

DOI: 10.5846/stxb202211013108

孙阁, 张槽, 王彦辉. 准确理解和量化森林水源涵养功能. 生态学报, 2023, 43(1): 9-25.

Sun G, Zhang L, Wang Y H. On accurately defining and quantifying the water retention services of forests. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1): 9-25.

准确理解和量化森林水源涵养功能

孙 阁^{1,*}, 张 槽^{2,3}, 王彦辉⁴

1 美国农业部林务局南方研究院, 北卡罗来纳州 27709

2 武汉大学水利水电学院, 武汉 430074

3 澳大利亚联邦科学与工业研究组织水土研究所, 堪培拉 2601

4 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 北京 100091

摘要:公认的森林水源涵养功能是指森林通过调节蒸散的组分和总量、保护和改善土壤结构、提高土壤入渗和削减地表径流、促进壤中流形成和地下水补充等水文过程而产生的消减河川洪水径流、增加枯水期径流、稳定水资源供给的利于经济社会发展的有益作用。但是,这种简单定义忽略了森林对总径流量的调节作用,因此会常常引出对森林水文效益的一些误解。研究认为,森林水源涵养服务功能或效益与森林水文调节作用关系密切但却是不同的概念。混淆二者的内涵是导致不能准确理解和合理评价森林水文影响的重要原因。森林水源涵养效益有很大时空差异,在量化和评价时需对比参照生态系统并考虑经济社会发展的水安全需求。量化森林水文调节作用方法的共同原则是剔除森林以外的其它因素影响,从而确定森林本身的水文影响。大面积森林恢复虽然对减少灾害性的中小洪水有积极作用,但各地的森林水源涵养功能并不一致,还会随时间而变,也时常存在不同水源涵养功能指标的矛盾。造林或再造林不一定会产生补充地下水、提高枯水期径流及增加年径流总量的效益。相反,不合理的造林与经营可能产生不利的水文影响。我们呼吁生态学和水文学研究机构及自然资源管理部门应尽快联合,统一定义森林水源涵养服务功能并甄别不同指标,建立量化标准与评价方法,加强相关基础与应用研究,以便准确预测、评价与各地发展需求紧密相关的森林水源涵养服务功能,从而科学指导森林的恢复和管理,推进高质量生态建设。

关键词:森林;水源涵养;蒸散;径流;生态水文;生态系统服务

On accurately defining and quantifying the water retention services of forests

SUN Ge^{1,*}, ZHANG Lu^{2,3}, WANG Yanhui⁴

1 Southern Research Station, United States Department of Agriculture Forest Service, Research Triangle Park, North Carolina 27709, United States of America

2 College of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Wuhan University, Wuhan 430074, China

3 Commonwealth Science and Industry Organization, Land and Water, Canberra, Australian Capital Territory 2601, Australia

4 Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: The beneficial functions of forests to protect and stabilize source waters, ‘reducing floods and augmenting low flows’, are termed as ‘Shui Yuan Han Yang’ (SYHY) in Chinese Pin Yin and “Soo Won Ham Yang” in Korean. The term in Chinese characters first appeared in the forest legal documents in Japan in 1897 and formally adopted by the Japanese government and the scientific community around 2001. However, the SYHY term is much debated in Japan. What entails SYHY is poorly defined and has been largely ill-interpreted in practice of forest ecological restoration in China. To many, the perception that the increase in forest converge increases water resources including low flows persists, resulting in concerns among scientists and practitioners. This was not surprising as the forest-water relationships are complex and variable, and how forests affect the hydrological cycles at multiple scales have been under debate globally. This commentary

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFF0801803, 2022YFF1300404); 国家自然科学基金项目(U20A2085, U21A2005)

收稿日期:2022-11-01; **采用日期:**2022-11-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ge.sun@usda.gov

attempts to tract the origin of the concept, the definitions, and causes of controversies, and explores how to best use the concept for guiding forest restoration campaigns in China and beyond. We conclude that SYHY services should consider forests role in both improving soil infiltration capacity and elevating water use by forests when evaluating the effects of vegetation-based ecological restoration. These two processes co-exist in influencing high flows, low flow, and total flow in forested watersheds and affect SYHY for a particular forest. We stress that forest hydrological functions are not SYHY services, and so they must be assessed separately with consideration of human water needs under different socioeconomic conditions. Different strategies in watershed management developed on forest ecohydrological principles are needed to achieve forest SYHY goals.

Key Words: forest; water retention; evapotranspiration; runoff; eco-hydrology; ecosystem services

森林水源涵养一词当前在国内生态建设和环保领域几乎尽人皆知^[1],顾名思义就是指森林的保护水源功能。由于通俗易懂和能很好表达森林的改善水环境、调节水循环、保护水资源的效益^[2-4],使其广泛出现在各类高等院校乃至中学的教科书中,也被广大科研工作者、土地管理者、政策制定者和大众使用^[5]。

在 1998 年发生全国性特大洪水灾害后,中国政府投入巨资实施了以退耕还林还草为主的生态恢复工程,在增加植被覆盖、减少侵蚀和泥沙方面的成就举世瞩目^[6]。1978 年启动的“三北防护林”工程主要目的是防风固沙和保持水土,很少考虑森林水文作用。但是后来启动的退耕还林、天然林保护工程则增加了减少洪水的主要意图,增强“水源涵养”功能成为基本目标之一^[7]。当前中国格外重视增加森林植被,其人工林面积位列世界第一(69 万 km²),全国森林覆盖率从 20 世纪 90 年代的 17% 提高到现在的 24% 左右,并计划在 2050 年提高到 30%。遥感观测表明,中国大陆整体变绿^[8],生态环境逐步改善,某些生态系统功能在逐步提高(如碳汇、控制土壤侵蚀),成为全球生态恢复的中国样板^[6]。

然而,大面积森林植被建设也带来不同生态系统服务的权衡问题^[3, 9]。最明显的莫过于北方旱区的水资源问题,如黄土高原植被增加后减少了河川径流和加重了土壤干化^[10]。同时,部分三北防护林出现了主要因干旱胁迫导致的森林退化^[11]。如何权衡“林-水-沙-碳”关系及相关多种服务,从而实现森林和水资源协调优化管理,一直是困惑有关部门的热点问题。虽然相关研究进展很大,但受惯性思维影响,一些不科学的认识还时见报端,如“有林就有水”“造林就是造水”“造林提高降水量”等提法,误导了民众认识和政府决策。在当前,普遍认同植树造林是增加陆地碳汇功能和积极应对气候变化的一个重要途径^[12],但也引起了对增加森林覆盖率会减少水资源供给的担忧。因此,如何准确理解和量化森林水文作用,是科学理解“绿水青山就是金山银山”和正确实施“山水林田湖草沙”综合治理以及林业助力落实“碳中和”国家战略决策的需要,是新时期对森林、水资源、流域综合管理的新要求。

但是,当前在生态学、林学、水文学界对如何准确理解和定量评价森林水源涵养作用还存在内涵与研究方法方面的很大分歧^[13-15],主要在于对森林水源涵养的定义和含义尚有歧义,从而不能正确理解森林水文功能,并导致在媒体宣传、政策制定、生产应用时远离了其本意。比如,森林水源涵养作用的核心是在特定条件下森林的“消洪补枯”有益作用,但盲目放大其含义,或认为在所有地理环境下森林都具有如此显著功能,就很容易导致认为森林越多则水资源越多,从而不加区分地盲目造林和扩大森林面积,引发或加重了一系列生态问题^[16-17]。

厘清森林水源涵养作用的内涵、范畴和量化方法,有助于合理评价和准确预测森林恢复的水文服务功能,具有重要的科学与实用价值^[18]。本文一方面试图在简要回顾森林水文学发展历史的基础上根据国内外文献对森林水源涵养的原始含意进行溯源,另一方面试图基于森林生态水文学基本原理提出水源涵养定义和量化的基本途径与方法,从而促进有关研究、消除公众和学界误解,为正确评价、准确预测、科学调控森林水文功能提供思路。

1 问题的提出

森林约覆盖了地球陆地面积的 30%,其自然分布、生长和生产力均与降水、光照、温度及养分等条件相适应^[19]。比如,森林在水热充沛的热带和亚热带很常见,在降水中等、温度较低的温带或寒带也有广泛分布,但在干旱区仅分布在山地阴坡、河流两岸、沟谷等水分充足的局地。在海拔较低、地势平缓、土地肥沃的冲积平原,森林因人类长期开垦而变成农田;相反,在海拔较高、地形较陡、人为干扰较小的山地水源区则得以保存且生长良好。森林的这些分布特点造成一种假象,即增加森林会使气候更湿润和径流更多;另一方面,减少和破坏森林确能加重水土流失与洪水灾害,并导致枯水期溪流与泉水干涸。这种朴素认识在中国古代和西方最初的有关森林影响的著作^[20]中都有体现。

森林和水的研究与管理长期分属不同学科与部门,这导致过去一百多年内各国学者对森林水文作用的争论不休。最早的水利科学重点关注大江大河的径流或水在多孔介质中的运动(如著名的达西实验),往往忽略植被在水循环中的作用。同样,传统的森林植物或生理生态学家多关注水对植物生长的作用,而对流域或区域尺度的森林水文气象影响则知之甚少。

法国人 Andréassian 曾详细介绍了欧洲历史上对森林水文影响的争议^[21]。这场从公元一世纪“浪漫和情感的对抗”最终演变成 19 世纪法国关于“水和森林”的一场科学辩论。和许多科学发展历史一样,最初的经验观察往往经不住科学的严格检验。

日本在明治时代(1868—1911 年)受西欧国家如荷兰的影响,已有水文研究。在森林气象部门工作的玉丰在茨城县从 1923 年就开展了小流域水量平衡、阔叶林皆伐的气象及水文影响研究^[22]。但是,有关森林如何“治水”和“水源涵养”等问题至今在日本仍有争论^[23]。最早的较为著名的辩论是 1933—1936 年间林业实验站冈山县林业工程师平田德太郎和山本德三郎的争论。1933 年冈山地区大旱,他们发现水库周围裸山上种植松树后,随着树木生长,水库逐年干涸。平田认为植树造林“增加了水源地保水、供水能力,起到了蓄水缓洪作用”,但降雨减少导致了水库干涸。山本则认为“植树造林增加蒸发而使水库干涸”“森林的(蓄水缓洪)作用多出现在大中河流;在小溪流区域,森林的保水作用未必就那么理想”。为此争议双方撰写论文达 34 篇之多,但仍莫衷一是。

我国 1981—1982 年也发生了一场著名的“林-水关系”争论,一方是中国科学院地理研究所原所长、著名地理学家黄秉维(1913—2000 年);另一方是原北京林学院的汪振儒(1908—2008 年),他早年留学美国,是树木生理学家、森林生态专家。黄秉维的首篇论文是《确切地估计森林的作用》^[24],质疑当时的“森林万能”“造林等于修水库”观点,认为不应过分夸大森林作用,指出“森林能控制或有助于控制水土流失,能削减河流的洪峰流量,都是一般规律”。同年,汪振儒、黄伯璇发表了论文《确切地认识森林的作用——与黄秉维先生商榷》^[25],强调人与森林的关系、森林吸收二氧化碳影响降水量的气候效应。双方在几期《地理知识》上开展了争论。但受当时国内外森林水文研究深度的限制,这场“拿洋枪打内战”的争论没能改变当时和随后几十年内研究人员和林业管理部门对“林-水关系”一边倒的认识,但对如何科学准确认识森林作用起到了榜样作用。

事实上,森林水文作用在国际上至今也仍是充满争议的科学问题。对有些看似教科书式的定论和“常识”,由于问题的复杂性以及缺乏足够研究,目前都还充满争议。比如对森林是否能影响大规模洪水还有讨论的空间^[26—28]。国际林联与森林问题合作伙伴关系为此 2017 年特别召集全球 20 多个国家的 50 多位专家组成专家小组,专门评价森林水文在可持续发展中的作用,在 2018 年权威发布了《变化星球上的森林和水:脆弱性、适应和治理机会的全球评估报告》^[29],详细描述了百年来学术界对“林-水关系”认识摇摆不定的曲折过程。历史上部分学者认为洪水和干旱都与森林破坏有关,通过造林就能解决这些问题。但自本世纪初开始,随着森林水文研究深入,另一部分学者认为森林耗水(绿水)量高于其它植被,是河川径流(蓝水)的竞争者,因此认为营造速生林会减少水资源。但是,随着有关森林水文气象影响的大尺度研究逐步深入,提出森林蒸散会增加下风向的降水,在评价森林水资源影响时也需综合考虑,该报告还指出包括植树造林在内的全球治

理可在优化“气候-森林-水”关系中发挥关键作用,但目前仍缺乏明确的政策指引。森林对大尺度范围降水和水资源的影响是当前研究热点,但现有结果还有很大不确定性^[30-34]。

2 森林水源涵养概念溯源

为探讨森林“水源涵养”一词的出处,在查阅历史文献的基础上,特地书面咨询了作为森林水文专家的日本东京大学爱知附属试验林场负责人藏治光一郎博士和韩国林业资源研究所崔亨泰博士。据藏治介绍,“水源涵养”的确切含义在日本也充满争议,是个“难回答的问题”。虽然这一词汇早在 1897 年就已出现在日本的有关森林法规中,但是政府 2001 年才根据日本科学委员会的建议正式采用“水源涵养”一词,一般认为包括如下内容:(1)消减洪水;(2)保护水资源;(3)控制水量;(4)净化水。然而,日本森林水文学界虽有百年研究历史,但对“水源涵养”的内涵理解仍还不一致。有的学者接受政府确定的这四项内容,但有的学者觉得只应包括第二条(保护水资源)和第三条(控制水量),对森林可大范围消减洪峰和净化水质的作用持怀疑态度。当前,日本森林水文学界普遍认为不可忽视森林的蒸散和入渗功能,但只有健康森林(有较好的地被物、较厚的土壤和较高的入渗能力)才有良好水源涵养作用。

崔亨泰博士认为韩国森林水文研究受日本影响很大,因早期水文学者多去日本留学。在韩语中,森林的汉字为“山林”,发音“San Lim”,“森林水源涵养”读做“San Lim Soo Won Ham Yang”,这一词汇源自日文。是指“森林土壤具有暂时或长期储存雨水并源源不断地供给溪流的功能。所以,这就是森林土壤的保水功能。它在短期内减少洪水并在长期内供应水资源”。他认为韩国的土壤孔隙度和导水率很高($> 400 \text{ mm/h}$),森林涵养水源的概念利于描述森林调节水循环的作用。在崔博士领导下,韩国林务局 2022 年启动了一项长期项目,将用 10 年左右时间对全国所有森林的土壤保水功能进行定量评估并绘制“森林蓄水图”。

“水源涵养”一词在中国何时开始使用已无从考证,估计始于民国时期的教材。但可以肯定的是,当代中国有关林水相互作用的认识受原苏联影响很大,其研究强调防护林带的土壤保护与蒸散作用,以及森林植被影响积雪和河川径流的作用^[35]。根据流域降水与径流数据的统计分析,一般认为森林覆被率和森林结构对河川径流有显著影响,但不同区域的影响程度和方向不同。一般来说,森林覆被率高的地方,春汛期长,径流系数也较高,洪水水位低,平水期水位高。这些研究结果在 20 世纪改革开放初期的林业院校教科书中均有体现。俄罗斯森林水文学者认为高纬度北方森林的水文作用因流域而异,且取决于雪水平衡,受到森林植被和气温、相对湿度、风速和降水中雪量的控制^[36]。

水源涵养当今在中国的涵义较其它国家更宽广^[37],如百度定义“水源涵养是指生态系统通过其特有的结构与水相互作用,对降水进行截留、渗透、蓄积,并通过蒸发实现对水流、水循环的调控。一般可以通过恢复植被、建设水源涵养区达到控制土壤沙化、降低水土流失的目的。绿化是水源涵养的主要技术措施之一”。最新公布的《中国大百科全书 水利卷》第三版把“水源涵养”纳入农学水土保持领域,特指森林的作用。定义为“森林通过其系统结构和空间格局与气象、地形、土壤等其它因素共同影响一系列水文过程之后所产生的对径流调节作用”。森林涵养水源的基本内涵包括“消减洪水径流、增加枯水径流、调节年径流量、保证供水安全”。水源涵养林是指“以涵养水源,改善水文状况,调节区域水分循环,防止河流、湖泊、水库淤塞,以及保护饮水水源为主要功能的森林、林木和灌木林的统称,又称水源保护林”。

中国森林水文研究起步较晚^[38-39],但有关森林涵养水源的论文数从 21 世纪初呈指数级快速增加,目前每年有 300 篇左右中文论文涉及“森林水源涵养”一词。这与 21 世纪初开始的大面积植树造林、生态恢复工程及科技实力和论文出版能力增强有关(图 1)。在 1982—2022 年发表的 4600 多篇论文中,出现频率位居前十的关键词是:水源涵养、水源涵养林、森林生态系统、水源涵养功能、价值评估、森林生态系统服务功能、生态效益、生态系统服务功能、生态系统服务、祁连山。可见森林水源涵养论文多关注森林经营、森林生态系统服务和生态效益价值评估。同时说明森林水源涵养研究还很少涉及蒸散等森林水文过程及其定量研究。有意思的是,“祁连山”也进入前十个主题词,这与祁连山森林水源涵养研究历史悠久(祁连山水源涵养研究院是

中国唯一以“水源涵养研究”命名的研究机构)及长期重视该地区森林水文作用有关^[37],还与国家自然科学基金委员会在黑河流域实施过一个生态水文长期重大研究计划有关^[40]。但最近研究表明,祁连山区主要河流(如黑河)的主要水源供给者不是林地,因高山草甸、苔原的径流系数远高于青海云杉林,草地面积也远大于林地。祁连山区森林实际蒸散远高于高山草甸^[41]。

综上所述,可以肯定汉语中森林“水源涵养”一词源于日本。其确切内涵在日本、中国和韩国的科学界使用中是大同小异的,在三个国家均多关注森林消减洪水作用。然而由于中国地域辽阔,水土流失严重,水资源分布不均,其关注重点是不同气候带的森林恢复对保护水资源的有益作用。

3 对森林水文影响的基本认知

森林水文学已有百年历史(表1),最早的研究重点是森林大规模破坏对洪水和土壤侵蚀的影响。如果说生态水文学是探讨生态过程与水文过程相互作用的科学,那么森林水文学即是当代生态水文学的雏形。随着19世纪末工业革命带来了森林锐减、水土流失严重、空气污染、酸雨等环境问题,欧、美、日的环境保护主义者开始关注森林的水文(洪水、泥沙)、气象(森林降水)作用,并开始了“配对流域”对比研究^[42]。美国林务局1910—1926年在美国科罗拉多州的车轮峡实施的“配对流域”研究方法,成为世界上最早的严格意义的森林砍伐水文影响研究。西方发达国家的森林水文学研究在20世纪60年代已日趋成熟,主要标志是1965年在美国宾夕法尼亚召开的第一届国际森林水文学学术研讨会^[48],在这次划时代的会议上,欧、美、日、澳等国的森林水文学奠基者们系统总结了森林水文学研究成果。之后,世界各地森林水文学的发展方兴未艾,逐步成为高等院校林学和流域综合管理专业的基础学科。美国、加拿大和日本主要关注森林采伐对水量、水质的影响;澳大利亚作为一个缺水国家,森林水文研究重点关注森林变化和人工林经营对水资源供给、地下水补给、土壤盐碱化的影响,并从20世纪70、80年代开始进行了大量的小流域对比试验。

表1 中国和国际上探讨森林与水关系的主要事件一览

Table 1 Chronology of major events related to studies on forest and water in China and around the world

年份 Years	重要里程碑与意义 Important milestones and significance
1842	提出“Dausse 达塞定律”:森林流域类似于“海绵”“降雨是在温暖潮湿的风与冷空气层接触时形成的;而且由于森林的空气比野外的空气更冷、更潮湿,所以那里的雨水必定更多。”因此“森林成为了一个巨大的冷凝器”“树木带来雨水” ^[42] 。
1864	被认为是最早指出砍伐森林可能导致荒漠化的学者的美国人 George Marsh(1801—1882)出版了《人与自然》又称《人类改变的自然地理》一书 ^[43] ,指出“大地被森林覆盖时,常年泉水从每座山脚下涌出,小溪从每一个山谷的河床上流下来。相反,森林砍伐造成洪水,并使常年水源枯竭”。
1900	在瑞士的伯恩埃曼塔地区,首次通过流域对比研究森林变化对流量和泥沙的影响 ^[44] 。
1910	在美国科罗拉多州 Wagon Wheel Gap 开始第一个“流域配对”实验 ^[45—46] 。这是首次正式研究森林砍伐的径流与输沙量影响。实验持续到1926年,是当前全球数百个配对流域实验的原型。
1927	在美国林务局任职并与 Marsh 齐名的俄裔美国人林学家 Zon(1874—1956年)出版了著名的《森林与水:来自科学的发现》 ^[47] 。从1907至1912年间,整理了1200篇关于森林与水关系的参考文献,其最早可追溯到1789年,体现了北美、欧洲、俄罗斯、印度、中国和非洲的观察。
1933	在日本进行的平田和山本之间关于森林水文作用的争论 ^[23] 。
1934	在美国林务局南方站建立了 Coweeta 森林水文野外实验室。
1948	Kittredge 发表了《森林影响》一书 ^[20] ,阐述森林的水文气象作用。
1940s—60s	在不同气候带建立“配对流域”,研究森林采伐影响径流与泥沙基本规律。

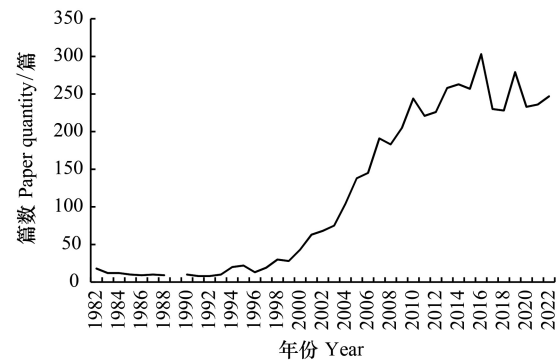


图1 用关键词“森林水源涵养”在知网检索的中文论文数量变化
Fig. 1 Search result by CNKI (China National Knowledge Infrastructure) for the number of Chinese papers indexed by the keyword forest Shui Yuan Han Yang (water retention)

续表

年份 Years	重要里程碑与意义 Important milestones and significance
1965	首次国际森林水文研讨会在美国宾西法尼亚召开,第二年出版了论文集 ^[48] ,系统总结了当时的森林水文研究成果。
1969	Hewlett 和 Nutter 出版了教材《森林水文学概论》 ^[49] 。
1979	在美国东北 Hubbard Brook 森林水文实验站,系统研究了森林对水文和地球化学平衡的影响及有关生态水文过程。基于这些研究,Bormann 和 Likens 出版《森林生态系统模式与过程》一书 ^[50] ,奠定了生态系统生态学的发展。
1980	森林气象学家 R. Lee 出版《森林水文》一书 ^[51] 。
1981	黄秉维与汪振儒在《地理知识》期刊上开展的关于森林水文作用的大辩论 ^[24—25] 。
1982	澳大利亚召开了第一届全国森林水文专题讨论会 ^[52] 。 Bosch 与 Hewlett (1982) 在 <i>Journal of hydrology</i> 发表有关森林植被变化对产水量和蒸散影响的综述论文《A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration》 ^[53] 。
1987	我国第一次国际森林水文研讨会由联合国教科文组织资助在哈尔滨召开 ^[54] 。
1993	中国林科院马雪华主编出版《森林水文学》一书 ^[55] 。
1996	中国林科院刘世荣等出版《中国森林生态系统水文生态功能规律》一书 ^[56] 。
1997	AmeriFlux 正式成立。不久从最初的 15 个站点扩大到 300 多个,为森林的碳-水耦合关系提供直接科学证据。之后,FluxNet, ChinaFlux, USCCC 等碳水通量观测网络相继建立,提高了对蒸散的认识。
2001	张鲁等在 <i>Water Resources Research</i> 发表论文《Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale》 ^[57] ,提出在流域尺度上定量确定森林和草地变化对年均蒸散影响的张鲁模型。
2002	Mingteh Chang 出版了《森林水文学:水与森林简介》 ^[58] 。
2004	Andreassian 在 <i>Journal of hydrology</i> 发表森林与水关系的综述论文《Waters and forests: from historical controversy to scientific debate》 ^[59] ,系统总结了小流域配对实验成果。
2005	Jackson 等在 <i>Science</i> 期刊发表关于碳水权衡的论文《Trading water for carbon with biological carbon sequestration》 ^[60] ,警告大量造林固碳对水资源的不良影响。
2006	在北京召开“第一届变化环境下的森林与水国际研讨会”。 孙阁 等在 <i>Journal of Hydrology</i> 期刊发表论文《Potential water yield reduction due to forestation across China》 ^[61] ,量化了中国不同区域造林减少流域产水量的潜在影响。
2007	Calder 等在《自然》期刊发表论文《Debate over flood-proofing effects of planting forests》 ^[62] ,对 Laurance ^[63] 在《自然》期刊和 Bradshaw 等 ^[64] 在《Global Change Biology》发表的有关森林影响大洪水的观点提出反驳。 在中国林科院举办由国际林联、联合国教科文组织、联合国粮农组织、北京市自然科学基金委员会等共同发起的国际研讨会“通过森林经营实现水资源管理”,提出需要林水协调管理。
2008	在美国水资源协会杂志出版中国森林水文专刊,收录了 11 篇论文,系统总结了近代中国森林水文研究的发展过程和成果 ^[65] 。 美国国家研究咨询委员会组织撰写了研究报告“变化中的森林景观之水文效应” ^[66] ,系统总结了森林水文研究成果,用于指导森林经营。
2012	Ellison 等 ^[67] 提出,要从大尺度“降水域”角度考虑森林蒸散耗水对下风向的供水作用,提供了评价森林水文气象影响新思路。
2018	国际林联发布森林和水评价报告《变化星球上的森林和水:脆弱性、适应和治理机会评估报告》 ^[29] ,系统总结了林水相互作用研究成果。
2021	张明芳与魏晓华在 <i>Sciences</i> 发表展望性论文《Deforestation, forestation, and water supply》 ^[68] ,评述了毁林、造林与水资源供给的关系及未来研究需求。 联合国粮农组织、国际林联、美国农业部联合出版了《以水为目的的森林管理指南》 ^[69] 。

在进入 21 世纪的今天,气候变化、城市化、水资源短缺等问题日益凸显,使得森林水文服务的重要性更加重要。国际上的森林水文研究领域不断拓展和深入,已从过去局限于营林对河流水质水量的影响拓展到目前广为关注的极端气候和土地利用变化影响供水安全的评价与预测、森林碳水耦合、新环境下的关键带水分运动、植被对气候的反馈规律等内容,研究手段从过去的径流小区或小流域尺度的“配对试验”拓展到大流域乃至区域尺度的遥感监测和计算机模型仿真模拟。研究范式也从过去的“黑匣子”式研究提升到目前的量化水分在“土壤-植被-大气”连续体内运动过程的机理研究。

同其它民族一样,中国人民历来对森林水文作用存有敬畏和美好情感。从古代“天人合一”的哲学思想、大众喜闻乐见的“山水画”流派,到现代的“山水林田湖草沙”生命共同体整体观,都体现了对林水紧密关系的重要认识。然而,中国森林水文研究起步较晚,相对落后于西方发达国家,中国林业科学研究院和四川省林科所虽在 20 世纪 60 年代就在岷江上游开展了采伐暗针叶林影响产流的开创性研究,可惜没有持续开展。在

20 世纪 80 年代后,中国林科院、北京林业大学、东北林业大学、中科院地理所等研究机构,逐步恢复了森林水文研究和人才培养,并与日本、美国、澳大利亚、德国、奥地利等发达国家广泛交流。一件值得纪念的意义深远的事件是 1987 年 8 月由联合国教科文组织和美国、中国人与生物圈计划发起召集的在哈尔滨举行的国际森林水文学研讨会,总结评价了中国森林水文研究进展,会后由美国外交部赞助亚利桑那大学编纂出版了英文论文集^[54],记录了这个历史上第一次中美森林水文研究人员交流过程。会后,国内森林水文学家们出版了《森林水文学》^[55],系统总结了中国森林水文研究的历程和成果。

1998 年的全国性特大洪水灾害,迫使人们反思江河上游的森林经营问题。中央政府痛定思痛,决定下大力气实施大规模的退耕还林还草及天然林保护工程。在这一时期,中国森林水文研究开始向西方的生态系统研究网络看齐,依托定位站点观测收集第一手野外资料,同时结合应用遥感技术和监测史料,开展森林水文规律研究。中国森林水文研究在 2000 年以来高速发展,尤其在干旱和半干旱地区重点流域的生态水文研究上取得了国际瞩目的成绩^[70]。2006 年,在国内外华人森林水文学者积极倡导下,第一届“变化环境下森林与水的国际研讨会”在中国林科院举行,会后出版了美国水资源协会期刊的《中国森林水文研究》专刊,系统介绍中国森林水文研究成果^[65]。至今该系列研讨会已三年一次连续五次在中国、美国、日本、加拿大、智利举行,每次都在国际著名期刊组织专刊。可喜的是,最近几年中国生态学会成立了生态水文、流域生态两个专业委员会,促进了林水关系深入研究和大众知识普及。

毋庸置疑,过去百年间世界各地森林水文研究都积累了大量科学资料,对森林在不同尺度的水文循环影响机理有了深入了解。虽然科学界还在许多方面有争议,但也已达成许多共识,已能回答很多基本的林水关系科学问题,用于指导生态建设。表 2 和图 2 列出了森林水文研究的主要结论和基本机理。

表 2 森林的水文调节及水源涵养作用和机制

Table 2 Mechanisms of forest hydrological functions and water retention services

森林水文调节作用 Hydrological regulation effects of forests	机理 Mechanisms	主要参考文献 Main references
森林在固碳的同时会降低气温、消耗较多水分 Forests reduce air temperature and fix carbon while consuming water	由于森林根系较深、生物量大于灌草或农作物、生长期长、冠层反照率低和净辐射高,森林蒸散量在同样气候条件下更高,耗水较多。	[57, 60, 71—72]
森林流域产水量较高,俗称水源地或“水塔” Forest watersheds are ‘water towers’	森林多处于地形复杂、海拔较高、人类活动少的位置,这里降水高,温度低,蒸散量小,因此产流量也高。	[73—74]
砍伐森林(包括掠夺性滥砍滥伐或合理森林经营)会增加地表径流、洪峰流量、径流总量,还可能增加或减少基流 Removing forests increase overland flow, peakflow, total flow, but may decrease or increase baseflow	砍伐森林会降低蒸散(因为减少叶面积指数,提高地面反照率,降低净辐射)或/和破坏土壤入渗能力,导致地下水补给增加(在干旱区)或减少(尤其在湿润区)。	[64, 75—78]
造林或恢复森林可能会减少、不影响或增加径流总量和基流 reforestation or forest restoration decreases or no causes no effects on total streamflow flow or baseflow	造林增加叶面积指数,降低地面反照率,提高净辐射。但径流变化取决于造林前后的蒸散变化。洪峰和基流量变化程度取决于土壤物理性质改善程度。	[68, 78—79]
森林影响产水量的相对值在低径流流域(如干旱区)大于高径流流域(如湿润区),所以径流响应植被变化在旱区更明显 Effects of forests on streamflow are more pronounced in dry regions	湿润区降水量远高于森林蒸散所需,故而径流量较高;而干旱区降水量绝大多数用于森林蒸散,故而径流较低。	[61, 80]
森林流域产水量随树种、树龄、森林结构变化而变化 Water yield varies with tree species, age, and forest structure	树种、树龄、森林结构变化会改变植被生长和水文过程以及蒸散耗水量,从而改变产流量。	[81—83]
同样条件下,人工林产流量低于当地天然林 Plantation forests consume more water than native forests under the same environment	人工林树木生长快,生产力高于当地天然林,故而蒸散需水多,产流少。	[84]

续表

森林水文调节作用 Hydrological regulation effects of forests	机理 Mechanisms	主要参考文献 Main references
同样条件下,生长季林地土壤含水量和地下水位低于草地 Growing season soil moisture content and groundwater level in forests are lower than grassland under the same environment	生长季林地蒸散高于草地,使土壤失水更多,地下水位下降。	[11, 85—87]
在区域尺度,处在同一降水区内上风向的大面积森林植被变化可能影响下风向的降水和径流量 Within the same precipitationshed,forest change upwind may affect precipitation and water availability downwind	上风向的森林蒸散的水汽是下风向地区降水的水汽来源之一。	[29, 33, 67, 72]

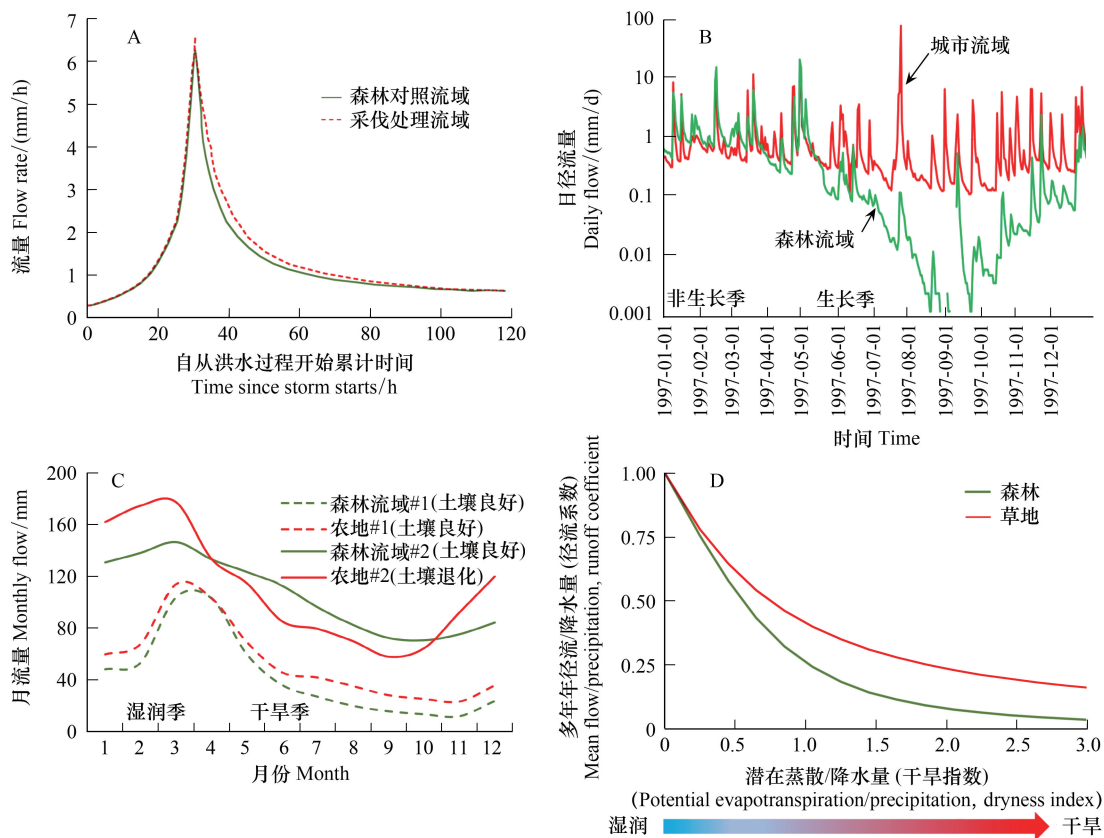


图2 不同时间尺度和土壤干扰程度下的森林植被影响流域径流示意图

Fig.2 Illustrations of forest/vegetation effects on watershed water yield at hourly (A), daily (B), monthly (C), and long term (D) time scales under various soil disturbance degrees

A: 土壤扰动很轻的森林采伐(采伐树木没有移走,没有地表径流出现)提高流域暴雨径流总量(平均22%)和洪峰流量(平均7%),基于湿润区土壤深厚的配对流域实验^[88];B: 城市化流域的生长季日流量远高于森林流域,基于湿润区流域(砍伐流域面积为41 hm²)对比研究^[89];C: 湿润区森林转变成农地后蒸散降低,在破坏土壤较轻时(入渗能力变化不大)基流增加,但严重破坏土壤后可能会大量减少入渗,使旱季径流减少,基于东南亚热带地区研究^[78];D: 根据Budyko理论(傅抱璞模型^[90])计算的不同气候带森林流域(以模型参数n=3.0为代表)和草地流域(以模型参数n=2.0为代表)径流系数示意图,两种植被覆盖的流域水文响应在干旱指数1.0—1.5附近差别最大

总体来讲,国际上关于森林经营水文影响的研究较多,但对退化土地造林等植被恢复水文影响的研究较少。一般的共识是植被变化主要通过影响蒸散和入渗来改变产汇流过程从而改变径流总量及其时间分布。森林对水资源的影响与当地的气候背景和所关注的时空尺度有关,在小尺度上往往更明显。在小流域尺度,

森林增多(或减少)通常会提高(或降低)蒸散,从而减少(或增加)径流。对中大流域,植被的径流影响机理与小流域基本一致,但径流变化除与植被干扰的程度、方式、面积、位置等有关外,还与流域特征(如流域大小、形状和是否存在湿地、水库等)有关。在区域尺度,较大的气候因子时空差异或人类干扰(如抽取地下水、引水灌溉、城市化)往往会掩盖森林变化的水文影响,从而成为影响森林分布和生产力及流域水资源的主要因素。森林采伐的径流影响会随时间而变,一般在最初 5—10 年最大,之后随森林生长和植被趋于稳定而逐步减弱。在森林生长缓慢的高寒区,如美国洛基山地区,流域水文状态要恢复至砍伐前可能需要半个世纪;在土壤严重退化的农地或草地上恢复森林,其水文过程恢复到成熟森林的状态也需要很长时间。

4 森林的水文调节作用与水源涵养服务功能的关系

森林水文影响(表 2,图 2)主要是通过影响蒸散耗水、土壤入渗和产流过程体现的。日本提出的森林“水源涵养”概念与西方把森林比作“海绵”的概念(Dausse 达塞定律)相似^[78],与英文词汇“water retention or preservation”最接近(而非 conservation)。森林水源涵养主要体现了植被和土壤对降水的截持、储存、释放和净化作用。这里的释放包括产流输出和土壤水分蒸散过程。与裸地或退化草地相比,森林的林冠层、灌草层、枯枝落叶层通过其截持作用而改变降水的数量及时空分布,利于消减洪峰和洪水总量。尤其重要的是,发育良好的森林土壤具有良好的孔隙结构和入渗性,利于减少地表径流、储存降水、补充地下水、提高基流或干旱期河川流量。可将植被截持、土壤入渗和暂时储水作用视为森林的持水功能。同时,森林的较高叶面积指数和庞大根系使其具有较高蒸散能力,将大量土壤水或浅层地下水返回大气。森林的蒸散作用与持水作用相互促进和制约:森林的高蒸散具有减少土壤含水量即增加土壤基质势^[11, 85]、腾空土壤水库、增加雨前土壤储水容量、促进入渗和减少地表径流的作用,从而发挥减洪滞洪功能。但是,森林的高蒸散会在减小土壤含水量的同时减少地下水补给量以及基流流量和流域总产水量。

可见,森林水源涵养不是指森林把降水永久储存于土壤中从而增加当地水资源量。相反,森林为了自身生存首先需消耗大量水资源,将暂存土壤的水分通过蒸散返回大气,仅把剩余的部分可流动的水输出到河流(或地下水)形成便于人类利用的水资源。在过去理解和谈及森林水源涵养功能时,事实上在突出强调相对普遍存在的森林通过增加入渗和提高土壤“海绵体”库容而产生的减少地表径流及中小洪水洪峰流量的“消洪”作用;而对森林增加蒸散并因此减少径流总量和调节径流时间分配(包括减少基流)的影响重视不够甚至忽视,可能是因蒸散研究困难和成果相对不足,尤其在流域尺度上;进而基于水量平衡的想法理想化地认为消减的洪峰径流必然转为“补枯”基流的效益。但事实上这种理想状态并不总是存在,因为森林增加蒸散减少径流总量可能会导致也减小枯水期流量。

由此来看,不能简单化甚至是神化森林水文功能,而应科学、准确地认识和量化各森林水文功能之间的权衡或协同关系及其时空变化,并且还要区分开森林的水文调节作用与水源涵养功能这两个不同概念(图 3)。随着人口增加和社会经济发展带来的对森林水文功能需求的数量提高和指标多样化,森林提供的水文调节作用与社会需求的水源涵养服务不一致的矛盾会越来越突出,尤其在干旱缺水地区和极端干旱事件影响日益增强时。必须承认在森林多种水文功能之间以及在森林水文功能的供给与需求之间客观存在的复杂的权衡或协同关系,需要在量化其形成机理的基础上进行合理利用与优化调节,实现人与自然的双赢与和谐。

首先,森林水源涵养功能与各地不同的人类福祉需求有关,具有时空差异。在水资源丰富的国家或地区(如日本、东南亚),更多地重视森林的消洪和补枯作用;而在水资源缺乏的国家或地区,则更关心森林对旱季产水量的影响。对中国这样水土流失严重、水资源短缺的国家,需同时强调森林的消洪、补枯、减沙和供水(产水总量)等多种功能。如果说在湿润地区更多出现的森林“消洪补枯”作用是正向水源涵养服务,那在非湿润地区更多出现的森林较高蒸散导致河川总径流量及枯水期径流量减少则可视作反向水源涵养服务。但也存在反例,比如澳大利亚沿海地区就在恢复和利用森林蒸散的“抽水机”作用来降低地下水位和防治农田盐碱化,因为森林开垦成农田虽然减小了蒸散和增加了地下水补给,但造成了土地盐碱化和农田减产。然而,

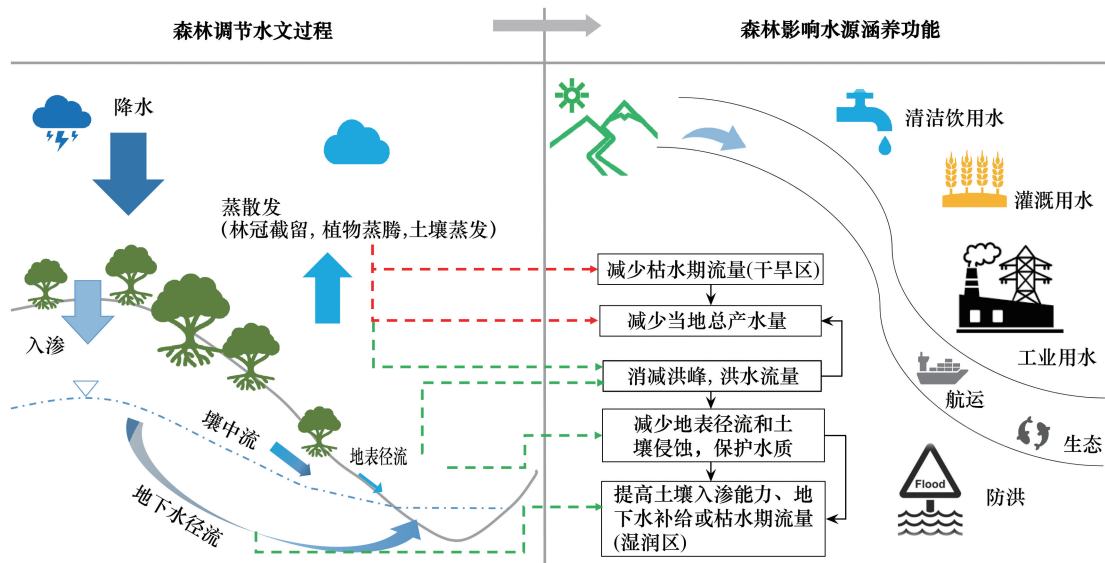


图3 森林的水文调节作用与水源涵养功能概念的区别与联系

Fig.3 The distinction and relation between hydrological regulation effects and water-retention services of forests

在阿根廷研究发现,草地种植人工林后减少了地下水补给但提高了土壤盐分,森林功能成为负效应^[91]。在世界多数湿润地带,如南亚季风区,森林恢复能改善土壤结构,增强入渗^[86]和地下水补给,有可能提高旱季径流,属于正向服务^[78]。但是,有关森林增加旱季径流的观测实例很少,这些文献多是基于土地利用复杂和受自然(如气候变暖,冰川融化)及人为干扰(如城市化,水利工程)强烈影响的大流域水文观测^[17, 92]或模型模拟分析^[93],存在说服力不足的问题,还未从机理上定量确定旱季径流增加现象与森林植被增加的因果关系。

森林很少能同时满足社会的所有水文服务需求,如既能“消洪”也能“补枯”,还能“增加水资源总量”。通俗地讲,一般不会是森林越多就能越好地给人类提供整体水文服务,因为多种功能之间可能有权衡关系,功能变化也往往是非线性的,因此存在某些优化区间及对应阈值。比如森林蒸散耗水会腾空土壤库容从而利于暴雨入渗、消减洪峰及洪水径流量,这是对人类有益的服务;但大量增加森林(尤其速生林)会因蒸散增加而减少地下水补给和流域径流总量甚至旱季基流,不利于下游供水安全,某种程度上是负向功能^[17, 84]。最近,有关气候变化的学者和水利部门开始关注造林增加碳汇促进实现“碳中和”会对供水安全有什么负面影响的问题,如何在气候变化背景下进行林水协调管理成为热点^[17, 69]。

5 量化森林的水量平衡影响及水源涵养功能的基本方法

从森林水文调节作用与水源涵养服务功能的关系来看,在评价森林水源涵养作用时,首先必须从森林增加蒸散与促进入渗的权衡关系入手,准确描述和量化森林的数量、结构与格局如何影响蒸散耗水、降水入渗(地下水补给)、土壤水动态、径流(暴雨洪水、基流)形成等过程,即在不同尺度上量化森林对水量平衡组分变化的影响,并将造林前或毁林后的其它植被类型或土地利用方式作为参考;其次,需要将水量平衡组分物理量的变化与社会需求的水文功能变化进行对比,判断森林水文调节作用在水源涵养服务意义上的方向与大小,因此有关评价需要结合社会经济学的理论与方法。限于篇幅,本文后面只关注和讨论如何量化森林植被变化对水源涵养起关键作用的流域水量平衡的影响。

当前国际上定量评价森林的水量平衡影响的途径不外乎野外实验和模拟模型这两种(表3)。野外实验的具体方法有传统的“配对的流域”实验法和“单一流域”观测序列法,各有优缺点。现代流域尺度的森林水文学知识多来自严格的配对小流域研究;而单一流域法常用于大流域在干扰前后的时间序列对比研究。“配对的流域”法是国际上公认的可靠方法,其研究成果广泛用于验证 Budyko 等理论^[80, 105],可严格区分出森林变化的

影响,但却不能评价和预测在气候、地形、土壤、植被共同变化下的径流变化。此外,基于生态水文过程将配对小流域研究结果尺度上推到大流域的方法目前还不是很成熟,因而还不能解决变化环境下的森林水文功能预测问题。

表 3 量化森林对水量平衡影响和水源涵养的基本方法

Table 3 General methods for quantifying the influences of forests on water balances and water retention			
研究途径 Approaches	具体方法 Methods	基本原理 Principles	参考文献 References
野外实验 Field experiments	配对流域	配对流域实验是确定森林植被水文作用的经典方法。首先选择气候相同并且植被、地形地貌、土壤相似的两个(或多个)相邻小流域,一个为控制流域(C),另一个为处理流域(T)。先在为期 3—5 年或更长时间的校核期内同时观测两个小流域的径流数据,籍此建立两个小流域不同时间尺度的径流(Q)回归关系($Q_t = a + b Q_c$),之后对处理流域进行处理(采伐或造林),然后同时观测对照和处理小流域的径流。森林水文效应可视为处理流域的处理期径流测值与利用控制流域处理期径流测值和回归模型计算的处理流域在非处理条件下的处理期径流测值之差。由于剔除了气候、地形地貌、土壤等因素的影响,所以能较好地定量确定森林植被变化对小流域整体蒸散和径流的影响。但该方法耗时长(5—10 年以上)、造价高、重复性差,仅适于小流域。	[49, 94]
	单一流域	该方法通过对单一流域的径流时间序列进行气候弹性分析,剔除气候变异对径流的影响,进而分离出植被或土地利用变化和其它因素的影响。该方法适于有长期气象观测、径流监测和翔实土地利用历史资料的流域。	[95]
数学模型 Mathematical models	经验性(黑箱模型)	利用野外实测数据建立的水文要素与植被变化的定量关系,不考虑或很少考虑因果关系,强调简单实用,关注最终预报结果精度。如基于人工智能、神经网络、多元回归建立的模型。	[96—97]
	概念性(灰箱模型)	根据水量平衡、能量平衡、动量平衡基本原理,通过宏观推理方法建立的平均状态下水文要素与气候、植被等因素的关系,如 Budyko 框架、Zhang 曲线。	[57, 98—100]
	物理机制 (白箱模型)	基于水量平衡、能量平衡、动量平衡原理,详细描述森林生态系统的生态、水文和生物地球物理化学动态过程,量化植被变化对主要水文要素(蒸散、地表径流、地下径流、洪水径流、基流等)及其时空格局的影响。其中集总式模型如 Brook90、PRMS,分布式模型如 MIKE SHE、RHESSys、SWAT 等。	[101—104]

自从 20 世纪 60 年代伴随计算机技术发展而出现的第一代斯坦福水文模型诞生以来,基于过程的具有物理意义的水文模型不断涌现(图 4)。由于森林生态系统结构的时空变异性更大,森林水文模型的开发与验证比普通流域水文模型更难,对蒸散和产流等过程的模拟精度要求也更高。

近些年来,Budyko 水热平衡原理框架模型,如傅抱璞蒸散模型^[17, 80, 90, 98]或张鲁多尺度蒸散模型^[57, 105]广泛用于定量解释植被或气候变化对蒸散和产水量的影响^[100, 150]。由于这类集总式的“Top-down”模型涵盖了平均状态下陆地生态系统的主要影响因子(水、热、地表特征),只需很少参数和气候变量就能有效量化长期、大尺度区域的水量平衡,能巧妙地宏观上说明气候差异和水文响应的敏感性。

但是,森林水文影响是个动态的复杂生物物理过程。Budyko 框架模型需要增加参数才能回答流域尺度上气候季节变异和流域特征变化的水量平衡影响^[105, 108]。当前,随着计算能力提高、不同尺度的森林水文“大数据”积累、高精度遥感和人工智能技术应用,涌现了一系列采用“由下而上”方法开发的具有物理意义的分布式生态水文模型。这些模型考虑森林碳、水、热平衡以及陆-气交换和生态系统扰动,为准确量化森林水文调节作用及水源涵养功能提供了科学工具。

6 小结和建议

中国自 2000 年以来大规模实施了以增强水源涵养功能为基本目标之一的森林恢复和生态建设,其成就举世瞩目。但当前尚无统一的森林水源涵养定义及量化方法,导致评价时常造成困惑或自相矛盾,不利于科学指导国土绿化、水资源保护、山水林田湖草沙系统治理等生态建设。因此,本文在溯源森林“水源涵养”基

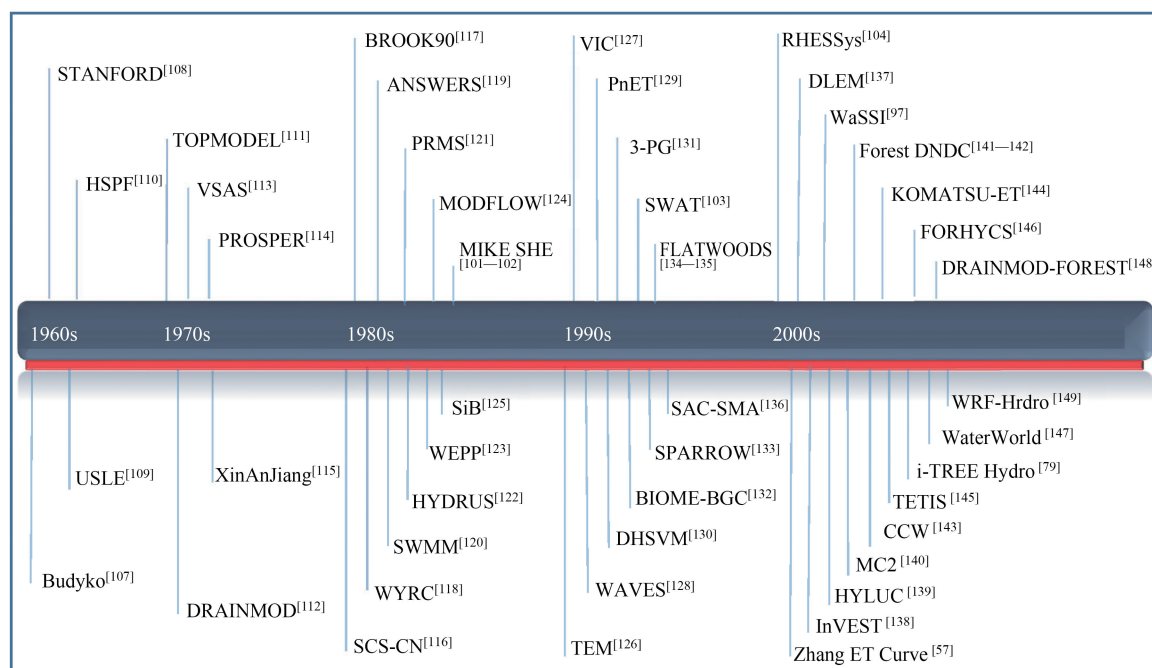


图 4 近 60 年来国际上开发的可用于估算陆地水量平衡和量化森林水文功能的模型^[106]

Fig.4 Hydrologic models used to estimate water balance and quantify forest water retention during the recent 60 years^[106]

本概念、梳理现代森林水文学研究成果的基础上,试图提出准确理解和量化森林水源涵养功能的途径和方法。“水源涵养”一词以汉字形式最早出现在 1897 年制定的日本森林法中。公认的森林水源涵养功能是指森林通过调节蒸散的组分(植被截持、植被蒸腾、土壤蒸发)和增加蒸散总量、保护和改善土壤结构、提高土壤入渗和削减地表径流、促进壤中流形成和地下水补充等水文过程而产生的消减河川洪水径流、增加枯水期径流、稳定水资源供给的利于经济社会发展的有益作用,常被简称为“消洪补枯”作用。但是,这种简单定义忽略了森林对总径流量的调节作用,因此会常常引出对不同条件下森林水文效益和水资源的一些误解。

森林变化对不同尺度的水文循环都有巨大影响,而且存在明显时空差异。森林的水文调节作用与水源涵养服务是不同概念,前者强调森林对水文要素物理量的影响,后者增加考虑了对社会经济发展的水安全需求的影响,二者不能混同。需在准确量化森林水文调节作用的基础上,从是否满足社会经济发展的水安全需求角度来评价森林水源涵养功能,这都需要深入理解和准确量化森林对蒸散耗水、土壤入渗、土壤水变化、地下水补给、产流、汇流等过程以及最终对径流的数量、质量和时空分配(尤其洪峰流量、旱季基流流量)的影响。

经典的“配对流域”实验方法虽然造价昂贵,仅适合小流域研究,且耗时很长和不能反映森林以外其他因素的影响,但至今仍是国际公认的最可靠的直接量化植被对小流域蒸散和径流影响的有效方法。然而至今中国还没有一个严格的“配对流域”实验。建议有条件的研究机构制定长期计划,设计并实施不同气候带的小流域“配对流域”实验,对比退化土地上不同植被恢复方法(如自然恢复、人工造林)或森林管理(间伐、替换树种)及采伐利用(皆伐、择伐、近自然经营)的水文影响过程。建立小流域观测网络,配合固定样地生态水文过程及大中流域研究,综合考虑气候、地形、土壤、植被的水文影响。同时,结合遥感技术应用,开发具有物理意义的水-热-植被动态耦合模型,预测未来变化条件下森林水文调节作用及水源涵养服务功能的变化。在变化的气候、地形地貌(地质)、土壤条件下,增加对森林(数量、结构、格局)影响水量、水质及其时空分布的理解、预测、评价与管理。在大流域尺度上,还应增加森林水文与水利工程等人类活动的相互影响研究,为流域管理提供决策支撑。

中国幅员辽阔,气候多样,各地水热条件和经济社会发展水平及生态安全和水安全需求迥异,因此其“林-水关系”更具复杂性,森林水源涵养服务功能的表现形式也具有独特性。但是,植被和气候的水文影响仍然

遵循生态水文基本规律,有章可循。国际上百年来的研究成果和教训在中国均可借鉴。毫无疑问,中国大面积的植树造林和生态恢复对控制水土流失、增加碳汇和改善河流水质水量整体上都有正面作用。但是,对森林水源涵养服务功能既不能小看也不能夸大,尤其在缺水地区更需有正确认识,不能简单化、一刀切和忽视其时空差异。在造林及营林中都必须遵从森林生态水文的基本规律,充分认识森林的水文调节作用和水源涵养服务功能以及它们在多个层面和尺度上的权衡与协同关系,这样才能在各地的生态修复实践中确定合理目标和采取适当措施,实现生态文明建设大业。呼吁生态学和文学有关研究机构及自然资源管理部门尽快联合起来,澄清和确定森林水源涵养服务功能的确切涵义和范畴,统一量化标准和方法,从而准确、合理地计量包括水源涵养在内的森林多重服务功能(如减轻洪水危害、保证供水安全、净化水质、碳水协调管理、调节气候等)。

参考文献(References):

- [1] 左其亭,王骄阳,杨峰,宋全香. 水源涵养相关概念辨析及水源涵养能力计算方法. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 13-19.
- [2] 李文华,张彪,谢高地. 中国生态系统服务研究的回顾与展望. 自然资源学报, 2009, 24(1): 1-10.
- [3] 吕一河,胡健,孙飞翔,张立伟. 水源涵养与水文调节:和而不同的陆地生态系统水文服务. 生态学报, 2015, 35(15): 5191-5196.
- [4] 刘效东,张卫强,冯英杰,赵新宇,甘先华,周庆. 森林生态系统水源涵养功能研究进展与展望. 生态学报, 2022, 41(4): 784-791.
- [5] 龚诗涵,肖洋,郑华,肖燧,欧阳志云. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素. 生态学报, 2017, 37(7): 2455-2462.
- [6] Bryan B A, Gao L, Ye Y Q, Sun X F, Connor J D, Crossman N D, Stafford-Smith M, Wu J G, He C Y, Yu D Y, Liu Z F, Li A, Huang Q X, Ren H, Deng X Z, Zheng H, Niu J M, Han G D, Hou X Y. China's response to a national land-system sustainability emergency. Nature, 2018, 559(7713): 193-204.
- [7] 余新晓,周彬,吕锡芝,杨之歌. 基于 InVEST 模型的北京山区森林水源涵养功能评估. 林业科学, 2012, 48(10): 1-5.
- [8] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. Nature Sustainability, 2019, 2(2): 122-129.
- [9] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [10] Chen H S, Shao M G, Li Y Y. Soil desiccation in the loess plateau of China. Geoderma, 2008, 143(1/2): 91-100.
- [11] Liang X Y, Xin Z B, Shen H Y, Yan T F. Deep soil water deficit causes *Populus simonii* Carr degradation in the three north shelterbelt region of China. Journal of Hydrology, 2022, 612: 128201.
- [12] Yu Z, Ciais P, Piao S L, Houghton R A, Lu C Q, Tian H Q, Agathokleous E, Kattel G R, Sitch S, Goll D, Yue X, Walker A, Friedlingstein P, Jain A K, Liu S R, Zhou G Y. Forest expansion dominates China's land carbon sink since 1980. Nature Communications, 2022, 13: 5374.
- [13] 张彪,李文华,谢高地,肖玉. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法. 生态学报, 2009, 28(3): 529-534.
- [14] 王尧,徐佩,傅斌,王威,王海雯. 森林生态系统水源涵养功能评估模型研究进展. 生态经济, 2018, 34(2): 158-164, 169.
- [15] 王云飞,叶爱中,乔飞,李宗省,缪驰远,狄振华,龚伟. 水源涵养内涵及估算方法综述. 南水北调与水利科技:中英文, 2021, 19(6): 1041-1052.
- [16] Cao S X, Sun G, Zhang Z Q, Chen L D, Feng Q, Fu B J, McNulty S, Shankman D, Tang J W, Wang Y H, Wei X H. Greening China naturally. AMBIO, 2011, 40(7): 828-831.
- [17] Zhou G Y, Xia J, Zhou P, Shi T T, Li L. Not vegetation itself but mis-revegetation reduces water resources. Science China Earth Sciences, 2021, 64(3): 404-411.
- [18] 周佳雯,高吉喜,高志球,杨伟超. 森林生态系统水源涵养服务功能解析. 生态学报, 2018, 38(5): 1679-1686.
- [19] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, Jolly W M, Piper S C, Tucker C J, Myneni R B, Running S W. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. Science, 2003, 300(5625): 1560-1563.
- [20] Kittredge J. Forest influences. New York: McGraw-Hill Book Co., 1948.
- [21] Andréassian V. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. Journal of Hydrology, 2004, 291(1/2): 1-27.
- [22] 杨海军,余新晓. 日本森林水文研究与发展. 北京林业大学学报, 1992, 14(1): 98-104.
- [23] 遠藤泰造. 森林の水源涵養機能に関する論争史 (I). 水利科学, 2002, 46(5): 54-88.
- [24] 黄秉维. 确切地估计森林的作用. 地理知识, 1981, (1): 1-3.
- [25] 汪振儒,黄伯璇. 确切地估计森林的作用——与黄秉维先生商榷. 地理知识, 1981, (8): 1-3, 6.
- [26] Bradshaw C J A, Sodhi N S, Peh K S H, Brook B W. Global evidence that deforestation amplifies flood risk and severity in the developing world. Global Change Biology, 2007, 13(11): 2379-2395.
- [27] Laurance W F. Forests and floods. Nature, 2007, 449(7161): 409-410.
- [28] Calder I R, Smyle J, Aylward B. Debate over flood-proofing effects of planting forests. Nature, 2007, 450(7172): 945.
- [29] Creed I, Noordwijk M. Forest and water on a changing planet: vulnerability, adaptation and governance opportunities: a global assessment report.

IUFRO world series, 2018

- [30] Peng S S, Piao S L, Zeng Z Z, Ciais P, Zhou L M, Li L Z X, Myneni R B, Yin Y, Zeng H. Afforestation in China cools local land surface temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(8): 2915-2919.
- [31] Li Y, Piao S L, Li L Z X, Chen A P, Wang X H, Ciais P, Huang L, Lian X, Peng S S, Zeng Z Z, Wang K, Zhou L M. Divergent hydrological response to large-scale afforestation and vegetation greening in China. *Science Advances*, 2018, 4(5): eaar4182.
- [32] Li Y, Piao S L, Chen A P, Ciais P, Li L Z X. Local and teleconnected temperature effects of afforestation and vegetation greening in China. *National Science Review*, 2020, 7(5): 897-912.
- [33] van Dijke A J H, Herold M, Mallick K, Benedict I, Machwitz M, Schlerf M, Pranindita A, Theeuwens J J E, Bastin J F, Teuling A J. Shifts in regional water availability due to global tree restoration. *Nature Geoscience*, 2022, 15(5): 363-368.
- [34] Teo H C, Raghavan S V, He X, Zeng Z, Cheng Y, Luo X, Lechner A, Ashfold M J, Lamba A, Sreekar R, Zheng Q, Chen A, Koh L P. Large-scale reforestation can increase water yield and reduce drought risk for water-insecure regions in the Asia-Pacific. *Global Change Biology*, 28(21), 6385-6403.
- [35] A.A.莫尔察诺夫, 杨山. 森林的水源涵养作用. *林业科学*, 1960(2): 161-174.
- [36] Onuchin A, Burenina T, Shvidenko A, Guggenberger G, Musokhranova A. Hydrology of taiga forests in high northern latitudes. 2016
- [37] 王金叶, 于澎涛, 王彦辉. 森林生态水文过程研究: 以甘肃祁连山水源涵养林为例. 北京: 科学出版社, 2008.
- [38] 于静洁, 刘昌明. 森林水文学研究综述. *地理研究*, 1989, 8(1): 88-98.
- [39] 郭明春, 王彦辉, 于澎涛. 森林水文学研究述评. *世界林业研究*, 2005, 18(3): 6-11.
- [40] Cheng G D, Li X, Zhao W Z, Xu Z M, Feng Q, Xiao S C, Xiao H L. Integrated study of the water-ecosystem-economy in the Heihe River Basin. *National Science Review*, 2014, 1(3): 413-428.
- [41] Li X, Cheng G, Tian W, Zhang Y, Zhou J, Pan X, Ge Y, Hu X. Hydrological cycle in the Heihe River Basin and its implication for water resource management in inland river basins (invited). 2013
- [42] McCulloch J S G, Robinson M. History of forest hydrology. *Journal of Hydrology*, 1993, 150(2/3/4): 189-216.
- [43] Marsh G P. *Man and Nature, Or Physical Geography as Modified by Human Action*. New York. 1864.
- [44] Hegg C, McArdell B W, Badoux A. One hundred years of mountain hydrology in Switzerland by the WSL. *Hydrological Processes*, 2006, 20(2): 371-376.
- [45] Bates C G, Henry A J. Streamflow at wagon wheel gap, COLO. *Monthly Weather Review*, 1921, 49(12): 637-650.
- [46] Bates C G, Henry A J. Second phase of streamflow experiment at wagon wheel gap, colo. *Monthly Weather Review*, 1928, 56(3): 79-80.
- [47] States U, Zon R. *Forests and water in the light of scientific investigation* By Raphael Zon. Forest service, United States Department of agriculture. Washington: Govt. print.off, 1927.
- [48] Rodda J C. International symposium on forest hydrology. *The Commonwealth Forestry Review*, 1966, 45(2 (124)): 160-162.
- [49] Hewlett J, Nutter W. *An outline of forest hydrology*. 1969
- [50] Bormann F, Likens G. *An ecological study. (book reviews: pattern and process in a forested ecosystem. disturbance, development and the steady state based on the Hubbard brook ecosystem study)*. 1981
- [51] Lee R. *Forest Hydrology*. Columbia University Press, 1980.
- [52] Beschta Robert L. The first national symposium on forest hydrology 1982. *Forest Science*, 1983, 29(3): 438.
- [53] Bosch J M, Hewlett J D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 1982, 55(1/2/3/4): 3-23.
- [54] Ffolliott P F, Guertin D P. *Forest hydrological resources in China - An analytical assessment*. U.S. MAB. 1990.
- [55] 马雪华. *森林水文学*. 北京: 中国林业出版社, 1993.
- [56] 刘世荣. *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.
- [57] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 2001, 37(3): 701-708.
- [58] Chang M. *Forest hydrology: an introduction to water and forests*. 2002
- [59] Andréassian V. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 2004, 291(1/2): 1-27.
- [60] Jackson R B, Jobbágy E G, Avissar R, Roy S B, Barrett D J, Cook C W, Farley K A, le Maitre D C, McCarl B A, Murray B C. Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science*, 2005, 310(5756): 1944-1947.
- [61] Sun G, Zhou G Y, Zhang Z Q, Wei X H, McNulty S G, Vose J M. Potential water yield reduction due to forestation across China. *Journal of Hydrology*, 2006, 328(3/4): 548-558.
- [62] Calder I R, Smye J, Aylward B. Debate over flood-proofing effects of planting forests. *Nature*, 2007, 450(7172): 945.
- [63] Laurance W F. Forests and floods. *Nature*, 2007, 449(7161): 409-410.
- [64] Bradshaw C J A, Sodhi N S, Peh K S H, Brook B W. Global evidence that deforestation amplifies flood risk and severity in the developing world. *Global Change Biology*, 2007, 13(11): 2379-2395.
- [65] Sun G, Liu S R, Zhang Z Q, Wei X H. Forest hydrology in China: introduction to the featured Collection¹. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 44(5): 1073-1075.

- [66] National Research Council. Hydrologic Effects of a Changing Forest Landscape. Washington, D.C.: National Academies Press, 2008
- [67] Ellison D, Futter M N, Bishop K. On the forest cover-water yield debate: from demand- to supply-side thinking. *Global Change Biology*, 2012, 18(3): 806-820.
- [68] Zhang M F, Wei X H. Deforestation, forestation, and water supply. *Science*, 2021, 371(6533): 990-991.
- [69] FAO, IUFRO, USDA. A guide to forest-water management. FAO Forestry Paper No. 185. Rome. 2021.
- [70] Wang Y H, Yu P T, Xiong W, Shen Z X, Guo M C, Shi Z J, Du A P, Wang L M. Water-yield reduction after afforestation and related processes in the semiarid liupan mountains, northwest China¹. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 44(5): 1086-1097.
- [71] Jackson R B, Randerson J T, Canadell J G, Anderson R G, Avissar R, Baldocchi D D, Bonan G B, Caldeira K, Diffenbaugh N S, Field C B, Hungate B A, Jobbágy E G, Kueppers L M, Noretto M D, Pataki D E. Protecting climate with forests. *Environmental Research Letters*, 2008, 3(4): 044006.
- [72] Ellison D, Morris C E, Locatelli B, Sheil D, Cohen J, Murdiyarso D, Gutierrez V, van Noordwijk M, Creed I F, Pokorny J, Gaveau D, Spracklen D V, Tobella A B, Ilstedt U, Teuling A J, Gebrehiwot S G, Sands D C, Muys B, Verbist B, Springgay E, Sugandi Y, Sullivan C A. Trees, forests and water: cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, 2017, 43: 51-61.
- [73] Liu N, Caldwell P V, Dobbs G R, Miniati C F, Bolstad P V, Nelson S A C, Sun G. Forested lands dominate drinking water supply in the conterminous United States. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(8): 084008.
- [74] Wang S, Fu B J, He C S, Sun G, Gao G Y. A comparative analysis of forest cover and catchment water yield relationships in Northern China. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(7): 1189-1198.
- [75] 刘昌明, 钟骏襄. 黄土高原森林对年径流影响的初步分析. *地理学报*, 1978, 33(2): 112-127.
- [76] Eisenbies M H, Aust W M, Burger J A, Adams M B. Forest operations, extreme flooding events, and considerations for hydrologic modeling in the Appalachians—a review. *Forest Ecology and Management*, 2007, 242(2/3): 77-98.
- [77] Bathurst J C, Fahey B, Iroumé A, Jones J. Forests and floods: using field evidence to reconcile analysis methods. *Hydrological Processes*, 2020, 34(15): 3295-3310.
- [78] Bruijnzeel L A. Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, 104(1): 185-228.
- [79] Wang J, Endreny T A, Nowak D J. Mechanistic simulation of tree effects in an urban water balance Model1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 44(1): 75-85.
- [80] Zhou G Y, Wei X H, Chen X Z, Zhou P, Liu X D, Xiao Y, Sun G, Scott D F, Zhou S, Han L S, Su Y X. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield. *Nature Communications*, 2015, 6: 5918.
- [81] Caldwell P V, Miniati C F, Elliott K J, Swank W T, Brantley S T, Laseter S H. Declining water yield from forested mountain watersheds in response to climate change and forest mesophication. *Global Change Biology*, 2016, 22(9): 2997-3012.
- [82] Aguilos M, Sun G, Noormets A, Domec J C, McNulty S, Gavazzi M, Minick K, Mitra B, Prajapati P, Yang Y, King J. Effects of land-use change and drought on decadal evapotranspiration and water balance of natural and managed forested wetlands along the southeastern US lower coastal plain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 303: 108381.
- [83] Tian A, Wang Y H, Webb A A, Liu Z B, Ma J, Yu P T, Wang X. Water yield variation with elevation, tree age and density of larch plantation in the Liupan Mountains of the Loess Plateau and its forest management implications. *Science of the Total Environment*, 2021, 752: 141752.
- [84] Hua F Y, Bruijnzeel L A, Meli P, Martin P A, Zhang J, Nakagawa S, Miao X R, Wang W Y, McEvoy C, Peña-Arancibia J L, Brancalion P H S, Smith P, Edwards D P, Balmford A. The biodiversity and ecosystem service contributions and trade-offs of forest restoration approaches. *Science*, 2022, 376(6595): 839-844.
- [85] Schwärzel K, Zhang L L, Montanarella L, Wang Y H, Sun G. How afforestation affects the water cycle in drylands: a process-based comparative analysis. *Global Change Biology*, 2020, 26(2): 944-959.
- [86] Zhang J, Bruijnzeel L A, Quiñones C M, Tripoli R, Asio V B, van Meerveld H J. Soil physical characteristics of a degraded tropical grassland and a 'reforest': implications for runoff generation. *Geoderma*, 2019, 333: 163-177.
- [87] Sun G, Riekerk H, Kornhak L V. Ground-water-table rise after forest harvesting on cypress-pine flatwoods in *Florida*. *Wetlands*, 2000, 20(1): 101-112.
- [88] Hewlett J D, Helvey J D. Effects of forest clear-felling on the storm hydrograph. *Water Resources Research*, 1970, 6(3): 768-782.
- [89] Boggs J L, Sun G. Urbanization alters watershed hydrology in the piedmont of north Carolina. *Ecology*, 2011, 4(2): 256-264.
- [90] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算. *大气科学*, 1981, 5(1): 23-31.
- [91] Jobbágy E G, Jackson R B. Groundwater use and salinization with grassland afforestation. *Global Change Biology*, 2004, 10(8): 1299-1312.
- [92] 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): 1-10.
- [93] Peña-Arancibia J L, Bruijnzeel L A, Mulligan M, van Dijk A I J M. Forests as 'sponges' and 'pumps': assessing the impact of deforestation on dry-season flows across the tropics. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 946-963.
- [94] Hewlett J D. Principles of Forest Hydrology. Athens, Ga.: University of Georgia Press, 1982
- [95] Wei X H, Liu W F, Zhou P C. Quantifying the relative contributions of forest change and climatic variability to hydrology in large watersheds: a

- critical review of research methods. *Water*, 2013, 5(2): 728-746.
- [96] Sun G, Alstad K, Chen J Q, Chen S P, Ford C R, Lin G H, Liu C F, Lu N, McNulty S G, Miao H X, Noormets A, Vose J M, Wilske B, Zeppel M, Zhang Y, Zhang Z Q. A general predictive model for estimating monthly ecosystem evapotranspiration. *Ecohydrology*, 2011, 4(2): 245-255.
- [97] Sun G, Caldwell P, Noormets A, McNulty S G, Cohen E, Moore Myers J, Domec J C, Treasure E, Mu Q Z, Xiao J F, John R, Chen J Q. Upscaling key ecosystem functions across the conterminous United States by a water-centric ecosystem model. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: G00J05.
- [98] Zhang L, Hickel K, Dawes W R, Chiew F H S, Western A W, Briggs P R. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. *Water Resources Research*, 2004, 40(2): 1-14.
- [99] Wang C, Wang S, Fu B J, Zhang L. Advances in hydrological modelling with the Budyko framework. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2016, 40(3): 409-430.
- [100] Gan G J, Liu Y B, Sun G. Understanding interactions among climate, water, and vegetation with the Budyko framework. *Earth-Science Reviews*, 2021, 212: 103451.
- [101] Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, O'Connell P E, Rasmussen J. An introduction to the European Hydrological System—Système Hydrologique Européen, “SHE”, 1: structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 1986, 87(1/2): 45-59.
- [102] Abbott M B, Bathurst J C, Cunge J A, O'Connell P E, Rasmussen J. An introduction to the European Hydrological System—Système Hydrologique Européen, “SHE”, 2: structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 1986, 87(1/2): 61-77.
- [103] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, Williams J R. Large area hydrologic modeling and assessment part i: model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 73-89.
- [104] Tague C L, Band L E. RHESys: regional hydro-ecologic simulation system—an object-oriented approach to spatially distributed modeling of carbon, water, and nutrient cycling. *Earth Interactions*, 2004, 8(19): 1-42.
- [105] Zhang L, Potter N, Hickel K, Zhang Y Q, Shao Q X. Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework - Model development and testing. *Journal of Hydrology*, 2008, 360(1/2/3/4): 117-131.
- [106] Sun G, Wei X, Hao L, Sanchis M G, Hou Y, Yousefpour R, Tang R, Zhang Z. Forest hydrology modeling tools for watershed management: A review. *Forest Ecology and Management*, 2022.
- [107] Budyko M I. The heat balance of the earth's surface, US Dept. of Commerce. Weather Bureau, Washington, DC, USA. 1958.
- [108] Crawford N, Linsley R. Digital simulation in hydrology' stanford watershed model 4., 1966
- [109] Wischmeier W H, Smith D. A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning. *Transactions 7th int Congr Soil Sci*, 1960
- [110] Bicknell B, Imhoff J, Kittle J, Jobes T, Donigan A. Hydrological Simulation Program-FORTRAN: HSPF Version 12.2 User's Manual, Athens, GA. 2005.
- [111] Beven K J, Kirkby M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Bulletin*, 1979, 24(1): 43-69.
- [112] Skaggs R W. A water management model for shallow water table soils: Water Resources Research Institute of the University of North Carolina, 1978.
- [113] Bernier P Y. Variable source areas and storm-flow generation: an update of the concept and a simulation effort. *Journal of Hydrology*, 1985, 79(3/4): 195-213.
- [114] Goldstein R A, Mankin J, Luxmoore R. Documentation of Prosper. A model of atmosphere-soil-plant water flow: Oak Ridge National Lab. (ORNL), Oak Ridge, TN (United States), 1974.
- [115] Zhao R J. The xinjiang model. In *Proceedings of the Oxford Symposium*, 1980.
- [116] Tedela N H, McCutcheon S C, Rasmussen T C, Hawkins R H, Swank W T, Campbell J L, Adams M B, Jackson C R, Tollner E W. Runoff curve numbers for 10 small forested watersheds in the mountains of the eastern United States. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012, 17(11): 1188-1198.
- [117] Federer C A. BROOK 90: A simulation model for evaporation, soil water, and streamflow. 2002.
- [118] Douglass J E. The potential for water yield augmentation from forest management in the eastern United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 1983, 19(3): 351-358.
- [119] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. ANSWERS: a model for watershed planning. *Transactions of the ASAE*, 1980, 23(4): 938-944.
- [120] EPA, Storm Water Management Model (SWMM). <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>
- [121] Regan R S, Markstrom S L, Hay L E, Viger R J, Norton P A, Driscoll J M, LaFontaine J H. Description of the national hydrologic model for use with the precipitation-runoff modeling system (prms): US Geological Survey, 2018.
- [122] Garcia-Prats A, del Campo A D, Pulido-Velazquez M. A hydroeconomic modeling framework for optimal integrated management of forest and water. *Water Resources Research*, 2016, 52(10): 8277-8294.
- [123] Elliot W J. Erosion processes and prediction with WEPP technology in forests in the northwestern U.S. *Transactions of the ASABE*, 2013, 56(2): 563-579.
- [124] McDonald M G, Harbaugh A W. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. US Geological Survey, 1988.

- [125] Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, Dalcher A. A simple biosphere model (SIB) for use within general circulation models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1986, 43(6): 505-531.
- [126] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, Moore B, Vorosmarty C J, Schloss A L. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, 363(6426): 234-240.
- [127] Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F, Burges S J. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(D7): 14415.
- [128] Zhang L, Dawes W. An integrated energy and water balance model. CSIRO Land and Water Technical Report. 1998.
- [129] Aber J D, Federer C A. A generalized, lumped-parameter model of photosynthesis, evapotranspiration and net primary production in temperate and boreal forest ecosystems. *Oecologia*, 1992, 92(4): 463-474.
- [130] Wigmosta M S, Vail L W, Lettenmaier D P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resources Research*, 1994, 30(6): 1665-1679.
- [131] Landsberg J J, Waring R H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 1997, 95(3): 209-228.
- [132] Running S W, Hunt E R Jr. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models. *Scaling Physiological Processes*. Amsterdam: Elsevier, 1993: 141-158.
- [133] Smith R A, Schwarz G E, Alexander R B. Regional interpretation of water-quality monitoring data. *Water Resources Research*, 1997, 33(12): 2781-2798.
- [134] Sun G, Riekerk H, Comerford N B. Modeling the forest hydrology of wetland-upland ecosystems in Florida. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(4): 827-841.
- [135] Sun G, Riekerk H, Comerford N B. Modeling the hydrologic impacts of forest harvesting on Florida flatwoods. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(4): 843-854.
- [136] Burnash R. The NWS River Forecast System-catchment modeling. *Computer Models of Watershed Hydrology*, 1995: 311-366.
- [137] Tian H Q, Liu M L, Zhang C, Ren W, Chen G S, Xu X F. DLEM-The Dynamic Land Ecosystem Model. User Manual. the ESRA (Ecosystem Science and Regional Analysis) Laboratory, Auburn University. 2005.
- [138] Sharp R, Douglass J, Wolny S, Arkema K, Bernhardt J, Bierbower W, Chaumont N, Denu D, Fisher D, Glowinski K. InVEST 3.8. 5. post0+ ug. gdd887c5. d20201118 User's Guide. The Natural Capital Project Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, 2020.
- [139] Calder I R. Assessing the water use of short vegetation and forests: Development of the Hydrological Land Use Change (HYLUC) model. *Water Resources Research*, 2003, 39(11).
- [140] Kim J B, Kerns B K, Drapek R J, Pitts G S, Halofsky J E. Simulating vegetation response to climate change in the Blue Mountains with MC2 dynamic global vegetation model. *Climate Services*, 2018, 10: 20-32.
- [141] Li C S, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1992, 97(D9): 9759-9776.
- [142] Li C S, Trettin C, Sun G, McNulty S, Butterbach - Bahl K. Modeling carbon and nitrogen biogeochemistry in forest ecosystems. 2005
- [143] Zhang Y L, Song C H, Sun G, Band L E, McNulty S, Noormets A, Zhang Q F, Zhang Z Q. Development of a coupled carbon and water model for estimating global gross primary productivity and evapotranspiration based on eddy flux and remote sensing data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 223: 116-131.
- [144] Komatsu H. Modeling evapotranspiration changes with managing Japanese cedar and cypress plantations. *Forest Ecology and Management*, 2020, 475: 118395.
- [145] Francés F, Vélez J I. TETIS: a catchment hydrological distributed conceptual model. 2005
- [146] Speich M J R, Zappa M, Scherstjanoi M, Lischke H. FORests and HYdrology under Climate Change in Switzerland v1.0: a spatially distributed model combining hydrology and forest dynamics. *Geoscientific Model Development*, 2020, 13(2): 537-564.
- [147] Mulligan M. WaterWorld: a self-parameterising, physically based model for application in data-poor but problem-rich environments globally. *Hydrology Research*, 2013, 44(5): 748-769.
- [148] Tian S Y, Youssef M A, Skaggs R W, Amatya D M, Chescheir G M. DRAINMOD-FOREST: integrated modeling of hydrology, soil carbon and nitrogen dynamics, and plant growth for drained forests. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(3): 764-782.
- [149] Gochis D J, Yu W, Yates D N. The WRF-Hydro model technical description and user's guide, version 3.0. NCAR Tech Doc, 2013, 120.
- [150] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算. *大气科学*, 1981, 5(1): 23-31.
- [151] Xu X L, Liu W, Scanlon B R, Zhang L, Pan M. Local and global factors controlling water - energy balances within the Budyko framework. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(23): 6123-6129.