

湖南会同杉木人工林林冠截留特征及模拟

段汝航¹, 赵仲辉^{1,2}, 项文化^{1,2}

(1. 中南林业科技大学, 长沙 410004; 2. 湖南会同杉木林生态系统国家野外科学观测研究站, 湖南 会同 418307)

摘要: 利用湖南会同杉木林生态系统国家野外科学观测研究站第 II 集水区 2015 年的林外降雨、林内穿透雨、树干茎流及气候观测数据, 研究了杉木人工林林冠截留特征, 分析了影响林冠截留量的主要因子, 验证了 Gash(1995)模型模拟杉木人工林林冠截留的适用性。结果表明: (1) 试验区 5 月降雨次数最多, 8 月降水量最大; 次降雨以小雨频率最高, 以短时降雨为主; (2) 林下穿透雨、树干茎流及林冠截留均与林外降雨呈正相关; (3) Gash(1995)模型模拟的年累积林冠截留量为 235.62 mm, 与实测值(254.16 mm)具有较好的一致性; (4) 模型主要受冠层饱和持水量(S)值、平均蒸发率与平均降雨强度比(\bar{E}/\bar{R})值影响, 研究中 S 值取值合理, \bar{E}/\bar{R} 值有待进一步精确。

关键词: 杉木人工林; 林冠截留; Gash(1995)模型

中图分类号: S791.27

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)04-0320-05

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.04.050

Characteristics and Simulation of Canopy Interception of Chinese Fir Plantations in Huitong, Hunan Province

DUAN Ruhang¹, ZHAO Zhonghui^{1,2}, XIANG Wenhua^{1,2}

(1. Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004; 2. Huitong National Field Station for Scientific Observation & Experiment for Chinese Fir Ecosystem, Huitong, Hunan 418307)

Abstract: Based on the data of rainfall, throughfall, stemflow and climate at the II watershed of Huitong National Field Station for Scientific Observation & Experiment for Chinese Fir Ecosystem in 2015, we analyzed the canopy interception characteristics of Chinese fir forest, and the driving forces, and also verified the applicability of the Gash (1995) model to simulate the canopy interception. The results showed that; (1) The rain frequency was the highest in May and the amount of rainfall was the highest in August. In the whole year, the short-time light rainfall was the main form of single rainfall; (2) Throughfall, stemflow and canopy interception were positively correlated with the rainfall; (3) Gash (1995) model simulated annual cumulative canopy interception was 235.62 mm, which was in good agreement with the measured values (254.16 mm); (4) The accuracy of Gash (1995) model was mainly affected by canopy saturation capacity(S), and the ratio of average evaporation rate(\bar{E}) to average rainfall intensity(\bar{R}). In this study, the value S is reasonable, but the \bar{E}/\bar{R} remains further to be more accurate.

Keywords: Chinese fir plantation; canopy interception; Gash (1995) model

林冠截留是森林生态系统水分调节的起点,影响着地表—大气能量循环过程和水量平衡^[1]。它作为降雨到达地面过程中第一次水量分配^[2],不仅对降雨产生滞留作用,而且对雨水营养元素的输入产生重要影响^[3]。林冠截留常用林外降雨与林内穿透雨和树干茎流的差值来表示^[4],常受降雨因素^[5-6](降雨强度、持续时长等)与林分自身因素^[7](森林类型、林龄、林冠结构、郁闭度等)等多种因素的综合影响。

林冠截留模型是模拟林冠截留的有效公式,在分

析各种影响林冠截留的因子及林内降雨各过程间关系的基础上,推导出了许多经验、半经验理论模型^[8]。在已有的林冠截留模型中,较为完善的有 Rutter 模型和 Gash 解析模型。Rutter 模型^[9]主要是通过大量具有物理意义的参数来推导冠层数量平衡过程,该模型的应用限制性较大;Gash 解析模型^[10]是 Gash 在 Rutter 模型的基础上,引入一些简单的经验公式,对 Rutter 模型进行简化后形成的,但由于未考虑森林密度这一影响因子,模型在模拟开阔的森林区域

收稿日期:2017-02-21

资助项目:国家自然科学基金重点项目(31290221)

第一作者:段汝航(1990—),男,硕士研究生,主要从事森林生态研究。E-mail:631273414@qq.com

通信作者:赵仲辉(1964—),男,博士,副教授,主要从事森林生态研究。E-mail:zzh641014@126.com

时,常出现高估林冠截留量的现象。1995年 Gash 引入冠层覆盖度(c)这一参数对原模型进行改进,形成了 Gash(1995)模型^[11]。改进后的 Gash(1995)模型在热带雨林^[12]、高山栎林^[13]、刺槐林^[1]、青海云杉^[14]等的林冠截留模拟中都体现出了较好的适用性。

目前利用 Gash(1995)模型对南方杉木人工林林冠截留的模拟有刘胜涛等^[15]在江西大岗山的研究。本研究在湖南会同杉木林生态系统国家野外科学观测研究站的第 II 集水区进行了为期一年的连续观测,旨在分析湖南会同杉木人工林的降雨再分配特征和检验 Gash(1995)模型模拟会同杉木人工林林冠截留的适应性。

1 研究地概况与研究方法

1.1 研究地概况

试验地位于湖南会同杉木林生态系统国家野外科学观测研究站(109°45'E, 26°50'N)第 II 集水区。地貌为低山丘陵,海拔 270~400 m;地层属震旦纪板溪系灰绿色变质板页岩,土壤为山地黄壤,土层深厚,土壤肥力条件好;年均气温 16.8 °C,1 月平均气温 4.4 °C,7 月平均气温 26.3 °C;年均相对湿度 80%,年均降水量 1 312.6 mm,降雨主要集中于 4—8 月,属典型的亚热带湿润季风气候。第 II 集水区面积 2.0 hm²,杉木林于 1996 年营造,在原有的杉木林皆伐后经炼山、全垦整地,实生苗造林,林分密度为 1 920 株/hm²,2015 年平均树高为 15.0 m。

1.2 野外观测方法

大气降雨(P):在林外空旷地上安装一个虹吸式雨量计,用以连续记录大气降雨即林外降雨。

林内降雨($T+F$):在第 II 集水区选取 3 个 6 m×8 m 的试验样地,每个样地中安装 3 个虹吸式雨量计(承水面积约为 314 cm²),连续记录林内穿透雨量(T);将每个样地内所有树木的树干流通过硅胶管连到一个虹吸式雨量计,记录样地的树干茎流量(F)。

林冠截留(I):利用测得的林外降雨、穿透雨和树干茎流,根据水量平衡原理,得林冠截留量计算公式为:

$$I = P - T - F \quad (1)$$

气象数据:利用观测铁塔上梯度观测系统测定的冠上 2.0 m 高处的空气温度(t , °C)、相对湿度(U , %)、风速(u , m/s)和净辐射(R_n , W/m²)及土壤热通量(G , W/m²)数据,饱和差(D , hPa)的计算公式为:

$$D = 6.11 \times 10^{\frac{7.457}{237.3 + t}} \times \left(1 - \frac{U}{100}\right) \quad (2)$$

数据处理:先将虹吸式雨量计自记纸的自记标记进行时间修正,然后读出每 10 min 的降水量,以 8 h^[16]为间隔确定每场降雨的总量和持续时间。除林外降水外,穿透水和树干流还需乘以面积修正系数 r :

$$r = \frac{\text{雨量计器口面积}}{\text{实际承接水面积}} \quad (3)$$

穿透水 T 为林下 9 个虹吸式雨量计的平均,树干流为 3 个样地的平均。

1.3 Gash(1995)模型介绍

Gash(1995)模型是目前模拟林冠截留过程较为成功的模型之一,该模型既吸收了经验模型的有效方法,又结合了理论模型的推理基础,在实际应用中适用性强。该模型将每次降雨分为冠层未饱和、冠层饱和及树干饱和 3 个阶段,采用分项求和形式,将 3 个阶段的截留损失相加得到总的截留量。

冠层未饱和的 m 次降雨($P_G \leq P_G'$)的林冠截留量为:

$$I_1 = c \sum_{j=1}^m P_{G_j} \quad (4)$$

冠层饱和的 n 次降雨($P_G > P_G'$)的林冠截留量为:

$$I_2 = ncP_G' + \frac{\bar{E}}{R} \sum_{j=1}^n (P_{G_j} - P_G') + qS_t + P_t \sum_{j=1}^{n-q} P_{G_j} \quad (5)$$

则林冠截留量可以表示为:

$$I = I_1 + I_2 \quad (6)$$

式中: I 为林冠截留量(mm); P_{G_j} 为 j 次降水量(mm); P_G' 为冠层达到饱和的降水量(mm); \bar{E} 为平均蒸发率(mm/h); R 为平均降雨强度(mm/h); S_t 为树干持水能力(mm); c 为冠层覆盖度(%); q 为树干达到其饱和持水能力的降雨次数; P_t 为树干茎流系数。

模型中平均蒸发量(\bar{E})采用 Penman-Monteith 公式计算^[10],其中空气动力学阻力的计算使用 Gash 在 1995 年使用的方法^[11]。

2 结果与分析

2.1 林外降雨特征

试验地 2015 年年降水量 1 535.0 mm,7 月降水量最高,为 225.1 mm,3 月降水量最低,为 47.0 mm,降水主要集中在 5—8 月,占总降水量的 50.54%;全年降雨 105 次,其中 5 月降雨次数最多,为 15 次,8 月降雨次数最少,为 5 次,3—5 月降雨次数占总降雨次数的 40%(图 1)。按 24 h 降水总量划分雨级,分为小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨、特大暴雨。由图 2 可见,试验地全年小雨降雨频数最高,为 54 次,占总降雨次数的 51.43%,但其降雨总量最低,仅占年总降水量的 9.21%;降水量主要集中在暴雨、大暴雨两个等级中,占年总降水量约 53.54%,但其总降雨次数仅为 13 次,仅占总降雨次数的 12.38%;全年无特大暴雨。

由图 3 可见,2015 年试验地降雨历时以 <5 h 的短时降雨出现的频率最高,频率为 39.05%,占总降水量的 7.26%;降雨历时在 5~10 h 时,频率为

29.52%，占总降水量的 15.31%；降雨历时在 >25 h 时，频率为 5.71%，占总降水量的 13.52%。由此可见，试验区的降雨以短时降雨为主，长历时降雨出现的频率较低，但长历时降雨的降雨总量大。

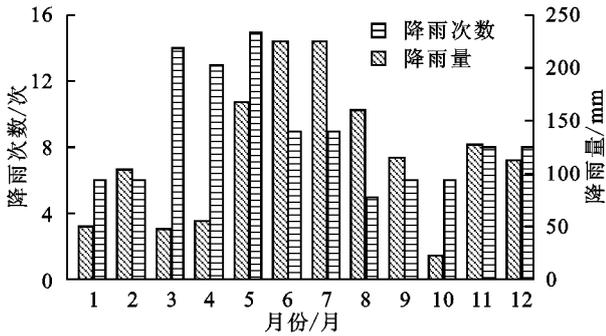


图 1 2015 年各月降雨量、降雨次数分布

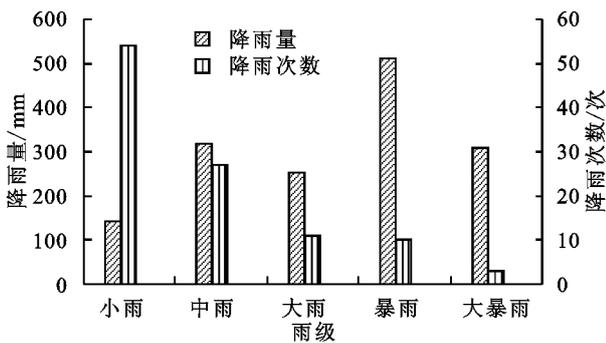


图 2 不同雨级的降雨量与降雨次数

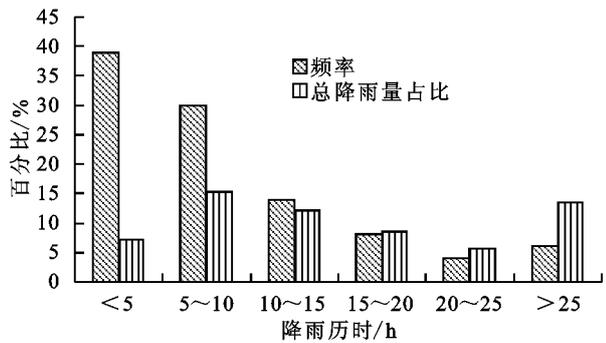


图 3 次降雨历时频率及总降水量占比

2.2 穿透雨特征

2015 年试验地产生穿透雨 95 次，总量为 1 252.6 mm，次穿透雨量最大值为 106.5 mm。

当林外降水量较小时，林内穿透雨几乎为零，随着降水量的增加，穿透雨成正比例增长。穿透雨(T)和林外降水量(P)之间呈显著的正相关，其拟合方程为： $T=0.901P-1.327$ ($R^2=0.999, p>0.01, n=95$)，由此可推算出产生穿透雨的林外降水量的临界值为 1.5 mm。

Gash(1995)模型中利用平均降雨强度来判断林冠是否达到饱和状态，相关研究均以平均降雨强度 ≥ 0.5 mm/h 为标准^[10]，但对湖南会同降雨特征分析可知，该值并不适合于本研究区。本文根据芦新建等^[18]的方法，穿透雨量和林外降水量拟合方程中的

常数即冠层饱和持水量 S ，即 S 为 1.327 mm。

2.3 树干茎流特征

树干茎流受多种条件的影响，如林冠特征、树皮粗糙度、气候特征、降雨强度等。2015 年试验地 105 次降雨事件中，产生树干茎流的降雨有 33 次，树干总茎流量为 28.04 mm。树干茎流(F)与林外降水量(P)呈显著的正相关，二者拟合关系为： $F=0.029P-0.261$ ($R^2=0.994, p>0.01, n=33$)。据郭明春等^[19]的研究可知，树干茎流量和林外降水量的拟合方程的常数即为树干持水能力，方程的系数为树干茎流系数， S_i 为 0.261 mm， P_i 为 0.029。

2.4 林冠截留特征

2015 年试验地单次林冠截留量为 0.25~12.27 mm，平均为 2.42 mm，林冠总截留量为 254.16 mm，截留率为 16.14%。由图 4 可见，林冠截留量(I)与降水量(P)呈幂函数关系： $I=0.854P^{0.470}$ ($R^2=0.934, n=105$)；林冠截留率(I_c)与降水量(P)呈幂函数关系： $I_c=0.854P^{-0.53}$ ($R^2=0.947, n=105$)。

当林外降水量较小时，林冠层表现为加湿时期，此时林冠截留量显著增加，林冠截留率快速下降；当林外降水量持续或增大，林冠持水量达到饱和，林冠截留量的增长趋于平缓，林冠截留率的下降亦趋于平稳，说明林外降水特征在一定程度上决定了林冠截留的变化特征。

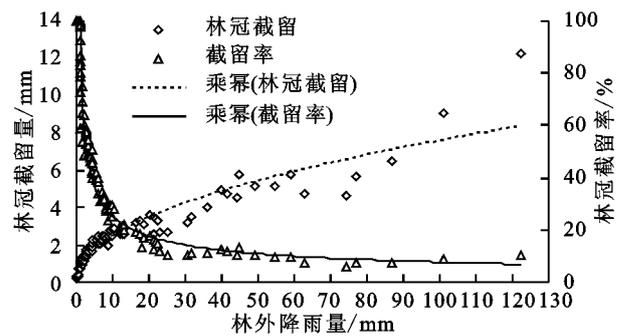


图 4 截留量、截留率与降水量的关系

3 林冠截留模拟

3.1 模型参数的敏感性分析

Gash(1995)模型中各参数的确定方法已经过许多研究者^[10]验证，很多研究者^[13]认为林冠截留量受到参数变化而产生差异。本文对模型参数进行了敏感性分析(表 1)发现，在参数分别 $\pm 10\%$ 时，参数 S 和 \bar{E}/\bar{R} 值变化引起模型模拟的林冠截留量(I)变动幅度较大，因此模型主要受 S 值、 \bar{E}/\bar{R} 值影响。

3.2 冠层未饱和、冠层饱和以及树干饱和阶段林冠截留模拟

2015 年湖南会同杉木人工林在林冠处于加湿阶段的 26 次降雨中，林冠截留量模拟值为 20.3 mm，

实测值为 21.9 mm, 模拟值 (I_m) 比实测值 (I_s) 偏低 1.6 mm(图 5(a)), 拟合方程为: $I_m = 1.033I_s - 0.089$ ($R^2 = 0.818, n = 26$); 在冠层饱和阶段的 46 次降雨中, 林冠截留量模拟值为 85.7 mm, 实测值为 92.8 mm, 模拟值 (I_m) 比实测值 (I_s) 偏低 7.1 mm(图 5(b)), 拟合方程为: $I_m = 0.468I_s + 0.917$ ($R^2 = 0.820, n = 46$); 在树干饱和阶段的 33 次降雨中, 林冠截留量模拟值为 129.5 mm, 实测值为 139.4 mm, 模拟值 (I_m) 比实测值 (I_s) 偏低 9.9 mm(图 5(c)), 二者拟合方程为: $I_m = 0.764I_s + 0.581$ ($R^2 = 0.86, n = 33$); 2015 年 105 次降雨林冠截留累积量模拟值为 235.5 mm, 实测值为 254.2 mm, 模拟值 (I_m) 比实测值 (I_s) 偏低 18.7 mm(图 5(d)), 拟合方程为: $I_m = 0.836I_s + 0.132$

($R^2 = 0.931, n = 105$)。

表 1 杉木人工林 Gash(1995)模型参数及敏感性分析

模型参数	数值	参数变化/%	I 变化/%	P_G' 变化/%
$\bar{E}/\bar{R}(-)$	0.060	+10	3.08	0.44
		-10	-4.37	-0.42
S_i/mm	0.261	+10	0.32	-
		-10	-0.32	-
P_t/mm	0.029	+10	0.37	-
		-10	-0.37	-
S/mm	1.327	+10	5.02	10.02
		-10	-2.74	-9.98
$C(-)$	0.750	+10	+0.30	-9.43
		-10	-0.30	11.66

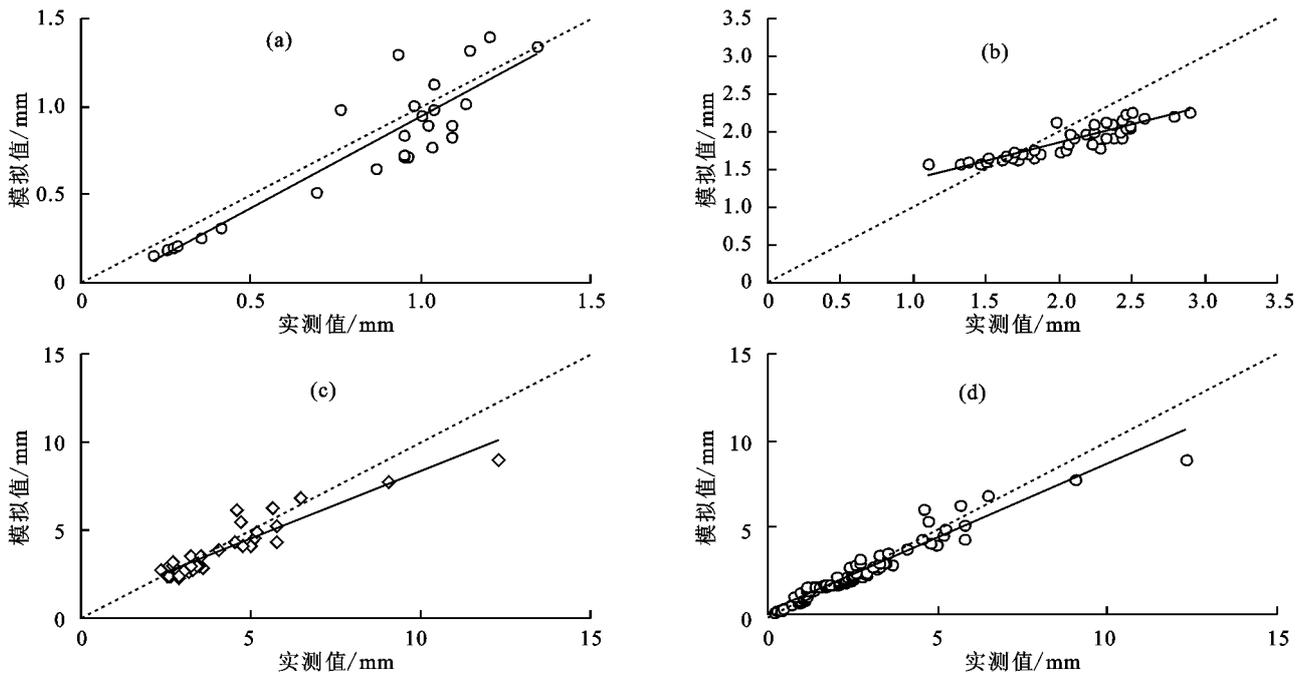


图 5 各阶段林冠截留模拟值 (I_m) 与实测值 (I_s) 的关系统计

3.3 \bar{E}/\bar{R} 值选取尺度对林冠截留模拟结果的影响

由于平均蒸发率 (\bar{E}) 与平均降雨强度 (\bar{R}) 都为变量, 受季节、气候、昼夜、风速等多种因素影响, 选取尺度越小, \bar{E}/\bar{R} 值的精度更高。由图 6 可知, 当采用次降水 \bar{E}/\bar{R} 值时(图 6(a)), 林冠截留模拟值为

256.28 mm; 当采用月累积降水 \bar{E}/\bar{R} 值时(图 6(b)), 林冠截留模拟值为 247.66 mm; 当采用年累积降水 \bar{E}/\bar{R} 值时(图 5(d)), 林冠截留模拟值为 235.50 mm。对比实测值 254.20 mm, \bar{E}/\bar{R} 值选取尺度越小模拟效果越优。

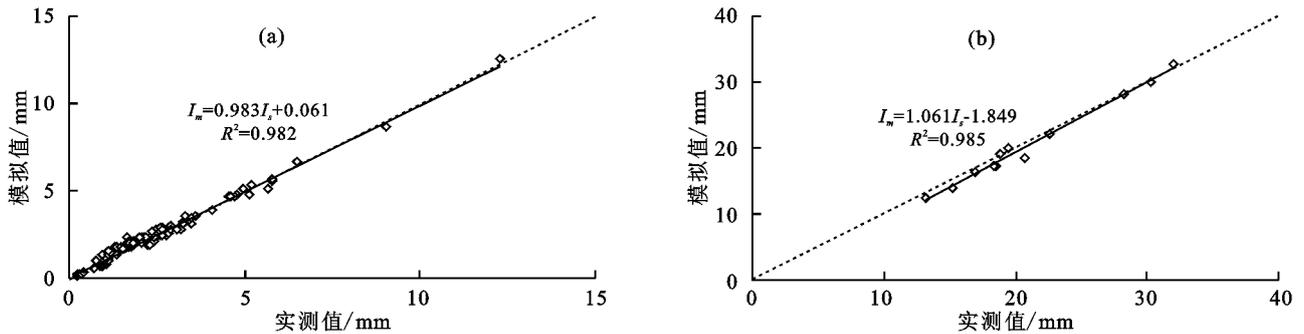


图 6 不同 \bar{E}/\bar{R} 值选取尺度林冠截留模拟值 (I_m) 与实测值 (I_s) 的关系

4 讨论

(1)杉木林林冠截留特征。湖南会同 20 年生的杉木人工林林冠截留量为 254.16 mm,林冠截留率为 16.55%,略高于杜紫贤等^[22]在建瓯地区对 16 年生杉木人工林研究中得到的年林冠截留率 16.31%,远低于刘胜涛等^[15]在江西大岗山地区对 30 年生杉木人工林研究中得到的 22.4%的林冠截留率。这 3 个研究地都位于亚热带地区,降水特征比较相似,林分都为杉木纯林,造林密度基本一致,前二地的杉木都为干材阶段,后者为成熟阶段,产生差异的主要原因可能是林龄。

(2)Gash(1995)模型模拟。应用 Gash(1995)模型模拟年累积林冠截留量为 235.52 mm,模拟值比实测值小 18.64 mm,低估约 7.37%。模型敏感性分析显示, S 值对模型的影响最大,当 S 值增加 10%引起林冠截留总量模拟值增加 8.42%,当 S 值减少 10%引起林冠截留总量模拟值减少 1.2%。准确测算 S 值是保证 Gash(1995)模型模拟准确的重要因子,Deguchi 等^[23]分析了不同乔木森林的 S 值在 0.25~1.55 mm 区间,Llorens 等^[24]分析了不同密度的针叶林 S 值区间范围为 0.1~3.0 mm,本研究测算的 S 值与以上两种分析结果一致。

次降雨量差异所形成的冠层未饱和、冠层饱和及树干饱和的 3 个阶段的林冠截留模拟效果有较大差异。当 $P_c \leq P_c'$ 时,处于冠层未饱和阶段,林冠截留量(I_1)模拟值低于实测值,主要是由于只考虑了冠层覆盖度这一影响因素,未考虑降雨强度、蒸发量等影响因素,可能导致模拟值偏低,但总体模拟效果较好。当 $P_c > P_c'$ 时,林冠截留量(I_2)模拟主要考虑了冠层饱和截留量及冠层饱和后树干截留变动量,其受 \bar{R} 值和 \bar{E} 值的影响。一方面,模型参数 \bar{R} 值和 \bar{E} 值对模拟值的影响较大, \bar{R} 值为平均降雨强度,而在冠层达到饱和后的林冠截留量(I_2)中,次降水量的 \bar{R} 值变动较大;在冠层饱和阶段,降雨以小到中雨为主, \bar{R} 值较小;在树干饱和阶段,降雨以大雨、暴雨及大暴雨为主, \bar{R} 值较大。 \bar{E} 值为平均蒸发率,该值同为变动值,所以 \bar{E}/\bar{R} 为不确定值,模型采用年平均降雨强度和年平均蒸发率对所有次降雨进行模拟,这一简化易产生误差;另一方面, \bar{R} 值和 \bar{E} 值的变动影响 P_c' 值的确定,这对冠层饱和和降水量界定产生影响。因此,模型中的 \bar{R} 值和 \bar{E} 值的选择值得进一步研究。

5 结论

(1)2015 年试验区林外降水 1 535.0 mm,产生林内降水的林外降水的临界值为 1.5 mm,次降雨以

小雨频率最高、以短时降雨为主;

(2)杉木人工林冠层饱和持水量 S 为 1.327 mm,树干持水能力 S_t 为 0.261 mm,树干茎流系数 P_t 为 0.029 mm;

(3)Gash(1995)模型模拟的年累积林冠截留量为 235.62 mm,与实测值(254.16 mm)比较接近。

(4)模型主要受冠层饱和持水量(S)值、平均蒸发率与平均降雨强度比(\bar{E}/\bar{R})值影响, \bar{E}/\bar{R} 的取值难以精准把握。

参考文献:

- [1] 王艳萍,王力,卫三平. Gash 模型在黄土区人工刺槐林冠降雨截留研究中的应用[J]. 生态学报,2012,32(17): 5445-5453.
- [2] 王爱娟,章文波. 林冠截留降雨研究综述[J]. 水土保持研究,2009,16(4):55-59.
- [3] 康文星,邓湘雯,赵仲辉. 林冠截留对杉木人工林生态系统物质循环的影响[J]. 林业科学,2006,42(12):1-5.
- [4] 孙向阳,王根绪,李伟,等. 贡嘎山亚高山演替林林冠截留特征与模拟[J]. 水科学进展,2011,22(1):23-29.
- [5] Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall into through-fall, stem-flow and interception: Effect of forest type, ground cover and climate[J]. Hydrological Processes,2000,14(16/17):2903-2920.
- [6] Nadkarni N M, Sumera M M. Old-growth forest canopy structure and its relationship to through-fall interception[J]. Forest Science,2004,50(3):290-298.
- [7] Dietz J, Hölscher D, Leuschner C, et al. Rainfall partitioning in relation to forest structure in differently managed montane forest stands in Central Sulawesi, Indonesia[J]. Forest Ecology and Management,2006,237(1/3):170-178.
- [8] Wang Y H, Yu P T, Xu D Y, et al. A preliminary study on transformation of rainfall interception models and parameters variation[J]. Journal of Beijing Forestry University,1998,20(6):25-30.
- [9] Rutter A J, Kershaw K A, Robbins P C, et al. A predictive model of rainfall interception in forests: Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine[J]. Agricultural Meteorology,1971,9: 367-384.
- [10] Gash J H C. An analytical model of rainfall interception by forests[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,1979,105:43-55.
- [11] Gash J H C, Lloyd C R, Lachaud G. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model[J]. Journal of hydrology,1995,170(1):79-86.
- [12] 王馨,张一平,刘文杰. Gash 模型在热带季节雨林林冠截留研究中的应用[J]. 生态学报,2006,26(3):722-720.

(下转第 344 页)

综合结果;而 EGCG 对 Mn 迁移的影响则是质子作用、络合作用和还原作用等的综合结果,三者的强弱还需进一步研究。总体而言,本文可为黄壤地区土壤酸化的治理和土壤改良提供科学依据。

参考文献:

- [1] 何刚,袁大刚,张俊思,等. 温度对 EGCG 和柠檬酸活化土壤硅铝铁锰的影响[J]. 土壤,2015,47(6):1163-1169.
- [2] Schmidt M A, Gonzalez J M, Halvorson J J, et al. Metal mobilization in soil by two structurally defined polyphenols[J]. Chemosphere,2013,90(6):1870-1877.
- [3] Schmidt M A, Halvorson J J, Gonzalez J M, et al. Kinetics and binding capacity of six soils for structurally defined hydrolyzable and condensed tannins and related phenols[J]. Journal of Soils and Sediments,2012,12(3):366-375.
- [4] 母媛,袁大刚,兰永生,等. 植茶年限对土壤 pH 值、有机质与酚酸含量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2016(4):44-48.
- [5] Andjelković M, Camp J V, Meulenaer B D. Iron-chelation properties of phenolic acids bearing catechol and galloyl groups[J]. Food Chemistry,2006,98(1):23-31.
- [6] Chvátalová K, Slaninová I, Březinová L, et al. Influence of dietary phenolic acids on redox status of iron: Ferrous iron autoxidation and ferric iron reduction[J]. Food Chemistry,2008,106(2):650-660.
- [7] 何刚,袁大刚,赵燕,等. 茶多酚与低分子有机酸活化土壤矿质元素的差异研究[J]. 土壤学报,2014,51(6):1379-1387.
- [8] 何刚,袁大刚,张东坡,等. 不同浓度和 pH 对茶多酚活化土壤硅、铝、铁的影响[J]. 土壤通报,2015,46(1):111-116.
- [9] 张甘霖,龚子同. 淹水条件下土壤中元素迁移的地球化学特征[J]. 土壤学报,1993,30(4):355-365.
- [10] Li J Y, Xu R K, Ji G L. Dissolution of aluminum in variably charged soils as affected by low-molecular weight organic acids[J]. Pedosphere,2005,15(4):484-490.
- [11] 张甘霖,龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京:科学出版社,2012:38-179.
- [12] 李九玉,徐仁扣. 不同 pH 下低分子量有机酸对黄壤中铝活化的影响[J]. 环境化学,2005,24(3):275-278.
- [13] Ng Kee Kwong K F, Huang P M. Influence of citric acid on the hydrolytic reactions of aluminum[J]. Soil Science Society of America Journal,1977,41(4):692-697.
- [14] 胡红青,贺纪正,李学恒,等. 有机酸对酸性土壤吸附磷的影响[J]. 华中农业大学学报,1997,16(1):37-42.
- [15] 何刚. 茶多酚对酸性土壤矿质元素活化的影响[D]. 成都:四川农业大学,2015.
- [16] Halvorson J J, Schmidt M A, Hagerman A E, et al. Reduction of soluble nitrogen and mobilization of plant nutrients in soils from U. S northern Great Plains agroecosystems by phenolic compounds[J]. Soil Biology and Biochemistry,2016,94(3):211-221.
- [17] 汪洪,刘荣乐,金继运. 土层水分非均匀供应下施锌对玉米植株中 Ca、Fe、Mn、Cu 吸收积累的影响[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(1):1-7.
- [18] 张仲胜,吕宪国,宋晓林. 三江平原不同土地利用方式下土壤锰含量研究[J]. 环境科学,2011,32(11):3429-3434.
- [19] 于天仁. 土壤化学原理[M]. 北京:科学出版社,1987:87.
- [20] 石碧,狄莹. 植物多酚[M]. 北京:科学出版社,2000:103-109.
- [13] 何常清,薛建辉,吴永波,等. 应用修正的 Gash 解析模型对岷江上游亚高山川滇高山栎林林冠截留的模拟[J]. 生态学报,2010,30(5):1125-1132.
- [14] 高婵婵,彭焕华,赵传燕,等. 基于 Gash 模型的青海云杉林降水截留模拟[J]. 生态学杂志,2015,34(1):288-294.
- [15] 刘胜涛,高鹏,李肖,等. 江西大岗山杉木人工林降雨截留特征及修正 Gash 模型的模拟[J]. 水土保持学报,2015,29(2):172-176.
- [16] Limousin J M, Rambal S, Ourcival J M, et al. Modeling rainfall interception in a Mediterranean Quercus ilex ecosystem: Lesson from a through-fall exclusion experiment[J]. Journal of Hydrology,2008,357(1/2):57-66.
- [17] 黄承标,温远光,李信贤. 田林老山常绿阔叶混交林气候及水文效应的研究[J]. 广西农学院学报,1991,10(4):52-63.
- [18] 芦新建,贺康宁,王辉,等. 应用 Gash 模型对青海高寒区华北落叶松人工林林冠截留的模拟[J]. 水土保持学报,2014,28(4):44-48.
- [19] 郭明春,于澎涛,王彦辉,等. 林冠截持降雨模型的初步研究[J]. 应用生态学报,2005,16(9):1633-1637.
- [20] Návár J, Bryan R B. Fitting the analytical model of rainfall interception of Gash to individual shrubs of semi-arid vegetation in northeastern Mexico[J]. Agricultural and Forest Meteorology,1994,68(3/4):133-143.
- [21] 刘效东,龙凤玲,陈修治,等. 基于修正的 Gash 模型对南亚热带季风常绿阔叶林林冠截留的模拟[J]. 生态学杂志,2016,35(11):3118-3125.
- [22] 杜紫贤,韩永刚,谢锦升,等. 木荷与杉木人工林林冠截留初步探讨[J]. 亚热带水土保持,2007,19(2):5-9.
- [23] Deguchi A, Hattori S, Park H T. The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: Application of the revised Gash model[J]. Journal of Hydrology,2006,318(1/4):80-102.
- [24] Llorens P, Gallart F. A simplified method for forest water storage capacity measurement[J]. Journal of Hydrology,2000,240(1):131-144.

(上接第 324 页)