

桂北地区不同密度杉木林枯落物与土壤水文效应

林立文¹, 邓羽松¹, 李佩琦¹, 杨钙仁¹, 蒋代华², 黄智刚^{2,3}, 雷震⁴

(1.广西大学林学院, 南宁 530004; 2.广西大学农学院, 南宁 530004;

3.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 4.广西融水县国营贝江河林场, 广西 融水 545300)

摘要:以桂北融水县贝江河林场杉木人工林为对象,采用野外实地观测与室内浸水法,研究了6种不同密度杉木林枯落物层和土壤层的水文效应。结果表明:(1)6种密度杉木林枯落物的厚度介于3.9~5.7 cm,蓄积量介于4.3~6.4 t/hm²,枯落物厚度与蓄积量变化一致,从大到小依次为1 755,1 440,2 025,2 700,2 325,975 plants/hm²;(2)枯落物最大持水量为2.40~14.23 t/hm²,最大拦蓄量为5.23~11.51 t/hm²,有效拦蓄量为2.45~9.49 t/hm²,且均以1 755 t/hm²最大;(3)在0—100 cm土层内,不同密度杉木林土壤容重介于1.19~1.28 g/cm³,当林分密度为1 755 plants/hm²时容重最小;(4)6种不同密度杉木林土壤的最大持水量和有效持水量均以1 755 plants/hm²最大,且最大持水量远大于有效持水量;(5)枯落物及其各分解层的持水量与浸水时间呈明显对数关系($R^2 > 0.96$),吸水速率与浸泡时间呈幂函数关系($R^2 > 0.92$)。综上得出,林分密度在1 755 plants/hm²左右时,杉木林能更好地发挥水源涵养功能。

关键词:桂北地区; 杉木林; 不同密度; 水文效应

中图分类号:S715 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2020)05-0200-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.05.028

Study on the Effects of Litter and Soil Hydrology of Different Density *Cunninghamia lanceolata* Forests in Northern Guangxi

LIN Liwen¹, DENG Yusong¹, LI Peiqi¹, YANG Gairen¹,

JIANG Daihua², HUANG Zhigang^{2,3}, LEI Zhen⁴

(1.College of Forestry Guangxi University, Nanning 530004; 2.College of Agricultural Guangxi

University, Nanning 530004; 3.Institute of Environment and Sustainable Development in Agricultural, Chinese

Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 4.Beijianghe State-owned Forest Farm, Rongshui, Guangxi 545300)

Abstract: Based on field observation and indoor immersion methods, we examined hydrological effects of litter layer and soil layer of six different densities of *Cunninghamia lanceolata* plantation in Rongshui Beijianghe Forest Farm of Northern Guangxi. The results showed that: (1) The litter thickness and the stock volume of six densities of *Cunninghamia lanceolata* plantation ranged from 3.9 to 5.7 cm and from 4.3 to 6.4 t/hm², the thickness of litter was consistent with the change of accumulation, and the order from large to small was 1 755, 1 440, 2 025, 2 700, 2 325, 975 plants/hm²; (2) The maximum water holding capacity of litter is 2.40~14.23 t/hm², and the maximum storage capacity was 5.23~11.51 t/hm². The effective storage capacity was 2.45~9.49 t/hm², of which 1 755 plants/hm² was the largest; (3) In the 0—100 cm soil layer, the soil bulk density of different densities of *Cunninghamia lanceolata* was between 1.19~1.28 g/cm³, and the minimum density is 1 755 plants/hm²; (4) The maximum and effective water holding capacity of six different densities of *Cunninghamia lanceolat* were 1 755 plants/hm², and the maximum water holding capacity was far greater than the effective water holding capacity; (5) The water holding capacity of litter and its decomposition layers had a logarithmic relationship with soaking time ($R^2 > 0.96$), and the water absorption rate had a power function relationship with soaking time ($R^2 > 0.92$). In conclusion, the forest with density about 1 755 plants/hm², *Cunninghamia lanceolata* forest showed better water conservation ability.

Keywords: North Guangxi; *Cunninghamia lanceolata* forest; different density; hydrological effect

收稿日期:2020-03-15

资助项目:广西创新驱动发展专项(桂科 AA17204087-8);国家重点研发计划项目(2017YFC0505402)

第一作者:林立文(1996—),男,硕士研究生,主要从事森林生态研究。E-mail:linliwen2018@163.com

通信作者:杨钙仁(1976—),男,博士,教授,主要从事生态水文与生态工程研究。E-mail:yanggr@gxu.edu.cn

森林作为陆地生态系统的重要组成部分,其类型丰富、结构复杂、分布广泛,发挥着拦截降水、调节径流、涵养水源等水文生态功能^[1-3]。森林水源涵养功能的大小表现为林冠层的截持降水量、枯落物层的持水量以及根系土壤层蓄水量的多少,其中枯落物层和土壤层的保水能力是这一功能的主体部分,也是森林生态系统健康监测中不可或缺的重要环节^[3-4]。因此,开展枯落物持水、土壤蓄水能力的研究,对探讨森林水文循环和水量平衡过程具有十分重要的理论与实践意义^[5-7]。杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国重要的速生用材树种,其干形通直圆满,材质轻韧,具有很高的经济价值和生态效益^[8]。杉木的蓄积量位列广西人工林之首,在林木产业发展中占极其重要的地位。研究区所在的融水县被称为“良种杉木的故乡”,是广西杉木的主产区,全县杉木人工林种植面积约 20 万 hm^2 ,被誉为“杉木王国”。

林分密度作为人工林群落结构的重要特征,它的差异会影响林分的整体结构、枯落物蓄积量、土壤理化性质、光热水分等,进而影响整个森林的水源涵养能力^[9]。对于不同密度人工林的水文效应,已有学者在不同地区开展了相关研究,赵磊等^[10]研究了江西大岗山不同密度杉木林指出,合理的造林密度和及时的抚育间伐能更好地发挥森林的水源涵养功能;王玲等^[11]研究了北京八达岭林场 4 种密度油松人工林认为,1 260 $\text{plants}/\text{hm}^2$ 的持水能力相对最好,可较好地涵养森林水源;丁霞等^[9]研究了丹江口库区高、中、低 3 种密度的马尾松人工林指出,中密度涵养水源的能力最佳。众多的研究丰富了林地水文学理论,并提供了宝贵的经验,然而这些研究区一般集中在华

北^[7,12]、东北^[4]、西北等地^[5,13],关于广西,特别是桂北地区杉木人工林的研究鲜见报道。地域的差异会导致气候的差异,光照、降雨、温度等因素的不同又会对林下枯落物层和土壤层产生巨大的影响^[14],进而影响整个林地的水源涵养能力。桂北所处的红壤区,夏季高温多雨,地表冲蚀剧烈,极易造成大面积的水土流失,因此,开展对桂北地区杉木人工林水文效应的研究意义重大。

鉴于此,本研究将以桂北融水县贝江河林场人工杉木林为研究对象,通过定量分析杉木林枯落物层的蓄积量、持水量以及土壤层的水分物理特征,比较不同密度杉木人工林枯落物和土壤层的水源涵养能力,旨在获取不同密度对杉木林水文特性的影响,以期从中提出该地区杉木人工林经营的合理密度,为桂北地区水土保持、林地的可持续经营管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

试验于 2019 年 7 月在柳州市融水县贝江河林场(109°11'E,24°57'N)进行。研究区属于中亚热带季风气候,极端最高气温 38.6 °C,极端最低气温 -3.0 °C,年均气温 18.8 °C,年均降水量 1 824.6 mm,无霜期 320 天以上,年日照时间达 1 699 h 以上。地貌类型以中低山为主,土壤属砂页岩风化发育而成的红壤,pH 为 4.0~5.0。研究区 6 种密度杉木林均为同一批栽植,年龄约为 15 年。实地踏查发现,由于杉木林的人工抚育,林下除了凋落的枝叶外,仅有少数植物生长,如乌毛蕨(*Blechnum orientale*)、芒箕(*Dicranopteris dichotoma*)、薯蓣(*Dioscorea opposita*)等,各林分的立地条件基本一致。林地基本概况见表 1。

表 1 不同密度杉木林样地的基本概况

样地编号	林分密度/ ($\text{plants} \cdot \text{hm}^{-2}$)	海拔/ m	坡度/(°)	坡向	郁闭度/%	平均 树高/m	平均 胸径/cm
I	975	490	23	WS	0.52	16.1	19.8
II	1440	500	25	WS	0.58	15.7	17.5
III	1755	495	23	WS	0.62	14.6	15.9
IV	2025	498	26	WS	0.69	13.8	14.7
V	2325	500	24	S	0.76	12.5	13.2
VI	2700	496	22	S	0.81	11.9	12.6

1.2 样地设置与样品采集

在踏查基础上,选取 6 种密度(975,1 440,1 755,2 025,2 325,2 700 $\text{plants}/\text{hm}^2$)杉木人工林作为研究对象,每个处理设 3 个重复样地(20 m×30 m),为消除边界效应,样地间距离不小于 10 m。对各样地内的林木进行实地测量,其基本特征见表 1。用样带法采集枯落物,在每个标准样地内布设 3 个具有代表性的小样方,面积为 1 m×1 m。未分解层枯落物是指

凋落物基本保持着原有的形态;半分解层是指枝叶未完全腐烂,肉眼能分辨出枝叶的大致形状。分别测定各层枯落物的厚度和鲜质量,随后将枯落物带回实验室在 85 °C 烘干至恒重称量,得到各层枯落物蓄积量和自然含水率。同时,在每个样地内选择典型地块挖掘土壤剖面 3 个,土壤剖面分为 5 层,即 0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm,用 100 cm^3 体积环刀取原状土带回实验室进行土壤贮水性能的测定。

1.3 枯落物持水性能测定

采用室内浸泡法测定 6 种密度杉木人工林枯落物未分解层以及半分解层的持水量和吸水速率,研究其吸水过程。将烘干至恒重的原状枯落物装入尼龙网袋,分别浸入清水中 1/12,1/4,1/2,1,2,4,6,8,10,12,24 h,捞起并静置一段时间,枯落物不滴水时称其重量,计算出各分解层在不同时段的持水量和吸水速率。相关研究^[13]表明,枯落物在水中浸泡 24 h 后基本饱和,所以将浸泡 24 h 后的吸水量作为最大持水量,此时的持水率为枯落物最大持水率,计算公式为:

$$R_{\max} = (M_{24} - M_d) / M_d \times 100\% \quad (1)$$

$$W_{\max} = (M_{24} - M_d) / A \times 100\% \quad (2)$$

$$V = (M_{24} - M_d) / t \quad (3)$$

式中: R_{\max} 、 W_{\max} 和 V 分别为枯落物最大持水率(%)、最大持水量(t/hm^2)和吸水速率($t/(hm^2 \cdot h)$); M_{24} 为枯落物浸水 24 h 饱和后的重量(g); M_d 为枯落物烘干后的质量(g); A 为枯落物样方面积(m^2); t 为浸水时间(h)。

1.4 枯落物拦蓄能力测定

枯落物层的最大拦蓄量可根据枯落物现存量、最大持水率以及自然含水率计算出来,但当降雨量达到 20~30 mm 时,枯落物的有效截留率大致为其最大持水率的 85%,由于最大拦蓄量不能反映枯落物对降雨的实际拦蓄情况,因此还需计算枯落物的有效拦蓄量,计算公式为:

$$W_{\max} = (R_{\max} - R_0)M \quad (4)$$

$$W_{sv} = (0.85R_{\max} - R_0)M \quad (5)$$

式中: W_{\max} 、 W_{sv} 为枯落物最大拦蓄量和有效拦蓄量(t/hm^2); R_0 为自然含水率(%); M 为枯落物现存量(t/hm^2)。

1.5 土壤水分物理性质测定

采用烘干法测定土壤含水量,环刀法测定土壤容重、孔隙度以及持水量。土壤持水能力是表征土壤涵养水源及水文调节功能的重要指标,它受到土壤孔隙大小和数量的影响。总孔隙度是表示最大持水能力的指标,毛管持水能力可表征土壤实际的持水能力,非毛管持水能力则是反映土壤渗透能力的指标,非毛管贮水亦称为有效贮水能力。土壤最大持水量、有效持水量和饱和持水量的计算公式为:

$$S_c = 10000 \cdot P_c \cdot h \quad (6)$$

$$S_{nc} = 10000 \cdot P_{nc} \cdot h \quad (7)$$

$$S_{\max} = 10000 \cdot P_t \cdot h \quad (8)$$

式中: S_c 、 S_{nc} 和 S_{\max} 分别为土壤田间持水量、有效持水量和最大持水量(t/hm^2); P_c 、 P_{nc} 和 P_t 分别为毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度(%); h 为土层厚度(m)。

2 结果与分析

2.1 不同密度杉木林枯落物厚度和蓄积量

枯落物的储量主要取决于枯落物的输入量和分

解程度。林分的生长状况和林地内的水热条件等因素又会影响枯落物的输入量、分解速度,进而影响林内枯落物的蓄积量。由表 2 可知,6 种密度杉木人工林枯落物的厚度介于 3.9~5.7 cm,大小排序为 1 755 plants/ hm^2 > 1 440 plants/ hm^2 > 2 025 plants/ hm^2 > 2 700 plants/ hm^2 > 2 325 plants/ hm^2 > 975 plants/ hm^2 。枯落物厚度随林分密度的增大而增大,但密度增加到 2 025 plants/ hm^2 时,厚度却减小。枯落物总储量与枯落物层厚度表现出相同的规律,即枯落物层厚度变大,其总储量也随之增大。当林分密度为 1 755 plants/ hm^2 时,枯落物总厚度达到最大值为 5.7 cm,未分解层储量、半分解层储量均达到最大值,分别为 2.87, 3.53 t/hm^2 ,显著优于其他林分密度。此外,各林分密度枯落物储量的占比,均为半分解层大于未分解层,且半分解层枯落物所占比例均大于 50%,由此可以看出,杉木林枯落物蓄积量主要来源于半分解层。

表 2 不同密度杉木林枯落物厚度与蓄积量

样地 编号	总厚度/ cm	总蓄积量/ ($t \cdot hm^{-2}$)	未分解层		半分解层	
			蓄积量/ ($t \cdot hm^{-2}$)	占比/%	蓄积量/ ($t \cdot hm^{-2}$)	占比/%
I	3.9	4.30	2.01	46.67	2.29	53.33
II	5.5	5.74	2.80	48.77	2.94	51.23
III	5.7	6.40	2.87	44.88	3.53	55.12
IV	5.4	5.50	2.69	49.00	2.80	51.00
V	4.3	4.58	2.01	43.83	2.58	56.17
VI	4.8	4.97	2.27	45.71	2.70	54.29

2.2 不同密度杉木林枯落物水文效应

2.2.1 不同密度杉木林枯落物持水能力 枯落物不仅能防止雨水和地表径流对土壤的冲刷,其自身也具有较强的吸水率和吸水量。由图 1 可知,6 种密度杉木人工林枯落物的最大持水量总和介于 9.24~14.23 t/hm^2 ,相当于 0.924~1.423 mm 的降雨,其最大持水量排序依次为:1 755 plants/ hm^2 > 1 440 plants/ hm^2 > 975 plants/ hm^2 > 2 025 plants/ hm^2 > 2 700 plants/ hm^2 > 2 325 plants/ hm^2 。在未分解层中,1 755 plants/ hm^2 的最大持水量最高,为 6.37 t/hm^2 ,2 325 plants/ hm^2 的最低,为 3.57 t/hm^2 。半分解层的最大持水量变化范围为 5.54~7.50 t/hm^2 ,1 755 plants/ hm^2 的仍然最高,为 7.85 t/hm^2 。

枯落物的最大持水率(%)与枯落物的组分和林下微环境有关,同枯落物的分解状况和发育状况亦有一定关系。枯落物最大持水率平均值介于 203.63%~263.46%,即最大可吸持约为自身干重 2.04~2.63 倍的水分,大小排序依次为 975 plants/ hm^2 > 2 700 plants/ hm^2 > 1 755 plants/ hm^2 > 1 440 plants/ hm^2 > 2 325 plants/ hm^2 > 2 025 plants/ hm^2 。从图 1 中还可以看出,各密度林分枯落物半分解层的最大持水量

以及最大持水率均高于未分解层,说明半分解层具有

更好的持水能力。

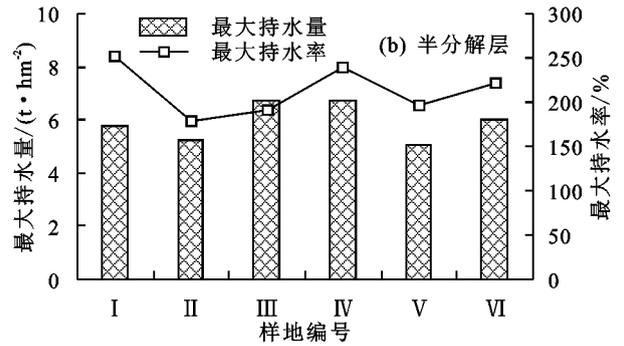
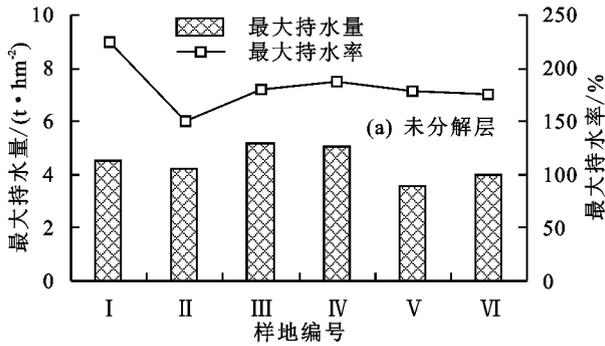


图 1 不同密度杉木林枯落物最大持水量和最大持水率

2.2.2 不同密度杉木林枯落物拦蓄能力 由表 3 可知,6 种密度杉木林枯落物的自然含水率均为半分解层大于未分解层,未分解层自然持水率变化为 12.73%~32.77%,半分解层自然持水率变化为 17.44%~37.71%。在拦蓄量方面,依然表现为半分解层大于未分解层,未分解层最大拦蓄量介于 2.93~4.67 t/hm²,大小排序依次为 1 755 plants/hm² > 2 025 plants/hm² > 975 plants/hm² > 2 700 plants/hm² > 1 440 plants/hm² > 2 325 plants/hm²;半分解层最大拦蓄量介于 4.08~5.94 t/hm²,排序依次为:1 755 plants/hm² > 2 025 plants/hm² > 2 700 plants/hm² > 975 plants/hm² >

1 440 plants/hm² > 2 325 plants/hm²。6 种密度杉木林枯落物未分解层的有效拦蓄率从大到小依次为 975,1 755,2 025,2 700,2 325,1 440 plants/hm²;其有效拦蓄量在林分密度为 1 755 plants/hm²时最大,为 3.85 t/hm²,2 025 plants/hm²次之,2 325 plants/hm²最小。半分解层的有效拦蓄率从大到小依次为 1 755,975,2 700,2 025,2 325,1 440 plants/hm²;其有效拦蓄量依然在 1 755 plants/hm²时最大,为 5.64 t/hm²。当杉木林密度为 1 755 plants/hm²时,枯落物层对降雨的有效拦蓄量最大,为 9.49 t/hm²,相当于 0.95 mm 的水深。

表 3 不同密度杉木林枯落物拦蓄能力

枯落物层	样地编号	自然含水率/%	最大拦蓄量/(t·hm ⁻²)	最大拦蓄率/%	有效拦蓄量/(t·hm ⁻²)	有效拦蓄率/%
未分解层	I	26.28	3.97	198.19	3.30	164.52
	II	18.03	3.69	131.83	3.06	109.35
	III	30.76	4.67	180.14	3.85	148.50
	IV	21.48	4.61	177.72	3.84	147.84
	V	32.77	2.93	145.78	2.39	119.00
	VI	12.73	3.70	163.12	3.11	136.74
半分解层	I	35.96	4.95	215.85	4.08	178.08
	II	29.20	4.39	149.17	3.60	122.42
	III	37.49	6.84	216.72	5.64	178.59
	IV	24.04	5.81	193.39	4.83	160.77
	V	37.71	4.08	158.56	3.32	129.12
	VI	17.44	5.52	204.50	4.62	171.21

2.2.3 不同密度杉木林枯落物持水过程 枯落物的持水量与浸泡时间具有一定的关系,其吸水速度则与枯落物的量和干燥程度等有关。6 种不同密度杉木人工林枯落物的未分解层和半分解层在浸水时间下的持水量分布规律见图 2,在最初浸泡的 2 h 内,枯落物的持水量迅速增加,曲线呈上升趋势,表明枯落物正处在快速吸水的状态。随着浸水时间的延长,持水量逐渐稳定接近饱和状态,曲线趋于平缓。枯落物的半分解层在浸水 6 h 左右基本饱和,随着浸泡时间的增加,持水量不再出现明显的变化;而未分解层在浸水 6 h 后仍继续增加,在 10~12 h 左右基本达到最大值,这说明不同密度杉木人工林枯落物未

分解层的持水能力均高于半分解层。对浸水 5 min~24 h 的 6 种密度杉木林枯落物的持水量与浸泡时间进行回归分析,得出回归系数 R²均大于 0.96(表 4),这说明持水量与浸水时间具有很强的相关性,呈现出比较显著的对数函数关系,关系式为:Q=a ln t+b。式中:Q 为枯落物持水量(t/hm²);t 为浸水时间(h);a,b 分别为方程系数。不同林分密度的拟合方程见表 4。

2.2.4 不同密度杉木林枯落物持水速率 枯落物的吸水速率与浸泡时间存在着明显的相关性。由图 3 可知,不同密度林分枯落物的未分解层与半分解层的持水速率随浸泡时间的增加具有相同的变化趋势,

呈现出负相关关系。浸水开始时,吸水速率最大,随着时间的增加,吸水速率逐渐减小,特别是浸水0~2 h,枯落物吸水速率急剧降低,浸水2 h后缓慢下降,浸水12 h后基本饱和,吸水速率趋于0,处在动态平衡状态。由图3还可以看出,未分解层吸水速率大于半分解层,这与枯落物自身分解状态有关,未

分解层中枯落物凋落晚,不利于快速吸收水分。对不同密度杉木林枯落物未分解层、半分解层的吸水速率与浸泡时间进行拟合,回归系数 R^2 均在0.92以上,回归方程为: $V=kt^n$ 。式中: V 为枯落物吸水速率($t/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$); t 为浸泡时间(h); k 为方程系数; n 为指数。不同林分密度的拟合方程见表5。

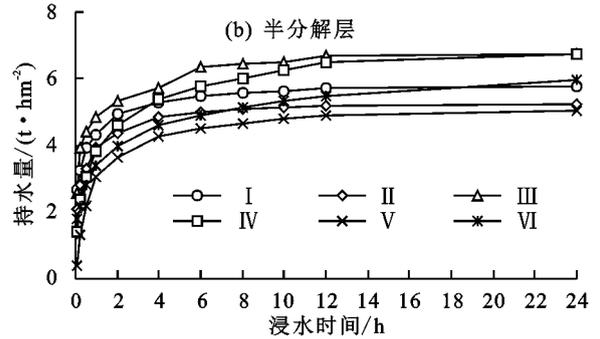
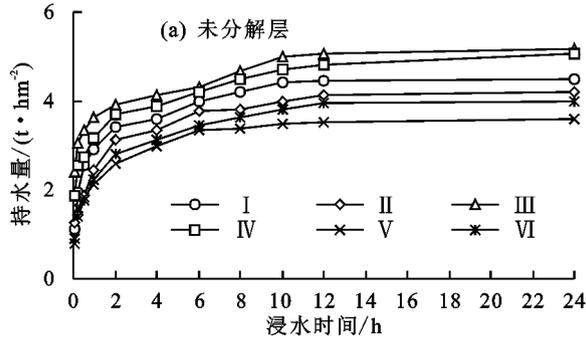


图2 不同密度杉木林枯落物的持水量与浸泡时间的关系

表4 不同密度杉木林枯落物持水量(Q)与浸泡时间(t)的拟合方程

样地编号	未分解层		半分解层	
	拟合方程	R^2	拟合方程	R^2
I	$Q=0.6213\ln t+2.8456$	0.9835	$Q=0.5941\ln t+4.2723$	0.9700
II	$Q=0.6012\ln t+2.5300$	0.9727	$Q=0.5997\ln t+3.7674$	0.9691
III	$Q=0.4974\ln t+3.6396$	0.9768	$Q=0.7411\ln t+4.7865$	0.9779
IV	$Q=0.5768\ln t+3.2526$	0.9897	$Q=1.0062\ln t+3.8692$	0.9936
V	$Q=0.5244\ln t+2.2150$	0.9821	$Q=0.8727\ln t+2.7761$	0.9765
VI	$Q=0.6030\ln t+2.3168$	0.9879	$Q=0.7828\ln t+3.4896$	0.9923

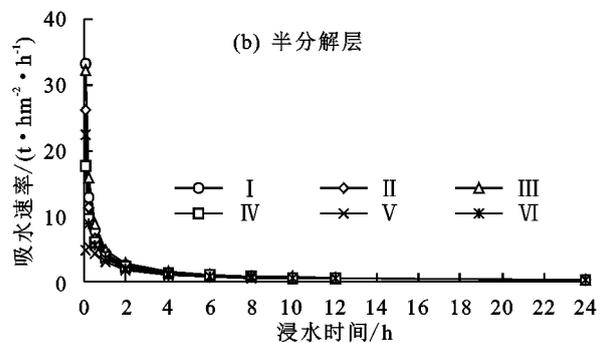
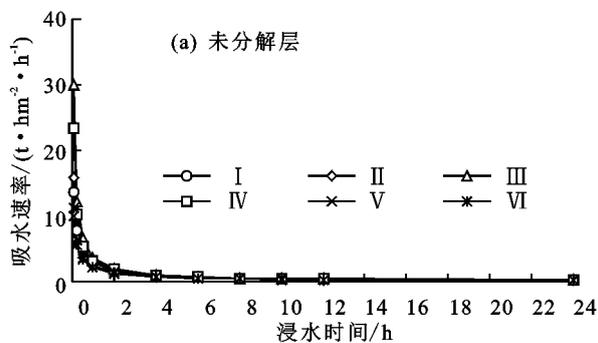


图3 不同密度杉木林枯落物持水速率与浸泡时间的关系

表5 不同密度杉木林枯落物持水速率(V)与浸泡时间(t)的拟合方程

样地编号	未分解层		半分解层	
	拟合方程	R^2	拟合方程	R^2
I	$V=2.5778t^{-0.768}$	0.9919	$V=4.1190t^{-0.859}$	0.9984
II	$V=2.3034t^{-0.763}$	0.9962	$V=3.5848t^{-0.836}$	0.9974
III	$V=3.5371t^{-0.867}$	0.9995	$V=4.5669t^{-0.841}$	0.9973
IV	$V=3.0981t^{-0.826}$	0.9993	$V=3.4137t^{-0.729}$	0.9936
V	$V=1.9782t^{-0.748}$	0.9909	$V=2.0767t^{-0.600}$	0.9227
VI	$V=2.0555t^{-0.733}$	0.9952	$V=3.2258t^{-0.779}$	0.9988

2.3 不同密度杉木林土壤物理性状及水文效应

2.3.1 不同密度杉木林土壤容重 容重是衡量土壤物理结构、紧实程度与通透性的重要指标。一般认为,土壤容重小,则土壤疏松利于拦蓄降水,减缓径流冲刷;容重大则相反。从表6可以看出,在0~100 cm土

层内,不同密度杉木林土壤容重均值介于1.19~1.28 g/cm^3 ,大小排序为1 440 plants/ $\text{hm}^2 > 975$ plants/ $\text{hm}^2 > 2$ 325 plants/ $\text{hm}^2 > 2$ 025 plants/ $\text{hm}^2 > 2$ 700 plants/ $\text{hm}^2 > 1$ 755 plants/ hm^2 。由此可以看出,密度为1 755 plants/ hm^2 的杉木林内土壤相对较为疏松,更有利于拦蓄降水。从垂直变化来看,6种密度杉木林容重有相同的变化趋势,即随土层厚度的加深,容重值呈逐渐增加的趋势。造成这种变化的原因主要是土壤表层覆盖着大量的枯枝落叶,分解后形成有机质,随土层深度的增加,有机质含量逐渐减少,土壤团聚性降低,从而增加了土壤的紧实度。

2.3.2 不同密度杉木林土壤孔隙度 土壤孔隙包括毛管孔隙和非毛管孔隙。从表6可以看出,土壤总孔

隙度在垂直方向上的变化与土壤容重相反,即随土层厚度的加深,总孔隙度呈逐渐降低的趋势。不同密度杉木林总孔隙度均值介于 51.78%~55.02%,大小排序为 1 755 plants/hm² > 2 700 plants/hm² > 2 025 plants/hm² > 2 325 plants/hm² > 975 plants/hm² > 1 440 plants/hm²。毛管孔隙度均值介于 36.90%~42.96%,大小排序为:2 025 plants/hm² > 1 755 plants/hm² > 2 700 plants/hm² > 2 325 plants/hm² > 975 plants/hm² > 1 440 plants/hm²。非毛管孔隙度均值介于 11.51%~15.10%,大小排序为 1 755 plants/hm² > 975 plants/hm² > 1 440 plants/hm² > 2 700 plants/hm² > 2 325 plants/hm² > 2 025 plants/hm²。从表 6 中还可以看出,不同密度杉木林土壤的总孔隙度,均以表土层的最大,在 54%以上,最大值达到了 63%,说明了孔隙度影响着土壤的通气透水性。

2.3.3 不同密度杉木林土壤持水能力 土壤持水能

力的大小取决于土壤的田间持水量和有效持水量,二者之和即为土壤的最大持水量。从表 6 中可以看出,密度为 1 755 plants/hm² 林分的土壤最大持水量均值最大,为 1 100 t/hm²;1 440 plants/hm² 的最小,为 1 035 t/hm²。不同密度杉木林的田间持水量均值介于 738.00~859.13 t/hm²,大小排序为 2 025 plants/hm² > 1 755 plants/hm² > 2 700 plants/hm² > 2 325 plants/hm² > 975 plants/hm² > 1 440 plants/hm²。不同密度杉木林的有效持水量均值介于 230.10~301.98 t/hm²,大小排序为 1 755 plants/hm² > 975 plants/hm² > 1 440 plants/hm² > 2 700 plants/hm² > 2 325 plants/hm² > 2 025 plants/hm²,可以看出,密度为 1 755 plants/hm² 的林分土壤最大持水量和有效持水量均最大。综合来看,不同密度杉木林的 0—100 cm 土层,1 755 plants/hm² 杉木林的土壤持水性能最好。

表 6 不同密度杉木林土壤物理性状

样地 编号	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/%	最大持水量/ (t·hm ⁻²)	田间持水量/ (t·hm ⁻²)	有效持水量/ (t·hm ⁻²)
I	0—20	0.99	62.56	39.35	23.21	1251.27	787.07	464.20
	20—40	1.15	56.51	51.07	5.43	1130.11	1021.47	108.65
	40—60	1.33	49.72	35.78	13.94	994.44	715.67	278.77
	60—80	1.37	48.21	35.94	12.27	964.15	718.73	245.42
	80—100	1.49	43.73	23.28	20.45	874.57	465.60	408.97
	均值	1.27	52.15	37.09	15.06	1042.91	741.71	301.20
II	0—20	1.21	54.35	32.90	21.45	1086.92	658.00	428.92
	20—40	1.21	54.27	35.54	18.73	1085.43	710.87	374.57
	40—60	1.25	52.75	47.45	5.30	1054.94	948.93	106.01
	60—80	1.32	50.29	33.86	16.44	1005.89	677.13	328.75
	80—100	1.40	47.22	34.75	12.47	944.45	695.07	249.39
	均值	1.28	51.78	36.90	14.88	1035.53	738.00	297.53
III	0—20	0.98	63.00	37.61	25.39	1260.08	752.29	507.79
	20—40	1.12	57.71	50.19	7.51	1154.13	1003.89	150.24
	40—60	1.20	54.55	47.22	7.33	1091.03	944.44	146.58
	60—80	1.32	50.17	30.14	20.03	1003.47	602.78	400.69
	80—100	1.33	49.68	34.45	15.23	993.52	688.94	304.58
	均值	1.19	55.02	39.92	15.10	1100.45	798.47	301.98
IV	0—20	1.04	60.58	41.87	18.71	1211.55	837.33	374.21
	20—40	1.14	57.13	49.79	7.34	1142.59	995.80	146.79
	40—60	1.27	52.25	48.82	3.44	1045.06	976.33	68.72
	60—80	1.27	52.12	35.66	16.46	1042.42	713.13	329.28
	80—100	1.32	50.23	38.65	11.58	1004.58	773.07	231.51
	均值	1.21	54.46	42.96	11.51	1089.24	859.13	230.10
V	0—20	1.16	56.11	41.37	14.74	1122.23	827.40	294.83
	20—40	1.18	55.30	44.91	10.39	1105.96	898.20	207.76
	40—60	1.19	55.09	40.37	14.73	1101.89	807.30	294.59
	60—80	1.26	52.53	31.40	21.13	1050.57	627.90	422.67
	80—100	1.41	46.75	37.25	9.50	934.98	744.90	190.08
	均值	1.24	53.16	39.06	14.10	1063.12	781.14	281.98
VI	0—20	1.00	62.15	27.59	34.56	1242.98	551.70	691.28
	20—40	1.14	57.17	45.21	11.96	1143.32	904.10	239.22
	40—60	1.24	53.10	34.49	18.61	1061.96	689.80	372.16
	60—80	1.3	50.76	45.95	4.81	1015.25	919.00	96.25
	80—100	1.33	49.70	45.78	3.92	993.96	915.60	78.36
	均值	1.20	54.57	39.80	14.77	1091.49	796.04	295.45

2.4 不同密度杉木林林地持水特性

从图 4 可以看出,6 种林分密度杉木林土壤层的贡献率均在 96% 以上,可见土壤层的持水量远高于枯落物层,进一步表明土壤层是森林涵养水源的主体。土壤层贡献率最大的林地是 V (2 325 plants/hm²),为 98.01%;最小的林地是 IV (2 025 plants/hm²),为 96.37%,这是由于林地 IV 枯落物层的持水能力较强,则枯落物层贡献率大,从而导致土壤层贡献率较低。林地的水源涵养能力表现为枯落物层与土壤层的有效持水量之和。由图 4 可知,6 种林分密度杉木林的有效持水量介于 238.77~311.47 t/hm²,其中以密度为 1 755 plants/hm² 最大,为 311.47 t/hm²,有效持水量从大到小依次为 1 755,975,1 440,2 700,2 325,2 025 plants/hm²。表明在 6 种林分密度中,1 755 plants/hm² 水源涵养能力最强。

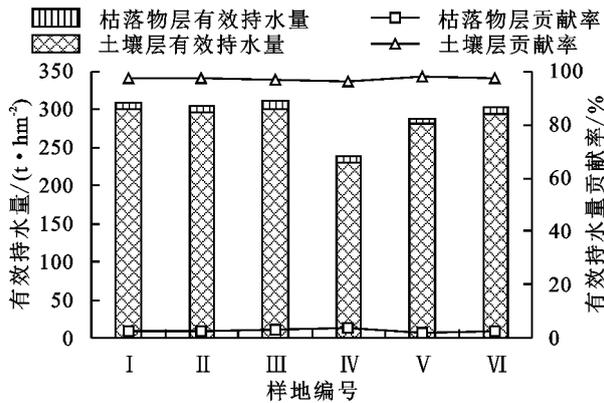


图 4 不同林分密度林地有效持水量及有效持水量贡献率

3 讨论

3.1 不同林分密度枯落物层的水文效应

森林的枯落物层在水土保持、水源涵养等方面发挥着巨大的作用。枯落物层的水源涵养功能主要表现在其蓄积量和持水量 2 个方面。枯落物蓄积量是衡量森林生态系统生产力的关键指标,它反映着枯落物凋落与分解之间的动态平衡^[15]。有研究^[16]认为,随着林分密度的增加,枯落物蓄积量也呈现增长的趋势。而本研究发现,枯落物的蓄积量随林分密度的增加呈现出波动性的变化,即林分密度在 1 755 plants/hm² 时,枯落物蓄积量达到最大,无论密度继续增加还是减小,枯落物均表现出下降的趋势。这与赵磊等^[10]发现枯落物储量的密度响应规律类似,究其原因,密度的增加影响了林地的生物量和林分郁闭度,林冠之间相互重叠变多,阻碍了阳光照射到林地上,使林内的温度低于林外,导致枯落物分解速率降低,则有利于枯落物的积累;但当林分密度超过某个限度,则会加剧林木之间的竞争,导致林木生长发育受到限制,枯落物蓄积量反而随之减少。本研究发现,研究区 6 种不同密度杉木人工林枯落物的蓄积量为 4.3~6.4

t/hm²,当密度为 1 755 plants/hm² 时蓄积量最大,975 plants/hm² 时最小。与相关研究进行比较发现,东江中上游^[17]、东莞大岭山林场^[18] 杉木林枯落物的蓄积量分别为 12.01,10.74 t/hm²,明显高于本研究枯落物蓄积量。这与采样时间有关,本研究是在 7 月开展,桂北地区属中亚热带季风气候,夏季高温多雨,土壤动物和微生物生长活跃,加速了杉木林枯落物的分解,而且已分解的一些细颗粒会被降雨时产生的径流冲刷走,从而导致研究区枯落物蓄积量偏低。

枯落物的持水能力通常用最大持水量和最大持水率来评价,其数值的大小取决于枯落物的组成、累积状况和分解程度等因素。本研究中,枯落物最大持水率介于 203.63%~263.46%,表明最大可吸持约为自身干重 2.04~2.63 倍的水分,各密度林分枯落物半分解层的最大持水量以及最大持水率均高于未分解层,说明半分解层具有更好的持水能力,这与已有的研究^[10-11] 结果一致,这是由于半分解层已少量分解形成腐殖质,且分解后枯落物的表面积也随之增大,吸持的水分则更多。最大持水量可用来反映枯落物自身的持水能力,但由于降雨时长性、土壤层透水性以及坡度的存在,很少会存在枯落物在雨水中浸泡 24 h 的现象,因此,常用有效拦蓄量来估算枯落物对降雨的实际拦蓄能力^[19]。本研究发现,6 种不同密度杉木人工林枯落物的有效拦蓄量,依然表现为半分解层大于未分解层。除了密度为 975 plants/hm² 的林分外,其他林分的有效拦蓄量随着密度的增加呈先增加后下降再增加的趋势,1 755 plants/hm² 枯落物的有效拦蓄量和有效拦蓄率最强,分别为 9.49 t/hm² 和 327.09%,远高于其他林分,这主要是由于 1 755 plants/hm² 枯落物的蓄积量在 6 种林分密度中最大,相应地在单位面积上,其枯落物的持水能力也就最大。同时林分密度的差异导致了林地水热条件的差别,正是这些差异使得密度为 1 755 plants/hm² 枯落物的拦蓄能力和持水能力最大。

3.2 不同林分密度土壤层的水文效应

土壤是森林生态系统涵养水源的主体部分,其持水量约占林分水源涵养量的 85% 以上,是评价森林水源涵养功能的重要指标^[3-5]。土壤容重和孔隙度与渗透速率密切相关,是反映土壤紧实度的敏感指标,同时也反映着土壤的通气透水性 and 根系延展时阻力的大小^[20]。一般土壤密度值多为 1.0~1.5 g/cm³,结构良好的土壤密度为 1.25~1.35 g/cm³。容重越小,土壤就越疏松,越有利于拦蓄降水;容重越大则反之。本研究发现,6 种不同密度杉木林土壤容重介于 1.19~1.28 g/cm³,以 1 755 plants/hm² 最小,表明密度为 1 755 plants/hm² 时更加有利于拦蓄降水。6 种密度杉木林土壤容重均随土壤层次的增大而增大,这

与相关研究^[5,12]结果一致。

土壤孔隙是贮存水分的地方,也是土壤微生物等迁移的通道,其大小取决于土壤质地和结构等条件。本研究中,土壤总孔隙度的变化规律与土壤容重相反,6种密度杉木林土壤总孔隙度随土层的加深呈逐渐降低的趋势,这与众多学者^[5,12]研究结果一致。在本研究中,杉木林土壤表层(0—20 cm)的总孔隙度和非毛管孔隙度都较高,这是由于森林土壤表层枯落物的长期积累,腐烂后形成较厚的腐质殖层,从而使土壤质地相对疏松。同时,树木根系集中分布在10—30 cm,根系的生长发育改善了土壤结构,这是土壤表层孔隙度高的另一因素。土壤持水量随孔隙度增高而增大,土壤的水源涵养性能也随之变强。土壤有效持水量是反映土壤涵养水源能力的重要指标,研究区6种不同密度杉木人工林土壤的最大持水量和有效持水量均以1 755 plants/hm²最大,且其最大持水量远大于有效持水量。通过分析土壤容重、土壤孔隙度、土壤持水量3个方面的试验数据,可以看出,当林分密度为1 755 plants/hm²时,土壤容重最小,土壤总孔隙度和非毛管孔隙度最大,对应的土壤最大持水量和有效持水量也最大。

林分密度通过影响土壤的结构,从而影响林分的水源涵养能力。侯贵荣等^[21]对5种不同密度(475, 900, 1 575, 1 850, 2 525 plants/hm²)刺槐林枯落物层水源涵养能力进行研究发现,当林分密度为1 575 plants/hm²时,刺槐林能最大限度地发挥其水源涵养功能,密度过高或过低,其蓄水能力均会急剧减弱。胡小燕等^[22]就杉木林密度对土壤养分效应进行研究发现,在5种林分密度(1 667, 3 333, 5 000, 6 667, 10 000 plants/hm²)中,低密度(1 667 plants/hm²)更有利于杉木林土壤肥力的长期维持,随着土壤肥力的提升,土壤涵养水源的能力也相应增强。相关研究^[23]也表明,当杉木林保存密度在1 000~1 600株/hm²时,林地土壤层的肥力和水源涵养能力最佳。这些结论都佐证了本研究的发现,即杉木林的持水性能并不是随着林分密度的增大而增大,合理的林分密度反而能产生更佳的水文效应,从而更好地发挥森林的水源涵养能力和生态效益。

4 结论

(1)研究区6种不同密度杉木林枯落物的厚度在3.9~5.7 cm,蓄积量变化范围为4.3~6.4 t/hm²,枯落物厚度与蓄积量变化一致,从大到小依次为1 755, 1 440, 2 025, 2 700, 2 325, 975 plants/hm²。

(2)6种不同密度杉木林枯落物的最大持水量变化范围为9.24~14.23 t/hm²,大小排序依次为1 755 plants/hm²>1 440 plants/hm²>975 plants/hm²>2 025 plants/hm²>2 700 plants/hm²>2 325

plants/hm²;最大拦蓄量和有效拦蓄量均以1 755 plants/hm²最大,分别为11.51 t/hm²,9.49 t/hm²。

(3)在0—100 cm土层内,不同密度杉木林土壤容重介于1.19~1.28 g/cm³,以密度为1 755 plants/hm²时最小,表明该密度林分内的土壤相对较为疏松,更有利于拦蓄降水。6种不同密度杉木林土壤的最大持水量和有效持水量均以1 755 plants/hm²最大,且最大持水量远大于有效持水量;

(4)不同密度杉木林枯落物持水量与浸水时间存在明显的对数函数关系(拟合方程为: $Q=a \ln t+b$);吸水速率与浸水时间存在明显的幂函数关系(拟合方程为: $V=kt^n$),均具有很好的相关性($R^2>0.92$),同一密度、同一浸水时段,半分解层持水量与吸水速率均高于未分解层。

(5)综合分析6种不同密度杉木林枯落物层和土壤层水文效应,当杉木林密度为1 755 plants/hm²时,林地具有较好的水源涵养能力,建议桂北地区在今后的杉木林抚育过程中,合理控制林分密度,以便更好地发挥人工林经济效益和水文生态功能。

参考文献:

- [1] Edwards D P, Tobias J A, Sheil D, et al. Maintaining ecosystem function and services in logged tropical forests [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2014, 29(9): 511-520.
- [2] Zong Y, Xiao Q, Lu S. Acidity, water retention, and mechanical physical quality of a strongly acidic Ultisol amended with biochars derived from different feedstocks [J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2016, 16(1): 177-190.
- [3] 陈波,杨新兵,赵心苗,等.冀北山地6种天然纯林枯落物及土壤水文效应[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 196-202.
- [4] 魏强,凌雷,张广忠,等.甘肃兴隆山主要森林类型凋落物累积量及持水特性[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(10): 2589-2598.
- [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): 127-133.
- [6] Song X, Yan C, Xie J, et al. Assessment of changes in the area of the water conservation forest in the Qilian Mountains of China's Gansu province, and the effects on water conservation [J]. *Environmental earth Sciences*, 2012, 66(8): 2441-2448.
- [7] 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.
- [8] 赵亮生,闫文德,项文化,等.不同年龄阶段杉木人工林枯落物层水文特征[J]. *西北林学院学报*, 2013, 28(4): 1-5, 121.
- [9] 丁霞,程昌锦,漆良华,等.丹江口库区湖北水源区不同密度马尾松人工林水源涵养能力[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(8): 2291-2301.

- crusts: Impacts on potential wind erodibility of sandy desert soils in southeastern Utah[J]. *Land Degradation and Development*, 2015, 8(4): 355-362.
- [3] 石薇,王新平,张亚峰.腾格里沙漠人工固沙植被区浅层土壤水分对降水和生物结皮的响应[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(3): 600-609.
- [4] Yang Y, Bu C, Mu X, et al. Effects of differing coverage of moss-dominated soil crusts on hydrological processes and implications for disturbance in the Mu Us Sandland, China[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(14): 3112-3123.
- [5] 周丽芳,阿拉木萨.微生物结皮层对地表蒸发过程影响的机理研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 208-213.
- [6] 郑云普,赵建成,张丙昌,等.荒漠生物结皮中藻类和苔藓植物研究进展[J]. *植物学报*, 2009, 44(3): 371-378.
- [7] Xiao B, Zhao Y G, Shao M A. Characteristics and numeric simulation of soil evaporation in biological soil crusts[J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(1): 121-130.
- [8] 周丽芳,阿拉木萨.生物结皮发育对地表蒸发过程影响机理研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(4): 193-200.
- [9] 吴丽,陈晓国,张高科,等.人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(3): 1138-1143.
- [10] 宋日权,褚贵新,冶军,等.掺砂对土壤水分入渗和蒸发影响的室内试验[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 109-114.
- [11] Kidron G J, Tal S Y. The effect of biocrusts on evaporation from sand dunes in the Negev Desert[J]. *Geoderma*, 2012, 179(2): 104-112.
- [12] 吴楠,魏美丽,张元明.生物土壤结皮中刺叶赤藓质膜透性对脱水、复水过程的响应[J]. *自然科学进展*, 2009, 19(9): 942-951.
- [13] Guan X, Huang J, Guo N, et al. Variability of soil moisture and its relationship with surface albedo and soil thermal parameters over the Loess Plateau[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26(4): 692-700.
- [14] Belnap J, Lange O L. *Biological soil crusts: Structure, Function and Management*[M]. Heidelberg: Springer, 2003, 371.
- [15] Xiao B, Wang H, Fan J, et al. Biological soil crusts decrease soil temperature in summer and increase soil temperature in winter in semiarid environment[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 58: 52-56.
- [16] 刘战东,秦安振,宁东峰,等.降雨级别对农田蒸发和土壤水再分布的影响模拟[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(8): 1-8.
- [17] Emilio C E, Canton Y, Chamizo S, et al. Effects of biological soil crusts on surface roughness and implications for runoff and erosion[J]. *Geomorphology*, 2012, 145: 81-89.
- [18] 龙桃,熊黑钢,张建兵,等.不同降雨强度下的草地土壤蒸发试验[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(6): 240-245.
- [19] Yair A, Almog R, Veste M. Differential hydrological response of biological topsoil crusts along a rainfall gradient in a sandy arid area; Northern Negev desert, Israel[J]. *Catena*, 2011, 87: 326-333.
- [20] Xiao B, Hu K L. Moss-dominated biocrusts decrease soil moisture and result in the degradation of artificially planted shrubs under semiarid climate[J]. *Geoderma*, 2017, 291: 47-54.
- (上接第 207 页)
- [10] 赵磊,王兵,蔡体久,等.江西大岗山不同密度杉木林枯落物持水与土壤贮水能力研究[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 203-208, 246.
- [11] 王玲,赵广亮,周红娟,等.八达岭林场不同密度油松人工林枯落物水文效应[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(9): 1767-1775.
- [12] 鲁绍伟,陈波,潘清华,等.北京山地不同密度侧柏人工林枯落物及土壤水文效应[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 224-229.
- [13] 杨霞,陈丽华,康影丽,等.辽东低山区 5 种典型水源涵养林枯落物持水特性[J]. *生态学报*, 2019, 38(9): 2662-2670.
- [14] 李强,周道玮,陈笑莹.地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用[J]. *生态学报*, 2014, 34(14): 3807-3819.
- [15] 刘凯,贺康宁,王先棒.青海高寒区不同密度白桦林枯落物水文效应[J]. *北京林业大学学报*, 2018, 40(1): 89-97.
- [16] 贺宇,丁国栋,梁文俊,等.林分密度对枯落物层持水特性的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(4): 68-72.
- [17] 张卫强,李召青,周平,等.东江中上游主要森林类型枯落物的持水特性[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(5): 130-134.
- [18] 周永文,黄文辉,陈红跃,等.不同人工林分枯落物和土壤持水能力研究[J]. *生态环境*, 2003, 12(4): 449-451.
- [19] 王忠禹,刘国彬,王兵,等.黄土丘陵区典型植物枯落物凋落动态及其持水性[J]. *生态学报*, 2019, 39(7): 2416-2425.
- [20] 杨建伟,杨建英,何会宾,等.冀北山区滦平县 4 种新造林地水源涵养能力研究[J]. *生态学报*, 2019, 39(18): 6731-6737.
- [21] 侯贵荣,毕华兴,魏曦,等.黄土残塬沟壑区刺槐林枯落物水源涵养功能综合评价[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 251-257.
- [22] 胡小燕,段爱国,张建国,等.南亚热带杉木人工成熟林密度对土壤养分效应研究[J]. *林业科学研究*, 2018, 31(3): 15-23.
- [23] 陈琦,刘苑秋,刘士余,等.杉木取代阔叶林后林下水源涵养功能差异评价[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 244-250.