 之后不再随林龄增加发生明显变化。与年均蒸腾量相反, 年均土壤蒸发量和产流量随林龄的变化均表现为在林龄 5~10 a 时随林龄的增加而快速减小, 林龄 10 a 之后, 减速变缓, 在林龄 30 a 之后达到稳定 (图 3)。在快速增长期, 年均截留量、蒸腾量、土壤蒸发量和产流量的变化速率分别为 1.91、24.13、-10.58、-14.88 $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$; 在缓慢增长期, 年均蒸腾量、土壤蒸发量和产流量的变化速率

表 4 华北落叶松人工林样地不同土层土壤水分模拟值与实测值的误差

Table 4 Errors of simulated soil moisture in different soil layers in relation to measured values in the larch plantation plot.

土层 Soil layer/cm	率定 Calibration			检验 Validation		
	天数 Number of days	平均绝对误差 (A) Mean absolute errors/%	平均相对误差 (B) Mean relative errors/%	天数 Number of days	平均绝对误差 (A) Mean absolute errors/%	平均相对误差 (B) Mean relative errors/%
0~10	34	2.01	6.40	30	2.24	7.36
10~20	34	2.00	6.72	30	3.73	14.94
20~40	34	1.97	6.49	30	2.80	9.72
40~60	34	1.63	5.30	30	2.56	8.76

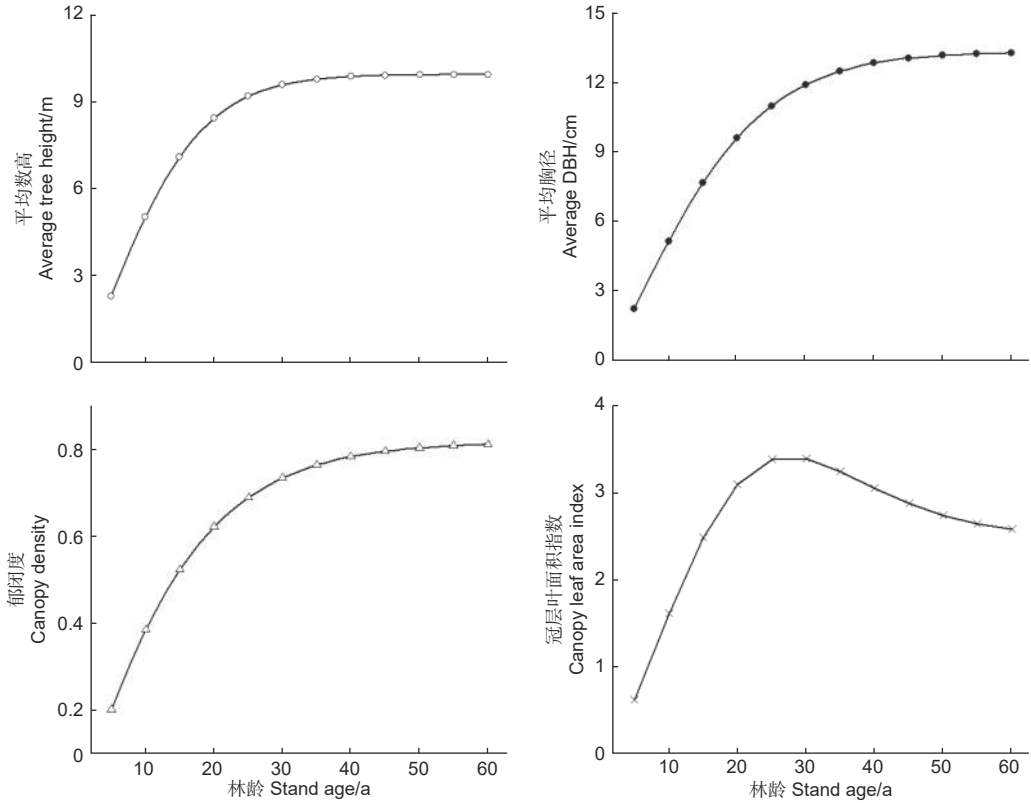


图 2 华北落叶松固定样地林分结构随林龄的变化
Fig. 2 Variation of stand structure with age in the fixed larch plot

分别为 0.62、-0.75、-0.76 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。在林龄 5~60 a 时, 年截留量、年蒸腾量、年土壤蒸发量和年产流量的变化范围分别约为 2.5~36.5、65.0~316.5、23.5~140.0、33.5~195.0 mm; 达到稳定后, 分别占年均降水量 (410 mm) 的 8.5%、77.2%、5.7%、和 8.2%。

4 讨论

4.1 林分结构随林龄的变化

华北落叶松人工林平均树高与胸径随林龄的变化过程符合林木生长的“S”型曲线, 但两者的生长过程不同步, 这与前人研究其他地区的华北落叶松林的结果大致相同^[28]; 且在其他树种上也有相似结果, 如刘菲等^[29]发现油松人工林树高快速生长期比胸径早 2 a。林分郁闭度随林龄的动态变化研究报道较少, 本研究中, 郁闭度随林龄增加不断增大, 最终趋于稳定。在本研究区, 林龄 5~15 a 之前, 郁闭度随林龄增加而快速增大, 但也有研究发现, 在半湿润区, 华北落叶松人工林的郁闭度在林龄 20~30 a 时随林龄增加而快速增大^[30]; 平均树高和胸径随林龄的变化趋势基本一致, 在林龄

30 a 以前快速增长, 比本研究区多延续了 15 a^[31], 这可能与本研究区的半干旱气候有关, 干旱导致快速生长阶段提前结束。

4.2 各水分平衡分量随林龄的变化及其在林水综合管理中的建议

本研究发现, 在快速生长阶段 (林龄 5~15 a), 年截留量和年蒸腾量的年均增加量分别为 1.9 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 24.0 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 占森林稳定阶段年截留量和年蒸腾量的 5.5% 和 7.5%; 年土壤蒸发量和年产流量的年均减少量分别为 10.6 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 15.0 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 占森林稳定阶段年土壤蒸发量和年产流量的 45.3% 和 44.8%。在缓慢生长期 (林龄 15~40 a), 年截留量、年蒸腾量、年土壤蒸发量和年产流量在林龄 15~30 a 间的平均增加 (减少) 量分别为 0.99、0.62、0.75、0.76 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 并在林龄 30 a 左右达到最大 (最小) 值, 且保持基本稳定。由此可知, 林龄大于 30 a 后, 可不考虑林龄对本研究区华北落叶松人工林水文功能的影响; 在林龄小于 30 a 时, 尤其是小于 15 a 时, 各水分平衡分量明显变化, 此时林龄对水文功能的影响必须加以考虑, 即在半干旱区华北落叶松人工林

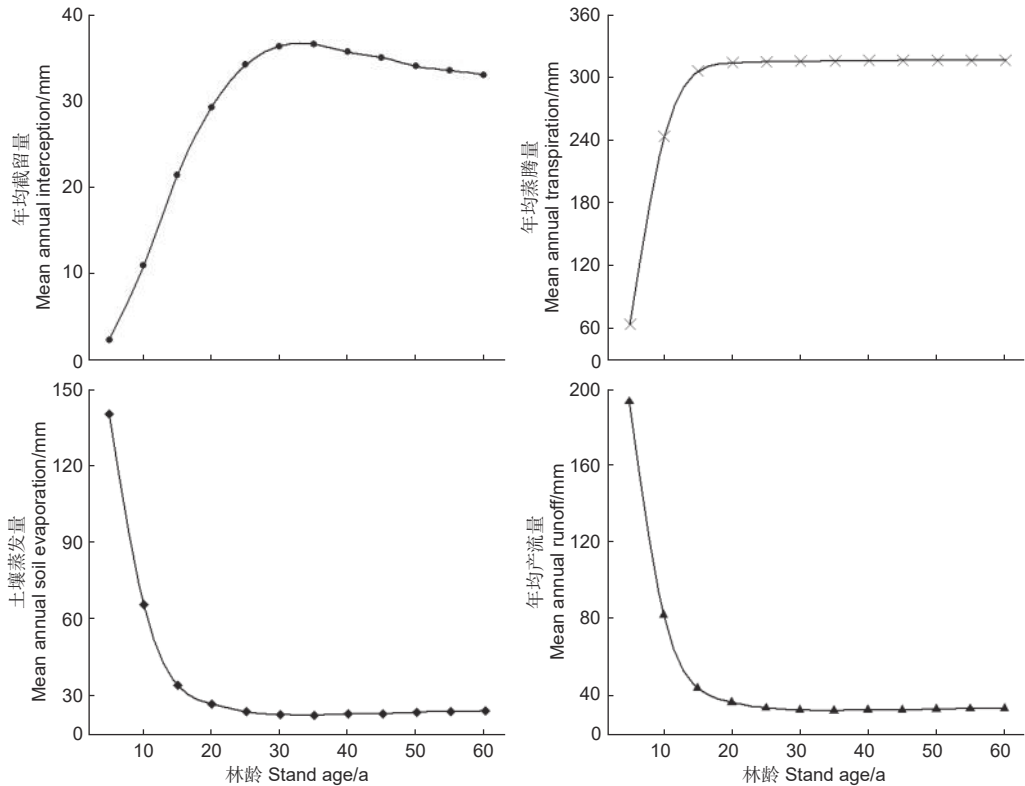


图 3 华北落叶松固定样地年水分平衡分量随林龄的变化

Fig. 3 Variation of annual water balance components with age in the fixed larch plot

的管理和建设过程中,考虑中龄林,尤其是幼龄林对水文功能的影响时必须考虑林龄的影响。

研究表明,森林的水文影响是由森林结构和降水特征共同影响的^[32],如森林的冠层截留量和截留率随林外降水量显著变化^[33],且与冠层结构密切相关^[33-34],坡向、坡度和土壤厚度等也对森林的水文功能有显著影响^[35]。本研究虽未考虑降水等气象因子的波动以及气候变化带来的水文影响,仅关注在气候不变、立地条件相同的情况下,森林因为年龄变化引起的结构变化,而产生的水文影响,但是仍然建议在林业管理中,在考虑林龄的影响时,进一步考虑气候变化和立地条件的作用。

5 结论

华北落叶松林的生长可分为快速生长期(林龄 5~15 a)、缓慢生长期(林龄 15~40 a)和稳定期(林龄 40 a 之后)。在快速生长期,林分平均树高、平均胸径、郁闭度和冠层 LAI 均随林龄的增加而快速增大;在缓慢生长期,林分平均树高、平均胸径和郁闭度呈缓慢增大趋势,而冠层 LAI 则呈先增大后减小的趋势;在稳定期,林分结构变化

不明显。

在快速生长期,年均截留量随林龄增加快速增大,年均蒸腾量、土壤蒸发量、产流量随林龄增加先快速增大(减小),在林龄 10 a 后增速(减速)变缓。在缓慢生长期,年均蒸腾量、土壤蒸发量和产流量随林龄的变化减慢,并在林龄 30 a 左右就趋于稳定。

因此,在生态水文研究和林水综合管理中,在林龄小于 30 a 时必须考虑林龄的影响,当林龄大于 30 a 时,不必再考虑林龄的影响。

参考文献:

- [1] Wang Y H, Yu P T, Feger K H, *et al.* Annual runoff and evapotranspiration of forestlands and nonforestlands in selected basins of the Loess Plateau of China[J]. *Ecohydrology*, 2011, 4: 277-287.
- [2] Yu P T, Wang Y H, Wu X, *et al.* Water yield reduction due to forestation in arid mountainous regions, northwest China[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2010, 25(4): 423-430.
- [3] Xu L H, Wang Y H, Yu P T, *et al.* Hydrological impacts of afforestation: a case study based on simulation of TOPOG in the small watershed of caogou in Liupan Mountains, China[J].

- Journal of Resources and Ecology, 2010, 1(3): 202-210.
- [4] 龚固堂,黎燕琼,朱志芳,等.川中丘陵区人工柏木防护林适宜林分结构及水文效应[J].生态学报,2012,32(3):923-930.
- [5] Dietz J, Hölischer D, Leuschner C, *et al.* Rainfall partitioning in relation to forest structure in differently managed montane forest stands in Central Sulawesi, Indonesia[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 237(1): 170-178.
- [6] 曹向文,赵洋毅,段旭,等.磨盘山华山松人工林林冠截留和产流特征及其影响因子[J].西南林业大学学报(自然科学),2017,37(6):105-112.
- [7] 肖洋,张淑兰,张海军,等.小兴安岭红松林冠层截留降雪特征及模拟[J].林业科学,2021,57(7):11-19.
- [8] 吕刚,王磊,张卓,等.辽西低山丘陵区不同年龄荆条冠层截留降雨模拟实验研究[J].生态学报,2019,39(17):6372-6380.
- [9] Brauman K. A, Freyberg D L, Daily G C. Forest structure influences on rainfall partitioning and cloud interception: A comparison of native forest sites in Kona, Hawai'i[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(2): 265-275.
- [10] Liu Z B, Wang Y H, Tian A, *et al.* Modeling the Response of Daily Evapotranspiration and its Components of a Larch Plantation to the Variation of Weather, Soil Moisture, and Canopy Leaf Area Index[J]. Journal of Geophysical Research:Atmospheres, 2018, 123: 7354-7374.
- [11] Yang B, Lee D K, Heo H K, *et al.* The effects of tree characteristics on rainfall interception in urban areas[J]. Landscape and Ecological Engineering, 2019, 15(3): 289-296.
- [12] 王磊,孙长忠,周彬.北京九龙山不同结构侧柏人工纯林降水的再分配[J].林业科学研究,2016,29(5):752-758.
- [13] 刘泽彬,王彦辉,田奥,等.六盘山半湿润区坡面华北落叶松林冠层截留的时空变化及空间尺度效应[J].水土保持学报,2017,31(5):231-239.
- [14] He Z B, Yang J J, Du J, *et al.* Spatial variability of canopy interception in a spruce forest of the semiarid mountain regions of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 188(15): 58-63.
- [15] 王贺年,余新晓,赵阳,等.北京山区4种优势林分生态用水实验研究[J].水土保持通报,2012,32(4):62-64+70.
- [16] Giambelluca T W, Scholz F G, Bucci S J, *et al.* Evapotranspiration and energy balance of Brazilian savannas with contrasting tree density[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(8): 1365-1376.
- [17] Iida S, Tanaka T, Sugita M. Change of evapotranspiration components due to the succession from Japanese red pine to evergreen oak[J]. Journal of Hydrology, 2006, 326(1): 166-180.
- [18] 魏曦,梁文俊,毕华兴,等.晋西黄土区油松林分结构与水土保持功能的多因子复合关系[J].林业科学研究,2020,33(3):39-47.
- [19] 尤海舟,孙浩伦,王立方,等.不同间伐强度蒙古栎次生林产流、产沙特征分析[J].中南林业科技大学学报,2020,40(3):105-110.
- [20] 黄柳菁,林欣,刘兴诏,等.广东不同林龄乔木生物量及物种多样性与叶面积指数的关系[J].西南林业大学学报(自然科学),2017,37(6):91-98.
- [21] 崔宁洁,张丹桔,刘洋,等.不同林龄马尾松人工林下植物多样性与土壤理化性质[J].生态学杂志,2014,33(10):2610-2617.
- [22] 付晓燕,江大勇,郭万军,等.林龄、密度对华北落叶松人工林下生物多样性的影响[J].河北林果研究,2009,24(1):33-37.
- [23] Matthieu B, Steeve P, David P. Hydraulic limitations in dominant trees as a contributing mechanism to the age-related growth decline of boreal forest stands[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 427(11): 135-142.
- [24] 王小兰,陈甲瑞,杨小林,等.尼洋河流域高山松次生林林分因子与林龄的相关性[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(11):16-24.
- [25] 韩新生.六盘山半干旱区三种典型植被的结构变化及其多功能影响[D].北京:中国林业科学研究院,2020,93-110.
- [26] Brooks R H, Corey A T. Hydraulic properties of porous media[J]. Colorado State University Hydrology Paper, 1964, 3: 1-27.
- [27] Federer C A. BROOK 90: a simulation model for evaporation, soil water, and streamflow[EB/OL]. (2021-04-09)[2022-05-06]. <http://www.ecoshift.net/brook/brook90.htm>.
- [28] 张二亮,宫宇,陈永军,等.华北落叶松生长规律初探[J].河北林果研究,2015,30(1):30-32.
- [29] 刘菲,黄荣林,江珊鸿,等.江南油杉人工林生长规律研究[J].中南林业科技大学学报,2020,40(3):39-52.
- [30] Ahmad B, Wang Y H, Hao J, *et al.* Optimizing stand structure for trade-offs between overstory timber production and understorey plant diversity: A case-study of a larch plantation in north-west China[J]. Land Degradation and Development, 2018, 29(9): 2998-3008.
- [31] 田奥.六盘山半湿润区华北落叶松人工林的多种功能时空变化与优化管理[D].北京:中国林业科学研究院,2019,40-55.
- [32] 牛赞,成彩霞,赵维俊,等.祁连山大野口流域青海云杉林水文特征与生态因子关系研究[J].中南林业科技大学学报,2017,37(1):62-68.
- [33] 董玲玲,康峰峰,韩海荣,等.辽河源3种林分降雨再分配特征及其影响因素[J].水土保持学报,2018,32(4):145-150.
- [34] 赵文玥,吉喜斌.干旱区稀疏树木冠层降雨截留蒸发的研究进展与展望[J].地球科学进展,2021,36(8):862-879.
- [35] Yu P T, Wang Y H, Du A P, *et al.* The effect of site conditions on flow after forestation in a dryland region of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 178-179: 66-74.

The Variation of Stand Structure with Age and Its Hydrological Effects of Larch Plantation in Liupan Mountains

XU Xiao-qin, YU Peng-tao, WANG Yan-hui, XU Li-hong, YU Yi-peng, LIU Ze-bin

(Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] To study the change of stand structure with age and its hydrological influence, and provide a theoretical basis for forest vegetation construction and management in the semi-arid area, Liupan Mountains. [Method] The main plantation type -- *Larix principis-rupprechtii* (Larch) plantation was selected in Diediediegou small watershed in the semi-arid area, Liupan Mountains. Based on daily meteorological data from 1993—2002, both the coupled stand structure model and BROOK90, an ecohydrological model were applied to simulate the variation of stand structures (average tree height, diameter at breast height (DBH), canopy density and leaf area index (LAI)) with plantation age, and then its effects on each water balance component (interception, transpiration, soil evaporation and runoff) were obtained. [Result] The Larch plantation could be divided into rapid growth period (5~15 years old), slow growth period (15~40 years old) and stable period (over 40 years old) with the increase of age. During the rapid growth period, the average tree height, average DBH, canopy density and canopy LAI increased rapidly with the increase of age, with an average annual growth rate of $0.48 \text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$, $0.54 \text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$, 0.03 and 0.19, respectively. During the slow growth period, the average stand tree height, DBH and canopy density increased slowly, while the LAI increased first and then decreased. But during the stable period, the stand structures did not change significantly. In the fast growth period, the average annual interception and transpiration increased rapidly with the increase of age, and the rate was 1.91 and $24.13 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, respectively. Meanwhile, the average annual soil evaporation and water yield decreased rapidly with the increase of age, and the decrease rate was 10.58 and $14.88 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, respectively. In the slow growth period, the change of average annual transpiration, soil evaporation and runoff with age slowed down, and tended to be stable when the age was 30 years. The average annual change rates were 0.62, -0.75 and $-0.76 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, respectively. [Conclusion] In the semi-arid area of Liupan Mountains, the stand structure of Larch plantations changes continuously when the stand age is less than 30 years, especially less than 15 years, which significantly affects the eco-hydrological function. And when the stand age is over 30 years old, the stand structure is stable and the water balance components tend to be stable too, which indicates that it is no longer necessary to consider the influence of stand age in the integrated forest-water management.

Keywords: *Larix principis-rupprechtii* stand; stand age; hydrological function; BROOK90 model

(责任编辑: 彭南轩)