森林水文学:全球变化背景下的 森林与水的关系

刘世荣¹ 常建国^{1,2} 孙鹏森¹

(¹ 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091)

(² 中国林业科学研究院华北林业研究所, 太原 030012)

FOREST HYDROLOGY: FOREST AND WATER IN A CONTEXT OF GLOBAL CHANGE

LIU Shi-Rong¹, CHANG Jian-Guo^{1,2}, and SUN Peng-Sen¹

¹The Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, and ²Research Institute of Forestry in North China, Chinese Academy of Forestry, Taiyuan 030012

森林水循环是陆地水循环中的重要组成部分,不但影响森林植被的结构、功能与分布格局,还影响地球表面系统的能量收支、转换和分配,在陆地生态系统的碳氮平衡过程中发挥着重要作用。森林生态系统的水文功能不仅是其服务功能的重要组成部分,而且对系统生产力、养分循环等其它功能产生影响。森林与水分循环间的关系早在 20 世纪初就受到关注,并开始了森林集水区的观测研究 (Andréassian, 2004)。20 世纪 60 年代 Borman 和 Likens 创立的 Harbord Brook 生态站,率先应用小集水区实验技术法,将森林水文学研究与森林生态系统定位研究相结合,从生态系统结构与功能角度,阐述森林水分运动规律和机制以及森林演替过程和森林环境变化对水分循环的影响,推动了森林水文学从水文要素的单项研究向系统综合的定位研究发展 (Likens *et al.*, 1977; 刘世荣等, 1996)。20 世纪 90 年代以后,森林水文学研究更加强调水文过程与生态学过程的耦合机制及其尺度效应,更加关注水分循环质量及水循环的生态学机制研究 (Gieritz & Diekkriiger, 2003; Brown *et al.*, 2005)。21 世纪初期,生态水文学作为一门边缘学科逐渐兴起,它注重研究生态学和水文学的交叉领域,是描述生态格局和生态过程水文学机制的科学 (赵文智和王根绪, 2002)。生态水文学发展推动了传统森林水文学从森林水文机制和水文特征研究向森林生态水文学的新兴交叉学科发展。尽管,森林生态水文学取得了

可喜进展,但仍然面临着诸多具有挑战性的科学问题、理论与方法亟待解决。

首先,森林植被是陆地水文循环的各个重要过程的参与者,其自身的生态学过程和水文过程交织在一起。森林主要是通过对降水截留、枯枝落叶层截持、土壤入渗、蒸散及径流等的影响来调整系统内的水分循环,森林的不同结构、生长发育和演替阶段导致上述水文功能呈现多样性特征 (Liu *et al.*, 2003)。迄今为止,由于研究方法的局限性及森林生态系统本身的复杂性,我们对森林生态系统内与系统间水分循环的时空变异规律、机理及驱动变量还不甚清楚,难以对森林生态系统水文过程的非线性变化做出明确的解释,更无法对其水文功能做出准确量的评价 (Brown *et al.*, 2005)。因此,加强对不同区域典型森林生态系统水文过程与生态学过程及相关因子的长期观测与研究,积累长期连续的森林植被与水分循环研究的数据显得十分必要。

第二、生态水文过程具有高度的尺度依赖性,生态学与水文学上可靠的控制试验往往只能在较小的尺度进行,在评价区域乃至更大尺度上的生态水文学问题时,尺度问题不可回避,这已成为当今水文学研究中的一个焦点与难点 (Cammara, 2004)。目前,因缺少令人信服的尺度转换的理论与方法,坡面与小流域尺度上的结论难以推绎到大流域,这对森林生态水文学的发展具有很大的制约 (Shaman *et al.*, 2004)。为此,国际水文界在委内瑞拉加拉加斯

(1982)、美国普林斯顿(1984)和澳大利亚罗伯森(1993)已经举办过3次水文学尺度问题的专题会议,就尺度转换的理论与方法展开了深入的研讨。目前生态水文学研究中出现了一些跨尺度研究的新的尝试,逐步摒弃了从小尺度的研究结果逐步推绎到大尺度的传统思维方法,例如借助遥感与地理信息系统技术,有效地解决了较大时空尺度上相关信息的收集与处理问题,直接从大尺度进行生态水文过程模拟或预测,从而使大尺度生态水文过程定量化研究逐渐发展起来(Chen *et al.*, 2002; 孙鹏森和刘世荣, 2003; Liu *et al.*, 2003; Andersen *et al.*, 2005)。分布式水文模拟方法、分形分析方法与统计自相似性分析方法等从不同角度考虑森林生态系统水分循环的时空变异特征,将小尺度(如土壤空隙)与大尺度(如流域)上的信息联系起来(Blöschl, 2001; Chirico *et al.*, 2003)。这些新的尝试尽管还不成熟,实际应用还存在一定的缺陷与局限性,但我们相信,新的科学技术将逐步拓宽人类获取信息的能力,尺度问题将会迎刃而解。

第三、水分在 SPAC 及林木体内的储存、运移与交换是森林与水分关系的重要内容,也是揭示森林水分循环机理的关键问题(Xu & Singh, 2005)。林木内水分的传输过程从根本上来讲取决于不同界面(例如根土界面)的力能关系,其中,林木根系的吸水及水分在林木体内的运移过程的调控机理尚不完全明确(Jackson *et al.*, 2000; Zwieniecki *et al.*, 2001)。水分在植物体中运移规律与机理可由 C-T 学说加以解释,但该理论一出现就受到了很大的质疑,出现了诸多争论(Zimmermann *et al.*, 2004)。这方面研究争论的焦点还包括:1)水分在植物体中的传输是否有活细胞参与?2)植物如何持续地保持很大的张力?3)导管中的栓塞是怎样修复的?4)张力是如何调节水分传输过程的?近年来随着根压力探针和细胞压力探针的出现及在研究中的应用,为揭示林木的吸水与水分在林木内的运移过程与机理提供了很大便利。但是,林木吸水与水分在林木体内的运移受到许多环境因子的影响,如气象因子(包括太阳辐射、大气温度、大气湿度、风速等)、土壤的水分状况、气孔导度、植物叶面积等,但这些环境因子对树干水分传输的影响方式和作用机理仍是今后研究中的重点。

林木耗水特性与耗水量是决定森林生态系统水分输出的主要因素。目前,林木耗水量的测定与计算方法较多,大致可以分为水文学法、微气象学法、

植物生理学法、红外遥感法和 SPAC 水分传输模拟法(Mo *et al.*, 2004)。其中,通过树干茎流的测定来估算林木耗水量是目前国内外经常采用的成熟方法。但树干茎流的测定与研究中还存在一些问题亟待解决,如边材面积与茎流量间的关系、不同物种间树干茎流的变异、树干茎流的昼夜变化等(Chuang *et al.*, 2006)。此外,从单株耗水量到林分的耗水量,再到生态系统的耗水量乃至更大尺度上林木耗水量的推算同样存在尺度转换不确定性问题,对此还需进一步探索。

第四、生态水文过程模拟。分布式水文模型成为当前生态水文过程建模的重要方法,不仅能够充分反映水文要素在空间上的异质性,而且栅格数据便于和遥感数据源更好地实现空间匹配,及时反应下垫面条件的时间变化,体现栅格单元间的相互关系,从而赋予模型更多的功能,这些是基于经验或黑箱方法的水文模型难以实现的(孙鹏森和刘世荣, 2003; Smith *et al.*, 2004)。分布式水文模型的模拟范围涵盖了地表水与地下水计算、水资源数量与质量的综合评价、非点源污染、土壤侵蚀与水土流失、洪水预报、土地覆盖与土地利用变化对水文过程的影响、生态需水、水生物与生态系统修复,并且可通过尺度转换与大气环流模式耦合来预测全球变化对水文水资源的影响,从而纳入全球变化生态水文学研究的范畴。如何将水文的分布式模型与植被的生长发育模型及其它模型耦合在一起,研究在全球变化背景下森林水分循环及其生态系统服务功能的变化是未来森林生态水文模型研究中的重点。

为了更好地理解森林与水的关系以及森林生态水文循环的规律与机理,本期发表了有关森林与水分研究的专辑,对森林生态水文学研究中的一些热点与关键问题进行了研究,对推进森林生态水文学的发展具有一定意义。张喜、薛建辉和生原喜久雄等(《植物生态学报》31, 757~768)对黔中山地喀斯特森林的林隙降雨、林内降雨、灌草层降水、树干茎流、地表径流和 90 cm 土层壤中流的特征及相关养分动态进行了长期观测与定量研究,丰富了森林生态系统水文功能研究的基础数据,揭示了喀斯特森林水文功能时空变异规律。刘峻杉、高琼和朱玉洁等(《植物生态学报》31, 794~803)对根土界面水分再分配的最新研究成果进行了综述,提出实验研究中需要关注的科学问题。万贤崇和孟平(《植物生态学报》31, 804~813)对植物体内水分长距离运输的 C-T 理论与存在的问题进行了全面综述。王华、赵

平和蔡锡安等(《植物生态学报》,31,777~786)对马占相思夜间树干液流的分配及其对整树蒸腾估算的影响的研究表明,夜间液流主要用于补充贮水部位的水分亏缺,树形特征的差异是解释夜间水分补充量变化的重要因子;夜间补充的水分对于整树蒸腾量的贡献因季节和树木径级的不同而有明显的变化,但其对整树总蒸腾量计算造成的误差可以忽略。上述3项研究是针对水分在SPAC系统及林木体内的储存、运移与交换展开的,并得出了有益的结论,有助于深入了解森林水分循环规律与机理。单立山、张希明和花永辉等(《植物生态学报》,31,769~776)对塔克拉玛干沙漠腹地一年生梭梭根系分布特征对水分管理的响应进行的研究,揭示了水分变化对植物特征的影响,这是干旱区森林植被与水分相互作用研究中的重点。杨佩国、李保国和吕贻忠等(《植物生态学报》,31,787~793)应用气象数据、土壤物理属性实测数据,把土壤水分分布式动态模型、植被表面净辐射模型和植被生产力综合模型耦合起来,实现了鄂尔多斯高原东部砂质荒漠化地区考赖沟流域尺度上30 m×30 m空间分辨率的植被生产力精确模拟,该研究方法可以为流域尺度上基于水分的植被生产力的精确模拟提供借鉴和参考。这项研究是水文分布式模型耦合其它模型的研究范例,为开展全球变化背景下水文变化及其引起的森林生态系统服务功能变化研究提供了有益的探索。

尽管这些文章无法反映与解释森林生态系统生态水文研究中的所有热点与关键科学问题,但从不同尺度上深入探索了森林生态系统的水分循环规律、机理及模型耦合途径。未来森林生态系统水文学的研究仍需以上述科学问题为核心,进一步将先进的理论、方法与科学技术融入相关研究,争取在热点与难点问题的研究中取得重大突破。

参 考 文 献

- Andersen J, Dybkjaer G, Jensen KH (2005). Use of remotely sensed precipitation and leaf area index in a distributed hydrological model. *Journal of Hydrology*, 305(4), 15–39.
- Andréassian V (2004). Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 291, 1–27.
- Blöschl G (2001). Scaling in hydrology. *Hydrological Processes*, 15, 709–711.
- Brown AE, Zhang L, McMahon TA (2005). A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 310, 28–61.
- Cammeraa LH (2004). Scale dependent thresholds in hydrological and erosion response of a semi-arid catchment in southeast Spain. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 104, 317–332.
- Chen JM, Chen XY, Ju WM (2002). Distributed hydrological model for mapping evapotranspiration using remote sensing inputs. *Journal of Hydrology*, 264, 34–50.
- Chirico GB, Grayson GB, Western AW (2003). A downward approach to identifying the structure and parameters of a process-based model for a small experimental catchment. *Hydrology Process*, 17, 2239–2258.
- Chuang YL, Oren R, Bertozzi AL (2006). The porous media model for the hydraulic system of a conifer tree: linking sap flux data to transpiration rate. *Ecological Modelling*, 191 (3224) 4, 4722–4725.
- Giertz S, Diekkrüger B (2003). Analysis of the hydrological processes in a small headwater catchment in Benin (West Africa). *Physics and Chemistry of the Earth*, 28, 1333–1341.
- Jackson RB, Sperry JS, Dawson TE (2000). Root water up take and transport: using physiological processes in global predictions. *Trends in Plant Science*, (5), 482–488.
- Likens GE, Bormann FH, Pierce RS, Eaton JS, Johnson NM (1977). *Biogeochemistry of a Forested Ecosystem*. Springer-Verlag, New York, 146.
- Liu SR (刘世荣), Wen YG (温远光), Wang B (王兵), Zhou GY (周光益) (1996). *Hydro-ecological Functions of Chinese Forests Ecosystems* (中国森林生态系统水文生态功能规律). Chinese Forestry Publishing House, Beijing, China. (in Chinese)
- Liu SR, Sun PS, Wen YG (2003). Comparative analysis of hydrological functions of major forest ecosystems in China. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 27, 16–22.
- Mo XG, Liu SX, Lin ZH (2004). Simulating temporal and spatial variation of evapotranspiration over the Lushi basin. *Journal of Hydrology*, 285, 125–142.
- Shaman J, Stieglitz M, Burns D (2004). Are big basins just the sum of small catchments? *Hydrological Processes*, 18, 3195–3206.
- Smith M B, Georgakakos KP, Liang X (2004). Preface, the distributed model intercomparison project (DMIP). *Journal of Hydrology*, 298, 1–3.
- Sun PS (孙鹏森), Liu SR (刘世荣) (2003). Large scale eco-hydrological model and its integration with GIS. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 23, 2115–2124. (in Chinese with English abstract)
- Xu CY, Singh VP (2005). Evaluation of three complementary rela-

tionship evapotranspiration models by water balance approach to estimate actual regional evapotranspiration in different climatic regions. *Journal of Hydrology*, 308,105 – 121.

Zhao WZ (赵文智), Wang GX (王根绪) (2002). *Ecohydrology* (生态水文学). China Ocean Press, Beijing. (in Chinese)

Zimmermann U, Schneider H, Lars HW (2004). Water ascent in tall trees: does evolution of land plants rely on a highly metastable state? *New Phytologist*, 10 (1111),1469 – 8137.

Zwieniecki MA, Melcher PJ, Holbrook NM (2001). Hydrogen control of xylem hydraulic resistance in plants. *Science*, 291, 1059 – 1062.

责任编辑：姜联合

《遗传学报》和《遗传》杂志

《遗传学报》、《遗传》杂志是中国遗传学会和中国科学院遗传与发育生物研究所主办、科学出版社出版的核心期刊,已被美国化学文摘(CA)、生物学数据库(BIOSIS)、生物学文摘(BA)、医学索引(Medical Index)、俄罗斯文摘杂志(AJ)以及 NCBI、CABI 等 20 多种国内外重要检索系统与数据库收录。刊登内容包括遗传学、发育生物学、基因组学、细胞生物学以及分子进化。读者对象为基础医学、农林牧渔、生命科学领域的科研与教学人员、研究生、大学生、中学生物学教师等。

2005 年《遗传学报》获得第三届全国期刊奖提名奖,2006 ~ 2007 年,连续获得中国科协精品科技期刊工程项目(B 类)资助。自 2007 年起,《遗传学报》的外文刊名变更为 *Journal of Genetics and Genomics*。

《遗传学报》(ISSN 1673-8527 ,CN11-5450/R)为月刊,全年 12 期,国内邮发代号 2-819,国外发行代号:M63。2008 年定价 50 元,全年 600 元。期刊中文网址:遗传学报.cn

《遗传》(ISSN 0253-9772 ,CN11-1913/R)为月刊,全年 12 期。国内邮发代号 2-810,国外发行代号:M62。2008 年定价 40 元,全年 480 元。期刊中文网址:遗传.cn

欢迎订阅,欢迎网上注册投稿,欢迎发布广告

联系地址:北京市安定门外大屯路:中国科学院遗传与发育生物研究所编辑室
主 编:薛勇彪;编辑室主任:李绍武 E-mail :ycxb@genetics.ac.cn ; yczz@genetics.ac.cn
邮政编码:100101 ;电话/传真:010-64889354 , 64807669
http :// www.Chinagene.cn ; http ://jgenetgenomics.org ;中国遗传网.cn