福建省长汀县不同生长年限杉木人工林水源涵养能力评估

杨学安[1], 岳 辉[2], 林根根[2], 霍鑫豪[1], 沈子雅[1], 程金花[1], 赵辰辰[1]
(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.长汀县水土保持中心, 福建 长汀 366300)

摘 要: [目的]探明南方低山丘陵区不同生长年限杉木人工林水源涵养能力的差异,为理解杉木人工林的水源涵养能力以及科学管理提供理论依据。[方法]根据福建省长汀县杉木人工林栽植情况,选择5个不同生长年限(3,4,7,8,11 a)杉木人工林作为研究对象,通过野外调查与室内试验相结合,并采用单因素方差分析法,对各林分地表枯落物层(蓄积量、持水量、拦蓄能力和持水过程)以及土壤层(容重、孔隙度、饱和导水率和拦蓄能力)进行研究,通过累加枯落物层和土壤层水源涵养量来对林分整体水源涵养能力进行综合评估。[结果]①5种林分枯落物层水源涵养量为8.51~17.10 t/hm^2,大小顺序依次为:11 a>4 a>3 a>8 a>7 a。②5种林分土壤层水源涵养量为352.90~504.58 t/hm^2,顺序依次为:8 a>7 a>11 a>4 a>3 a。③林分枯落物层和土壤层水源涵养量的总和为362.96~513.45 t/hm^2,顺序依次为:8 a>7 a>11 a>4 a>3 a。[结论]①杉木林枯落物层、土壤层及林地水源涵养能力随生长年限呈非线性增加;②枯落物层水源涵养能力主要是受到枯落物蓄积量和分解程度的影响,土壤层水源涵养能力主要是受到林木根系生长和土壤养分的影响;③土壤层有效蓄水量占总涵养量的95%以上,是杉木人工林涵养水源的主体;④建议对年限在3~4 a的林地主要从土壤层进行土壤物理结构改良,提升土壤的渗透性能;年限8~11 a的林分可能出现衰退,可通过提高土壤养分,合理管理枯落物层的积累和分解,同时也可进行杉木与阔叶树混交来提升土壤渗透性。

关键词: 杉木林; 水源涵养; 枯落物层; 土壤层; 福建省长汀县
文献标识码: B **文章编号:** 1000-288X(2026)03-0223-12 **中图分类号:** S715.7

文献参数: 杨学安, 岳辉, 林根根, 等.福建省长汀县不同生长年限杉木人工林水源涵养能力评估[J].水土保持通报, 2026, 46(3): 223-234. Yang Xuean, Yue Hui, Lin Gengen, et al. Assessment of water conservation capacity of *Cunninghamia lanceolata* plantations with different stand ages in Changting County, Fujian Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(3): 223-234.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.017 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.03.017**

Assessment of water conservation capacity of *Cunninghamia lanceolata* plantations with different stand ages in Changting County, Fujian Province

Yang Xuean[1], Yue Hui[2], Lin Gengen[2], Huo Xinhao[1], Shen Ziya[1], Cheng Jinhua[1], Zhao Chenchen[1]
(1.*College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*; 2.*Changting County Soil and Water Conservation Center, Changting, Fujian* 366300, *China*)

Abstract: [Objective] Differences in water conservation capacity among *Cunninghamia lanceolata* plantations with different stand ages in the low-mountain and hilly regions of southern China were investigated in order to provide a scientific basis for understanding the water conservation capacity of *C. lanceolata* plantations and their scientific management. [Methods] Based on the planting conditions of *C. lanceolata* plantations in Changting County, Fujian Province, five plantations with different stand ages (3, 4, 7, 8, and 11 years) were selected as the study objects. Field investigations combined with laboratory experiments were conducted, and one-way analysis of variance was used to investigate the forest-floor litter layer (accumulation, water-holding capacity, retention capacity, and water-holding process) and the soil layer (bulk density, porosity, saturated hydraulic conductivity, and retention capacity). The overall water conservation capacity of each stand was evaluated by

收稿日期:2025-08-28 **修回日期:**2025-12-10 **采用日期:**2025-12-12
资助项目:"十四五"国家重点研发计划项目"低质低效人工林林下植被功能群诱导恢复与生态服务协同提升技术"(2023YFF1304403)
第一作者:杨学安(2001—),男(汉族),河北省石家庄市人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀。Email:1098064591@qq.com。
通信作者:程金花(1979—),女(汉族),山东省聊城市人,博士,教授,主要从事土壤侵蚀及森林水文等方面的研究。Email:Jinhua_cheng@126.com。

cumulatively calculating the water conservation amounts of the two layers. [Results] ① The water conservation capacity of the litter layer in the five stands ranged from 8.51 t/hm^2 to 17.10 t/hm^2, with the order being 11 years > 4 years > 3 years > 8 years > 7 years. ② The water conservation capacity of the soil layer in the five stands ranged from 352.90 t/hm^2 to 504.58 t/hm^2, with the order being 8 years > 7 years > 11 years > 4 years > 3 years. ③ The total water conservation capacity of the litter layer and soil layer ranged from 362.96 t/hm^2 to 513.45 t/hm^2, with the order being 8 years > 7 years > 11 years > 4 years > 3 years. [Conclusion] ① The water conservation capacity in the litter layer, soil layer, and forest land of *C. lanceolata* plantations increases nonlinearly with growing stand age. ② Litter layer water conservation capacity is primarily influenced by litter accumulation and decomposition degree, while the water conservation capacity of the soil layer is mainly affected by tree root growth and soil nutrients. ③ The effective water storage of the soil layer accounts for more than 95% of the total, and forest soil is the primary component of water conservation in *C. lanceolata* plantations. ④ For stands aged 3—4 years, management should mainly focus on the soil layer by improving the soil physical structure to enhance soil permeability. For stands aged 8—11 years that may enter a decline stage, improvement can be achieved by increasing soil nutrients, reasonably managing the accumulation and decomposition of the litter layer, and implementing mixed plantations of *C. lanceolata* and broadleaf trees.

Keywords: ***Cunninghamia lanceolata* plantations; water conservation; litter layer; soil layer; Changting County, Fujian Province**

森林作为陆地生态系统的主体,在全球水循环调节中发挥着不可替代的作用。森林水源涵养功能通过调节径流分配,减少洪峰流量及补给枯水期径流等途径,构建了生态安全的重要屏障[1]。森林的水源涵养能力体现在林冠层、枯落物层和土壤层中,表现出明显的层次性特征[2-3]。枯落物层通过延缓地表径流并储存降水,可以有效抑制地表侵蚀。土壤层作为最终的水分蓄积体,在森林水分保持中发挥了重要功能。枯落物层和土壤层具有物理截留,生物化学转化及水文调节等多重作用,是森林水源涵养的主要功能载体[4]。森林的水源涵养能力与森林的结构、组成、土壤特性等密切相关,对于不同生长年限的森林在水源涵养能力上通常存在显著差异。人工林是森林生态系统中的重要组成部分,在社会经济和生态环境保护与恢复中扮演着重要角色[5-6]。

南方低山丘陵区是中国国家生态安全屏障建设的重要区域,其生态恢复成效对区域可持续发展具有重要战略意义[5]。福建省长汀县作为中国南方低山丘陵区水土流失治理的典型地区,自20世纪80年代实施大规模造林工程以来,该地区森林覆盖率显著提升,但人工林结构单一化导致的水土流失现象仍制约生态功能优化,尤其在杉木人工林的经营管理中,水源涵养能力逐渐下降,影响其生态效益的长期发挥。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)作为中国主要的速生用材树种,因其生长迅速、萌芽力强、抗病虫害能力强、栽培管理简便且材质优良等优势,已在中国生态修复工程中占据主导地位[7]。但传统杉木纯林经营长期以木材生产为导向,导致林分结构单一化、生物多样性下降、水源涵养能力衰退等现象,制约了森林生态系统的健康发展[8-9]。杉木在生态修复中发挥了重要作用,研究杉木林水源涵养能力有助于区域生态修复和水土保持功能,缓解区域水资源紧张问题,从而保障木材生产,优化杉木林的经营模式,推动森林资源的可持续利用,具有重要的生态、社会和经济价值。

近年来,众多学者[10-14]在其他区域对不同林龄林分水源涵养能力的研究均表明,不同林龄的森林在水源涵养能力上存在显著差异,这种差异与森林的结构、枯落物组成及土壤特性等因素密切相关,且随林龄呈现动态变化规律,并普遍遵循这一研究范式。学者们[15-16]在杉木人工林的研究中发现,杉木林水源涵养能力随林龄也呈现动态变化规律,但具体规律尚不明确。这些研究为了解杉木林水源涵养能力提供了理论基础,但目前对杉木林水源涵养能力的研究多集中于不同龄组之间,林龄的跨度很大,连续性较低,在红壤典型治理区长汀县研究较少,且从枯落物的储量、持水量、持水过程、拦蓄能力与土壤的容重、孔隙度、饱和导水率、拦蓄能力等多角度结合去阐述杉木林水源涵养能力的研究较少。为此,本研究以福建省长汀县不同生长年限(3,4,7,8,11 a)杉木人工林为研究对象,通过对枯落物层(储量、持水量、持水过程、拦蓄能力)与土壤层(容重、孔隙度、饱和导水率、拦蓄能力)指标的综合测定。旨在了解杉木人工林地枯落物、土壤和林地综合的水源涵养能力,探讨其随生长年限的变化规律,以期为低山丘陵区杉木人工林的生态效益评价和可持续经营提供科学依据。

1　研究区概况

本文试验地位于福建省长汀县楼子坝国有林场(25°18′40″—26°02′05″N,116°00′45″—116°39′20″E),地处武夷山脉南麓低山丘陵区,属亚热带海洋性季风气候带,海拔 450～850 m,年均温 15～19 ℃,年均降水量 1 700 mm,年平均日照时数 1 924 h,无霜期 260 d。成土母岩以花岗岩为主,土壤以红壤为主,黄红壤、粗骨性红壤、黄壤等均有分布,土壤呈酸性。主要树种有马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木及毛竹(*Phyllostachys edulis*)等。

2　研究方法

2.1　样地设置与样品采集

2025 年 4—5 月,对福建省长汀县楼子坝国有林场进行全面调查和勘探。根据当地栽植情况,选择具有代表性的杉木林进行布点,确保样地在坡度、海拔高度、造林密度上尽可能具有相似性(图 1)。以 3,4,7,8,11 a 共 5 个不同生长年限的杉木人工林为研究对象,在每个生长年限的杉木林中各设置 3 个 20 m×20 m 样地,共 15 个样地。各生长年限样地基本情况详见表 1。在样地中心及四角各设置 30 cm×30 cm 小样方,测量枯落物厚度,按未分解层和半分解层采集枯落物样品并称量其鲜重,以供实验室对枯落物各项指标进行测定。土壤样品在每个样地沿对角线选取 3 个采样点,按 0—10 cm,10—20 cm 和 20—40 cm 分层采集。分别用环刀(容积 100 cm^3)按 0—10 cm,10—20 cm 和 20—40 cm 采集原状土样,采样时每层样品均在该层垂直厚度的中部位置获取(如 0—10 cm 层取 2.5～7.5 cm 深度),以避免层间过渡带干扰,最大限度反映土层实际情况。每层设 3 个重复,确保数据代表性和统计可靠性。先对单个样地各层次枯落物样品、土样分别取平均值,再对同一生长年限的 3 个样地同层采样点的值求平均作为最终值。

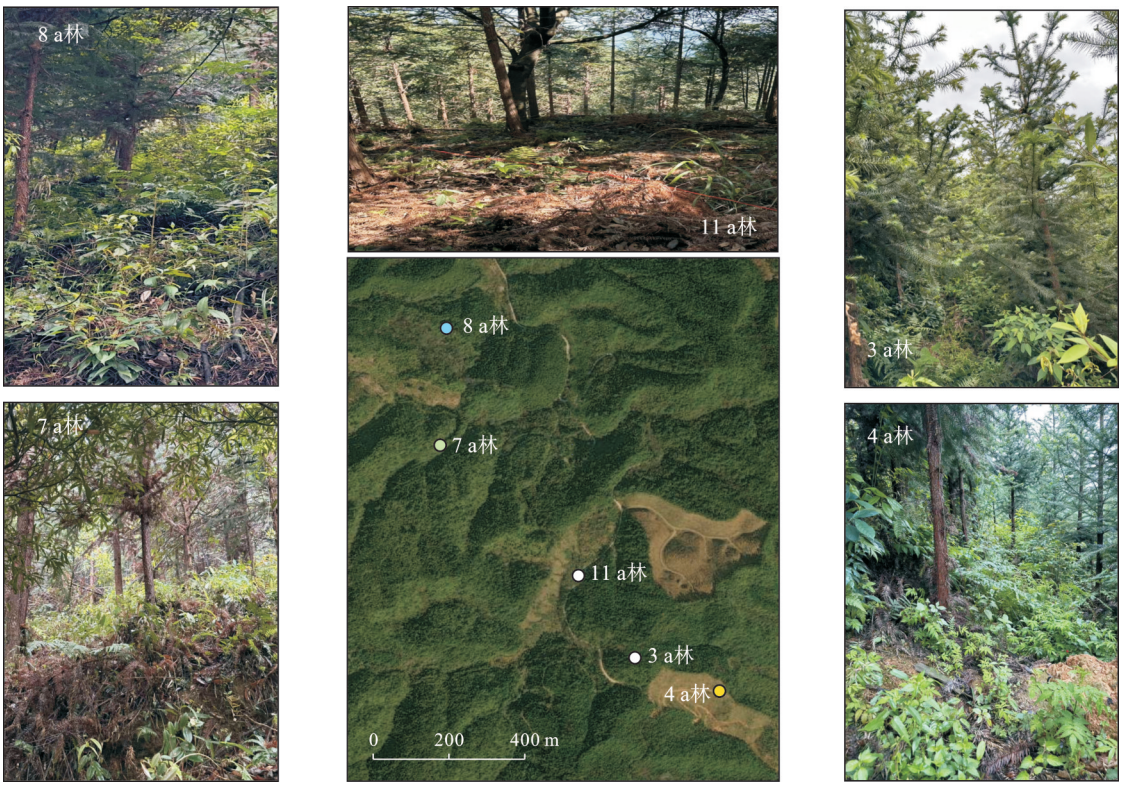


图 1　研究样地实际状况

Fig.1　Actual conditions of study sample plots

2.2　枯落物层水源涵养能力相关指标测定

将样方内的枯枝落叶进行称量,将所取样品烘干称其干质量,计算枯落物的蓄积量。采用室内浸泡法来测定枯落物的持水量和持水速率,探究其吸水过程。将烘干的枯落物装入尼龙网袋中,分别在清水中浸泡 1/12,1/4,1/2,1,2,3,4,6,8,12 和 24 h 后静置至无最大水滴落下称其重量,计算出各层次枯落物在不同时段的持水量和吸水速率[17]。研究[18]表明,枯落物浸泡 24 h 基本达到饱和,以浸泡 24 h 的持水量作为最大持水量,此时的持水率作为最大持水率,最大持水量和持水率是枯落物截留的理论饱和值。最大拦蓄量(率)、有效拦蓄量(率)更

贴近实际降雨场景，可以反映枯落物对降雨的拦截能力。已有研究[19]表明，当单次降雨量达到20～30 mm时，无论枯落物层含水量如何变化，实际持水能力约为自身最大持水能力的85%。因此选用有效拦蓄量与有效拦蓄率作为衡量枯落物对降水拦蓄能力的指标，更能反映水文过程的真实贡献。计算公式[10,20]为

$$M = M_d / A \times 100 \tag{1}$$

式中：M为枯落物蓄积量(t/hm^2)；M_d为枯落物烘干重(g)；A为枯落物样方面积(m^2)。

表1 不同生长年限杉木人工林样地概况

Table 1 Overview of sample plots of *C. lanceolata* plantations with different stand ages

生长年限/a	坡度/(°)	海拔高度/m	造林密度/(株·hm^{-2})	郁闭度	平均树高/m	平均胸径/cm
3	52.7°	607.99	3 000	0.40	5.03	10.23
4	51.3°	593.73	3 000	0.50	5.31	10.92
7	52.7°	583.05	2 505	0.70	11.19	12.23
8	52.9°	577.01	2 505	0.65	11.64	13.07
11	53.1°	636.68	2 250	0.70	14.22	17.49

$$R_0 = (M_0 - M_d)/M_d \times 100\% \tag{2}$$

式中：R_0为枯落物自然含水率(%)；M_0为枯落物鲜重(g)。

$$R_{max} = (M_{24} - M_d)/M_d \times 100\% \tag{3}$$

式中：R_{max}为枯落物最大持水率(%)；M_{24}为枯落物浸水24 h的重量(g)。

$$W_1 = (M_{24} - M_d)/A \times 100 \tag{4}$$

式中：W_1为枯落物最大持水量(t/hm^2)。

$$R_{1max} = R_{max} - R_0 \tag{5}$$

式中：R_{lmax}为枯落物最大拦蓄率(%)。

$$R_y = 0.85R_{max} - R_0 \tag{6}$$

式中：R_y为枯落物有效拦蓄率(%)；0.85为有效拦蓄系数。

$$V = (M_{24} - M_d)/t \tag{7}$$

式中：V为枯落物吸水速率[t/(hm^2·h)]；t为浸水时间(h)。

$$W_{max} = (R_{max} - R_0) \times M \tag{8}$$

式中：W_{max}为枯落物最大拦蓄量(t/hm^2)。

$$W = (0.85R_{max} - R_0) \times M \tag{9}$$

式中：W为枯落物有效拦蓄量(t/hm^2)。

2.3 土壤层水源涵养能力相关指标的测定

采用森林土壤水分-物理性质的测定方法测定土壤的容重、孔隙度并计算蓄水量。采用恒定水头法测定土壤的饱和导水率。计算公式[21-22]为

$$\rho = \frac{M_4 - M_0}{V} \tag{10}$$

式中：ρ为土壤容重(g/cm^3)；M_4为烘干后重(g)；M_0为环刀重(g)；V为环刀体积100 cm^3。

$$P_t = \frac{M_2 - M_4}{V} \times 100\% \tag{11}$$

式中：P_t为总孔隙度(%)；M_2为饱和后重(g)。

$$P_c = \frac{M_3 - M_4}{V} \times 100\% \tag{12}$$

式中：P_c为毛管孔隙度(%)；M_3为静置后排出重力水重(g)

$$K_T = 10Q/A_T\left[S/(S+H)\right] \tag{13}$$

式中：K_T为T℃水温下的饱和导水率(mm/min)；10为单位转换系数；Q为渗透水的体积(ml)；A为土样的截面积(cm^2)；t为渗透时间(min)；S为土样高度(cm)；H为5 cm水头(cm)；T为试验水温(℃)。

$$K_S = K_T/(0.7 + 0.03T) \tag{14}$$

式中：K_S为10 ℃水温下的饱和导水率(mm/min)。

$$W_t = 10\,000P_t \cdot h \tag{15}$$

式中：W_t为土壤饱和蓄水量(t/hm^2)；h为土层厚度(m)。

$$W_0 = 10\,000P_0 \cdot h \tag{16}$$

式中：W_o为土壤非毛管蓄水量(t/hm^2)；P_o为土壤非毛管孔隙度(%)。

2.4 数据处理

使用Excel对枯落物、土壤和环刀样品的最终值进行比较，并对枯落物持水过程的函数进行拟合来明确枯落物持水过程。运用SPSS 26.0软件对实地调查与试验所得数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA)，根据$p<0.05$来比较并标注指标之间差异性，结合Origin 2018软件作图。本研究评估水源涵养能力时主要考虑枯落物层和土壤层，通过两层累加求和来表述林地综合水源涵养能力。

3 结果与分析

3.1 不同生长年限杉木人工林枯落物层水源涵养能力分析

3.1.1 枯落物储量

由表2可知，5个不同生长年限杉木人工林枯落物总厚度为3.36～9.82 cm，厚度大小排序依次为：生长年限11 a＞7 a＞8 a＞4 a＞3 a。枯落物总蓄积量

为3.64～9.60 t/hm^2,总蓄积量大小排序依次为:生长年限11 a>7 a>8 a>4 a>3 a。其中,11 a总蓄积量显著高于7和8 a,7和8 a显著高于3和4 a($p<0.05$)。5个不同生长年限未分解层和分解层所占比例有所差异,其中3,4和7 a未分解层所占比例大于半分解层,8和11 a半分解层大于未分解层。3 a半分解层所占比例最小,占总蓄积量的34.9%,11 a则最大,占总蓄积量的53.95%。

表2　不同生长年限杉木人工林枯落物总厚度与蓄积量

Table 2　Total litter thickness and accumulation in *C. lanceolata* plantations with different stand ages

生长年限/a	总厚度/cm	未分解层/(t·hm^{-2})	比例/%	半分解层/(t·hm^{-2})	比例/%	总蓄积量/(t·h m^{-2})
3	3.36	2.37±0.55^{c}	65.10	1.27±0.37^{c}	34.90	3.64±0.59^{c}
4	3.90	2.51±0.65^{bc}	55.27	2.03±0.25^{bc}	44.73	4.54±0.64^{c}
7	8.24	3.79±1.06^{ab}	55.21	3.08±0.22^{b}	44.79	6.87±0.94^{b}
8	7.78	3.25±0.55^{abc}	49.82	3.28±0.90^{b}	50.18	6.53±0.38^{b}
11	9.82	4.42±0.48^{a}	46.05	5.18±1.54^{a}	53.95	9.60±1.77^{a}

注:数据为平均值±标准差;同列不同字母表示不同生长年限间差异显著($p<0.05$)。下同。

3.1.2　枯落物持水量

枯落物最大持水量和最大持水率共同影响森林调蓄降水的能力。由表3可知,5个不同生长年限枯落物最大持水量变化范围为12.37～25.88 t/hm^2,最大持水量大小排序依次为:生长年限11 a>7 a>8 a>4 a>3 a。最大持水率变化范围为269.84%～398.08%,最大持水率大小排序依次为:生长年限3 a>4 a>11 a>7 a>8 a。随着杉木林的生长,枯落物的最大持水量呈先增加后降低再增加的趋势,而最大持水率呈现先降低后增加的趋势。

表3　不同生长年限杉木人工林枯落物最大持水量和持水率

Table 3　Maximum water-holding capacity and water retention rate of litter in *C. lanceolata* plantations with different stand ages

生长年限/a	最大持水量/(t·hm^{-2})			最大持水率/%		
	未分解层	半分解层	合 计	未分解层	半分解层	平 均
3	7.37±1.73^{b}	5.00±0.71^{c}	12.37	318.92±4.28^{a}	477.23±7.98^{a}	398.08
4	7.79±1.05^{b}	6.91±0.66^{bc}	14.70	320.33±31.16^{a}	350.48±8.15^{b}	335.41
7	9.57±2.27^{ab}	9.14±1.07^{b}	18.71	255.96±15.47^{b}	308.43±11.23^{bc}	282.20
8	8.26±1.23^{ab}	8.56±1.31^{b}	17.19	266.92±6.18^{b}	272.77±52.11^{c}	269.84
11	11.54±0.35^{a}	14.34±2.78^{a}	25.88	263.46±23.36^{b}	301.81±41.45^{bc}	282.63

3.1.3　枯落物持水过程

在研究枯落物的吸水特性时发现,浸泡时间与枯落物的吸水速率之间存在显著的相关性。从图2a和图2b可以观察到,不同生长年限的分解层枯落物在吸水过程中,随着浸泡时间的延长,其持水量逐渐增加,而吸水速率则呈现下降趋势。各层枯落物在浸水初期(2 h以内)迅速吸水,随后随着时间的延长,吸水速率逐渐减缓。到24 h时,枯落物的持水量已达到饱和状态,吸水速率最低。不同年限的枯落物表现出不同的持水能力,其中未分解层的持水能力大小排序依次为:生长年限11 a>7 a>8 a>4 a>3 a;而半分解层的持水能力大小排序也为:生长年限11 a>7 a>8 a>4 a>3 a。随着杉木林生长的进展,枯落物的持水能力呈现出先增加后下降再回升的趋势。通过对5个不同生长年限的杉木人工林各层次枯落物进行回归分析,结果表明,持水量与浸水时间之间为对数形式关系:

$$Y = a\ln(t) + b \tag{17}$$

式中:Y为枯落物持水量(t/hm^2);a为系数;t为浸水时间(h);b为待估常数。

从图2c和图2d观察到,5个生长年限下不同层次枯落物的吸水速率随浸水时长延长呈递减态势,在最初的1 h内,吸水速率最大,之后随着时间推移,速率快速下降,在8 h后,下降速度趋于平缓,在8～24 h时,枯落物的吸水速率趋于稳定。随着浸泡时间的延长,枯落物吸水速率趋于一致,表明枯落物已达到饱和状态。5个不同生长年限枯落物吸水速率与浸水时间之间符合幂函数关系:

$$v = kt^{n} \tag{18}$$

式中:v为枯落物吸水速率(g/g/h);k为系数;n为指数。

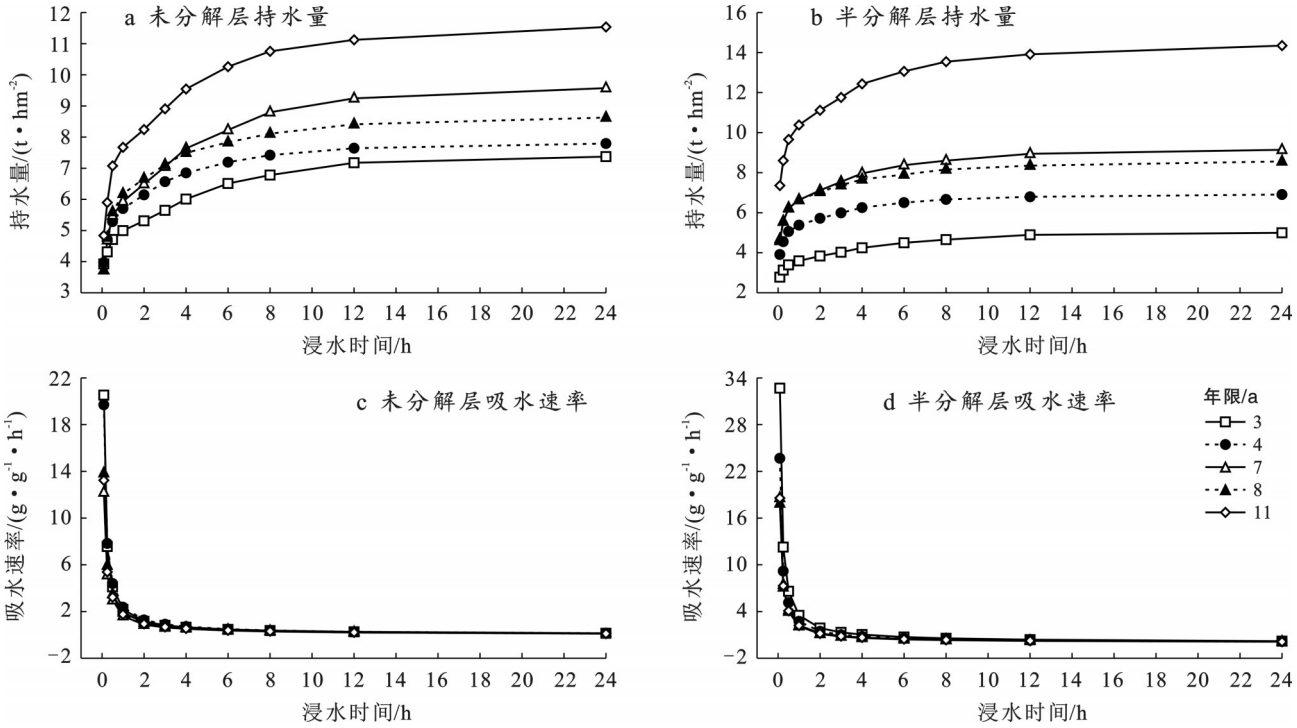


图2 不同生长年限杉木人工林枯落物持水量和吸水速率与浸水时长的变化关系

Fig.2 Relationship between litter water-holding capacity, water absorption rate and immersion duration in *C. lanceolata* plantations with different stand ages

3.1.4 枯落物拦蓄能力

枯落物的最大拦蓄量(率)和有效拦蓄量(率)是评估水文生态功能的核心指标,从不同角度反映枯落物层对降水的截留、蓄存和调控能力,关系到土壤的水分保持能力。由表4可知,5个不同生长年限枯落物的最大拦蓄量分布在11.32~20.98 t/hm^2,最大拦蓄量大小排序依次为:生长年限11 a>4 a>3 a>8 a>7 a。随着杉木林的生长,枯落物的最大拦蓄量呈先增加后降低再增加的趋势。其中11 a的杉木人工林枯落物最大拦蓄量无论总体还是各层次都高于其他生长年限。最大拦蓄率分布在173.56%~385.47%,最大拦蓄量大小排序依次为:生长年限3 a>4 a>11 a>8 a>7 a。随着杉木林的生长,枯落物的最大拦蓄率呈现先下降后增加的趋势。

表4 不同生长年限杉木人工林枯落物最大拦蓄能力

Table 4 Maximum retention capacity of litter in *C. lanceolata* plantations with different stand ages

生长年限/a	最大拦蓄量/(t·hm^{-2})			最大拦蓄率/%		
	未分解层	半分解层	合计	未分解层	半分解层	平均
3	7.10±1.66^b	4.82±0.65^b	11.92	307.59±4.73^a	463.35±9.08^a	385.47
4	7.49±1.01^b	6.26±0.34^b	13.76	307.93±30.39^a	323.12±14.71^b	315.52
7	6.30±1.61^b	5.02±0.43^b	11.32	171.44±14.94^d	175.68±12.03^d	173.56
8	6.64±0.91^b	4.81±0.72^b	11.45	206.17±12.80^c	158.38±50.77^d	182.28
11	10.78±0.34^a	10.20±3.00^a	20.98	246.26±20.91^b	227.39±26.39^c	236.83

由表5可知,5个不同生长年限枯落物的有效拦蓄量分布在8.51~17.10 t/hm^2,有效拦蓄量大小排序依次为:生长年限11 a>4 a>3 a>8 a>7 a。随着杉木林的生长,枯落物的有效拦蓄量呈先增加后降低再增加的趋势。其中11 a的杉木人工林枯落物有效拦蓄量无论总体还是各层次都高于其他生长年限。有效拦蓄率分布在131.23%~325.76%,有效拦蓄率大小排序依次为:生长年限3 a>4 a>11 a>8 a>7 a。随着杉木林的生长,枯落物的有效拦蓄率呈现先下降后回升的趋势。

3.2 不同生长年限杉木人工林土壤层水源涵养能力分析

3.2.1 土壤容重和孔隙状况

由表6可知5种生长年限土壤容重均值分布在0.85~1.08 g/cm^3,容重大小排序依次为:生长年限3 a>4 a>11 a>7 a>8 a。随着杉木林的生长,土壤

容重整体呈现先下降后上升的趋势。杉木林根系主要分布在0—20 cm之间,从垂直变化来看,各生长年限随土层加深土壤容重均有一定上升趋势。土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度均值分别为52.76%～60.19%,43.58%～47.47%和9.18%～12.72%。土壤孔隙度指标大小排序均为:生长年限8 a>7 a>11 a>4 a>3 a。随着杉木林的生长,土壤孔隙度呈现先上升后下降的趋势。在垂直方向上,土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度的变化与土壤容重相反,即随土层厚度的加深,均呈现逐渐降低的趋势。

表5　不同生长年限杉木人工林枯落物有效拦蓄能力

Table 5　Effective retention capacity of litter in *C. lanceolata* plantations with different stand ages

生长年限/a	有效拦蓄量/(t·hm^{-2})			有效拦蓄率/%		
	未分解层	半分解层	总和	未分解层	半分解层	平均
3	5.99±1.40^{b}	4.07±0.54^{b}	10.06	259.75±4.09^{a}	391.76±7.97^{a}	325.76
4	6.32±0.85^{b}	5.23±0.25^{b}	11.55	259.88±25.72^{a}	270.55±13.74^{b}	265.21
7	4.87±1.20^{b}	3.64±0.28^{b}	8.51	133.05±12.89^{d}	129.41±10.85^{d}	131.23
8	5.35±0.74^{b}	3.53±0.63^{b}	8.87	166.14±11.95^{c}	117.46±43.00^{d}	141.80
11	9.05±0.30^{a}	8.05±2.59^{a}	17.10	206.74±17.45^{b}	182.12±21.74^{c}	194.43

表6　不同生长年限杉木人工林土壤容重和孔隙状况

Table 6　Soil bulk density and porosity in *C. lanceolata* plantations with different stand ages

生长年限/a	土层深度/cm	容重/(g·cm^{-3})	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%
3	0—10	1.03±0.13^{Aa}	54.62±3.88^{Ab}	43.78±2.58^{Aa}	10.83±2.03^{Aa}
	10—20	1.08±0.06^{Aa}	52.50±1.59^{Ab}	43.57±1.11^{Aa}	8.94±0.72^{ABb}
	20—40	1.11±0.09^{Aa}	51.15±0.45^{Ac}	43.39±0.70^{Aa}	7.76±1.06^{Bb}
4	0—10	0.96±0.02^{Bab}	56.46±3.39^{Ab}	45.16±2.29^{Aa}	11.30±1.28^{Aa}
	10—20	1.07±0.04^{Aa}	55.24±1.88^{Aab}	45.03±2.19^{Aa}	10.22±0.64^{Bab}
	20—40	1.09±0.01^{Aab}	52.76±1.72^{Abc}	44.71±1.63^{Aa}	8.05±0.40^{Bb}
7	0—10	0.87±0.03^{Bbc}	59.15±1.10^{Aab}	47.09±1.08^{Aa}	12.06±0.29^{Aa}
	10—20	0.90±0.06^{ABb}	58.58±2.51^{Aa}	46.82±1.38^{Aa}	11.76±2.34^{Aab}
	20—40	0.99±0.05^{Ab}	56.56±2.38^{Aab}	46.23±3.76^{Aa}	10.33±3.76^{Aab}
8	0—10	0.83±0.02^{Ac}	62.28±2.07^{Aa}	49.19±2.15^{Aa}	13.09±0.36^{Aa}
	10—20	0.85±0.07^{Ab}	59.58±2.15^{Aa}	46.78±2.46^{Aa}	12.80±0.54^{ABa}
	20—40	0.88±0.05^{Ac}	58.73±2.28^{Aa}	46.44±2.21^{Aa}	12.29±0.08^{Ba}
11	0—10	0.89±0.05^{Bbc}	57.66±1.97^{Aab}	45.98±4.55^{Aa}	11.68±4.12^{Aa}
	10—20	0.94±0.03^{Bb}	57.21±4.09^{Aab}	45.64±3.54^{Aa}	11.57±2.71^{Aab}
	20—40	1.06±0.05^{Aab}	54.60±2.53^{Abc}	45.42±0.59^{Aa}	9.18±2.29^{Aab}

注:同列不同大写字母表示相同生长年限不同土层间存在显著差异,同列不同小写字母表示相同土层不同生长年限间存在显著差异($p<0.05$)。

3.2.2　土壤饱和导水率

由图3可知,5个不同生长年限土壤饱和导水率均值变化范围为1.84～2.33 mm/min,饱和导水率大小排序依次为:生长年限8 a>7 a>11 a>4 a>3 a。随着杉木林的生长,土壤饱和导水率整体呈现先上升后下降的趋势。在垂直方向上,土壤饱和导水率随着土层加深均呈现下降趋势。

3.2.3　土壤拦蓄能力

土壤的饱和蓄水量由毛管孔隙蓄水量和非毛管孔隙蓄水量(即有效蓄水量)组成,能够反映土壤在水分贮存和调节方面的潜力[23]。由表7可知,3,4,7,8,11 a生杉木人工林土壤层(0—40 cm)饱和蓄水量分别为2 094.26,2 172.30,2 308.51,2 393.10和2 240.68 t/hm^2,土壤有效蓄水量分别为352.90,376.16,444.78,504.58和416.17 t/hm^2,随着杉木林的生长,土壤蓄水能力呈现先增加后降低的趋势。在垂直方向上,土壤拦蓄能力随着土层深度的增加呈现下降趋势。

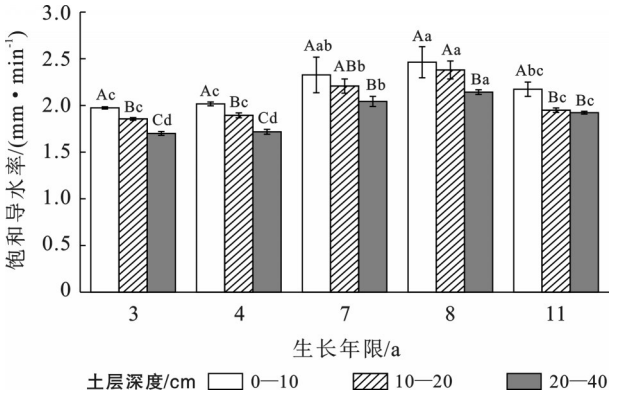


图3 不同生长年限杉木人工林土壤饱和导水率

Fig.3 Soil saturated hydraulic conductivity in *C. lanceolata* plantations with different stand ages

3.3 林分枯落物和土壤层水源涵养能力综合分析

土壤饱和蓄水量表征了其贮存与调节水分的潜在容量。其中土壤毛管孔隙所持有的水分主要供给植被根系吸收利用以及林地土壤蒸散消耗。而非毛管孔隙所持有的水分在重力作用下发生移动,直接关系到土壤的渗透性能和水分调控效能。因此,非毛管蓄水量常被视为有效蓄水量,是评估森林水源涵养能力的关键指标之一[24]。森林的蓄水能力主要体现在枯落物层和土壤层两个方面。为定量比较5种不同生长年限杉木人工林的水源涵养能力,本研究通过累加计算各林分枯落物的有效拦蓄量以及0—40 cm土层的有效蓄水量(即非毛管蓄水量),进而对比分析各林分在枯落物和土壤两方面的综合水源涵养能力。如表8所示,5种生长年限林分的持水能力范围在362.96~513.45 t/hm^2,持水能力大小排序依次为:生长年限8 a>7 a>11 a>4 a>3 a。由图4可见,随着杉木林的生长,林分水源涵养能力呈先增加后减小的趋势。在3 a最初生长期时水源涵养能力最低,在8 a时水源涵养能力最高。

表7 不同生长年限杉木人工林土壤持水能力

Table 7 Soil water-holding capacity in *C. lanceolata* plantations with different stand ages

生长年限/a	不同土层土壤饱和蓄水量/(t·hm^{-2})				不同土层土壤有效蓄水量/(t·hm^{-2})			
	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	合计	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	合计
3	546.19±38.79^{Bb}	525.04±15.95^{Bb}	1 023.02±9.08^{Ac}	2 094.26	108.34±20.30^{Ba}	89.38±7.19^{Bb}	155.18±21.27^{Ab}	352.90
4	564.62±33.91^{Bb}	552.41±18.81^{Bab}	1 055.27±34.34^{Abc}	2 172.30	113.02±12.84^{Ba}	102.16±6.45^{Bab}	160.98±7.98^{Ab}	376.16
7	591.53±11.01^{Bab}	585.76±25.12^{Ba}	1 131.22±47.56^{Aab}	2 308.51	120.64±2.92^{Aa}	117.58±23.42^{Aab}	206.56±75.18^{Aab}	444.78
8	622.79±20.73^{Ba}	595.78±21.47^{Ba}	1 174.53±45.59^{Aa}	2 393.10	130.87±3.56^{Ba}	128.00±5.39^{Ba}	245.71±1.64^{Aa}	504.58
11	576.56±19.72^{Bab}	572.08±40.87^{Bab}	1 092.04±50.68^{Abc}	2 240.68	116.80±41.17^{Aa}	115.68±27.05^{Aab}	183.69±45.86^{Aab}	416.17

表8 不同生长年限杉木人工林林地持水能力

Table 8 Water-holding capacity of forest land in *C. lanceolata* plantations with different stand ages

生长年限/a	有效拦蓄量/(t·hm^{-2})			比例/%		
	土壤层	枯落物层	合计	土壤层	枯落物层	合计
3	352.90	10.06	362.96	97.23	2.77	100
4	376.16	11.55	387.71	97.02	2.98	100
7	444.78	8.51	453.29	98.12	1.88	100
8	504.58	8.87	513.45	98.27	1.73	100
11	416.17	17.10	433.27	96.05	3.95	100

其中枯落物层蓄水量占总蓄水量的比例较小(1.73%~3.95%),而土壤层蓄水量占据主导地位(96.05%~98.27%)。

4 讨 论

4.1 不同生长年限杉木人工林枯落物层水文效应

5个不同生长年限的杉木人工林枯落物厚度和蓄积量存在一定差异,各生长年限枯落物蓄积量有随厚度增加而增加的趋势,总蓄积量随生长年限(3~11 a)的增长呈非线性增加,这可能是在杉木人工林发育的早期阶段(3~11 a),枯落物输入与累积过程并非简单的线性增长,可能受到林分郁闭度、凋落速率及环境变化的综合影响[25]。本研究区别于张日施等[11]对秃杉林随林龄增长蓄积量持续上升的结论,导致这种差异的原因可能是杉木与秃杉凋落物产量模式不同、林分发展阶段以及立地条件的综合作用。枯落物半分解层的蓄积量和所占比例随生长年限增加而上升,表明枯落物分解进程随时间推进而深化,这一过程需要长时间的作用才能完成[26]。各生长年限枯落物的最大持水量为自身干重的2.7~4.0倍,基本遵循枯落物分解程度越高,持水能力越强这一规律[19],但出现7 a分解程度低于8 a,而持水量7 a却比8 a高的现象,本研究认为枯落物的最大持水量不仅受分解程度影响,还与蓄积量密切相关。半分解层有效拦蓄量低于未分解层有效拦蓄量,这与其他学者研究[15,27]不同,这可能与本研究杉木所处生长阶段分解层枯落物储量较少有关。各生长年限枯落物各层次持水量与浸水时间呈对数增长,R^2为0.958 6~

0.991 4,表明杉木林枯落物持水量过程符合林木普遍规律[28]。枯落物吸水速率与浸水时间之间呈幂函数关系,R^2为0.998 1～0.999 9,表明本研究的杉木人工林枯落物层在持水过程中符合杉木林的普适性规律[15]。

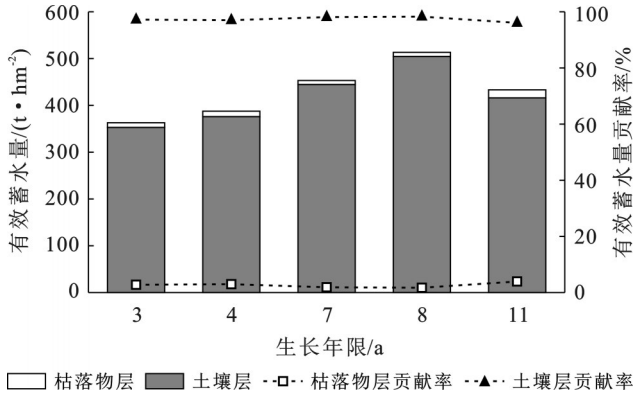


图4　不同生长年限杉木人工林林地拦蓄能力

Fig.4　Retention capacity of forest land in *C. lanceolata* plantations with different stand ages

枯落物层的拦蓄能力与分解过程及物理结构等密切相关,杉木人工林可以通过枯落物层有效地储存和拦蓄水分,避免降雨直接击打造成土壤侵蚀。本研究中杉木林枯落物层的拦蓄能力表现为:11 a＞4 a＞3 a＞8 a＞7 a,呈现非线性增长,原因可能是11 a生杉木林枯落物拦蓄能力出现最高值主要由蓄积量累积、半分解层性质共同作用,7和8 a枯落物半分解层孔隙结构发育不充分,导致拦蓄能力相对较低。本研究明确了杉木人工林枯落物层在水文循环中的重要作用及影响因素,对完善森林生态系统水源涵养功能评估指标体系具有支撑意义。

4.2　不同生长年限杉木人工林土壤层水文效应

土壤是森林生态系统中最主要的贮水场所,其水源涵养量占比超过85%,其蓄水能力受土壤类型、容重和孔隙度等因素影响[27]。随着杉木林的生长,土壤容重出现先下降后上升的趋势,土壤总孔隙度和非毛管孔隙度呈现先上升后下降的趋势。这可能是因为早期植被生长阶段,林下植被发育和根系活动增强,有机质积累显著,促进了土壤团聚体的形成,导致容重下降、总孔隙度和非毛管孔隙度上升,随着杉木进一步生长,有机质积累减缓,树木根系对土壤的压实作用增强,导致土壤结构趋于紧实,容重回升,总孔隙度和非毛管孔隙度逐渐降低[19]。随土层深度增加,土壤容重有一定的增加趋势,而饱和导水率和非毛管孔隙度呈现下降趋势,总孔隙度和毛管孔隙度无显著差异。这可能是因为随土层深度增加,杉木根系、土壤有机质含量逐渐减少,降低团聚体的形成,从而影响土壤孔隙度等物理性质[29]。土壤饱和导水率是评价土壤渗透性的重要参数,其值越高,表明土壤在饱和状态下的水分传导能力越强。从饱和导水率分析,随着杉木林的生长出现先升后降的趋势,这可能是因为随着生长年限增加,树木持续生长导致土壤物理结构改善,渗透能力增强,在11 a时杉木生长对土壤养分消耗显著,可能导致土壤结构退化。在垂直方向上,土壤饱和导水率随着土层加深呈现下降趋势,这可能和土壤物理性质变化以及有机质积累的变化有关[30]。杉木林林地渗透能力和水源涵养能力呈现正相关,可通过改善土壤渗透性能来提高水源涵养能力。土壤层中拦蓄能力表现为:8 a＞7 a＞11 a＞4 a＞3 a,随生长年限呈非线性增长状态。土壤拦蓄能力在8 a最高,这可能是因为根系发育较快,土壤结构得到优化,使得土壤能有效存储和调节水分;11 a后的下降可能是因为根系竞争养分。3,4 a土壤拦蓄能力较弱,主要因为树木根系尚未发育成熟,土壤压实,孔隙度较低。本研究明确了杉木人工林土壤层在水文循环中的重要作用及影响因素,对维护林地长期水文健康至关重要。

4.3　林分枯落物层与土壤层综合拦蓄能力

本研究通过对比各生长年限的枯落物层与土壤层的蓄水量可以看出,土壤层是林分涵养水源的主体,其有效蓄水量占整体的95%以上,对整个林分涵养水源的能力起着重要作用。枯落物层虽然拦蓄水量所占比例较小,但其通过改善水分渗透,减少水分蒸发,增强土壤结构,促进土壤有机质积累等,间接提高了土壤的蓄水能力,增强了林分水源涵养能力。通过累加计算枯落物层有效拦蓄量和0—40 cm土壤层有效蓄水量之和,得到林分综合蓄水量。林分水源涵养能力大小表现为:8 a＞7 a＞11 a＞4 a＞3 a,水源涵养能力并非随年龄线性增长,而是呈先增加后下降的趋势,可能会在生长8—11 a间出现水源涵养能力下降的转折点。对比现有研究发现,南方杉木林水源涵养能力较低,低于马尾松、加勒比松等单一树种人工林,将邻近研究区地块的杉木纯林和混交林水源涵养进行比较发现,杉阔混交林、细柄阿丁枫混交林、杉木桤木混交林水源涵养量均高于杉木纯林的水源涵养量[31-34]。综上所述,南方杉木林水源涵养能力与其他树种相比没有明显优势且亟待提高,可通过杉木与阔叶树混交的手段来提升林地水源涵养能力,尤其在杉木林生长8～11 a可能出现水源涵养能力衰退阶段。本研究明确了杉木纯林水源涵养功能的衰退节点,证实了杉阔混交改造的潜力,为杉木人工林水源涵养功能提升提供了科学支撑。未来

应进一步寻找其他生长年限，且对其他混交树种进行研究，为南方杉木人工林的多目标可持续经营提供理论支撑。

5 结 论

（1）不同生长年限枯落物层的拦蓄能力大小表现为：11 a>4 a>3 a>8 a>7 a。枯落物层水源涵养能力随生长年限呈非线性增长状态，呈现此趋势主要是受到枯落物蓄积量和分解程度的影响。

（2）不同生长年限土壤层中拦蓄能力大小表现为：8 a>7 a>11 a>4 a>3 a。土壤层水源涵养能力随生长年限呈非线性增长状态，呈现此趋势主要是受到林木根系生长和土壤养分的影响。

（3）土壤层有效蓄水量占整体的95%以上，林地土壤仍是杉木人工林涵养水源的主体。

（4）不同生长年限林分水源涵养能力大小表现为：8 a>7 a>11 a>4 a>3 a。林分水源涵养能力随生长年限呈非线性变化，8～11 a阶段可能存在水源涵养能力衰退现象。建议3～4 a主要从土壤层开展土壤物理结构改良，提升土壤的渗透性能。8～11 a可能出现衰退的阶段，可通过提高土壤养分，合理管理枯落物层的积累和分解，同时也可通过杉木与阔叶树混交提升土壤渗透性。

参考文献（References）

[1] 中野秀章.森林水文学[M].北京：中国林业出版社，1983：2-4.
Nakano H. Forest Hydrology [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1983:2-4.

[2] 韩春，陈宁，孙杉，等.森林生态系统水文调节功能及机制研究进展[J].生态学杂志，2019，38(7)：2191-2199.
Han Chun, Chen Ning, Sun Shan, et al. A review on hydrological mediating functions and mechanisms in forest ecosystems [J].Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(7):2191-2199.

[3] Li Xiang, Niu Jianzhi, Xie Baoyuan. Study on hydrological functions of litter layers in north China [J]. PLoS One, 2013,8(7):e70328.

[4] 刘婧雯，程唱，邹星晨，等.高寒区不同密度白桦天然林枯落物层与土壤层水文效应[J].林业科学研究，2025，38(2)：156-164.
Liu Jingwen, Cheng Chang, Zou Xingchen, et al. Hydrological effects of litter layer and soil layer in birch natural forest with different densities in alpine region [J]. Forest Research, 2025,38(2):156-164.

[5] 漆良华，田慧敏，王辉民，等.南方低质低效人工林质量改善与生态服务提升技术研究前瞻[J].中国水土保持科学，2024，22(5)：1-8.
Qi Lianghua, Tian Huimin, Wang Huimin, et al. Technologies for improving the qualities and ecological services of low-quality and low-efficiency plantations in southern China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024,22(5):1-8.

[6] 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.
Zhou Jiawen, Gao Jixi, Gao Zhiqiu, et al. Analyzing the water conservation service function of the forest ecosystem [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(5):1679-1686.

[7] 张勰，伍汉斌，程勇，等.杉木育种群体遗传多样性评价及核心种质构建[J].中南林业科技大学学报，2024，44(9)：118-126.
Zhang Xie, Wu Hanbin, Cheng Yong, et al. The evaluation of the genetic diversity of breeding populations and construction of a core collection of *Cunninghamia lanceolata* [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2024,44(9):118-126.

[8] 肖斌，姚甲宝，徐克芹，等.低效杉木林林窗土壤-凋落物的持水特性[J].水土保持通报，2025，45(2)：45-53.
Xiao Bin, Yao Jiabao, Xu Keqin, et al. Water-holding characteristics of soil-litter at forest gap of low-efficiency Chinese fir forest [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(2):45-53.

[9] 凤紫棋，孙文义，穆兴民，等.南方山区杉木人工林林下草本植物多样性的影响因素[J].草业学报，2023，32(9)：17-26.
Feng Ziqi, Sun Wenyi, Mu Xingmin, et al.Factors influencing undergrowth herbaceous diversity of *Cunninghamia lanceolata* plantations in southern mountainous areas [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023,32(9):17-26.

[10] 富丽，赵锦梅，李永宁，等.陇东黄土高原不同林龄苹果林地枯落物及土壤的水文效应[J].水土保持通报，2018，38(5)：40-45.
Fu Li, Zhao Jinmei, Li Yongning, et al. Hydrological effects of litters and soil in apple tree plantation at different stand ages of Longdong Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(5):40-45.

[11] 张日施，黄光友，南雅薇，等.桂西北不同年龄阶段秃杉人工林的水源涵养功能[J].水土保持学报，2021，35(5)：130-136.
Zhang Rishi, Huang Guangyou, Nan Yawei, et al. Water conservation function of *Taiwania flousiana* plantations at different ages in northwest Guangxi [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 130-136.

[12] 张淑兰，韩勇，杨盼，等.汉江上游不同林龄麻栎林枯落物的水文功能评价[J].生态环境学报，2022，31(1)：44-51.
Zhang Shulan, Han Yong, Yang Pan, et al. Evaluation

of hydrological function of litter of quercus acuvarius at different ages in the upper reaches of Han River [J]. Ecology and Environment Sciences, 2022, 31(1): 44-51.

[13] 张甜,李瑞蓉,畅元生.临猗县不同林龄苹果林地枯落物及土壤水源涵养功能研究[J].森林工程,2024,40(6):30-40.
Zhang Tian, Li Ruirong, Chang Yuansheng. Study on water conservation function of litter and soil in apple tree plantation of different stand ages of Linyi [J]. Forest Engineering, 2024,40(6):30-40.

[14] 王志豪,张鹏飞,贾小旭,等.毛乌素沙地不同林龄樟子松水源涵养功能[J].水土保持学报,2025,39(4):100-108.
Wang Zhihao, Zhang Pengfei, Jia Xiaoxu, et al. Water conservation function of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* stands at different ages in Mu Us sandy land [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025,39(4):100-108.

[15] 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.
Xia Jingyu, Wang Wenying, Jiang Linjun, et al. Water holding characteristics of litters in different-aged *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. Guangxi Forestry Science, 2019,48(4):449-454.

[16] 邓厚银,晏姝,王润辉,等.粤北不同林龄杉木人工林下土壤层及枯落物层持水能力研究[J].广东农业科学,2019,46(2):51-58.
Deng Houyin, Yan Shu, Wang Runhui, et al. Study on water-holding capacity of soil layer and litter layer of Chinese fir plantations with different stand ages in northern Guangdong [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2019,46(2):51-58.

[17] 王零,吕春燕,武天伟,等.祁连山中段不同密度青海云杉林枯落物及土壤水源涵养功能研究[J].中南林业科技大学学报,2025,45(6):126-135.
Wang Ling, lü Chunyan, Wu Tianwei, et al. Study on litter and soil water conservation function of *Picea crassifolia* forest with different stand densities in the middle part of Qilian Mountains [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2025, 45(6): 126-135.

[18] 冷佳欣,刘春红,王轶浩,等.重度火灾对缙云山林地持水力的影响[J].生态学报,2025,45(17):8485-8497.
Leng Jiaxin, Liu Chunhong, Wang Yihao, et al. Research on the influence of severe fire on the water-holding capacity of forest land in Jinyun Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(17):8485-8497.

[19] 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.
Lin Liwen, Deng Yusong, Li Peiqi, et al. Study on the effects of litter and soil hydrology of different density *Cunninghamia lanceolata* forests in northern Guangxi [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5):200-207.

[20] 朱司格.湘西石漠化地区典型森林植被类型水源涵养功能研究[D].湖南 长沙:中南林业科技大学,2019.
Zhu Sige. Study on water conservation function of typical forest vegetation types in rocky desertification area of western Hunan Province [D]. Changsha, Hunan: Central South University of Forestry & Technology, 2019.

[21] 国家林业局.LY/T 1215—1999 森林土壤水分-物理性质的测定[S].北京:中国标准出版社,1999.
State Forestry Administration. LY/T 1215—1999 Determination of forest soil water-physical properties [S]. Beijing: China Standards Press, 1999..

[22] 韩若兰.带状改造对柳杉人工林土壤水文特征的影响[D].四川 成都:四川农业大学,2024.
Han Ruolan. The impact of belt transformation on soil hydrological characteristics of artificial *Cryptomeria fortunei* forest [D]. Chengdu, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2024.

[23] 程唱,贺康宁,俞国峰,等.干旱半干旱区不同林型人工林水源涵养能力比较研究[J].生态学报,2021,41(5):1979-1990.
Cheng Chang, He Kangning, Yu Guofeng, et al. Comparative study on water conservation capacity of different forest types of artificial forest in arid and semi-arid area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1979-1990.

[24] 李阳,万福绪.黄浦江中游5种典型林分枯落物和土壤水源涵养能力研究[J].水土保持学报,2019,33(2):264-271.
Li Yang, Wan Fuxu. Water conservation capacities of litters and soils in five typical stands in the middle reaches of Huangpu River [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(2):264-271.

[25] 杨家慧,谭伟,卯光宪,等.黔中不同龄组柳杉人工林枯落物水源涵养能力综合评价[J].水土保持学报,2020,34(2):296-301.
Yang Jiahui, Tan Wei, Mao Guangxian, et al. Water conservation ability of litter in *Cryptomeria fortunei* plantation with different age groups in central Guizhou [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(2):296-301.

[26] 徐传洪.不同林龄序列杉木人工林凋落物特征研究[D].湖南 长沙:中南林业科技大学,2020.
Xu Chuanhong. Study on litter characteristics of Chinese fir plantation in different stand ages [D]. Changsha,

Hunan: Central South University of Forestry & Technology, 2020.

[27] 彭娓,张凯,杨秀清.云杉次生林林下植被、枯落物及土壤特征对林分密度的响应[J].西南林业大学学报(自然科学),2024,44(1):56-66.
Peng Wei, Zhang Kai, Yang Xiuqing. Response of understory vegetation, litter and soil characteristics to stand density in *Picea* secondary forests [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2024,44(1):56-66.

[28] 周云,白英辰,姚兰,等.鄂西南5种典型林分枯落物与土壤的持水性能[J].水土保持通报,2023,43(2):77-86.
Zhou Yun, Bai Yingchen, Yao Lan, et al. Litter and soil water-holding capacity of five typical forest stands in southwest Hubei Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(2):77-86.

[29] 王晨光,曹文华,马波,等.不同根系构型草本与灌木复合对土壤饱和导水率的影响因素分析及模拟[J].水土保持通报,2023,43(4):10-16.
Wang Chenguang, Cao Wenhua, Ma Bo, et al. Analysis and simulation of factors affecting soil saturated hydraulic conductivity by combinations of grasses and shrubs with different root configurations [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(4):10-16.

[30] 张一璇,史常青,杨浩,等.永定河流域官厅水库南岸典型林分土壤饱和导水率研究[J].生态学报,2019,39(18):6681-6689.
Zhang Yixuan, Shi Changqing, Yang Hao, et al. Saturated hydraulic conductivity of soils of typical forests of the south coast of Guanting reservoir in Yongding River watershed [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(18):6681-6689.

[31] 农海勤,陆明路,易弘韬,等.亚热带人工林凋落物和土壤层水源涵养功能[J].生态学报,2025,45(17):8599-8613.
Nong Haiqin, Lu Minglu, Yi Hongtao, et al. Water conservation function of litter and soil layer in subtropical artificial forests [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(17):8599-8613.

[32] 卢德浩,郑峰霖,古佳玮,等.不同林分类型凋落物和土壤水源涵养能力分析与评价[J].生态环境学报,2025,34(1):26-35.
Lu Dehao, Zheng Fenglin, Gu Jiawei, et al. Analysis and evaluation of litter and soil water conservation capacity of different stand types [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2025,34(1):26-35.

[33] 陈绍栓.杉木细柄阿丁枫混交林涵养水源功能和土壤肥力的研究[J].生态学报,2002,22(6):957-961.
Chen Shaoshuan. The water holding capacity and soil fertility in the mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Altingia gracilides* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002,22(6):957-961.

[34] 郑兆飞.桤木杉木混交林水源涵养能力研究[J].西南林学院学报,2008,28(3):8-10.
Zheng Zhaofei. Study on water conservation capacity of the mixed plantations of *Alnus cremastogyne* and *Cunninghamia lanceolata* [J]. Journal of Southwest Forestry College, 2008,28(3):8-10.

(上接第125页)

[30] 车敏娜,吴恒,热孜万古力·赛买提,等.8株草本科植物根际土放线菌代谢产物活性初步研究[J].天然产物研究与开发,2017,29(11):1920-1927.
Che Minna, Wu Heng, Re Ziwanguli·Saimaiti, et al. Preliminary study on the activities of metabolites of rhizosphere soil actinomycetes from eight herbaceae plants [J]. Natural Product Research and Development, 2017, 29(11):1920-1927.

[31] 马爱爱,徐世健,敏玉霞,等.祁连山高山植物根际土放线菌生物多样性[J].生态学报,2014,34(11):2916-2928.
Ma Aiai, Xu Shijian, Min Yuxia, et al. Phylogenetic and physiological diversity of actinomycetes isolated from plant rhizosphere soils in the Qilian Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(11):2916-2928.

[32] Alharbi S M, Al-Sulami N, Al-Amrah H, et al. Metagenomic characterization of the maerua crassifolia soil rhizosphere: Uncovering microbial networks for nutrient acquisition and plant resilience in arid ecosystems [J]. Genes, 2025,16(3):285.

[33] 孙煜佳,陆梅,赵旭燕,等.纳帕海高寒退化草甸土壤细菌群落结构对氮添加的响应[J].生态环境学报,2025,34(2):233-246.
Sun Yujia, Lu Mei, Zhao Xuyan, et al. Response of soil bacterial community structure to nitrogen addition in degraded Napahai alpine meadow [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2025,34(2):233-246.

[34] 黄正谊,苏延桂,黄刚,等.尖峰岭热带天然林不同土层细菌群落多样性和组成的海拔变异规律[J].生态学报,2023,43(7):2891-2902.
Huang Zhengyi, Su Yangui, Huang Gang, et al. The altitudinal patterns of bacterial community diversity and composition at different soil depths in Jianfengling mountain tropical forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(7):2891-2902.