

## 桂西北光皮桦人工林水源涵养功能

滕秋梅<sup>1</sup>, 何斌<sup>2</sup>, 徐广平<sup>1</sup>, 杨俊松<sup>3</sup>, 张中峰<sup>1</sup>,  
张德楠<sup>1</sup>, 周龙武<sup>1</sup>, 何文<sup>1</sup>, 黄科朝<sup>1</sup>, 孙英杰<sup>1</sup>

(1.广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室, 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西 桂林 541006;  
2.广西大学林学院, 南宁 530004; 3.贵州省贵阳市花溪区马铃乡林业站, 贵阳 550027)

**摘要:** 为了研究广西西北部不同林龄光皮桦人工林的水源涵养功能, 选择具有代表性的 11, 16 年生光皮桦人工林、16 年生杉木林, 从林冠层、枯枝落叶层和土壤层 3 个层次及综合性的水源涵养能力进行了定量分析。结果表明: (1) 11, 16 年生光皮桦人工林林冠层、灌木层、草本层持水量范围分别为 12.54~21.06, 2.15~3.05, 1.27~1.52 t/hm<sup>2</sup>, 凋落物总储量为 4.54~7.42 t/hm<sup>2</sup>, 最大持水量为 12.55~16.00 t/hm<sup>2</sup>, 16 年生均显著大于 11 年生 ( $P < 0.05$ ), 凋落物吸水速率与浸水时间存在良好的线性关系 ( $R^2 > 0.86$ ,  $P < 0.05$ )。 (2) 土壤的孔隙状况表现为 16 年生光皮桦林 > 11 年生光皮桦林, 均大于对照的 16 年生杉木林, 0—20 cm 显著大于 20—40, 40—80 cm 土层。 (3) 11 年生光皮桦土壤最大持水量、毛管持水量、非毛管持水量的变化范围分别为 28.97%~60.55%, 25.35%~47.21%, 3.71%~13.34%, 16 年生的为 29.06%~63.45%, 25.63%~48.70%, 3.34%~14.75%, 均随着土层的加深而减少; 11, 16 年生光皮桦林 0—80 cm 土壤层自然含水量范围分别为 27.46~30.16, 28.12~30.22 g/cm<sup>3</sup>; 总蓄水量分别为 3 813.4, 3 732.2 t/hm<sup>2</sup>, 均大于 16 年生杉木林 (3 659.2 t/hm<sup>2</sup>)。总体上, 林龄较大的光皮桦人工林表现出较强的水源涵养功能, 且优于同林龄的杉木人工林。研究结果可为该地区光皮桦人工林的经营管理提供科学依据。

**关键词:** 光皮桦人工林; 持水量; 土壤; 枯落物; 水源涵养

**中图分类号:** S714.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2019)05-0177-08

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.05.026

## Water Conservation Function of *Betula luminifera* Plantation in Northwest Guangxi

TENG Qiumei<sup>1</sup>, HE Bin<sup>2</sup>, XU Guangping<sup>1</sup>, YANG Junsong<sup>3</sup>, ZHANG Zhongfeng<sup>1</sup>,  
ZHANG Denan<sup>1</sup>, ZHOU Longwu<sup>1</sup>, HE Wen<sup>1</sup>, HUANG Kechao<sup>1</sup>, SUN Yingjie<sup>1</sup>

(1. Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin, Guangxi 541006; 2. Forestry College, Guangxi University, Nanning 530004; 3. Forestry Station of Maling Township at Huaixi District, Guiyang 550027)

**Abstract:** To evaluate the water conservation function of *Betula luminifera* plantations with different ages in Northwestern Guangxi, the representative 11 and 16-year-old *B. luminifera* plantations and 16-year-old *Cunninghamia lanceolata* were selected as main research object, and the water conservation capacities in three layers including the forest canopy, litter layer and the soil layer, as well as the comprehensive water conservation capacity were analyzed quantitatively. The results showed that: (1) The water holding capacity of the canopy, shrub layer and herb layer of the 11 and 16 year-old *B. Luminifera* plantations ranged from 12.54 to 21.06 t/hm<sup>2</sup>, 2.15 to 3.05 t/hm<sup>2</sup> and 1.27 to 1.52 t/hm<sup>2</sup>. The total litter reserve was 4.54 ~ 7.42 t/hm<sup>2</sup>, and the maximum water holding capacity was 12.55 ~ 16.00 t/hm<sup>2</sup>, which of 16-year-old plantation was significantly higher than that of 11-year-old plantation ( $P < 0.05$ ). There was a good linear relationship between the water absorption rate and water soaking time ( $R^2 > 0.86$ ,  $P < 0.05$ ). (2) The pore condition of soil followed the order of 16-year-old *B. Luminifera* forest > 11-year-old *B. Luminifera* forest > 16-years-

收稿日期: 2019-03-14

资助项目: 国家自然科学基金项目(31760162); 广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA050069); 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室基金项目(17-259-23); 广西科技重大专项(桂科 AA17204087-9, 桂科 AA18118011-4); 广西百色高新技术产业开发区引导项目(K-YS-SW-201801); 广西植物研究所基本业务费项目(桂植业 17012, 桂植业 18007, 桂植业 18015)

第一作者: 滕秋梅(1991—), 女, 硕士, 主要从事森林生态研究。E-mail: 1037014105@qq.com

通信作者: 徐广平(1977—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事土壤生态与全球变化研究。E-mail: xugpgau@163.com

old *C. lanceolata* forest, and the pore condition of soil was significantly higher in 0–20 cm soil layer than that in 20–40 cm and 40–80 cm soil layer. (3) The variation range of maximum water holding capacity, capillary water holding capacity and non-capillary water holding capacity of the 11-year-old *B. Luminiifera* soil was 28.97% ~ 60.55%, 25.35% ~ 47.21% and 3.71% ~ 13.34%, and the range was 26.06% ~ 63.45%, 25.63% ~ 48.70% and 3.34% ~ 14.75% in 16-years-old *B. Luminiifera* plantation, respectively, and all the values decreased with the increasing of the soil layer. The natural water content ranges of 0–80 cm soil layer in 11 and 16 year-old forest were 27.46 ~ 30.16 g/cm<sup>3</sup> and 28.12 ~ 30.22 g/cm<sup>3</sup>, respectively, and total water storage capacities were 3 813.4 t/hm<sup>2</sup> and 3 732.2 t/hm<sup>2</sup>, respectively, and all the values were greater than those in 16-year-old *C. lanceolata* forest (3 659.2 t/hm<sup>2</sup>). On the whole, the older *B. luminiifera* plantation had stronger water conservation function, and it was superior to the same age *C. lanceolata* plantation. The results could provide scientific basis for the management of *B. luminiifera* plantation in this area.

**Keywords:** *Betula luminiifera* plantation; water holding capacity; soil; litter; water conservation

森林是人类赖以生存和发展的重要资源之一,其具有结构复杂、生产力高、生态功能多样等特点。水源涵养功能作为森林生态系统最重要的功能之一,其研究一直贯穿整个森林水文的研究过程<sup>[1]</sup>。近些年,在有关学者的不懈努力下,中国对森林水文学的研究在地域的广阔性、植被的典型性以及树种的多样性等方面都取得了显著的成果。吴强等<sup>[2]</sup>对滦河上游地区 7 种典型林分类型的枯落物和土壤持水性能进行研究,结果表明土壤持水性能按大小排列为华北落叶松林、油松林、山杨—白桦林、山杨林、华北落叶松—白桦林、白桦林、落叶松—油松林;侯贵荣等<sup>[3]</sup>对山西吉县蔡家川流域刺槐林、油松林、刺槐×油松混交林枯落物层和土壤层持水性能的研究结果表明,3 种林地枯落物层和土壤层的涵养水源能力表现为油松×刺槐混交林较高,油松纯林较差;李奕等<sup>[4]</sup>研究认为,樟子松天然林的蓄水能力与林地的坡度和坡位有关。另外,许多学者<sup>[5-9]</sup>在森林水源涵养功能的退化树种影响、凋落物养分(C、P、K 等)溶出特征、水文效应、红松人工林和自然保护区不同植被类型等方面进行了大量的研究。以上研究中,不同人工林水源涵养的结论不尽一致,变化差异主要由于林分类型、管理措施等存在不同。分析和比较不同森林类型水源涵养功能及其差异,对于合理经营森林资源,实现人工林的可持续发展具有重要的现实意义。

光皮桦(*Betula luminiifera* H. Winkl)是我国特有的珍贵乡土树种,同时也是培育名贵中药材天麻的优势菌材<sup>[10]</sup>,更是荒山造林的优良速生用材树种之一,经济效益和生态效益极高。目前,有关光皮桦的研究主要集中在生物生态学特性、苗木培育与营林技术、生长特性与生物量、遗传改良策略以及碳储量及其分布等方面<sup>[11-12]</sup>。关于光皮桦水源涵养功能的研究一般是与其他林分混交,但有关不同林龄光皮桦人工纯林水源涵养功能的研究报道较少。为此,本研究

以广西西北部天峨县林朵林场 11,16 年生光皮桦人工林为研究对象,通过选择和设置标准样地,开展不同林龄光皮桦人工林不同结构层次持水性能的研究,以揭示该区域光皮桦人工林水源涵养功能概况,为今后合理评价光皮桦人工林的经济效益和生态效益提供科学依据和理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区天峨县,该县境地处广西丘陵与云贵高原的过渡地带,属亚热带季风气候区,冬暖夏凉,四季分明,年平均气温 20 °C,年平均日照时间 1 283 h,年降水量 1 370 mm,无霜期 330 d。试验地位于该县林朵林场顶皇分场,地理位置为 107°14'E, 24°58'N,海拔高度 700~800 m,西南坡,坡度 25°~28°,土壤为二迭纪灰绿砂页岩发育而成的山地黄红壤,土层厚度 80~100 cm。光皮桦人工林前茬均为杉木(*Cunninghamia lanceolata*)纯林,分别于 1999 年和 2005 年采伐,经过炼山和整地后,分别于第 2 年 4 月用 1 年生光皮桦实生苗营造,密度均为 1 250 株/hm<sup>2</sup>(株行距 2 m×4 m)。造林第 1 到第 3 年分别在每年的 5—6 月和 9—10 月进行铲草抚育,2016 年 4 月底调查时 11 年生光皮桦人工林的林相较整齐,郁闭度为 0.70,保留密度 954 株/hm<sup>2</sup>,林分平均树高 16.20 m,平均胸径 15.80 cm,林下灌木主要有盐肤木(*Rhus chinensis* Mill.)、木姜子(*Litsea pungens* Hemsl.)、华南毛柃(*Eurya ciliate* Merr.)等,草本主要有五节芒(*Miscanthus floridulus* (Lab.) Warb. ex Schum. et Laut)、铁芒箕(*Dicranopteris linearis* (burm.) Underw.)、蔓生莠竹(*Microstegium vegans* (Nees ex Steud.) A. Camus)等,覆盖度约 60%,凋落物厚度约 2.0 cm。16 年生光皮桦人工林的林相较整齐,郁闭度为 0.80,保留密度 950 株/hm<sup>2</sup>,林下灌木主要有毛桐(*Mallotus barbatus*

(Wall.) Muell.-Arg.)、杜茎山 (*Maesa japonica* (Thunb.) Moritzi)、盐肤木 (*Rhus chinensis* Mill.) 等,草本主要狗脊 (*Woodwardia japonica* (L. f.) Sm.)、乌蕨 (*Stenoloma chusanum* Ching)、蔓生莠竹 (*Microstegium vegans* (Nees ex Steud.) A. Camus) 等,覆盖度约 60%,凋落物厚度约 3.0 cm。

## 1.2 研究方法

于 2016 年 4 月 26 日至 5 月 6 日,在天峨县林朵林场场顶皇分场鹄分场的 11,16 年生光皮桦人工林中按上坡、中坡和下坡分别设置面积为 600 m<sup>2</sup> (20 m×30 m) 的标准样地各 1 块。在样地内进行每木检尺,测定各样地中林木生长状况(树高、胸径、冠幅和郁闭度等)。

根据林分生长调查结果,在 2 个林分年龄的标准地中分别选择 3 株平均木,伐倒平均木后,林木地上部分采用 Monsic 分层切割法,依次收集树叶、树枝、干材、树皮;林木地下部分即根系采用全根挖掘法,即以树桩为中心,挖取半径约 1.5 m、深度约 1 m 的周边林木地下根系,除树桩外,其他根系按照其直径大小依次划分为粗根(≥2.0 cm)、中根(0.5~2 cm)、细根(<0.5 cm)。称取林木各组分鲜质量,然后分别采集各组分鲜样品 300~500 g,带回实验室,在恒温烘箱中于 80 °C 恒温下烘至恒重,计算出林木中各个组分的生物量。在进行乔木层生物量测定的同时,分别在各林分年龄标准样地内按三角形布设面积为 1.0 m×1.0 m 小样方,调查各样方内的植物种类、个体数量、高度以及覆盖度等,采用样方收获法分别称取草本层、灌木层的生物量以及凋落物层(分为未分解和半分解层)的现存量,采集各层次样品 300~500 g 带回实验室参照乔木层样品分别测定各层生物量。用浸水法测定持水量和持水率<sup>[5]</sup>。在各标准样地内各设置 5 个采样点,按层次(0—20,20—40,40—80 cm)分层采土,用环刀法测定土壤的物理性质(孔隙度等)和渗透性能<sup>[7]</sup>。

## 1.3 数据处理

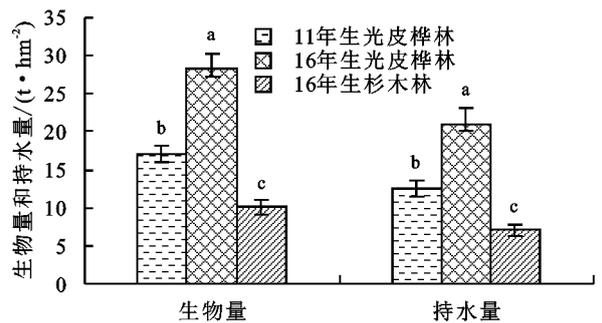
用 Microsoft office 2003 软件处理数据和作图,用 SPSS 22.0 软件进行差异显著性检验。

# 2 结果与分析

## 2.1 林冠层的持水性能

林冠层的持水特性与降雨特征(降雨量、降雨强度、降雨时间)以及林冠层本身的性质(树种组成、郁闭度、生物量)等有关。光皮桦人工林林冠层持水性能见图 1。16 年生光皮桦人工林林冠(枝叶)层的生物量显著大于 11 年生( $P < 0.05$ ),表现为 16 年生光皮桦林(21.06 t/hm<sup>2</sup>) > 11 年生光皮桦林(12.54 t/hm<sup>2</sup>) > 16 年生杉木林(7.20 t/hm<sup>2</sup>),持水量表现出

相同的结果。可见,随着生物量的增大持水量也增大,且林龄大的林分林冠层持水量大于小林龄林分。这可能是由于林龄大的树冠,枝条较茂盛,树干较大,生物量随之增多,从而拦截雨水的能力较强,树冠的持水量也相对较多。16 年生杉木林的持水量均显著小于 11,16 年生光皮桦林,这可能与 2 个树种的特性有关,光皮桦是落叶阔叶树种,杉木是针叶树种,光皮桦的叶面积指数大于杉木,而叶面积指数与林冠层对降雨的截留功能有关。



注:图中不同小写字母表示不同林分间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

图 1 林冠层的持水性能

## 2.2 灌木层和草本层持水性能

灌木层和草本层具有一定水源涵养功能,是森林生态系统的重要组成部分。由图 2 可知,2 种光皮桦林下灌木层的生物量和持水量与林冠层具有相似的规律,且与 16 年生杉木林均具有显著差异( $P < 0.05$ ),持水量表现为 16 年生光皮桦林(3.05 t/hm<sup>2</sup>) > 11 光皮桦林(2.15 t/hm<sup>2</sup>) > 16 年生杉木林(1.42 t/hm<sup>2</sup>)。而草本层的生物量和持水量与 16 年生杉木均无显著差异( $P > 0.05$ ),持水量表现为 16 年生光皮桦林(1.52 t/hm<sup>2</sup>) > 16 年生杉木林(1.34 t/hm<sup>2</sup>) > 11 年生光皮桦林(1.27 t/hm<sup>2</sup>),与 16 年生杉木林均无显著差异( $P > 0.05$ )。可见,与同林龄的杉木相比,光皮桦人工林林下灌木层和草本层的持水性能较好。

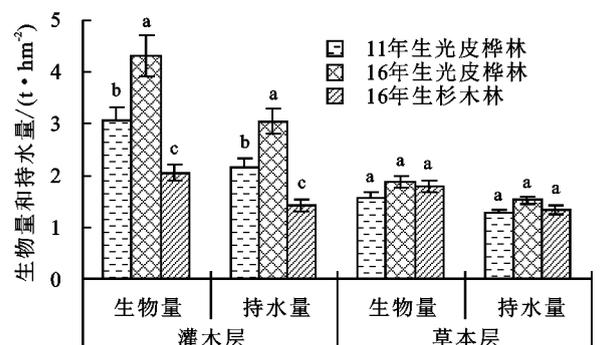


图 2 林下植物层的持水性能

## 2.3 凋落物层的持水性能

2.3.1 凋落物储量 林地凋落物总储量包括未分解层和半分解层。由图 3 可知,16 年生光皮桦人工林凋落物总储量为 7.42 t/hm<sup>2</sup>,显著大于 11 年生(4.54 t/hm<sup>2</sup>) ( $P < 0.05$ )。可见,林龄越大凋落物储量越

大,说明林龄对光皮桦凋落物储量具有显著影响,这可能与林龄较大的光皮桦人工林生长较旺盛,枯枝落叶量较多有关。与 16 年生的杉木林相比,11 年生的光皮桦林凋落物储存量较大,而 16 年生的光皮桦人工林凋落物储存量是相同林龄杉木林的 2 倍多,差异显著( $P < 0.05$ ),可见光皮桦人工林凋落物量比杉木林更多,进一步反映了不同森林类型凋落物量的差异。11,16 年生未分解层凋落物储量占总储量的比例分别为 61.67%,54.85%,半分解层储量分别为 38.33%,45.15%,未分解层凋落物储量显著大于半分解层,随着林龄的增加,未分解层占总储存量的比例减少,半分解层的比例增加,说明随着林龄的增大,凋落物先从未分解层到半分解层,最后被分解成有机质等物质回归土壤,微生物对凋落物分解是逐渐进行的过程。与同林龄的杉木林相比,光皮桦人工林半分解层的比例较大,未分解层的比例小于杉木林,进一步说明光皮桦的枯落物较杉木易分解。

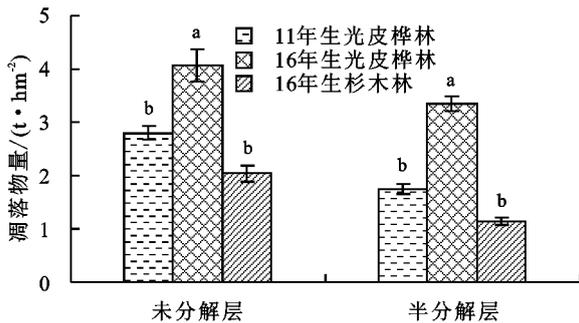


图 3 凋落物储量

2.3.2 凋落物层持水率 凋落物持水率是反映持水性能的一个重要指标,持水率越大,表示持水能力越强,其大小受到林分类型、林分内微环境、分解状况等因素的影响。由图 4 可知,0.5~24 h 的持水率均为 16 年生光皮桦林最大,11 年生光皮桦林次之,16 年生杉木林最小,且 16 年生光皮桦林持水率显著大于 16 年生杉木林( $P < 0.05$ ),与 11 年生光皮桦林无显著差异( $P > 0.05$ ),表明作为阔叶树种的光皮桦持水能力强于针叶树种杉木。随着浸泡时间的增加,各林地凋落物的持水率表现出上升的趋势,不同林地在同一时间上升的幅度不同。而各林地凋落物持水率均在浸泡时间为 0.5~4 h 上升的幅度最大,8~10 h 之后趋于平缓状态,10 h 后基本达到饱和,10~24 h 的持水率基本无变化,说明 10 h 后凋落物的质量与其干重之比可以反映其最大持水率。

2.3.3 凋落物吸水速率 凋落物的吸水速率是指单位时间内的吸收水量,作为反映凋落物短时内对水分的吸收速度,吸水速率快,表示凋落物对于短时间的降雨具有较大的持水量,这对森林生态系统水源涵养功能的提高具有重要意义。由图 5 可知,在浸泡时

间为 0.5 h 时吸水速率最快,之后吸水速率随浸泡时间的延长呈现降低的趋势,但持水量仍在增加,10~24 h 趋于平缓增加,凋落物的这种持水现象有利于吸收自然降水。光皮桦人工林中,16 年生光皮桦林吸水速率最大,在前 0.5 h 的吸水速率高达 3 356 g/(kg·h),是 11 年生光皮桦林的 1 倍多,而 4~24 h 后 11 年生光皮桦林吸水速率大于另外 2 种林分。从整个 24 h 的吸水速率来看,各林分的变化没有明显的规律。各林地凋落物浸入水中初期其吸水速率差异显著,表现为 16 年生光皮桦林(3 356 g/(kg·h)) > 11 年生光皮桦林(2 900 g/(kg·h)) > 16 年生杉木林(2 672 g/(kg·h)),随浸泡时间的延长,吸水速率的差异慢慢变小,到 10 h 后趋于动态平衡。这可能是因为随着浸泡时间的延长,凋落物持水量接近其最大持水量,逐渐趋于饱和,其吸水速率随之变小。将吸水速率与浸水时间之间的关系进行拟合,发现两者之间存在良好的线性关系: $W_A = a + b/t$ 。式中: $W_A$  为吸水速率(g/(kg·h)); $a$  为常数; $b$  为线性系数; $t$  为浸泡时间(h)。拟合方程为:11 年生光皮桦林, $W_A = -224.533 + 1331.264/t, R^2 = 0.864$ ;16 年生光皮桦林, $W_A = -280.464 + 1585.588/t, R^2 = 0.869$ ;16 年生杉木林, $W_A = -330.018 + 1670.351/t, R^2 = 0.868$ 。11 年生和 16 年生光皮桦人工林的持水速率达到极显著相关水平( $P < 0.01$ ),这可能是因为林龄的不同,凋落物的数量、积累的厚度以及分解状况不同所导致;16 年生光皮桦人工林与 16 年生杉木林的吸水速率具有极显著差异( $P < 0.01$ )。

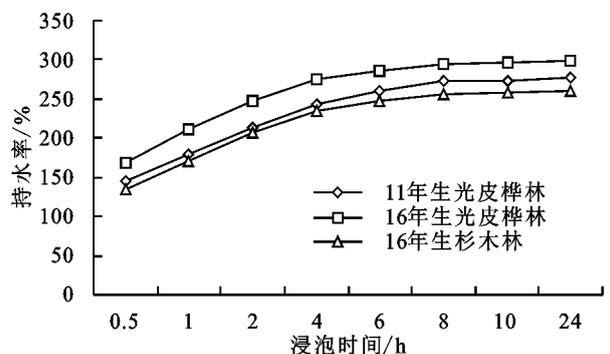


图 4 凋落物层持水率

2.3.4 凋落物的最大持水量 凋落物的最大持水量可以反映凋落物干物质的持水能力,最大持水量越高,吸收和过滤地表径流的能力越强。本文以凋落物浸泡 24 h 后的持水率作为最大持水率,计算光皮桦人工林凋落物最大持水量(图 5)。各林分凋落物层最大持水量表现为 16 年生光皮桦林(16.00 t/hm<sup>2</sup>) > 11 年生光皮桦林(12.55 t/hm<sup>2</sup>) > 16 年生杉木林(8.28 t/hm<sup>2</sup>),11,16 年生间具有显著差异,均显著大于杉木林。可见林龄的增加有利于提高光皮桦人工

林对降雨的拦蓄能力。

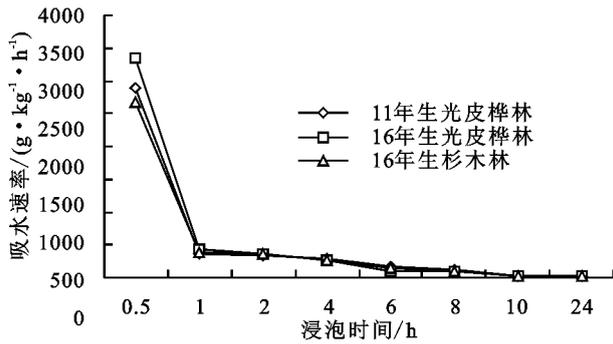
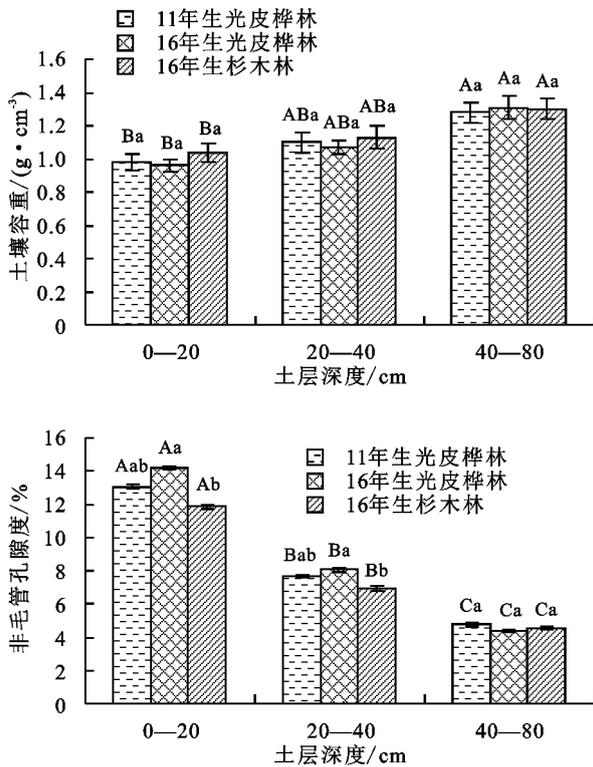


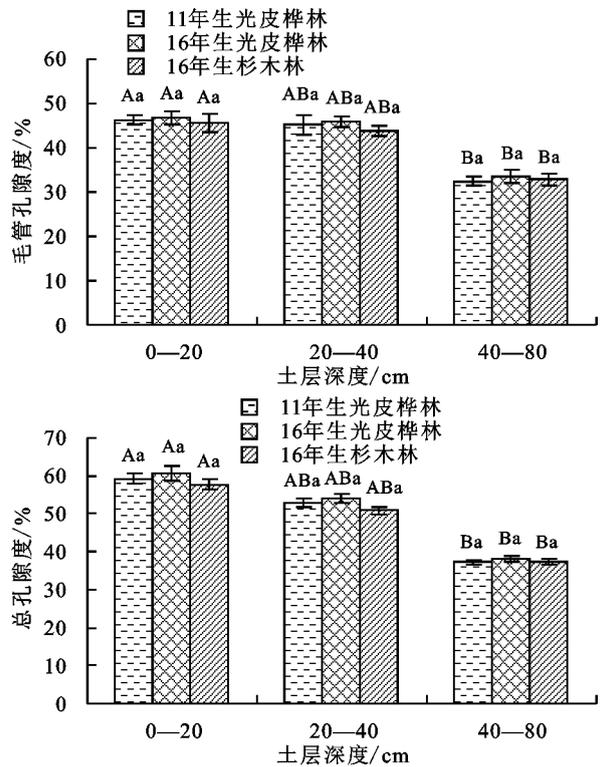
图 5 凋落物吸水速率与浸泡时间的关系

## 2.4 土壤层的持水性能

2.4.1 土壤孔隙度 土壤孔隙度是反映土壤物理性质的指标,直接影响土壤的透气性和蓄水性能。由图 6 可知,各林地土壤容重随着土层的加深而增大,且 0—20, 20—40 cm 土壤容重差异显著 ( $P < 0.05$ ),表



现为 16 年生杉木林  $>$  11 年生光皮桦林  $>$  16 年生光皮桦林, 40—80 cm 表现为 16 年生光皮桦林 ( $1.31 \text{ g/cm}^3$ )  $>$  16 年生杉木林 ( $1.3 \text{ g/cm}^3$ )  $>$  11 年生光皮桦林 ( $1.28 \text{ g/cm}^3$ ), 同一土层各林地间的差异均不显著 ( $P > 0.05$ )。各林地毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度的表现规律均相似,同一土层不同林地间均表现为 16 年生光皮桦林最大, 16 年生杉木林最小,均随着土层的加深而减小, 0—20 cm 显著大于 40—80 cm 土层。11 年生和 16 年生光皮桦林 0—80 cm 毛管孔隙度分别为 32.45%~46.27%, 33.58%~46.75%, 非毛管孔隙度分别为 4.75%~13.07%, 4.37%~14.16%, 总孔隙度分别为 37.25%~59.27%, 37.98%~60.75%。可见,就光皮桦林的土壤孔隙度而言, 16 年生大于 11 年生,说明光皮桦林龄的增大影响了其土壤孔隙度,且有利于土壤物理性质的改良。



注:图中不同小写字母代表同一土层不同林分差异显著 ( $P < 0.05$ ); 不同大写字母代表同一林分不同土层差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

图 6 土壤的孔隙度状况

2.4.2 土壤持水量 土壤水分概况是土壤孔隙状况和土壤颗粒组成的综合体现。由图 7 可知,各林地土壤层自然含水量差异不显著 ( $P > 0.05$ ),同一土层不同林分间自然含水量均表现为 16 年生光皮桦林  $>$  11 年生光皮桦林  $>$  16 年生杉木林, 0—80 cm 11 年生光皮桦林土壤层自然含水量的变化范围为 27.46~30.16  $\text{g/cm}^3$ , 16 年生光皮桦林为 28.12~30.22  $\text{g/cm}^3$ , 16 年生杉木林为 26.13~28.09  $\text{g/cm}^3$ , 均随着土层的加深而增大。按照方程  $W_A = a + bd$  拟合光皮桦人工林土壤含水量 ( $W_A, \text{g/cm}^2$ ) 和土层深度 ( $d,$

cm) 的关系。式中:  $a$  和  $b$  为系数。拟合方程为: 11 年生光皮桦林,  $W_A = 25.98 + 1.38d, R^2 = 0.984$ ; 16 年生光皮桦林,  $W_A = 27.073 + 12.02d, R^2 = 0.998$ ; 16 年生杉木林,  $W_A = 25.167 + 0.98d, R^2 = 0.999$ , 相关系数均在 0.98 以上,表明土壤含水量和土层深度具有良好的拟合关系。各林地各土层最大持水量均为 16 年生光皮桦林最大, 11 年生光皮桦林次之; 0—20 cm 土层 11, 16 年生光皮桦林与 16 年生杉木林有显著差异 ( $P < 0.05$ ), 其他土层差异均不显著 ( $P > 0.05$ ); 11 年生光皮桦林、16 年生光皮桦林和 16 年生杉木林最

大持水量的变化范围分别为 28.97%~60.55%, 29.06%~63.45%, 28.71%~55.25%, 均随着土层的加深而减少。各林地毛管持水量、非毛管持水量的表现规律与最大持水量相似, 均为 16 年生光皮桦林最大, 16 年生杉木林最小, 随着土层的加深而减少。

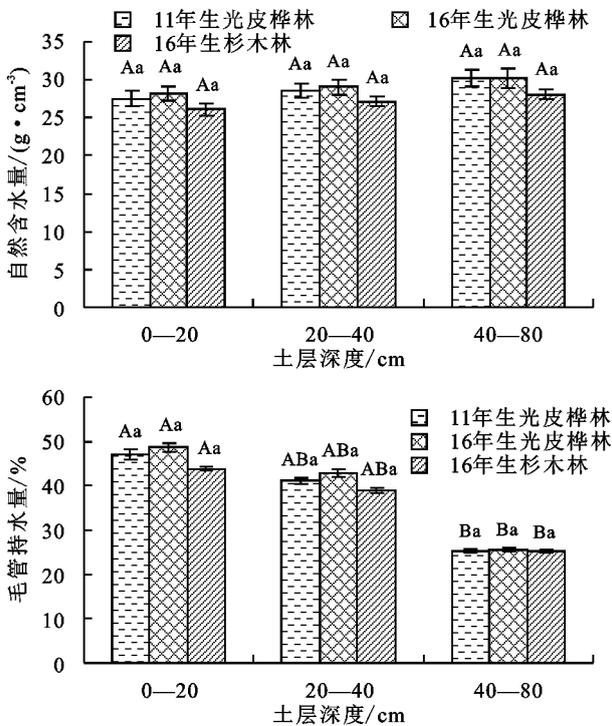


图 7 土壤持水量

2.4.3 土壤蓄水能力 一般来讲, 土壤的蓄水能力由土壤的最大蓄水量、毛管蓄水量和非毛管蓄水量等因素来决定, 最大蓄水量是指非毛管水和毛管水都达到饱和时的蓄水量, 而土壤涵养水源能力的大小与土壤的蓄水能力大小密切相关。由图 8 可知, 各林地土壤蓄水量随土层的变化规律一致, 均为 40—80 cm > 0—20 cm > 20—40 cm, 且 40—80 cm 土层与其他 2 个土层均具有显著差异 ( $P < 0.05$ )。0—80 cm 土层的总蓄水量同样表现为 16 年生光皮桦林 (3 791.24 t/hm<sup>2</sup>) > 11 年生光皮桦林 (3 719.65 t/hm<sup>2</sup>) > 16 年生杉木林 (3 650.91 t/hm<sup>2</sup>), 各林地间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

2.4.4 土壤渗透能力 土壤的渗透性能同样是衡量林地水源涵养功能的重要指标, 一般用渗透系数和渗透速率表示。由表 1 可知, 11, 16 年生光皮桦人工林、16 年生杉木林土壤初渗速度、稳渗速度、渗透系数的大小随着土层的加深呈现减小的趋势。11 年生光皮桦林 0—20 cm 土层的稳渗速度比 20—40, 40—80 cm 分别高 41.23%, 51.37%, 差异显著 ( $P < 0.05$ ); 16 年生光皮桦林 0—20 cm 土层的稳渗速度分别是 20—40, 40—80 cm 土层的 2.41, 3.16 倍, 具有显著差异 ( $P < 0.05$ )。不同林地土壤渗透能力存在一定差异, 0—20, 20—40 cm 土层的初渗速度和稳渗速度均表现为 16 年

11, 16 年生光皮桦林、16 年生杉木林毛管持水量的变化范围分别为 25.35%~47.21%, 25.63%~48.70%, 25.23%~43.85%, 非毛管持水量的分别为 3.71%~13.34%, 3.34%~14.75%, 3.48%~11.46%, 各土层均差异显著 ( $P < 0.05$ )。

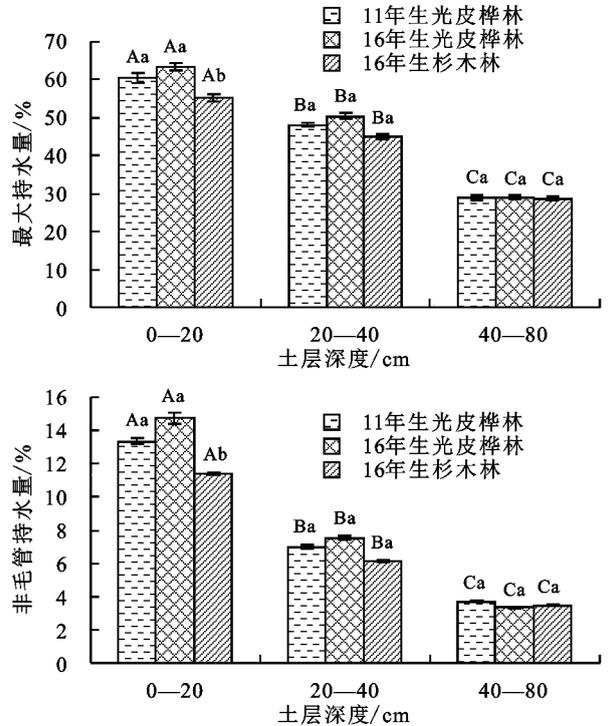
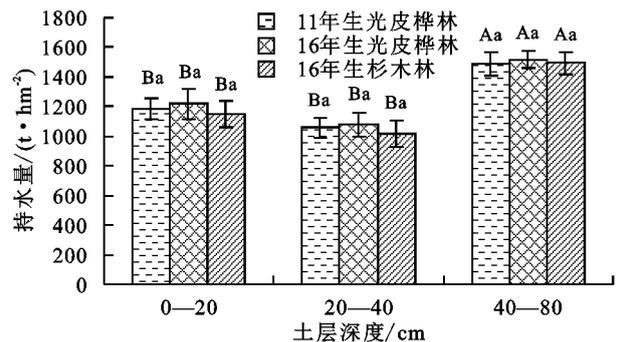


图 8 土壤储水性能

生光皮桦林 > 11 年生光皮桦林 > 16 年生杉木林, 40—80 cm 土层的变化规律不明显。



## 2.5 不同林龄对人工林持水能力与潜力的影响

林分的持水量由林冠层、林下植被层、凋落物层以及土壤层组成。由表 2 可知, 光皮桦林持水量主要集中在土壤层, 占总持水量的比例在 98% 以上, 林下植被层持水量最小。其中 11, 16 年生光皮桦林分总持水量分别为 3 748.16, 3 839.03 t/hm<sup>2</sup>, 均大于 16 年生杉木林 (3 669.16 t/hm<sup>2</sup>); 其次是凋落物层和林冠层, 林下植物层持水量最少。11 年生光皮桦林林冠层、林下植物层、凋落物层、土壤层持水量占林分总持水量的比例分别为 0.33%, 0.09%, 0.33%, 99.22%, 16 年生光皮桦林分别为 0.55%, 0.12%, 0.57%, 98.73%。由

此可见,随着林龄的增加,光皮桦人工林持水能力有所增加,水源涵养功能逐渐提高。

表 1 土壤渗透能力

土层 深度/cm	林分 类型	渗透速度/(mm·min <sup>-1</sup> )		渗透系数 K <sub>1</sub> /(mm·min <sup>-1</sup> )	
		初渗值	稳渗值	初渗值	稳渗值
0—20	11 年生光皮桦林	18.07±1.36aA	7.65±0.48bA	6.79	2.88
	16 年生光皮桦林	20.45±2.67aA	11.40±0.31aA	7.69	4.29
	16 年生杉木林	15.04±1.84aA	6.55±0.32bA	5.65	2.46
20—40	11 年生光皮桦林	12.15±2.54aB	4.50±1.06aB	4.57	1.69
	16 年生光皮桦林	12.86±1.94aB	4.72±0.53aB	4.83	1.77
	16 年生杉木林	10.42±2.03aB	4.06±0.23aB	3.92	1.53
40—80	11 年生光皮桦林	7.82±2.54aC	3.72±0.63aB	2.94	1.40
	16 年生光皮桦林	8.06±13.07aC	3.64±0.80aB	3.03	1.37
	16 年生杉木林	7.02±0.78aC	3.50±0.38aB	2.64	1.32

注:表中数据为平均值±标准差;不同小写字母表示同一土层不同林分间差异显著( $P<0.05$ );不同大写字母表示同一林分间不同土层差异显著( $P<0.05$ )。

表 2 林分总持水量

单位:t/hm<sup>2</sup>

林分类型	林冠层	林下植物层	凋落物层	土壤层	总持水量
11 年生光皮桦林	12.54±0.9b	3.42±0.21ab	12.55±0.87b	3719.65±92.14a	3748.16±98.51a
16 年生光皮桦林	21.06±1.09a	4.57±0.17a	22.16±1.42a	3791.24±99.01a	3839.03±85.14a
16 年生杉木林	7.20±0.45c	2.76±0.20b	8.28±0.51c	3650.91±83.35a	3669.16±56.34a

注:同一列不同小写字母表示不同林分类型间差异显著( $P<0.05$ )。

### 3 讨论

森林凋落物在水土保持、涵养水源、调节径流、提高土壤的渗透性能、改善土壤的理化性质等方面具有非常重要的作用。凋落物层通过增加地表粗糙度、减缓一定的径流速度、延长径流时间以及增加一定的人渗量来吸收和截留经由林冠层和灌草层截留后落到地表的一部分雨水<sup>[1]</sup>。孙艳等<sup>[13]</sup>对广西大化县带林村不同林龄段马尾松人工林凋落物层持水性能研究得出,近熟林阶段马尾松林水源涵养功能高于幼龄林和中龄林。本研究得出,16 年生光皮桦人工林凋落物的总储存量、持水率、吸水速率均显著大于 11 年生,说明光皮桦林龄的增大有利于其凋落物的积累。常用最大持水量和有效蓄水量表示凋落物层的水源涵养功能,其中最大持水量与凋落物的组成和种类有关<sup>[14]</sup>。郭梦娇等<sup>[15]</sup>对辽河源不同林龄油松林的水源涵养能力的研究得出,凋落物的最大持水量随着林龄的增加而增加。本研究得出,16 年生光皮桦人工林凋落物层最大持水量为 16.00 t/hm<sup>2</sup>,显著大于 11 年生(12.55 t/hm<sup>2</sup>)光皮桦林,即随着林龄的增大,光皮桦人工林凋落物层最大持水量呈现递增的趋势,说明林龄对光皮桦林凋落物的最大持水量影响显著。此结论与孙艳等<sup>[13]</sup>、郭梦娇等<sup>[15]</sup>、王美莲等<sup>[16]</sup>研究结论相符,而与富丽等<sup>[17]</sup>的结论不一致,其指出苹果经济林凋落物的最大持水量随林龄的增加呈现先增加后下降的趋势。随林龄变化凋落物最大持水量的变化规律有差异,可能与所研究林分的林龄、立地条件以及林木种类不同有很大关系,加

上所处的地理位置不同,因而得出不一样的规律。不同林龄凋落物层最大持水量的分布规律如何,还需进一步研究。杉木林凋落物最大持水量显著小于同林龄光皮桦林,这与 2 树种的生物学特性有很大关系,光皮桦属于高大落叶乔木,枯枝落叶量较多,凋落物在地表形成一层保护层,能削减雨水到达土壤的力度以及延长径流时间,这样就会有更多的雨水渗入地下,增加了水源涵养功能。

本研究结果得出,光皮桦人工林 0—80 cm 土壤的自然含水量和总蓄水量均表现为 16 年生大于 11 年生,差异不显著( $P>0.05$ )。虽然 2 个林分的自然含水量和总蓄水量没有达到显著差异,但是从本研究对 2 种林分林冠层、灌木层、草本层、凋落物层以及土壤层的持水能力来看,16 年生大于甚至显著大于 11 年生。可能原因是 2 种林分都是在杉木采伐后林后形成的,成林时间较短(光皮桦的树高、胸径和材积生长的成熟年龄大于 40 年),对该地土壤容重、孔隙度等的影响较小。森林实现其水源涵养功能主要是通过水文、气象、土壤等进行作用<sup>[1]</sup>,而森林土壤是水分贮存的重要容库,其蓄水能力的大小与土壤的种类、容重以及孔隙度等因素有关。土壤容重是土壤的固有属性,不同林分的土壤容重有差异;土壤孔隙是土壤水分、养分、空气和微生物等迁移的路径、贮存的库以及活动的场所,植被发达的根系决定了土壤的空隙状况,而空隙越大,土壤的人渗能力越高,削减了径流的速度以及因径流带走的泥沙量,从而影响土壤的透水性和保持水土的能力<sup>[18]</sup>,其大小与林分密度以及

林分类型显著相关<sup>[19]</sup>。本研究中,各林分 0—40 cm 土壤容重为 0.98~1.10 g/cm<sup>3</sup>,与吴强等<sup>[2]</sup>对 0—30 cm 土层的研究结果(0.82~1.20 g/cm<sup>3</sup>)相近,小于陈光升等<sup>[20]</sup>对华西雨屏区光皮桦林(1.29 g/cm<sup>3</sup>)的结果;光皮桦林土壤容重随着土层的加深而增大,土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度均随土层深度的加深而减小,这与刘凯等<sup>[21]</sup>、王燕等<sup>[22]</sup>的研究结果相符。与李文影等<sup>[23]</sup>对小兴安岭白桦次生林的研究结果不一致。造成研究结果有差异,与所研究区域的立地条件、降雨以及气温等因素有关。随着林龄的不同,光皮桦人工林的土壤容重表现为 16 年生小于 11 年生,土壤的孔隙度状况(总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度)以及渗透能力均是 16 年生大于 11 年生。随着林分的生长土壤空隙度状况以及渗透能力具有增加的趋势,这与光皮桦林下的植被状况、群落结构有关;该地区 16 年生的光皮桦林下植被生物量较大,植物种类丰富,使其具有较好的群落层次,而土壤的空隙状况与植被状况显著相关,此结果与李际平等<sup>[24]</sup>、郭梦娇等<sup>[15]</sup>的研究结果相似。可见,随着林龄的增加,光皮桦人工林土壤的物理性状得到了改善,降低了土壤容重,增加了土壤空隙,加速了土壤的入渗速率,减少或者削弱了林内地表径流的产生,使土壤在一定时间尺度下对于降水的截留有着更好的效果。另外,光皮桦人工林土壤毛管持水量、非毛管持水量均随着林龄的增加而增加。综上,随着林龄的增加,光皮桦人工林的持水能力具有增加的趋势,表现出更好的水源涵养功能。本研究仅对 11,16 年生 2 个林龄,其未达到成熟林期间的水源涵养能力进行了研究,林分类型相对较少。在以后的研究中,将增加多几个林龄的研究,以更详细地评价光皮桦人工林的水源涵养功能,丰富光皮桦人工林研究的基础数据。

## 4 结论

(1)光皮桦人工林林冠层、灌木层持水量、凋落物总储量 16 年生均显著大于 11 年生。11,16 年生光皮桦林最大持水量分别为 12.55,22.16 t/hm<sup>2</sup>,0—80 cm 土壤层自然含水量的变化范围分别为 27.46~30.16,28.12~30.22 g/cm<sup>3</sup>。

(2)总蓄水量表现为 16 年生光皮桦林(3 813.4 t/hm<sup>2</sup>)>11 年生光皮桦林(3 732.2 t/hm<sup>2</sup>),均大于 16 年生的杉木人工林。光皮桦人工林水源涵养功能因林龄的不同而有所差异,随着林分的生长,水源涵养功能得到提高;与该区相同林龄的杉木人工林相比,16 年生光皮桦林总持水量大于 16 年生杉木林。

(3)光皮桦人工林的水源涵养功能较强,建议在该地区加强天然次生林的保护和恢复,该地区选择种植光皮桦人工造林,既可以发挥比较好的经济效益,

又可以在水土保持方面起着良好的作用。

(4)在林木经营和管理等方面采取必要的抚育措施,如保留林下植被和林下凋落物,根据林木的生长状况施加一定的有机肥等,这对林地生产力的提高以及实现人工林经济效益和生态效益双赢的可持续发展具有重要的意义和作用。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 吴强,楚聪颖,张鹏,等.滦河上游 7 种典型林分类型水土保持功能[J].水土保持学报,2015,29(5):40-44.
- [3] 侯贵荣,毕华兴,魏曦,等.黄土残塬沟壑区 3 种林地枯落物和土壤水源涵养功能[J].水土保持学报,2018,32(2):357-363,371.
- [4] 李奕,满秀玲,蔡体久,等.大兴安岭山地樟子松天然林土壤水分物理性质及水源涵养功能研究[J].水土保持学报,2011,25(2):87-91,96.
- [5] 孙立博,余新晓,陈丽华,等.坝上高原杨树人工林的枯落物及土壤水源涵养功能退化[J].水土保持学报,2019,33(1):104-110.
- [6] 程志辉,李法云,李海燕,等.辽东山地水源涵养林典型植被凋落物 C、N、P 溶出特征及其影响因素[J].生态学杂志,2019,38(4):1031-1040.
- [7] 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):127-133.
- [8] 梁晓娇,王树力.阿什河源头不同类型红松人工林枯落物及其土壤水文特性[J].水土保持学报,2017,31(1):140-145,152.
- [9] 马国飞,满苏尔·沙比提,张雪琪.托木尔峰自然保护区台兰河上游不同植被类型的水源涵养功能[J].水土保持学报,2018,32(1):210-216,224.
- [10] 毕宁,周聿,周应书,等.光皮桦作为天麻菌材树种的优势分析[J].现代农业科技,2017(17):87-88.
- [11] 赵庆萍,杨林,刘佳琪,等.优质速生树种光皮桦研究进展[J].贵州林业科技,2016,44(4):55-60,54.
- [12] 滕秋梅,刘俊,廖倩苑,等.桂西北光皮桦人工林生态系统碳储量及其分布格局[J].西部林业科学,2016,45(4):119-122,129.
- [13] 孙艳,李四,张楠.林龄对马尾松人工林水源涵养能力的影响研究[J].中国水土保持,2018(7):22-24,69.
- [14] 刘蔚漪,喻庆国,罗宗伟,等.滇南亚热带地区典型公益林与商品林凋落物储量及持水特性[J].生态环境学报,2017,26(10):1719-1727.
- [15] 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.
- [16] 王美莲,王飞,姚晓娟,等.不同林龄兴安落叶松枯落物及土壤水文效应研究[J].生态环境学报,2015,24(6):925-931.

- 2016,22(4):1102-1110.
- [5] 张大庚,祝艳青,李天来,等.长期定位施肥对保护地土壤钙素形态分布的影响[J].水土保持学报,2011,25(2):198-202.
- [6] 张大庚,王凯琼,栗杰,等.长期施有机肥对耕地棕壤团聚体及钙素分布的影响[J].水土保持学报,2017,31(4):154-158.
- [7] 周卫,林葆.植物钙素营养机理研究进展[J].土壤学进展,1995,23(2):12-17.
- [8] Hirschi K D. The calcium conundrum. Both versatile nutrient and specific signal [J]. *Plant Physiology*,2004,136(1):2438-2442.
- [9] 陆景陵.植物营养学(上册)[M].北京:北京农业出版社,1995:51-59.
- [10] 董彩霞,周健民,王火焰.不同番茄品种对缺钙敏感性的差异[J].西北植物学报,2003,23(5):777-782.
- [11] 庞胜群,辛建华,郑群,等.加工番茄果实品质性状的配合力及遗传力研究[J].石河子大学学报(自然科学版),2011,29(3):278-281.
- [12] 郭文忠,刘声锋,徐新福.不同硝酸钙和氯化钠溶度处理土壤对番茄植株养分吸收的影响[J].西北植物学报,2004,24(11):2043-2047.
- [13] 董彩霞,周健民,范晓晖,等.不同施钙措施对番茄果实钙含量和钙形态的影响[J].植物营养与肥料学报,2004,10(1):91-95.
- [14] 董彩霞,周健民,段增强,等.番茄脐腐病发生机理研究综述[J].园艺学报,2001,28(增刊1):644-648.
- [15] Adams P, Ho L C. Deposition of modern tomato cultivars to blossom-end rot in relation to salinity [J]. *Journal of Pomology & Horticultural Science*,1992,67:827-839.
- [16] Paiva E A S, Smpaio R A, Martinez H E P. Composition and quality of tomato fruit cultivated in nutrient solutions containing different calcium concentrations [J]. *Plant Nutrition*,1998,21(12):2653-2661.
- [17] 马国瑞,石伟勇.农作物营养失调症原色图谱[M].北京:中国农业出版社,2002:32.
- [18] 张洁,李天来,徐晶.昼间亚高温对日光温室番茄生长发育、产量及品质的影响[J].应用生态学报,2005,16(6):1051-1055.
- [19] Golam F, Prophan Z H, Nezhadahmadi A, et al. Heat tolerance in tomato [J]. *Life Science Journal*,2012,9(4):1936-1950.
- [20] Silveira A C, Aguayo E, Chisari M, et al. Calcium salts and heat treatment for quality retention of fresh-cut 'Galia' melon [J]. *Postharvest Biology and Technology*,2011,62(1):77-84.
- [21] 李天来,李淼,孙周平.钙和水杨酸对亚高温胁迫下番茄叶片保护酶活性的调控作用[J].应用生态学报,2009,20(3):586-590.
- [22] 宗会,李明启.钙信使在植物适应非生物逆境中作用[J].植物生理学通讯,2001,37(4):330-335.
- [23] 王芳,杨莎,郭峰,等.钙对花生幼苗生长、活性氧积累和光抑制程度的影响[J].生态学报,2015,35(5):1496-1504.
- [24] 齐明芳,刘玉凤,周龙发,等.钙对亚高温下番茄幼苗叶片光合作用的调控作用[J].中国农业科学,2011,44(3):531-537.
- [25] 齐红岩,王丹,齐明芳,等.不同形态钙对高温逆境下番茄叶片光合作用的调控作用[J].应用生态学报,2014,25(12):3540-3546.
- (上接第184页)
- [17] 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.
- [18] 李红,范素芳,张光灿,等.黄土丘陵区退耕还林后不同林地土壤孔隙与贮水特性[J].水土保持通报,2010,30(1):27-30.
- [19] 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.
- [20] 陈光升,胡庭兴,黄立华,等.华西雨屏区人工竹林凋落物及表层土壤的水源涵养功能研究[J].水土保持学报,2008,22(1):159-162.
- [21] 刘凯,贺康宁,田赟,等.青海高寒山区5种林分的土壤特性及其水源涵养功能[J].水土保持学报,2017,31(3):141-146.
- [22] 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.
- [23] 李文影,满秀玲,张阳武.不同林龄白桦次生林土壤特性及其水源涵养功能[J].中国水土保持科学,2009,7(5):63-69.
- [24] 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.