

基于集水区法的森林生态系统影响径流研究进展^{*}

黄志刚^{1,2} 欧阳志云¹ 李锋瑞¹ 郑华¹ 王效科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 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所生态与农业研究室, 兰州 730000)

摘要: 森林生态系统结构复杂, 具有减少地表径流、调节河川流量、减小土壤侵蚀等一系列保护环境的功能。森林植被变化对森林水文过程的影响会改变水量平衡方程的各个变量, 从而影响森林流域的水分分配和河川径流量, 进而对陆地生态系统水分循环起到重要的调节作用。从森林结构、森林类型、森林覆盖率和森林经营 4 个方面总结了国内外基于集水区法研究森林生态系统影响径流的结论, 即小流域的研究结果认为森林的减少将增加河川径流量, 而大流域的研究结果认为森林的减少将减少河川径流量。最后指出, 在研究单位和研究项目合作研究的基础上, 结合各相关学科的新兴技术和研究设备, 通过整合相关学科的研究成果, 阐明森林生态系统水土保持过程与机理, 是今后森林生态系统水文服务功能研究的发展方向。

关键词: 森林生态系统, 森林集水区, 森林经营, 森林覆盖率, 径流深

中图分类号: S 715

文献标识码: A

文章编号: 1001-4241(2009)03-0036-06

Progress in the Effects of Forest Ecosystem on Runoff Based on Forest Catchments

Huang Zhigang^{1,2} Ouyang Zhiyun¹ Li Fengrui² Zheng Hua¹ Wang Xiaoke¹

(1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences,

Beijing 100085, China; 2 Department of Ecology & Agriculture, Cold and Arid Regions Environment

and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract Forest ecosystem has complicated structures, which endow it with some inherent functions such as decreasing surface runoff and soil erosion and regulating river flow, and it has important hydrology regulation function on terrestrial ecosystem. The effects of forest vegetation variation on hydrological processes of forest watershed influence the variables of water balance equation, which influences water distribution and river flow. In this paper, some conclusions were summarized by studying the recent studies on the effects of forest ecosystem on runoff at forest structures, forest types, forest vegetation coverage and forest managements at home and abroad. The river flow would increase with the decreasing of forest vegetation based on the studies in small forest catchments, but the reversed conclusions were true in large forest catchments. Finally, some suggestions are recommended to the readers. On the basis of the combination of research institutions and projects, integrating streamlined techniques and apparatus of interrelated subjects and their investigation conclusion, illustrating the hydrological functions and mechanisms of forest, which are the developing trend in the future.

Key words forest ecosystem, forest catchment, forest management, vegetation coverage, runoff depth

* 收稿日期: 2008-11-07

基金项目: 国家自然科学基金委创新群体项目 (40621061); 国家自然科学基金资助项目 (30428028)

作者简介: 黄志刚 (1978-), 男, 中国科学院生态环境研究中心博士研究生, 研究方向: 森林水文生态学, E-mail: huangzhigang03@sina.com

欧阳志云 (1962-), 男, 中国科学院生态环境研究中心博士生导师、研究员, 研究方向: 生态系统服务功能研究、生态评价与生态规划的理论与应用研究, E-mail: zyouyang@rcees.ac.cn

森林占地球陆地表面面积的 33%, 具有良好的水土保持功能^[1-2]。研究森林生态系统水土保持功能有助于了解森林生态系统中水分的运转过程与机制以及对生态系统结构、生物地球化学循环、能量代谢和生产力的影响, 为森林合理利用、保护自然和水资源以及维持人类生存环境的稳定提供持续发展的科学理论。研究森林与径流的关系对造林或采伐规划、流域水资源管理、河流生物多样性及生境保护都具有十分重要的作用, 还可以帮助我们理解与评估河流形态变化、泥沙迁移及水灾与旱灾的规律。目前国内外学者一般从 3 个不同空间尺度来研究森林植被变化对径流的影响, 即标准人工径流场 (径流小区法)、天然坡面径流场和典型流域对比试验 (集水区试验)。标准人工径流场和天然坡面径流场能够在微观上分解影响坡面径流诸因子的单独效应及相互效应并进行调控, 而典型流域对比试验则从宏观上整体考虑流域内诸影响因子的综合效应。本文在分析国内外关于森林集水区试验研究森林影响径流文献的基础上, 综述当前国内外在森林与径流方面的一些最新认识与观点, 希望对我国森林水文研究与应用提供参考。

1 森林集水区研究方法概述

森林集水区实验是世界上普遍采用的一种研究森林管理方式对径流量影响的方法, 主要用于研究土地利用方式对集水区水文循环过程的影响, 在人们对水文科学认识中起到了极为重要的作用。根据森林集水区林分状况的不同以及研究区域的具体条件和研究目的的差异, 不同的森林集水区实验常采取不同的研究方法, 大致可以分为 3 类^[3-4], 即比较不同集水区径流的研究、单一集水区试验研究和配对集水区试验研究。这 3 种集水区研究方法各有利弊, 其差异主要在于因限定因子及观察研究的时间不同而得出的结论的时间和空间异质性。为了排除森林植被变化前测定的天气可能与森林植被变化后的天气间存在的差异, 在实际研究中通常采用配对集水区试验研究方法, 因为由气候变化所造成的影响可以通过比较配对集水区在森林植被变化前后的输出水量来确定。配对集水区试验是选择 2 个在面积、形态、地质、气候与植被都近似的集水区, 对它们同时观

察一段时间, 这段时间称为校正时段 (一般 3~5 年, 最好能够包括丰水年和枯水年)。在校正时段之后, 可选择其中之一作为处理, 保留另外一个不动或作为“参照”集水区。经过一段时间的观察, 便可作统计分析来确定处理对径流的影响。森林集水区研究中所采用的集水区面积主要取决于实验地点的地形、气候和土壤等因素, 从世界范围来看, 平均面积为 80 hm² (范围在 1~2 500 hm²), 其中面积在 50~100 hm² 的集水区被普遍采用^[5]。因为如果集水区面积太小, 容易造成较大的试验误差, 但集水区面积太大则难以管理, 也难以准确测量, 获得较精确的参数。

2 森林生态系统对径流的影响

不同国家和地区的许多研究人员应用森林集水区法研究了森林对径流的影响。森林集水区研究主要分布在美国、东欧、西欧和东亚。Whitehead 和 Robinson^[6] 研究了世界上早期的 100 个主要森林集水区研究的分布情况, 结果表明, 世界上用来研究森林对径流影响作用的集水区主要分布在年降雨量 1 000~2 500 mm 的区域, 占统计总数的 89%, 其中又以分布在年降雨量 1 500 mm 左右区域的集水区最多, 占统计总数的 37%。森林具有最大的水土保持功能, 不同物种组成的林分因林冠层、地被物层、凋落物层和根系层的结构、组成、种类、数量和性质的差异而影响林冠截持降水、贮蓄水分和调节径流的功能, 从而导致不同林分的水土保持能力的差异。

2.1 森林结构对径流的影响

森林结构主要通过调节降雨在林分不同层次间的再分配来影响产流时间和径流量。乔木及灌木层通过改变降雨的垂直分布来削减降雨动能并减少侵蚀性降雨量, 进而减少地表径流。刘向东^[7] 等对森林植被垂直结构减弱降雨动能的研究表明: 林冠层截留削减降雨动能约占次降雨总动能的 17%~40%, 灌木和草本层削减次降雨总动能的 44% 左右, 枯枝落叶层不仅因截留作用削减降雨总动能的 9% 左右, 而且可将透过林冠层和灌木草层的降雨动能全部削减, 森林植被垂直结构削减降雨动能的大小顺序依次为植被落叶层大于灌木草层大于林冠层。John 等^[8] 在研究石炭酸灌木对降雨的截留及降雨动能的削减效应

时发现:石炭酸灌木丛可截留 10% 的降雨,削减 45% 的有效降雨动能。草本层及凋落物层能吸附降水,增强地表粗糙度,通过减缓径流速度和延长径流时间来增加水分入渗量以减少径流。陈奇伯等^[9]的研究表明,径流的流速和流量与林地凋落物含量成反比,认为中等密度的马尾松林,只要保持其凋落物层不受扰动,就可达到较好的减缓地表径流流速的效果。

综上所述,森林结构组成影响森林生态系统的径流量及径流过程,森林结构组成越复杂,其减少径流的效果越好。

2.2 森林类型对径流流失的影响

径流量与森林类型密切相关,美国 Coweeta 集水区多年研究结果显示,由阔叶林转变为针叶林后,年径流深减少 250 mm,由阔叶林转变为草地后径流深也发生了变化,主要与草地生物量有关,草地生物量的下降导致了流域年径流深的增加^[10]。英国 Balquhilder 集水区实验在比较草地与荒地以及草地和针叶林等不同植被覆盖类型的水文过程时发现,森林植被的存在会减少径流量,认为这是由于林冠对降雨的截留导致了蒸发量的大大增加所致^[6]。西班牙 Ventós 集水区试验比较了裸地、草地、灌木林和人工松树林的产流效应^[11],结果表明,裸地的径流深为有植被林地径流深的 4 倍。

孙惠南^[12]系统研究了有林地与无林地影响径流的因素。王金叶^[13]等研究祁连山森林复合流域径流规律时发现,祁连山藓类云杉林地不发生地表径流,云杉幼林地、祁连山圆柏林地、灌木林地很少发生地表径流,牧坡草地均有不同程度地表径流发生,森林植被的影响贯穿径流全过程,但是不减少河川径流总量。尹光彩等^[14]在鼎湖山的研究结果表明,针阔混交林比马尾松纯林和季风常绿阔叶林在减少地表径流量方面具有更好的水文生态效应。李锡泉等^[15]在湘西森林小流域的研究结果表明,坡面年径流量从大到小依次为坡耕地 > 荒山草坡 > 人工经济林 > 天然次生林。魏晶等^[16]在辽西低山丘陵区的结果表明,油松林和沙棘林年均径流深分别为 2.52 mm 和 0.89 mm,林地内径流深约为荒地的 1/20,沙棘的减流率比油松好,认为主要是因沙棘林和油松林的树冠形状、枯落物层和土壤理化性状等差

异综合作用的结果。邓南荣^[17]在东江湖流域白盆珠水库的研究结果表明,缺乏草本层的乔木林径流量远大于乔-灌-草混交的森林植被。王治国等^[18]认为,地表死地被物的存在可减少径流量。张建军^[19]等在晋西黄土区的研究表明,刺槐林地和油松林地的产流量随密度的增加大幅度减少。

综上所述,森林类型能够显著影响径流量及径流过程,有林地产流量低于无林地,针叶林、阔叶林、灌木林、草地和裸地生态系统对产流过程的影响依次递减,径流量逐渐增加。

2.3 森林覆盖率对径流的影响

森林覆盖率通过影响森林生态系统内降雨截留蒸腾和林地土壤蒸发而影响流域径流量和径流过程。森林覆盖率不同决定了洪峰的起伏程度和大小,也决定了流域地表面裸露的程度和产流面积。目前,森林覆盖率对河川年径流量的影响存在着争论,概括起来主要有 3 种观点。

第 1 种观点是在研究大流域产流规律后得到的,认为森林覆盖率的增加会减少河川年径流量^[24],其原因可能是占生态系统水分平衡中比重较大的森林植被蒸腾耗水以及森林植被所截留的降水迅速蒸发的结果,认为森林覆盖率的增加降低了河道的水位和水量,导致径流量的减少。英国 Plynlimon 森林集水区的研究结果显示,有森林覆盖的集水区的年径流量低于草地覆盖区,主要原因在于林冠对降水的截留及其快速蒸发增加了整个集水区内的蒸发量^[20]从而降低了系统的有效降水输入总量。在我国干旱、半干旱地区,由于森林植被蒸腾耗水在生态系统水分平衡中占的比重较大,森林有明显减少河川径流的作用,随着森林覆盖率增加及林龄增大,流域年径流量和径流系数都明显减少。刘昌明^[22]通过比较黄土高原不同森林覆盖率地区的年径流量发现,在其他自然条件相似的情况下,森林覆盖率的增加将导致年径流量的减少,林区径流系数比非林区小 40% ~ 60%。罗伟祥等^[23]在研究不同覆盖率林地和草地的径流量时也发现,径流量与植被覆盖率之间为单因子负对数关系。

第 2 种观点认为森林覆盖率的增加能够增加河川年径流量。原苏联关于森林覆盖率变化对流域年径流量的影响的研究结果显示,森林覆盖率的增加能够增加流域年径流量。我国的多数研究

结果表明, 森林覆盖率的增加会不同程度地增加河川径流量, 金栋梁认为, 森林覆盖率高的流域比低的或无林流域的河川径流量总是一定增加, 增加幅度为 21.8% ~ 32.8%。中国林学会森林涵养水源考察组的研究结果表明, 森林覆盖率每增加 1%, 流域径流深增加 0.04 ~ 1.1 mm。赵鸿雁等^[21]的研究也认为, 森林对河川径流量有明显的增加作用, 覆盖率每增加 1%, 年径流深增加 1.46 mm。王金叶等^[13]在祁连山的多年研究结果表明, 森林覆被率为 65% 的流域比森林覆被率为 32% 的流域枯水期径流深增加 28.9 mm, 洪水期径流深减少 98.9 mm。

第 3 种观点认为森林覆盖率的减少将增加河川径流量。这种观点在美国、澳大利亚以及西欧等国家居多, 这种观点的研究多是从小实验流域得到的。认为出现这种情况的主要原因是森林覆盖率低, 林冠截留降雨和森林凋落物截留吸收水分造成的降雨量损失减少, 增加了有效降雨量。森林在降水充沛的湿润气候条件下较少的蒸散耗水、森林土壤良好的渗透作用和水源涵养作用, 保证了河川水分的均匀分配以及对径流和洪水、枯水期的调节。

2.4 森林经营对径流的影响

森林砍伐对河川径流量的影响一直是森林水文学关注的问题。自 20 世纪初以来, 国际上广泛开展了森林砍伐和未砍伐径流量流域对比试验以及流域自身对比试验研究。美国 Coweeta 集水区多年研究结果显示, 清除森林可以增加大约 15% 的平均年径流量和洪峰流量^[10], 认为不同的森林管理方式影响了森林生态系统的水分截留和蒸发, 进而影响了集水区的年径流量。美国 Hubbard Brook 森林集水区多年对比试验结果表明, 当砍伐流域内 20% 的森林后可以观测到流域年径流量的增加, 当砍伐面积达到流域面积的 45% 时, 流域年径流深增加 100 mm 以上, 当将流域内的森林全部砍伐后, 流域年径流深增加 250 mm 以上, 砍伐面积每增加 10%, 流域年径流深增加 18 mm^[25]。德国在 Kiefdorf 集水区开展的采用校核观测的办法来剔除其他因素对森林采伐实验影响的研究结果表明, 分段采伐流域内 96% 山毛榉林后的第 2 年, 流域年径流深增加 86 mm, 这比根据 10 年校核观测计算所得的流域年径流深高出

39%^[26]。加拿大 Camation Creek 生态试验站 20 年的森林水文观测资料统计结果表明, 森林砍伐后, 流域年径流深增加 15% ~ 20%^[27]。近年来, 日本在森林水文过程方面作了大量研究, 主要是通过一系列集水区实验对采伐或造林对流域径流量的影响进行综合研究, 认为皆伐增大流域径流量, 大致估计皆伐后直接径流量为皆伐前的 1.5 ~ 2.0 倍。皆伐增加直接径流量的原因是减少了截留和蒸腾; 另外, 采伐和集运破坏或压紧地表, 减少入渗量, 也减少了径流损失。同时研究还发现, 在土壤水分含量很低的情况下, 初期损失很大, 也会出现皆伐减少径流的情况^[28]。另外, 森林火灾对河川径流量的影响比较复杂, 呈余弦函数变化趋势, 即火灾发生后的几年内集水区径流量明显减少增加, 之后逐年增加, 当植被恢复完全后, 径流量又减少^[29]。森林经营是通过改变森林生态系统的结构、组成、覆盖度及降雨的空间再分配来影响径流量及径流过程的。

3 研究展望

森林及其变化对径流的影响主要表现在 2 个方面: 一是森林的存在会增加河川径流量, 研究者在解释这一现象时强调了森林在降水充沛的湿润气候条件下较少的蒸散耗水、森林土壤良好的渗透作用和水源涵养作用, 从而保证了河川水分的均匀分配以及对径流和洪水、枯水期的调节; 二是森林的存在会减少河川径流量, 其原因可能是占生态系统水分平衡中比重较大的森林植被蒸腾耗水以及森林植被所截留的降水迅速蒸发^[24, 30]的结果。

森林 - 土壤 - 大气的相互作用过程是一个复杂的过程, 不同的树种、不同的植被结构, 在不同的地区、不同的季节都会产生不同甚至截然相反的效应。森林植被对陆地生态系统水分循环具有重要的水文调节作用, 森林植被变化对森林水文过程的影响会改变水量平衡的各个环节, 影响森林的水分分配和河川径流量^[31]。流域径流形成机制的研究是水文学领域中的热点, 研究森林植被对径流形成机制的影响, 对于解决森林水文学中的尺度问题, 实现不同尺度研究结果的信息转换, 客观评价森林植被在不同时空尺度上的水文学作用, 具有十分重要的意义, 是今后森林水文学

研究的重要方向之一^[32]。研究森林变化对径流量的影响,有助于了解人类活动对全球水循环和水文过程的影响,尽管在该领域进行的许多研究工作取得了一定的成果,但由于植被群落、地理位置、地貌、海拔、气候、水文等诸多要素综合作用的复杂性,该领域的研究仍缺乏系统成熟的理论体系,主要表现在缺乏对土壤-植被-大气系统的整体研究、研究时段偏短以及因研究方法和观测手段的不同而使研究结果缺乏可比性等。魏晓华等^[33]认为,确定径流对植被变化响应的干扰临界值对规划森林及流域管理具有现实的指导意义。临界值的变化范围一般在 15% ~ 35%。对于敏感度较小的地区,可取其上限(30% ~ 35%),而对于敏感度较大的地区,可取其下限(15% ~ 20%),并建议应在每一典型植被带建立一组具有科学设计的配对集水区试验。同时,还应把配对集水区试验与其他研究具体过程(特别是土壤水文过程)的手段结合起来。这种方法上的结合有助于理解森林变化与径流关系的复杂性,也有助于弥补配对集水区实验方法的不足。

森林群落的复杂性以及地形、地貌、气候、水文等多因素的时空变化,使森林对流域产流影响变得极其复杂,造成研究结果的差异甚至相悖,即使是同一水文现象,因所作用的森林群落类型和地域的差异,所得到的水文结果截然不同。森林水文学研究应重视森林植被与水分耦合关系的基本过程与作用机理研究,使所得结论更加客观,更便于在实践中应用。鉴于此,在今后的研究工作中要做到:

1) 重视和加强合作研究。一是重视和加强研究单位和研究项目的合作研究,特别是国际间的研究单位和研究项目的合作。二是重视和加强学科间的合作研究。当今森林水文功能研究涉及物理学、化学、气象学、土壤学、生物学、微生物学、地理科学、数学和管理学等诸多学科,单一学科的研究已不能满足森林水文功能研究的需要,因此,必须加强多学科的合作研究。同时,将各学科的新兴技术和研究设备应用到相关研究中,减少人为试验误差,增加科学研究的准确度和精度,更加客观地描述和揭示森林水文功能。

2) 重视和加强过程和机理研究。今后的研究应重视森林与降水、森林与土壤和森林与产流

过程的相互影响研究。在研究单位和研究项目的合作研究的基础上,通过整合相关学科的研究成果,结合“3S”技术,阐明中、大尺度流域产流过程与机制,是今后森林水土保持功能研究的重点。

参考文献

- [1] M atheussen B, K irsbaum R, Goodm an I A, et al Effects of land-cover change on stream flow in the interior Columbia River Basin (USA and Canada) [J]. *Hydrological Processes* 2000, 14: 867-885
- [2] 罗海波, 钱晓刚, 刘方, 等. 喀斯特山区退耕还林(草)保持水土生态效益研究 [J]. *水土保持学报*, 2003, 17(4): 31-35
- [3] Hew lett J D, Lull H W, Reinhart K G. In difference of experimental watersheds [J]. *Water Resource Research* 1969, 5(1): 306-316
- [4] 李文华, 何永涛, 杨丽韞. 森林对径流影响研究的回顾与展望 [J]. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 398-406.
- [5] Bosh J M, Hew lett J D. A review of catchment experiment to determine the effect of vegetation change on water yield and evapotranspiration [J]. *Journal of Hydrology*, 1982, 55: 3-22.
- [6] Whitehead P G, Robinson M. Experimental basin studies: an international and historical perspective of forest impacts [J]. *Journal of Hydrology*, 1993, 145: 217-230.
- [7] 刘向东. 森林植被垂直截留作用与水土保持 [J]. *水土保持研究*, 1994(3): 8-11.
- [8] John W ainwright Anthony J Parsons A thold Abraham s Rain fall energy under creosotebush [J]. *Journal of Arid Environment* 1999, 43: 111-120.
- [9] 陈奇伯, 张洪江, 解明曙. 森林枯落物及苔藓阻延径流速度研究 [J]. *北京林业大学学报*, 1996, 18(1): 1-5.
- [10] Swank W T, Crossley D A. *Forest hydrology and ecology at Coweeta Ecological Studies 66* [M]. New York: Springer-Verlag, 1988: 469.
- [11] Chirino E, Boneta, Bellot J et al Effects of 30-year-old Aleppo pine plantations on runoff, soil erosion, and plant diversity in a semi-arid landscape in south eastern Spain [J]. *Catena* 2006, 65: 19-29.
- [12] 孙惠南. 近 20 年来关于森林作用研究的进展 [J]. *自然资源学报*, 2001, 16(5): 407-412
- [13] 王金叶, 车克钧. 祁连山森林复合流域径流规律研究 [J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(1): 22-27
- [14] 尹光彩, 周国逸, 刘景时, 等. 鼎湖山针阔叶混交林生态系统水文效应研究 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2004, 12(3): 195-201.
- [15] 李锡泉, 田育新, 袁正科, 等. 湘西山地不同植被类型的水土保持效益研究 [J]. *水土保持研究*, 2003, 10(2): 123-126
- [16] 魏晶, 吴钢. 辽西低山丘陵区人工油松林和沙棘林的水文生态效应 [J]. *生态学报*, 2006, 26(7): 2087-2092
- [17] 邓南荣, 吴志峰, 刘平, 等. 白盆珠水库库区坡面径流侵蚀规

- 律初步研究 [J]. 土壤与环境, 2001, 10(3): 185- 187.
- [18] 王治国, 肖娟, 魏忠义, 等. 黄土残塬区人工降雨条件下坡耕地水蚀研究——III. 坡耕地小麦休闲期秸秆覆盖的防蚀效应 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(2): 13- 17.
- [19] 张建军, 毕华兴, 魏天兴. 晋西黄土区不同密度林分的水土保持作用研究 [J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(3): 50- 53
- [20] Calder IR. Evaporation in the uplands [M]. Chichester: Wiley, 1990: 148.
- [21] 赵鸿雁, 吴钦孝, 刘国彬. 森林流域水文及水沙效益研究进展 [J]. 西北林学院学报, 2001, 16(4): 82- 87
- [22] 刘昌明, 曾燕. 植被变化对产水量影响的研究 [J]. 中国水利, 2002, 10: 112- 117
- [23] 罗伟祥, 白立强, 宋西德, 等. 不同覆盖度林地和草地的径流量与冲刷量 [J]. 水土保持学报, 1990, 4(1): 30- 35.
- [24] Stednick J D. Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield [J]. Journal of Hydrology, 1996, 176: 79- 95
- [25] Bonnmann FH, Likens G E. Pattern and progress in a forested ecosystem [M]. New York: Springer-Verlag, 1979, 253
- [26] Brächtel H M, Fuhrer H W. Water yield control in beech forest: a paired watershed study in the K rufdorf forest research area [J]. Interactions Between Atmosphere, Soil and Vegetation, 1991, 204: 477- 484
- [27] 程根伟, H etherington E. 太平洋西海岸森林砍伐对洪水特征的影响 [J]. 山地研究, 1997, 15(3): 167- 172.
- [28] 满秀玲, 刘吉春, 李传容, 等. 小兴安岭森林采伐对土壤侵蚀和河流泥沙量的影响 [J]. 东北林业大学学报, 1997, 25(4): 35- 38.
- [29] 刘世荣, 温远光, 王兵, 等. 中国森林生态系统水文生态功能规律 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1996.
- [30] 杨海军, 孙立达, 余新晓. 晋西黄土区森林流域水量平衡研究 [J]. 水土保持通报, 1994, 14(2): 26- 31.
- [31] 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): 482- 488
- [32] 张志强, 王礼先, 余新晓, 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.
- [33] 魏晓华, 李文华, 周国逸, 等. 森林与径流关系——一致性和复杂性 [J]. 自然资源学报, 2005, 20(5): 761- 770