滇中高原不同林龄华山松林冠层对天然降雨雨滴能量特征的影响

涂晓云[1], 王克勤[1,2], 赵洋毅[1,2], 王嘉维[1], 段 旭[1,2], 朱梦雪[1]

(1.西南林业大学 生态与环境学院, 云南 昆明 650224;
2.国家林业和草原局 云南玉溪森林生态系统国家定位观测研究站, 云南 昆明 650224)

摘　要: [目的] 探究滇中磨盘山不同林龄华山松人工林对天然降雨动力学特征的影响,为区域水土资源保护、森林结构调整等提供一定的理论参考。[方法] 基于 2019 年 5 至 10 月在云南省玉溪市新平县磨盘山观测的 74 场降雨资料,采用滤纸色斑法对华山松人工林(中龄林 15 a,成熟林 40 a,过熟林 60 a)的林内外的降雨雨滴同时进行观测。选取其中具有代表性的 11 场降雨,针对不同降雨条件分析了 3 种林龄林分对雨滴能量特征的影响。[结果] ①华山松林林冠层对雨滴有汇集与分散作用,中龄林对雨滴分散作用更强,成熟林次之,过熟林则表现为较强的汇集作用。②林内外雨滴终点速度与雨滴直径均具极显著的正相关关系($p<0.01$),林内雨滴终点速度排序为:中龄林>成熟林>过熟林。③雨滴直径及降雨强度的增加均可增强林内外的降雨能量,且雨滴能量与二者均呈现极显著的正相关关系($p<0.01$)。不同降雨条件下,降雨动能与雨滴径阶均可拟合为幂函数,林内雨滴能量排序为:中龄林<成熟林<过熟林。其中,中龄林对雨滴能量的削弱作用更为明显。④中龄林对雨滴的缓冲势能效果最好(66.67%),占降雨总势能的52%,成熟林次之(31.58%),过熟林最弱仅为 20.64%。[结论] 随树木年龄的增长林冠减缓雨滴能量的效果减弱。因此,对于成熟林以上的华山松人工林林分,应及时进行林分采伐与更新,且注重保护林下枯落物,以减轻由林下雨滴造成的水土流失。

关键词: 华山松人工林; 林龄; 雨滴直径; 雨滴终点速度; 雨滴能量

文献标识码: A　　**文章编号:** 1000-288X(2021)03-0040-10　　**中图分类号:** S715.2

文献参数: 涂晓云, 王克勤, 赵洋毅, 等.滇中高原不同林龄华山松林冠层对天然降雨雨滴能量特征的影响[J].水土保持通报,2021,41(3):40-49.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.006; Tu Xiaoyun, Wang Keqin, Zhao Yangyi, et al. Effects of *Pinus armandii* plantation canopy of different age on energy characteristics of natural rainfall in Central Yunnan Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(3):40-49.

Effects of *Pinus Armandii* Plantation Canopy of Different Age on Energy Characteristics of Natural Rainfall in Central Yunnan Plateau

Tu Xiaoyun[1], Wang Keqin[1,2], Zhao Yangyi[1,2], Wang Jiawei[1], Duan Xu[1], Zhu Mengxue[1]

(1.*College of Ecology and Environment*, *Southwest Forestry University*, *Kunming*, *Yunnan* 650224, *China*;
2.*Yuxi Forestry Ecosystem Research Station of National Forestry and Grassland Administration*, *Kunming*, *Yunnan* 650224, *China*)

Abstract: [Objective] The effects of *Pinus armandii* plantation canopy of different age on the dynamic characteristics of natural rainfall at Mount Mopan, Central Yunnan Province were explored in order to provide certain theoretical references for regional water and soil resource protection and forest structure adjustment. [Methods] 74 natural rainfall observations were obtained for Mount Mopan in Xinping County, Yuxi City, Yunnan Province from May to October 2019. These data included simultaneously observed rainfall and raindrops inside and outside of a middle-aged forest (15-year-old), a mature forest (40-year-old), and an

收稿日期: 2021-01-05　　**修回日期:** 2021-02-02

资助项目: 国家自然科学基金项目"干热河谷冲沟系统土壤优先流及对沟蚀发育的影响机理研究"(42067005); 云南省基础研究计划项目(202001AT070136); 云南省万人计划青年拔尖人才专项(YNWR-QNBJ-2019-215; YNWR-QNBJ-2019-226); 国家林草局林业科技创新平台运行项目(2020132078); 云南玉溪森林生态系统国家长期科研基地(2020132550)

第一作者: 涂晓云(1996—),女(汉族),云南省昭通市人,硕士研究生,研究方向为水土保持。Email:xiaoyun_Tu9606@163.com。

通讯作者: 王克勤(1964—),男(汉族),甘肃省庄浪县人,教授,博士生导师,主要从事小流域环境综合治理方面的研究。Email:wangkeqin7389@sina.com。

over-mature forest (60-year-old) of a *P. armandii* plantation using the filter paper splash procedure. 11 representative rainfall events from among the data were selected, and the three forest stands for different rainfall conditions that impact the energy characteristics of raindrops were analyzed. [Results] ① The *P. armandii* forest had the effect of collecting and dispersing raindrops, and the middle-aged forest had the strongest effect on raindrop dispersion, followed by mature forest. The over-mature forest had the strongest collecting effect. ② The terminal speed of raindrops inside and outside the forest had a very significant positive correlation with the diameter of raindrops ($p<0.01$). The terminal speed of raindrops in the forest followed the order of middle-aged forest > mature forest > over-mature forest. ③ Increased raindrop diameter and rainfall intensity enhanced rainfall energy inside and outside the forest, and raindrop energy had a very significant positive correlation with both ($p<0.01$). Under different rainfall conditions, the rainfall kinetic energy and raindrop diameter can be fitted to a power function relationship. Raindrop energy in the forest followed the order of middle-aged forest < mature forest < over-mature forest. The weakening effect of middle-aged forest on raindrop energy was more obvious. ④ The buffering potential energy of middle-aged forest on raindrops was the best at 66.67%, accounting for 52% of the total rainfall potential, followed by mature forests at 31.58%, and over-mature forests at only 20.64%. [Conclusion] The influence of a forest canopy in reducing raindrop energy weakens as trees age. Therefore, for *P. armandii* plantations older than mature forests, timely harvesting and regeneration of forests should be carried out, and more attention should be given to the protection of understory litter to reduce soil erosion caused by raindrops under the forest canopy.

Keywords: *Pinus armandii* plantation; age of trees; raindrop diameter; raindrop final velocity; raindrop energy

土壤侵蚀是发生在地表水文循环过程中伴随能量变化与物质分散的复杂的位移过程,是一个全球性的环境灾害,目前已成为世界关注的环境问题之一[1]。中国西南土石山区是典型水力侵蚀区,区域侵蚀的主要动力来源于天然降雨雨滴动能对土壤表层的溅蚀作用[2-3]。雨滴下落破坏土壤结构,使得土粒飞溅,形成土壤板结,降低土地利用率[4-5]。研究已证实森林植被对雨滴能量具削减性,当降雨雨滴经森林植被林冠层后,其雨滴的大小、数量、动能及空间分布等形态特征均发生改变[6-7],且能量在降水输入过程中进行了再分配,进而削弱下降雨滴的动能,减缓雨滴击溅作用[8-9]。因此,研究森林植被林冠对降雨特征和雨滴动能的削减作用是深入探析森林生态水文作用机制的重要环节,也是研究植被水土保持作用和水文效益的基础工作。

森林林冠层作为陆地生态系统水文循环的重要场所,其与天然降雨雨滴能量的关系是当前森林生态水文过程研究的热点[10-12]。许多学者对林冠层与降雨能量的关系进行了多方面的研究。例如,20 世纪后期 Brandt J[13]探析了热带雨林冠层降雨能量转换与土壤侵蚀的关系;余新晓[14]通过森林植被减弱降雨侵蚀能量的数理分析,得出不同林分对降雨势能的减弱作用;周跃等[15]研究发现云南松林冠层可有效减少降雨对地表的滴溅能量等。目前,相关研究主要围绕雨滴物理特性的研究方法[16]、降雨特征[17-18]、林冠结构[8, 19-20]、降雨与土壤侵蚀的关系[21-22]等开展。例如,展小云等[23]采用粒子成像瞬态粒子测量可视化技术观测自然降雨雨滴,利用雨滴降落到地面的瞬时末速度结合外包络线提取算法 $V(D)=10^{-3}(L-D)/(t_1-t_2)$ 计算雨滴终点速度,建立了 $E_K(t)=26.82I^{0.34}$ 的降雨动能与降雨强度之间的统计关系,该模型通过实测的雨滴直径估算雨滴动能具有较高的准确性和适用性,很大程度上弥补了降雨动能统计模型区域局限性中的不足。Song 等[24]以亚热带早期演替阶段的人工乔木林为研究对象,分别从林冠的垂直与水平方向上观测 3 种不同树的叶面积特征,得出垂直方向上林冠层的叶面积指数越大,穿透雨滴动能越大,水平方向则与之相反的结论。已有研究阐明不同地区由于雨滴特性差异可引起不同程度的土壤侵蚀,该现象主要与区域的气象变化、雨滴性质、植被类型等因素相关[21,25-26]。同时,也有通过人工模拟降雨的方法分析降雨能量转化及林下产流产沙过程[27]。相关研究主要以人工林为主[6,18],少数为天然林[8,17],而对于作为森林演替状态指标的林分林龄与天然降雨能量转换之间关系的研究鲜有报道。

云南省干湿季节分明,降雨多集中于 5—9 月,雨量较大,每逢雨季各地区均会发生不同程度的水土流失等自然灾害。华山松人工林群落是滇中高原中亚热带山地季风气候区较为典型的地带性植被,具有较高的土壤改良与水土保持作用,是当地理水保土效益

较高的树种之一。此外,不同林龄的林分对森林生态水文功能可能存在不同程度的影响。因此,本研究以不同林龄华山松人工林为研究对象,分析华山松3个演替阶段林冠层对天然降雨雨滴能量的影响。以期为区域水土资源保护、森林结构调整等提供一定的理论参考。

1 研究区概况

研究区位于云南省中部的玉溪市新平彝族傣族自治县磨盘山国家森林公园内,是云贵高原、横断山地和青藏高原南缘地理结合部,地理坐标为101°55′13″—102°04′00″E,23°54′00″—24°02′30″N,海拔1 260~2 614.4 m,相对高差1 354.4 m。磨盘山地处北回归线以北,是云南亚热带北部与亚热带南部的气候过渡区,具典型的山地气候。降水多集中在5—10月,年降水量均>1 000 mm;年均气温17~20 ℃,极端低温-8.6 ℃,积温为4 800 ℃;土壤发育主要以第三纪古红土的山地红壤和玄武岩红壤为主,较高海拔地区有黄棕壤分布;森林植被类型主要有亚热带常绿阔叶林、亚热带针阔混交林、针叶林和高山矮林等,共有98科137属324种。监测样地平均海拔为2 258 m,树种为典型人工针叶林华山松(*Pinus armandii*),土壤均为红壤。具体的华山松人工林样地基本概况如表1所示。

表1 华山松林样地基本概况

样地	海拔/m	坡度/(°)	坡向/(°)	平均树高/m	平均胸径/cm	平均冠幅/m	密度/(株·hm^{-2})
中龄林15 a	2 286	12	南偏西20	12.5	12.5	3.7	2 960
成熟林40 a	2 302	8	南偏西3	15.2	16.5	3.9	2 030
过熟林60 a	2 186	11	北偏东43	18.9	28.2	4.1	1 448

2 研究方法

2.1 降雨观测

样地依托云南玉溪森林生态系统国家定位观测站内的华山松人工林地,在林地内选择地理位置相近、近似自然生长长势良好的华山松林,确定其林龄并参照国家森林资源规划设计调查技术规程与主要树种龄级与龄组划分标准[28-29],以10 a为一龄级划分为中龄林(15 a)、成熟林(40 a)、过熟林(60 a)3个龄组。在此基础上,分别布设一个面积为50 m×50 m的永久性试验样地,四周加以铁丝网保护,减少动物与人为破坏。同时,在布设样地内对华山松林林分密度、胸径、树高、叶面积指数、覆盖度等指标进行林业调查与记录,并观测2019年5月至10月的林内外降雨特征。

2.1.1 林外大气降雨观测 样地不远处已设有Envidata-thies全自动野外固定气象站,可长历时监测与建立降雨量相对湿度风向风速气温气压辐射等气象因子的云端数据库。同时,在样地观测场外距离适中、人类及动物活动影响小的空旷地带设置一台激光雨滴谱仪和RG-3自记雨量计,并在样地内的空旷区域设置2个普通雨量桶,进行对比参考,以确保研究区大气降雨数据的真实性与可靠性。根据2019年5—10月观测的林外降雨数据经整理分析(表2)可知,磨盘山降雨多集中于6—9月,共74场。年降雨总量为635.2 mm,年平均降雨强度为4.66 mm/h,是典型的半湿润区。在6月平均降雨强度达最大值为6.89 mm/h,属于小降雨强度。此外,降雨次数最多月份是8月,降雨量贡献较多月份是7月和9月且年降雨贡献率分别为38.73%,22.67%。

表2 2019年5—9月华山松样地林外降雨特征

月份	总降雨场次	降雨历时/h	降雨量/mm	平降雨强/(mm·h^{-1})	最大雨强		
					I_{10}/(mm·h^{-1})	I_{30}/(mm·h^{-1})	I_{60}/(mm·h^{-1})
5	6	21.28	54.8	5.4	6.87	6.05	4.51
6	12	26.35	93	6.89	8.26	6.43	5.23
7	19	121.43	246	5.49	6.82	5.88	4.95
8	23	84.70	97	2.67	6.41	4.06	2.34
9	14	78.10	144	2.87	5.74	4.24	3.24
合计	74	331.86	635.2	—	—	—	—

2.1.2 林内穿透降雨观测 相关研究表明下落雨滴一部分会直接沿树干或枝条缓慢流到地面形成树干流,最终作为水分补给的重要来源被根部吸收利用,而不具备能量对地表产生击溅作用,此部分降雨动能

可忽略不计[22,26]。因此，本研究只对林内穿透降雨进行观测。在不同林龄华山松人工林 50 m×50 m 的样地内，布设 4 个 25 m×25 m 的标准固定样地，每个林龄样地内分别将 8 个标准雨量桶和 1 个自记雨量计（编号为 $R_{中}$，$R_{成}$，$R_{过}$）设置在郁密度适中的典型地段，用于观测林内穿透降雨特征，均距树干 0.79 m。中龄林、成熟林、过熟林的样地标准雨量桶均编号均为 1，2，3，4，5，6，7，8 号且分别距树干 0.91，1.30，1.25，0.86，1.45，2.16，3.00，1.51 m。

2.1.3　雨滴大小测定　本研究采用传统滤纸色斑法对雨滴直径进行测量与分析。试验前将新华造纸厂生产的直径 15 cm 的定性中速滤纸，用柔软细毛刷均匀涂抹质量比为 1∶10 的曙红与滑石粉的混合粉末，每次降雨前将处理好的滤纸平铺于 20 cm×50 cm 的聚乙烯塑料板，上方进行覆盖，带入样地内布设有雨量桶样树的附近，进行林内穿透雨滴取样。降雨开始后，林内外同时进行雨滴取样，待滤纸布满色斑后，立即更换，覆盖保存，每 10 min 取样一次，每次重复 3 次。若降雨强度突然变化，立即进行取样，最后收好布有色斑的滤纸带回实验室风干，采用游标卡尺进行雨滴直径大小测量并记录数据。此研究中色斑直径和雨滴直径之间的关系参照曹光秀[20]率定公式，其函数表达式为：

$$d=0.398D^{0.71}\quad(R^2=0.970)\tag{1}$$

式中：D 为色斑直径（mm）；d 为雨滴直接（mm）。

2.2　数据选择

依据林内外降雨试验与观测数据，参照 2012 年国家标准《降水等级》（GB/T28592-2012）[30]进行降雨量等级划分，选取 2019 年 5—10 月典型的 11 场降雨雨滴数据进行分析，详细取样情况见表 3。

表 3　2019 年 11 场降雨雨滴情况和基本特征

降雨时间	雨滴数量/个		林外降雨量/mm	林内降雨量/mm			降雨强度等级	取样时刻	取样历时/min
	林外	林内		中龄林（15 a）	成熟林（40 a）	过熟林（60 a）			
20190523	648	387	3.2	2.6	2.8	3.2	小雨	8:00	8
20190607	863	491	18.8	8.6	10.8	14.6	中雨	18:10	5
20190618	859	490	18.1	8.4	9.6	12.8	中雨	13:01	5
20190710	1 286	833	51.4	28.6	31.4	34.2	暴雨	16:20	3
20190717	1 065	535	39.4	15.8	35.2	37.4	大雨	17:51	4
20190703	628	304	7.6	1.4	2.2	3.8	小雨	14:06	10
20190805	635	352	8.8	3.8	5.4	6.6	小雨	16:20	9
20190911	1 296	858	60.4	18.2	30.8	42.2	暴雨	8:12	4
20190808	875	488	17.2	9.2	12.8	13.6	中雨	18:11	6
20190721	1 070	675	46.8	21.4	28.2	32	大雨	15:49	3
20190910	1 068	684	31.4	19.6	21.8	27.8	大雨	13:04	3

2.3　数据处理

雨滴下落过程中，在重力、空气浮力、空阻力 3 个力的共同影响下，雨滴做变加速度运动，当加速度为 0 时，雨滴转为匀速运动，此时对应的速度称为雨滴终点速度，是降雨的重要物理参数之一。雨滴终点速度本质上与雨滴质量成正相关，同时直接决定雨滴动能的大小，森林植被林冠层作为天然降雨雨滴最先接触的下垫面结构，可对其势能进行重新分配。因此，降雨雨滴的雨滴终点速度、动能与势能均可作为量化雨滴能量变化过程中的特征指标。

本研究雨滴终点速度分为林外与林内的终点速度，采用修正的沙玉清公式与牛顿公式进行计算[18]，就雨滴动能而言，先计算单个雨滴的动能，根据每次降雨雨滴组成求其和得雨滴总动能，最后推求单位面积降雨总动能[31]，雨滴势能计算过程参考殷晖等[8]的研究成果，具体指标计算公式与适用条件见表 4。

3　结果与分析

3.1　林内外雨滴直径的分布差异

表 5 可反映林外与 3 种林龄林内所有样本中的雨滴径级数目分布情况，可得林内外雨滴直径大多分布在 0.25～1.5 mm 之间，但林外与不同林龄林内各雨滴径级的雨滴谱规律存在极显著差异（$p<0.01$）。林外雨滴总数为 3 859 个，中龄林、成熟林、过熟林林内雨滴总数分别为 2 431，2 342，2 241 个，林外雨滴数量比上述 3 种林龄林内降雨的雨滴个数分别多 58.74%，64.77%，72.20%，3 种林龄林内>1.5 mm 的雨滴直径无论是数量还是百分比均高于林外，且林外雨滴径阶在 0.5～1.9 mm 区间的雨滴减小幅度最大，可以确定林冠可将体积较小的雨滴汇集成更多的大雨滴，华山松林冠具汇集雨滴的作用。同时也可看出，林内>2 mm的每个雨滴径级的数量均多于林外且林外几

乎没有>3.5 mm 的雨滴出现，但林内却出现了些许 5.5 mm 以上的大雨滴。

此外，将 3 种林龄林内雨滴分布相比发现，中龄林林冠层对0.125～0.25 mm 径级小雨滴数量最多分散作用更明显，过熟林林冠对0.5 mm以上雨滴汇集作用较其它林龄更显著。总的说来，华山松林各林龄内雨滴数量低于林外，且其林冠层对降雨雨滴即有汇集作用也有分散作用，并且中龄林对雨滴的分散作用更强，成熟林次之，过熟林则对雨滴的汇集作用更突出。

表 4 雨滴能量指标计算公式

雨滴能量参数	适用条件		计算公式
滴终点速度/($m \cdot s^{-1}$)	林外	$d<1.9$ mm	$V_{林外}=0.496\times10^{(\sqrt{28.362+6.524\lg(0.1d)-(\lg0.1d)^2}-3.66)}$
		$d\geqslant1.9$ mm	$V_{林外}=(17.20-0.844d)\sqrt{0.1d}$
	林内	—	$V_{林内}=V_{林外}[1-\exp(-2gh/V_{林外}^2)]^{1/2}$
雨滴动能/($J \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1}$)	单个雨滴动能		$e=1/2mv^2=\rho\pi d^3/12$
	雨滴总动能		$E_{总}=\sum_{i=1}^{n}e_i$
	单位面积降雨动能		$E=E_{总}/HS$
雨滴势能/J	林冠顶部雨滴势能		$E_{势}=mgH_{树}$； $m=\pi d^3\rho/6$
	经林冠层后势能减少量		$\Delta E=m_{穿}g(H_{树}-h)$
	总势能减少量		$\Delta E=\Delta E_{穿}+\Delta E_{林冠截留}$

注：①雨滴终点速度计算中，d 为雨滴直径(mm)；$V_{林外}$ 为林下降雨不同直径的雨滴到达林地时的速度(m/s)；$V_{林内}$ 为不同直径雨滴降落的终点速度(m/s)；g 为重力加速度，$g=9.8$ m/s^2；h 为林下降雨的雨滴降落高度(m)。②雨滴动能计算中，ρ 为水的密度，标准状态下为 1 g/cm^3；v 为雨滴终速度(m/s)；m 为雨滴质量(g)；i 代表雨滴个数；E 为单位面积上单位降雨量的雨滴动能[J/(m^2 · mm)]；H 为降雨深(mm)；S 为滤纸面积(m^2)。③雨滴势能计算中，$E_{势}$ 为林冠顶部雨滴势能(J)；m 为降雨雨滴质量(g)；d 为雨滴直径(mm)；$H_{树}$ 为平均树高(m)；$m_{穿}$ 为穿透雨降雨质量(g)；h 为平均枝下高度(m)；$\Delta E_{林冠截留}$ 表示林冠截留降雨未达到地面损失的势能。

表 5 华山松样地林内外雨滴大小分布情况

雨滴直径/mm	林外		不同林龄林内雨滴数量					
	雨滴数量/个	百分比%	中龄林(15 a)	比例/%	成熟林(40 a)	比例/%	过熟林(60 a)	比例/%
<0.125	32	0.83	0	0	0	0	0	0
0.125～0.25	200	5.18	371	15.26	154	6.58	48	2.14
0.25～0.5	1 949	50.51	783	32.21	765	32.66	360	16.06
0.5～1.5	1 182	30.63	919	37.80	926	39.54	1 017	45.38
1.5～1.9	383	9.92	204	8.39	237	10.12	360	16.06
1.9～2.5	75	1.94	85	3.50	120	5.12	184	8.21
2.5～3.5	24	0.62	33	1.36	68	2.90	143	6.38
3.5～4.5	9	0.23	22	0.90	34	1.45	68	3.03
4.5～5.5	5	0.13	11	0.45	23	0.98	38	1.70
5.5～6.5	0	0	3	0.12	15	0.64	23	1.03
6.5～7.5	0	0	0	0	0	0	0	0
7.5～8.5	0	0	0	0	0	0	0	0
>8.5	0	0	0	0	0	0	0	0

3.2 林内外雨滴终点速度的差异

据学者对南方地区降雨研究表明林内雨滴终点速度受树木高度的影响，直径大于 3mm 的大雨滴，其所在位置的枝条高度须在 12 m 以上才能到达雨滴终点速度[24]。显然林外降雨已到达终点速度。然而，本研究中选取固定样地的 3 个不同林龄(中龄林 15 a，成熟林 40 a，过熟林 60 a)平均树高分别为：12.5，15.2，18.9 m；平均枝下高分别为：6.5，4.8，3.9 m，因此，林下雨滴并未达到终点速度。

将选取的 11 场典型林内外降雨雨滴速度终点速度随雨滴直径的变化绘制成带直线与数据标记的散点图(图 1)，从图 1 中可以看出林内雨滴的终点速度随雨滴直径的增加而增大，当雨滴直径到达一定值时，其终点速度趋于稳定。同时，随华山松林龄的增大，雨滴终点速度相应减小。当雨滴直径 d 小于 2 mm时，林内 3 种林龄林内与林外雨滴速度无显著

差异($p>0.05$);当 d 等于 2 mm 时,林内外同一直径的雨滴终点速度开始出现差异,此时,雨滴终点速度在 6～7 m/s 范围;当 d 大于 2 mm 时,林内外雨滴终点速度具极显著差异($p<0.01$)且增长趋势明显,呈现出林外(9.45 m/s)>中龄林(8.24 m/s)>成熟林(7.63 m/s)>过熟林(7.17 m/s)的态势,雨滴在 6.9 mm时,林内外雨滴速度均达最大值。当雨滴直径在 7 mm 以上时,林内外雨滴终点速度均呈略微减小趋势,这一方面可能与大雨滴汇集所需时间长但下落距离短,雨滴势能减弱,动能减小,从而到达地面的雨滴终点速度减小。另一方面,当雨滴直径达到一定值后,最终雨滴终点速度数值略微降低但总体趋于稳定。同时,由于风速、风向的影响,实际上雨滴终点速度结果仍存在一定的误差。

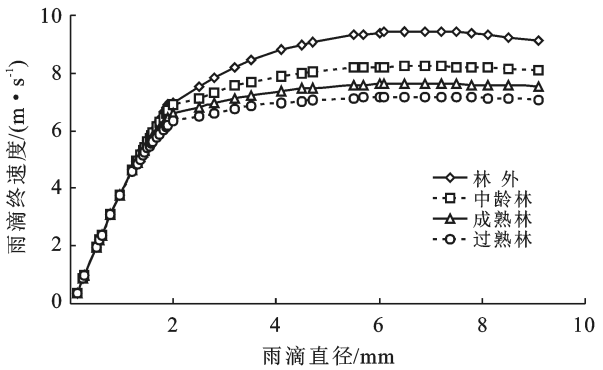

图 1　林内外雨滴终点速度与雨滴直径的关系

总之,雨滴终点速度与雨滴直径呈极显著的正相关关系($p<0.01$,$R^2=0.80$),雨滴直径在 0.125～1.9 mm 范围林内外雨滴终点速度差异不显著($p>0.05$);当直径在 2 mm 以上时,同一直径的 3 种林龄雨滴终点速度均小于林外雨滴终点速度,在直径等于 6.9 mm 时雨滴终点速度均达到最大值。

3.3　不同降雨强度下林内外雨滴动能特征

3.3.1　林外降雨动能特征　图 2 表示林外雨滴动能在不同降雨条件下随雨滴直径和降雨强度变化的关系。从图 2 中可以看出,随雨滴径级的增大雨滴动能不断增加,到达一定值后趋于稳定,且在 1.5～2.5 mm 雨滴动能随雨滴径级的增大趋势尤为显著,其中暴雨、大雨、中雨、小雨强度的雨滴动能分别稳定在 158.76,120.48,82.20,26.36 J/(m² · mm)。同一雨滴直径下雨滴动能随降雨强度的增强而增大,且暴雨条件的雨滴最小动能是小雨条件下最大雨滴动能的 4.5 倍,总体说来,林外雨滴动能与雨滴直径、降雨强度均表现出极显著的正相关关系($p<0.01$,$R^2_{雨滴直径}=0.69$,$R^2_{降雨强度}=0.57$)。

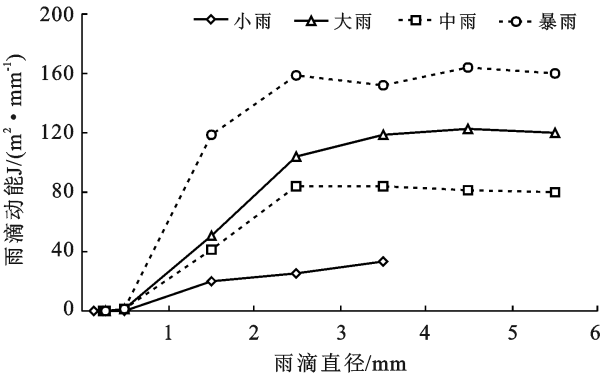

图 2　不同降雨强度下林外雨滴动能与直径的关系

3.3.2　不同林龄华山松林内降雨动能特征差异　图 3 表示华山松中龄林(15 a)、成熟林(40 a)、过熟林(60 a)3 个林龄在不同强度降雨条件下,林内降雨动能随雨滴径阶变化的关系。从图 3 中可以看出,林内降雨动能随雨滴直径的增加而增大,达到峰值后,总体呈下降趋势。在 0.25～4.0 mm 区间内,随雨滴直径的增大 3 种林龄林内雨滴动能均表现出显著上升的形态,两者极显著正相关($p<0.01$,$R^2=0.80$)。由此拟合不同强度降雨情况下,林内降水动能与雨滴直径的关系(表 6),二者呈幂函数关系,相关系数均大于 0.9。

表 6　不同降雨强度下单位面积雨滴动能与雨滴径级的关系方程

降雨强度	林龄/a	关系方程	R^2 相关系数
小雨	中龄林 15	$E=0.084\,d^{3.41}$	0.93
	成熟林 40	$E=0.098\,d^{3.18}$	0.94
	过熟林 60	$E=0.049\,d^{3.65}$	0.92
中雨	中龄林 15	$E=0.13\,d^{3.25}$	0.94
	成熟林 40	$E=0.11\,d^{3.34}$	0.94
	过熟林 60	$E=0.078\,d^{3.73}$	0.91
大雨	中龄林 15	$E=0.16\,d^{3.05}$	0.92
	成熟林 40	$E=0.13\,d^{3.43}$	0.93
	过熟林 60	$E=0.099\,d^{3.85}$	0.92
暴雨	中龄林 15	$E=0.21\,d^{3.11}$	0.94
	成熟林 40	$E=0.17\,d^{3.59}$	0.93
	过熟林 60	$E=0.12\,d^{3.97}$	0.91

注:上述各式中,E 为单位面积上单位降雨量的雨滴动能[J/(m² · mm)];d 为雨滴直径(mm);R^2 表示相关系数。

同时,图 3 还反映出,随降雨强度的增加林内动能也随之增大,两者呈现极显著正相关关系($p<0.01$,$R^2=0.38$)。小降雨强度下,3 种不同林龄华山松的林下雨滴动能达最大值后均表现出下降趋势,这说明 3 种不同年龄华山松的林冠层均对小降雨下的雨滴动能具有减缓作用。暴雨强度下 3 个林龄林内的降雨

动能最大，相同雨滴直径下过熟林林内单位面积雨滴动能峰值为 43.70 J/(m^2 · mm)，分别是中龄林的1.87倍，成熟林的 1.57 倍。此外，中雨、大雨和暴雨条件下，林冠层对雨滴动能削减效果不明显，但 3 种不同林龄林内动能相比，不同降雨强度下，随林龄增加单位面积雨滴动能均表现为：中龄林＜成熟林＜过熟林，大雨和暴雨条件下中龄林对雨滴动能削弱现象更明显，且该阶段对 4.5～6.5 mm 的雨滴动能消减作用更为凸显。中龄林的林下平均单位面积雨滴动能，在大雨条件下分别比成熟林、过熟林低 28.47%，44.27%，在暴雨条件下，成熟林与过熟林分别比中龄林高 32.39%和 45.71%。造成这一现象的主要原因可能是随着华山松树龄的增加，树高和树木的平均叶片角度、开放度、间隙分数降低致使相同降雨条件下雨滴数量、大小及雨滴终点速度不同。总的说来，中龄林、成熟林、过熟林 3 个林分阶段，除小强度降雨外，林冠层对单位面积雨滴动能的削弱作用较小，但 3 者相比，中龄林削弱雨滴动能的能力更强。

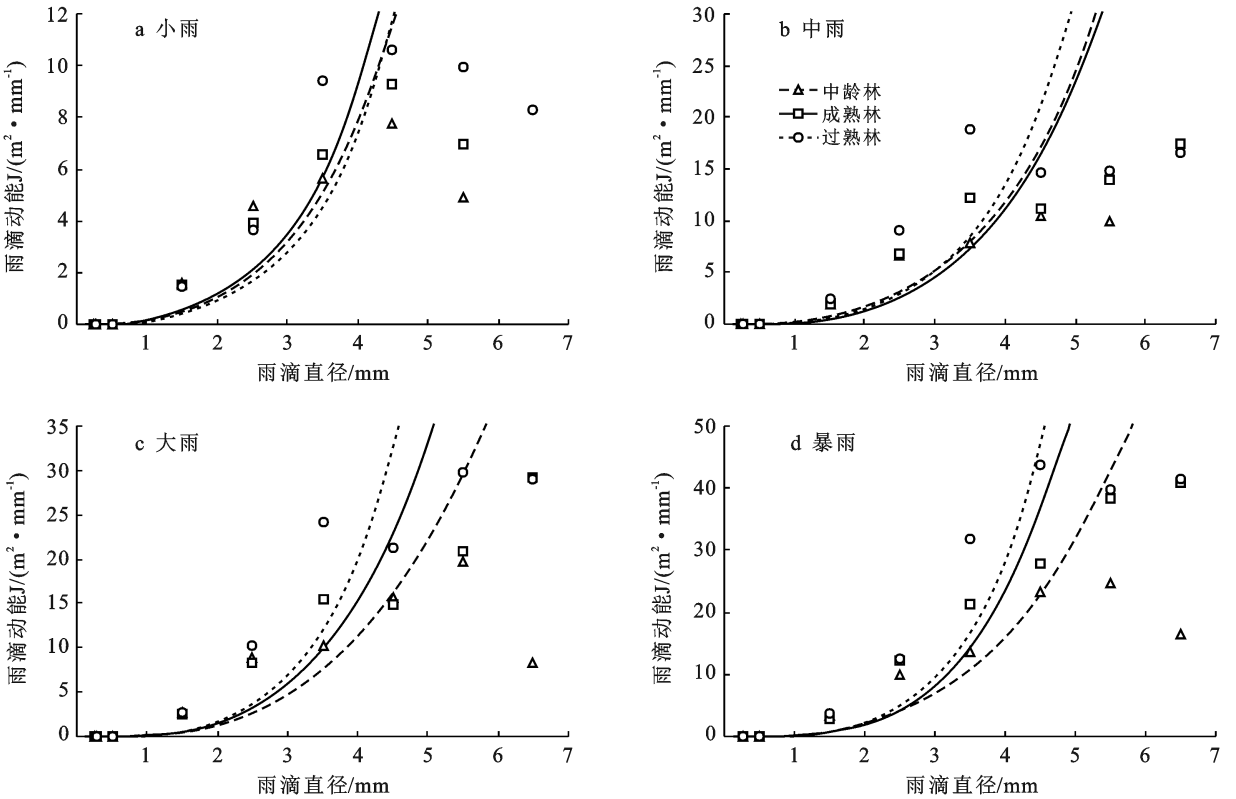

图 3 不同降雨强度下 3 种林龄华山松林内单位面积雨滴动能与直径的关系

对比图 2 与图 3 可知，不同林龄华山松林内的降雨雨滴动能均低于林外的累积雨滴动能，这说明林冠层具有减弱降雨雨滴能量的作用。在小雨条件下，林外累计雨滴动能就达到了林内中雨条件下的降雨雨滴动能的水平，且暴雨条件下过熟林、成熟林、中龄林的林内累计降雨动能峰值分别仅是相同条件下林外雨滴动能的 22.94%，19.04%，12.13%，这些主要与林内外雨滴数量和是否达到雨滴终点速度相关。同时，受林冠层与树高的影响，林内到达地面的终点速度小于林外雨滴实际的终点速度，使得 3 个林龄的林内雨滴动能呈现：过熟林＞成熟林＞中龄林。总的说来，不同林龄林内与林外的雨滴动能均随降雨强度与雨滴径级的增大而增强，林冠层可削弱雨滴的动能。

3.4 不同林龄华山松林冠对雨滴势能的分配作用

根据雨滴取样数据，计算中龄林(15 a)、成熟林(40 a)、过熟林(60 a) 3 个林龄的相应总势能，探析华山松的不同林龄林冠对雨滴势能的分配规律(图 4)。结果表明，不同林龄林内的降雨雨滴总势能、穿透雨滴势能及林冠缓冲势能均随雨滴径级的增大呈现上升趋势，尤其雨滴直径在 4.5mm 以上时，增长趋势十分明显。由此得出各势能与雨滴径阶之间的函数关系式为：$E_{缓冲}=0.25\ d^{3.01}$；$E_{穿}=0.52\ d^{2.98}$；$E_{总}=0.80\ d^{2.99}$。式中：$E_{缓冲}$，$E_{穿}$，$E_{总}$ 分别表示林冠缓冲势能、穿透雨滴势能与降雨总势能〔J/(m^2)〕；d 为雨滴直径(mm)，各势能与雨滴径阶间均呈幂函数关系且达到了极显著水平($p<0.01$)。此外，随树木林龄的增长，穿透雨滴势能增大，林冠缓冲势能减小，且过熟林的降雨雨滴总势能与穿透雨滴势能两者均表现为：成熟林＞中龄林，但中龄林林冠雨滴的缓冲势能却高于过熟林，

其最大缓冲势能高出过熟林 66.67%,占降雨总势能的 52%,缓冲能力最强,其次是成熟林(31.58%),缓冲能力最弱的是过熟林(20.63%)。导致这一现象的原因主要考虑以下两方面,一方面从中龄林过渡到成熟林再到过熟林阶段,树木产生自然稀疏现象尤其是过熟林阶段表现尤为明显,从而叶面积指数降低树林生物量下降,致使树木在成熟林后期林冠层截留效果显著减弱。另一方面,由于中龄林阶段林分长势更佳,受冠层厚度与林木高度影响,林冠层分散雨滴能力更强,影响对雨滴的缓冲作用更为明显。此外,华山松针叶有多种组合形式如一束针叶有 1 枚或 2～3 枚或 4～5 枚等,在水表面张力的作用下针叶黏合形成束,极大增加了大雨滴汇集的概率,受重力及风力的综合影响势能转化为动能,最终增强对地表的打击能力。因此,在水土流失严重或荒漠化地区的林业生态工程准备与抚育期间,应选择林冠层比较茂盛,具较厚枯枝落叶层的树种,同时在抚育期间,应及时对成熟林与过熟林分进行采伐与更新,保护地表植被。

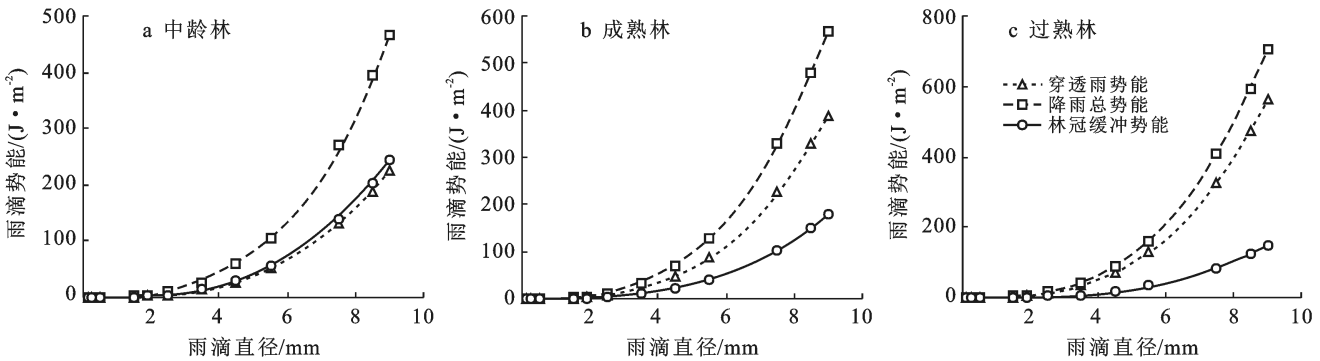

图 4　不同林龄华山松林冠对雨滴势能分配的关系

4　讨论与结论

4.1　讨 论

自然降雨雨滴接触林冠层过程中,一部分雨滴在叶片汇集作用下将小雨滴聚集成直径更大雨滴的过程称为雨滴汇集作用,其在重力作用下降落林内的雨滴称为叶片滴落雨;相反,另一部分雨滴降水下落过程中与树木枝条或叶片碰撞后被分散为直径更小雨滴的过程成为雨滴分散作用,此时对应的雨滴称为飞溅液滴[32]。雨滴的汇集与分散直接决定雨滴质量与速度,影响降水雨滴的打击地表土壤的能力,已有研究表明林冠对雨滴的汇集作用可增加林内降雨动能或击溅侵蚀能力[33],与之相反分散作用可有效减弱雨滴击溅侵蚀能力。总的说来,林冠层通过汇集与分散作用改变雨滴特性进而影响降雨雨滴能量。

本研究发现华山松林冠层有汇集与分散雨滴作用,雨滴经林冠层后在枝叶的作用下分离为更小或聚集为更大径阶雨滴,此结果与谢春华[9]、康文星等[34]的研究成果类似。林外雨滴数量高于林内且比中龄林、成熟林、过熟林 3 种林龄林内降雨的雨滴个数分别多 58.74%,64.77%,72.20%,这和史宇等对侧柏林冠层研究中的林内雨滴数高于雨林外 37.8%[31]这一成果不同,造成这一差异的主要原因可能是与侧柏相比针叶具更高的雨滴截留容量,水滴滞留效果更突出相关。同时,此研究成果也与李桂静等[31]对南方红壤地区马尾松林林内雨滴总数高于林外 19.5%的结论存在差异,这一差异产生的原因可能是马尾松林针叶多为 2 针一束罕见 3 针一束,而华山松针叶多为 5 针一束,水滴的表面张力将针叶粘合成一束所需时间更长,对雨滴的截持效果更明显;还可能是由于研究区气候条件不同,特别是降雨强度、降雨历时等因素造成的。

研究发现华山松林内外雨滴直径大多分布在 0.25～1.5 mm范围,这与曹光秀等对滇中高原常绿阔叶林的研究中林内降雨雨滴直径 0.5～3.5 mm 的雨滴数量最多有所不同[17],原因可能是常绿阔叶林叶片与华山松林针叶相比,叶片承雨面积更大,汇集雨滴的能力更强导致的,还有可能与常绿阔叶林枝叶之间的重合度、开合度也高于华山松林有关。

雨滴终点速度是决定降雨初期雨滴动能大小的关键物理参数,本研究发现林内外雨滴终点速度均随着雨滴直径的增大而逐渐增加,到达一定值后趋于稳定,此研究结果与史宇对北京山区侧柏林冠层[32]的成果类似。在不同降雨强度条件下,林内外雨滴动能表现为:林外＞过熟林＞成熟林＞中龄林,这与吴光艳等对黄土高原南部人工林中低林冠使雨滴速度降低从而雨滴动能减少的研究[35]结果相符合。因此,应特别注意林分的管理,及时采伐更新,发挥林木的最大经济效益,同时保留林下枯落物缓解消散雨滴打

击地表的能力。另外,研究还发现华山松林冠对雨滴势能具有一定的缓冲作用,中龄林的林冠相比于成熟林和过熟林,对雨滴势能的缓冲作用更为明显,此结论与谢春华对长江上游暗针叶生态系统结构及其对降雨的分配功能的研究结果一致[10]。所以,对雨水土流失严重的地区,经济允许的情况下,可选择林木林龄偏大,林冠繁茂的树种,以降低强降雨下的降雨势能,同时考虑树种凋落的枯枝落叶层厚度,便于对林下汇集的大雨滴产生的动能进行削减。

本研究仅针对滇中高原华山松人工纯林对雨滴动能的影响进行研究,研究结果对于其他纬度差异较大地区、树种,其林冠对雨滴能量的影响可能存在一定的差异。希望今后能够继续深入对不同树种的特异性、雨滴空间异质性、树种形态结构特征、不同气象条件对雨滴动能的影响的研究,进一步对林冠层对降雨输入过程中对雨滴能量的分配进行补充。

4.2 结论

(1) 华山松林内外雨滴直径多集中在0.25~1.5 mm范围,林内雨滴数量:过熟林>成熟林>中龄林。华山松林各林龄阶段对雨滴均有汇集与分散作用,中龄林对雨滴分散作用更强,成熟林次之,过熟林则表现为较强的汇集作用。

(2) 林内外雨滴终点速度随雨滴径级的增加而增大到达一定值后趋于稳定,二者呈现极显著正相关关系($p<0.01$,$R^2=0.80$),林内雨滴终点速度:中龄林>成熟林>过熟。

(3) 林内外雨滴动能与雨滴直径均呈极显著正相关关系($p<0.01$,$R^2_{林外}=0.69$,$R^2_{林内}=0.80$)。不同降雨强度条件下,林内雨滴动能与雨滴直径间均可拟合为幂函数关系,相关系数均在0.9以上,且随降雨强度的增强林下雨滴能量增加,林外暴雨条件的雨滴最小动能是小雨条件下最大雨滴动能的4.5倍。林内雨滴能量:中龄林<成熟林<过熟林。林冠层对小强度降雨雨滴能动消减作用明显,中雨、大雨、暴雨条件下,冠层对雨滴动能消减作用较弱,但3种林龄相比,中龄林阶段的华山松对雨滴动能的削弱作用更为明显。

(4) 降雨雨滴总势能、穿透雨滴势能及林冠缓冲势能均随雨滴径级的增大呈现上升趋势。同时,各势能与雨滴直径间均呈幂函数关系且达到极显著水平($p<0.01$),中龄林对降雨雨滴的缓冲势能效果最好,成熟林次之,缓冲能力最弱的是过熟林。

[参考文献]

[1] 汪倩,林金石,黄彦,等.利用纳米磁性材料表征地表溅蚀特征的初探[J].土壤学报,2017,54(5):1303-1312.

[2] 相莹敏,张洪江,程金花,等.华北土石山区土壤溅蚀影响因素分析[J].中国水土保持科学,2016,14(2):120-126.

[3] 唐泽军,雷廷武,张晴雯,等.雨滴溅蚀和结皮效应对土壤侵蚀影响的试验研究[J].土壤学报,2004,41(4):632-635.

[4] 贺秀斌,文安邦,张信宝,等.农业生态环境评价的土壤侵蚀退耕指标体系[J].土壤学报,2005,42(5):852-856.

[5] 陈杰,檀满枝,陈晶中,等.严重威胁可持续发展的土壤退化问题[J].地球科学进展,2002,17(5):720-720.

[6] Geiβler C, Nadrowski K, Kühn P, et al. Kinetic energy of throughfall in subtropical forests of SE China-effects of tree canopy structure, functional traits, and biodiversity [J]. PLoS One, 2013,8(2), e49618.

[7] Geiβler C, Lang A C, Oheimb G V, et al. Impact of tree saplings on the kinetic energy of rainfall: The importance of stand density, species identity and tree architecture in subtropical forests in China [J]. Agricultural Forest Meteorology. 2012,156(12):31-40.

[8] 殷晖,关文彬,薛肖肖,等.贡嘎山暗针叶林林冠对降雨能量再分配的影响研究[J].北京林业大学学报,2010,32(2):1-5.

[9] 谢春华.长江上游暗针叶林生态系统结构及其对降雨的再分配功能[D].北京:北京林业大学,2002.

[10] Eunice M A, Maria J G, Helba A Q P, et al. Ecohydrology in a Brazilian tropical dry forest: Thinned vegetation impact on hydrological functions and ecosystem service [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2020, 27(10), 100649.

[11] Bonnesoeur V, Locatelli B, Guariguata M R, et al. Impacts of forests and forestation on hydrological services in the Andes: A systematic review [J]. Forest Ecology and Management, 2019,433(11):569-584.

[12] 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.

[13] Brandt J. The transformation of rainfall energy by a tropical rain forest canopy in relation to soil erosion [J]. Journal of Biogeography, 1988, 15(1): 41.

[14] 余新晓.森林植被减弱降雨侵蚀能量的数理分析(续)[J].水土保持学报,1988,2(3):90-96.

[15] 周跃,李宏伟,徐强.云南松林的林冠对土壤侵蚀的影响[J].山地学报,1999,17(4):324-328.

[16] 吴光艳.陕西杨凌人工林内外天然降雨雨滴特性[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2012.

[17] 曹光秀,赵洋毅,段旭,等.滇中高原常绿阔叶林对天然降雨雨滴动能的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(3):146-151,159.

[18] 李振新,欧阳志云,等.卧龙地区针叶林及亚高山灌丛对降雨的雨滴谱及能量的影响[J]. 水土保持学报,2004,

18(4):125-133.

[19] 孙庆艳,余新晓,杨新兵,等.密云水库集水区防护林不同树种林冠截留研究[J]. 中国水土保持科学, 2009,7(3):76-81.

[20] 黄团冲,贺康宁,王先棒.青海大通白桦林冠层降雨再分配与冠层结构关系研究[J]. 西北林学院学报, 2018,33(3):1-6.

[21] 曹光秀,王克勤,赵洋毅,等.中亚热带地区常绿阔叶林地表径流和产沙影响机制[J].水土保持学报,2018,32(4):30-36.

[22] 秦富仓,余新晓,张满良,等.植被对小流域汇流及侵蚀产沙影响研究[J].干旱区资源与环境,2005,19(5):165-168.

[23] 展小云,郭明航,赵军,等.基于粒子成像瞬态测量技术的雨滴微物理特性及降雨动能研究[J].农业工程学报,2018,34(2):107-113.

[24] Song Zhengshan, Steffen S, Zhu Panpan, et al. Spatial distribution of LAI and its relationship with throughfall kinetic energy of common tree species in a Chinese subtropical forest plantation [J]. Forest Ecology and Management, 2018,425(5):189-195.

[25] 王恒松,张芳美.黔西北乡土植物篱对典型石漠化区石灰土侵蚀动力学过程的调控[J].水土保持学报,2019,33(4):16-23,80.

[26] 赵赫,文志,刘艳秋,等.典型热带森林生态系统林冠穿透雨特征及影响因素[J].生态科学,2020,39(4):74-80.

[27] 侯沛轩,孙佳美,余新晓,等.模拟降雨条件下植被调控坡面水沙输出过程研究[J].土壤,2016,48(4):819-823.

[28] 国家林业局调查规划设计院. GB/T26424-2010 森林资源规划调查技术规程中国标准书号[S].北京:中国标准出版社,2011.

[29] 国家林业局调查规划设计院,黑龙江省林业监测规划院.LY/T 2908—2017 主要树种与龄组划分[S].北京:中国标准出版社, 2017.

[30] 张泽铭,张翠翠,侯红运,等.《降水量等级》(GB/T 28592—2012)应用实例[J].现代农业科技,2016(19):223-226.

[31] 李桂静,周金星,崔明,等.南方红壤区马尾松林冠对降雨雨滴特性的影响[J].北京林业大学学报,2015, 37(12): 85-91.

[32] 史宇,余新晓,张建辉,等.北京山区侧柏林冠层对降雨动力学特征的影响[J].生态学报,2013,33(24):7898-7907.

[33] Geizler C, Kühna P, Bohnke M, et al. Splash erosion potential under tree canopies in subtropical SE China [J]. Catena, 2012,91(10):85-93.

[34] 康文星,邓湘雯,赵仲辉.林冠截留在杉木林生态系统能量转换过程中的作用[J].林业科学,2007,43(2):15-20.

[35] 吴光艳, 成婧, 等. 黄土高原南部人工林林冠对降雨特征的影响分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(4): 32-35,42.

(上接第 39 页)

[18] 毛瑢,孟广涛,周跃.云南省金沙江流域水土流失防治对策研究[J].水土保持研究,2006,13(1):184-185.

[19] Lukina N V, Orlova M A, Bakhmet O N, et al. The influence of vegetation on the forest soil properties in the Republic of Karelia [J]. Eurasian Soil Science, 2019,52(7):793-807.

[20] 王震洪,段昌群,文传浩,等.滇中 3 种人工林群落控制土壤侵蚀和改良土壤效应[J].水土保持通报,2001,21(2):23-27.

[21] 李焱秋,戴全厚,任青青,等.喀斯特浅层裂隙土壤垂向渗透性及影响因素[J].水土保持学报,2020,34(3):150-155.

[22] 张晓勉,张金池,王云南,等.钱塘江源头主要植被类型土壤抗剪强度研究[J].水土保持研究,2015,22(4):79-84.

[23] 王楠,赵友朋,郭晓平,等.土壤含水率和干容重对不同植被类型边坡土壤抗剪强度的影响[J].水土保持通报,2018,38(6):88-94.

[24] 李想,王瑄,盛世博,等.不同土地利用方式土壤抗剪强度及其影响因子分析[J].水土保持学报,2016,30(5):102-106.

[25] 吴丽萍,陈洪松,付智勇,等.喀斯特岩溶裂隙对地下径流和氮素垂直渗漏的影响[J].水土保持学报,2017,31(5):64-71.

[26] Yan Youjin, Dai Quanhou, Wang Xiangdong, et al. Response of shallow karst fissure soil quality to secondary succession in a degraded karst area of Southwestern China [J]. Geoderma, 2019,348:76-85.

[27] 雷俐,魏兴琥,徐喜珍,等.粤北岩溶山地土壤垂直渗漏与粒度变化特征[J].地理研究,2013,32(12):2204-2214.

[28] 杨宇琼,戴全厚,严友进,等.黔中喀斯特坡地浅层裂隙土壤机械组成对降雨的响应[J].应用生态学报,2019,30(2):545-552.

[29] 徐宗恒,黄丽苹,杨正辉,等.不同根系含量对山原红壤抗剪强度的影响[J].水土保持通报,2019,39(5):54-59.

[30] 张晓明,王玉杰,夏一平,等.重庆缙云山典型植被原状土抗剪强度的灰色关联度分析与评价[J].水土保持研究,2007,14(2):145-147.

[31] Su Lijun, Zhou Wanhuan, Chen Weibin, et al. Effects of relative roughness and mean particle size on the shear strength of sand-steel interface [J]. Measurement, 2018,122:339-346.

[32] 孙泉忠,郭菁,王钰,等.岩溶地区不同利用方式土壤土力学特性垂直变化特征[J].中国岩溶,2013,32(3):287-291.