

修正的 Gash 模型在大兴安岭北部山地樟子松林林冠截留中的适用性

李奕, 宋墩福, 魏萧萧, 王盼 (江西环境工程职业学院林业学院, 江西赣州 341000)

摘要 为验证修正的 Gash 模型在大兴安岭北部山地樟子松林林冠截留中的适用性, 基于 2011 年和 2012 年的气象、林分和降雨观测数据, 利用修正的 Gash 模型对林冠的截留效应进行了模拟研究。结果表明, 研究期内大气降雨总量为 493.12 mm, 林冠截留总量为 122.65 mm, 穿透雨总量为 368.34 mm, 树干茎流总量为 2.13 mm。运用模型模拟的穿透雨量、树干茎流量和林冠截留量分别为 378.07、4.02 和 111.03 mm, 林冠截留模拟值低于实测值 11.62 mm, 相对误差为 9.48%, 实测值与模拟值有着较好的一致性, 说明修正的 Gash 模型适用于对大兴安岭山地樟子松林林冠截留的模拟。

关键词 修正的 Gash 模型; 大兴安岭北部; 樟子松; 林冠截留

中图分类号 S715 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2019)03-0101-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.03.032



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

The Applicability of Modified Gash Model in Canopy Interception of *Pinus sylvestris* Forest in Northern Da Hinggan Mountains

LI Yi, SONG Dun-fu, WEI Xiao-xiao et al (Jiangxi Environmental Engineering Vocational College, Ganzhou, Jiangxi 341000)

Abstract In order to verify applicability of the revised Gash analytical model in simulating canopy interception of *Pinus sylvestris* forest in Da Hinggan Mountains, the rainfall, throughfall, stem flow characteristics and their heterogeneity were measured, the canopy interception was simulated with the revised Gash analytical model. The results showed that the total rainfall was 493.12 mm. The amounts of interception, throughfall and stem flow were 122.65, 368.34 and 2.13 mm, respectively. Throughfall, stem flow and canopy interception simulated by the revised Gash model were 378.07, 4.02 and 111.03 mm, respectively. The value of canopy interception simulated by the revised Gash model was 11.62 mm lower than the observed value. The revised Gash analytical model of rainfall interception was employed and the simulated interception values were close to the measured ones with an underestimation of 9.48%, indicating that the revised Gash analytic model could be used for estimating canopy interception *P. sylvestris* forest in Da Hinggan Mountains.

Key words The revised Gash model; Northern Da Hinggan Mountains; *Pinus sylvestris*; Canopy interception

林冠截留作为森林生态系统降水输入的第一接触层, 一直是森林水文学研究的重点, 同时, 也影响着地表-大气能量的循环过程和水量平衡。林冠截留的大小受多种因素的影响, 主要可概括为气象因素^[1-2]和林分自身特征^[3-6]。用模型来估算和预测林冠截留的大小目前被广泛应用。研究早期的模型忽略了气象和林分特征, 只适用于试验地, 因而没有得到较好的推广和应用。Gash^[7]模型是以 Rutter 模型等早期研究模型为基础, 进行简化推导而建立的较为完善的模拟林冠截留的解析模型。之后, 针对 Gash 模型在实际应用中存在的一些缺点, Gash 等^[8]进行了修正, 提高了模型的适用性。修正的 Gash 模型结合了早期研究模型的长处, 更为简单和实用, 目前在全世界被广泛应用^[9-16], 但该模型在我国森林中的应用较少, 特别是在我国大兴安岭地区应用更为稀少。樟子松是松属植物中最耐寒的树种之一, 其拥有常绿、抗旱、耐贫瘠以及适应性强等生物学特性, 是目前我国沙地、东北地区农田防护林和城市绿化的首选, 有着重要的地位和作用^[17]。笔者通过对大兴安岭北部漠河县境内山地樟子松林林冠截留的观测, 分析樟子松林对降雨的再分配特征, 结合气象站气象观测数据, 推导和计算出修正的 Gash 模型的相关参数值, 通过对实验值与模拟值的对比分析来探讨修正的 Gash 模型在大兴安岭北部地区山地樟子松林的适用性, 以期对评价和预测大兴安岭北部山地樟子松林林冠截留作

用及评估其生态水文效应提供一种可靠的方法。

1 数据采集与研究方法

1.1 研究区概况 该研究在黑龙江漠河国家级森林生态系统定位研究站进行, 其地理坐标为 121°07'~124°20'E、52°10'~53°33'N, 属寒温带大陆性气候, 有较为明显的山地气候特征, 年平均气温为 -4.8℃, 年平均降水量为 431.2 mm, 降雨多集中在 7—8 月, 日照时数为 2 377~2 625 h。≥10℃的积温为 1 436~2 062℃, 霜期为当年 9 月初至次年 5 月中下旬, 年平均无霜期仅 89 d。森林植被以北方明亮针叶林为主, 乔木树种有兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、白桦(*Betula platyphylloides*)、山杨(*Populus davidiana*)等, 主要灌木种为兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum*)、杜香(*Ledum palustre*)和越橘(*Vaccinium vitis-idaea*)等。该地区土壤主要为棕色针叶林土, 局部有草甸和沼泽, 并有永冻层存在^[18]。

1.2 数据采集 2011 年 7 月和 2012 年 7—9 月, 在距离漠河森林生态系统定位研究站 5 km 处的樟子松林内布设样地, 面积为 20 m×30 m, 阳坡, 坡度为 35°~40°, 密度约 662 株/hm², 林分的平均树高 17.36 m, 平均胸径 23.64 cm, 郁闭度为 0.7, 标准地内随机布置 10 个由外径为 20 cm 的 PVC 管自制成的雨量桶, 每场降雨后及时测定林内穿透降雨量 TF(mm)。根据径级分布, 在标准地内共选择 5 株标准木以观测树干茎流量, 计算公式为:

$$SF = \sum_{i=1}^n \frac{S_n \cdot N}{A \cdot 10^4}$$

式中, S_n 为每株标准木的树干茎流量(mL); N 为单位面积上

基金项目 林业公益性行业科研专项(201404303); 江西环境工程职业学院引进人才科研启动项目。

作者简介 李奕(1986—), 男, 江西萍乡人, 讲师, 博士, 从事森林水文、恢复生态研究。

收稿日期 2018-09-19; **修回日期** 2018-10-11

标准木的株数; A 为标准地的面积 (m^2)。

根据穿透雨和树干茎流实测值来计算林冠截留量 (mm): $I = P_c - TF - SF$ 。

该试验所需气象数据由国家气象局北极村气象站提供。

1.3 研究方法 修正的 Gash 模型被用来模拟单独的降雨事件是目前被众多学者认可的较为科学的方法, 在实际降雨中林冠加湿、林冠饱和以及降雨停止后林冠干燥的过程都存在于降雨的过程中, 该模型的假设条件为相邻 2 次降雨之间有充足的时间使林冠完全恢复到降雨前的干燥程度。模型采用分项求和的形式, 将整个林冠在降雨过程中各个阶段的截留损失相加得到总的林冠截留量。该模型计算林冠截留量的基本公式为^[19]:

$$\sum_{j=1}^{m+n} I_j = c \sum_{j=1}^m P_{G_j} + \sum_{j=1}^n (c\bar{E}_c/\bar{R})(P_c - P'_c) + c \sum_{j=1}^n P'_c + qcS_t + cP_t(1 - \bar{E}_c/\bar{R}) \sum_{j=1}^{n-q} (P_{G_j} - P'_c)$$

式中, I_j 为林冠截留量 (mm); n 为林冠达到饱和的降雨次数; m 为林冠未达到饱和的降雨次数; j 为总的降雨次数; S_t 为树干持水能力 (mm); q 为树干达到饱和和产生树干茎流的降雨次数; \bar{R} 为平均降雨强度 (mm/h); c 为林分郁闭度; \bar{E}_c 为单位覆盖面积平均林冠蒸发速率 (mm/h); $\bar{E}_c = \bar{E}/c$, \bar{E} 为饱和林冠的平均蒸发速率 (mm/h); P_{G_j} 为总的降雨量 (mm); P_t 为树干茎流系数; P'_c 为使林冠达到饱和的降雨量 (mm); P_c 为单次

降雨的降雨量 (mm)。

模型 5 个组成部分分别代表的是 $c \sum_{j=1}^m P_{G_j}$: m 次未能饱和冠层的降雨量 ($P_c < P'_c$); $\sum_{j=1}^n (c\bar{E}_c/\bar{R})(P_c - P'_c)$: 降雨过程中的蒸发量; $c \sum_{j=1}^n P'_c$: n 次使林冠达到饱和和降雨事件的降雨量; qcS_t : 降雨后的蒸发量; $cP_t(1 - \bar{E}_c/\bar{R}) \sum_{j=1}^{n-q} (P_{G_j} - P'_c)$: $n-q$ 次未能饱和树干的降雨量 ($P_c < S_t/P_t$)。

2 结果与分析

2.1 研究期林外雨特征 在整个研究期内共计观测到 26 场降雨, 林外降雨总量 493.12 mm, 平均每次降雨 18.97 mm。26 场降雨中, 单次降雨量最大值 78.24 mm, 最小值 0.93 mm, 降雨以小雨 ($P_c < 10 \text{ mm}$) 居多, 达 16 次, 占降雨总次数的 61.54%, 观测期内共观测到 2 场暴雨 ($P_c > 50 \text{ mm}$), 其降雨总量占观测期总降雨量的 28.05%。平均降雨强度为 1.9 mm/h, 单次降雨强度介于 0.1~12.0 mm/h, 雨强大于 5.0 mm/h 的频率为 7.69%, 雨强小于 1.0 mm/h 的频率为 53.85% (图 1A)。单次降雨最小持续时间为 0.5 h, 最大持续时间达 21.5 h, 平均每次降雨历时 4.3 h。由图 1B 可知, 频数最大的降雨历时 4.1~6.0 h。由观测结果可知, 降雨以雨强较小、雨量较少的小雨为主, 大雨、暴雨等极端降雨现象较少, 降雨量分布不均衡, 降雨前干燥期较长。

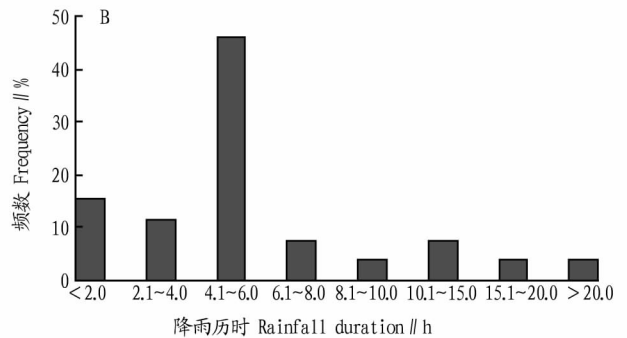
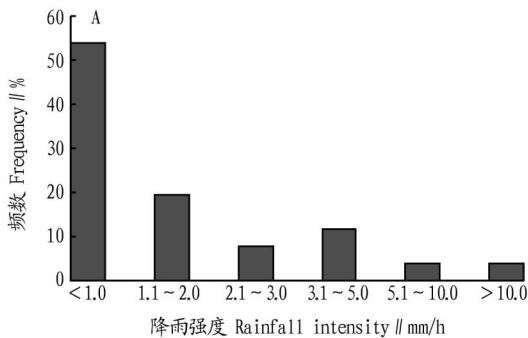


图 1 降雨特征

Fig. 1 Rainfall characteristics

2.2 林冠对降雨的截留分配特征 观测期内林内穿透雨总量占整个研究期内降雨总量的 74.70%, 穿透雨率为 21.04%~79.23%, 平均穿透雨率为 65.31%。由图 2A、B 可知, 不论穿透雨量还是穿透雨率都有随着降雨量的增加而增大的趋势。

穿透雨变异系数为 10.25%~64.36%。研究发现, 当降雨量 $P_c < 6.5 \text{ mm}$ 时, 穿透雨变异系数较大, 且随着降雨量的增大, 其减小幅度较大; 当降雨量 $P_c > 6.5 \text{ mm}$ 时, 穿透雨变异系数较小, 且随着降雨量的增大, 其减小幅度相应变小。

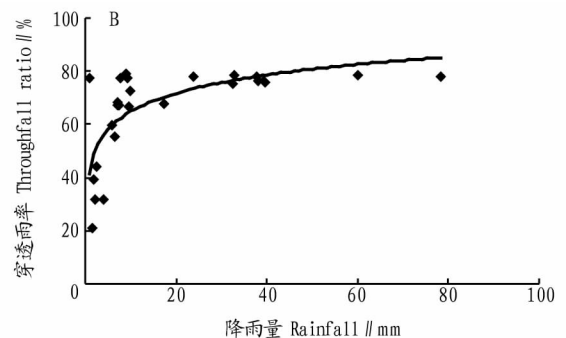
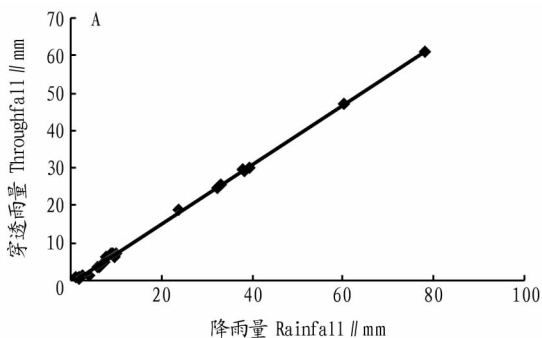


图 2 穿透雨量(率)与降雨量的关系

Fig. 2 Relationship between throughfall (ratio) and rainfall

由此可知,穿透雨率变异系数有随降雨量增大而逐渐减小的趋势。

穿透雨量与降雨量的关系 TF 为: $TF = 0.771 2P_c - 0.613 1, R^2 = 0.998 0, n = 26$;

穿透雨率与降雨量的关系 RTF 为: $RTF = 9.576 9 \ln P_c + 42.633 0, R^2 = 0.445 0, n = 26$ 。

观测期内树干茎流总量为 2.13 mm, 其占比不足研究期间总降雨量的 1.0%, 单次降雨的平均树干茎流量为 0.04 mm。观测同时发现, 只有在降雨量 $P_c > 4.0$ mm 时, 才会产生树干茎流, 分析原因可能樟子松树冠较大, 树皮较厚, 吸水性和透水性较大, 因此, 樟子松需要较大的降雨量才能使林冠和树皮达到饱和。树干茎流量与林外降雨存在拟合关系为 $SF = 0.005 8P_c - 0.027 8, R^2 = 0.926 9, n = 26$ (图 3)。

根据林冠截留计算方程, 研究期内林冠截留总量为 122.65 mm, 占同期大气降雨总量的 24.87%, 单场降雨的截留率为 20.62%~78.96%, 平均截留率为 34.63%, 可见, 樟子松林冠截留能力较强。观测发现, 随着雨量级的增加, 林冠截留量虽有增加, 但其截留率呈减小的趋势。通过数据可以知道, 林冠截留率在小雨时最大, 达 78.96%, 分析原因可能是小雨的降雨量小, 降雨历时短, 降雨强度小, 林冠能够有时间充分被湿润, 截留大部分降雨, 从而使得截留率较大。而当发生大暴雨事件时, 林冠截留能力低于其平均水平, 也就

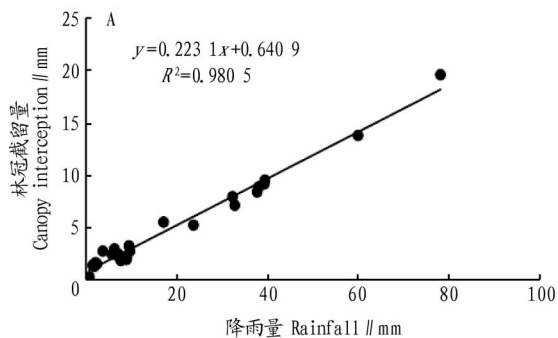


图 4 林冠截留量(率)与降雨量的关系

Fig. 4 Relationship between canopy interception (ratio) and rainfall

2.3 修正的 Gash 模型中主要参数值的确定

2.3.1 林冠持水能力(S)。该研究采用 Wallace 等^[13]和 Limousin 等^[20]的回归方法来确定林冠的持水能力(S), 该方法是根据林内穿透雨量与林外降雨量关系方程, 计算得到穿透雨的残差 TF(σ), 然后确定降雨量与穿透雨量残差的关系(图 5), 求得二者关系拐点的降雨量值, 大于该值并且残差 TF(σ)大于零的降雨量值(TF_σ)与其对应的穿透雨量值的回归线在 x 轴截距的负值即为 $S^{[19-20]}$ (图 6)。根据实验数据计算后可得其回归方程为 $TF_\sigma = 0.758 1P_c + 0.925 7, R^2 = 0.983 0$, 即 $S = 0.925 7$ 。由林分调查数据可得林分的平均郁闭度 $c = 0.7$, 因此, 单位面积林冠持水能力由公式 $S_c = S/c$ 计算, $S_c = 1.322$ 。

在该研究中根据观测数据计算所得 S 值大于其他研究^[14,19]中所得 S 值, 这是由于 S 值主要取决于树种组成, 叶枝的表面积, 林冠结构和树干、枝、叶持水能力等, 不同的树

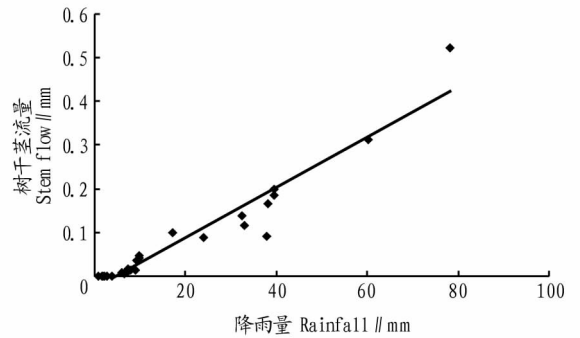
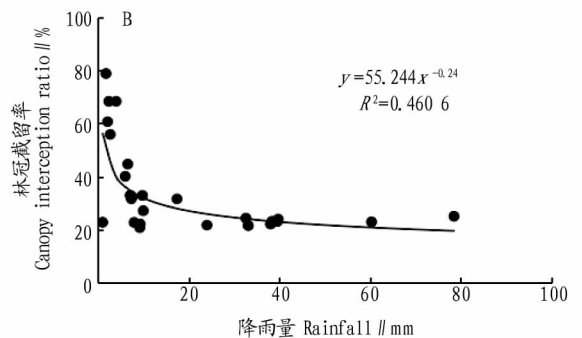


图 3 树干茎流量与降雨量的关系

Fig. 3 Relationship between stem flow and rainfall

意味着当场降雨的大部分雨水可能是没有经过树体直接降入林地的。林冠截留量与林外降雨量存在紧密正相关是许多研究已经确定的, 只是不同森林类型其拟合曲线不同。通过对数据拟合结果的分析可得: 线性回归方程最能反映林冠截留量与林外降雨量的关系(图 4A)。林冠截留量随林外降雨量的增加而增大, 但当林冠截留降雨的能力接近或达到饱和的时候, 由于枝叶吸收水分已经饱和, 截留量则受到蒸发的影响, 可能增加的速度会相对缓和, 实际情况下, 截留量随林外降雨量的变化通常呈一条不饱和的曲线。通过分析得到, 对数回归方程能较好地反映林冠截留率与大气降雨的关系(图 4B)。



种和林分组成关系均会对 S 值产生影响。

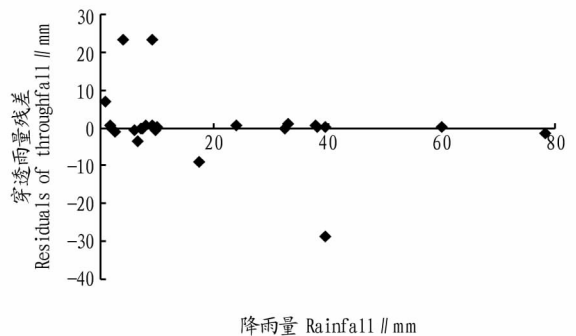


图 5 穿透雨量残差与降雨量关系

Fig. 5 Relationship between the residuals of throughfall and rainfall

2.3.2 饱和林冠平均蒸发速率(\bar{E})。饱和林冠的平均蒸发速率 \bar{E} 根据 Penman-Monteith 公式: $\lambda \bar{E} = (\Delta R_n + \rho c_p D / r_a) / (\Delta +$

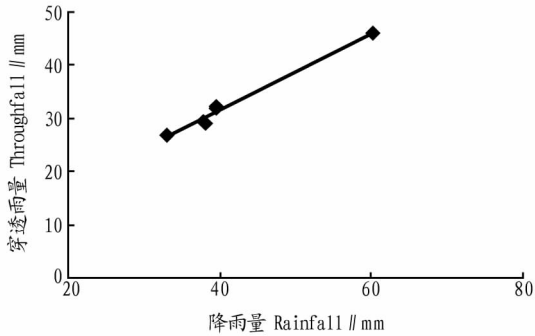


图6 穿透雨量与大于拐点降雨量关系

Fig. 6 Relationship between the throughfall and rainfall

γ)计算,空气动力学阻力(r_a)由公式 $r_a = 1/0.056u$ 计算,将由国家气象局北极村气象站提供的气象数据带入公式计算后,可得 $\bar{E} = 0.338$ mm/h,而单位面积平均林冠蒸发速率 $\bar{E}_c = \bar{E}/c$,从而算得 $\bar{E}_c = 0.483$ mm/h。 P'_c 为使林冠达到饱和的降雨量, P'_c 由公式 $P'_c = (-\bar{R}/\bar{E}_c)S_c \ln(1 - \bar{E}_c/\bar{R})$ 计算,可得 $P'_c = 1.533$ mm。

2.3.3 树干茎流系数(P_i)和树干持水能力(S_i)。由图3可知,树干茎流量与林外降雨量存在如下线性关系: $SF = 0.0058P_c - 0.0278$, $R^2 = 0.9269$, $n = 26$,而 S_i 为树干茎流量与降雨量关系式在 y 轴截距的负值, P_i 为斜率^[20],计算后可得 $S_i = 0.0278$, $P_i = 0.0058$,从而根据公式 $P'_i = S_i/P_i$,算得树干饱和和所需降雨量, $P'_i = 4.793$ mm。

2.3.4 其他模型参数。由公式 $P = 1 - c$,可得 $P = 0.3$ 。

2.4 修正的 Gash 模型模拟的截留量与实测截留量对比 根据实际观测数据可以计算出观测期内樟子松天然林林冠截留量、穿透雨量和树干茎流量分别为 122.65、368.34 和 2.13 mm。将计算好的模型参数值代入模型中可以得到模型各组分对应数值及林冠截留总量、穿透雨总量和树干茎流总量的模拟值(表1)。可知,林冠截留总量的实测值比模拟值多 11.62 mm,相对误差为 9.48%。由表1可知,在模型的各项组成中,降雨过程中的蒸发量和饱和林冠的降雨量是主要部分,其分别占模拟的林冠截留总量的74.88%和

表1 修正 Gash 模型的模拟值与实测值比较

Table 1 Observed values and simulated values by revised Gash model

项目 Item	模拟值 Simulated value	实测值 Observed value
林冠未达到饱和的 m 次降雨的截留量 Small rainfalls when $P_c < P'_c$	0.65	—
林冠达到饱和的 n 次降雨的林冠加湿过程 Wetting-up the canopy when $P_c \geq P'_c$	83.14	—
降雨过程中的蒸发量 Evaporation from saturation until rainfall ceases	26.83	—
降雨停止后林冠蒸发量 Evaporation after rainfall ceases	0.39	—
$n-q$ 次未能饱和和树干的降雨量 $n-q$ rainfalls, when $P_c < S_i/P_i$	0.01	—
林冠截留总量 Total interception loss	111.03	122.65
树干茎流量 Total stew flow	4.02	2.13
穿透雨总量 Total throughfall	378.07	368.34

24.16%。分析原因为樟子松林冠冠幅较大,树皮较厚,有较强的吸水性能和透水性,加之观测期内的平均降雨强度较小,仅为 1.847 mm/h,而其林冠平均蒸发速率较大,达 0.338 mm/h,从而使得林冠的蒸发量和饱和林冠的降雨量较大。

由于修正的 Gash 模型最初是用于对林冠截留一周累积量的模拟^[8],因此在该研究中利用 2012 年 7—9 月连续观测数据对模拟周累积量和实测周累积量进行了比较分析(图7),分析发现累积的周数越多,林冠截留总量模拟值和实测值越接近。当到达第 12 周累积量时,两者的相对误差仅为 3.49%,这也说明了修正的 Gash 模型能够较好地模拟大兴安岭北部山地樟子松天然林林冠截留量。

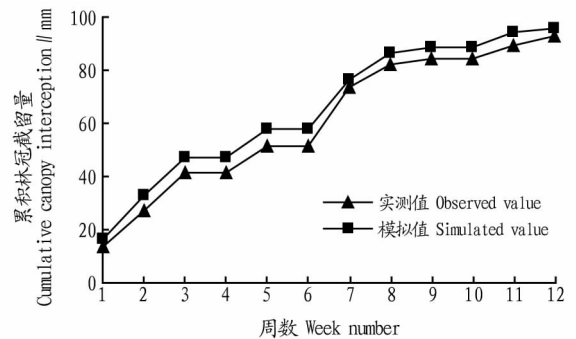


图7 林冠截留周累积量的实测值与模拟值比较

Fig. 7 Observed and simulated weekly cumulative canopy interception

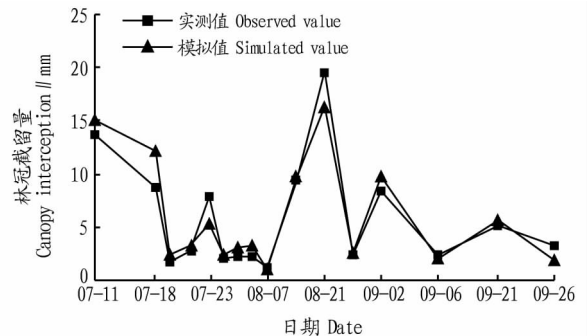


图8 单场降雨的林冠截留实测值与模拟值比较

Fig. 8 Observed and simulated canopy interception of single rainfall event

如图8所示,通过单场降雨的林冠截留模拟值与实测值比较分析可知,修正的 Gash 模型能够较准确地预测部分场次降雨的林冠截留量,但是还是有个别场次的林冠截留量有着较大差异,两者差异的最大值为 3.34 mm,最小值仅为 0.12 mm。

3 结论与讨论

整个观测期内,大兴安岭北部山地樟子松天然林林冠截留总量为 122.65 mm,占同期降雨总量的 24.87%,说明山地樟子松天然林林冠的截留能力属于中等水平。应用修正的 Gash 模型模拟的林冠截留总量为 111.03 mm,占同期降雨总量的 22.52%,实测值高于模拟值 11.62 mm,截留率高于模拟值 2.35 百分点,两者相对误差 9.48%,与其他应用修正的

Gash 模型研究结果相比^[14,19],该模拟结果值低于实测值,模拟精度偏低,但仍能够较好地模拟樟子松天然林的林冠截留。

尽管修正的 Gash 模型涉及较多的参数,且有较多因素影响模型的精度,但该研究通过采用较为成熟的方法获取参数,综合比较了实测值和模拟值,所以模拟结果较为可靠,这也表明了修正的 Gash 模型可以适用于大兴安岭北部樟子松林的截留模拟,该研究结果对于预测大兴安岭北部樟子松林冠截留量以及评估其水文效应具有科学参考价值。修正的 Gash 模型在模拟和预测林冠截留方面是目前比较常用和有效的降雨截留模型,模型综合考虑了降雨和空气动力学的特征,将林冠截留损失合理划分成几个组成部分,对降雨截留的整个过程考虑得较为充分,具有较好的物理学基础。即使是在不同的气候、地理位置或是林分类型的条件下,国内外不少研究也已经证明修正的 Gash 模型在模拟林冠截留时仍然是最简单有效的。该模型对单次降雨的林冠截留量进行模拟,小雨量时模拟准确性较高,随着降雨量增加,模拟精度有所下降。总体来看,笔者认为修正的 Gash 模型在樟子松天然林林冠截留降雨过程模拟中具有较好的适用性,能为该地区森林水文循环和区域水资源利用提供可靠的方法。

参考文献

- [1] SCHELLEKENS J, SCATENA F N, BRUIJNZEEL L A, et al. Modelling rainfall interception by a lowland tropical rain forest in northeastern Puerto Rico[J]. *Journal of hydrology*, 1999, 225(3): 168-184.
- [2] CROCKFORD R H, RICHARDSON D P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: Effect of forest type, ground cover and climate[J]. *Hydrological processes*, 2000, 14(16/17): 2903-2920.
- [3] NADKARNI N M, SUMERA M M. Old-growth forest canopy structure and its relationship to throughfall interception[J]. *Forest science*, 2004, 50(3): 290-298.
- [4] IIDA S, TANAKA T, SUGITA M. Change of interception process due to the succession from Japanese red pine to evergreen oak[J]. *Journal of hydrology*, 2005, 315: 154-166.
- [5] 党宏忠, 周泽福, 赵雨森. 青海云杉林冠截留特征研究[J]. *水土保持学*

- 报, 2005, 19(4): 60-64.
- [6] 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(1/2/3): 170-178.
- [7] GASH J H C. An analytical model of rainfall interception by forests[J]. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, 1979, 105(443): 43-55.
- [8] GASH J H C, LLOYD C R, LACHAUD G. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model[J]. *Journal of hydrology*, 1995, 170(1/2/3/4): 78-86.
- [9] 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(1/2/3/4): 80-102.
- [10] HERBST M, ROBERTS J M, ROSIER P T W, et al. Measuring and modeling the rainfall interception loss by hedgerows in southern England[J]. *Agricultural and forest meteorology*, 2006, 141(4): 244-256.
- [11] SHI Z J, WANG Y H, XU L H, et al. Fraction of incident rainfall within the canopy of a pure stand of *Pinus armandiith* revised Gash model in the Liupan Mountains of China[J]. *Journal of hydrology*, 2010, 385(1/2/3/4): 44-50.
- [12] ŠRAJ M, BRILLY M, MIKOŠ M. Rainfall interception by two deciduous Mediterranean forests of contrasting stature in Slovenia[J]. *Agricultural and forest meteorology*, 2008, 148(1): 121-134.
- [13] WALLACE J, MCJANNET D. Modeling interception in coastal and montane rainforests in northern Queensland, Australia[J]. *Journal of hydrology*, 2008, 348(4): 480-495.
- [14] 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.
- [15] 季冬. 贡嘎山暗针叶林林冠截留的 Gash 模型[M]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [16] 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): 722-729.
- [17] 李奕. 大兴安岭北部樟子松林生态水文过程及水量平衡研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- [18] 李奕, 蔡体久, 满秀玲, 等. 大兴安岭地区天然樟子松林降雨截留再分配特征[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 40-44.
- [19] 赵洋毅, 王玉杰, 王云琦, 等. 基于修正的 Gash 模型模拟缙云山毛竹林降雨截留[J]. *林业科学*, 2011, 47(9): 15-20.
- [20] LIMOUSIN J M, RAMBAL S, OURCIVAL J M, et al. Modelling rainfall interception in a mediterranean *Quercus ilex* ecosystem: Lesson from a through fall exclusion experiment[J]. *Journal of hydrology*, 2009, 365(1/2): 142-143.

(上接第 63 页)

- [8] 吴平. 植物对室内空气污染物的净化能力研究进展[J]. *四川林业科技*, 2009, 30(3): 105-107.
- [9] 刘凤, 高泽, 刘松奇, 等. 室内植物净化空气的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(10): 254-255, 289.
- [10] 胡羨聪, 张德强, 张国辉, 等. 大气 SO₂、氟化物对植物生理生态指标的影响[J]. *热带亚热带植物学报*, 2003, 11(4): 372-378.
- [11] MO J H, ZHANG Y P, XU Q J, et al. Photocatalytic purification of volatile organic compounds in indoor air: A literature review[J]. *Atmospheric environment*, 2009, 43: 2229-2246.
- [12] ZHANG Y P, MO J H, LI Y G, et al. Can commonly-used fan-driven air cleaning technologies improve indoor air quality A literature review[J]. *Atmospheric environment*, 2011, 45(26): 4329-4343.
- [13] KWANG J K, MI J K, JEONG S S, et al. Efficiency of volatile formaldehyde removal by indoor plants: Contribution of aerial plant parts versus the root zone[J]. *Horticultural science*, 2008, 133: 479-627.
- [14] RESHMAL V S, KUMAR P, CHAITRA G S. Significant role of ornamental plants as air purifiers: A review[J]. *International journal of current micro-*

- biology and applied sciences*, 2017, 6(8): 2591-2606.
- [15] 李应东, 蔡良杰. 基于园林建筑与园林植物配置的关系研究[J]. *门窗*, 2016(12): 200.
- [16] 李万龙. 园林植物配置的原则及注意问题探析[J]. *中国集体经济*, 2017(19): 54-55.
- [17] 赵宏. 植物学野外实习教程[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [18] 贺勇, 李磊, 李俊毅, 等. 北方 30 种景观树种净化空气效益分析[J]. *东北林业大学学报*, 2010, 38(5): 37-39.
- [19] 鲁敏, 李英杰, 鲁金鹏. 绿化树种对大气污染物吸收净化能力的研究[J]. *城市环境与城市生态*, 2002(2): 7-9.
- [20] 王荣新, 辛学兵, 裴顺祥, 等. 北京市 9 种常见绿化树种吸收积累 SO₂ 能力研究[J]. *林业科学研究*, 2017, 30(3): 392-398.
- [21] 陈伟光, 黄芳芳, 温小莹, 等. 大气 SO₂ 和 NO₂ 污染及植物的抗性和净化能力研究进展[J]. *林业与环境科学*, 2017, 33(4): 123-129.
- [22] 李艳芹, 李艳梅, 陈奇伯, 等. 昆明市典型绿化树种的滞尘及吸收 SO₂、NO_x 效应[J]. *湖北农业科学*, 2016, 55(18): 4740-4745.
- [23] 孔桂芝. 浅谈园林树木对改善日常生活环境的作用[J]. *襄阳职业技术学院学报*, 2005, 4(1): 102-104.