

森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法^{*}

张彪^{1,2,*} 李文华¹ 谢高地¹ 肖玉¹

(¹中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; ²中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 为全面认识与正确评价森林生态系统的水源涵养功能, 本文探讨了其概念、表现形式及其计量方法, 认为: 1) 森林的水源涵养功能是一个动态、综合的概念, 随着人们对森林水文作用认识的不断深入, 其内涵不断丰富扩大, 因此森林的水源涵养功能概念存在狭义和广义之分; 2) 森林的水源涵养功能(广义)有多种表现形式, 包括拦蓄降水、调节径流、影响降雨和净化水质等, 不过其具体表现形式与研究对象、研究目的以及研究尺度有关; 3) 目前森林拦蓄降水功能的计量方法主要有土壤蓄水能力法、水量平衡法、年径流量法和多因子回归法等 8 种, 不过这些方法都存在一定的局限性, 实际应用中需要综合考虑。

关键词 森林生态系统; 水源涵养; 功能表现; 计量方法

中图分类号 S718.5 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2009)03-0529-06

Water conservation function and its measurement methods of forest ecosystem. ZHANG Biao^{1,2}, LI Wen-hua¹, XIE Gao-di¹, XIAO Yu¹ (¹ Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(3): 529-534.

Abstract: With the increasing demand for clean water, the water conservation of forest ecosystem has raised increasing concerns. This paper reviewed the research progress on the concept of water conservation, summarized its main manifestations, and introduced the measurement methods of water storage. The current studies lack a comprehensive analysis of the water conservation function of forest ecosystem. Water conservation is a dynamic comprehensive concept, which develops with the advancements in forest hydrology research. The broad and narrow senses of water conservation could be found in recent literatures. The manifestations of water conservation in a broad sense cover the rainfall interception and storage, runoff regulation, precipitation increasing (in debate), and water purification, etc., while the actual manifestations of water conservation are closely linked to the study area, objectives, and scales. Currently, the methods for measuring the amount of conserved water include soil water storage capacity method, water balance method, annual runoff method, and multiple-factor regression analysis method, etc., and all of them have their prerequisites and limitations. In practice, the measurement methods should be selected according to actual situations.

Key words: forest ecosystem; water conservation; function manifestation; measurement method

随着水资源需求量的不断增加以及水环境的急剧恶化, 水资源紧缺已成为世人所共同关注的全球性问题(姜文来, 1998)。由于森林生态系统是清洁水源的发祥地(Nunñez *et al*, 2006), 因而其涵养水源的功能尤其受到人们的重视(高成德和余新晓, 2000)。自 20 世纪初森林与水的关系研究开始以来

(余新晓等, 2004), 森林的水源涵养功能一直是生态学与水文学研究的重点内容, 而且发表了大量研究成果(赵传燕等, 2003; 陈东立等, 2005)。不过, 森林的水源涵养功能至今未形成一个公认的定义, 而是不同的研究者有不同的认识和界定(孙立达和朱金兆, 1995; 王治国, 2000)。由于对水源涵养功能内涵理解的不一致性, 经常导致不同地域甚至同一地域的研究案例没有了可对比性, 严重阻碍了森林

* 国家自然科学基金资助项目(30770410, 30230090)。

** 通讯作者 E-mail: zhangb8010@126.com

收稿日期: 2008-05-27 接受日期: 2008-11-23

水源涵养功能研究成果的有效利用;而且目前的森林水源涵养功能研究已由过去的简单定性和个别因素评价,发展到了定量、多因素的综合计量评价(藤枝基久,1994),并且已公开发表多种计量方法(侯元兆等,2005),但关于这些计量方法的综合比较分析,尤其是方法的适用条件和局限性却鲜于报道。为了客观认识与正确评价森林生态系统的水源涵养功能,本文探讨了森林水源涵养功能的概念,并详细分析了其主要表现形式,最后重点讨论了 8 种计量方法的优缺点,旨在为我国的森林水源涵养功能评价研究提供参考依据。

1 森林水源涵养功能的概念

森林的水源涵养功能是一个动态发展的概念,其内涵随着人们对森林与水关系认识的不断深入而变化。19 世纪末 20 世纪初,森林水文学的研究主要集中在以流域(或集水区)为单元研究森林对河川径流的影响上(李文华等,2001),到了 20 世纪 60、70 年代,森林的生态水文过程研究开始受到重视(王礼先和张志强,1998),林冠截留、枯枝落叶层截持、土壤水分入渗与贮存以及林地蒸发散等水文过程逐渐为人们所认识。因此,在研究的早期,水源涵养功能主要是指森林对河水流量(增或减)的影响(片冈顺,1990);后来,森林的拦蓄降水功能逐渐受到重视(孙立达和朱金兆,1995),而目前的森林水源涵养功能研究包括多项内容,比如森林对降水的影响、森林蒸发散、森林对径流的影响和森林对水质的影响等(王治国,2000)。当前的水源涵养功能概念更加综合化,它不仅关注森林生态系统内的水文过程,同时也关注于多个水文过程所产生的综合效应。因此,可以用水源涵养功能的狭义概念和广义概念进行区分,即狭义的水源涵养功能是指“森林拦蓄降水或调节河川径流量的功能”,而广义的水源涵养功能是指“森林生态系统内多个水文过程及其水文效应的综合表现”。

2 森林水源涵养功能的主要表现形式

2.1 拦蓄降水

森林的拦蓄降水功能是指森林生态系统对降水的拦截和贮存作用,主要包括林冠、林下植被和枯枝落叶层的截留以及土壤蓄水(刘世荣等,1996),是森林涵养水源的主要表现形式。

降落到森林中的雨水,一部分首先达到树冠表

面而被吸附在枝叶的分叉处,这些被保留的雨水一部分直接蒸发返回大气中(附加截留量),一部分随保留雨量的增加或因风的吹动而从林冠滴下(林冠滴下雨量);降雨的另一部分顺着枝条、树干流到地面(干流量);还有一部分降水未接触树体而直接穿过林冠间隙落到林地上(穿透雨量);此外,树体还吸收很小一部分雨量(树干容水量)。树木冠层对降水的拦截作用,一方面有利于减轻洪水期林地所承受的降雨量(张理宏等,1994);另一方面,可以减弱雨滴的动能,缓和降水对森林地表的直接击溅和冲刷(万师强和陈灵芝,1999)。林冠截留功能的大小可用林冠截留量表示,是林冠截留储量、附加截留量和树干容水量之和(陈东立等,2005),其大小受降水特性(降水量、降水强度与降水的时空分布)、树木特征(树种、树龄、枝叶结构和干燥程度)和林型结构(郁闭度和林冠层次)等多种因素的影响(万师强和陈灵芝,1999)。

穿过林冠或从林冠滴下的雨水,一部分与林冠下层植被(灌木、草本和苔藓层)接触而被截留(陈东立等,2005)。下层植被截留雨量的大小与其生物量关系密切(刘世荣等,1996)。由于林下植被截留的准确测定比较困难,而且截留量一般较少,因此计算时常被忽略不计(闫俊华,1999)。

林地上的枯枝落叶层也具有较大的水分截持能力(赵玉涛等,2002),能够吸收和截留经由林冠、下层植被截留后落到地表的一部分雨水(刘世荣等,1996),常用最大持水量或有效持水量表示,其中前者与枯落物的组成种类和分解程度有关,而后者不仅与枯落物单位面积干质量、种类、质地有关,而且与枯落物的干燥程度、紧实度、排列次序等密切相关(余新晓等,2004)。枯枝落叶层的蓄水保水作用,能够影响穿透降雨对土壤水分的补充和植物的水分供应(Putuhenu & Cordery, 1996),是森林水源涵养功能的一个重要水文层次。

降水通过林冠、下层植被和枯枝落叶层截留,到达林地土壤表层,进行再次分配:水分向土壤下渗,一部分滞蓄于土壤中,形成土壤水,被林木及植物根系吸收蒸腾或直接蒸发回归到大气中;入渗到土壤中的水分贮存于包气带和饱水带中,形成壤中流(或称土内径流);当降水强度大于入渗强度或暂时贮存于土壤中的水分超过一定限度时,就会产生地

表径流。森林土壤层是森林生态系统贮蓄水分的主要场所 (Jin *et al.*, 1999), 其蓄水能力的大小依赖于土壤种类、土壤容重、孔隙度和有机质含量等因素, 实际研究中通常以静态的土壤水分涵蓄能力 (持水能力) 和动态的水分调节能力 (渗透能力) 进行综合评价, 前者主要依赖于土壤孔隙, 而后者取决于土壤非毛管孔隙 (刘世荣等, 1996), 这是因为非毛管孔隙更有利于地表水转化为土壤水或土壤径流和地下水。

2.2 调节径流

森林植被能够影响水文过程、促进降雨再分配、影响土壤水分运动以及改变产流汇流条件等, 从而缓和地表径流, 增加土壤径流和地下径流, 在一定程度上起到了削峰补枯、控制土壤侵蚀、改善河流水质等作用 (张志强等, 2001), 其中森林对河川径流量的影响以及削减洪峰和增加枯水径流的功能最受关注。

由于自然条件、研究方法、区域面积等因素的不同, 以及森林与径流错综复杂的关系, 森林影响河川径流总量的结论存在 3 种观点 (李文华等, 2001): 1) 森林的存在对河川年径流量影响不大; 2) 森林的存在可增加年径流量; 3) 森林的存在会减少年径流量。尽管目前多数研究结果总体倾向于第 3 种观点, 但由于森林与水分的关系极其复杂, 不同自然环境以及不同结构类型的森林对大气降水的截留、林内降雨的再分配、地表径流、地下径流以及蒸散发的影响不尽相同, 进而造成了水分循环和水量平衡的时空格局与过程的差异, 因此在实际研究中还需要根据具体条件进行具体分析, 而不能将某一环境条件下得出的结果作为一般规律加以应用。

关于森林对洪水径流的影响也有不同的观点 (Andreassian, 2004)。多数学者认为, 森林可以减少洪水量、削弱洪峰流量、推迟和延长洪水汇集时间; 但有人认为, 森林对前期洪水有益, 而对后期洪水不利 (Bonell, 1993); 也有研究认为, 森林对洪水特性并无显著影响 (刘世荣等, 1996)。由于森林蓄水容量与森林类型、特征、地质、地貌等条件有关, 不同自然地理区域以及不同水文区, 森林与洪水的关系不宜一概而论。世界各国的研究表明, 森林拦蓄洪水的作用在定性上是明确的, 而洪水削减程度则与暴雨输入大小和特性有关 (高甲荣等, 2001)。一般说来, 森林对大雨乃至暴雨具有较大的调节能力, 而对大暴雨和特大暴雨的调节能力有限。

枯水季节森林生态系统土壤含蓄的大量水分可以增加流域的枯水径流量, 使河川径流量保持稳定、均匀 (刘世荣等, 1996), 是森林涵养水源的一个重要功能, 有助于提高农田灌溉和生活用水的能力, 对于我国的农业生产和国民经济发展都能产生有益的影响。不过也有定点实验表明 (Farley *et al.*, 2005), 与其他管理措施较好的土地利用类型相比, 人工林对枯水径流的影响不显著甚至有负面的影响 (即减少枯水流量)。

2.3 影响降雨量

森林对降雨量的影响也是一个争论已久的问题 (Chang, 2003): 一种观点认为森林有增雨作用 (Molchanov, 1963); 另一种观点认为森林有减雨作用 (周国逸, 1995); 还有人认为森林与降水无关或者关系甚小 (Richard, 1980; Tangtham & Sutthipibul, 1989)。由于森林致雨机制的复杂性和降水空间分布的差异性, 单一地肯定或否定森林有无增雨作用都是不全面的, 也许森林与降水的问题本身就没有唯一解。不过多数学者认为, 在通常情况下森林对降雨量的影响程度很小 (于静洁和刘昌明, 1989), 但也不能排除在特定情况下森林表现出增雨作用 (李贵玉和徐学选, 2006)。

2.4 净化水质

在降水进入森林中首先被林冠层分配的同时, 也伴随着化学元素的冠层交换过程, 主要表现为雨水对树木表面分泌物的溶解、枝叶对降水中离子的吸收以及雨水对枝叶表面粉尘、微粒等大气悬浮沉降物的淋洗等 (余新晓等, 2004); 当降水到达林地后, 地被物和土壤层作为第二界面对降水化学性质产生影响, 主要表现为活地被物和枯枝落叶层的截留、微生物对化合物的分解以及对离子的摄取、土壤颗粒的物理吸附、土壤对金属元素的化学吸附和沉淀等 (刘世荣等, 1996)。对密云水库水源林的研究表明 (李文宇等, 2004), 经过森林生态系统的降水水质中, 溶解氧、总盐度和 NO_3^- 等营养元素化学成分明显增加, 而 pH 值、浑浊度和 NH_4^+ 等明显下降, 其水质得到不同程度的净化。

3 森林水源涵养量的计算方法

3.1 土壤蓄水能力法

土壤蓄水能力法认为, 森林涵养的水量主要贮

存在土壤层内,因此可以用土壤层厚度和非毛管孔隙度的乘积来表示(马雪华,1993)。土壤蓄水能力法比较简单,可操作性强;不过这种方法仅考虑了森林土壤层的蓄水功能,忽略了森林蒸散的影响以及林冠、枯落物等作用层对水分的拦蓄作用;而且这种方法反映的是静止状态土壤的暂时蓄水量,实际情况下土壤非毛管孔隙蓄水是动态的,因此森林涵养水分的数量还需要根据降雨强度、雨量分布等实际情况而定(姜志林,1984)。

3.2 综合蓄水能力法

综合蓄水能力法是指综合考虑了林冠层截留量、枯落物持水量和土壤层贮水量的方法(郎奎建等,2000),其中林冠层截留量可以通过截留率与降水量计算,枯落物持水量通过凋落物存量与最大(或有效)持水能力计算,土壤层蓄水量通过土壤非毛管孔隙度和土壤厚度计算。这种方法综合考虑了森林 3 个作用层对降水的拦蓄作用,比较全面,有助于比较分析不同作用层拦蓄降水功能的大小,但需要大量的实测数据,因此计算起来比较复杂;同时这种方法也忽略了森林蒸散消耗的影响;值得注意的是,这种方法计算的结果仅反映理论上最大的蓄水量,并不代表实际状态下森林的蓄水量。

3.3 林冠截留剩余量法

林冠截留剩余量法认为,森林土壤拦截、渗透与储藏的雨水数量即为涵养水源量,在降雨过程中,未被林冠层(包括灌木层)截留而落到地表的雨水,由于重力的作用不断通过土壤下渗,而森林土壤通常不会因水分饱和而产生地表径流,因此林冠截留剩余的水量就是森林的水源涵养量,可以通过降雨量和林冠截留率计算所得(邓坤枚等,2002)。这种方法只涉及 2 个参数,比较简单,但由于忽略了森林蒸散和地表径流,计算结果往往大于实际涵养水量。

3.4 水量平衡法

水量平衡法是将森林生态系统视为一个“黑箱”,以水量的输入和输出为着眼点,从水量平衡的角度,降水量与森林蒸散量以及其他消耗的差即为水源涵养量(肖寒等,2000)。水量平衡法是研究水源涵养机理的基础(孙立达和朱金兆,1995),能够比较准确地计算水源涵养量,而且容易操作,因此理论上来说是计算水源涵养量最完美的方法,也是目前使用频率最高的方法。但是,也存在一定的局限

性(姜文来,2003),一是森林的蒸发散目前还难以准确测量;二是研究区内降水量、森林蒸发散和地表径流的空间差异性一般被忽略掉,因此研究区的空间范围不宜过大。

3.5 降水储存量法

降水储存量法认为,在林区林冠和树干的蒸腾和扩散约占降水量的 30%,树木在蒸腾过程中又占 15%,因而森林涵养水源量只占林区降水量的 55%,而林区降水量可以通过平均降水量与森林覆盖率计算(张三焕等,2001)。这种方法主要是根据森林蒸发散的经验值计算水源涵养量,简便易行,可操作性强;由于森林生态系统的蒸散受树种、林龄、海拔、降水量等多种因子的影响,因此森林涵养水量占有林地降水量的实际比例还难以准确估计,而且这种方法也忽略了地表径流等因素的影响。

3.6 年径流量法

年径流量法是指假设森林涵养水源量等于林区内年径流量,并且林地与其他类型土地(耕地、荒山等)每年蒸散耗水量相同,那么森林涵养水量可由评价区的年径流量乘以林木覆盖率计算所得。这种方法比较简单,可操作性强;但是建立在一种假设条件下,而实际上森林涵养水源量并不等于林区内年径流量,而且森林地带的蒸发量与其他类型土地的蒸发量差别很大,因此计算误差较大。

3.7 地下径流增长法

与无林区相比,有林区地下径流呈增长趋势,因此地下径流的增长量即为森林涵养水源量(侯元兆等,2005)。地下径流增长法比较简单实用,所需数据量少,而且均可通过实测得到。但是,这种方法计算出的地下径流增长量,虽然包括了森林涵养水源量的主要部分,但并不是全部,此方法计算的结果比实际值偏低;而且在现实中很难找到除森林植被不同外其他条件诸如降雨特征、树木特征、林型特征以及土壤、地质地貌特征完全相同的 2 个流域,因此,这种方法也难以实际应用。

3.8 多因子回归法

多因子回归法是指以经度、纬度、海拔、森林覆盖率等多项因子为自变量,以降水量、蒸发量、年干燥度、年径流深、径流系数等因子为因变量,运用数量理论和计算机进行多项回归计算,从而总结出回归系数的方法(张庆费和周晓峰,1999)。这种方法

考虑了森林水源涵养量的主要相关因子,有利于反映森林植被覆盖率变化等变量因子所产生的结果,比较准确全面;但多元线性回归模型的建立,需要大量观测数据来确定回归系数,而通常情况下因观测资料短缺难以实际应用,加上下垫面因素的差异,即使建立起模型,也不能扩展应用。

4 结 论

森林是自然界中重要的可再生资源,它能调节气候、涵养水源、净化空气等,有效地改善生态环境。随着当前水资源缺乏以及各种污染引起的水质下降,解决水资源问题已成为人类面临的重要任务,森林与水之间的关系也成为当今社会关注的热点。在回顾借鉴国内外大量森林水文学研究成果的基础上,本文着重讨论了森林生态系统水源涵养功能的概念、主要表现形式及其计量方法,形成以下认识:

1)森林的水源涵养功能是一个动态的、综合的概念,随着人类对森林水文作用认识的不断深入,其内涵也不断丰富扩大。我们可以用水源涵养功能的狭义概念和广义概念进行区分,即“森林拦蓄降水或调节河川径流量的功能”和“森林生态系统内多个水文过程及其水文效应的综合表现”。

2)广义的森林水源涵养功能具有多种表现形式,主要为拦蓄降水、调节径流、影响降雨和净化水质等,尽管其中的某些功能还存在争议,但是对多个具体功能形式进行综合评估已受到重视。应当指出的是,对于任何地区、任何一种森林类型来说,多种功能是同时并存的,是综合的,只不过是某一区域某种条件下某些功能形式可能比较突出而已,因此实际情况下,在不同的研究区、研究目的以及研究尺度下,研究者所关注的水源涵养表现形式往往不同。

3)尽管目前有关水源涵养量计算方法较多,但是这些方法都具有一定的优势和局限性,实际应用时需要根据具体情况灵活选择。

总之,森林的水源涵养功能涉及植被、气候、地质地貌、社会经济等多个因素之间的相互作用和影响,是一个极其复杂的综合概念。由于目前对某些水文过程的机理还缺乏足够的认识,对森林的某些功能(如影响降水)还有争议。不过随着森林生态水文研究的不断深入以及不同学科之间的合作,人们一定能够更加清楚地认识森林水源涵养功能,并

采用更加准确合理的方法和技术手段,进行水源涵养功能的研究和评价。

参考文献

- 陈东立,余新晓,廖邦洪. 2005. 中国森林生态系统水源涵养功能分析. 世界林业研究, 18(1): 49-54.
- 邓坤枚,石培礼,谢高地. 2002. 长江上游森林生态系统水源涵养量与价值的研究. 资源科学, 24(6): 68-73.
- 高成德,余新晓. 2000. 水源涵养林研究综述. 北京林业大学学报, 22(5): 78-82.
- 高甲荣,肖 斌,张东升,等. 2001. 国外森林水文研究进展述评. 水土保持学报, 15(5): 60-75.
- 侯元兆,张 颖,曹克瑜. 2005. 森林资源核算(上卷). 北京:中国科学技术出版社.
- 姜文来. 1998. 水资源价值论. 北京:科学出版社.
- 姜文来. 2003. 森林涵养水源的价值核算研究. 水土保持学报, 17(2): 34-40.
- 姜志林. 1984. 森林生态学(六):森林生态系统蓄水保土功能(2). 生态学杂志, (6): 58-63.
- 郎奎建,李长胜,殷 有,等. 2000. 林业生态工程 10种森林生态效益计量理论和方法. 东北林业大学学报, 28(1): 1-7.
- 李贵玉,徐学选. 2006. 对森林能否增加降水和年径流总量的再探讨. 西北林学院学报, 21(1): 1-6.
- 李文华,何永涛,杨丽韞. 2001. 森林对径流影响研究的回顾与展望. 自然资源学报, 16(5): 398-406.
- 李文字,余新晓,马钦彦,等. 2004. 密云水库水源涵养林对水质的影响. 中国水土保持科学, 2(2): 80-83.
- 刘世荣,温远光,王 兵,等. 1996. 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.
- 马雪华. 1993. 森林水文学. 北京:中国林业出版社.
- 片冈顺. 1990. 水源林研究述评. 水土保持科技情报(4): 44-45.
- 孙立达,朱金兆. 1995. 水土保持林体系综合效益研究与评价. 北京:科学出版社.
- 藤枝基久. 1994. 水源涵养机能量化的研究现状. 水土保持科技情报, (4): 30-32.
- 万师强,陈灵芝. 1999. 暖温带落叶阔叶林冠层对降水的分配作用. 植物生态学报, 23(6): 557-561.
- 王礼先,张志强. 1998. 森林植被变化的水文生态效应研究进展. 世界林业研究, 11(6): 14-23.
- 王治国. 2000. 林业生态工程学. 北京:中国林业出版社.
- 肖 寒,欧阳志云,赵景柱,等. 2000. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探——以海南岛尖峰岭热带森林为例. 应用生态学报, 11(4): 481-484.
- 闫俊华. 1999. 森林水文学研究进展. 热带亚热带植物学报, 7(4): 347-356.
- 于静洁,刘昌明. 1989. 森林水文学研究综述. 地理研究, 8

- (1): 88-98
- 余新晓, 张志强, 陈丽华, 等. 2004. 森林生态水文. 北京: 中国林业出版社.
- 张理宏, 李昌哲, 杨立文. 1994. 北京九龙山不同植被水源涵养作用的研究. 西北林学院学报, **9**(1): 18-21.
- 张庆费, 周晓峰. 1999. 黑龙江省汤旺河和呼兰河流域森林对河川年径流量的影响. 植物资源与环境, **8**(1): 22-27.
- 张三焕, 赵国柱, 田允哲, 等. 2001. 长白山珲春林区森林资源资产生态环境价值的评估研究. 延边大学学报(自然科学版), **27**(2): 126-134.
- 张志强, 王礼先, 余新晓, 等. 2001. 森林植被影响径流形成机制研究进展. 自然资源学报, **16**(1): 79-84.
- 赵传燕, 冯兆东, 刘 勇. 2003. 干旱区森林水源涵养生态服务功能研究进展. 山地学报, **21**(2): 157-161.
- 赵玉涛, 张志强, 余新晓, 等. 2002. 森林流域界面水分传输规律研究述评. 水土保持学报, **16**(1): 92-95.
- 周国逸, 余作岳, 彭少麟. 1995. 小良试验站 3 种生态系统水量平衡研究. 生态学报, **15**(增刊 A 辑): 223-229.
- Andreassian V. 2004. Water and forests: From historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, **291**: 1-27.
- Bonell M. 1993. Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forests. *Journal of Hydrology*, **150**: 217-275.
- Chang M. 2003. *Forest Hydrology: An Introduction to Water and Forests*. Boca Raton, FL: CRC Press
- Farley K, Jobbagy E, Jackson P. 2005. Effects of afforestation on water yield: A global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology*, **11**: 1565-1567.
- Jin M, Zhang R, Sun L, et al 1999. Temporal and spatial soil water management: A case study in the Heilonggang region, PR China. *Agricultural Water Management*, **42**: 173-187.
- Molchanov A. 1963. The hydrological role of forests. Israel Program for Science Translations, Jerusalem, Office of Tech Services, US Dept Commerce, Washington DC
- Nunñez D, Nahuelhual L, Oyarzun C. 2006. Forests and water: The value of native forests in supplying water for human consumption. *Ecological Economics*, **5**: 606-616.
- Putuhenu W, Cordery I 1996. Estimation of interception capacity of the forest floor. *Journal of Hydrology*, **180**: 283-299.
- Richard L. 1980. *Forest Hydrology*. New York: Columbia University Press
- Tangtham N, Sutthipibul V. 1989. Effects of diminishing forest area on rainfall amount and distribution in North-East Thailand, in regional seminar on tropical forest hydrology, Sept 4-9, Institute Penyelidikan Perhutanan Malaysia, Kuala Lumpur, Malaysia
-
- 作者简介 张 彪,男, 1980年生, 博士研究生。主要从事生态服务功能研究。E-mail: zhangb8010@126.com
- 责任编辑 王 伟
-