北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

基于水量平衡的华北落叶松人工林承载密度研究

任启文 王玉忠 徐振华 张树梓

Carrying density of *Larix principis-rupprechtii* plantations based on water balance

Ren Qiwen, Wang Yuzhong, Xu Zhenhua, Zhang Shuzi

引用本文:
任启文, 王玉忠, 徐振华, 张树梓. 基于水量平衡的华北落叶松人工林承载密度研究[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(7):1–8. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240023
Ren Qiwen, Wang Yuzhong, Xu Zhenhua, Zhang Shuzi. Carrying density of *Larix principis–rupprechtii* plantations based on water balance[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(7):1–8. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240023

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240023

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

不同密度调控强度对华北落叶松人工林土壤质量的影响
Effects of different density regulation intensities on soil quality in *Larix principis–rupprechtii* plantation
北京林业大学学报, 2021, 43(6): 50–59. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200322

塞罕坝华北落叶松纯林和混交林土壤肥力质量评价
Soil fertility quality evaluation of pure and mixed *Larix principis–rupprechtii* forests in Saihanba, Hebei Province of northern China
北京林业大学学报, 2021, 43(8): 50–59. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210189

华北落叶松人工林间伐后9～10年林下天然更新研究
Natural regeneration of *Larix principis–rupprechtii* plantations in 910 years after thinning
北京林业大学学报, 2021, 43(12): 17–28. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200371

华北落叶松不同代际人工林土壤养分及细菌群落变化特征
Changes in soil nutrients and bacterial communities of *Larix principis–rupprechtii* plantations of different generations
北京林业大学学报, 2020, 42(3): 36–45. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190256

人工促进更新措施对落叶松种子萌发和早期生长的影响
Effects of artificial promotion measures on seed germination and early growth of *Larix principis–rupprechtii*
北京林业大学学报, 2023, 45(4): 24–35. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210486

间伐对华北落叶松林凋落物分解的影响
Effects of thinning on litter decomposition of *Larix principis–rupprechtii* plantation
北京林业大学学报, 2021, 43(12): 29–37. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210114

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240023

基于水量平衡的华北落叶松人工林承载密度研究

任启文[1,2,3] 王玉忠[1,2] 徐振华[1,2] 张树梓[1,2,3]
（1. 河北省林业和草原科学研究院，河北 石家庄 050061；2. 河北省森林城市建设技术创新中心，河北 石家庄 050061；
3. 河北小五台山森林生态系统定位研究站，河北 涿鹿 075600）

摘要:【目的】研究冀北地区华北落叶松人工林水分平衡规律及其供求关系，准确计算区域不同降水条件下华北落叶松适宜经营密度。**【方法】**依据水量平衡原理构建包含大气降水土壤入渗分量、林下蒸散发分量和不同胸径华北落叶松单株蒸腾耗水分量的水源承载密度计算公式。通过对小五台山自然保护区华北落叶松人工林树干液流、林下蒸散发、水量再分配特征的长期定位观测，以及胸径与木质部周长关系模型的构建，确定计算参数，计算不同降水条件下华北落叶松人工林各径级可承载密度。**【结果】**(1)小五台地区华北落叶松生长季 6 个月，生长季昼间蒸腾平均时长 15 h；生长季平均液流速率 0.012 kg/(h·cm)，除 4 月、6 月较低外，其余各月都达到 0.011 kg/(h·cm) 以上，尤其以 8 月最高，达到 0.021 kg/(h·cm)。(2)生长季华北落叶松林下平均蒸散发速率 1.448 kg/(m^2·d)，全年平均速率 0.833 kg/(m^2·d)；蒸散发速率 4—6 月上升较快，6—9 月上升缓慢，并在 9 月达到峰值，10 月迅速下降，11 月到来年 2 月处于较低水平。(3)华北落叶松林冠层截留量占降水量的 21.22%，穿透雨量占 78.10%，树干径流量占 0.68%，坡面径流量占 1.50%，土壤入渗量占 77.28%。(4)华北落叶松胸径与木质部周长呈线性相关关系，R^2 为 0.958。**【结论】**依据水量平衡原理计算出小五台地区不同降水条件下华北落叶松林各径级可承载密度，对于冀北地区现有林分的科学经营具有重要指导意义。

关键词：华北落叶松；承载密度；水量平衡；冀北地区
中图分类号：S791.22 **文献标志码**：A **文章编号**：1000−1522(2024)07−0001−08
引文格式：任启文，王玉忠，徐振华，等. 基于水量平衡的华北落叶松人工林承载密度研究［J］. 北京林业大学学报，2024，46(7)：1−8. Ren Qiwen, Wang Yuzhong, Xu Zhenhua, et al. Carrying density of *Larix principis-rupprechtii* plantations based on water balance［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(7): 1−8.

Carrying density of *Larix principis-rupprechtii* plantations based on water balance

Ren Qiwen[1,2,3] Wang Yuzhong[1,2] Xu Zhenhua[1,2] Zhang Shuzi[1,2,3]
(1. Hebei Academy of Forestry and Grassland Science, Shijiazhuang 050061, Hebei, China;
2. Hebei Forest City Construction Technology Innovation Center, Shijiazhuang 050061, Hebei, China;
3. Hebei Xiaowutai Forestry Ecosystem Research Station, Zhuolu 075600, Hebei, China)

Abstract: ［**Objective**］This paper aims to study the water balance law and supply-demand relationship of *Larix principis-rupprechtii* plantations in the northern Hebei Province region of northern China, and accurately calculate the proper management density of *L. principis-rupprechtii* plantations under different precipitation conditions in the region. ［**Method**］The calculation parameters were determined through long-term location observation of sap flow, understory evapotranspiration, water redistribution characteristics of *L. principis-rupprechtii* plantations in Xiaowutai Mountain Nature Reserve, and the construction of relationship model between DBH and xylem perimeter, and the carrying density of each diameter class of *L. principis-rupprechti* plantation under different precipitation conditions was calculated. ［**Result**］(1) The growth season of *Larix principis-rupprechtii* in the Xiaowutai area was 6 months, with an average diurnal

收稿日期: 2024−01−22 **修回日期:** 2024−03−25
基金项目: 河北省重点研发计划项目(22327601D)，中央财政林草科技推广示范项目(冀 TG〔2023〕015)。
第一作者: 任启文，高级工程师。主要研究方向：森林培育。Email: blrenqiwen@126.com 地址：050061 河北省石家庄市新华区学府路 75 号。
责任作者: 王玉忠，正高级工程师。主要研究方向：林木遗传育种。Email: hbslky202@126.com 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

transpiration time of 15 h during the growth season. The average sap flow velocity of *L. principis-rupprechtii* during the growth season was 0.012 kg/(h·cm). Except for lower values in April and June, it reached above 0.011 kg/(h·cm) in all other months, with the highest value reaching 0.021 kg/(h·cm) in August. (2) The average evapotranspiration rate under *L. principis-rupprechtii* forest during the growth season was 1.448 kg/(m^2·d), and the annual average rate was 0.833 kg/(m^2·d). The evapotranspiration rate increased rapidly from April to June, slowly increased from June to September, and reached its peak in September, rapidly decreased in October, and remained at a relatively low value from November to February of the followed year. (3) The canopy interception of *L. principis-rupprechtii* forest accounted for 21.22% of the precipitation, the penetrating precipitation accounted for 78.10%, the trunk runoff accounted for 0.68%, the slope runoff accounted for 1.50%, and the soil infiltration accounted for 77.28%. (4) There was a linear correlation between DBH and xylem perimeter of *L. principis-rupprechtii*, R^2 was 0.958. [**Conclusion**] Based on the principle of water balance, the bearing density of different DBH of *L. principis-rupprechtii* forests under varied precipitation conditions in the Xiaowutai area is calculated, which has important guiding significance for the scientific management of existing forests in the northern Hebei region of northern China.

Key words: *Larix principis-rupprechtii*; carrying density; water balance; northern Hebei Province region

华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)人工林是冀北山地最重要的森林类型之一。长期以来，由于营造密度高，疏伐强度小，林龄 40 年以上时普遍发育成为结构简单、密度高、生长停滞的低质低效林，面临着严峻的生产力降低和更新衰退问题[1]。究其原因，主要是随林木生长，耗水量不断增加，幼龄林可满足的水资源量在成熟林后已不能满足生长需求[2]。北方地区普遍缺水，可利用水资源量必然成为林分合理密度确定的限制性因子，因此基于区域水资源承载能力确定华北落叶松人工林合理经营密度应是当前急需解决的关键技术问题。

基于水资源承载能力的人工林稳定性和适宜密度一直是相关研究的热点[3−5]。1991 年辽宁章古台樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)人工林大面积死亡[6−7]，以及“三北”工程区的“小老头林”无不与区域降水资源的植被承载能力有关[8]。近年来，区域降水资源的植被承载能力也引起了有关部门的重视[9−10]。2019 年，习近平总书记在“黄河流域生态保护和高质量发展座谈会”上首次提出“以水而定、量水而行”；2021 年，《国务院办公厅关于科学绿化的指导意见》中明确要求“坚持以水而定、量水而行，宜绿则绿、宜荒则荒，科学恢复林草植被”；2023 年习近平总书记在内蒙古考察并主持召开加强荒漠化综合防治和推进“三北”等重点生态工程建设座谈会上强调：“要合理利用水资源，坚持以水定绿、以水定地、以水定人、以水定产，把水资源作为最大的刚性约束，大力发展节水林草。要科学选择植被恢复模式，合理配置林草植被类型和密度，坚持乔灌草相结合，营造防风固沙林网、林带及防风固沙沙漠锁边林草带等。”“三北”工程攻坚战科技创新把“研究不同气候区典型乔灌草植被水分平衡规律与其供求关系，定量估算乔灌草植被水资源承载力，研发水资源承载潜力下三北地区林草植被优化配置技术与模式”作为关键技术进行攻关。

目前，我国应用热技术方法对众多树种蒸腾耗水特征进行了研究[11−13]，但研究内容大多集中于树干液流速率的变化特征及其影响因子[14−17]，以及在自然环境中如何准确估算单株、林分耗水量[18]，鲜有将林木蒸腾耗水研究成果应用到生产实践的报道。本研究立足林水关系这一科学问题，依托华北落叶松树干液流、林下蒸散发、大气降水水量再分配长期定位观测数据，基于水量平衡原理建立承载密度计算公式，确定不同降水量条件下华北落叶松林各径级最大可承载密度，为打好“三北”工程攻坚战提供科技支撑和决策依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区和样地概况

本研究区位于河北省小五台山国家级自然保护区，气候属暖温带大陆季风型山地气候，具有雨热同季、冬长夏短、四季分明、夏季昼夜温差大等特点。年均气温 5 ~ 6 ℃，1 月平均气温−12.3 ℃，7 月平均气温 22.1 ℃；无霜期 100 ~ 140 d，年均降水量 550 mm；土壤属于森林褐土类。华北落叶松人工林样地选择在相对平整、均一的典型坡面上，样地大小 50 m × 100 m，海拔高度 1 402 ~ 1 407 m，坡向西偏北 10°，坡度 14°。林分密度 820 株/hm^2，林龄 42 年，郁闭度 73%。华北落叶松平均胸径(17.41 ± 4.43) cm，平均

树高(9.97 ± 2.34) m,平均冠幅为 4.7 m × 4.4 m。林内灌木主要有胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、绣线菊(*Sambucus williamsii*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)等;草本有细叶薹草(*Carex duriuscula*)、唐松草(*Thalictrum petaloideum*)等,地表盖度 70%。

1.2　研究方法

1.2.1　树干液流测定

根据林木所在空间位置和生长状况,在落叶松样地内选择树干通直、无病虫害、生长状况良好的 9 株落叶松为样树,测定树干液流速率,胸径范围 8.5 ~ 25.1 cm(表 1)。采用 Ems 51 Sap Flow System 测定树干液流,在数采仪中设置每 10 min 采集 1 次数据,每 30 min 记录 1 次平均数据,时间为 2019−03−31—2019−10−22。

表 1　树干液流监测样树主要参数

Tab. 1　Main parameters of sap flow monitoring sample trees

编号 No.	树高 Tree height/m	胸径 DBH/cm	冠幅 Crown width
1	16.4	25.1	4.5 m × 3.2 m
2	12.5	23.2	6.2 m × 5.0 m
3	10.8	20.8	5.3 m × 4.7 m
4	10.4	17.3	3.8 m × 3.3 m
5	9.8	17.1	4.3 m × 3.3 m
6	12.5	17.0	4.0 m × 3.4 m
7	9.5	15.5	3.9 m × 3.8 m
8	7.3	10.6	3.1 m × 2.6 m
9	6.1	8.5	2.3 m × 2.2 m

1.2.2　林下蒸散发测定

对样地进行灌草调查,选择标准灌草样方,埋设土壤蒸渗仪(内桶高 90 cm,直径 80 cm),将原状土柱装入桶内,表面保持原状灌草植被。桶底设有质量传感器,数采仪每小时测定并记录一次数据,时间为 2019−03−19—2020−02−29,林下蒸散发速率计算见下式。

$$W=\frac{w_1+\sum_i \Delta w_i - w_2}{ds} \tag{1}$$

式中:W 为林下蒸散发速率(kg/(m^2·d)),w_1 为统计时段开始蒸渗仪土体质量(kg),w_2 为统计时段结束蒸渗仪土体质量(kg),Δw_i 为统计时段内蒸渗仪土体第 i 次变化的质量(kg),d 为统计时段总天数(d),s 为蒸渗仪桶口面积(m^2)。

1.2.3　水量再分配测定

在落叶松林样地附近的空旷地布设 1 台小型全自动气象站测定大气降水。在样地内分别布设 5 个规格 100 cm × 50 cm × 50 cm 的集水槽收集穿透雨,雨后用量杯测量穿透雨量。依据样地调查结果,另外选择 9 株华北落叶松刮除老皮,使用塑料软管螺旋状缠绕树干,树皮与软管间用玻璃胶密封缝隙,下方接小型雨量筒测定树干径流量,树干径流监测样树主要参数见表 2。样地下方设有坡面径流场,用于测定坡面径流量。研究区内设有水量平衡场,经多年监测未出现壤中流。因此,冠层截留量和土壤入渗量通过公式(2)、(3)计算。水量再分配统计时间为 2016—2019 年。

$$G=R-C-S \tag{2}$$

$$M=C+S-P \tag{3}$$

式中:G 为冠层截留量(mm),R 为降水量(mm),C 为穿透雨量(mm),S 为树干径流量(mm),M 为土壤入渗量(mm),P 为坡面径流量(mm)。

表 2　树干径流监测样树主要参数

Tab. 2　Main parameters of trunk runoff monitoring sample trees

编号 No.	树高 Tree height/m	胸径 DBH/cm	冠幅 Crown width
1	12.3	24.7	6.00 m × 5.00 m
2	12.6	23.5	6.50 m × 5.60 m
3	12.7	21.4	6.90 m × 5.90 m
4	14.6	19.7	4.60 m × 4.06 m
5	14.0	17.6	4.30 m × 4.00 m
6	12.6	16.8	4.90 m × 4.00 m
7	8.6	14.6	4.80 m × 3.00 m
8	8.9	13.8	3.90 m × 3.80 m
9	6.3	10.5	4.20 m × 3.00 m

1.2.4　胸径与木质部周长测定

在小五台地区选择各类径级华北落叶松 50 株测定胸径,用生长锥钻取木质部,带回实验室测定木质部周长,从而建立木质部周长与胸径的关系式。

1.2.5　落叶松承载密度计算

根据水量平衡原理,在不消耗地下水的情况下,林分耗水应小于或等于林地可供水量[19],据此建立水源承载密度计算公式(4)。$v_s \times V_P \times 10^4$ 表征可用水资源量,$30 \times 12 \times W \times 10^4$ 代表林下蒸散发消耗量,$30 \times T \times t \times S \times F$ 代表不同胸径乔木树种生长季耗水量。

$$H=\frac{v_s \times V_P \times 10^4 - 30 \times 12 \times W \times 10^4}{30 \times T \times t \times S \times F} \tag{4}$$

式中:H 为林分密度(株/hm^2),v_s 为土壤入渗比例(%),V_P 为年降水量(mm),T 为生长季月数,W 为全年林下蒸散发平均速率(kg/(m^2·d)),t 为昼间蒸腾时长(h),S 为木质部周长(cm),F 为生长季树干液流

速率均值(kg/(h·cm))。

2 结果与分析

2.1 华北落叶松树干液流速率变化特征

根据年度连续观测数据分析得出，华北落叶松树干液流启动于 4 月初，结束于 10 月初，前后历时 6 个月。树干液流速率启动后逐步上升，5 月达到第一个峰值，6 月有所下降，7—8 月达到第二峰值，9 月逐步下降(图 1)；除 4 月、6 月较低外，其余各月都达到 0.011 kg/(h·cm)以上，尤其以 8 月最高，达到 0.021 kg/(h·cm)；经统计分析，华北落叶松生长季平均液流速率 0.012 kg/(h·cm)(图 2)。一天中，树干液流速率启动和结束时间随日出日落变化而变化，生长季昼间蒸腾时长基本为 06:00—21:00，平均时长 15 h(图 3)。

2.2 华北落叶松林下蒸散发变化特征

由图 4 可见，生长季内华北落叶松林下蒸散发变化过程。4—6 月从 0.70 上升到 1.59 kg/(m^2·d)，上升较快；6—9 月增速放缓，9 月达到峰值 1.72 kg/(m^2·d)，10 月迅速下降到 0.36 kg/(m^2·d)；进入冬季，11 月到来年 2 月蒸散发处于较低水平，且变化不明显，3 月略有升高。蒸渗桶内土体质量由于降水

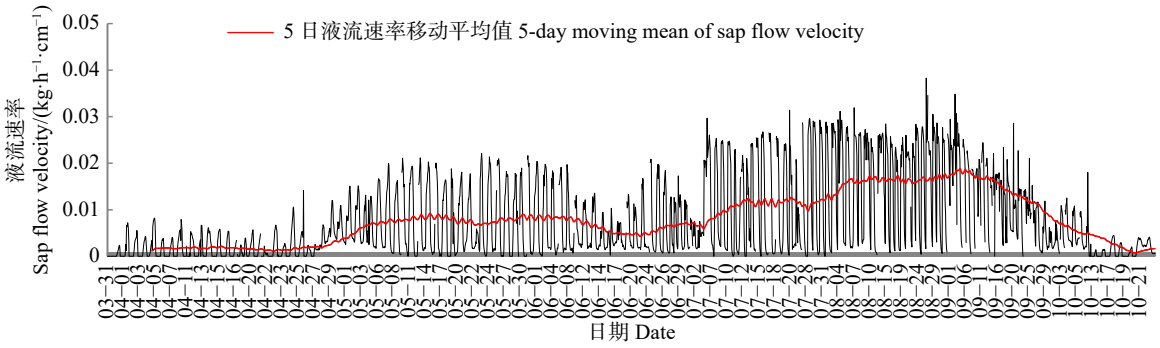


图 1 华北落叶松生长季树干液流速率变化过程

Fig. 1 Process of changes in sap flow rate during the growth season of *Larix principis-rupprechtii*

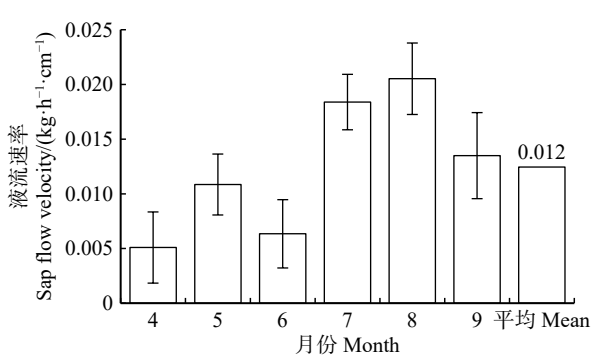


图 2 华北落叶松生长季树干液流速率月变化

Fig. 2 Monthly variation of sap flow rate during the growing season of *Larix principis-rupprechtii*

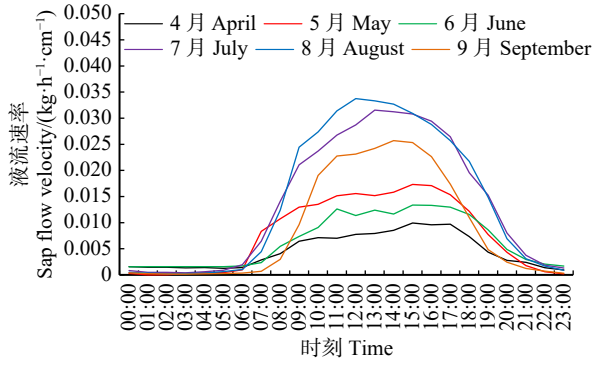


图 3 华北落叶松生长季树干液流速率日变化

Fig. 3 Daily variation of sap flow velocity during the growing season of *Larix principis-rupprechtii*

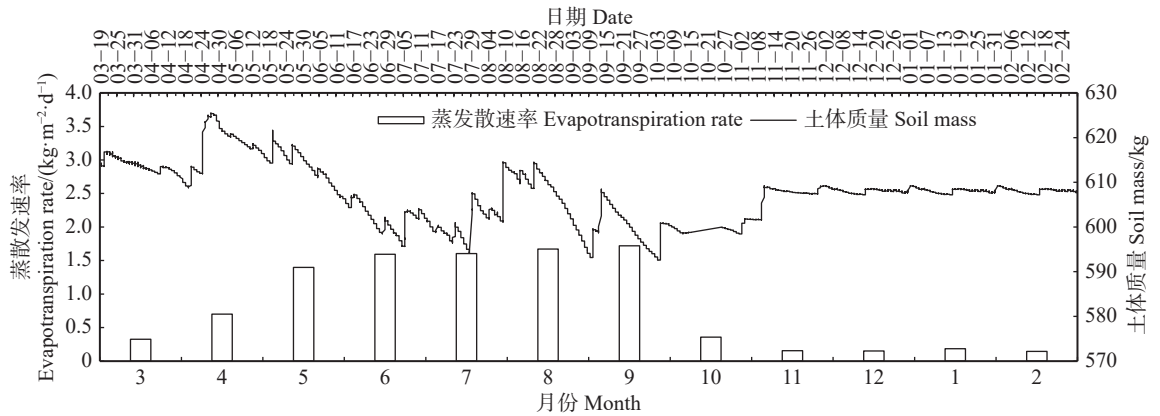


图 4 华北落叶松生长季林下蒸散发变化过程

Fig. 4 Changing process of evapotranspiration under *Larix principis-rupprechtii* forest during the growing season

和蒸散发的双重影响，表现为部分时段直线升高后沿一定斜率下降，循环往复的过程；遇有降水，桶内土体含水量增加，质量直线上升；随着桶内土壤蒸发和植被蒸腾，土体含水量减少，呈现沿一定斜率下降趋势。华北落叶松林下蒸散发日变化过程表现为白天蒸散发强，夜间逐渐减弱的趋势；一天中08:00—20:00 是蒸散发的主要时段，以 10:00—16:00 最快，土体质量减小最为显著，而午夜前后则变化趋势接近于水平(图 5)。通过统计计算 4—10 月生长季华北落叶松林下平均蒸散发速率 1.448 kg/(m^2·d)，非生长季(10 月—次年 3 月)平均蒸散发速率 0.219 kg/(m^2·d)，全年平均蒸散发速率 0.833 kg/(m^2·d)。

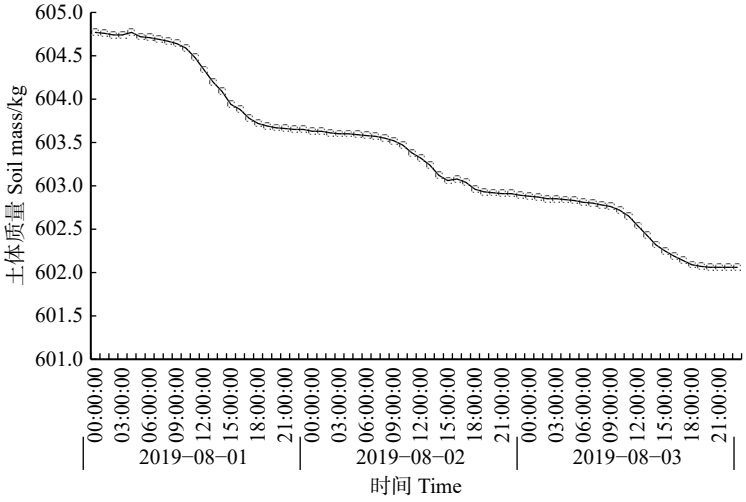


图 5　华北落叶松林下蒸散发日变化过程

Fig. 5　Daily variation process of evapotranspiration under *Larix principis-rupprechtii* forest

2.3　华北落叶松林水量再分配特征

由于不同强度降水土壤入渗比例差异较大，为保证数据的准确性和代表性进行了长达 4 年的华北落叶松人工林大气降水水量再分配监测(非全部降水)。由图 6 可见，2016—2019 年统计到 32 次不同强度降水，降水总量 1 173.56 mm；冠层截留量 249.01 mm，占降水量的 21.22%；穿透雨量 916.54 mm，占 78.10%；树干径流量 8.01 mm，占 0.68%；坡面径流量 17.61 mm，占 1.50%；土壤入渗量 906.95 mm，占 77.28%。在不消耗地下水的情况下土壤入渗量是森林植被可利用的最大水量，对于森林经营有重要意义。

2.4　华北落叶松胸径与木质部周长相关模型

为通过华北落叶松胸径计算对应的木质部周长，建立了胸径(x)与木质部周长(y)的相关模型 y = 2.541 7x + 1.322 9，决定系数 R^2 = 0.958(P < 0.01)，呈现极显著线性正相关(图 7)，表明通过胸径计算木质部周长较为可靠。

2.5　华北落叶松林承载密度的确定

按照华北落叶松生长季月数、昼间蒸腾时长、平均液流速率、林下蒸散发速率、水量再分配土壤入渗分量、木质部周长与胸径的关系模型等试验数据，确定华北落叶松承载密度计算参数为：W = 0.833 kg/(m^2·d)，T = 6 个月，t = 15 h，$F_{落}$=0.012 kg/(h·cm)，$v_{土}$=77.28%。$V_{降}$按照 450 ~ 700 mm 计算，每 50 mm 一个梯度；S 依据华北落叶松胸径与木质部周长模型代入胸径求得，胸径按照 5 ~ 35 cm 计算，每

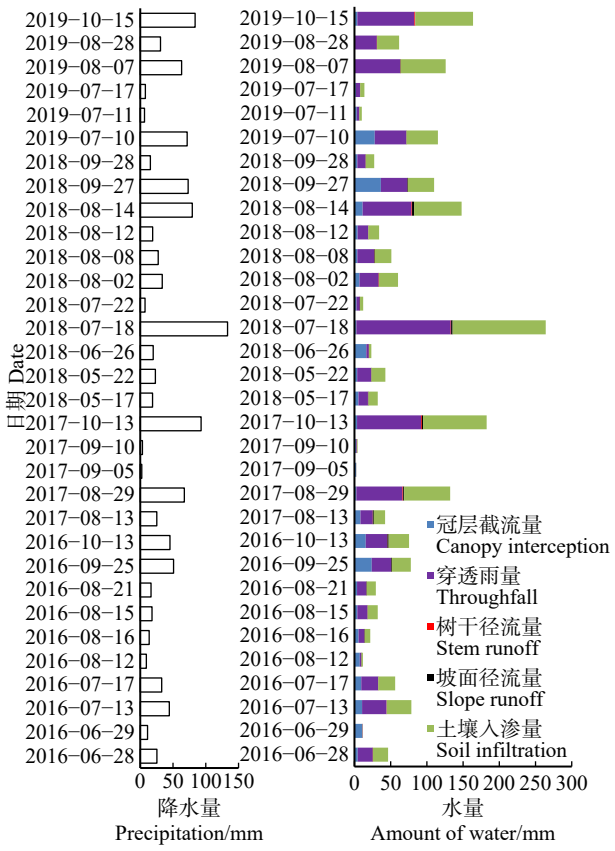


图 6　华北落叶松林大气降水量再分配

Fig. 6　Redistribution of atmospheric precipitation in *Larix principis-rupprechtii* forest

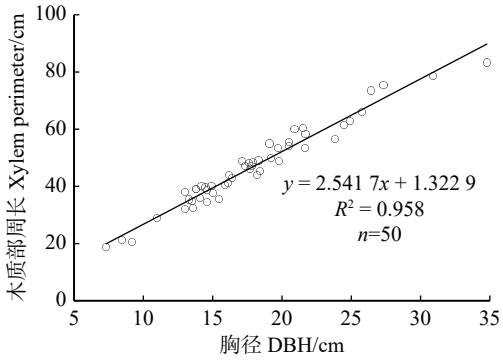


图 7 华北落叶松胸径与木质部周长相关模型

Fig. 7 Correlation model between DBH and xylem perimeter of *Larix principis-rupprechtii*

1 cm 一个梯度。将以上参数代入公式(4)，得到不同降水条件下不同胸径华北落叶松林最大承载密度(表 3)。

由表 3 可见，森林密度控制遵循两个基本规律，一是随着降水量的增加，林分密度呈现增加规律；二是随着胸径增加，林分密度呈现降低趋势。这主要是由水资源承载力和林木耗水规律决定的，降水量增加水资源承载力相应增加，可承载的林木数量增加；林木胸径增加，其单株耗水量相应增加，在水资源承载力一定的情况下可承载的林木数量减少。550 mm 降水量下，华北落叶松胸径为 10、20、30 cm 时可承载的密度分别为 1 445、741、498 株/hm^2。可见随胸径的增加可承载密度下降很快，因此当胸径增加到一定程度时必须进行抚育间伐来控制林分适宜密度，以满足当地水资源承载能力，促进华北落叶松林健康稳定生长。

3 讨 论

许多学者从不同角度对华北落叶松和其他树种的合理密度进行了大量的研究。王绪芳等[20]以宁夏六盘山 19 年生不同密度的华北落叶松人工林为研究对象，依据胸径、树冠面积和立木密度的相关规律，确定了华北落叶松胸径和最适林分密度的相互关系，按照当地年均降水量 600 mm 计算，在胸径小于 15 cm 时与本文的适宜承载密度相差不大，但在胸径大于 15 cm 时差距较大，可能原因是建立回归方程时的样本范围所致，未覆盖到 15 cm 以上样本。张丽楠等[21]以陕西秦岭华北落叶松人工林为研究对象，应用树冠面积与胸径的相关关系，推算出不同径阶林分的适宜经营密度，与本文结果差距较大，可能由于降水资源已不是限制因子(年降水量 900 ~ 1 200 mm)，其他因子才是确定承载密度的关键因素。也有从不同生态功能出发研究华北落叶松人工林适宜密度。从土壤保育功能出发，应用密度比较法研究得出山西太岳山 1 402 株/hm^2 的华北落叶松人工林土壤质量最好[22]；从林下物种多样性出发，山西太岳山保留密度 1 467 株/hm^2 的华北落叶松人工林林下物种多样性最高，群落结构最复杂[23]；也有从更新效果出发，得出山西省关帝山中密度(400 ~ 560 株/hm^2)华北落叶松林天然更新优于过疏和过密林分[24]。由于研究目的不同，无法与本文做出准确比较，但通过研究区降水量和样地平均胸径查阅本文结果，发现大部分基于生态功能目标研究得出的适宜密度均接近或小于本文的承载密度。比如山西太岳山华北落叶松林保留密度 1 467 株/hm^2 林下物种多样性最高[22]，与本文同等条件下(降水量 650 mm，胸径 16 cm)的承载密度 1 488 株/hm^2 相近。总之，由于经营目标、研究方法和地理区域等的不同，研究结论也不尽相同，但水资源是森林生长的基本物质

表 3 不同降水条件下不同胸径华北落叶松林最大承载密度 株/hm^2

Tab. 3 Max. carrying density of *Larix principis-rupprechtii* forests with different DBH under varied precipitation conditions tree/ha

胸径 DBH/cm	降水量 Precipitation/mm					
	450	500	550	600	650	700
5	1 053	1 903	2 753	3 603	4 453	5 303
6	892	1 611	2 331	3 050	3 770	4 490
7	773	1 397	2 021	2 645	3 269	3 893
8	682	1 233	1 784	2 334	2 885	3 436
9	611	1 104	1 596	2 089	2 582	3 075
10	553	999	1 445	1 891	2 337	2 783
11	505	912	1 319	1 727	2 134	2 541
12	464	839	1 214	1 589	1 963	2 338
13	430	777	1 124	1 471	1 818	2 165
14	400	724	1 047	1 370	1 693	2 016
15	375	677	979	1 282	1 584	1 886
16	352	636	920	1 204	1 488	1 772
17	332	600	867	1 135	1 403	1 671
18	314	567	821	1 074	1 327	1 581
19	298	538	779	1 019	1 259	1 500
20	283	512	741	969	1 198	1 427
21	270	488	706	924	1 142	1 360
22	258	467	675	883	1 092	1 300
23	247	447	646	846	1 045	1 245
24	237	428	620	811	1 003	1 194
25	228	412	596	779	963	1 147
26	219	396	573	750	927	1 104
27	211	382	552	723	893	1 064
28	204	368	533	697	862	1 026
29	197	356	515	674	833	992
30	190	344	498	652	805	959
31	184	333	482	631	780	929
32	179	323	467	612	756	900
33	173	313	453	593	733	873
34	168	304	440	576	712	848
35	164	296	428	560	692	824

条件，直接影响着森林的健康和稳定，因此森林植被密度与区域水资源承载能力的适宜程度应引起足够的重视。当前，众多学者基于冠幅–胸径关系模型、密度–胸径生长模型或者密度与某种生态功能之间的关系研究了不同树种的合理密度[25−27]，但由于区域水源承载能力和林木耗水监测指标的复杂性和长期性，基于水量平衡和林水关系研究承载密度的鲜有报道。韩辉等[28]将液流通量应用到合理林分密度研究，确定了樟子松人工固沙林 14 ~ 20 cm 胸径的合理密度，发现现有同径阶林分普遍存在密度过大的问题。在北方干旱半干旱区由于水资源欠缺，基于可利用水资源量的承载密度应是关键限制因子密度，直接影响华北落叶松人工林的健康和生态系统稳定性，特别是在三北地区定量测算植被水资源承载力和林分耗水量，进而确定其可承载密度，是森林质量精准提升时代背景下的关键技术和主要内容之一。

本研究只进行了华北落叶松有限胸径液流速率的测定，并且认为除去供水、光照等环境因素影响，不同胸径华北落叶松潜在液流速率无差异，被压木液流速率低于优势木主要原因是光照等环境因素影响[29]。另外，土壤入渗水量所占降水量的比例直接影响林木可利用水量的多少，此处用长期定位监测数据，虽然一定程度上消除了降水强度不同导致的误差，但没有考虑降水量和林分密度变化后土壤入渗分量和林下蒸散发分量的协同变化，需要在今后的研究中加以完善。

4　结　　论

本研究通过长期定位观测确定了小五台地区华北落叶松人工林蒸腾耗水及大气降水水量再分配的重要参数，包括：小五台地区华北落叶松生长季 6 个月，生长季昼间蒸腾平均时长 15 h，平均液流速率 0.012 kg/(h·cm)；生长季华北落叶松林下平均蒸散发速率 1.448 kg/(m^2·d)，全年平均速率 0.833 kg/(m^2·d)；华北落叶松林冠层截留量占降水量的 21.22%，穿透雨量占 78.10%，树干径流量占 0.68%，坡面径流量占 1.50%，土壤入渗量占 77.28%。建立了华北落叶松胸径与木质部周长的大样本模型：$y = 2.541\ 7x + 1.322\ 9$($R^2 = 0.958$)，实现由胸径到木质部周长的计算，为不同胸径华北落叶松单株耗水量计算提供重要参数。依据以上参数，最终确定小五台地区不同降水条件下华北落叶松林各径级可承载密度，对于冀北地区现有林分的科学经营具有重要指导意义。

参　考　文　献

[1] Liang W J, Wei X. Factors promoting the natural regeneration of *Larix principis-rupprechtii* plantation in the Lüliang Mountains of central China[J/OL]. Peer J, 2020, 8: 107717[2022−02−12]. https://doi.org/10.7717/peerj.9339.

[2] 任启文, 张树梓, 李联地, 等. 冀西北水源涵养林生态水文过程研究与应用技术 [M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2021: 158−170.
Ren Q W, Zhang S Z, Li L D, et al. Research and application technology on ecological hydrological processes of water source conservation forests in northwest Hebei Province[M]. Shijiazhuang: Hebei Science & Technology Press, 2021: 158−170.

[3] Barbeta A, Mejía-Chang M, Ogaya R, et al. The combined effects of a long-term experimental drought and an extreme drought on the use of plant-water sources in a Mediterranean forest[J]. Global Change Biology, 2015, 21: 1213−1225.

[4] Leo M, Oberhuber W, Schuster R, et al. Evaluating the effect of plant water availability on inner alpine coniferous trees based on sap flow measurements[J]. European Journal of Forest Research, 2014, 133: 691−698.

[5] 彭小梅, 车存伟, 苏靖茸, 等. 干旱区人工林稳定性与适宜性的树轮学评价体系构建与应用 [J]. 中国沙漠, 2024, 44(1): 1−10.
Peng X M, Che C W, Su J R, et al. Construction and application of a dendrochronological evaluation method for the stability and suitability of artificial forests in arid areas[J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(1): 1−10.

[6] Zheng X, Zhu J J, Yan Q L, et al. Effects of land use changes on the groundwater table and the decline of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in southern Horqin Sandy Land, Northeast China[J]. Agricultural Water Management, 2012, 109: 94−106.

[7] Song L N, Zhu J J, Zhang J X, et al. Divergent growth responses to warming and drying climates between native and non-native tree species in Northeast China[J]. Trees, 2019, 33: 1143−1155.

[8] 孜尔蝶·巴合提, 贾国栋, 余新晓, 等. 基于稳定同位素分析不同退化程度小叶杨水分来源 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(6): 1807−1816.
Zierdie·Baheti, Jia G D, Yu X X, et al. Assessing water sources for *Populus simonii* with different degrees of degradation based on stable isotopes[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(6): 1807−1816.

[9] Li M Y, Fang L D, Duan C Y, et al. Greater risk of hydraulic failure due to increased drought threatens pine plantations in Horqin Sandy Land of northern China[J/OL]. Forest Ecology and Management, 2020, 461: 117980[2023−02−21]. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117980.

[10] Grossiord C, Sevanto S, Dawson T E, et al. Warming combined with more extreme precipitation regimes modifies the water sources used by trees[J]. New Phytologist, 2017, 213: 584−596.

[11] Deng J F, Yao J Q, Zheng X, et al. Transpiration and canopy stomatal conductance dynamics of Mongolian pine plantations in semiarid deserts, Northern China[J/OL]. Agricultural Water Management, 2021, 249: 106806[2023−02−21]. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106806.

[12] Song L N, Zhu J J, Zheng X, et al. Comparison of canopy transpiration between *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Pinus tabuliformis* plantations in a semiarid sandy region of Northeast China[J/OL]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 314:

108784[2023−02−21]. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108784.

[13] 张凯, 孙艳丽, 隗骥超, 等. 北京山区大果榆树干液流的季节与昼夜环境调控 [J]. 林业科学, 2023, 59(7): 24−34.
Zhang K, Sun Y L, Wei J C, et al. Control of environmental factors on the sap flow at daily and seasonal scales in *Ulmus macrocarpa* in Beijing, China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023, 59(7): 24−34.

[14] Chang X X, Zhao W Z, He Z B. Radial pattern of sap flow and response to microclimate and soil moisture in Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) in the upper Heihe River Basin of arid northwestern China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 187: 14−21.

[15] Chen L X, Zhang Z Q, Li Z D, et al. Biophysical control of whole tree transpiration under an urban environment in northern China[J]. Journal of Hydrology, 2011, 402(3): 388−400.

[16] Du S, Wang Y L, Kume T, et al. Sap flow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(1): 1−10.

[17] 孔喆, 陈胜楠, 律江, 等. 欧美杨单株液流昼夜组成及其影响因素分析 [J]. 林业科学, 2020, 56(3): 8−20.
Kong Z, Chen S N, Lü J, et al. Characteristics of *Populus euramericana* sap flow over day and night and its influencing factors[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(3): 8−20.

[18] 马菁, 郭建斌, 刘泽彬, 等. 六盘山华北落叶松林分蒸腾日内变化及其对环境因子的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(5): 1−11.
Ma J, Guo J B, Liu Z B, et al. Diurnal variations of stand transpiration of *Larix principis-rupprechtii* forest and its response to environmental factors in Liupan Mountains of northwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(5): 1−11.

[19] 余新晓, 甘敬. 水源涵养林研究与示范 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2007: 258−270.
Yu X X, Gan J. Research and demonstration of water conservation forests[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2007: 258−270.

[20] 王绪芳, 井赵斌, 程积民, 等. 华北落叶松人工林生长的合理经营密度探讨 [J]. 贵州农业科学, 2013, 41(10): 168−171.
Wang X F, Jing Z B, Cheng J M, et al. Study on reasonable management density of *Larix principis-rupprechtii* artificial forest[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2013, 41(10): 168−171.

[21] 张丽楠, 王得祥, 郝亚中, 等. 陕西宁东林业局华北落叶松人工林最适经营密度研究 [J]. 西北林学院学报, 2013, 28(1): 146−150.
Zhang L N, Wang D X, Hao Y Z, et al. Optimal management density of *Larix principis-rupprechtii* plantations of Ningdong Forestry Bureau in Shanxi Province[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(1): 146−150.

[22] 刘慧敏, 韩海荣, 程小琴, 等. 不同密度调控强度对华北落叶松人工林土壤质量的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(6): 50−59.
Liu H M, Han H R, Cheng X Q, et al. Effects of different density regulation intensities on soil quality in *Larix principis-rupprechtii* plantation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(6): 50−59.

[23] 田平, 韩海荣, 康峰峰, 等. 密度调整对太岳山华北落叶松人工林冠层结构及林下植被的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(8): 45−53.
Tian P, Han H R, Kang F F, et al. Influence of density adjustment on canopy structure and understory vegetation of the *Larix principis-rupprechtii* plantation in Taiyue Mountain, Shanxi, China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(8): 45−53.

[24] 卫舒平, 梁文俊, 魏曦, 等. 不同密度华北落叶松林天然更新及其影响因子 [J]. 应用生态学报, 2022, 33(10): 2687−2694.
Wei S P, Liang W J, Wei X, et al. Natural regeneration of *Larix principis-rupprechtii* plantations with different densities and its influencing factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(10): 2687−2694.

[25] 陈雪姣. 洛南县油松人工林生长模型及合理密度研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
Chen X J. Research on growth model and stand reasonable density of *Pinus tabulaeformis* plantation in Luonan Area[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.

[26] 王玲, 赵广亮, 周红娟, 等. 华北地区油松人工林林分密度对土壤化学性质和酶活性的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(12): 9−16, 33.
Wang L, Zhao G L, Zhou H J, et al. Effects of stand density on soil chemical properties and enzyme activity of *Pinus tabulaeformis* in north China[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(12): 9−16, 33.

[27] 刘宇, 郭建斌, 王彦辉, 等. 宁夏六盘山不同密度华北落叶松人工林枯落物水文效应 [J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(8): 36−44.
Liu Y, Guo J B, Wang Y H, et al. Hydrological effects of forest litter of *Larix principis-rupprechtii* plantations with varying densities in Liupan Mountains of Ningxia, China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(8): 36−44.

[28] 韩辉, 张学利, 党宏忠, 等. 基于树干液流通量的沙地樟子松合理林分密度的确定 [J]. 林业科学研究, 2015, 28(6): 797−803.
Han H, Zhang X L, Dang H Z, et al. Study on proper stand density of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in sandy land based on stem sap flow velocity[J]. Forest Research, 2015, 28(6): 797−803.

[29] 熊伟, 王彦辉, 于澎涛, 等. 华北落叶松树干液流的个体差异和林分蒸腾估计的尺度上推 [J]. 林业科学, 2008, 44(1): 34−40.
Xiong W, Wang Y H, Yu P T, et al. Variation of sap flow among individual trees and scaling-up for estimation of transpiration of *Larix principis-rupprechtii* stand[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(1): 34−40.

（责任编辑 孟 瑶
责任编委 余新晓）