

森林植被对水文通量的影响研究综述

王玉杰, 熊 峰, 王云琪, 张 焱

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘 要: 森林植被层作为水文环境要素, 对降水、蒸散和径流等水文通量在空间上的分布特征有着重要的影响作用。国内外对于森林植被对水文通量的空间分布的影响, 在垂直方向上分层次进行水文通量变化过程的研究; 在水平方向上按照林地与非林地的对比, 森林植被类型之间的对比, 甚至同一树冠的不同部位的对比等, 进行了细致的研究。以森林植被对这三种水文通量要素空间分布的作用为基础, 系统概述了近年有关的研究成果, 并结合国内外研究的动向, 指出将来可能着重研究的方向。

关键词: 森林植被; 水文通量; 水文环境; 空间分布

中图分类号: S715

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2005)04-0183-05

Impacts of Forest Vegetation on Distribution of Hydrological Fluxes: A Review

WANG Yu-jie, XIONG Feng, WANG Yun-qi, ZHANG Yan

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract As an important component in hydrological process, forest vegetation influences critically the spatial distribution of hydrological fluxes such as precipitation, evapo-transpiration, and runoff. Many researches have been conducted in terms of vertical variation of hydrological fluxes from canopy layer aboveground to root layer underground, and what were compared between forest and non-forest land, between different forest types, and even between different parts of the same crown. Based on literatures of recent two decades, the authors summarized the effects of forest vegetation on the spatial distribution of those hydrological fluxes, and discussed the primary achievements and some theoretically and practically important fields not well researched and understood, and finally attempt to point out some research direction in the future.

Key words: forest vegetation; hydrological fluxes; hydrological environment; spatial distribution

森林植被作为水文环境(hydrological environment)要素之一, 对水文通量(hydrological fluxes)^[1]具有明显的空间分异作用。森林的存在, 使到达林地的降水与空旷地有很大差异。

由于森林植被在垂直方向上的层次性(hierarchy)和水平方向上的分异性(variability), 以及对水文通量各要素(降水、蒸散、径流)直接或间接的影响, 使得水文通量在空间上的分布发生了极其复杂的变化。在垂直方向上, 森林植被的层次性主要表现为地面上的冠层(本文把乔木、灌木和草本冠层通称为冠层)、地被物层和地面下的根系层。森林植被在水平方向上的空间分异特征, 比如森林植被类型, 表现为水文通量发生分配的直接因子。

森林植被对水文通量的空间分布的影响究竟有多大, 一

直是水文工作者致力要解决的重大问题。本文按照森林植被对各水文通量要素空间分布的影响, 对国内外有关研究进行评述。

1 森林植被影响水文通量空间分布的研究意义

研究森林植被垂直方向上各层次对水文通量的影响, 主要有三方面的意义: 可以弄清楚水文通量在森林植被各层次的分配和运动变化过程, 以正确评价森林植被各层次的水文作用; 有助于开发基于物理过程的水文模型, 估算地表水和地下水的产量, 对水的可利用性(water availability)做出适当评价; 为研究森林植被防止水力侵蚀的机制提供依据。

研究森林植被在水平方向上的变化性对水文通量的影响, 其意义表现为: 与空旷地的对比可以正确评价森林植

* 收稿日期: 2004-09-13

基金项目: 国家“十五”攻关项目“长江三峡库区水源涵养型植被建设技术与示范(2001BA510B02-01)”的部分内容

作者简介: 熊峰(1971-), 男, 硕士, 研究方向为流域治理; 通讯作者, 王玉杰(1960-), 男, 博士, 教授, 现从事水土保持、流域治理等方面的科研和教学工作, 发表论文20余篇。

被的水文学意义; 植被类型之间的对比可以评价不同植被类型的水文学作用, 为森林培育的方向提供依据; 为水文过程的空间尺度分析提供依据。

2 森林植被层对降水的分配作用

到达林区的大气降水要发生两次分配过程。大气降水到达林冠作用层以后, 一部分被林冠截留, 一部分透过冠层到达林地表面^[2]。到达林地的降水, 其中一部分被森林地被物截持, 一部分向地下渗透; 一部分形成地表径流。

2.1 林冠层对降水的初次分配

林冠在降雨到达地面以前改变了其空间分布。降雨中某一成分永远到不了地面, 这部分水被叶、枝和茎拦截并以“湿冠层蒸发”或“截留损失”的过程蒸发掉。林冠进一步将暂时储存的降雨成分从冠层表面滴下的为“叶面滴流”, 或沿树木茎部导下的为“茎流”, 其余从林冠间隙落下的降水成分为“直接穿透雨”^[3,4]。

2.1.1 林冠截留

森林的林冠截留效应一般通过林冠截留率来反映。国外的研究表明, 林冠截留率一般在10% ~ 30%^[5,6]。但也有研究表明, 温带针叶林林冠截留率一般在20% ~ 40%^[7~10]。国内的研究表明: 林冠一般可以截留全年降雨的15% ~ 30%, 全年林冠截留率一般在20%左右, 热带雨林和川西高山原始林可达30%以上^[3]。

2.1.2 林冠层对降水的空间分异方面的研究

林冠层对降水的空间分异体现在两个方面: 一是单株植物冠部本身的结构所产生的穿透降水与茎流的差异; 二是由于植被类型变化等因素造成的冠体不同带来的差异。

国外的研究表明: 林冠截留量与其生物量呈正相关^[11]; 穿透降水量在降水中占有比较大的比重且与降水量近似呈线性关系, 而干流量仅占0.3% ~ 3.8%^[12]。穿透降水中由林冠叶面汇集形成的滴流, 其下落水滴大小受植被类型的影响。大叶树种形成的水滴远大于针叶树种形成的水滴, 这与热带阔叶树种的截留量和截留率要小于温带针叶树种相一致^[13]。

国内有关的研究也很多, 主要有以下一些结论:

林冠的几何结构对截留量大小具有影响, 林冠结构愈稠密, 截留量愈大, 同样数量的枝叶体, 排列与分布的规律不同(如均匀结构与团簇状结构等), 也可能影响到截留的数量^[14]。枝叶生物量和吸水性能也是其影响因子^[3]。

影响林冠截留率的因子包括: 林种、林分及其郁闭度、林型等。

就单株树木而言, 树冠外缘会比树干附近透流量大, 如华北落叶松树冠边缘较中央的降雨量大1.5倍^[15], 杉木和油松单株树冠下雨量分布均是从树干附近至树冠中部再至树冠边缘依次增加^[16,17], 而对常绿阔叶林则是树冠中部比树冠边缘大^[16]。显然, 对于树枝开展并向下垂、叶密集、具有向外缘汇集降雨作用的树木, 树冠边缘透流降雨会明显增加。

流量与树木分枝角及树皮的光滑程度有关。树枝分枝角度小, 树皮较硬而光滑有利于干流的形成, 而枝角度大, 树

皮粗糙松软, 其吸水量大, 不利于干流的形成^[18,19]。郭景唐等研究了油松人工林树枝特征函数对干流量的影响, 认为干流量与树枝特征函数的相关程度要比干流量与直径的相关系数显著的多^[20]。

冠层截留量、透流量、茎流量之间的比例随林种、林分郁闭度等因素的不同而不同^[3,21~23]。

2.2 森林地被物层对降水的再分配

森林地被物层分为活地被物与死地被物。活地被物在国内目前尚无统一的概念, 闫文德等认为活地被物层由灌木层、草本层及其以下地面以上任何植物所组成^[24], 这与罗天祥所提到的林下植物含义一致^[25], 而余新晓等把灌木层、草本层作为单独的森林植被层次, 把苔藓层才作为活地被物层进行研究^[26]。本文将紧贴地面的苔藓、地衣等植物称为活地被物。死地被物则通常被称为枯落物或凋落物。

经过多个冠层到达地被物层的林内降水, 一部分被截持, 一部分入渗到土壤中, 另一部分则可能发生水平位移, 形成地表径流。林冠层、地被物层的截留、截持水量的大小与入渗水量和地表径流量的大小有着直接的关系。

2.2.1 地被物层的对林下降水的截持作用

国外的研究表明, 水分在地被物层的传输机制类似于林冠截留过程, 其截留量与地被物的种类、贮水能力有关, 与林地单位面积地被物成正比^[27]。单位厚度森林地被物的平均储水能力约为1.23 mm/cm^[28]。

国内对地被物层中枯落物对降水的截持作用研究较多, 但对活地被物的研究相对较少。对活地被物持水能力的研究仅限于苔藓, 程金花等(2002)对苔藓的最大持水量和吸水速率进行了室内测定, 结果表明: 林下苔藓层最大持水量可达到其风干重的343.5%^[29]; 厚度从0.5~3.0 cm变动的苔藓, 其最大持水量也从1.073 9 mm增加至2.188 6 mm^[30]。但是苔藓最大持水能力并不能反映苔藓实际有效持水能力, 陈丽华等对长江上游贡嘎山的冷杉林苔藓研究表明: 在长江上游以峨眉冷杉为代表的暗针叶林苔藓层的天然持水量是其最大持水量的80%^[31]。

枯落物的吸水率多为其干重的2~3倍, 有的阔叶树种可达4倍以上; 最大吸持水量一般在1~5 mm之间, 多的可达10 mm左右; 枯落物截留降雨介于20~90 mm^[32]。枯落物层吸水作用的大小, 取决于其本身的厚度和性质。

2.2.2 地被物层对降水的空间分异作用的研究

国外的研究表明, 地被物的厚度、质量随森林植被的空间变化而变化^[33,34], 因而也形成地被物层持水能力的空间分异特征。

国内也有类似的结论。研究发现, 不同类型、林龄的森林下的苔藓层具有不同的最大持水量^[29,35]。枯落物层持水率和最大持水量受林分及其郁闭度的影响^[36,37]。

3 森林植被对蒸散发的空间分配的影响

森林的物理蒸发和森林植物蒸腾二者之和, 称为森林蒸散^[2]。冠层截留损失、地被物截持水分蒸发和林内地表蒸发构成蒸散的物理蒸发部分; 森林蒸散的另一部分就是通过植

物根系吸收土壤水分进行的植物蒸腾。目前的蒸散研究中,对总蒸散量的研究方法中也没有可以起到校准其他方法的相对标准的方法^[38]。魏天兴等对林分的蒸散量的测定和计算方法进行了较为系统的阐述^[39]。

国外对典型热带雨林的研究表明,总蒸散量能占降水量的67.6%^[40];分别用蜗动相关法和集水区水量平衡法对美国东南部的非同龄落叶混交林的蒸散量进行测定,结果基本一致,在580 mm左右^[41]。

3.1 森林植被在垂直方向上对蒸散有明显的空间分异作用

国外的资料表明,树木蒸腾量占总蒸散量的比例从干季到湿季也有其变化范围43%~68%^[40~42]。林内地表蒸发仅占测定的总蒸散量与植物蒸腾量之差的小部分^[41]。地被物的蒸发水量占年总蒸散量的7%~13%,但地被物的蒸散量不一定是降水截持量,在干旱季节,有25%的地被物蒸发来源于矿质土壤的毛管水^[43]。

国内的资料表明,林冠层蒸散量在总蒸散量中占优势。高人(2002年)在对辽宁东部山区5种主要森林类型的研究表明,各林分类型生长季总蒸散量为476.6~651.3 mm,以林冠的蒸发散为主,占同期总蒸散量的73.5%~88.6%,林冠下林地蒸发散为69.3~126.5 mm,占总蒸发散的11.4%~26.5%。^[44]孟广涛等(2001年)在云南省会泽县的华山松人工林地的研究表明,在蒸散的水量中,林冠截留雨量的直接物理蒸发量占总蒸散量的25.6%。^[45]

3.2 蒸散量随森林植被的水平变化而分异

联邦德国鲍姆加特纳综合了大量关于森林蒸散的研究成果,与其它地类进行比较,得出森林蒸散通常比低矮植被蒸散量大10%~30%,几乎与水面蒸发一样^[2]。

国内的研究也认为林地的蒸散量总体大于无林地^[2]。程根伟等在中国科学院贡嘎山高山生态站计算对比分析非森林地面蒸发和森林蒸散的结果发现,在非生长季节,林地蒸散大约比非森林地面低25%;而在生长季节,森林蒸散比非林地高25%左右。只有在5月或者10月,这两者的结果基本相同^[46]。

森林植被使地表的面蒸发变成一种“体蒸散”,首先是植被层的叶的立体分布,二是植物根在土壤中的立体分布。所以,总体来说,森林植被能增加蒸散量。

森林蒸散总体大于裸露地表蒸发是因为:一是植被层的遮荫作用,减弱了太阳辐射能,降低了地表温度;二是植被层降低了地表空气流速;三是林内空气比林外空气湿度要大。这三点都不利于地表蒸发,所以森林植被对地表蒸发有减弱作用。

4 森林植被对径流分配的影响

径流可以分为地表径流、壤中流和地下径流,这3种径流成分之间关系紧密。径流形成的机制通常认为有两种:超渗产流和蓄满产流。无论是超渗产流还是蓄满产流,都可以归结为界面产流规律^[47]。森林正是通过对产流机制产生深刻的影响而作用于径流成分之间的分配关系的。

关于森林植被对流域总径流量的影响,国内外还没有一致的结论^[48]。基于前述森林植被的水平方向变化引起的林

冠截留量、地被物截持水量和蒸散作用等的差异性,以及各区域土壤入渗能力的不同,不同区域产流情况也大不一样。这可以用变动源区理论(Variable Source Area Concept)^[49]来加以说明。变动源区水文过程(Variable Source Area hydrology)是过饱和过程的扩展^[50]。从变动源区在空间上的分布和传递过程看,某些流域产生较大的主要由壤中流(Sub-surface flow)形成的暴雨径流量,表明暴雨产流并不仅仅局限于近河槽地段,而是可以扩展到流域内较大的区域上^[51]。

4.1 森林植被能增加土壤入渗,从而减少地表径流的形成

森林能增加土壤入渗,主要体现在两个方面。一是森林能增加土壤入渗能力,水力传导度是其直接体现;二是森林改变了土壤表面特性(比如改变了地表糙率或表层贮水能力),从而增大了水分入渗到土壤的机会^[52]。

森林植被之所以增加入渗能力主要是因为森林植被能减小土壤容重,增大土壤孔隙度和贮水量^[53]。而土壤容重小,孔隙度大,初始含水量高,都能增大土壤入渗率^[54,55]。

森林土壤的水分入渗能力明显大于非林地,林地与对照的荒地相比,入渗率平均值是荒地的3~4倍^[54,56]。森林土壤的入渗率受森林演替阶段、林分类型、密度、郁闭度、枯落物层厚度等因素的影响^[53,56]。

4.2 对壤中流的形成有直接影响

壤中流在流域径流产生过程中具有相当重要的作用。特别在森林流域内,表层土壤透水性较强,降雨能较快地渗入土壤中形成土壤水,并沿坡面向下流动形成壤中流^[57]。森林植被对壤中流的形成有直接的影响:

植物根系的吸水作用影响壤中流的形成。由于植物根系分布引起土体内水分消耗的非均一性,远离植物根际区土壤水分在根系密集区土壤水势梯度的作用下,向根际区汇集,从而对壤中流的形成产生影响^[58]。

植物死亡根系对管流的形成是一种直接贡献。管流作为优先流中的一种主要的大孔隙流^[59],对土壤水分的入渗及壤中流的形成具有重要的作用。由植物死亡根系形成的生物性土管由于其内壁的粗糙程度较地质性土管(由土壤裂隙形成的土管)大,因此对水分的传输更为迅速^[60]。

4.3 森林植被能影响地下径流

地下径流是指下渗到深层变成地下水的成分,又在切割深度比较大的河道中流出形成的径流^[2]。森林植被对地下径流有两个相反的作用,一方面增加土壤入渗有利于水分补充到地下水中,另一方面植物的蒸腾作用吸收大量土壤水分以及对土壤贮水力的改善又不利于水分对地下水的补充。

国内的研究表明,森林植被能在降水充沛的季节增加入渗,从而有利于增加地下水的补充量,形成地下径流^[61~63];但在干旱半干旱的黄土地区,密度过大的森林植被强烈蒸散引起的土壤干层,因其巨大水分亏缺量阻隔重力水下渗,阻止降水垂直入渗补给地下水的作用,又不利于地下径流的形成^[64,65]。

5 结 语

综上所述,国内外对于森林植被对水文通量的空间分布

的影响,在垂直方向上分层次进行水文通量变化过程的研究;在水平方向上按照林地与非林地的对比,森林植被类型之间的对比,甚至同一树冠的不同部位的对比等,进行了细致的研究,并取得了一定的成果。但总起来看,现有研究多是基于森林植被对水文通量某一方面的影响,缺乏系统全面的研究。从研究方法与手段上看,迄今的森林水文学研究过于强调森林的水文效应,缺乏对影响森林水文过程各要素的综合分析,没有统一的方法和技术指标,设立的试验场所也不够完善,缺乏长期的监测数据。

参考文献:

- [1] 张志强,等.森林植被影响径流形成机制研究进展[J].自然资源学报,2001,16(1): 79- 84
- [2] 贺庆棠.气象学[M].北京:中国林业出版社,1988. 11.
- [3] 王佑民.我国林冠降水再分配研究综述(Ⅰ)[J].西北林学院学报,2000,15(3): 1- 7.
- [4] Nick A Chappell, et al. Modelling rainfall and canopy controls on net- precipitation beneath selectively- logged tropical forest[J]. Plant Ecology, 2001, 153: 215- 229
- [5] Teng- Chiu Lin, et al. Spatial variability of throughfall in a subtropical rain forest in Taiwan[J]. Journal of Environmental Quality, 1997, 26(1): 172- 180
- [6] Delphis F Levia Jr, Ethan E Frost. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems[J]. Journal of Hydrology, 2003, 274: 1- 29
- [7] Hornbeck J W, Swank W T. Watershed ecosystem analysis as a basis for multiple use management of eastern forests[J]. Ecol Appl, 1992, (2): 238- 247.
- [8] McCulloch J G, Robinson M. History of forest hydrology[J]. Journal of Hydrology, 1993, 150: 189- 216
- [9] Stednick J D. Monitoring the effects of timber harvests on annual water yield[J]. Journal of Hydrology, 1996, 176: 79- 95
- [10] Swank W T, et al. Stream flow changes associated with forest cutting, species conversion and natural disturbance[A]. In: Forest Hydrology and Ecology at Coweet[C]. Ecol Stud, New York: Springer- Verlag, 1988, 66: 297- 312
- [11] Dave M Morris, et al. Patterns of canopy interception and throughfall along a topographic sequence for black Spruce dominated forest ecosystems in northwestern Ontario[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2003, 33(6): 1046
- [12] 高甲荣,等.国外森林水文研究进展述评[J].水土保持学报,2001,15(5): 60- 75
- [13] Ian R. Calder. Canopy processes: implications for transpiration, interception and splash induced erosion, ultimately for forest management and water resources[J]. Plant Ecology, 2001, 153: 203- 214
- [14] 崔启武,等.林冠对降水的截留作用[J].林业科学,1980,16(2): 141- 146
- [15] 刘向东,等.六盘山区森林树冠截留、枯枝落叶层和土壤水文性质的研究[J].林业科学,1989,25(3): 220- 227.
- [16] 邓世宗,韦炳斌.不同森林类型林冠对大气降雨量再分配的研究[J].林业科学,1990,26(3): 271- 276
- [17] 刘向东,等.黄土丘陵区油松人工林和山杨林林冠对降水的再分配及其对土壤水分的影响[J].中国科学院西北水土保持研究所集刊,1991,第14集: 9- 20
- [18] 马雪华,等.亚热带杉木、马尾松人工林水文功能的研究[A].见:周晓峰.中国森林生态系统定位研究[M].哈尔滨:东北林业大学出版社,1994. 346- 353
- [19] 曾庆波.海南岛尖峰岭热带林生态系统的水分循环研究[A].见:周晓峰.中国森林生态系统定位研究[M].哈尔滨:东北林业大学出版社,1994. 413- 429
- [20] 郭景唐.华北油松人工林树枝特征函数对干流量影响的研究[A].见:周晓峰.中国森林生态系统定位研究[M].哈尔滨:东北林业大学出版社,1994. 268- 273
- [21] 卫正新,李树怀.不同林地林冠截留降雨特征的研究[J].中国水土保持,1997, (5): 19- 21.
- [22] 王佑民,刘秉正.黄土高原防护林生态特征[M].北京:中国林业出版社,1994. 228- 233
- [23] 杨茂瑞.亚热带杉木、马尾松人工林的林内降雨、林冠截留和树干茎流[J].林业科学研究,1992,5(2): 158- 162
- [24] 闫文德,等.会同第二代杉木人工林林下植被生物量分布及动态[J].林业科学研究,2003,16(3): 323- 327.
- [25] 罗天祥.龙胜里骆杉木人工林群落的降水截留和养分淋溶归还[J].资源科学,1995, (6): 44- 50
- [26] 余新晓,等.贡嘎山东坡峨眉冷杉林地生物分布及其水文效应初步研究[J].北京林业大学学报,2002,24(5/6): 14- 18
- [27] Putuhen W M, Cordery I. Estimation of interception capacity of the forest floor[J]. J. Hydro, 1996, 180: 283- 299

- [28] C Tobo nMarin, et al Forest floor water dynamics and root water uptake in four forest ecosystems in northwest Amazonia[J]. Journal of Hydrology, 2000, 237(3- 4): 169- 183
- [29] 程金花, 等 贡嘎山冷杉纯林地被物及土壤持水特性[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(3): 45- 49
- [30] 曾信波 苔藓层的蓄水保土功能研究[J]. 水土保持学报, 1995, 9(4): 118- 121
- [31] 陈丽华, 等 贡嘎山冷杉林区苔藓层截持降水过程研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(4): 60- 63
- [32] 王佑民, 等 中国林地枯落物持水保土作用研究概况[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 108- 113
- [33] Roger T Koide, et al On variation in forest floor thickness across four red pine plantations in Pennsylvania, U SA [J]. Plant and Soil, 2000, 219(1): 57- 69
- [34] Xiaoni N Xu, Eiji Hirata Forest floor mass and litterfall in Pinus luchuensis plantations with and without broad-leaved trees[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 157(1- 3): 165- 173
- [35] 张洪江, 等 三峡库区几种林下苔藓的保水功能[J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(5): 457- 461
- [36] 杨吉华, 等 不同林分枯落物的持水性能及对表层土壤理化性状的影响[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 141- 144
- [37] 潘紫重, 等 不同林分类型凋落物的蓄水功能[J]. 东北林业大学学报, 2002, 30(5): 19- 21
- [38] 王安志, 裴铁璠 森林蒸散测算方法研究进展与展望[J]. 应用生态学报, 2001, 12(6): 933- 937
- [39] 魏天兴, 等 林分蒸散耗水量测定方法述评[J]. 北京林业大学学报, 1999, 21(3): 85- 91
- [40] Paulo Rodolfo Leopoldo, et al Real evapotranspiration and transpiration through a tropical rain forest in central Amazonia as estimated by the water balance method[J]. Forest Ecology and Management, 1995, 73(1- 3): 185- 195
- [41] Kell B Wilson, et al A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance[J]. Agriculture and Forest Meteorology, 2001, 106(2): 153- 168
- [42] Thomas W Giambelluca, et al Transpiration in a small tropical forest patch[J]. Agriculture and Forest Meteorology, 2003, 117(1- 2): 1- 22
- [43] M G Schaap, et al Forest floor water content dynamics in a Douglas fir stand[J]. Journal of Hydrology, 1997, 201(1- 4): 367- 383
- [44] 高人 宁东部山区几种主要森林植被类型水量平衡研究[J]. 水土保持通报, 2002, 22(2): 5- 8
- [45] 孟广涛, 等 滇中华山松人工林的水文特征及水量平衡[J]. 林业科学研究, 2001, 14(1): 78- 84
- [46] 程根伟, 等 贡嘎山亚高山森林带蒸散特征模拟研究[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(1): 23- 27
- [47] 芮孝芳 关于降雨产流机制的几个问题的讨论[J]. 水利学报, 1996, (9): 22- 26
- [48] 石培礼, 李文华 森林植被变化对水文过程和径流的影响效应[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 481- 487
- [49] 余新晓, 等 基于地形指数的TOPMODEL 研究进展与热点跟踪[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(4): 117- 121
- [50] M T Walter, et al Hydrologically sensitive areas: Variable source area hydrology implication for water quality risk assessment[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 55(3): 277- 284
- [51] Sidle R C, et al Seasonal hydrological response at various spatial scales in a small forested catchment, Hitachi Ohta, Japan[J]. Journal of Hydrology, 1995, 168(6): 227- 250
- [52] Bradford P Wilcox, et al Hydraulic conductivity in a pinon- juniper woodland: Influence of vegetation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(4): 1243
- [53] 余新晓, 等 长江上游亚高山暗针叶林土壤水分入渗特征研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1): 15- 19
- [54] 陈丽华, 余新晓 晋西黄土地区水土保持林地土壤入渗性能的研究[J]. 北京林业大学学报, 1995, 17(1): 42- 47
- [55] 张永涛, 等 石质山地不同条件的土壤入渗特性研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 123- 126
- [56] 潘紫文, 等 黑龙江省东部山区主要森林类型土壤水分的入渗速率[J]. 东北林业大学学报, 2002, 30(5): 24- 26
- [57] 李金中, 等 森林流域坡地壤中流模型与模拟研究[J]. 林业科学, 1999, 35(4): 2- 8
- [58] 王新平, 等 沙坡头人工植被固沙区天然降水的入渗和分配研究[J]. 中国沙漠, 2002, 22(6): 534- 540
- [59] 秦耀东, 等 土壤中孔隙流研究进展与现状[J]. 水科学进展, 2000, 11(2): 203- 207
- [60] 张洪江, 等 长江三峡花岗岩坡面林地土管特性及其对管流的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(1): 55- 60
- [61] 杨新华 湛江市的干旱状况及水资源的可持续利用[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2001, (4): 19- 23
- [62] 吴绳聚, 等 森林对水环境影响浅议[J]. 防护林科技, 1994, (2): 22- 24
- [63] 尹佃忠 森林植被对地下水补给作用分析[J]. 地下水, 2003, 25(1): 9- 10
- [64] 李玉山 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 427- 432
- [65] 刘贤赵, 黄明斌 黄上丘陵沟壑区森林土壤水文行为及其对河川径流的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(2): 72- 76