

桂西北不同年龄阶段秃杉人工林的水源涵养功能

张日施¹, 黄光友², 南雅薇¹, 何斌¹, 惠柳笛¹, 黄振格¹, 谢敏洋¹

(1.广西大学林学院广西森林生态和保育重点实验室, 南宁 530004; 2.南丹县山口林场, 广西 南丹 547200)

摘要: 为探究秃杉人工林水源涵养功能及其变化趋势, 以广西南丹县不同年龄阶段(9, 17, 25, 37 年生)秃杉人工林为研究对象, 采用室内浸泡法和环刀法分别研究 4 种林分的林冠层、林下植被层、凋落物层和土壤层持水特性。结果表明: (1) 秃杉人工林林冠层和林下植物层持水量分别为 18.79~28.37, 1.27~4.72 t/hm², 其中林下植物层持水量随林龄增加而显著增大($P < 0.05$); 凋落物现存量为 2.23~10.67 t/hm², 最大持水量为 5.95~34.15 t/hm², 随林龄增加而显著增大($P < 0.05$)。 (2) 不同林龄秃杉林土壤非毛管孔隙度和总孔隙度分别为 5.60%~15.68% 和 48.27%~66.85%, 其中 0—20, 20—40 cm 土层非毛管孔隙度和总孔隙度均显著大于 40—80 cm 土层($P < 0.05$), 同时随林龄增加而增大; 土壤层(0—80 cm)最大持水量和有效持水量分别为 4 196.74~4 416.47, 540.13~648.07 t/hm², 其中 0—20, 20—40 cm 土层最大持水量和有效持水量随林龄增加而增大。 (3) 9, 17, 25, 37 年生秃杉人工林林分的总持水量依次为 4 222.43, 4 272.55, 4 355.29, 4 484.32 t/hm², 随林龄增加而增大。 综上, 秃杉人工林能够改善土壤结构和水分状况, 增强林分水源涵养功能。

关键词: 秃杉人工林; 林龄; 水源涵养功能; 桂西北

中图分类号: S715.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)05-0130-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.05.019

Water Conservation Function of *Taiwania flousiana* Plantations at Different Ages in Northwest Guangxi

ZHANG Rishi¹, HANG Guangyou², NAN Yawei¹, HE Bin¹,

HUI Liudi¹, HUANG Zheng¹, XIE Minyang¹

(1. Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, Forestry College,

Guangxi University, Nanning 530004; 2. Shankou Forest Farm of Nandan County, Nandan, Guangxi 547200)

Abstract: In order to study the water conservation function and its change tendencies of *Taiwania flousiana* plantations, *T. flousiana* plantations at different ages (9, 17, 25 and 37 years old) in Nandan county of Guangxi were taken as research objects, and the water holding capacities of the canopy, undergrowth vegetation layer, litter layer and soil layer of the *T. flousiana* plantations were studied by the indoor soaking method and the cutting ring method. The results showed that: (1) The water holding capacity of the canopy and the vegetation layer under canopy for the different ages of *T. flousiana* plantations ranked 18.79 ~ 28.37 and 1.27 ~ 4.72 t/hm², respectively. The water holding capacity of the understory vegetation increased significantly with the increasing of forest age ($P < 0.05$). The litter amount was 2.23~10.67 t/hm², and the maximum water holding capacity was 5.95 ~ 34.15 t/hm², which increased significantly with the increasing of forest age ($P < 0.05$). (2) Soil non-capillary porosity and total porosity of different *T. flousiana* plantations were 5.60% ~ 15.68% and 48.27% ~ 66.85%, respectively. Soil non-capillary porosity and total porosity in 0—20 and 20—40 cm soil layers were significantly higher than those in 40—80 cm soil layers ($P < 0.05$), and increased with the increasing of forest age. The maximum water holding capacity and the effective water holding capacity of the soil layer (0—80 cm) were 4 196.74 ~ 4 416.47 and 540.13 ~ 648.07 t/hm², respectively. The maximum water holding capacity and the effective water holding capacity of the 0—20 and 20—40

收稿日期: 2021-03-27

资助项目: 广西重点研发计划项目(桂科 AB1729008); 国家自然科学基金项目(31760201, 31560206)

第一作者: 张日施(1997—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事森林培育与森林生态研究。E-mail: 1345072645@qq.com

通信作者: 何斌(1962—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事森林土壤、森林生态和森林培育研究。E-mail: hebin8812@163.com

cm soil layers increased with the increasing of forest age. (3) The total water storage capacity of 9, 17, 25 and 37 years old *T. flousiana* plantations were 4 222.43, 4 272.55, 4 355.29 and 4 484.32 t/hm², respectively, which increased with the increasing of forest age. In conclusion, the *T. flousiana* plantations could improve the soil structure and moisture condition and enhance the water conservation performance of stands.

Keywords: *Taiwania flousiana* plantation; forest age; water conservation function; northwest Guangxi

森林的水源涵养功能是森林生态系统的重要服务功能之一^[1],其研究贯穿于整个森林水文的研究过程,成为林学乃至生态学研究的重要领域,也是世界范围内林业发展所关注的热点问题之一^[1-2]。人工林作为森林生态系统的重要组成部分,在增加森林资源、发挥其木材产品生产功能的同时,在改善生态环境尤其是涵养水源和保持水土方面发挥着重要的作用^[3]。近些年来,有关学者^[4-8]先后对不同地域典型人工林的水源涵养功能开展了大量研究工作,结果表明,在人工林形成或演变过程中,其群落所具有的多层次结构,包括林冠层、林下植物层和凋落物层的结构组成、数量、性质等因演替或生长阶段的不同而不同,其通过凋落物和根系生长过程对土壤结构和孔隙状况的影响也不同,从而导致其对雨水的拦蓄和调节水分分配及流动过程等涵养水源和水土保持能力存在差异。何斌等^[6]、滕秋梅等^[8]分别对马占相思(*Acacia mangium* Willd.)和光皮桦(*Betula luminifera* H. Winkl)人工林持水性能的研究表明,2种林分不同结构层次涵养水源能力均表现为随着林龄的增加而增大的趋势,显示出其生长过程对提高水源涵养功能都有良好的作用。郭梦娇等^[9]对不同林龄油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)人工林水源涵养能力也取得了相同的研究结果。但马小欣等^[7]对华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr)人工林的研究表明,其林分水源涵养功能表现为近熟林>成熟林>中龄林>幼龄林。可见,不同人工林演替或生长过程中,其水源涵养功能的研究结果因林分类型和管理措施等不同而存在差异。因此,探讨人工林不同演替或生长阶段的水源涵养功能及其差异,揭示其影响机制,对正确评价人工林水文生态功能,合理经营森林资源,促进人工林可持续经营具有重要的作用和意义。

秃杉(*Taiwania flousiana* Gaussen)为杉科台湾杉属珍稀树种,具有生长快、病虫害极少,生物生产力及出材量高和材质好等优点,而且因其成熟期晚(一般60年以上才开花结实),速生持续时间长,其人工林培育过程中至今没有出现杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)大径材因处于成熟或过熟期而容易发生的枯梢及木材心腐现象,是南方部分中、低山区杉木采伐迹地更新的优良替代树种和退耕还林的重要栽培树种^[10-12],同时也是培育大径级珍贵用材和建设国家木材战略储

备林的优良树种。目前,有关秃杉人工林栽培及其相关研究已有较多的报道^[13-14],但涉及其水源涵养方面的研究很少,关于秃杉人工林生态水文的规律和机理还有待进一步研究。为此,本研究以广西南丹县秃杉人工林为研究对象,拟通过对9,17,25,37年生秃杉人工林不同结构层次持水性能的定量分析,探索秃杉人工林经营过程中不同年龄阶段水源涵养功能的差异及其变化规律,为准确评价其生态效益、实现人工林的可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于广西西北部的南丹县山口林场。南丹县(107°01'—107°55'E, 24°42'—25°37'N)地处云贵高原边缘,地貌以中低山为主,海拔高度多数在500~1 000 m,具有高原山区的气候特点和变化规律。年平均气温16.9℃,年均降水量1 498 mm,试验地海拔950~1 020 m,土壤母质(母岩)为砂页岩,风化程度较深,土壤类型为山地黄壤,平均土层厚度80 cm以上,腐殖质层厚度18~25 cm。

研究林分包括9,17,25,37年生共4个不同林龄秃杉人工林,前茬均为杉木人工纯林,造林密度均为2 500株/hm²(株行距2 m×2 m),造林措施为前茬林分采伐后,经炼山、挖穴(规格0.4 m×0.4 m×0.3 m)整地后,于第2年3—4月用秃杉(贵州雷公山种源)实生苗定植营造。造林后第1年秋季和第2,3年的春季和秋季分别进行1次铲草抚育;第9~10,14~15,19~20年分别进行间伐,间伐强度约为25%,20%,30%。各林龄样地基本情况见表1。

1.2 研究方法

根据南丹山口林场不同林龄秃杉林林分分布状况,于2018年3月分别选取9,17,25,37年生秃杉林为研究对象,在地理位置毗邻、立地条件相似和林分生长良好的地段,按照不同林龄各设置3个样地,样地大小为600 m²(20 m×30 m),进行林分生长调查,调查指标包括林冠郁闭度、林分密度,林木胸径、树高、冠幅和枝下高。计算平均胸径和平均树高。在每个林龄样地外选择3株平均木并伐倒,采用“Monsic分层切割法”分别测定地上部分树叶、树枝、干皮和干材鲜质量。在每块样地内按对角线设置2 m×2 m的小样方3个,调查林下植被(灌木和草本)种类、个

体数、高度和覆盖度等,采用“样方收获法”分别测定灌木层、草本层和凋落物层鲜重,采集乔木层、灌木层、草本层和凋落物层样品各 500~1 000 g,其中一部分样品经过烘干后测定干重和含水率,估算各结构层次生物量或现存量;另一部分用浸水法测定量和持

水率,估算各结构层次持水量^[8]。
在每块样地内按“S”形各设置 5 个土壤剖面,采集 0—20,20—40,40—80 cm 3 个土层样品,用环刀采集各土层原状土,用环刀法测定土壤容重、孔隙度、持水量、渗透性^[15]。

表 1 不同林龄秃杉人工林样地概况

林龄/a	林分密度/ (株·hm ⁻²)	坡向	坡位	坡度/(°)	平均 胸径/cm	平均 树高/m	郁闭度
9	2100	东北	中坡	28	11.86	9.38	0.87
17	1250	东北	中坡	31	19.83	16.21	0.83
25	850	东北	中坡	30	26.31	18.17	0.72
37	680	北	中坡	32	34.76	22.40	0.65

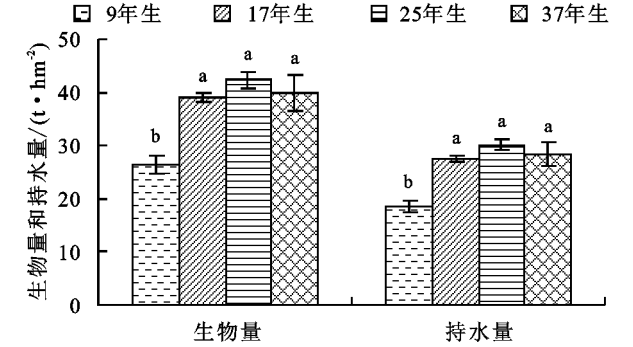
1.3 统计分析

运用 Excel 2013 软件进行数据的整理和计算,采用 SPSS 22.0 软件对不同林龄秃杉林各结构层次持水性能和不同土层水分—物理性质的差异显著性($P<0.05$)进行单因素方差分析(One-way ANOVA),并采用 Duncan 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同林龄秃杉林林冠层的持水性能

由图 1 可知,9,17,25,37 年生秃杉林林冠层生物量分别为 26.30,39.00,42.32,39.89 t/hm²,随林龄增加呈现先上升(9~25 年生)后缓慢下降(25~37 年生)的趋势,其中 17,25,37 年生相互间无显著差异($P>0.05$),但均显著高于 9 年生($P<0.05$);其持水量依次为 18.49,27.41,30.13,28.37 t/hm²,表现出与其生物量相同的变化趋势。可见,从 9 年生到 17 年生,秃杉林林冠层持水量随着生物量的增大而增大,17 年后林冠层生物量基本不变,其持水能力也维持较平稳的状态。



注:图柱上方小写字母不同表示不同林龄间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 不同林龄秃杉林林冠层持水性能

2.2 不同林龄秃杉林林下植物的持水性能

林下植物层包括灌木层和草本层。不同年龄阶段秃杉林因其形成时间和林分结构不同,其林下植物的种类和数量存在差异,导致其林下植物的持水性能也不同。从图 2 可以看出,9,17,25,37 年生秃杉林

林下植物生物量分别为 1.54,3.38,5.17,5.80 t/hm²,均随林龄增加而显著增大($P<0.05$);其持水量分别为 1.27,2.78,4.34,4.72 t/hm²,呈现与生物量相同的变化趋势,表明秃杉林生长过程促进了林下植物的生物积累,同时也提高其持水能力。

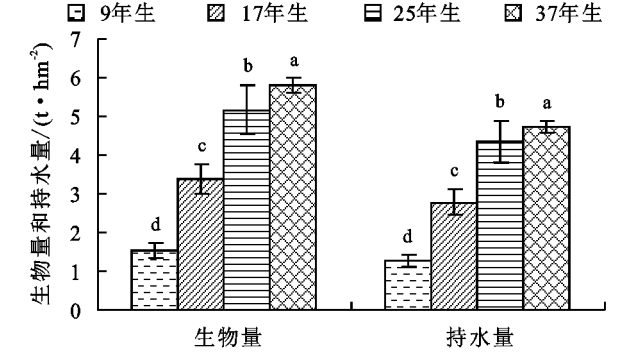


图 2 不同林龄秃杉林林下植物层持水性能

2.2.1 凋落物现存量 林地凋落物按其分解程度分为未分解层和半分解层。由图 3 可知,秃杉林凋落物现存量依次为 2.23,5.50,7.04,10.67 t/hm²,随林龄增加而显著增加($P<0.05$),其中未分解层现存量分别占 62.78%,52.43%,46.17%,38.33%,随林龄增加而显著减少;半分解层现存量分别占 37.22%,47.57%,53.83%,61.67%,随林龄增加而显著增加。说明秃杉林的生长过程,不但可以促进林地凋落物的生物积累,同时也促使其从未分解层转化为半分解层,最后经过代谢、降解形成有机物等物质而回归土壤,从而改善土壤结构和孔隙性状。

2.2.2 凋落物层持水率 凋落物持水率是反映其持水能力的重要指标,其大小主要与林分类型、组成、积类与分解状况等密切相关。一般来说,凋落物层蓄积量大,层次厚,分解快,分解彻底,则饱和持水率越大。由图 4 可知,在各不同浸泡时间内,不同林龄秃杉林凋落物持水率均为 37 年生>25 年生>17 年生>9 年生,即林龄增加而增大,与凋落物量及其组成中半分解层蓄积量所占比例的变化规律相一致。从整个 24 h 的吸水过程看,各林龄凋落物持水率均表现为

随浸泡时间增加而升高的变化趋势,其中以 0.5~4 h 间增加的幅度最大,4~8 h 间逐渐减小,8~10 h 间趋于平缓,10 h 时后基本趋于饱和状态,至 24 h 时,各林龄秃杉林凋落物最大持水率分别达到 267.3%, 288.4%, 311.6%, 320.1%。

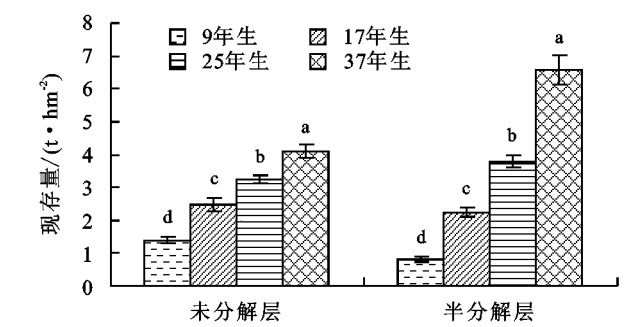


图 3 不同林龄秃杉林凋落物现存量

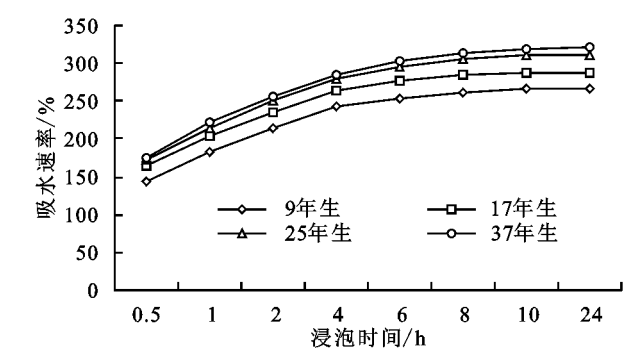


图 4 不同林龄秃杉林凋落物层持水速率

2.2.3 凋落物吸水速率 由图 5 可知,各林龄凋落物吸水速率均随浸泡时间增加而下降,与其持水率表现为相反的变化趋势,其中以浸泡时间 0.5 h 吸水速率最快,0.5~10 h,吸水速率随浸泡时间的增加而逐渐下降;10~24 h 下降速度或者持水量趋于平缓。从不同林龄凋落物整个 24 h 的吸水速率来看,0.5 h 时吸水速率依次达到 2 874, 3 268, 3 432, 3 504 g/(kg·h),其中 25, 37 年生与 9 年生间的差异显著 ($P<0.05$);此后,随着浸泡时间的延长,各林龄凋落物吸水速率间的差异逐渐减少,至 10 h 后吸水速率已逐渐趋于动态平衡。结果表明,随着浸泡时间的延长,凋落物持水量逐渐接近于最大持水量,同时逐渐趋于饱和,其吸水速率也随之变小。

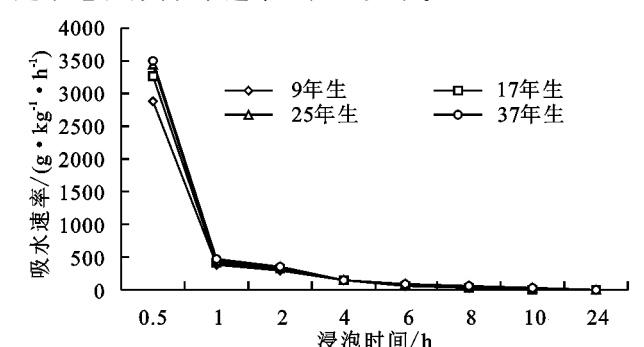


图 5 不同林龄秃杉林凋落物吸水速率与浸泡时间的关系
将凋落物吸水速率 WA (g/(kg·h)) 与其浸水时间

$t(h)$ 的关系进行拟合,其关系符合 $WA = a + b/t$ 方程式。式中: a 和 b 分别为常数和线性系数。所得拟合方程分别为: 9 年生秃杉林, $WA = -234.402 + 1365.064/t$, $R^2 = 0.885$; 17 年生秃杉林, $WA = -280.705 + 1552.408/t$, 相关系数 $R^2 = 0.879$; 25 年生秃杉林, $WA = -285.591 + 1625.720/t$, $R^2 = 0.878$; 37 年生秃杉林, $WA = -290.246 + 1662.135/t$, $R^2 = 0.881$; 各林龄凋落物吸水速率与浸泡时间的相关关系均达到极显著相关水平 ($P<0.01$)。

2.2.4 凋落物最大持水量 凋落物的最大持水量是反映凋落物持水性能的一个重要指标,其主要决定于凋落物的现存量及其最大持水率。本研究以凋落物浸泡 24 h 时的持水率为最大持水率(图 5),依据各林龄凋落物层现存量(图 3)计算其最大持水量。结果表明,9, 17, 25, 37 年生秃杉林凋落物层最大持水量分别为 5.95, 13.84, 21.95, 34.15 t/hm², 随林龄增加而显著增大 ($P<0.05$) (图 6)。

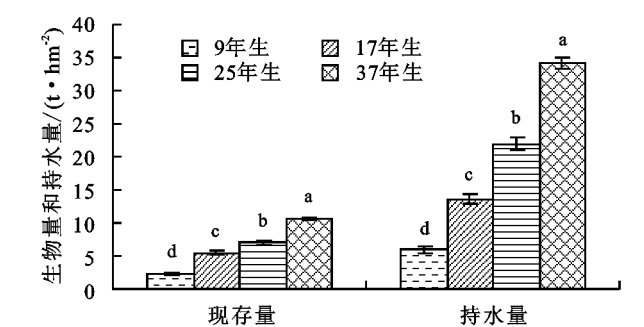


图 6 不同林龄秃杉林凋落物层持水性能

2.3 土壤的持水性能

2.3.1 土壤容重和孔隙状况 土壤容重和孔隙度是评价土壤质量的重要指标,反映着土体构造的虚实松紧,决定着土壤的透气和保水等性能的大小。由表 2 可知,各林龄秃杉人工林土壤容重为 0.852~1.293 g/cm³,土壤非毛管孔隙度和总孔隙度分别为 4.80%~66.85% 和 43.47%~66.85%,其中秃杉根系主要分布的 0—20, 20—40 cm 土层容重均 ≤ 1.011 g/cm³,总孔隙度均在 52% 以上,均显著高于 40—80 cm 土层 ($P<0.05$);而秃杉林 0—20, 20—40 cm 土层容重均随林龄增加而下降,土壤非毛管孔隙、毛管孔隙和总孔隙度均随林龄增加呈现逐渐增大趋势,其中 0—20 cm 土层中 37 年生与 9, 17 年生之间非毛管孔隙的差异均达到显著水平 ($P<0.05$)。

2.3.2 林地土壤的渗透性能 林地土壤对降雨的调节能力主要表现在对降雨的渗透能力和蓄水能力 2 个方面。其中土壤渗透性能的大小与土壤容重、孔隙度和有机质含量等密切相关。从表 3 可以看出,秃杉人工林土壤渗透速度呈现随土层深度增加而下降的变化趋势,而在 0—20, 20—40 cm 土层,土壤渗透速度均表现出随林龄增加而增大的趋势,其中 37 年生

与 9 年生土壤初渗速率间以及稳渗速率间的差异均达到显著水平($P<0.05$)。

表 2 不同林龄秃杉林土壤容重和孔隙

林龄/a	土层 深度/cm	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	土壤容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	毛管 孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%	总孔隙度/%
9	0—20	64.06±4.91b	0.935±0.04a	48.87±2.37a	11.74±1.46b	60.61±3.55a
	20—40	33.27±3.17b	1.011±0.05a	46.97±4.66a	5.60±1.54b	52.57±3.84a
	40—80	11.35±0.78a	1.293±0.04a	43.49±3.05a	4.83±0.89a	48.33±2.34a
17	0—20	65.98±3.76b	0.907±0.05a	48.96±3.86a	13.17±2.38b	62.13±0.48a
	20—40	34.22±1.47ab	0.994±0.03a	47.74±1.26a	5.67±1.40b	54.42±1.69a
	40—80	12.02±0.64a	1.265±0.08a	43.47±0.76a	4.80±0.44a	48.27±1.19a
25	0—20	69.56±5.75ab	0.876±0.04a	49.13±2.18a	14.10±1.65a	63.23±0.80a
	20—40	37.65±2.98a	0.982±0.08a	47.43±2.62a	6.21±0.64ab	53.64±3.24a
	40—80	12.40±0.72a	1.274±0.07a	43.81±1.73a	4.87±0.70a	48.68±1.10a
37	0—20	76.08±5.59a	0.852±0.05a	51.80±3.53a	15.18±1.36a	66.85±2.18a
	20—40	39.74±3.47a	0.957±0.03a	48.07±3.09a	7.03±1.35a	55.10±2.26a
	40—80	12.54±0.83a	1.245±0.04a	43.89±1.00a	4.85±0.62a	48.74±0.38a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示相同土层次不同林龄之间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.3.3 林地土壤的水分贮蓄性能 土壤最大持水量 4 416.47 t/hm²,土壤有效持水量分别为 540.13,568.87, 包括毛管孔隙持水量和非毛管孔隙持水量(即有效持 601.00,648.07 t/hm²,不同土层最大持水量和非毛 水量),它反映了土壤贮蓄和调节水分的潜在能力。 管持水量总体上均呈现随林龄增加而增大的变化趋 由表 3 可知,9,17,23,35 年生秃杉林土壤层(0—80 势,其中 0—20 cm 土层非毛管持水量中 37 年生与 9 年生间的差异性均达到显著水平($P<0.05$)。

表 3 不同林龄秃杉林土壤渗透和持水性能

林龄/ a	土层 深度/cm	初渗速率/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	稳渗速率/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	有效持水量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	最大持水量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	土壤层总持水量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)
9	0—20	19.83±2.35b	11.07±0.94b	234.60±29.23b	1212.20±71.04a	4196.74±128.73a
	20—40	13.37±1.08b	6.54±0.37b	112.07±20.79b	1051.47±76.71a	
	40—80	8.71±0.54a	4.64±0.25a	193.47±35.60a	1933.07±93.67a	
17	0—20	22.36±2.10b	11.75±1.08b	263.40±47.56b	1229.67±29.67a	4228.72±16.74a
	20—40	14.05±0.92a	7.16±0.52a	113.47±28.02b	1068.27±33.79a	
	40—80	8.50±0.64a	5.17±0.34a	192.00±17.43a	1930.80±47.77a	
25	0—20	24.67±1.97b	17.65±2.01a	281.93±33.02ba	1264.60±15.98a	4297.87±86.52a
	20—40	15.28±1.22a	8.02±0.70a	124.27±12.78ab	1182.20±63.78a	
	40—80	9.13±0.80a	5.30±0.39a	194.80±28.01a	1951.07±44.20a	
37	0—20	31.57±3.05a	18.29±1.53a	313.53±27.10a	1336.93±43.09a	4416.47±52.57a
	20—40	15.86±1.72a	7.84±0.61a	140.53±27.07a	1121.92±35.97a	
	40—80	9.42±0.48a	5.52±0.37a	94.00±24.88a	1957.60±23.21a	

2.4 林分水源涵养功能

林分的总持水量由林分地上部分即林冠层、林下 植被层、凋落物层和地下部分即土壤层的涵养水分能 力所决定。由表 4 可知,9,17,25,37 年生秃杉林林 分总持水量分别为 4 222.43,4 272.55,4 355.29, 4 484.32 t/hm²,随林分生长过程而增大,地上部分 持水量所占比例仅为 0.56%~1.51%,但地上部分在 截留降雨、阻挡雨水对土壤的溅打、侵蚀,减少地表径 流中起着十分重要的作用。4 种林分土壤层(0—80 cm)持水量均占总持水量的 98%以上,其他层次持水

量之和所占比例均小于 2%,表明秃杉林土壤层在水 源涵养功能方面的作用远大于其他结构层次。

3 讨论

森林水源涵养功能首先体现在林冠层(枝叶) 对降雨的截留,其通过对降雨的重新分配,既可以 避免雨水对地面的直接溅击,缓解降雨对地表的 侵蚀,同时能够截留部分降雨量,减少地表土壤的 流失^[6]。林冠层截留降雨作用的大小主要决定于林 冠层的生物量、叶面积指数和持水率。本研究中,不 同林龄秃杉林枝叶均较浓密,成层性明显,其生物量

和持水量分别为 26.30~42.32,18.49~30.13 t/hm²,均呈现随林龄增加先增大后缓慢下降的变化趋势,且都明显高于相同区域的相近林龄的光皮桦人工

林和杉木人工林^[8],表明各林龄秃杉林林冠层持水能力均较强,且随生长过程先增加然后维持较高的持水量水平。

表 4 不同林龄秃杉人工林林分总持水量 单位:t/hm²

林龄/a	地上部分			土壤层	总持水量
	林冠层	林下植物层	凋落物层		
9	18.49±1.19b	1.27±0.16d	5.95±0.46d	4196.73±128.83a	4222.43±129.56a
17	27.41±0.57a	2.78±0.32c	13.64±0.98c	4228.72±16.74a	4272.55±16.20a
25	30.13±1.03a	4.34±0.54b	21.95±0.92b	4297.87±86.52a	4355.29±87.26a
37	28.37±2.34a	5.32±0.18a	34.15±1.78a	4416.47±52.57a	4484.32±55.74a

林下植物层是森林发挥水源涵养作用的第 2 层次,其通过对穿过林冠层后降雨的再次截留,进一步减弱降雨溅打土壤能力^[6]。林下植物层持水性能主要决定于其生物量和持水率的大小。本研究中,受树种特性和林分结构特征的影响,各林龄秃杉林林下植物层总体上发育均较差,但其生物量(1.54~5.80 t/hm²)和持水量(1.27~4.72 t/hm²)仍然表现出随林龄增加而增大的变化趋势。因此,秃杉林生长过程既促进了林下植物的生物积累,同时也促进其持水能力的提高。

森林凋落物是植物—土壤养分循环的联结库,具有涵养水源、保持水土、提高土壤渗透能力和改善土壤结构等理化性质的作用。凋落物层的水源涵养功能主要通过其现存量和持水能力来体现^[16],其中现存量是森林凋落物凋落与分解之间的动态平衡,其又与其群落结构、树龄组成及其所处气候带的水热条件等密切相关^[17]。与本研究相同气候带(中亚热带)的广西天峨县 16 年生杉木林凋落物现存量为 3.17 t/hm²^[8],福建省三明市不同发育阶段(10~34 年生)杉木人工林凋落物现存量和最大持水量分别为 1.53~3.47 t/hm²^[18],湖南省会同县不同林龄(11~35 年生)杉木林凋落物现存量为 1.26~2.74 t/hm²^[17],广西横县 13~50 年生马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)人工林凋落物现存量为 2.30~4.41 t/hm²^[19]。本研究中,9,17,25,37 年生秃杉林凋落物层现存量分别为 2.23,5.50,7.04,10.67 t/hm²,随林龄增加而增大,表现出与马占相思^[6]和杉木人工林^[17-18]相同的变化趋势,且均高于相同气候带且相同或相近林龄的杉木人工林^[8,17],表明秃杉林凋落物较丰富,同时说明秃杉人工林的生长过程有利于其凋落物的生物积累。而不同林龄秃杉林凋落物最大持水率在 267.3%~320.1%,随林龄增加而升高,且高于湖南省会同县相近林龄杉木人工林(196.03%~242.28%)^[18],也高于相近林龄的广西横县马尾松人工林(190.90%~224.87%)^[19]和广西南宁市 4~11 年生马占相思人工林(247.93%~251.03%)^[6],说明秃杉林凋落物具有较高持水率,其原因可能是秃杉林凋落物组成主要以持水率较高的

凋落叶和柔软小枝为主,且其组成中未分解层疏松、持水率较高的半分解层现存量随林龄增加而增大。凋落物的最大持水量是其水源涵养功能的主要表征。本研究得出,9,17,25,37 年生秃杉林凋落物最大持水量依次为 5.95,14.71,22.56,33.25 t/hm²,均明显高于相近林龄的福建省三明市杉木人工林(4.24~11.80 t/hm²)^[17]和湖南省会同县杉木人工林(2.47~6.59 t/hm²)^[18],以及广西横县马尾松人工林(5.76~9.47 t/hm²)^[19];而秃杉林凋落物吸水速率均表现以浸泡 0.5 h 最大,随着浸泡时间的延长,各林龄凋落物吸水速率逐渐趋向一致,与周丽丽等^[17]、夏璟钰等^[18]对杉木林的研究结果相一致。可见,秃杉林能够通过其比较丰富的凋落物层覆盖地表形成保护层,避免降雨对地表土壤的直接溅蚀打击,并在较短时间内迅速截持降水,从而起到减少地表径流发生及其对土壤的侵蚀作用。

土壤是森林贮存水分的最主要场所,其蓄水能力的大小与林地土壤的种类、容重以及孔隙度等密切相关^[6]。土壤容重和孔隙状况是土体构造虚实松紧的反映,影响土壤的通气性、透水性及其贮存水分能力^[20]。不同森林类型因其林分结构、林木组成等不同,其对土壤结构、孔隙状况的影响也不同,导致其水文生态效应存在一定差异^[21]。本研究中,9~37 年生秃杉人工林各土层容重为 0.852~1.293 g/cm³,土壤总孔隙度为 48.27%~66.85%,其中 0—40 cm 土壤容重(0.852~1.011 g/cm³)明显小于广西南宁马占相思人工林^[6]、河北省辽河源自然保护区油松天然林^[9]、安徽老山亚热带常绿阔叶林^[22]和湖南平江县杉木人工林^[23]的研究结果,表明本研究区林地土壤较疏松、通气透水性能和水源涵养性能较强,这也是该地区秃杉人工林生长良好、并具有较高生物生产力的重要原因之一。各林龄秃杉林土壤容重均随着土层加深而增大,土壤非毛管孔隙度、毛管孔隙度和总孔隙度呈现相反的趋势,这与何斌等^[6]对马占相思人工林和王燕等^[24]对马尾松人工林的研究结果相一致。而秃杉林 0—20,20—40 cm 土层容重均随林龄

增加而下降,土壤非毛管孔隙、总孔隙度和渗透速率则表现为相反的变化趋势,其原因可能是在秃杉林形成和生长过程中:一方面,秃杉林凋落物较丰富,通过分解和腐殖化作用促进了土壤有机质的生物积累(表 3);另一方面,其作为浅根性树种,根系发达、疏散,根系之间相互连生^[25],通过其庞大的根系的穿插、伸展产生各种孔隙,以及大量活根的分泌和死根系(包括间伐过程中留在林地的大量根系)的腐解增加土壤有机质含量和大量孔隙。本研究中,9,17,25,37 年生秃杉人工林土壤(0—80 cm)最大持水量分别为 4 196.74,4 228.72,4 297.87,4 416.47 t/hm²,土壤有效持水量分别为 540.13,568.87,601.00,648.07 t/hm²,均随林龄增加而增大,表现出与徐小牛等^[22]、李际平等^[23]、何斌等^[6]相同的研究结果。由此可见,秃杉人工林的生长过程能够改善林地土壤结构和孔隙状况,降低土壤容重,增加降水在土壤中的渗透速度,减少因超渗而容易出现的地表径流现象,从而提高林地土壤的水源涵养功能。

综上所述,秃杉人工林生长过程中,不但可以通过其林冠层、林下植物层和凋落物层的生物积累,拦截降雨,降低径流对土壤冲刷作用,涵养水源和保持水土;而且通过其凋落物的分解和腐殖化作用、根系的穿插伸展以及活根的分泌和死根的腐解作用,改善土壤结构和孔隙状况,提高土壤持水性能,促使林分持水能力呈现出随林龄增加而增大的变化趋势,从而表现出更好的水源涵养功能。

4 结论

(1)秃杉人工林地上部分持水量依次为 25.71,43.83,56.42,67.85 t/hm²,其中林下植物和凋落物层持水量分别为 1.27~4.72,5.95~34.15 t/hm²,均随林龄增加而增大;林冠层持水量为 18.49~28.37 t/hm²,随林龄增加呈现先增加后下降的变化。随着秃杉人工林的生长,林地土壤渗透性能和持水性能逐渐得到改善,其中土壤最大持水量表现为 37 年生(4 416.47 t/hm²)>25 年生(4 297.87 t/hm²)>17 年生(4 228.72 t/hm²)>9 年生(4 196.74 t/hm²),随林龄增加而增大。

(2)综合 4 种秃杉人工林分总持水性能,其由高到低次序为 37 年生(4 484.32 t/hm²)>25 年生(4 355.29 t/hm²)>17 年生(4 272.55 t/hm²)>9 年生(4 222.43 t/hm²),其中 9,17 年生林分总持水量均明显高于相近区域、相近林龄的光皮桦和杉木人工林^[8],表明本研究区秃杉人工林水源涵养功能较强。各林龄秃杉人工林持水量分配中,林地土壤持水量占 98.5%以上,地上部分持水量均小于 1.40%,说明林地土壤仍然是秃杉人工林贮存水分的最主要场所。

(3)秃杉作为著名的长寿树种,兼具速生和速生持续期长的优点,是培育大径级珍贵用材的理想树种,但目前我国秃杉人工林经营目标主要以培育中小径材为主,经济效益和生态效益均较差,而且不利于林地地力维持。因此,合理发展秃杉大径级珍贵用材林,不但可以提高经济效益,而且具有良好的涵养水源和保持水土等生态功能,对维护林地地力、保护生态环境、促进人工林的可持续经营与发展具有重要作用和意义。

参考文献:

- [1] Zhang B, Li W H, Xie G D, et al. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value[J]. Ecological Economics, 2008, 69(7): 1416-71426.
- [2] Zhang B, Yan Y, Yang Y. Regional differences of water conservation in Beijing's forest ecosystem[J]. Journal of Forestry Research, 2011, 22(2): 295-300.
- [3] 周佳雯,高吉喜,高志球,等.森林生态系统水源涵养服务功能解析[J].生态学报,2018,38(5):1679-1686.
- [4] Zhang C, Yan H F, Takase K, et al. Comparison of the soil physical properties and hydrological processes in two different forest type catchments [J]. Water Resources, 2016, 43(1): 225-237.
- [5] 涂志华,范志平,孙学凯,等.大伙房水库流域不同植被类型枯落物层和土壤层水文效应[J].水土保持学报,2019,33(1): 127-33.
- [6] 何斌,秦武明,戴军,等.马占相思人工林不同年龄阶段水源涵养功能及其价值研究[J].水土保持学报,2006,20(5):5-8,27.
- [7] 马小欣,赵鹏飞,陆贵巧,等.冀北山区华北落叶松人工林水源涵养功能评价[J].中南林业科技大学学报,2016,36(4):84-89.
- [8] 滕秋梅,何斌,徐广平,等.桂西北光皮桦人工林水源涵养功能[J].水土保持学报,2019,33(5):177-184,189.
- [9] 郭梦娇,朱江,程小琴,等.辽河源不同林龄油松林水源涵养能力研究[J].水土保持学报,2016,30(3):279-284.
- [10] 谢敏洋,何斌,戴军,等.桂西北秃杉人工林不同年龄阶段的固碳功能[J].林业科学研究,2020,33(5):106-113.
- [11] Liu K, Wei J G, He B, et al. Biomass Productivity of *Taiwania flousiana* plantation and successive rotation plantation of *Cunninghamia lanceolata* in cutover Forest Land of *C. Lanceolata* [J]. Agricultural Biotechnology, 2018, 7(4): 178-180, 186.
- [12] 何斌,卢万鹏,唐光卫,等.桂西北秃杉人工林土壤肥力变化的研究[J].林业科学研究,2015,28(1):88-92.
- [13] 陈卓梅,郑郁善,黄先华,等.秃杉混交林水源涵养功能的研究[J].福建林学院学报,2002,22(3):266-269.
- [14] 何斌,黄承标,韦家国,等.不同林龄秃杉人工林凋落物储量及其持水特性[J].东北林业大学学报,2009,37(3):44-46.

- urated hydraulic conductivity from open-access soil databases[J]. *Catena*, 2021, 197: e104973.
- [7] Bagarello V, Lovino M, Lai J B. Accuracy of saturated soil hydraulic conductivity estimated from numerically simulated single-ring infiltrations[J]. *Vadose Zone Journal*, 2019, 18(1): e180122.
- [8] 胡伟, 邵明安, 王全九, 等. 取样尺寸对土壤饱和导水率测定结果的影响[J]. *土壤学报*, 2005, 42(6): 1040-1043.
- [9] Zhang Y Y, Zhao W Z, Li X B, et al. Contribution of soil macropores to water infiltration across different land use types in a desert-oasis ecoregion[J]. *Land Degradation and Development*, 2020, 32(4): 1751-1760.
- [10] Caldwell T G, Young M H, Mc Donald E V, et al. Soil heterogeneity in Mojave Desert shrublands: Biotic and abiotic processes[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(9): 9551-9563.
- [11] Schwärzel K, Punzel J. Hood infiltrometer: A new type of tension infiltrometer[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(5): 1438-1447.
- [12] Wooding R A. Steady infiltration from a shallow circular pond[J]. *Water Resources Research*, 1968, 4(6): 1259-1273.
- [13] Gardner W R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table[J]. *Soil Science*, 1958, 85(4): 228-232.
- [14] Webster R, Burgess T M. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties iii changing drift and universal kriging[J]. *European Journal of Soil Science*, 1980, 31(3): 505-524.
- [15] 李丹凤. 黑河中游绿洲土壤物理性质的时空变异性研究[D]. 陕西 杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2014.
- [16] 刘春利, 胡伟, 贾宏福, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错区坡地土壤剖面饱和导水率空间异质性[J]. *生态学报*, 2012, 32(4): 207-215.
- [17] 姚淑霞, 赵传成, 张铜会. 科尔沁不同沙地土壤饱和导水率比较研究[J]. *土壤学报*, 2013, 50(3): 469-477.
- [18] 邵明安, 王全九, 黄明斌. *土壤物理学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 87-97.
- [19] Zhang Y Y, Zhao W Z, He J H, et al. Soil susceptibility to macropore flow across a desert: Oasis ecotone of the Hexi corridor, northwest china [J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(2): 1281-1294.
- [20] Zhang Z B, Lin L, Wang Y, et al. Temporal change in soil macropores measured using tension infiltrometer under different land uses and slope positions in subtropical China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, 16(3): 854-863.
- [21] 吕殿青, 邵明安, 潘云. 容重变化与土壤水分特征的依赖关系研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(3): 209-212, 216.
- [22] Flatman G T, Yfantis A A. Geostatistical strategy for soil sampling: The survey and the census[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1984, 4(4): 335-349.
- [23] Zhao C L, Shao M A, Jia X X, et al. Using pedotransfer functions to estimate soil hydraulic conductivity in the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2016, 14: 1-6.
- [24] 于冬雪, 贾小旭, 黄来明. 黄土区不同土层饱和导水率空间变异与影响因素[J]. *土壤通报*, 2018, 49(5): 1073-1079.
- [25] 李涛, 李晓琳, 郝新梅, 等. 应用土壤质地预测干旱区葡萄园土壤饱和导水率空间分布[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(9): 84-92.
- (上接第136页)
- [15] 国家林业局. 中华人民共和国林业行业标准: 森林土壤分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999: 21-151.
- [16] 林立文, 邓羽松, 李佩琦, 等. 桂北地区不同密度杉木林枯落物与土壤水文效应[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 200-207, 215.
- [17] 夏璟钰, 王雯颖, 蒋林君, 等. 不同林龄杉木人工林凋落物持水特性研究[J]. *广西林业科学*, 2019, 48(4): 449-454.
- [18] 周丽丽, 蔡丽平, 马祥庆, 等. 不同发育阶段杉木人工林凋落物的生态水文功能[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(5): 249-253.
- [19] 李海防, 范志伟, 颜培栋, 等. 不同年龄马尾松人工林水源涵养能力比较研究[J]. *福建林学院学报*, 2011, 31(4): 320-323.
- [20] 郑力文. 林木根系对土壤性质的影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [21] 冯宜明, 李毅, 曹秀文, 等. 甘肃亚高山云杉人工林土壤特性及水源涵养功能对林分密度的响应特征[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(9): 1529-1541.
- [22] 徐小牛, 邓文鑫, 张赞齐, 等. 安徽老山亚热带常绿阔叶林不同林龄阶段土壤特性及其水源涵养功能的变化[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(1): 177-181.
- [23] 李际平, 李沛霖, 曹小玉, 等. 福寿林场杉木人工林水源涵养功能比较研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2014, 34(7): 80-83, 129.
- [24] 王燕, 宫渊波, 尹艳杰, 等. 不同林龄马尾松人工林土壤水土保持功能[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(5): 23-27, 31.
- [25] 孙志刚, 陈强, 苏俊武, 等. 秃杉持续生长力的探讨[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(5): 116-119.