

滇中高原常绿阔叶林对天然降雨雨滴动能的影响

曹光秀^{1,2}, 赵洋毅^{1,2}, 段旭^{1,2}, 薛杨^{1,2}

(1. 西南林业大学生态与水土保持学院, 昆明 650224; 2. 国家林业局云南玉溪森林生态系统国家定位观测研究站, 昆明 650224)

摘要: 为探究滇中高原优势群落常绿阔叶林植被对降雨雨滴动能的影响, 于2016年和2017年5—9月, 在天然降雨条件下运用自计雨量计和滤纸色斑法, 通过定位监测磨盘山常绿阔叶林林外降雨和林内穿透雨特征及其雨滴特性, 针对不同降雨条件研究了常绿阔叶林对雨滴动能等特征的影响。结果表明: 林外的雨滴个数比林内降雨的雨滴个数多61.7%; 随着雨量的增大, 雨滴直径分布规律也呈逐渐增大的趋势; 在小雨条件下, <0.5 mm林外降雨雨滴直径数量占总雨滴数的40.85%, 而同径级雨滴林内仅占总数的12.22%, 且以0.5~3.5 mm的雨滴数量所占比例较大; 当林外降雨雨滴直径超过4.5 mm, 雨滴终点速度稳定在9.34 m/s; 林内降雨雨滴直径超过4.1 mm, 雨滴终点速度稳定在7.05 m/s; 同一雨滴径级下, 暴雨条件下的雨滴动能比小雨时的动能大98.29%, 且随降雨量的增大而增大, 林内累积雨滴动能的峰值达到林外降雨的20.68%。随着雨滴直径的增大, 穿透雨势能、降雨总势能及林冠截留势能均呈逐渐增大的趋势, 缓冲势能比穿透雨势能大46.59%, 占总势能的65.18%。林冠层对小雨具有截持和增大林内降雨雨滴直径的作用, 且造成林内降雨的滞后性, 林冠对天然降雨的降雨速度、势能及动能起到明显的缓冲作用。

关键词: 雨滴动能; 常绿阔叶林; 雨滴大小; 雨滴终速度; 滇中高原

中图分类号: S715.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0146-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.03.023

Effect of Evergreen Broad-leaved Forest on Kinetic Energy of Natural Rainfall Raindrop in Central Yunnan Plateau

CAO Guangxiu^{1,2}, ZHAO Yangyi^{1,2}, DUAN Xu^{1,2}, XUE Yang^{1,2}

(1. Southwest Forestry University College of Ecology and Soil & Water Conservation,

Kunming 650224; 2. Yuxi Forest Ecosystem Research Station, China's State Forestry Administration, Kunming 650224)

Abstract: Using rain recorder and filter paper stain method, the effects of evergreen broad-leaved forest on raindrop kinetic energy of Mopan Mountain in Yunnan Plateau were explored, during the period from May to Sep in 2016 and 2017. The results showed that the number of raindrops was more than throughfall raindrop by 61.7%. With the increase of rainfall, the raindrop diameter increased gradually. Raindrops with diameter < 0.5 mm of outside of forest accounted for 40.85% of total number of raindrop in the light rain condition, while the proportion was only 12.22%, and the number of raindrop with 0.5~3.5 mm diameter accounted for a larger proportion than outside forest. When raindrop diameter > 4.5 mm in outside forest, the raindrop terminal velocity stabilized around 9.34 m/s. When raindrop diameter > 4.1 mm, the speed was about 7.05 m/s. Rain kinetic energy at the rainstorm condition was larger than it in light rainfall by 98.29%, and with the increase of rainfall, the peak in cumulative raindrop kinetic energy reached 20.68% rainfall outside of the forest. With the increase of raindrop diameter, the throughfall potential energy, total rainfall potential energy and canopy interception potential energy both showed a gradual increase trend. The buffering potential energy was 46.59% larger than that of penetrating rain potential, accounting for 65.18% of the total potential energy. The canopy layer has the function of retention and increase of raindrop, which also cause the rainfall lag in forest, and the had obvious buffering effect on the rainfall speed, potential energy and kinetic energy of natural rainfall.

Keywords: raindrop kinetic energy; evergreen broad-leaved forest; raindrop size; raindrop final velocity; central Yunnan Plateau

收稿日期: 2017-09-15

资助项目: 国家自然科学基金项目(31760149, 31560233); 云南省教育厅重点项目(2015Z141); 国家林业局林业科技创新平台运行项目(2018-LYPT-DW-162)

第一作者: 曹光秀(1993—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事森林生态学研究。E-mail: 2207043897@qq.com

通信作者: 赵洋毅(1980—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水土保持和生态恢复研究。E-mail: yz301@foxmail.com

土壤表层受降雨侵蚀的动力主要来自于雨滴动能,表层土壤对雨滴的动能起到缓冲作用,在此过程中,原有的土壤结构层被破坏,土壤颗粒被分散,最终导致土壤中降雨入渗量下降及地表产流量的增加^[1]。地表植被主要从两方面缓解土壤侵蚀,一方面植被地上部分能削减雨滴动能;另一方面植被层根部能改善土壤层的理化性质,从而综合缓解降雨及坡面径流对土壤的侵蚀作用^[2]。因此,研究森林植被对雨滴动能的削减作用是研究森林生态水文效应的关键问题。将森林植被对降雨动能削减及林冠对降雨进行再分配进行量化研究,能够更加明确森林植被对降雨特征的影响机理。

不同植被类型与雨滴动能的关系研究从20世纪50年代已陆续展开^[3],如Barros等^[4]对雨滴动能与土壤溅蚀方面的研究等。截至目前,已获得较丰硕的成果,主要围绕雨滴特征研究方法及雨滴特征与降雨、土壤侵蚀关系等方面^[5-7]。Sether等^[8]研究发现雨滴在降落过程中形状会改变,并分别利用公式 $E = (mv^2)/A$ 和 $EQ = IT(mv^2/A)$ 模拟计算单个雨滴能量和次降雨能量。但由于实际降雨不可能只是单个存在,且降雨过程中雨滴也会相互影响而使降雨动能也发生相应变化,因此该方法在实际研究工作中并不实用。Smith^[9]根据雨滴大小分布和雨滴终端速度来推算降雨动能,并建立了降雨强度与动能的函数关系。已研究^[3,10-11]表明,不同地区的降雨类型和气象条件下,雨滴特征差异较大,从而造成不同程度的土壤侵蚀;此外,还有较多学者通过开展人工模拟降雨的方法,研究雨滴动能等特征变化及与侵蚀产沙的关系^[12-14];而相关研究主要以人工林和模拟研究为主^[1,15-16],对天然降雨方面的研究相对较少^[17-18]。

云南具有干湿季明显、雨季较集中、雨量较大的特点,每年雨季许多地区都会发生不同程度的水土流失等自然灾害。常绿阔叶林群落是滇中高原地区比较典型的地带性植被,林分通过对降雨的再分配作用能有效地保持地表水分,对降雨的蓄存与保持水土具有不可替代的作用^[19]。因此,本研究选取滇中高原典型植被常绿阔叶林为研究对象,探讨在不同天然降雨条件下林分对雨滴的数量、大小组成、速度、能量变化以及时空分布的影响,以期为区域土壤侵蚀机理和水土流失的防治提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省玉溪市新平县磨盘山国家森林公园内,区域总面积7 232.1 hm²,海拔1 260~2 614.4 m,相对高差1 354.4 m,地理坐标为101°55′13″—102°04′00″E,23°54′00″—24°02′30″N。南北最长15.47

km,东西最宽14.81 km。磨盘山地处北回归线以北,具有典型的亚热带高原季风气候类型。年均气温17~20℃,极端最低温-8.6℃,磨盘山顶≥10℃,积温为4 800℃,年降水量均在1 000 mm以上。土壤岩基以砂岩类岩石为主,种类较多,有砂岩、砂页岩、紫色砂岩、红色砂岩等,风化较强烈。由于气候条件优越,磨盘山生物种群复杂,物种丰富,据不完全统计,共有种子植物324种,分属98科227属,其中有国家二级保护植物野茶树(*Eurya alata Kobuski*)、楠木(*Phoebe nanmu*)等。研究区常绿阔叶林主要树种有光叶柯(*Lithocarpus mairei*)、糙皮桦(*Betula utilis*)、牛筋条(*Dichotomanthus tristaniaecarpa*)、高山栎(*Quercus semicarpifolia*)、木荷(*Schima superba Gardn*)、长叶栎(*Lithocarpus confinis*)、野櫻桃(*Cerasus pseudocerasus*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 降雨观测 样地的选择依托云南玉溪森林生态系统定位观测研究站布设的100 m×100 m常绿阔叶林固定样地,样地海拔2 362 m,坡向为东北向,中坡位,坡度28°,植被胸径22.05 cm,平均树高15.25 m,树龄75年,平均冠幅直径7.15 m,密度934株/hm²,郁闭度89.34。各类数据监测时间为2016年和2017年的5—9月。

(1)林外大气降雨观测。在距离样地500 m的空旷位置建有全自动气象观测场,场地内布设Envidata-thies全自动野外固定气象站,具有实时监测降雨量、风速、风向、辐射、气温、气压、相对湿度等气象数据的功能。并在观测场内设有2个U30自记雨量计,进行对比参考,以确保研究区大气降雨数据的真实可靠。

(2)林内穿透降雨观测。在100 m×100 m大样地内设置1个20 m×20 m的标准固定样地,布设8个标准雨量筒和1个自记雨量计,用于监测林内穿透降雨特征,雨量筒布设情况见表1。

表1 2016—2017年5—9月常绿阔叶林林下雨量筒放置位点及对应的上方林冠特征

雨量筒号	经纬度	距离树干	冠层	盖度	叶面积指数
		距离/m	厚度/m		
1	23°56′28.29″N,101°58′50.41″E	0.96	8.5	0.83	4.12
2	23°56′28.05″N,101°58′50.13″E	1.20	9.1	0.89	3.90
3	23°56′28.22″N,101°58′49.83″E	0.85	10.8	0.76	3.87
4	23°56′28.53″N,101°58′50.11″E	1.45	7.4	0.80	3.57
5	23°56′28.42″N,101°58′50.41″E	2.15	8.3	0.82	3.89
6	23°56′28.20″N,101°58′50.23″E	3.00	6.9	0.78	3.49
7	23°56′28.57″N,101°58′50.46″E	1.52	9.7	0.85	3.85
8	23°56′28.63″N,101°58′50.32″E	1.32	10.5	0.72	4.07
9	23°56′28.27″N,101°58′50.10″E	0.78	8.0	0.96	4.09

1.2.2 雨滴大小测定 采用传统的滤纸色斑法对雨滴直径大小进行测量,具体做法是采用曙红粉和滑石

粉按质量比 1 : 10 的比例均匀混合,用毛刷将其均匀涂抹在杭州特种纸业有限公司生产的 15 cm 的定性滤纸上。每次降雨前将涂抹好颜料的滤纸平铺在 20 cm×50 cm 的聚乙烯塑料板上,将塑料板带到常绿阔叶林样地内布设有雨量筒的样树附近,接收落下来的林内穿透雨雨滴。于每场降雨开始后,同时对林内外降雨进行雨滴取样,待色斑布满滤纸后取下滤纸换上新的刷有涂料的滤纸,最后收集好布有色斑的滤纸到实验室采用游标卡尺进行雨滴直径大小测定,并记录数据。

1.2.3 数据处理

(1)数据选取。根据后期整理的林内外降雨数据(雨强、雨量、降雨历时)按照中华人民共和国国家标准《降水量等级(GB/T 28592—2012)》^[20]进行划分,选取其中 2016 年和 2017 年 5—9 月的每种雨量级的 3 场降雨数据,共 12 场降雨采集的雨滴直径大小数据进行分析,12 场降雨的具体情况见表 2。

表 2 2016—2017 年 12 场降雨基本特征和雨滴情况

降雨时间	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	雨滴数量
2016-05-14	23.20	13.8	中雨	12:00	6	756
2016-05-26	9.99	6.8	小雨	11:45	10	345
2016-06-15	15.00	1.2	中雨	12:30	6	463
2016-07-03	194.97	28.2	暴雨	13:25	4	904
2016-08-09	29.30	15.4	大雨	18:00	5	938
2017-05-25	5.42	1.6	小雨	18:05	10	278
2017-05-31	6.31	2.6	小雨	08:00	10	352
2017-06-25	146.43	21.6	暴雨	16:17	4	987
2017-07-09	21.20	14.0	中雨	10:00	6	540
2017-07-22	311.52	41.4	暴雨	09:55	4	1340
2017-08-03	43.81	36.6	大雨	13:08	5	1105
2017-08-24	34.42	10.6	大雨	14:02	5	892

(2)雨滴终点速度。为了获得精确的雨滴直径大小,本研究事先对色斑直径和雨滴直径之间的函数关系进行率定。首先,用精确到千分位的电子天平称量注射器和清水的总质量(M, g),然后在滤纸上用注射器滴落水滴,试验过程中尽量避免滤纸上的色斑不要有重叠,直到滤纸上布满色斑,再次称量注射器和剩余清水的质量 m , 求出质量差和水滴总数 n , 即可算出每一个水滴的直径 $d(mm)$:

$$d = \sqrt[3]{\frac{6(M-m)}{n\rho\pi}}$$

式中: ρ 为水的密度(g/cm^3)。

在此过程中需更换不同大小的注射器针头(本次率定分别用了 2, 5, 10 mL 容量的注射器),重复以上操作,对实际水滴直径和与其对应形成的色斑直径使用 Excel 进行回归分析,得到二者间的函数关系式。

本研究通过试验率定,得出二者的函数关系式为:

$$d = 0.398D^{0.71}, R^2 = 0.970$$

式中: D 为色斑直径(mm)。

雨滴动能是由雨滴终点速度决定的,分林外和林内降雨的终点速度计算。

本研究林外降雨的雨滴终点速度计算按雨滴直径大小分 2 种情况来计算^[18]:

① $d < 1.9 mm$ 时,用修正的沙玉清公式计算:

$$V_{林外} = 0.496 \times 10^{\sqrt{28.32 + 6.52 \lg 0.1d - (\lg 0.1d)^2 - 3.66}}$$

② $d \geq 1.9 mm$ 时,用修正的牛顿公式计算:

$$V_{林外} = (17.20 - 0.844d) \sqrt{0.1d}$$

林内雨滴终点速度计算公式:

$$V_{林内} = V_{林外} [1 - \exp(-2gh/V_{林外}^2)]^{1/2}$$

式中: d 为雨滴直径(mm); $V_{林外}$ 为林外降雨雨滴接触地面的终点速度(m/s); $V_{林内}$ 为林内降雨雨滴接触地面的终点速度(m/s); h 为林内降雨雨滴降落高度(m); g 为重力加速度, $g = 9.8 m/s^2$ 。

(3)雨滴动能。先计算单个雨滴的降雨动能,再对其求和计算总动能,最后推算出单位面积的降雨总动能^[3]:

$$\textcircled{1} \text{ 单个雨滴动能计算公式: } e = \frac{mv^2}{2} = \frac{\rho\pi d^3 v^2}{12}$$

$$\textcircled{2} \text{ 雨滴总动能计算公式: } E_{总} = \sum_{i=1}^n e_i$$

$$\textcircled{3} \text{ 单位面积降雨动能计算公式: } E = \frac{E_{总}}{HS}$$

式中: e 为单个雨滴动能(J); ρ 为水的密度,标准状态下 $\rho = 1 g/cm^3$; v 为雨滴终点速度(m/s); i 为雨滴个数; $E_{总}$ 为雨滴总动能($J/(m^2 \cdot mm)$); H 为林内雨滴降雨深(mm); S 为滤纸面积(m^2)。

(4)雨滴势能。根据殷晖等^[17]的研究:

①降雨接触林冠顶部时的势能

$$E_{势} = mgH_{树}; m = \frac{\pi d^3 \rho}{6}$$

式中: $E_{势}$ 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)。

②雨滴经过林冠到达地面时势能的减少量为:

$$\Delta E_{穿} = m_{穿} g (H_{树} - h)$$

式中: m 为穿透雨降雨质量(g); h 为平均枝下高度(m); $(H_{树} - h)$ 为林冠平均厚度(m)。

③总的势能减少量计算公式:

$$\Delta E = \Delta E_{穿} + \Delta E_{林冠截留}$$

式中: $\Delta E_{林冠截留}$ 为林冠截留降雨未达到地面损失的势能(J)。

2 结果与分析

2.1 不同降雨量下雨滴分布特征

对不同降雨量条件下选取的 12 场降雨中采集的雨滴数据进行处理。从表 3 可以看出,不同降雨条件下林内外的雨滴分布情况各不相同。小雨情况下,雨

滴直径主要分布在 0.125~2.5 mm,大径级雨滴的数量随着雨滴直径的增大逐渐减少,采样时间相同的情况下针对相同雨量级的 3 场降雨累积数据,林外的雨滴个数比林内降雨的雨滴个数多 61.7%;随着雨量级的增大,雨滴直径分布规律也呈逐渐增大的趋势,到暴雨时,雨滴的直径大小主要集中在 1.5~7.5 mm,最大雨滴直径达到 8.5 mm 以上。

从表 3 还可看出,林外的雨滴直径 < 0.5 mm 的数量占总雨滴数的 40.85%,而林内此径级的雨滴数只占总数的 12.22%,相比之下 0.5~3.5 mm 的雨滴数量更多。出现上述规律的可能原因是林外降雨雨滴直径随着雨量级的增而增大,林外降雨产生的大雨滴多分布在大雨及暴雨降雨条件下,而小雨条件下多分布较小直径的雨滴。林内降雨雨滴直径多集中分布在 1.5~4.5 mm,主要是林冠层对大雨滴有截持作用,对小雨滴有聚集作用,当聚集的雨滴直径达到一定值时,雨滴重力作用大于枝叶的托持作用,雨滴才会降落到地面,因此即使林外降雨雨滴直径较大时林内降雨雨滴直径分布主要集中在中雨滴直径状态。

表 3 不同雨量级下雨滴大小分布情况

雨滴 直径/mm	林外雨滴个数				林内雨滴个数			
	小雨	中雨	大雨	暴雨	小雨	中雨	大雨	暴雨
<0.125	46	0	0	0	0	0	0	0
0.125~0.25	107	11	0	0	0	4	9	61
0.25~0.5	132	34	17	0	33	7	18	77
0.5~1.5	194	292	242	68	88	21	32	99
1.5~2.5	119	342	483	139	70	81	109	143
2.5~3.5	67	254	539	284	41	158	125	154
3.5~4.5	26	170	467	421	23	70	266	259
4.5~5.5	8	95	214	592	10	60	140	171
5.5~6.5	6	52	98	418	5	53	56	112
6.5~7.5	0	26	53	175	0	29	28	96
7.5~8.5	0	0	18	41	0	0	17	19
>8.5	0	0	0	19	0	0	4	3
合计	705	1276	2131	2157	270	483	804	1192

2.2 林分对雨滴速度的影响

雨滴速度是指雨滴在空气中的下降末速度,不同直径的雨滴终点速度不同^[21]。下降的雨滴主要受重力和空气阻力的作用,雨滴由静止状态到做加速度运动过程中,阻力由小变大,最后阻力与重力相平衡,雨滴做匀速下落运动,此时的末速度即雨滴下落终点速度。雨滴下落速度在达到终点速度之前,速度随降落高度而变化,说明降落高度达到一定值时,雨滴降落速度才能到达终点速度^[22]。姚文艺等^[23]对南方地区降雨研究得出对于雨滴直径超过 3 mm 的大雨滴,达到最大下落速度的 99% 时下落高度必须大于 12 m。

林外降雨的雨滴在降落地面之前已经达到终点速度,本研究中常绿阔叶林样地的平均树高为 13.50 m,林冠下的高度平均为 6 m,由于树高的限制因此

林内降雨的速度并未达到终点速度。从图 1 可以看出,林内外雨滴终点速度均随着雨滴直径的增大而呈现出增大的趋势,二者之间存在明显的正相关性,但增大到一定值后二者关系趋于稳定,可能是因为大雨滴降落到地面的时间较短、损耗的动能及势能较少、到达地面的终点速度较弱,效果不明显;当雨滴直径达到一定值后,最终还受到雨滴终点速度计算公式的限制。当直径逐渐增大后通过公式计算出来的终点速度值会趋于稳定,当然中间还会受到其他气象条件的影响,如风速、风向等,因此用公式计算得出的终点速度值虽有规律可循,但实际上还存在一定的误差。林外降雨雨滴直径 > 4.5 mm 后,终点速度稳定在 9.34 m/s;林内降雨雨滴直径 > 4.1 mm 后,终点速度稳定在 7.05 m/s。总体来看,当雨滴直径为 0.125~1.68 mm,林内外雨滴速度无限接近,当直径 > 1.73 mm 后,对于同一径级的雨滴林外的雨滴终点速度比林内的雨滴速度大。

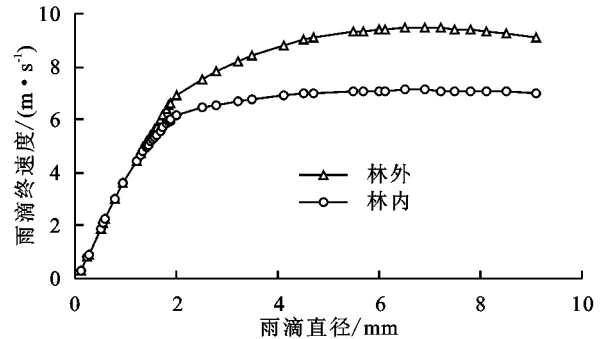


图 1 林内外雨滴终点速度与雨滴直径的关系

2.3 不同降雨强度下雨滴动能特征

2.3.1 林外降雨雨滴动能特征 通过选取 2 min 内不同降雨条件下 12 场降雨的雨滴数据,分析得出各降雨条件下林内外雨滴动能的变化规律。从图 2 可以看出,林外降雨雨滴动能随雨滴直径的增大呈逐渐增大的趋势,达到一定值后趋于稳定,说明林外降雨雨滴动能与雨滴直径和雨量呈明显的正相关性。同一雨滴径级暴雨条件下的雨滴动能比小雨条件下的雨滴动能大 98.29%,雨滴动能随雨量级的增大暴雨条件下的雨滴动能增大更明显,特别是在雨滴直径达到 3.5 mm 时雨滴动能增大的最快,在雨滴直径 > 5 mm 后动能趋于稳定,暴雨条件下稳定在 112.15 J/(m²·mm),小雨条件下稳定在 2.2 J/(m²·mm)。

2.3.2 林内降雨雨滴动能特征 林下降雨雨滴动能随雨滴直径的增大也存在明显的增大趋势,大雨量级条件下雨滴直径在 1.5~2.5 mm 上升趋势较快,在 3.5 mm 时,降雨动能达到峰值 16.25 J/(m²·mm),随后出现下降趋势,最后稳定在 8.2 J/(m²·mm)。总体来看,无论是大雨、中雨还是暴雨,雨滴动能达到一个峰值后都有微弱下降的趋势,与林外降雨不同(林外雨滴动能呈现增大的趋势,没有达到峰值后有

所减小),理论上雨滴动能应该随着雨滴直径的增大而增大,但图 3 采用雨滴的累积动能,动能减小的原因与雨滴个数存在必然联系,可以推测出林冠层繁茂的枝叶对雨滴有截留作用,相比较大的暴雨或较小的中雨和小雨,在大雨条件下的截留效果最为明显。说明雨量级较小时雨滴对土壤的冲击力较小,林冠对雨滴动能的截留效果较小;当暴雨条件下雨量达到一定值后,林冠虽能对其产生一定的截留效果,但截留效果没有大雨时明显,暴雨条件下雨滴大而且分布较密集,对林区土壤表层侵蚀力较强。

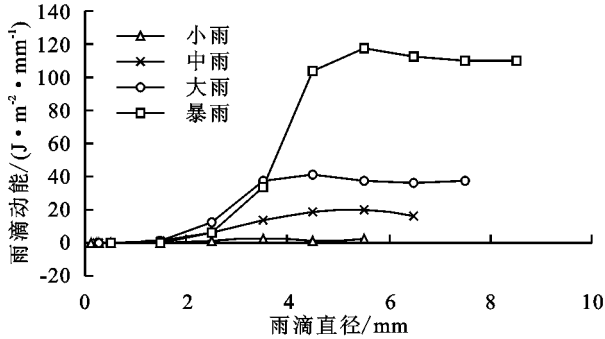


图 2 不同雨量级条件下林外雨滴动能与直径的关系

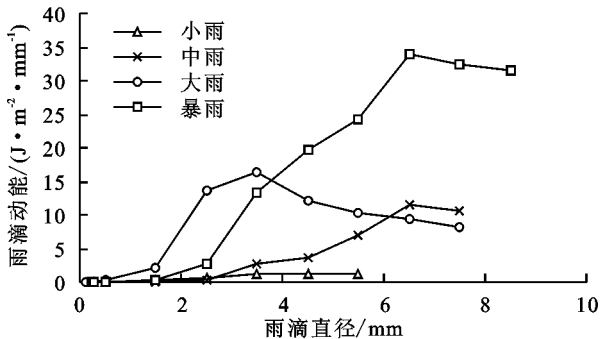


图 3 不同雨量级条件下林内雨滴动能与直径的关系

对比图 2 与图 3,林外累积雨滴动能明显大于林内降雨的雨滴动能,造成这一结果的主要原因为雨滴直径大小、雨滴数量和降雨高度。小雨条件下林内外的雨滴动能较小,但到中雨雨量级后林外的雨滴动能明显比林内大,到暴雨条件下最为明显,在同采样时间下,林内累积雨滴动能的峰值只达到林外降雨的 20.68%,并且林内降雨由于受林冠的影响,很大一部分林内降雨到达地面的终点速度未达到雨滴的终点速度。总之,随着雨量的增大,雨滴动能也有明显的增大趋势,可能是在单位时间内作用于单位面积雨滴个数增加、雨滴直径增大并且林冠对大雨滴的截持效果不明显,最终导致随着雨量级的增大,雨滴对单位面积的动力作用随之增大,因此林冠对强降雨条件下的雨滴动能削减作用最为明显。

2.4 林冠对雨滴势能的分配作用

对取样得到的林内雨滴直径数据进行相应的雨滴势能计算,得出不同径级下雨滴势能的分配规律(图 4)。研究表明,随着雨滴直径的增大,穿透雨势

能、降雨总势能及林冠截留势能均呈现逐渐增大的趋势,并且增加的趋势与降雨量呈正相关;特别是当雨滴直径 >4.5 mm 时,增大的趋势较明显;林冠对径级较大的雨滴缓冲的总势能比穿过林冠层降落到地面的雨滴势能大,经过计算,缓冲势能比穿透雨势能大 46.59%,占总势能的 65.18%。因此可以得出林冠对降雨势能起到明显的缓冲作用,从计算公式来看,其主要原因是林冠分散了大雨滴,减小雨滴直径,受树高的限制雨滴未达到终点速度,减少了林内降雨量;同时雨滴经过林冠的截留作用,使本应同时落到地面的雨滴分时间段分散开来,一部分被树冠截持的雨滴在降雨后期受风力及重力作用的综合影响才会降落,对地表层造成重力势能的冲击作用。因此,在水土流失严重的地区应该多种植林冠层较繁茂的林木,用于截留强降雨下产生的降雨势能,从而减少雨滴对体表土壤直接造成的重力冲击。

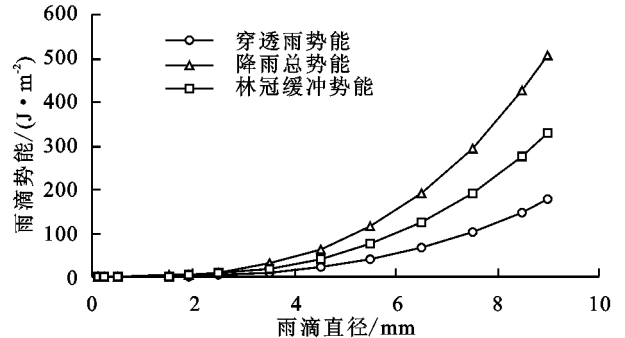


图 4 林冠对雨滴势能分配的关系

3 讨论

常绿阔叶林林冠层对降雨既有扩散作用也有聚集作用,经过林冠的雨滴被繁茂的枝干和树叶分散成更小径级的雨滴,此结果与史宇等^[10]、王琛^[16]和罗德^[24]的研究结果类似。在同取样时间内同面积的林外降雨雨滴个数比林内降雨雨滴个数多 61.7%,这与李桂静等^[3]对南方红壤地区的研究结果有所不同(林内雨滴数比林外高 19.5%),可能主要原因是常绿阔叶林林冠层比马尾松林枝叶更密集,对雨滴的截持效果更明显。本研究结果还与王彦辉^[22]对于毛竹、杉木和人工林刺槐林的雨滴大小分布不受降雨类型和降雨强度的影响结论存在一定的差异,可能原因是天然常绿阔叶林比人工林对降雨雨滴存在截留作用,进而造成不同雨量级条件下林内降雨雨滴随降雨量的增大而明显增大的趋势。随着雨量级的增大,雨滴直径分布规律也呈逐渐增大的趋势,符合徐军^[5]对于林冠对林区降雨具有截持作用的研究结果,小雨滴在林冠层被枝叶截持,只有当雨滴汇集成更大的水滴,水滴重力超过林冠的截持力时,在重力和风的作用下汇集的小雨滴才会降落到林地表面。因此林内雨滴径级即使在降小雨情况下比林外雨滴径级大,并且这也是林内降雨具有滞后性^[6,25]的原因之一。

研究还发现,林区降雨经过林冠层的截留、分散和聚集作用改变了雨滴原有的运动规律,造成林内外雨滴降落速度有所不同。林冠层对于大径级雨滴速度的影响比小径级雨滴大,林冠层对大径级雨滴起到截留作用,这与李振新等^[18]对于贡嘎山暗针叶林的研究结果类似。对林内外不同降雨条件下产生的雨滴动能进行分析比较,发现不同降雨强度下雨滴动能存在明显差异,与蔡丽君等^[11]对于黄土高原地区的研究结果相似,林冠对短而集中的暴雨动能削减作用更为明显。在同采样时间下,林内累积雨滴动能的峰值只达到林外降雨的 20.68%,比史宇等^[10]对于北京山区侧柏林 27%的雨滴动能削减率相对低一点,可能与植被林冠厚度及地区土壤差异有关。因此,在没有植被遮挡的降雨条件下,强而短时间的暴雨对地表土壤的冲击力较大,这也是在暴雨天气下山体容易发生滑坡和泥石流的原因。

降雨势能与土壤受侵蚀的关系联系起来^[21,26]研究表明,随着雨滴直径的增大,穿透雨势能、降雨总势能及林冠截留势能均呈逐渐增大的趋势,并且增加的趋势与降雨量呈正相关性^[27],林冠对降雨势能及动能起到明显的缓冲作用。因此,在水土流失严重的地区应该多种植林冠层较繁茂的林木,用于截留强降雨下产生的降雨势能,从而减少雨滴对体表土壤直接造成的重力冲击。林内降雨量、雨滴动能及势能经过林冠层的缓冲作用都起到削减的效果,但其变化大小与植被生长情况、降雨量、降雨强度、风向、风速等气象因素有很大关系。本研究仅针对不同降雨类型对同一林分进行研究,并不能对上述的这些影响因素做出——对应的结论,后期的研究需在此方面进行补充。

4 结论

(1)林内的雨滴数量和直径大小分布比林外低;雨滴直径分布随雨量级的增大而增大,大雨滴主要集中在大雨和暴雨量级,林内降雨具有滞后性。

(2)林冠层对于大径级雨滴速度的影响比小径级雨滴的大,林冠层对大径级雨滴的截留作用更明显。

(3)林外累积雨滴动能明显大于林内降雨的雨滴动能;同一雨滴径级,暴雨条件下的雨滴动能比小雨条件下的动能大 98.29%,雨滴动能随雨强的增大而增大,暴雨条件下最为明显;在同采样时间下,林内累积雨滴动能的峰值只达到林外降雨的 20.68%。

(4)林冠对径级较大雨滴缓冲的总势能比穿过林冠层降落到地面的雨滴大,林冠缓冲势能比穿透雨势能大 46.59%,占总势能的 65.18%;在强降雨的暴雨天气下,雨滴动能和势能均随降雨强度和雨滴直径的增大而增大。

参考文献:

[1] 张颖,牛健植,谢宝元,等.森林植被对坡面土壤水蚀作用的

动力学机理[J].生态学报,2008,28(10):5084-5094.

- [2] Carroll C, Merton L, Burger P. Impact of vegetation cover and slope on runoff, erosion, and water quality for field plots on a range of soil and spoil materials on central Queensland coal mines[J]. Soil Research, 2000, 38(2):313-328.
- [3] 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.
- [4] Barros A P, Prat O P, Testik F Y. Size distribution of raindrops[J]. Nature Physics, 2010, 6(6):232.
- [5] 徐军.林冠和枯落物结构对水分截留和溅蚀的影响[D].北京:北京林业大学,2016.
- [6] 李秀博.贡嘎山地区 4 种植被类型林冠截留特征及其对地下水补给的影响[D].成都:成都理工大学,2010.
- [7] 张颖,谢宝元,余新晓,等.黄土高原典型树种幼树冠层对降雨雨滴特性的影响[J].北京林业大学学报,2009,31(4):70-76.
- [8] Sether D M, Hu J S. The impact of Pineapple mealybug wilt-associated virus -1 and reduced irrigation on pineapple yield[J]. Australasian Plant Pathology, 2001, 30(1):31-36.
- [9] Smith P L. Raindrop size distributions: Exponential or gamma-does the difference matter[J]. Journal of Applied Meteorology, 2003, 42(7):1031-1034.
- [10] 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.
- [11] 蔡丽君,王国栋,张社奇.黄土高原降雨雨滴动能的分布规律[J].水土保持通报,2003,23(4):28-29.
- [12] 霍云梅,毕华兴,朱永杰,等.QYJY-503C人工模拟降雨装置降雨特性试验[J].中国水土保持科学,2015,13(2):31-36.
- [13] 郑腾辉,邢媛媛,何凯旋,等.雨滴击溅与薄层水流混合侵蚀的输沙机理[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(3):211-218.
- [14] 丛月,张洪江,程金花,等.华北土石山区草本植被覆盖度对降雨溅蚀的影响[J].水土保持学报,2013,27(5):59-62.
- [15] 周国逸.几种常用造林树种冠层对降水动能分配及其生态效应分析[J].植物生态学报,1997,21(3):250-259.
- [16] 王琛.北京地区森林小气候特征研究:以妙峰山为例[D].北京:北京林业大学,2010.
- [17] 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.
- [18] 李振新,欧阳志云,郑华,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):125-129.
- [19] 纪金华,章永江,张一平,等.哀牢山常绿阔叶林水源涵养功能及其在应对西南干旱中的作用[J].生态学报,2012,32(6):1692-1702.
- [20] 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):19-21.

续施加,这一特性也在0.5%的纳米碳施加过程中达到了最值,随后继续添加纳米碳,土壤中保持的水分也没有发生明显的变化。

(3)在脱湿状态下,土壤中施加纳米碳能够将水分保持在地表以下一定范围附近,阻止了水分的深层渗漏,有利于保持土壤水分。纳米碳体现出增强土壤持水性的能力,随纳米碳含量的升高,持水能力愈强,但纳米碳对增加土壤含水量不是一个线性关系,随着纳米碳含量的增加会出现一个峰值,接着对土壤含水量的增加会出现削弱的作用。运用 van Genuchten 模型对水分特征曲线进行拟合,得出加入不同含量纳米碳时,土壤的滞留含水率、饱和含水率、与进气值相关系数有明显增加,形状系数 n 则小于不加纳米碳的土壤。本文着重研究了纳米碳混合层对土壤水分入渗的影响,结果表明将纳米碳作为土壤改良剂施入土壤中,明显减缓了风沙土水分入渗速率,可以有效降低土壤水分流失。

参考文献:

- [1] 方国华,钟淋涓,毛春梅.水污染经济损失计算方法述评[J].水利水电科技进展,2004,24(3):54-56.
- [2] 田卫堂.我国水土流失现状和防治对策分析[J].水土保持研究,2008,15(4):204-209.
- [3] 唐克丽,张仲子,孔晓玲,等.黄土高原水土流失与土壤退化研究初报[J].环境科学,1984,5(6):5-10.
- [4] 唐克丽,张仲子,孔晓玲,等.黄土高原水土流失与土壤退化的研究[J].水土保持通报,1987,7(6):12-18.
- [5] 郑粉莉.坡面侵蚀分带侵蚀过程与降雨-土壤水分转化、土壤退化关系的研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(4):92-95.
- [6] 白红英,唐克丽,张科利,等.草地开垦人为加速侵蚀的人工降雨试验研究[J].中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊.1993,17:87-93.
- [7] 张兴昌,邵明安.侵蚀条件下土壤氮素流失对土壤和环境的影响[J].土壤与环境,2000,9(3):249-252.
- [8] 张宝庆,吴普特.近30年黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析[J].农业工程学报,2011,27(4):287-293.
- [9] 白春礼.纳米科技及其发展前景[J].科学通报,2001,46

(2),89-92.

- [10] 梅龙伟,张振华,丁开和.单壁碳纳米管电子输运特性的稳定性分析[J].物理学报,2009,58(3):1971-1979.
- [11] 王根伟.碳纳米管稳定性及其复合材料的制备和力学性质[D].太原:太原理工大学,2006.
- [12] 韩红梅,邱介山,周颖,等.碳纳米管的制备及其热稳定性和表面性质的研究[J].碳素技术,2001,115(4):5-9.
- [13] Lecoanet H F, Wiesner M R. Velocity effects oil fullerene and oxide nanoparticle deposition in porous media [J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(16): 4377-4382.
- [14] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils [J]. Soil Science Society of American Journal, 2006, 70(5): 1719-1730.
- [15] Tan S, Zhou B B, Wang Q J. Effect of nanocarbon on the hydraulic parameters and the solute transport process for disturbed loessial soil [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(1): 1-13.
- [16] 于健,雷廷武.不同PAM施用方法对土壤入渗和侵蚀的影响[J].农业工程学报,2010,26(7):38-44.
- [17] Wang J, Fu B, Qiu Y, et al. Soil nutrients in relation to land use and landscape position in the semi-arid small catchment on the loess plateau in China [J]. Journal of Arid Environments, 2011, 48(4): 537-550.
- [18] 谭帅,周蓓蓓,王全九.纳米碳对扰动黄绵土水分入渗过程的影响[J].土壤学报,2014,51(2):263-269.
- [19] 周蓓蓓,陈晓鹏,吕金榜,等.纳米碳对不同植被覆盖下黄土坡地降雨侵蚀的抑制效果[J].水土保持学报,2017,33(2):116-124.
- [20] 吴军虎,陶汪海,王海洋,等.羧钾基纤维素钠对土壤团粒结构及水分运动特性的影响[J].农业工程学报,2015,31(2):117,123.
- [21] 史文娟,梁嘉平,陶汪海,等.添加聚谷氨酸减少土壤水分深层渗漏提高持水能力[J].农业工程学报,2015,31(23):94-100.
- [22] 张启昌,孟庆繁,兰晓龙.黄土低山丘陵区湿润锋运动的试验研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(4):84-88.

(上接第151页)

- [21] Andréassian V. Waters and forests: From historical controversy to scientific debate[J]. Journal of Hydrology, 2004, 291(1/2):1-27.
- [22] 王彦辉.几个树种的林冠降雨特征[J].林业科学,2001,37(4):2-9.
- [23] 姚文艺,陈国祥.雨滴降落速度及终速公式[J].河海大学学报(自然科学版),1993,21(3):21-27.
- [24] 罗德.北京山区森林植被影响下的降雨动力学特性研究[D].北京:北京林业大学,2008.
- [25] 刘玉杰.天然落叶松林冠截留及林内雨延滞效应研究

[D].哈尔滨:东北林业大学,2016.

- [26] Nanko K, Mizugaki S, Onda Y. Estimation of soil splash detachment rates on the forest floor of an unmanaged Japanese cypress plantation based on field measurements of throughfall drop sizes and velocities [J]. Catena, 2008, 72: 348-361.
- [27] Nanko K, Onda Y, Ito A, et al. Spatial variability of throughfall under a single tree: Experimental study of rainfall amount, raindrops, and kinetic energy[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2011, 151(9): 1173-1182.