

DOI: 10.5846/stxb201311262814

段文军, 李海防, 王金叶, 赵连生, 李光平, 王绍能. 漓江上游典型森林植被对降水径流的调节作用. 生态学报, 2015, 35(3): 663-669.

Duan W J, Li H F, Wang J Y, Zhao L S, Li G P, Wang S N. The regulation effect of typical forest on rainfall-runoff in upper reaches of Lijiang River. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 663-669.

漓江上游典型森林植被对降水径流的调节作用

段文军¹, 李海防¹, 王金叶^{1,*}, 赵连生², 李光平², 王绍能²

¹ 桂林理工大学旅游学院, 桂林 541004

² 猫儿山国家级自然保护区管理局, 兴安 541316

摘要: 利用野外同步长期定位观测林外降雨、地表径流和河川径流的方法, 对漓江上游典型森林植被的生态水文过程进行观测研究。结果表明: 1) 流域降水年内分配极不均匀, 50a 年降雨量总体变化趋势不明显。林冠截留受林外降雨特征的影响, 也与植被类型密切相关。2) 地表径流平均滞后时间为 70 min。在连续降雨的情况下, 降雨滞后效应不再明显, 甚至出现地表径流与降雨同步的现象, 小降雨可能产生大的地表径流, 从而加大流域在雨季发生洪灾的风险。3) 湿季径流系数略大于旱季, 干季降水量减少, 且森林植被消耗大量水分, 减少了枯水期径流的产生, 增大发生旱灾的风险。森林植被延长河川径流持续时间, 使一次持续 18 d 的降水过程形成的径流, 在降水停止后能延续 24 d。降雨后退水持续时间与前期降水及后期降水叠加有关。目的为揭示漓江上游森林植被对降水径流的调节作用, 客观评估漓江上游水资源潜力、加强流域水资源管理和森林经营提供科学依据。

关键词: 漓江; 森林植被; 降水径流; 水文调节

The regulation effect of typical forest on rainfall-runoff in upper reaches of Lijiang River

DUAN Wenjun¹, LI Haifang¹, WANG Jinye^{1,*}, ZHAO Liansheng², LI Guangping², WANG Shaoneng²

¹ School of Tourism, Guilin University of technology, Guilin Guangxi 541004, China

² Mao'er Mountain National Nature Reserve Administration, Xing'an Guangxi 541316, China

Abstract: The relationship between forest and water resources has been a main scientific issue in the study of ecological hydrology, which is also an important theoretic foundation for hydrological prediction and regulation. Different forest vegetations create different canopy structure and micro-environment, which affect the distribution of rainfall among canopy, litter and different soil layers through water interception, water retention and transpiration and exert a great impact on surface runoff and river discharge. Recent studies have showed that the function of forest vegetation in reducing flood peaks during the rainy season and increasing the river flow in the dry season might be exaggerated. The relationship between forest vegetation and river flow still needs further confirmation. Lijiang River was a core mountain-water scenic spot in Guilin. Precipitation in Lijiang river basin was abundant, but its distribution within the year was irregular and rainfall mainly happened in rainy season (from March to August). Forest vegetation in the basin plays an important ecological and hydrological regulating function. In this research, data was collected in typical forest vegetation in upper reaches of Lijiang River in Mao'er Mountain National Nature Reserve, Guangxi Province. Hydrological processes, such as rainfall, surface runoff and river flow were monitored and analyzed in typical forests of Mao'er Mountain. The results showed that, 1) The

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30860058, 41261006); 国家科技支撑计划课题 (2012BAC16B04); 广西科技攻关计划课题 (桂科攻 1298006-3)

收稿日期: 2013-11-26; 网络出版日期: 2014-04-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangjy66@sohu.com

distribution of annual and inter-annual precipitation was irregular revealed by statistical analysis of annual precipitation. The rainfall intensity and the rainfall frequency in the rainy season were heavy and the rainfall in the dry season (from September to February of the following year) accounts for only 17.61% of the annual total precipitation. No significant trend was found for inter-annual precipitation in the last 50 years. The canopy interception was greatly related with rainfall characteristics and forest vegetation. 2) Forest ecosystems had complex canopy structure and exerted a great impact on rainfall redistribution and the average lag time of surface runoff was 70 min. With continuous rainfall, the lagging effect might not be obvious and the surface runoff and the rainfall appeared at the same time, which largely increased the probability of generating heavy runoff after light rain and also the risk of flood in rainy season. 3) The runoff coefficient in dry season was lower than that in rainy season because of less rainfall and more evapo-transpiration, which increased the risk of serious drought. Forest vegetation put off the peak of river flow behind, extended the runoff duration for 24 days with 18 days of continuous rainfall. For a long time, due to the different geographical environment, soil conditions and forest structure has different influence on the redistribution of precipitation, the formation process of surface runoff, underground runoff as well as evaporation, which lead to the relationships of forest vegetation, surface runoff, and river flow are still controversial in the academia. This study would provide scientific basis for better understanding of the relationships between forest vegetation and its hydrological effects, helping to facilitate water resources and achieving wise forest management in upper reaches of Lijiang River.

Key Words: Lijiang River; forest vegetation; rainfall-runoff; hydrological regulation

森林与水的关系一直是生态水文学研究的热点,森林植被对河川径流的影响是生态水文研究的重要内容,也是区域水资源评价的核心^[1-4]。不同类型的森林植被具有不同的冠层结构和土壤环境,改变了降水在林冠层、凋落物层和土壤层的分配,进而影响地表径流和河川径流的形成^[5-6]。但长期以来,由于不同的地理环境、水土条件和森林结构对大气降水的分配,地表径流和地下径流的形成以及蒸发散等过程产生不同的影响,导致学术界对森林植被与地表径流、河川径流的关系仍然存在争议。近期研究表明,森林植被在雨季消减洪峰和旱季增加产流的作用可能有所夸大,森林植被与径流形成的关系,尚有待于进一步验证^[7-10]。

漓江是以山水为特色的国际旅游胜地,是典型的雨源补给型河流,流域森林植被对河川径流起着重要的生态水文调节作用。目前,国内学者围绕流域典型森林植被垂直层次结构和地表径流、河川径流之间的关系开展初步研究^[11-15]。为进一步明确亚热带地区雨旱两季森林植被与径流形成的关系,本研究以漓江上游猫儿山国家级自然保护区典型森林植被为研究对象,利用野外同步长期定位观测林外降雨、地表径流和河川径流的方法,对漓江上游典型森林植被的生态水文过程进行观测研究。分析林外降水特征及典型森林植被对地表径流、河川径流的调节作用,对揭示漓江上游森林植被对河川径流的影响,客观评估漓江上游水资源潜力、加强流域水资源管理和森林经营提供科学依据。

1 实验区概况

试验小流域位于猫儿山国家级自然保护区九牛塘(110°29' E, 25°52' N),流域总面积 17.23 hm²,海拔 1100 m,森林植被茂盛,覆盖率为 96.5%,主要乔木树种为木荷(*Schima superba*)。年平均气温 16.4—18.1 °C,年日照时数 1243.5—1467.1 h,年平均相对湿度为 79%—82%。属中亚热带湿润季风气候区,雨热同期,年径流量丰富,但年内分布极不均匀。主要土壤类型为山地黄红壤,土层薄、质地粗、粉沙粒含量高;成土母质主要是泥炭岩、砾岩、紫红色沙页岩等。

2 研究方法

2.1 降水观测

1960—2010 年的降水历史数据来源于桂林市气象局,对 50a 降雨的年内和年际变化进行统计特征分析。

试验观测降水采用 2007 年于猫儿山架设的 LI-1401 小型自动气象站进行观测(根据海拔不同共架设 4 个自动气象站),对降雨量(mm)、空气温度(℃)、空气相对湿度(%)和风速(km/h)等气象因子进行长期连续观测。2009 年,在九牛塘山脊林外空地上另架设 JL-21 自记雨量计,观测降雨过程;雨量计分辨率为 0.2 mm,记录时间间隔为 1 min^[13]。

2.2 林内穿透雨观测

为有效观测猫儿山典型森林植被林冠层对降水的截持作用,本研究选取包括高山矮林、铁杉林、水青冈林、木荷林和毛竹林等 5 种典型森林植被(表 1)。在试验区典型林分内设置观测样线,沿线按照 0.5 m 的间隔均匀布设 10 个长 100 cm、宽 16 cm、高 25 cm 的盛雨槽,承接林内穿透雨,所有穿透雨经管道汇集后,由改进的翻斗式自计水流量仪(FR201F)测定林内降水量。把林内场降水量与距离接近的自动气象站测得大气降水相比较,计算森林系统对降水的截留量(F_i)和截留率(F_{ir})^[13]:

$$F_i = F_p - F_t$$

$$F_{ir} = \frac{F_i}{F_p} \times 100\%$$

式中, F_i 为林冠截留量(mm), F_p 为林外降水量(mm), F_t 为林内降水量(mm),包括穿透水和滴水量, F_{ir} 为林冠截留率(%)。

表 1 5 种林型本底值特征

Table 1 Characteristics of five typical forest

林分 Forest type	起源 Source	海拔 Altitude/ m	坡向 Aspect	坡度 Grade/ (°)	郁闭度 Canopy coverage/%	密度 Density/ (株/hm ²)	平均胸径 Mean diameter at breast height/cm	平均树高 Average height/m	土壤类型 Soil type
高山矮林 <i>Cyclobalanopsis stewardiana</i>	原始	1950	NE	24	97	800	28	4.5	泥炭土
铁杉林 <i>Tsuga Chinensis</i>	原始	1900	NE	5	95	450	36	17	泥炭土
水青冈林 <i>Fagus sylvatica</i>	原始	1200	W	37	95	320	64	16	山地黄壤
木荷林 <i>Schima superba</i>	人工 8 年生	700	SW	27	85	1200	12	14.5	山地黄红壤
毛竹林 <i>Phyllostachys pubescens</i>	人工 2 年生	400	SW	35	90	2250	8	16	山地红壤

2.3 地表径流观测

在九牛塘木荷林设立地表径流观测固定样地,建立地表径流观测场(规格 10 m×20 m),为防止地表径流场内外渗漏,径流场四周用水泥板做隔水墙,水泥板深入地下 40 cm,地面露出 15 cm,在出水口一端修建三角形量水堰,用自记式水流量计(Level-2000,USA)测定地表径流。

2.4 河川径流观测

为观测流域河川径流,选取九牛塘典型小流域为研究对象,小流域总面积 17.23 hm²,内含木荷林和毛竹林等多个林型。在试验小流域出水口建立三角量水堰,量水堰出水口角度为 90°,量水堰拦水墙深入基岩 50 cm,并使用防水材料;在量水堰静水池入水口安装拦污栅,防止河道中大量的枯枝落叶进入静水池,影响观测精度。同样,用自记式水流量计(Level-2000,USA)连续观测小流域径流量和径流过程。

3 结果分析

3.1 降水特征分析

对 1960—2010 年降水历史资料和近几年的试验观测数据进行统计分析。结果表明,漓江上游降水年内

分配极不均匀,其中,雨季降水(3—8月)占全年降水的82.39%,仅5—7月降水就占全年降水的47.13%(图1)。雨季降水集中降水强度大,如2011年5月7日至8日,最大降雨强度达20.0 mm/h,单次超过50 mm的降雨出现8次,降雨1134.60 mm;超过100 mm的降雨2次,降雨量286.8 mm;超过200 mm的降雨2次,降雨量522.6 mm。而旱季(9—翌年2月)降水仅占全年降水的17.61%,其中,11月份降水仅占全年总降水量的0.62%,降水次数少且降水强度小。降水年内分配极不均匀造成雨季洪涝灾害常有发生,旱季缺水矛盾突出,不利于流域水资源利用。

根据流域1960—2010年降水量变化曲线和5a滑动平均曲线(图2),可以看出,流域降水量年际动态整体呈阶段性高低交错状态。50a平均降水量为1930.4 mm,最大降水量为2691.8 mm,最小降水量为1467.3 mm,降水年际差异明显。20世纪60年代初到80年代流域年降水量在频繁波动中由低向高变化;80年代初到90年代中期,流域年降水量先出现相对较大的下降态势,而后又出现一个相对较大的上升态势;90年代中期开始到21世纪初(2010年)又出现下降。但50a降雨量总体变化趋势不明显,没有显著增加或者减少的趋势。

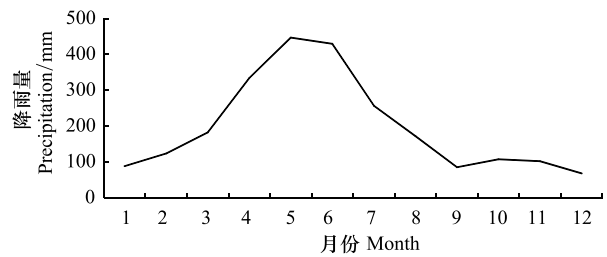


图1 漓江流域降水年内分配

Fig.1 Distribution of monthly precipitation in Lijiang River basin

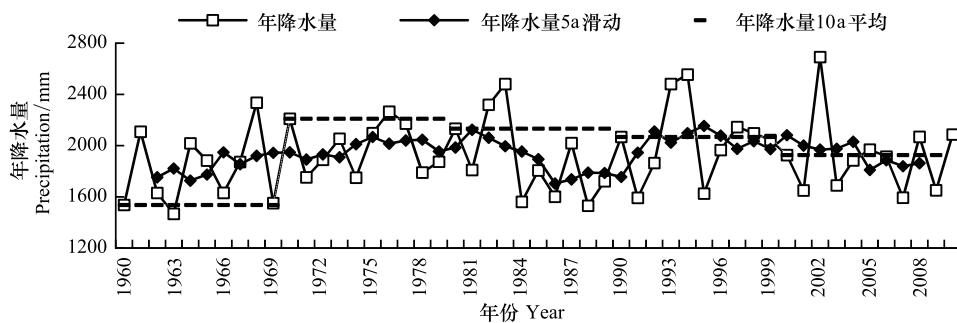


图2 漓江流域1960—2010年降水动态变化

Fig.2 Distribution of annually precipitation from 1960 to 2010 in Lijiang River basin

3.2 林冠层对降水的截持

林冠对降雨的生态水文作用在于减弱降水对地表的冲击,延迟产流时间,减少水土流失。在本研究中,将林外降水分为0—10 mm、10—25 mm、25—50 mm、50—100 mm、100—200 mm等5个等级,计算不同降雨等级下林冠层对降水的截持(图3)。可以看出,在不同降雨等级条件下,林冠截留率随降雨量增加而减少。在降雨强度很少时,林冠甚至可以完全截留降雨,这与前期降雨量及场降雨持续的时间有关。铁杉林在0—10 mm降雨等级时,林冠截留率最高,为48%;随着降雨等级的增加,截留率降低,在降雨等级为100—200 mm时达20%;林冠平均截留率为41.2%。这是由于铁杉林是针叶林,郁闭度大,雨滴易被针叶之间的空隙拦截,难以到达树干和地面。毛竹林在降雨量为0—10 mm时,林冠平均截留率仅为21%,随着降雨等级的增加,截留率稳定在10%—15%之间,平均截留率为17.6%。高山矮林、水青冈林和阔叶林林冠平均截留率分别为34.7%、37.6%和24.6%,不同植被类型截留率相差较大,且随着

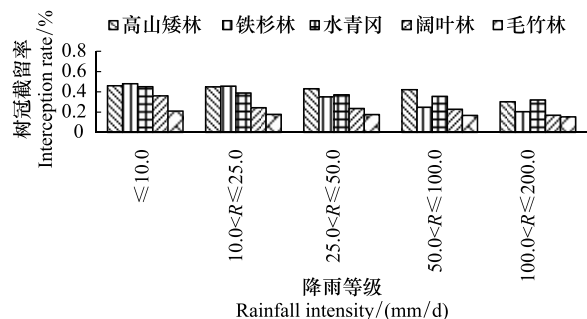


图3 不同降雨等级林冠层对降水的截留

Fig.3 Canopy interception of forests for different rainfall intensity

降雨等级变化趋势一致,说明林冠截留不仅受林外降雨特征的影响,也与植被类型密切相关。

3.3 地表径流的滞后效应

由于林冠层、枯枝落叶层的截留以及森林土壤的调蓄作用,在降水量较小和前期降雨较少的情况下,径流特征不明显,因此,较大的降雨才能反映地表径流特征及森林生态系统对地表径流的影响。观测结果表明,木荷林地地表径流有明显的滞后效应。本研究以 2011 年 6 月 4—8 月的一次典型降雨为例,分析其地表径流过程,降雨时间、累积降雨和地表径流等特征值(图 4)。此次降雨总量为 1814.4 mm,平均降雨强度为 4.5 mm/h,地表径流为 30.4 mm,地表径流系数 0.0167。当雨量和雨强均较小时,地表径流过程线的涨水过程较为平缓;而当雨量和雨强均较大时,涨水过程比较陡急。6 月 4 日降雨约 60min 后地表开始出现径流,而后又连续出现两次强降雨,第 1 次强降雨出现在 22:30,洪峰涨水出现在 22:50;第 2 次强降雨出现在 23:50,洪峰涨水出现在 6 月 5 日 00:10。而后在连续降雨的情况下,降雨滞后效应不再明显。

观测结果表明,木荷林的地表径流很小,地表径流系数仅为 0.0167(年地表径流量占年降水总量的 1.67%),这主要是由于木荷林 A 层土壤富含有机质,质地疏松,空隙大,入渗能力强,进入林内的降水更易于入渗转化为地下径流,说明木荷林具有较好的涵养水源的功能。降水停止后,地下径流缓缓渗出,地表仍有径流产生,且地表径流持续时间长于降水时间,地表径流平均滞后时间约为 70 min(图 4)。森林植被对径流系数的影响是随着累积雨量的不断增大,其影响程度也相对减小,这是由于随着雨量增加,森林系统林冠截留、枯落物层和土壤层水分处于饱和状态,地表径流的方式主要是蓄满产流,造成在植被恢复过程中林冠截留、土壤物理性质的变化对地表径流的影响变小。在降雨后期甚至会出现地表径流与降雨同步的现象,导致小降雨可能产生大径流的现象,增大漓江流域雨季发生洪灾的风险。

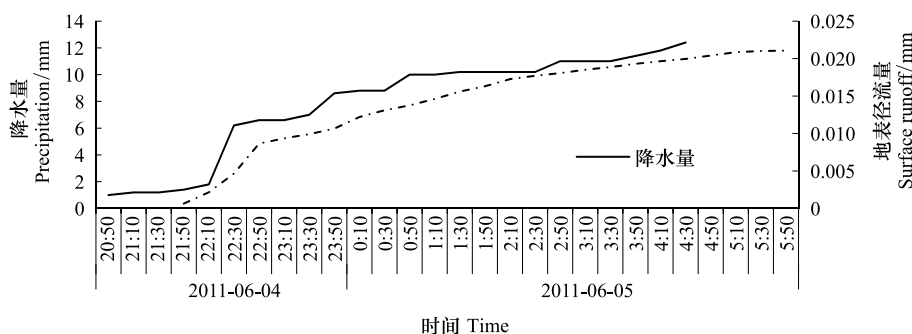


图 4 典型森林群落地表径流滞后效应

Fig.4 The time lag effect of surface runoff in typical forest

3.4 试验流域河川径流的水文响应

根据观测,试验流域面积虽然较小,但由于流域内森林植被保持良好,常年有径流发生。径流主要集中在夏季,占全年径流总量的 63.2%;冬季径流最少,仅占全年径流总量的 9.2%,春季和秋季径流分别占全年径流总量的 14.3%和 13.3%。冬春季节径流发生比较平稳,变化起伏较小;夏季径流受雨季影响变化起伏较大。试验流域年内径流量与降水量变化趋势基本一致(图 5)。2011 年,雨季径流占全年径流的 80.4%,月径流与月降水呈线形相关关系,相关系数为 0.9269。试验流域 2011 年全年径流深度为 1928.1 mm,径流系数为 0.6800,10 月径流系数最小,7 月径流系数最大。比较分析雨季与旱季径流系数的大小,表明雨季径流系数略大于旱季。旱季降水量减少,且森林植被消耗的水分高于雨季,森林把部分降水存储在系统内,减少了枯水期径流的产生,加大干旱早灾的风险。

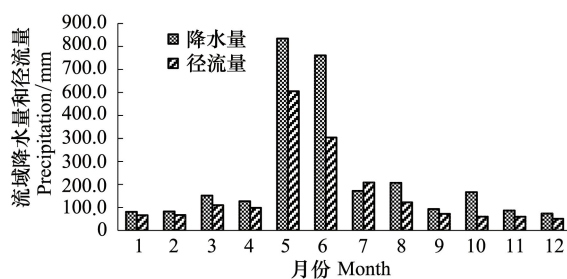


图 5 试验流域年内降水与河川径流分配

Fig.5 Distribution of monthly precipitation and river runoff

但该结果并不否定森林植被强大的涵养水源功能,森林土壤强大的渗透能力和储水能力,能把降水涵养起来,在雨后缓慢供给河川,稳定河川径流。森林植被对降水形成径流最明显的作用是滞后径流形成、径流高峰时间和延长径流持续时间。根据试验研究建立的模型计算径流递减率:

$$r = 0.2604 \times e^{-0.124 \times t}$$

$$R^2 = 0.9552$$

式中, r 为径流递减率(径流减少量/初始径流量), t 为递减时间(d)^[12]。例如,2011年6月1日至7月13日的降水是流域连续降雨较为典型的一次(图6),在45d的时间里连续降雨3次,平均降雨强度3.5 mm/h,最大1h降雨量17 mm,属典型的大暴雨。在这一降水过程中,开始两天出现降水5.2 mm,但小流域日径流量仍延续前期的下降态势;到第3天(6月4日)出现了35 mm降水,小流域日径流量才开始增加。最大降水出现在6月15日,降水量199.8 mm;最大径流出现在6月16日,滞后降水1d。降水停止后径流一直延续到第2次降水开始或延续到第2次,甚至是第3次降水径流中,第2次降水开始时小流域径流仍然大于第1次降水开始时,说明在第2次降水形成的径流中有部分是前次降水的结果。径流过程在降水停止后持续24d(降水停止后到径流减小到降水开始时的径水平),持续到6月28日以后的径流与第2次降水径流重叠,实测径流明显高于前一次降水模拟径流(图6),降雨后退水持续时间与前期降水及后期降水叠加有关。

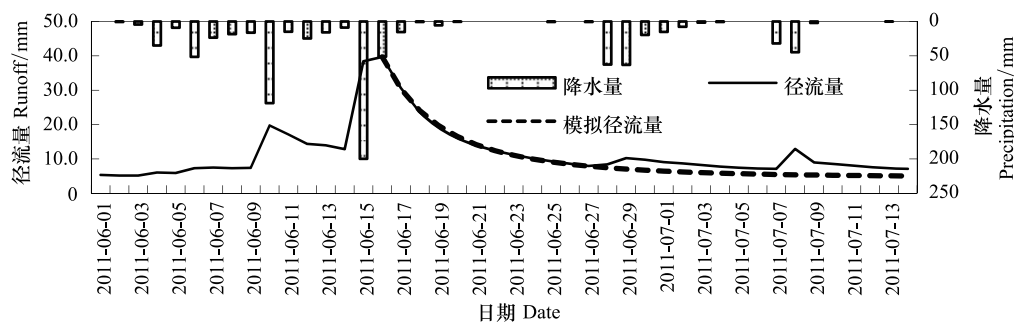


图6 试验流域年内降水与河川径流分配

Fig.6 Distribution of daily precipitation and river runoff

4 结论

漓江是典型的雨源补给型河流,探究森林植被对河川径流的调节作用,是客观评估漓江上游水资源潜力、加强流域水资源管理和森林经营的基础。根据1960—2010年50a降水历史资料和试验地水文观测,得出以下结论:1)降水年内分配极不均匀,50a年降雨量总体变化趋势不明显。林冠截留受林外降雨特征的影响,也与植被类型密切相关。2)地表径流平均滞后时间为70 min,在连续降雨的情况下,降雨滞后效应不再明显。甚至会出现地表径流与降雨同步的现象,小降雨也可能产生大的地表径流,加大漓江流域在雨季发生洪灾的风险。3)雨季径流系数略大于旱季,旱季降水量减少,且森林植被消耗大量水分,减少了枯水期径流的产生,加大旱季发生旱灾的风险。森林植被延长河川径流持续时间,使一次持续18d的降水过程形成的径流,在降水停止后能延续24d,降雨后退水持续时间与前期降水及后期降水叠加有关。

参考文献(References):

- [1] Calder I R. Forests and water-ensuring forest benefits outweigh water costs. *Forest Ecology and Management*, 2007, 251(1/2): 110-120.
- [2] Laurance W F. Environmental science: Forests and floods. *Nature*, 2007, 449(7161): 409-410.
- [3] Wang Y H, Yu P T, Feger K, Wei X H, Sun G, Bonell M, Xiong W, Zhang S L, Xu L H. Annual runoff and evapotranspiration of forestlands and non-forestlands in selected basins of the Loess Plateau of China. *Ecohydrology*, 2011, 4(2): 277-287.
- [4] Josta G, Schumec H, Hagere H, Markart G, Kohl B. A hillslope scale comparison of tree species influence on soil moisture dynamics and runoff processes during intense rainfall. *Journal of Hydrology*, 2012, 420: 112-124.

- [5] Gomi T, Sidle R C, Ueno M, Miyata S, Kosugi K. Characteristics of overland flow generation on steep forested hillslopes of central Japan. *Journal of Hydrology*, 2008, 361(3-4): 275-290.
- [6] Ghahramani A, Ishikawa Y, Gomi T, Shiraki K, Miyata S. Effect of ground cover on splash and sheetwash erosion over a steep forested hillslope: A plot-scale study. *Catena*, 2011, 85(1): 34-47.
- [7] van Dijk A I J M, Keenan R J. Planted forests and water in perspective. *Forest Ecology and Management*, 2007, 251 (1/2): 1-9. ·
- [8] Neary D G, Ice G G, Jackson C R. Linkages between forest soils and water quality and quantity. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258 (10): 2269-2281.
- [9] 郑绍伟, 慕长龙, 陈祖铭, 龚固堂, 黎燕琼. 长江上游森林影响流域水文过程模拟分析. *生态学报*, 2010, 30(11): 3046-3056.
- [10] 周光益, 陈步峰, 曾庆波, 吴仲民, 黄全, 李意德. 海南岛热带山地雨林短期水量平衡及主要养分的地球化学循环研究. *生态学报*, 1996, 16(1): 28-32.
- [11] 王金叶, 李海防, 段文军, 唐东明, 王绍能, 刘兴伟, 黄华乾. 漓江上游典型森林群落内外降雨特征研究. *水土保持研究*, 2012, 19(1): 56-60.
- [12] 王金叶, 李海防, 段文军, 唐东明, 王绍能, 刘兴伟, 黄华乾. 漓江上游森林小流域径流过程及其影响因素. *林业科学*, 2013, 49(6): 149-153.
- [13] 李海防, 王金叶, 刘兴伟, 唐东明, 李光平, 王绍能. 广西猫儿山主要林型水源涵养功能研究. *西北林学院学报*, 2012, 27(1): 50-53.
- [14] 王安志, 刁一伟, 裴铁璠, 金昌杰. 阔叶树截留降雨试验与模型-以色木槭为例. *林业科学*, 2007, 43(1): 15-20.
- [15] 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. *生态学报*, 2006, 26(3): 722-729.