

DOI: 10.5846/stxb201601120081

龚诗涵, 肖洋, 方瑜, 郑华, 肖焱, 欧阳志云. 中国森林生态系统地表径流调节特征. 生态学报, 2016, 36(22): - .

Gong S H, Xiao Y, Fang Y, Zheng H, Xiao Y, Ouyang Z Y. Forest ecosystem surface run-off regulation characteristics in China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): - .

中国森林生态系统地表径流调节特征

龚诗涵^{1, 2}, 肖 洋^{1, 2}, 方 瑜¹, 郑 华¹, 肖 焱¹, 欧阳志云^{1, *}

1 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要: 径流调节是森林生态系统重要生态服务功能之一, 包含着大气、水分、植被和土壤等生物物理过程, 其变化将直接影响区域气候水文、植被和土壤等状况, 是区域生态系统状况的重要指示器。在区域尺度上评估森林生态系统地表径流特征, 对于科学认识和合理保护森林生态系统水源涵养功能具有重要意义。以森林生态系统定位监测数据为基础 (文献资料收集), 探讨地表径流与降水, 径流系数与植被的关系, 建立径流系数与植被的回归方程, 分析全国森林生态系统地表径流调节特征。结果表明: (1) 各森林类型地表径流与降水相关性显著, 其对地表径流的影响为 37%—76%。此外, 径流系数与植被也显著相关, 其对径流系数的解释能力为 27%—47%。(2) 基于植被覆盖数据, 通过植被与径流系数回归方程估算全国森林生态系统的径流调节特征。各森林生态系统径流调节能力存在差异, 强弱顺序为: 落叶针叶林>落叶阔叶林>针阔混交林>常绿针叶林>常绿阔叶林。

关键词: 地表径流调节; 森林生态系统; 降水; 植被; 径流系数

Forest ecosystem surface run-off regulation characteristics in China

GONG Shihan^{1, 2}, XIAO Yang^{1, 2}, FANG Yu¹, ZHENG Hua¹, XIAO Yi¹, OUYANG Zhiyun^{1, *}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract: Run-off regulation is an important forest ecosystem service. It is involved in natural processes, such as regional climate circulation, the hydrological cycle, vegetation growth, soil conditions, and other natural processes. It is also an important indicator of regional ecosystem status change. Water resources in China are limited, and precipitation is uneven over time and space. Many researchers have attributed the water conservation loss in China to long-term human interference and widespread conversions of land use and land cover. Previous studies have found that climate conditions, such as drought, severe storms, and temperature fluctuations, are the primary cause of water conservation change. Therefore, the current forest run-off regulation characteristics and their relationships with precipitation, surface run-off, and vegetation need to be investigated if water conservation levels are to improve. To date, many reviews of paired catchment studies have only observed the changes in run-off characteristics over a couple of years. A few studies have used paired catchment results to predict the hydrological responses to permanent vegetation change. A comparison of the long term annual results from regrowth, deforestation, and afforestation experiments have shown that it takes more than 5 years for a catchment to reach a new equilibrium after permanent changes in vegetation have taken place. However, deforestation experiments reach a new equilibrium earlier than afforestation experiments. Paired catchment studies have successfully revealed relationships between

基金项目: 全国生态环境长期跟踪遥感调查 (KFJ-EW\ZY-004)

收稿日期: 2016-01-12; 修订日期: 2016-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyouyang@rcees.ac.cn

the percentage vegetation change and associated hydrological characteristics in relatively small catchments. The relationship between run-off and precipitation becomes significant when seasonal storms and/or rain precipitation are included in the analysis. Previous plot scale studies have also shown that vegetation reduced runoff compared to farmland and grassland ecosystems. At the catchment scale, paired catchment studies have also shown that afforestation further reduces run-off, but the hydrological responses associated with rainfall-runoff processes are very complicated. This investigation used a literature review, statistical regression, and geographic information system analyses to study the run-off characteristics of different forest ecosystems and has developed a run-off regulation regression model for ecosystems at the regional scale. We quantified the run-off regulation characteristics of forest ecosystems in China, and compared the regulation characteristics of different types of ecosystems. Our main conclusions are (1) There is a significant correlation between precipitation and surface run-off in different forest ecosystems, and there is a correlation between vegetation cover and the run-off coefficient. The proposed run-off regulation functions were based on the regression analysis of a large amount of measured data obtained from the literature. (2) The run-off regulation characteristics for forest ecosystems were calculated over 11 years (2000—2010) using vegetation data for China and a statistical regression function. The forest ecosystems had different run-off regulation functions. The run-off regulation capability decreased in the following way: deciduous coniferous forest > mixed deciduous broadleaf forest > mixed broadleaf-conifer forest > evergreen coniferous forest > evergreen broadleaf forest.

Key Words: surface runoff regulation; forest ecosystem; precipitation; vegetation; runoff coefficient

森林生态系统作为地球上最重要的陆地生态系统,不仅为人类输出木材、药材及其他工业用品,而且还具有水源涵养、土壤保持、生物多样性保护、气候调节等功能^[1-2]。由于人口的增长、需求的增加、城镇化进程加快、资源开发力度的增大,导致了森林生态系统的退化,服务功能的降低,进而威胁着人类赖以生存的环境^[3-4]。

径流调节主要指养护水资源的举措达到降低水土流失、控制土壤沙化的目的,对于缓解洪涝灾害,减少土壤与营养物质流失,提高系统生产力有着重要影响^[5]。森林生态系统径流调节效应是十分明显,大多数径流是以壤中流、地下流的形式流出。地表径流调节受多种因素影响,包括气候条件(降水量、降水强度)、植被特征(类型、结构、林龄、覆盖率),土壤条件(土壤厚度、孔隙率),地质、地形特征以及人类活动影响等^[6]。

目前,我国水资源和水环境问题十分严峻,水资源短缺,水质恶化,洪灾、旱灾频繁,已给人们生产生活造成了巨大的负面影响。此外,经济与人口的增长、城市化进程的加快以及全球气候变暖,将进一步加剧水资源和水环境问题。由于环境问题的加剧,径流调节在生态系统服务中的重要性得到了广泛的重视。尽管国内外学者针对森林生态系统的径流调节功能进行了大量的研究,但由于研究区局限和特定,并未能反映全国尺度的森林生态系统径流调节特征^[7]。本研究通过整合相关文献资料数据,建立径流系数与植被回归方程,研究全国尺度的森林径流调节特征,在探讨森林降低水土流失,保护水土资源,以及森林植被恢复和生态重建方面具有重要的科学意义和应用价值。

1 研究数据与方法

1.1 数据收集与筛选

本研究所用数据主要来自于相关文献资料,包括从国内公开发表的文献和出版的专著(关于径流小区的地表径流、降水、植被数据)。为了充分、有效地利用所收集的数据,更好地反映各森林生态系统类型地表径流与降水和植被的关系,本研究根据样本数据获得的方法的统一性对文献资料进行筛选,从多篇文献资料中筛选满足条件的样本数据。这些数据较大程度地覆盖了我国森林生态系统的分布区域,代表了我国的各种森林生态系统类型。植被覆盖度数据是基于像元二分模型^[8]通过 Modis 影像反演得到。像元二分模型是一种简单实用的遥感估算模型,它假设一个像元的地表由有植被覆盖部分与无植被覆盖部分地表组成,而遥感传

感器观测到的光谱信息也由这 2 个组分因子线性加权合成,各因子的权重是各自的面积在像元中所占的比率,其中植被覆盖度可以看作是植被的权重。全国 2000—2010 植被覆盖数据(VC)来源于中国科学院遥感与数字地球研究所。生态系统类型图主要基于 Landsat 数据采用的面向对象的分类技术,引入非影像光谱信息强化目标的识别能力;生态系统类型数据来源于中国科学院遥感与数字地球研究所。降水与温度数据,基于普通薄盘和局部薄盘样条函数插值理论,来源于中国国家计量信息中心/中国气象局(NMIC/CMA)。

1.2 研究方法

中国幅员辽阔,自然条件复杂。多样化的气候、地形特征,维持着不同生态系统类型。就森林生态系统而言,其分布明显反映了地带性的特征,从北到南,大致分布为寒温带和温带山地针叶林、温带针阔混交林、温带落叶阔叶林、亚热带针阔混交林、亚热带常绿阔叶林、热带雨林和季雨林。目前,我国森林生态系统有多种分类方法,基于本文的研究目的和空间数据的可得性,本文依据《中华人民共和国植被图(1:100 万)》植被分类方法^[9](表 1),结合全国生态系统类型图^[10-11]整理得到。

表 1 中国森林生态系统分类

Table 1 Classification of forest and shrub ecosystems

森林生态系统类型 Forest ecosystem types		代表树种 Dominant tree species
落叶针叶林 Deciduous coniferous forest	寒温带和温带山地针叶林 温带针叶林	兴安落叶松、西伯利亚落叶松、华北落叶松等 油松、赤松、白皮松等
常绿针叶林 Evergreen coniferous forest	亚热带和热带山地针叶林 亚热带和热带针叶林	大白红杉、台湾铁杉、云南铁杉等 马尾松、云南松、海南松等
落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forest	温带落叶阔叶林 亚热带落叶阔叶林	蒙古栎、白桦、山杨等 青檀、化香、枫香、桉树等
常绿阔叶林 Evergreen broadleaf forest	亚热带常绿阔叶林 热带雨林、季雨林 亚热带、热带竹林和竹丛	以栲属、石栲属、青冈属等为主 望天树、青皮、黄葛树等 毛竹、箭竹、麻竹等
针阔混交林 Mixed broadleaf-conifer forest	温带针阔混交林 亚热带针阔混交林	红松与蒙古栎、紫椴、风桦等 铁杉属与槭、桦、青冈等

利用筛选后的试验数据,运用 SPSS 软件,进行相关分析。基于拟合结果(回归系数 R^2) 选择合适拟合方程,建立各森林类型地表径流和降水、植被的函数关系,揭示其径流调节特征。所建立的降水与径流关系应同时满足统计学、生态学的意义(统计学意义为所建立的趋势线能较好地代表所有数据,关系达到显著性;生态学意义则是在降水范围内,径流量均应小于降水量)。

径流调节能力 WC 表示森林生态系统对雨水的调节能力,计算公式如下:

$$WC = 100 - RC = 100 - R / P \times 100$$

其中, RC 为径流系数(%),等于地表径流量 R 与降雨量 P 的比值乘以 100。

2 结果与分析

由于收集试验数据的不完整性,影响因子的复杂性,全面了解各因子对径流调节的影响仍有很大的难度。目前,关于各因子对径流的影响也尚未得到一致的规律性的结论^[7]。所以,在分析地表径流与影响因子关系时,应关注主要的影响因素。研究表明,降水和植被会显著影响地表径流,其对径流动态的贡献率分别为 69.8% 和 17.3%^[12]。综合考虑,本文基于数据可获取性和影响因素重要性,选取森林类型、降水量和植被覆盖作为区域尺度上分析地表径流的关键因子。

2.1 地表径流与降水的关系

森林作为陆地主要生态系统类型,通过林冠、林下植被和凋落物对降水截留,以及蒸散作用和森林土壤的贮存特征,使森林地表径流减少,起到水文调节作用^[13]。本文基于所收集的数据^[14-60],统计分析不同森林类

型地表径流与降水的关系。由图 1 可见,各森林类型地表径流与降水呈现极显著的正相关性,其中相关最高的为常绿针叶林,决定系数 R^2 达到了 0.764(表 2)。回归函数多为幂函数和线性函数,说明随着降水量的增多,森林地表径流量也随之加大。降雨明显作用于各森林类型的地表径流,其影响的解释力为 37%—76%。剩余的 24%—63%为其他因子对地表径流的影响,例如土壤厚度、孔隙度、坡度等等。

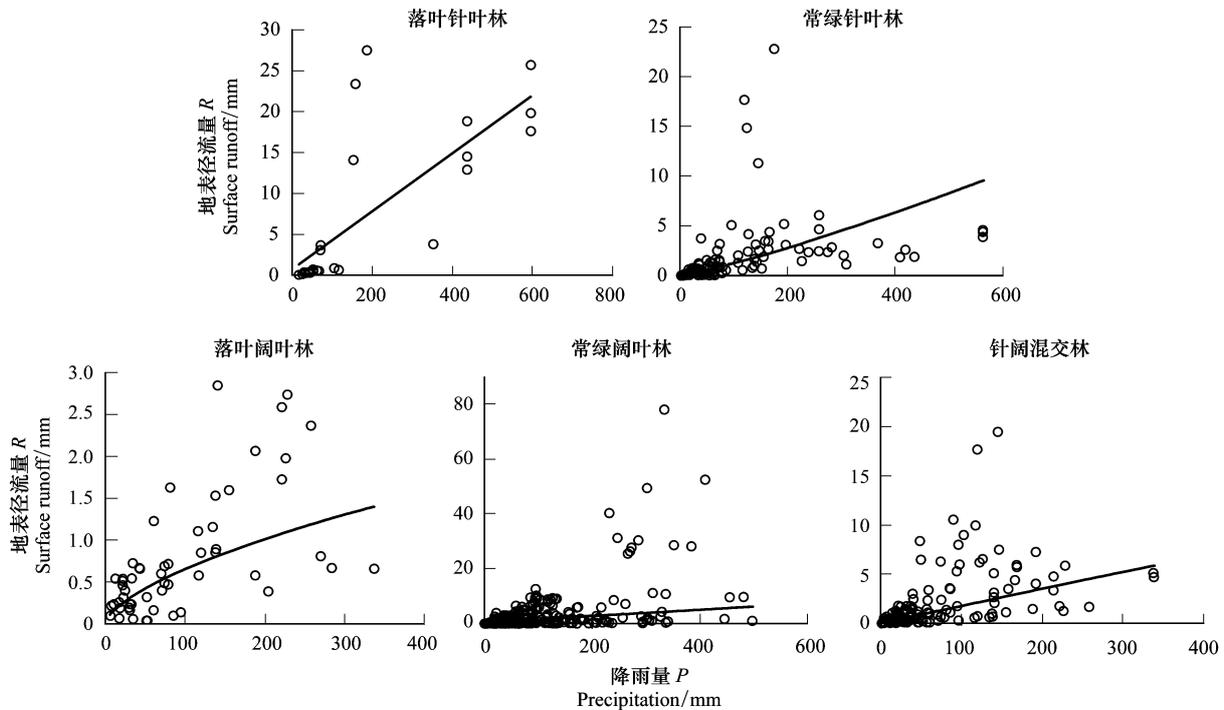


图 1 地表径流与降雨关系 (R 为地表径流量, P 为降雨量)

Fig.1 The relationship between surface runoff and precipitation

R 为地表径流量, P 为降雨量 (R is surface runoff and P is precipitation)

表 2 地表径流与降雨关系

Table 2 The relationship between runoff and precipitation

生态系统类型 Ecosystem type	样本数 Number of data	决定系数 R^2	回归函数 Regression function
落叶针叶林 Deciduous coniferous forest	29	0.524	$R = 0.0373 \times P + 0.593$
常绿针叶林 Evergreen coniferous forest	138	0.764	$R = 0.0048 \times P^{1.197}$
落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forest	60	0.377	$R = 0.0053 \times P + 0.256$
常绿阔叶林 Evergreen broadleaf forest	325	0.385	$R = 0.0202 \times P^{0.916}$
针阔混交林 Mixed broadleaf-conifer forest	145	0.543	$R = 0.0106 \times P^{1.063}$

2.2 径流系数与植被的关系

在样本分析结果中,除了发现降水量与地表径流显著相关外,我们还发现植被覆盖与径流系数存在显著的负相关特征。由图 2 可知,各森林类型植被覆盖与径流系数呈现极显著的负相关性,其中相关最高的为落叶阔叶林,决定系数 R^2 达到了 0.56(表 2)。回归函数多为幂函数,说明随着植被覆盖度的增加,森林的径流系数随之降低。植被覆盖在一定程度上确定着各森林类型的径流系数,其作用的解释力为 32%—56%。

2.3 径流调节能力

虽然我国降雨时间分布差异明显,但降雨主要分配在夏季(雨热同期),同时该时段也是植被的主要生长期,所以本文选取 4—10 月的植被覆盖度平均值来代表年植被覆盖度。基于植被覆盖与径流系数的回归函数模拟了全国森林径流调节能力。

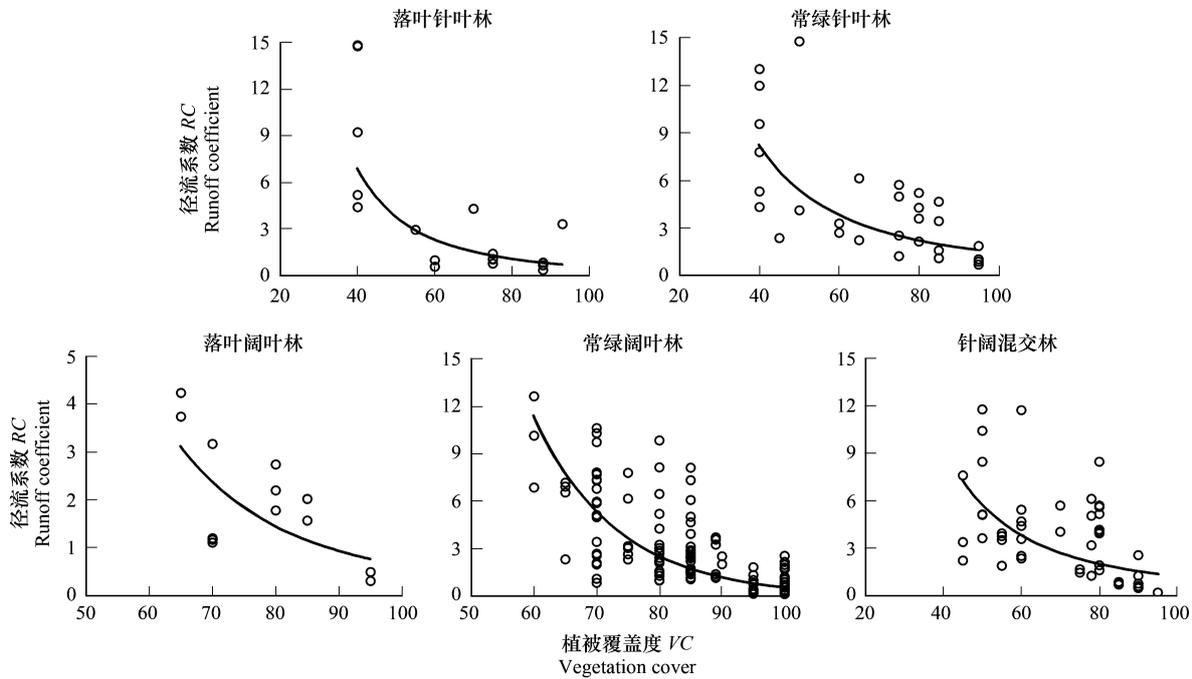


图 2 径流系数与植被覆盖关系 (RC 为径流系数, VC 为植被覆盖度)

Fig.2 The relationship between runoff coefficient and vegetation cover (RC is runoff coefficient and VC is vegetation cover)

表 3 径流系数与植被覆盖关系

Table 3 The relationship between runoff coefficient and vegetation cover

生态系统类型 Ecosystem type	样本数 Number of data	决定系数 R^2	回归函数 Regression function
落叶针叶林 Deciduous coniferous forest	21	0.558	$RC = 136717 \times VC^{-2.684}$
常绿针叶林 Evergreen coniferous forest	31	0.516	$RC = 9074.5 \times VC^{-1.9}$
落叶阔叶林 Deciduous broadleaf forest	15	0.416	$RC = 2 * 10^{07} \times VC^{-3.697}$
常绿阔叶林 Evergreen broadleaf forest	130	0.533	$RC = 1 * 10^{12} \times VC^{-6.114}$
针阔混交林 Mixed broadleaf-conifer forest	48	0.324	$RC = 37277 \times VC^{-2.244}$

统计分析各森林类型的径流系数和径流调节能力,用均值表示各类型的状况,对比分析各类型径流调节特征。由图 3 可知,我国森林类型径流系数的范围为 0.83%—4.58%,径流调节能力在 95.42%—99.17%之间。就径流调节能力而言,落叶针叶林流调节能力最高,为 0.83%;其次为落叶阔叶林,针阔混交林。

3 总结

本文以森林生态系统定位监测数据为基础,统计分析地表径流与降雨和植被的相关关系,得出以下主要结论:

(1) 各森林生态系统地表径流与降雨呈显著正相关,随着降水量的加大,森林径流量主要呈线性和幂函数式的增加,降水对地表径流的解释能力达到

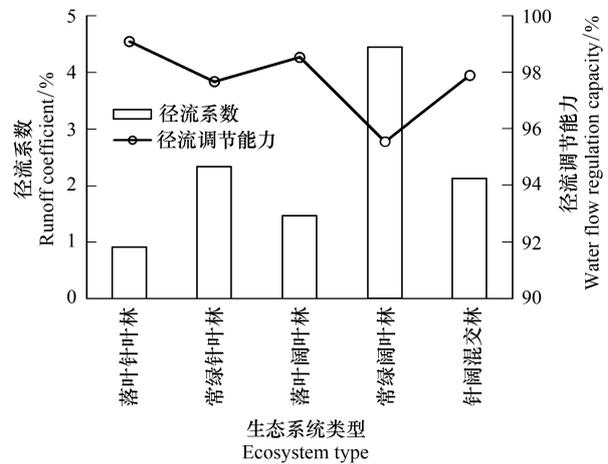


图 3 各类型森林生态系统径流调节能力对比

Fig.3 Comparative analysis of surface runoff characteristics of different forests

37%—76%。

(2) 径流系数与植被覆盖存在显著的负相关特征,随着植被覆盖度的增加,森林径流系数主要呈幂函数式的降低,植被覆盖对径流系数的解释能力为 32%—56%。

(3) 通过对比分析各森林类型径流调节特征,揭示出我国森林径流调节能力:落叶叶针叶林>落叶阔叶林>针阔混交林>常绿针叶林>常绿阔叶林。

参考文献 (References):

- [1] Núñez D, Nahuelhual L, Oyarzún C. Forests and water: the value of native temperate forests in supplying water for human consumption. *Ecological Economics*, 2006, 58(3): 606-616.
- [2] Dudley N, Stolton S. *Running Pure: the Importance of Forest Protected Areas to Drinking Water: A Research Report for the World Bank/WWF Alliance for Forest Conservation and Sustainable Use*. World Bank/WWF Alliance for Forest Conservation and Sustainable Use, 2003. (
- [3] 欧阳志云, 赵同谦, 赵景柱, 肖寒, 王效科. 海南岛生态系统生态调节功能及其生态经济价值研究. *应用生态学报*, 2004, 15(8): 1395-1402.
- [4] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. 4th ed. Washington, DC: Island Press, 1997.
- [5] 刘世荣, 孙鹏森, 温远光. 中国主要森林生态系统水文功能的比较研究(英文). *植物生态学报*, 2003, 27(1): 16-22.
- [6] 李文华, 何永涛, 杨丽韞. 森林对径流影响研究的回顾与展望. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 398-406.
- [7] 张诚, 严登华, 郝彩莲, 秦天玲, 王凌河. 水的生态服务功能研究进展及关键支撑技术. *水科学进展*, 2011, 22(1): 126-134.
- [8] Jiapaer G L, Chen X, Bao A M. A comparison of methods for estimating fractional vegetation cover in arid regions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12): 1698-1710.
- [9] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中国植被及其地理格局: 中华人民共和国植被图(1: 1000000)说明书. 北京: 地质出版社, 2007.
- [10] 吴炳方, 苑全治, 颜长珍, 王宗明, 于信芳, 李爱农, 马荣华, 黄进良, 陈劲松, 常存, 刘成林, 张磊, 李晓松, 曾源, 包安明. 21 世纪前十年的中国土地覆盖变化. *第四纪研究*, 2014, 34(4): 723-731.
- [11] Zhou G Y, Wei X H, Luo Y, Zhang M F, Li Y L, Qiao Y N, Liu H G, Wang C L. Forest recovery and river discharge at the regional scale of Guangdong Province, China. *Water Resources Research*, 2010, 46(9), doi: 10.1029/2009WR008829.
- [12] Du J, Shi C X, Zhang C D. Modeling and analysis of effects of precipitation and vegetation coverage on runoff and sediment yield in Jinsha River Basin. *Water Science and Engineering*, 2013, 6(1): 44-58.
- [13] 曹云, 欧阳志云, 郑华, 黄志刚, 邢芳芳. 森林生态系统的水文调节功能及生态学机制研究进展. *生态环境*, 2006, 15(6): 1360-1365.
- [14] 申彦科, 王玉杰, 齐娜, 杨小梅, 李耀明, 成晨. 重庆市缙云山不同林分对坡面产流的影响. *水土保持通报*, 2009, 29(5): 80-84.
- [15] 张晓明, 孙中锋, 张学培. 晋西黄土残塬沟壑区不同林分暴雨产流产沙作用分析. *中国水土保持科学*, 2003, 1(3): 37-42.
- [16] 段文标, 刘少冲. 莲花湖库区水源涵养林林地产流产沙分析. *水土保持学报*, 2006, 20(5): 12-15.
- [17] 姜萍, 郭芳, 罗跃初, 魏晶, 孙晓伟, 吴钢. 辽西半干旱区典型人工林生态系统的水土保持功能. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2905-2909.
- [18] 潘磊, 唐万鹏, 黄志霖, 史玉虎, 马德举, 崔鸿侠. 长江三峡花岗岩区典型林地暴雨径流特征研究. *湖北林业科技*, 2010, (1): 1-4.
- [19] 黄承标, 温远光, 李信贤. 田林老山常绿落叶阔叶混交林气候及水文效应的研究. *广西农学院学报*, 1991, 10(4): 52-63.
- [20] 张喜, 薛建辉, 许效天, 连宾, 李克之. 黔中喀斯特山地不同森林类型的地表径流及影响因素. *热带亚热带植物学报*, 2008, 15(6): 527-537.
- [21] 张洪江, 孙艳红, 程云, 程金花. 重庆缙云山不同植被类型对地表径流系数的影响. *水土保持学报*, 2006, 20(6): 11-13, 45-45.
- [22] 温熙胜, 何丙辉, 张洪江, 何凡, 缪驰远. 三峡库区缓坡林地产流初探. *西南大学学报: 自然科学版*, 2007, 29(5): 74-80.
- [23] 祁生林, 张洪江, 何凡, 程金花. 重庆四面山植被类型对坡面产流的影响. *中国水土保持科学*, 2006, 4(4): 33-38.
- [24] 李耀明, 王玉杰, 储小院, 成晨, 齐娜. 降雨因子对缙云山地区典型森林植被类型地表径流的影响. *水土保持研究*, 2009, 16(4): 244-249.
- [25] 席光超, 齐实, 王云琦. 三峡库区典型森林植被类型对坡面产流影响. *林业调查规划*, 2008, 33(2): 122-127.
- [26] 闫俊华, 周国逸, 张德强, 王旭. 鼎湖山顶级森林生态系统水文要素时空规律. *生态学报*, 2003, 23(11): 2359-2366.
- [27] 王玉杰, 王云琦. 森林对坡面产流的影响研究. *世界林业研究*, 2005, 18(3): 12-15.
- [28] 陈强, 常恩福, 毕波, 李品荣, 尹艾萍, 刘永国, 李玉文. 滇东南岩溶地区两种地类的水土流失比较. *水土保持研究*, 2007, 14(1): 281-283, 286-286.
- [29] 黄荣珍, 岳永杰, 李凤, 谢锦升, 杨玉盛. 不同类型森林水库调水特性研究. *水土保持学报*, 2008, 22(1): 154-158.

- [30] 崔向慧,李海静,王兵. 江西大岗山常绿阔叶林生态系统水量平衡的研究. 林业科学, 2006, 42(2): 8-12.
- [31] 韩永刚,杨玉盛. 森林水文效应的研究进展. 亚热带水土保持, 2007, 19(2): 20-25.
- [32] 黄志刚. 南方红壤丘陵区典型小流域森林生态系统水文过程、调节功能及机制研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [33] 刘世荣,温远光,王兵,周光益. 中国森林生态系统水文生态功能规律. 北京: 中国林业出版社, 1996: 140-140.
- [34] 周晓峰. 中国森林生态系统定位研究. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1994: 441-441.
- [35] 孔维健,周本智,安艳飞,王小明. 天然次生林和人工毛竹林水文生态特征比较. 水土保持研究, 2010, 17(1): 113-116, 139-139.
- [36] 孔维健,周本智,安艳飞,王刚,王小明,徐升华. 人工毛竹林水文生态功能的初步研究. 林业科学研究, 2010, 23(5): 713-718.
- [37] 王彦辉,刘永敏. 江西省大岗山毛竹林水文效应研究. 林业科学研究, 1993, 8(4): 373-379.
- [38] 谢锦忠,傅懋毅,肖基许,肖贤坦,马占兴. 丛生竹林生态系统的水文效应研究 I. 麻竹人工林地地表径流规律的初探. 竹子研究汇刊, 2000, 19(4): 18-25.
- [39] 郑郁善,陈卓梅,邱尔发,尤志达,洪有为,陈礼光. 不同经营措施笋用麻竹人工林的地表径流研究. 生态学报, 2003, 23(11): 2387-2395.
- [40] 笪志祥,楼一平,董文渊,高艳平. 梁山慈竹在退耕还林中的水土保持效应研究. 浙江林业科技, 2007, 27(3): 22-27.
- [41] 吴钦孝,赵鸿雁,汪有科. 黄土高原油松林地产生沙及其过程研究. 生态学报, 1998, 18(2): 151-157.
- [42] 吕皎,王维. 太行山中山区六种植被配置模式的水土保持功能研究. 土壤通报, 2010, 41(5): 1146-1152.
- [43] 和爱军,刘文耀,郑征. 云南松林与针阔混交林的水土效应. 云南林业科技, 1990, (3): 6-13.
- [44] 孟广涛,郎南军,方向京,李贵祥,袁春明,温绍龙. 滇中华山松人工林的水文特征及水量平衡. 林业科学研究, 2001, 14(1): 78-84.
- [45] 邓红兵,王庆礼. 三峡库区小集水区复合生态系统的水分及养分动态. 长江流域资源与环境, 2001, 10(5): 432-439.
- [46] 袁春明,郎南军,孟广涛,方向京,李贵祥,温绍龙. 长江上游云南松水土保持林地坡面径流与侵蚀规律的研究. 水土保持学报, 2003, 17(6): 74-76.
- [47] 王晶,包维楷,丁德蓉. 九寨沟林下地表径流及其与地表和土壤状况的关系. 水土保持学报, 2005, 19(3): 93-96.
- [48] 雷孝章,曹叔尤,江小华. 森林系统对降雨径流的调节转换规律研究. 中国水土保持科学, 2008, 6(S1): 24-29.
- [49] 李生,任华东,姚小华,张守攻,杨实,兰应秋,农美东. 典型石漠化地区不同植被类型地表水土流失特征研究. 水土保持学报, 2009, 23(2): 1-6.
- [50] 郑华. 森林恢复方式对生态系统服务功能的影响机制研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004.
- [51] 李振新. 岷江上游三种典型生态系统土壤保持的生态学机制研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004.
- [52] 张喜,连宾,尹洁,吴永波,崔迎春. 喀斯特洼地不同森林类型的坡面径流和土壤流动态. 安徽农业科学, 2010, 38(7): 3843-3847.
- [53] 王晓东,张洪江,程金花,孙艳红. 三峡库区森林植被坡面产流特性. 水土保持研究, 2008, 15(1): 1-3.
- [54] 金小麒,安和平,杨成华,巫启新. 板桥河小流域典型植被的水量平衡及养分动态初步研究. 贵州林业科技, 1991, 16(2): 34-41.
- [55] 刘芝芹,王克勤,李艳梅. 云南干热河谷不同坡面产流产沙研究. 山西水土保持科技, 2009, (4): 14-18.
- [56] 周璟,张旭东,何丹,周金星,周小玲,王中建. 湘西北小流域坡面尺度地表径流与侵蚀产沙特征及其影响因素. 水土保持学报, 2010, 24(3): 18-22.
- [57] 田日昌,陈洪松,王克林,谢小立. 红壤坡地不同覆被类型地表径流对降水特征的响应. 自然资源学报, 2009, 24(6): 1058-1068.
- [58] 倪三川,胡夏嵩,毛小青,朱海丽,李国荣,陈桂琛. 室内模拟降雨条件下黄土植被边坡径流试验研究. 水土保持学报, 2008, 22(5): 22-25.
- [59] 陈杰,刘文兆,张勋昌,侯喜禄,胡梦珺,王兵. 黄土丘陵沟壑区林地水文生态效应. 生态学报, 2008, 28(7): 2954-2963.
- [60] 徐学选,穆兴民,蒋定生,王玉,王炜. 黄土丘陵区降雨坡面再分配规律研究. 水土保持研究, 2002, 9(3): 249-250, 253-253.