赣南丘陵区典型林分水源涵养功能评价

艾 彪[1,2], 黄 云[1,2], 朱元皓[1,2], 谢泽阳[1,2], 黄琼瑶[1,2], 郑博福[1,2], 朱锦奇[1,2]

(1. 南昌大学 资源环境与化工学院, 鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 江西 南昌 330031; 2. 江西生态文明研究院, 江西 南昌 330031)

摘　要:[目的] 明确不同林分类型整体水源涵养能力的差异性,为赣南丘陵区水源涵养功能和生态系统服务的恢复提供理论依据。[方法] 以赣南丘陵区江西省赣州市崇义县境内两种主要天然林(楠木和毛竹),以及两种典型人工经济果林地(脐橙和茶)为研究对象,利用水浸法和双环法对林分的枯落物层与土壤层的持水性进行测定,同时利用熵权法对枯落物层和土壤层的相关指标进行综合评价。[结果] ①4 种林分枯落物层蓄积量、最大持水量和有效拦蓄量范围分别为 9.19～16.70,13.43～31.02,6.99～14.08 t/hm^2;土壤非毛管孔隙度、有效持水量和最大持水量均值范围分别为 5.80～10.05%,57.98～100.50,447.76～580.17 t/hm^2,均为楠木林最大,茶林最小。②4 种林地土壤初渗速率与稳渗速率变化趋势相一致,排列顺序为:毛竹林>楠木林>茶林>脐橙林。③在 4 种林分水源涵养能力综合评分中,两种天然林要高于两种经济果林。④土壤稳渗速率是影响林分整体水源涵养能力最显著的指标,其次为枯落物最大持水量和有效拦蓄量,而土壤容重的影响最低。[结论] 赣南丘陵区两种天然林水源涵养能力高于两种经济果林,而该区域人工经济果林水源涵养能力的大幅度降低将进一步导致土地退化,加速水土流失,是区域可持续发展的重要生态风险隐患之一。

关键词:森林土壤;枯落物;涵养水源;经济果林;天然林

文献标识码:A　　**文章编号**:1000-288X(2021)01-0197-09　　**中图分类号**:S714.7, S715

文献参数:艾彪,黄云,朱元皓,等.赣南丘陵区典型林分水源涵养功能评价[J].水土保持通报,2021,41(1):197-205. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.01.028; Ai Biao, Huang Yun, Zhu Yuanhao, et al. Evaluation of water conservation capacity of litter and soil layer in typical forest stands in hilly region of Southern Jiangxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(1):197-205.

Evaluation of Water Conservation Capacity of Litter and Soil Layer in Typical Forest Stands in Hilly Region of Southern Jiangxi Province

Ai Biao[1,2], Huang Yun[1,2], Zhu Yuanhao[1,2], Xie Zeyang[1,2], Huang Qiongyao[1,2], Zheng Bofu[1,2], Zhu Jinqi[1,2]

(1. *School of Resource Environment and Chemical Engineering*, *Nanchang University*, *Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization*, *Ministry of Education*, *Nanchang*, *Jiangxi* 330031, *China*; 2. *Jiangxi Ecological Civilization Research Institute*, *Nanchang*, *Jiangxi* 330031, *China*)

Abstract: [Objective] The variation in water conservation capacity in different stands was studied to provide a theoretical basis for the restoration of the water conservation function and ecosystem services in Southern Jiangxi Province. [Methods] All experiments were conducted in Chongyi County, Ganzhou City, Jiangxi Province. Two main natural forests, *Phoebe zhennan* and *Phyllostachys heterocycla*, and two typical artificial economic fruit forests, *Citrus sinensis* and *Camellia sinensis*, were selected. The water holding capacity of the litter layer and soil layer was measured by the water immersion and double ring methods. Related indices of the litter layer and soil layer were evaluated by the entropy weight method. [Results] ① The litter volume, maximum water holding capacity, and effective interception capacity of the four kinds of stand were 9.19—16.70, 13.43—31.02, and 6.99—14.08 t/ha, respectively. The average ranges of soil noncapillary porosity, effective water holding capacity, and maximum water holding capacity were 5.49%—10.05%, 57.98—100.50 t/ha, and 447.76—580.17 t/ha, respectively. All traits in the *P. zhennan* forest

收稿日期:2020-06-17　　**修回日期**:2020-09-30

资助项目:科技重点研发计划课题"南方丘陵山地屏障带生态系统服务格局及演变机制"(2017YFC05056)

第一作者:艾彪(1995—),男(汉族),湖北省孝感市人,硕士研究生,主要从事水土保持研究。Email:1538445439@qq.com。

通讯作者:朱锦奇(1991—),男(汉族),江西省九江市人,博士,主要从事恢复生态学研究。Email:zhujq@ncu.edu.cn。

were found to be greater than in the other stands, and the lowest were in the *C. sinensis* forest. ② Four stands had similar changed tendencies of soil initial infiltration rate and stable infiltration rate. The order was *P. heterocycla* forest > *P. zhennan* forest > *C. sinensis* forest > *C. sinensis* forest. ③ The comprehensive scores of the water conservation capacity of the natural forests (*P. zhennan* forest and *P. heterocycla* forest) were higher than those of the economic forests. ④ The water conservation capacity of the stand was mostly affected by soil steady infiltration rate, followed by maximum water holding capacity and effective retention capacity of the litter, while the soil bulk density was the lowest. [Conclusion] The water conservation capacity of natural forests is higher than that of economic fruit forests in the hilly area of South Jiangxi Province. The land degradation and accelerated soil erosion are driven by the reduction of the water conservation capacity of artificial economic forests in this area, leading to an important ecological risk to the sustainable development of this region.

Keywords: forest soil; litter layer; water conservation; economic fruit forest; natural forest

森林作为地球上最大的陆地生态系统,它不仅具有物种多样性丰富、结构复杂的特点,而且拥有净化环境、水源涵养、固土保肥和调节气候等生态功能[1]。其中水源涵养功能是森林水文生态系统功能的重要组成部分以及生态服务功能价值评估的重要指标[2]。森林的水源涵养功能主要由林冠层、枯落物层和土壤层来完成,其中又以枯落物层和土壤层作为水源涵养能力的主要表现层,森林通过枯落物层和土壤层对降水进行截留、吸收、蓄积作用,实现对降雨的再分配,从而达到调节径流、减少水土流失、净化水质的作用[3-6]。森林水源涵养能力主要受林分类型、枯落物特性、土壤结构因素的影响,其中林分类型是影响水源涵养能力的关键因素[7]。近年来,许多学者对于森林水源涵养功能的研究多集中在不同尺度的天然林。其中,在南方丘陵地区大尺度上,罗佳等[8]以湖南省岳阳市平江县为例,对不同混交林模式下森林水源涵养能力进行了研究,得出林分树种组成,林下灌草层盖度以及枯落物生物量对森林水源涵养能力有较大影响;在土壤类型、物理性质等小尺度方面,潘春翔等[9]对湖南乌云界自然保护区4种典型植被土壤层水源涵养能力进行了研究,得出土壤蓄水容量是评价森林生态系统水源涵养能力的核心指标。但是对于人工经济果林与天然林在水源涵养方面差异性的研究较少。由于人工经济果林其枯落物厚度、本身性质普遍与天然林不同,其地表枯落物覆盖度、分解状况不同,进而导致枯落物对水分的截留、拦蓄能力不同,且人工经济果林受人为干扰活动较大,例如施肥、剪枝、摘果等活动,导致林下土壤结构发生改变,进而引起土壤持水性能和下渗能力变化[10]。因此探究不同天然林和人工经济果林枯落物层和土壤层持水性能对于森林水源涵养能力的研究具有重要意义。

赣南丘陵区作为中国东南部生态安全屏障的重要组成部分,对于维护地区森林水源、减少水土流失和加强森林植被修复方面发挥着重要作用[11]。楠木林和毛竹林作为赣南丘陵地区主要的森林类型,具有重要的水源涵养功能,可以有效的调节、改善当地的水源流量和水质。但是,由于该地区生态环境脆弱,地形复杂,生态多样性易遭到破坏,造成该区域不同地段水源涵养功能差异性的特点[12]。崇义县作为赣南丘陵地区的一个重要地段,由于该区域长期不当的森林管理模式,大量天然林被人工种植的单一经济林种所代替,严重破坏了当地的生态平衡,使得该区域水土流失严重[13]。因此,本文选取江西省赣州市崇义县两种主要天然林:楠木林和毛竹林,以及两种典型人工经济果林:脐橙林和茶林,分析不同天然林和人工经济果林枯落物层和土壤层水源涵养功能,进一步明确不同林分类型水源涵养功能的差异性,为赣南丘陵地区水源涵养功能和生态系统服务的恢复提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于崇义县境内,介于116°15′—116°48′E,25°24′—25°55′N,境内山脉交错纵横,地势呈西南高,东北低,属于南方丘陵山地地貌类型。该区域属中亚热带季风湿润区,四季分明,雨量充沛,年日照时间为1 322 h,年平均气温为19 ℃,极端最低温度为−3.4 ℃,极端最高温度为39.6 ℃,无霜期为291～320 d,年平均降水量为1 800～2 000 mm,年降雨量多集中在4—8月,占年总降雨量的65%。该区域岩性以含粘性土碎石砾为主,主要土壤类型为红壤土,大部分土层较薄,抗蚀能力差,自然肥力较低。研究区栽植的果木经济林主要有脐橙(*Citrus sinensis*)、茶(*Camellia sinensis*)、柑橘(*Citrus reticulata*)等,均为水平梯田种植,且林下植被稀少。自然植被类型以乔木和灌木为主,主要乔木有楠木(*Phoebe zhennan*)、毛竹(*Phyllostachys heterocycla*)、马尾松(*Pinus massoniana*)等,大多为坡面生长,林下草本植被

较为丰富,其中楠木林下草本植被有狗尾草(*Setaria viridis*)、雀稗(*Paspalum thunbergii*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)等,毛竹林下草本植被有粉蕨(*Onychium siliculosum*)、油草(*Leptochloa chinensis*)、雀稗(*Paspalum thunbergii*)等。主要灌木有杜鹃(*Rhododendron simsii*)、吊钟花(*Fuchsia hybrida*)、木芙蓉(*Hibiscus mutabilis*)等。

2　研究方法

2.1　样地设置与调查

于 2019 年 6 月对江西省崇义县境内森林植被进行实地调查,选取两种经济果林(脐橙林和茶林),以及两种天然林(楠木林和毛竹林)作为研究对象。其中脐橙林、楠木林、毛竹林样地位于龙勾乡,茶林样地位于上堡乡。4 种林地母质、海拔、坡度、坡向等立地因子基本保持一致。经济果林整地方式均为水平梯田,其施肥、除草周期为每年 2 次。楠木林和毛竹林均为纯林,样地中无其他乔木和灌木树种。在每种林地各设置 2 个 20 m×20 m 标准样地,并对其每木检尺,记录海拔、坡度、坡向、林龄、郁闭度、林分密度、树高、胸径、冠幅、土壤类型、林下植被和树种组成。各标准地基本概况见表 1。

表 1　赣南丘陵区不同林分类型标准地概况

林分类型	编号	海拔/m	坡度/(°)	坡向	林龄/a	郁闭度/(°)	林分密度/(株·hm^{-2})	平均树高/m	平均胸径/cm	平均冠幅/m	土壤类型	林下植被	树种组成
楠木林	1	224	31	东南	22	82	895	15.45	15.25	6.21	红壤	狗尾草、五节芒、芒萁	楠木
	2	220	28	东南	21	85	1078	16.85	17.33	7.21	红壤		
毛竹林	1	195	26	东南	18	74	804	9.35	6.83	3.12	红壤	粉蕨、油草、雀稗	毛竹
	2	185	24	东南	20	76	936	8.21	6.32	3.51	红壤		
脐橙林	1	243	33	东南	15	88	785	3.16	8.56	2.88	红壤	马唐、肾蕨	脐橙
	2	231	31	东南	13	84	862	2.87	7.88	3.12	红壤		
茶林	1	320	29	东南	20	75	965	0.54	3.12	1.21	红壤		茶
	2	350	27	东南	18	80	1125	0.58	2.85	0.85	红壤		

2.2　枯落物蓄积量与持水能力测定

在上述每个样地中按照坡上、坡中、坡下设置 3 个面积 50 cm×50 cm 枯落物样方,根据枯枝落叶的分解程度,将枯落物层分成未分解层和半分解层,分别对其厚度进行测量,然后将枯落物装入塑料袋中密封,并迅速称重记录。此后带回实验室用烘箱烘干至恒重,并再次称重记录,计算出枯落物层自然含水率。采用水浸法测定 4 种林分枯落物的持水量和持水速率,各林分枯落物取 25 g 放入水中浸泡,分别在 0.5,1,2,4,6,8,10,12,24 h 对枯落物的重量进行测定,从而计算出各林分类型枯落物持水量、持水速率、最大持水量、最大持水速率以及枯落物吸水速率[14-15]。计算公式如下:

$$\begin{aligned} S_{\max} &= (M_s - M_0) \times 100 \\ Q_{\max} &= (M_s - M_0)/A \times 100 \\ V &= (M_s - M_0)/t \times 1\,000\,000 \end{aligned} \tag{1}$$

式中:$S_{\max}$ 为枯落物最大持水率(%);$Q_{\max}$ 为枯落物最大持水量(t/hm^2);V 为枯落物吸水速率[g/(hm^2·h)];M_s 为枯落物浸水 24 h 后质量(g);M_0 为枯落物烘干质量(g);A 为枯落物样方面积(m^2);t 为浸水时间(h)。

2.3　枯落物拦蓄量测定

枯落物对降雨的最大拦蓄量可以通过蓄积量、最大持水率、自然持水率计算出来,但由于最大拦蓄量并不能体现枯落物对降雨的真实拦蓄情况,因此还需计算枯落物的有效拦蓄量[16],计算公式如下:

$$\begin{aligned} W_{\max} &= (S_{\max} - S_0) \times C \\ W &= (0.85 S_{\max} - S_0) \times C \end{aligned} \tag{2}$$

式中:$W_{\max}$,W 为枯落物最大拦蓄量和有效拦蓄量(t/hm^2);S_0 为自然含水率(%);C 为枯落物蓄积量(t/hm^2)。

2.4　土壤层物理性质测定

土壤容重和孔隙度是反映土壤水文物理特征的两个重要指标。土壤孔隙度决定着土壤透气性能的强弱,土壤毛管孔隙中所储存的水分主要用于维持森林植被自身生长发育,而林地水源涵养能力的大小主要取决于非毛管孔隙度[17]。通常认为,土壤容重越小,则土质越为疏松,其对于水分的吸收、降水的截留以及减缓地表径流的能力越为明显[18]。为此,本研究在每种林分标准地上、中、下坡的中心位置选取 3 个具有代表性的采样点挖取土壤剖面,用 100 cm^3 环刀在每个剖面按 0—10,10—20,20—30 cm 土层深度分层取样(每个土层重复取 3 次样),带回实验室用烘干

至恒重，从而计算出土壤容重，用环刀浸泡法测定土壤饱和持水量、毛管孔隙度、总孔隙度[19]。土壤层持水能力计算公式：

$$W_a = 10\ 000 P_a H$$
$$W_b = 10\ 000 P_b H \tag{3}$$

式中：W_a，W_b 分别为土壤有效持水量和土壤最大持水量(t/hm²)；P_a，P_b 分别为土壤非毛管孔隙度和总孔隙度(%)；H 为土层深度(m)。

2.5 土壤入渗测定

土壤层是森林生态系统水源涵养的重要组成部分，其持水能力的强弱对地表径流、壤中流以及地下水补给有着直接的影响[20-21]。本研究采用双环法[22]对土壤下渗速率进行测定，在每个标准地上、中、下坡选取3个样点进行入渗试验。根据各样地实际情况，选用的内环和外环直径分别为20 cm和35 cm，环高均为25 cm，将双环打入土壤5 cm深，保持同一圆心，向内外环同时注水，并使水层保持同一高度，为10 cm，避免侧向渗流，利用量筒均匀供水，且必须随时保持内外环水层高度为10 cm，记录单位时间内内环所消耗的水量。每个样点作3次重复的入渗试验，所得结果取平均值。土壤初渗速率、稳渗速率计算公式如下：

$$V_a = Q_a / t_a$$
$$V_b = Q_b / t_b \tag{4}$$

式中：V_a，V_b 分别为土壤初渗速率和土壤稳渗速率(mm/min)；Q_a，Q_b 分别为最初时间段内入渗量和稳渗时间段内入渗量(mm)；t_a，t_b 分别为初渗时间和稳渗时间(min)。

2.6 水源涵养功能评价

采用熵权法[23]对不同林分类型各个因子进行量化，在一个标准系统下对4种林分类型水源涵养功能进行综合评价。

(1) 依据以下公式计算不同林分各指标的信息熵。第 i 指标的熵值为：

$$H_i = -K \sum_{j}^{m} p_{ij} \quad (i=1,\cdots,n;\ j=1,\cdots,m)$$
$$p_{ij} = R_{ij} / \sum_{i=1}^{m} R_{ij} \tag{5}$$
$$K = 1/\ln m$$

式中：H_i 为熵值，如果 $p_{ij}=0$，则定义 $P_{ij}\ln P_{ij}=0$，R_{ij} 为标准化后指标值；m 为林分类型；n 为评价指标数。

(2) 根据以下公式计算各指标的权重 W_i

$$W_i = \frac{1-H_i}{m-\sum_{i=1}^{n} H_i} \quad (i=1,2,\cdots,n) \tag{6}$$

(3) 各林分水源涵养能力综合评价值 K_j

$$K_j = \sum_{i=1}^{n} 100 \times p_{ij} W_i \tag{7}$$

3 结果与分析

3.1 枯落物厚度及蓄积量

研究区4种林分类型枯落物厚度介于2.6～5.3 cm，最大为楠木林，其次为脐橙林，最小为毛竹林。4种林分类型枯落物蓄积量范围为9.19～16.70 t/hm²，以楠木林最大，茶林最小(表2)。从各林分不同层次来看，4种林分半分解层枯落物蓄积量均大于未分解层枯落物蓄积量，其中楠木林半分解层占比最大(67.60%)，其次依次为茶林(63.76%)＞毛竹林(53.05%)＞脐橙林(52.86%)，由此可见，半分解层枯落物为整个林分枯落物蓄积量的主要来源。

表2 不同林分类型枯落物蓄积量

林分类型	枯落物厚度/cm		总厚度/cm	枯落物蓄积量				蓄积量/(t·hm⁻²)
	半分解层	未分解层		未分解层/(t·hm⁻²)	比例/%	半分解层/(t·hm⁻²)	比例/%	
楠木林	2.2±0.32[a]	3.1±0.16[a]	5.3±0.43[a]	5.41±0.71[a]	32.40	11.29±0.81[a]	67.60	16.70±0.91[a]
毛竹林	1.3±0.11[b]	1.9±0.22[b]	3.2±0.29[b]	5.46±0.66[a]	46.95	6.16±0.85[b]	53.05	11.63±0.85[b]
脐橙林	1.4±0.26[ab]	2.1±0.14[ab]	3.5±0.30[ab]	6.34±0.89[a]	47.14	7.11±1.12[b]	52.86	13.45±2.00[b]
茶林	1.5±0.10[a]	1.1±0.18[c]	2.6±0.24[b]	3.33±0.35[b]	36.24	5.86±0.70[b]	63.76	9.19±0.70[b]

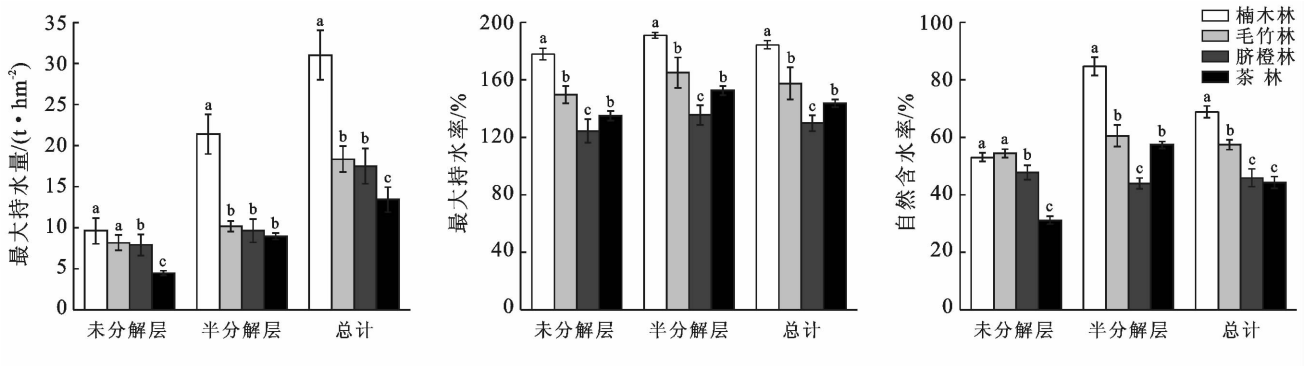
注：不同小写字母表示同一分解层不同林分间存在显著性差异($p<0.05$)，下同。

3.2 枯落物水文效应

3.2.1 枯落物最大持水量 如图1所示，研究区4种林分枯落物最大持水量总和范围为13.43～31.02 t/hm²，其最大持水量大小排序为：楠木林(31.02 t/hm²)＞毛竹林(18.36 t/hm²)＞脐橙林(17.52 t/hm²)＞茶林(13.43 t/hm²)，楠木林的最大持水量与其他3种林分存在明显差异。各林分最大持水率，以楠木林最大(184.50%)，脐橙林最小(129.94%)。各林分自然含水率均值介于44.29%～68.90%，最大为楠木林，最小为茶林。

从各林分不同层次来看，未分解层和半分解层枯落物最大持水量范围分别为4.48～9.62 t/hm²，8.95

～21.40 t/hm²,且均以楠木林最大,茶林最小。此外,可以看出,无论是未分解层还是半分解层枯落物最大持水量,都与林分整体枯落物最大持水量总体趋势保持一致。



注:图中不同小写字母表示同一分解层不同林分间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 1　不同林分枯落物最大持水量、最大持水率和自然含水率

3.2.2　*枯落物持水过程*　枯落物的持水过程存在一定的规律,枯落物持水量随着浸水时间的增加而逐渐增大,在 0—2 h 内是枯落物吸水最快的阶段,随后在 2—12 h 之间枯落物持水量持续增加,但其增加幅度不断减小,最后持水量趋于稳定,吸水过程基本停止,枯落物持水量达到饱和状态。从林分不同层次来看,4 种林分未分解层与半分解层枯落物持水量变化过程有所差异,未分解层持水量大小排序为:楠木林>毛竹林>脐橙林>茶林;半分解层持水量大小排序为:楠木林>毛竹林>茶林>脐橙林(图 2)。

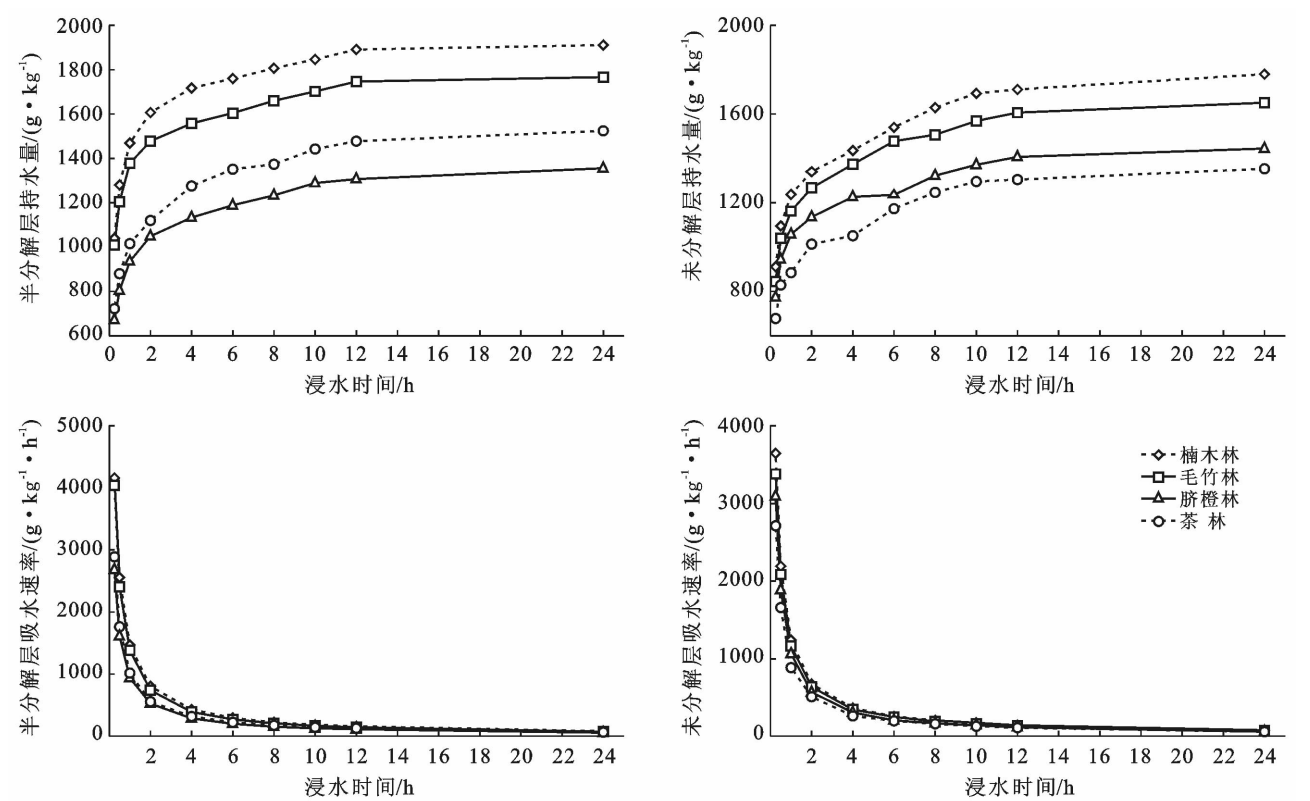


图 2　不同林分枯落物持水量、吸水速率与浸水时间关系

对 0—24 h 之间 4 种林分枯落物各层持水量与浸泡时间的关系进行回归分析,得出该时间段内持水量与浸泡时间之间存在如下关系(表 3):$Q=a\ln t+b$。式中:Q 为枯落物持水量(g/kg);t 为浸泡时间(h);a 为方程系数;b 为方程常数项。

3.2.3　*枯落物吸水速率*　4 种林分枯落物吸水速率与浸水时间之间的变化规律基本保持一致,二者之间呈负相关关系。在枯落物室内浸泡试验开始时,枯落

物的吸水速率处于最快的阶段，之后随着时间的推移，其吸水速率开始呈现下降趋势，尤其是在 0—2 h 之间，吸水速率急剧下降，随后在 2—12 h 内，枯落物吸水速率下降幅度明显减缓，到 24 h 时枯落物持水量呈饱和状态而不再吸水，吸水速率趋近于 0(图 2)。从各林分不同层次来看，4 种林分未分解层和半分解层吸水速率动态变化稍有差异，未分解层吸水速率大小排序为：楠木林＞毛竹林＞脐橙林＞茶林；半分解层吸水速率大小排序为：楠木林＞毛竹林＞茶林＞脐橙林。对 4 种林分枯落物吸水速率与浸水时间进行回归分析，二者之间的拟合模型为：$V=Kt^n$，式中 V 为枯落物吸水速率〔g/(kg·h)〕，K 为方程系数，t 为浸水时间(h)，n 为指数。各林分拟合方程如表 3 所示。

表 3 不同林分枯落物持水量、吸水速率与浸水时间的关系

枯落物层	林分类型	持水量与浸水时间		吸水速率与浸水时间	
		关系式	R^2	关系式	R^2
未分解层	楠木林	$Q=192.66\ \ln t+1\ 209.39$	0.988 9	$V=1\ 186.93\ t^{-0.855}$	0.999 2
	毛竹林	$Q=178.23\ \ln t+1\ 138.93$	0.987 5	$V=1\ 157.42\ t^{-0.875}$	0.999 9
	脐橙林	$Q=143.57\ \ln t+1\ 021.56$	0.979 3	$V=1\ 004.82\ t^{-0.870}$	0.999 0
	茶 林	$Q=152.94\ \ln t+901.88$	0.979 6	$V=884.22\ t^{-0.848}$	0.999 1
半分解层	楠木林	$Q=189.39\ \ln t+1\ 408.59$	0.957 4	$V=1\ 381.56\ t^{-0.873}$	0.998 2
	毛竹林	$Q=164.25\ \ln t+1\ 316.32$	0.967 0	$V=1\ 296.19\ t^{-0.882}$	0.998 8
	脐橙林	$Q=153.13\ \ln t+915.71$	0.989 3	$V=894.82\ t^{-0.847}$	0.998 7
	茶 林	$Q=182.21\ \ln t+1\ 002.76$	0.990 8	$V=977.256\ t^{-0.835}$	0.998 8

3.2.4 *枯落物拦蓄能力* 如图 3 所示，4 种林分未分解层和半分解层最大拦蓄量分别为 3.46～6.67 t/hm²，5.54～12.00 t/hm²，均以楠木林最大，茶林最小；4 种林分未分解层和半分解层有效拦蓄量分别为 2.78～5.32 t/hm²，4.21～8.76 t/hm²，均为楠木林最大，茶林最小。

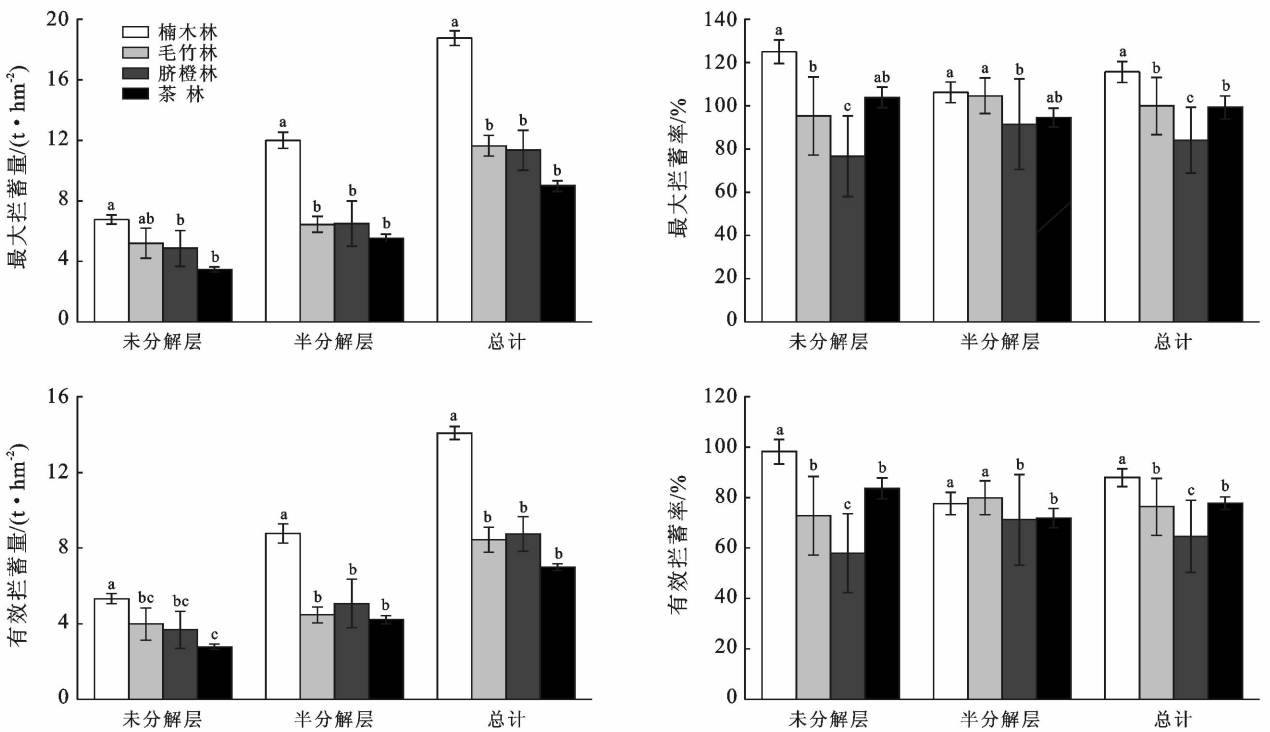


图 3 不同林分枯落物的最大拦蓄量、有效拦蓄量

3.3 土壤层水文效应

3.3.1 *土壤物理性质及持水性研究* 由表 4 可知，4 种林地土壤容重动态变化趋势均是随着土层深度的增加而增大，从土壤容重均值来看，脐橙林地土壤容重最大(1.22 g/cm³)，毛竹林地最小(1.03 g/cm³)；土壤总孔隙度均值范围为 44.78～58.02%，以楠木

林最大,茶林最小;而非毛管孔隙度与土壤有效持水量紧密相关,其大小排序为:楠木林>毛竹林>脐橙林>茶林,4 种林分有效持水量大小排序与非毛管孔隙度相同,表现为楠木林最大(100.50 t/hm^2),茶林最小(57.98 t/hm^2)。4 种林地土壤最大持水量范围为 447.76～580.17 t/hm^2,以楠木林最大,茶林最小。

表 4　不同林分土壤物理性质及持水量

林分类型	土层深度/cm	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	总孔隙度/%	土壤容重/(g·cm^{-3})	最大持水率/%	最大持水量/(t·hm^{-2})	有效持水量/(t·hm^{-2})
楠木林	0—10	47.62±1.05^a	11.29±0.39^a	58.91±0.90^a	1.04±0.01^b	56.52±0.16^a	589.10±8.99^a	112.93±3.90^a
	10—20	47.64±2.48^a	9.78±0.71^a	57.42±2.53^a	1.09±0.02^b	52.82±3.44^a	574.20±25.28^a	97.83±7.09^a
	20—30	48.65±0.25^a	9.07±1.06^a	57.72±1.10^a	1.10±0.02^b	52.45±1.96^a	577.20±11.05^a	90.73±10.60^a
	均值	47.97±0.59	10.05±1.13	58.02±0.79	1.08±0.03	53.93±2.25	580.17±7.88	100.50±11.34
毛竹林	0—10	44.71±1.36^a	8.08±0.75^{ab}	52.79±0.90^{ab}	1.02±0.04^b	51.83±2.25^a	527.90±8.95^a	80.77±7.46^b
	10—20	43.46±0.47^a	7.74±0.58^a	51.20±0.44^{ab}	1.03±0.04^b	49.82±2.27^a	511.97±4.36^a	77.40±5.77^a
	20—30	44.35±0.23^{ab}	7.49±0.40^a	51.84±0.54^{ab}	1.04±0.05^b	49.78±2.58^a	518.40±5.41^a	74.93±3.96^a
	均值	44.17±0.65	7.77±0.29	51.94±0.80	1.03±0.01	50.48±1.17	519.42±8.02	77.70±2.93
脐橙林	0—10	42.38±0.20^{ab}	7.14±0.46^b	49.52±0.48^b	1.20±0.02^a	41.29±0.88^b	495.17±4.82^b	71.40±4.59^{bc}
	10—20	42.17±0.37^{ab}	6.38±0.15^{ab}	48.56±0.24^b	1.22±0.02^a	39.95±0.60^b	485.57±2.44^b	63.83±1.50^b
	20—30	41.31±0.44^b	6.31±0.38^{ab}	47.62±0.60^b	1.24±0.01^a	38.47±0.88^b	476.23±6.00^b	63.13±3.75^b
	均值	41.95±0.57	6.61±0.46	48.57±0.95	1.22±0.02	39.90±1.41	485.66±9.47	66.12±4.58
茶林	0—10	39.07±0.41^b	6.04±0.65^b	45.11±0.81^b	1.14±0.01^a	39.54±1.00^b	451.07±8.10^b	60.4±6.50^c
	10—20	38.75±0.73^b	5.87±0.50^b	44.62±0.84^b	1.15±0.01^a	38.93±1.04^b	446.20±8.43^b	58.87±5.01^b
	20—30	39.11±0.78^b	5.49±0.05^b	44.60±0.73^b	1.16±0.02^a	38.55±0.92^b	446.08±7.33^b	54.87±0.51^b
	均值	38.98±0.20	5.80±0.28	44.78±0.29	1.15±0.01	39.01±0.50	447.76±2.87	57.98±2.83

注:不同小写字母表示同一土层不同林分间差异显著($p<0.05$)。

3.3.2　土壤渗透性能　由表 5 可知,4 种林分土壤初渗速率大小范围为 7.18 ～18.76 mm/min,以毛竹林最大,脐橙林最小。土壤入渗试验开始后,随着入渗时间的延长,土壤入渗速率呈不断减小趋势,最后速率趋近于稳定,各林地土壤稳渗速率大小范围为 0.86 ～5.27 mm/min,以毛竹林最大,脐橙林最小。从达到稳渗的时间来看,4 种林分土壤达到稳渗所需时间是有所不同的,楠木林达到稳渗所需时间最长为 25 min,脐橙林所需时间最短 12 min。通对林地土壤入渗时间和入渗速率进行拟合分析,得出二者之间存在较好的幂函数关系:$f=at^{-b}$($R^2>0.91$)。式中:f 为入渗速率(mm/min);a,b 为常数;t 为入渗时间(min)。

表 5　不同林分类型土壤渗透速率及拟合方程

林分类型	初渗速率/(mm·min^{-1})	稳渗速率/(mm·min^{-1})	稳渗时间/min	回归方程	R^2
楠木林	16.32	5.08	25	$y=13.557\ t^{-0.317}$	0.940 8
毛竹林	18.76	5.27	21	$y=16.204\ t^{-0.362}$	0.963 4
脐橙林	7.18	0.86	12	$y=5.047\ t^{-0.620}$	0.917 8
茶林	11.57	2.37	15	$y=10.480\ t^{-0.505}$	0.966 1

3.4　水源涵养能力综合评价

3.4.1　不同森林类型水源涵养能力评价指标　为了能够更加直观的对不同水源涵养林和人工经济果林的水源涵养能力进行综合评价,本文利用熵权法选择枯落物层和土壤层的指标进行比较评价。其中枯落物层水文效应指标选择 3 个:枯落物蓄积量、最大持水量、有效拦蓄量(3 个指标均取总量);土壤层水文效应指标选择 5 个:土壤容重、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、最大持水量、稳渗速率(5 个指标均取 3 个土壤层的平均值)。

3.4.2　构造标准化指标矩阵并计算权重值　将 4 种林分水源涵养能力 8 个指标数据标准化处理,得到新的标准矩阵,再根据公式(5)计算得到各指标的信息熵,最后通过公式(6)计算得到各指标的权重值(表 6)。从各评价指标权重占比来看,对水源涵养能力影响比较大的指标有土壤稳渗速率(32.1%)、枯落

物最大持水量(23.2%)、枯落物有效拦蓄量(19.2%)以及枯落物蓄积量(11.7%),权重值排序依次为:土壤稳渗速率>枯落物最大持水量>枯落物有效拦蓄量>枯落物蓄积量>土壤非毛管孔隙度>土壤毛管孔隙度>土壤容重>土壤最大持水量。故当我们对林分水源涵养能力进行综合评价时,应更多考虑土壤稳渗速率、枯落物蓄积量、枯落物最大持水量以及枯落物有效拦蓄量。各林分水源涵养能力综合评价值(表6),大小排序为:楠木林(36.256)>毛竹林(28.314)>茶林(17.732)>脐橙林(17.616)。

表6 不同林分水源涵养综合评价权重值

林分类型	枯落物层权重值			土壤层权重值					综合得分	排名
	枯落物蓄积量	最大持水量	有效拦蓄量	土壤容重	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	最大持水量	稳渗速率		
楠木林	0.33	0.39	0.37	0.24	0.28	0.33	0.29	0.37	36.256	1
毛竹林	0.23	0.23	0.22	0.23	0.25	0.26	0.26	0.39	28.314	2
脐橙林	0.26	0.22	0.23	0.27	0.24	0.22	0.24	0.06	17.616	4
茶林	0.18	0.17	0.18	0.26	0.23	0.19	0.22	0.17	17.732	3
权重值	0.117	0.232	0.192	0.010	0.014	0.107	0.007	0.321	—	—

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 森林枯落物厚度以及蓄积量是决定森林水源涵养能力高低的重要因素,不同林分枯落物的厚度及蓄积量有所差别,其蓄积量多少与植被生长情况、人为活动、枯落物特性和分解状况等因素密切相关[24-25]。本研究表明,楠木林枯落物层蓄积量远大于两种人工经济果林,产生这种结果的原因,可能是由于不同林分根系的生长状况不同,楠木林相比于其他两种经济果林繁殖能力更强,发达的根系上能形成密集的茎叶层,枯落物的归还量大[26]。加之脐橙林和茶林受人为干扰活动较大,容易遭受破坏,造成林下枯落物体积相对较低。而毛竹林枯落物层蓄积量小于脐橙林,仅比茶林略大,这与不同林分枯落物特性有关,竹叶质薄柔软且较易分解,而脐橙叶较之竹叶宽厚狭长,且质地坚韧[27]。在枯落物层持水性能方面,各林分半分解层枯落物最大持水量和吸水速率均是大于未分解层,可能是由于半分解层枯落物蓄积量明显高于未分解层[28]。从各林分整体来看,两种天然林楠木林、毛竹林与两种人工经济果林脐橙林、茶林相比,具有最大持水量、最大拦蓄量和有效拦蓄率高等特点。造成这种情况的主要原因可能是楠木林和毛竹林自然含水率较高,在枯落物处于风干状态下,其最大持水能力以及吸水性能相比于两种人工经济果林较强,另外这与不同林分林龄、枯落物特性以及蓄积量也有关[29]。

(2) 不同林分类型其土壤水文物理特征存在差异,这与不同林分枯落物蓄积量、枯落物分解状态以及林分地下根系生长状态有很大关系。研究结果表明,在0—30 cm土层之内,4种林分类型土壤容重均随土层深度的增加而增大,非毛管孔隙度随土层深度的增加而减小,这与赵磊等[30]众多学者的研究结果相一致。此外,由于两种人工经济果林受人为活动干扰较大,如剪枝、摘果等活动,土壤表层被频繁践踏,从而导致林地土壤板结紧实,土壤容重变大。土壤最大持水量和有效持水量取决于土壤毛管孔隙度和非毛管孔隙度[31]。研究证实,楠木林和毛竹林的土壤层持水能力较强,其土壤最大持水量、有效持水量以及渗透速率均大于两种人工经济果林表现为最差。出现这种情况的主要原因可能是两种天然林具有较为发达的根系结构,能够显著的改善土壤的孔隙状况。另外,由于两种人工经济果林林下植被和枯落物稀少,对地表土壤缺乏保护,不能有效减缓降水和地表径流对表层土壤的侵蚀,造成土壤结构破坏,土壤板结,导致土壤渗透速率降低。

4.2 结论

本文主要研究了赣南丘陵区4种不同林分的枯落物层和土壤层的水源涵养能力,分别分析了枯落物最大持水量,枯落物有效拦蓄量,土壤容重,毛管孔隙度、稳渗速率等指标与土壤水源涵养能力的相互关系,结果表明:

(1) 赣南丘陵区脐橙林和茶林的种植同时降低了枯落物层和土壤层的水源涵养能力,造成了整体区域水源涵养能力的大幅度降低。

(2) 土壤稳渗速率,枯落物最大持水量,枯落物有效拦蓄量3个指标对区域的水源涵养能力的贡献最显著。因此,为充分提升赣南丘陵区森林水源涵养

能力,应合理规划人工经济果林种植,加强对经济果林林下植被、枯落物层和土壤层的保护,减少对天然林的破坏,为该区域构建结构合理的森林生态系统。

[参 考 文 献]

[1] 熊壮,叶文,张树斌,等.西双版纳热带季节雨林与橡胶林凋落物的持水特性[J].浙江农林大学学报,2018,35(6):1054-1061.

[2] 王利,于立忠,张金鑫,等.浑河上游水源地不同林型水源涵养功能分析[J].水土保持学报,2015,29(3):249-255.

[3] 郭宇嘉,牛庆花,陆贵巧,等.承德市第三乡林场不同林分类型枯落物和土壤的持水特性[J].水土保持通报,2018,38(3):38-44.

[4] Song Xiang, Yan Changzhen, Xie Jiali, 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.

[5] 张彪,李文华,谢高地,等.森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法[J].生态学杂志,2009,28(3):529-534.

[6] Xie Gaodi, Li Wenhua, Xiao Yu, et al. Forest ecosystem services and their values in Beijing [J]. Chinese Geographical Science, 2010,20(1):51-58.

[7] 丁访军,王兵,钟洪明,等.赤水河下游不同林地类型土壤物理特性及其水源涵养功能[J].水土保持学报,2009,23(3):179-183,231.

[8] 罗佳,田育新,周小玲,等.不同造林模式水源涵养功能研究[J].中南林业科技大学学报,2017,37(3):79-85.

[9] 潘春翔,李裕元,彭亿,等.湖南乌云界自然保护区典型生态系统的土壤持水性能[J].生态学报,2012,32(2):538-547.

[10] 张杰,陈晓安,汤崇军,等.典型水土保持措施对红壤坡地柑橘园水土保持效益的影响[J].农业工程学报,2017,33(24):165-173.

[11] 张海波,张明阳,王克林,等.南方丘陵山地带水源涵养功能变化特征[J].农业现代化研究,2014,35(3):345-348.

[12] 肖海兵,李忠武,聂小东,等.南方红壤丘陵区土壤侵蚀—沉积作用对土壤酶活性的影响[J].土壤学报,2016,53(4):881-890.

[13] 袁再健,马东方,聂小东,等.南方红壤丘陵区林下水土流失防治研究进展[J].土壤学报,2020,57(1):12-21.

[14] 白晋华,胡振华,郭晋平.华北山地次生林典型森林类型枯落物及土壤水文效应研究[J].水土保持学报,2009,23(2):84-89.

[15] 徐洪亮,满秀玲,盛后财.大兴安岭不同类型落叶松天然林水源涵养功能研究[J].水土保持研究,2011,18(4):92-96.

[16] 刘宇,郭建斌,王彦辉,等.宁夏六盘山不同密度华北落叶松人工林枯落物水文效应[J].北京林业大学学报,2016,38(8):36-44.

[17] 石媛,鲁绍伟,陈波,等.河北雾灵山不同密度油松人工林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持学报,2014,28(3):92-97.

[18] 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.

[19] 陈波,孟成生,赵耀新,等.冀北山地不同海拔华北落叶松人工林枯落物和土壤水文效应[J].水土保持学报,2012,26(3):216-221.

[20] 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.

[21] Dunkerley D. Percolation through leaf litter: What happens during rainfall events of varying intensity? [J]. Journal of Hydrology, 2015,525:737-746.

[22] 孙艳红,张洪江,杜士才,等.四面山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J].水土保持学报,2009,23(5):109-112,117.

[23] 彭玉华,郑威,谭长强,等.广西壮族自治区的台湾桤木混交造林水源涵养功能评价[J].水土保持通报,2019,39(5):98-105,112.

[24] 贾剑波,刘文娜,余新晓,等.半城子流域 3 种林地枯落物的持水能力[J].中国水土保持科学,2015,13(6):26-32.

[25] Leer R. Forest Hydrology [M]. New York: Columbia University Press, 1980.

[26] Zhao Jie, Wan Songze, Li Zhi'an, et al. Dicranopteris-dominated understory as major driver of intensive forest ecosystem in humid subtropical and tropical region [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012,49:78-87.

[27] 龙春玲,刘腾飞,于芬,等.厚壁毛竹与毛竹叶片的光学解剖结构比较分析[J].安徽农业大学学报,2015,42(1):39-44.

[28] 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].生态学杂志,2019,38(9):2662-2670.

[29] 杨吉华,张永涛,李红云,等.不同林分枯落物的持水性能及对表层土壤理化性状的影响[J].水土保持学报,2003,17(2):141-144.

[30] 王燕,王兵,赵广东,等.江西大岗山 3 种林型土壤水分物理性质研究[J].水土保持学报,2008,22(1):151-153.

[31] 孙艳红,张洪江,程金花,等.缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J].水土保持学报,2006,20(2):106-109.