

森林水文学研究进展(综述)

闫俊华

(中国科学院华南植物研究所, 广州 510650)

摘要 近年来, 人们饱受了森林破坏所致的洪涝和旱魃灾难, 森林水文功能因而日益受到关注。同时, 也给森林水文的研究提出了挑战, 森林水文学研究的简史、涉及领域及展望将在本文中阐述。

关键词 森林水文学; 展望

中图分类号 Q948.1

PROGRESS IN THE STUDY OF FOREST HYDROLOGY

Yan Junhua

(*South China Institute of Botany, Academia Sinica, Guangzhou 510650*)

Abstract In recent years, people have experienced great disasters which result from disruption of forests. Close attention is paid increasingly to hydrological function of the forests. In this paper, a brief history of researches in this field and the prospects concerned are reviewed. There are two periods in the researches: forest influence and forest-ecosystem hydrology. The effects of forests on rainfall, regulation of hydrological process, hydrology of soil water and underground water, and ecological benefits of forest hydrology are presented. The author suggests that three aspects need to be emphasized, viz., the coupling research on forest pattern, and hydrological scale and process; research on regional characteristics; and the structure of water inflow and outlet in forest ecosystem.

Key words Forest hydrology; Review

1 简史

森林水文学是水文学的分支学科, 是研究森林和水关系的科学。作为一门独立的学科约始于上世纪末本世纪初, 最初在北美和欧洲, 新中国成立后也开始森林水文学的研究。美国学者 Kittredge^[1]于 1948 年首次提出森林水文学这个学科术语, 但当时并没有给予确切的学科定义, 他把研究森林对水影响的重要方面, 如降水、土壤水、河流和洪水, 单独地称为森林水文学。这一学科术语提出后, 世界上许多国家的学者对其概念和内涵进行深入探讨。马雪华^[2]在《森林水文学》一书中给其定义为: 森林水文学是研究森林植被对水分循环和环境的影响。陈信雄^[3]认为森林水文学研究的主要目的在于阐述森林在水分循环过程中扮演的角色。总之, 随着相关学科

中国科学院生物技术特别支持, 国家基金(39700112、39630240), 广东省基金(960468)资助项目, 中国科学院“九·五”特别支持项目(KZ95T-40-02-03)的资助。

1999-01-21 收稿; 1999-07-08 修回

的发展和生态环境问题的出现,森林水文学的概念框架不断完善,研究的内容也日益广泛和深入。

纵观森林水文学的研究历程可分为两个阶段,即经典森林水文学和现代森林水文学^[2]。

经典森林水文学的研究主要涉及的是森林影响学。1864年德国的Ebmayer在巴伐利亚建立了第一个森林气象站,对林地的降水量、土壤蒸发和枯枝落叶层对地面蒸发的影响进行了测定。1879年奥地利开展了森林截留降水和蒸腾的观测研究。此后,在工业发达、人口稠密的国家,随着需水量的增加,对森林调节水分、涵养水源的作用开始引起重视,陆续开始了森林覆盖对河流流量影响的研究。1924年至1926年间罗德民和李德毅先生在我国的山东、山西、河南、安徽等地的寺庙林地,观测研究不同森林植被对雨季径流和水土保持效应的影响。1948年,Kittredge^[1]在《森林的影响》一书中对经典森林水文学研究作了较为全面的论述。

随着英国植物生态学家Tansley^[4]提出生态系统的概念,Lindeman^[5],Odum^[6],Ricklefs^[7]等对此概念的完善,加之Kalinin^[8],Budyko^[9],Baumgartner,Reichel^[10]对水分循环与水量平衡研究的深入,森林水文学的研究便以小流域、集水区、生态系统作为研究对象,其研究理论基础、研究方法、技术路线、仪器设备进入了新的台阶,即产生了现代森林水文学。它是运用生态系统理论和物质平衡原理,从系统结构和功能方面来研究发生在森林生态系统的水文学规律及其内在联系。因此,现代森林水文学又可称为森林生态系统水文学。

五六十年代,生态学研究的核心是生态系统的结构与功能或称格局和进程的研究^[11]。将生态系统的边界定义在地形上的小集水区界线以内,开创了生态学长期定量化研究的领域,使生态系统理论有机会和定量性较强的水文学结合起来。这个结合一方面使得森林生态学理论在森林水文学中得以广泛的应用,同时也促进森林水文学出现了很多新的研究领域。国际森林水文学研讨会首次会议于1965年9月10日在美国宾夕法尼亚州大学召开,由来自22个国家的87名科学家参加,并出版了论文集。国外的一些科研工作者在全国不同气候森林带广泛开展对比性流域实验,对有林地和无林地集水区河流流量进行测定、比较,同时对森林中的降水分配、径流、截流、穿透水等水文现象进行深入细致的观测研究并组建模型。Engler的对比试验研究表明,森林流域的洪水流量和产水量低于牧草流域,而基流却高于后者^[12]。美国在科罗拉多州魏根惠尔山峡开展的对比流域试验表明森林采伐后明显增加径流量^[12]。Leyton等^[13]、Rutter等^[14]研究了林冠截流的特性,发现其与林外降雨之间呈线性相关关系。Gash^[15]推导出截流的计算式。Massman^[16]运用土壤-植被-水分模型对小集水区进行研究,获得较为满意的结论。我国也在全国各主要林区先后设置了森林水文观测站,一些科研单位、高等林业院校及有关业务部门进行森林水文的定量研究。1987年8月,中国林学会在联合国教科文组织的资助下,在东北林业大学召开了第一届全国森林水文学研究方法学术讨论会,并将会议的论文汇成论文集。次年12月,在中国林学会的领导下,正式成立了森林水文及流域治理专业委员会。近几年,我国各区域森林生态系统水量平衡^[17-21]及森林水文各要素功能规律^[22-29]的研究取得了一定的成果,森林水文学模型^[30-32]、理论^[33-36]和模拟^[37-39]研究也有所进展。

2 涉及领域

2.1 森林对降雨量的影响

虽然林地的降水几乎全部是由那些与森林植被存在无关的自然因子引起的,但是降水的局部

差异再加上森林植被的影响,使小流域水量平衡中要得到正确的水量估计变得复杂起来,导致了森林对降水影响问题长久以来的争论^[1]。其争论的原因可归结为两个方面,其一是森林对大气温度、湿度、风向和风速的影响,是否有促进水蒸气凝结作用,也就是森林是否有增雨作用;其二是由森林截留而蒸发以及森林抑制地面温度而削弱对流,是否有减雨作用。

增雨作用的理论依据:(1)森林植被通过其树高和林冠以改变下垫面的粗糙度,一定程度地抬升气流,增加局部的大气湍流,有利于促进降水;(2)森林具有较高的蒸散,林冠上空有较大的气态水,空气的湿度大,为降水提供了必要的条件;(3)雾水平流入林冠时,雾滴通过与树叶枝条相接触而被截获下来,可视为森林对雾滴捕捉作用。研究实例:(1)根据 Blandford 在南印度中央部某地区,以前是不毛的荒野地,从 1875 年开始造林并比较观测了造林前后 7 年的雨量值。在造林后 7 年的全国平均雨量比造林前 7 年的基本上没有增加的情况下,而造林区的平均雨量却增加了 11.3%。说明森林有增雨之效果。(2) Hursh (1948) 在研究森林覆盖对局部气候的影响时收集了有关森林与降水关系的资料,他在田纳西州选择了一片适宜的地区,其上 2800 hm² 森林被附近的冶炼厂完全损坏,在这片损坏的森林地附近的其它森林区之间还有一片面积为 4800 hm² 的草地,他在每个带内安放两个降水观测站,同时测定风速,4 年的观测值可以看出森林中的降水量超过裸地 14.3%,超过草地 9%。(3)在山地或海岸,森林能捕捉雾滴的作用,是确实的现象,此亦有各国观测的实例加以证明。在美国加州威尔逊山,10 月到 5 月间,树高 12-24 m 的云杉、松树等对雾滴的捕捉作用使林内雨量为林外雨量的 2-2.7 倍;在日本的大台原枫树林,4-10 月间林内外雨量,有雾时比无雾时降水量增加约 27%。

减雨作用的理论依据:(1)我国气象专家赵九章认为森林能抑制林区日间地面温度的升高,削弱对流,从而可能使其上空的大气降水量减少。(2)周国逸^[9]在南亚热带和热带北缘的研究认为在热带与亚热带地区,由于对流雨是其降水的主要来源,在无林地地表及其上空,小气候的变化远较森林地的变化大,热对流作用剧烈,夏季的中午就常常会发生无林地的降水较森林地大的情况。(3)森林截留降水,主要供雨后蒸发,是降水量的损失过程,应从降水总量中扣除,从而减少降水。研究实例:中国科学院华南植物研究所热带北缘广东省电白小良水土保持站内进行了植被大面积恢复工作。3 个集水区的海拔、坡度、形状指数相似且相互毗邻,其中两个的植被是人工恢复而来,1981-1990 年这 10 年间它们的降水量差异见表 1。由此可以看出,除了植被不同以外,这 3 个集水区找不出可能影响大气降水量的其它因子,在这里森林的作用是减少了大气降水的输入。

表 1 混交林、桉树林和裸地 1981-1990 年的大气降水量(mm) (周国逸, 1995)

Table 1 Annual rainfall for mixed forest, eucalyptus forest and bare land catchments (mm) (Zhou Guoyi, 1995)

年份 Year	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	平均 Mean
混交林 Mixed forest	1674	1529	1355	1993	2322	1235	1199	1201	1184	1289	1498
桉树林 Eucalyptus forest	1531	1358	1355	1677	1998	1157	1138	924	972	1068	1318
裸地 Bare land	1651	1676	1508	1889	2310	1351	1318	1262	1204	1312	1548

有关森林与降水的问题还远远得不出统一的结论,也许森林与降水问题本身就没有唯一的答案^[11]。从普遍意义上来说,森林对降水的影响力很小,受森林的直接影响而使大气降水发生

很大改变的想法是不切实际的。汤普林认为森林不会影响大尺度的气候,只是通过森林的树高和林冠以改变下垫面的粗糙度,一定程度地抬升气注流,增加局部的大气湍流,起到微尺度的气候影响,它最多使降水增加1%—2%。从全球的角度看,降水应等于蒸发,陆地的蒸发量只占总蒸发量的14.3% (71/496),它意味着所有土地都停止蒸发,则全球的总降水量将减少14.3%,而地球上的森林面积只占土地的四分之一,如果将所有森林都砍掉也并不会停止陆面的蒸发,那也只能使蒸发量最多减少三分之一左右,而对降水所产生的影响最大不会超过1%—2%。彭曼收集了亚洲、非洲、欧洲及拉美等地14处森林多年试验的资料,得出森林没有明显增加降水作用的结论。但不能排除在局部地方,森林的存在可以激化或者抑制对降水有益的因子,从而较大影响大气降水量,而起到间接作用,由此可能出现不同的观测结果,但它们并没有什么普遍意义。

2.2 森林对水文过程的调节

森林对水文过程的调节是通过截留、蒸散等途径来实现的。

林冠截留作为对输入森林生态系统水分调节的起点历来是研究的热点,国内外在这方面积累了大量的研究资料。其结果表明:温带针叶林的林冠截留占年降水量的20%—40%^[14,15],亚热带杉木林、马尾松林和季风常绿阔叶林林冠截留分别占年降水量的15%、25%和30%^[40-42],对我国不同气候带及其相应的森林植被类型林冠截留分析表明,截留率变动范围在11.4%—34.3%,变动系数为6.68%—55.05%^[43]。周国逸^[11]对林冠截留的本质与机理研究认为截留实际上是由几个过程组成,即固体对于液体的吸附作用;林木枝叶上形成了一薄薄的液层后,液体对于液体的吸附作用;以及在林冠湿润以后,林冠巨大的蒸发面的蒸发作用而使林冠由湿而复干。在观测统计基础之上,国内研究者建立了大量的截留模型,包括经验模型和半经验半理论模型^[14,15,24,41,44-46]。

林下植被截留因其难于准确测定且截留量少而常在计算截留时被忽略不计。目前,国内外还没有一种理想的直接测定林下植被截留的方法,都是用间接方法估算林下植被截留量。据日本村井用实验室方法测得赤松天然壮龄林、落叶松人工壮龄林的下层草被表面的最大吸附水量推算值为0.04—0.05 mm,杂草冠部覆盖面的吸附水量为0.15—0.56 mm。

林地死被物截留量现场测定是非常困难的,通常的方法是选取样本由室内实验来推定。马雪华^[25]以不破坏林地死被物结构为原则,对林冠下苔藓、枯枝落叶拦截雨水量进行研究,其结果表明:在一般情况下,当降雨量小于5 mm时,苔藓、枯枝落叶层几乎可以全部吸收降下的雨量;当降雨量大于5 mm时,苔藓、枯枝落叶层开始出现渗水,贡献给土壤;当降雨量接近8 mm时,苔藓、枯枝落叶层的蓄水量达到最大饱和值,接着开始下降。邓世宗^[47]在广西里骆生态站测定杉木林下、常绿阔叶林下的枯枝落叶最大吸水量分别是自身重量的3.35和4.58倍。我国的研究结果认为,枯枝落叶吸持水量可达自身干重的2—4倍,各种森林枯枝落叶的最大持水率平均为309.54%^[43]。孙立达等^[48]在黄土高原人工防护林枯枝落叶层吸持水量的研究表明,其持水容量小于191%,而且还建立了计算枯落物层拦蓄水量的经验方程。总结大量的研究可得出林地死被物截留的三条规律:(1)其截留量与枯枝落叶的种类、厚度、干重、湿度及分解程度有密切关系。(2)随着降雨强度的增加,其截留量的百分比相应减少。(3)其截留量是有一定限度的。

蒸散是森林生态系统中水分资源损失的主要部分,在森林调节水文过程和森林生态系统水分

平衡分析中占有十分重要的地位。而决定蒸散速率大小有气象和下垫面性质两个方面,二者非常复杂,使得蒸散不易观测和计算,所以,蒸散一直是森林生态系统研究的一个重要课题。国内外进行了较深入细致的研究,并提出了多种计算蒸散力和实际蒸散的方法。常用的蒸散力计算方法有经验公式法和热量平衡法。经验公式法包括根据空气饱和差、气温和积温、辐射平衡确定蒸散力;热量平衡法是综合考虑了决定蒸散力的最主要的三因素,即辐射平衡、空气湿度、空气温度,是计算蒸散力较合理的方法。高国栋^[49]等根据热量平衡法计算了我国蒸散力,并绘制了全国分布图。计算实际蒸散的方法归纳为直接测定和计算两大类。直接测定方法有水分平衡法、热量平衡法、空气动力学方法;计算方法有 THORNTHWAITE^[50]方法、PENMAN^[51]方法、SHIAU^[52]方法、布德科^[53]方法、刘振兴^[54]公式法、崔启武等^[55]公式法、傅抱璞^[56]公式法、周国逸^[34]公式法。我国不同森林水文观测站实际蒸散研究结果:会同杉木人工林为 865.03 mm,占降雨量 81.3%^[18];里骆杉木林为 849.5 mm,占降雨量 55.2%^[57];西江坪常绿阔叶林为 929.3 mm,占降雨量 47.8%^[57];龙桥马尾松林为 852.2 mm,占降雨量 68.3%^[57];小兴安岭红松林为 559.6 mm,占降雨量 87%^[17];海南岛山地雨林为 1370.6 mm,占降雨量 47.08%^[20];小良桉树林为 614.4 mm,占降雨量 46.6%^[58]。从上述数据可以看出,我国森林生态系统实际蒸散是系统水分输出的较大项,占降雨量的变化范围在 40%—90%。

森林以其高耸繁茂的枝叶组成的林冠层和疏松而深厚的枯枝落叶层截持大气降水,同时,截留的降水大部分又以蒸散的形式返回大气中。从而使进入森林生态系统的降水得到重新分配。通过森林植被的调节,一方面延缓系统的液态水输出,降低洪峰流量,增加枯水流量,减免旱涝灾害;另一方面促进了降水参与系统的水分循环,大大增加了有效降水,提高了水分的利用效率。

2.3 森林土壤与地下水文过程

土壤是森林生态系统水分的主要蓄库,系统中的水文过程大多是通过土壤作为媒介而发生的,土壤水分与地下水相互联系,加大了森林生态系统中土壤水分蓄库的调蓄能力,从而森林土壤与地下水文过程引起国内外研究者的关注。

由于森林植被的影响,林地土壤的孔隙度,特别是非毛管孔隙度较大,从而使森林土壤有较大的入渗率、入渗量和渗蓄能力。在中亚热带杉木人工林和南亚热带地带树种的混交林和桉树林长期测定表明,土壤中的水分蓄库占整个系统的 90% 以上^[11]。林地土壤水分对植物-大气、大气-土壤和土壤-植物 3 界面的物质和能量的交换过程有着重要的控制作用,它影响气孔开合、渗透、蒸发、蒸腾和径流的产生。同时,土壤的水分动态可以揭示森林生态系统的水分过程与格局以及系统水分运动的物理本质^[59]。国内这方面研究的成果很多^[40, 60, 61],并用 Philip 模型、Smith 模型和 Holtan 模型等来模拟林地土壤水分入渗过程^[48, 59, 62]。

森林直接对地下水的影响并不明显,它是通过对土壤结构和土壤水分的作用间接地影响地下水文过程。目前,国内外的研究多集中于森林对地下水位和水质的影响。我国的研究认为山区森林土壤下渗水量对地下水补给有利,由于林地的土壤疏松,孔隙多,渗透性强,降水的 50%—80% 可以渗入地下^[63]。但在小良试验站 3 个生态系统中的地下水位变化研究中发现,随着年代的增加,地下水位都有所下降,而且森林地下降得更加明显,它可能预示着森林对地下水位有着负的作用^[61],国外的研究也有类似的报道^[64-66]。

2.4 森林水文的环境生态效益

森林破坏后所至的水文恶果日益毕露,森林水文的环境生态效益得到共识。1998年的长江连续8次洪峰就是一个明显的例证。在历史上,长江上游森林覆盖率为50%,水的含沙量极小。目前,长江上游的森林覆盖率减至8%,四川盆地近4%,失去植被保护的裸地,每一场暴雨都造成洪水、滑坡和塌方。随水流下的泥沙带来湖底淤积,一些湖泊消失了,历史上著名的云梦湖在荆江分流后消亡了;一些湖泊成为内陆湖,洪湖也离开了长江;一些湖泊缩小了,洞庭湖从原来的4000平方公里缩小到如今的2600平方公里。可见,失去森林水文生态效益后所至的蓄洪量减少是造成1998年长江洪峰、高水位的一个重要原因。

森林对河流洪水、枯水流量和年径流量的影响。大面积采伐森林的结果将导致河流洪峰流量的增加,枯水流量的减少,扩大了最大流量与最小流量的变幅。但是,关于森林对河流年径流量的增减问题,持有不同的争议。前苏联水文气象总站设有17个径流量平衡站,集水区面积从20—50 km²,关于森林对河川径流量的影响问题始终存在着2种截然相反的观点^[12]。刘世荣^[43]等对我国森林水文生态作用集水区研究做了比较全面细致的总结和对比,多数结论认为:森林覆盖率的减少会不同程度地增加河川年径流量。但是在四川省西部米亚罗高山林区、岷江上游冷杉林小集水区以及长江4对大流域的对比研究指出,森林流域年径流量较无林或少林流域大的结论^[2,25,67]。

森林防止土壤侵蚀,减少河流泥沙含量。森林植被是地表的保护层,它可以防止土壤侵蚀,减少河流泥沙淤积,同时,森林对防止水库、湖泊淤积,延长水库使用年限都有良好的作用。研究表明,在黄土高原森林覆盖率达30%的流域较无林地流域减少输沙量60%;岷江上游原始森林的采伐导致河流年平均含沙量增加1—3倍;海南岛尖峰岭热带季雨林地的耕地径流含沙量较有林地高3倍。森林对降水的截留作用,减少了大气降水到达地面的数量和速度,调节了地面径流形成的数量和速度,减少了水土流失。马雪华^[25]研究了冷杉林下苔藓、枯枝落叶的持水性问题,收集了有关数据,其结果表明:川西高山冷杉的苔藓、枯枝落叶层厚达8—12 cm,具有较好的水文效益,表现在拦截降水量,增加土壤含水量,减少地表径流量,保护土壤表层免受冲刷等。

森林改变水质,维持生态系统养分循环。目前,在欧美各国关于森林与水质的关系研究较多,国内的研究处于摸索阶段,研究成果较少。降水在经过森林流域时,一方面可以使土壤、岩石风化物 and 生物遗体上的各种有机物质,以及降落在植物体表面或地面上的大气浮游物质等溶解、淋洗,从而增加水中各种化学成分。另一方面降水通过森林流域形成溪流的过程中,又可能除去某些溶解成分,下渗水中的成分也可能被土壤吸收或通过离子交换而除去。国内外研究表明,采伐破坏了森林生态系统的养分循环,尤其是破坏了树木生长对氮的吸收,使河水中氮的含量显著增加,同时对其它的化学组分也产生一定的影响。

3 展望

现代森林水文学以流域、小集水区和生态系统作为研究对象,并利用计算机、地理信息系统及卫星气象资料等各种先进的研究手段,对涉及的领域进行研究并取得了一定的成果。但有些领域一直缺乏普遍性规律和统一性理论,因而长期存在着争议和分歧。如森林对降水、年径流量的增

减问题等。对森林的蒸散、林冠对降水的截留和重新分配等研究虽然提出了较为理想的计算方法和数学模型,但大多是建立在假设和观测统计的基础之上,尚未得到统一的理论认识。而这些问题既是森林水文生态功能评价的重要依据,又是流域治理、可持续发展等战略性研究的一个不可忽视的重要方面。森林水文学者对其进行深入研究并寻求新的增长点和前沿领域已不容怠慢,笔者在这里提出几点展望,以起抛砖引玉之效。

3.1 森林格局、水文学过程和尺度耦合研究

森林格局与水文学过程的关系是森林水文学研究的核心问题之一,水文学过程影响了森林格局,森林格局作用于水文学过程。若要正确理解森林格局与水文学过程的关系,就必须认识到其依赖于尺度的特点。无论是时空的尺度,还是结构和功能方面的尺度,森林格局、水文学过程都与其密切相关。因此寻求森林格局时应注意对水文学过程的理解,研究水文学过程时不应忽略森林格局的影响,而在研究二者关系时,则应考虑尺度效应。根据此观点,森林水文学者必须把研究结果与相应的尺度联系起来,否则这些结果将增加更多的争议和分歧观点。例如森林对降雨量的影响,在某一时间尺度或空间尺度,森林增加降水的干扰可被系统吸收,森林减少降水的干扰却非常显著,因而观测的结果是森林有减少降水之作用;而在另一时间或空间尺度,森林减少降水的干扰要可被系统吸收,森林增加降水的干扰却非常显著,则观测结果是森林有增加降水之作用。可见,因尺度不同,而得出完全相反的结论。

3.2 地域性研究

森林水文学的研究离不开森林与气候两个方面,而一定地域就有其特定的森林与气候特征。同时,就会有其特定的森林水文学过程。可见,森林水文学自产生以来就打下了地域性的烙印。因此,我们无论研究森林水文的单个环节,还是进行森林水文学整个过程的模拟时,模型中应有反映地域性的参数,否则所建的模型不仅不具有通用性,同时也因地域特征的变化而失真。计算森林蒸散时,由于地域性对热量和水分供应的限制,加之地域性森林植被、土壤及小气候等因素的影响,使之计算起来非常复杂。我们可以认为森林蒸散是反映地域性的综合森林水文特征。

3.3 系统水分的输入与输出结构研究

森林对水文学过程的作用最终反映在系统水分输入与输出的结构上。系统水分的输入主要包括降水与地下水。降水的输入不仅给系统带来丰富的水资源,同时也给系统带来较为良好的养分条件,而地下水的输入会导致地下水位下降,地下水资源也就相应受到威胁。因此,森林对系统水分输入方式的影响是森林水文生态效益进行评价的重要依据之一。被澳大利亚学者称之为“水泵”的桉树林尽管有良好的社会和经济效益,但因其消耗过多地下水资源而受到国内外众多学者的观注^[64-66,68,69]。系统水分的输出主要包括径流(地表径流和地下径流)和蒸散(蒸发和蒸腾)。防洪排涝效益要求系统尽量减少地表径流量,降低降雨期间的液态水输出,以达到减轻下游洪峰的目的,而随着水资源问题的出现,系统的产水量大小日益受到重视,产水量从定义上应该是从某一系统流出所有液态水量^[70,71]。除了地下径流、壤中流以外,当然也包括地表径流。由此可以看出,产水量与防洪排涝效益之间有矛盾性的一面;但是,由于构成系统产水量的

主体是地下径流和壤中流,而地表径流的减少为地下径流和壤中流的增多创造了潜在可能性,因此,它们之间又是统一的。同时,产水量与森林蒸散紧密联系,所以,研究系统水分输出结构有可能统一森林对径流量影响的分歧。

参考文献

- 1 Kittrege J. Forest Influence. Graw-Hill Book Co, 1948, 838
- 2 马雪华. 森林水文学. 北京: 中国林业出版社, 1993, 398
- 3 陈信雄. 森林水文学. 台湾: 千华出版公司, 1979, 582
- 4 Tansly S A. The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology*, 1935, 16:284-307
- 5 Lindeman R. The trophic dynamic aspect of ecology. *Ecology*, 1942, 23:399-418
- 6 Odum E P. The strategy of ecosystem development. *Science*, 1969, 164:262-270
- 7 Ricklefs R E. *Ecology*. Newton: Chiron Press, 1973, 966
- 8 Kalinin G P. *Global Hydrology*. New York: John Wiley Press, 1971, 327
- 9 Budyko. The water balance of the ocean. *World Water Balance by IASH-UNESCO-WMO*, 1972, 1:24-33
- 10 Baumgartner A, Reichel E. *The World Water Balance—Mean Annual Global, Continental and Martime Precipitation, Evaporation, and Runoff*. Elsevier Amsterdam, 1975, 179
- 11 周国逸. 生态系统水热原理及其应用. 北京: 气象出版社, 1997, 216
- 12 王礼先, 解明曙. 山地防护林水土保持水文生态效益及其信息系统. 北京: 中国林业出版社, 1998, 361
- 13 Leyton I et al. Rainfall interception in forest and moorland. In: *Int. Symp. Forest Hydrology*. Pergamon Press, Oxford, 1965, 163-178
- 14 Rutter A J et al. A predictive model of rainfall interception in forests, I: Derivation of the Model from observations in a plantation of corsican pine. *Agric, Meteorol*, 1971, 9:367-384
- 15 Gash J H C. Analytical model of rainfall interception by forests. *Quart J R Met Soc*, 1979, 105:43-53
- 16 Massman W J. A soil-plant-water model with a case study in a forested catchment. *Ecological Modeling*, 1985, 27(3):75-86
- 17 朱劲伟, 崔启武等. 红松林和采伐迹地的水量平衡分析. *生态学报*, 1982, 2(4):335-344
- 18 康文星, 田大伦等. 杉木人工林水量平衡和蒸散的研究. *植物生态学与地植物学学报*, 1992, 16(2):187-195
- 19 周国逸, 余作岳等. 小良试验站3种生态系统水量平衡研究. *生态学报*, 1995, 15(增刊A辑):223-229
- 20 周光益, 陈步峰等. 海南岛热带山地雨林短期水量平衡及主要养分的地球化学循环研究. *生态学报*, 1996, 16(1):28-32
- 21 余新晓, 陈丽华. 黄土地区防护林生态系统水量平衡研究. *生态学报*, 1996, 16(3):238-245
- 22 王彦辉. 陇东黄土地区刺槐林水土保持效益的定量研究. *北京林业大学学报*, 1986, 8(1):35-52
- 23 董世仁, 郭景唐等. 华北油松人工林的透流、干流和树冠截留. *北京林业大学学报*, 1987, 9(1):58-68
- 24 王彦辉. 刺槐对降雨的截持作用. *生态学报*, 1987, 7(2):43-49
- 25 马雪华. 四川米亚罗地区高山冷杉林水文作用研究. *林业科学*, 1987, 23(3):356-359
- 26 魏晓华, 周晓峰. 三种阔叶次生林的茎流研究. *生态学报*, 1989, 9(4):325-329
- 27 陈祖明, 任守贤. 岷江上游森林水文效应研究. *地理学报*, 1992, 47(1):49-57
- 28 陈乾, 陈添宇. 用 NOAA 卫星气象资料计算复杂地形下的流域蒸散. *地理学报*, 1993, 48(1):61-69

- 29 周国逸, 余作岳等. 小良试验站三种植被类型地表径流效应的对比研究. 热带地理, 1995, 15(4):306-312
- 30 周光益. 杉木人工林生态系统林地径流模式的研究. 中南林学院学报, 1989, 9(增刊):32-39
- 31 沈晓东, 王腊春等. 基于栅格数据的流域降雨径流模型. 地理学报, 1995, 50(3):264-269
- 32 周国逸, 余作岳等. 广东小良试验站降雨径流关系的一个黑箱模型. 生态学杂志, 1995, 14(4):67-72
- 33 孙惠南. 用自然地理观点探讨蒸发力. 地理学报, 1984, 39(1):44-51
- 34 周国逸, 潘维待. 森林生态系统蒸发散计算方法的研究. 中南林学院学报, 1988, 8(1):22-27
- 35 陈廉杰. 森林土壤允许流失量的研究. 水土保持学报, 1993, 7(1):19-22
- 36 刘昌明. 土壤-植物-大气系统水分运行的界面过程研究. 地理学报, 1997, 52(4):366-373
- 37 姚华夏, 袁作新. 森林水文效应的数学模拟. 全国森林水文学学术讨论会文集. 北京: 测绘出版社, 1989, 297
- 38 刘树华, 黄子琛等. 土壤-植被-大气连续体中蒸散过程的数值模拟. 地理学报, 1996, 51(2):118-125
- 39 王兵, 刘世荣等. 中国若干森林水文要素地理分布规律的模拟. 生态学报, 1997, 17(4):338-343
- 40 邓世宗, 唐俊. 广西不同生态地理区域杉木林水量平衡的研究. 广西森林水文及流域治理论文集. 北京: 气象出版社, 1994, 59-63
- 41 唐常源. 亚热带马尾松人工林的降雨截留作用. 地理学报, 1992, 47(6):545-551
- 42 黄忠良, 孔国辉. 鼎湖山季风常绿阔叶林生态水文功能研究. 热带亚热带森林生态系统研究, 第8集. 北京: 气象出版社, 1998, 150-155
- 43 刘世荣, 温远光等. 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, 203-207
- 44 崔启武, 边履刚等. 林冠对降雨的截持作用. 林业科学, 1980, 16(2):141-146
- 45 Horton R E. Rainfall interception. Mon Weather Rev, 1919, 47:603-623
- 46 Gash J H C, Morton A J. An application of the Rutter model to the estimation of the interception loss from Thetord forest. J Hydrol, 1978, 38:49-58
- 47 邓世宗. 从广西森林水文的研究谈柳江流域洪水的治理. 广西森林水文及流域治理论文集. 北京: 气象出版社, 1994, 41-47
- 48 孙立达, 朱金兆. 水土保持林体系综合效益研究与评价. 北京: 中国科学技术出版社, 1995, 245
- 49 高国栋, 陆渝蓉等. 我国最大可能蒸发量的计算和分布. 地理学报, 1978, 33(2):102-111
- 50 Thornthwaite C W, Mather J R. In structions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Publications in Climatology, Laboratory of Climatology, Centerton, 1957, 3:311
- 51 Penman H L. Vegetation and hydrology. Commonwealth Agricultural Bureau, 1963, 124
- 52 Shiau S Y, Davar K S. Modified Penman method for potential evapotranspiration from forest regions. J Hydrology, 1973, 18:349-365
- 53 布德科. 地表面热量平衡. 北京: 科学出版社, 1960, 249
- 54 刘振兴. 论陆面蒸发的计算. 气象学报, 1956, 27(4):15-27
- 55 崔启武等. 论水热平衡联系方程. 地理学报, 1979, 34(2):169-176
- 56 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算. 大气科学, 1981, 5(1):23-31
- 57 钟国华, 邓世宗等. 广西不同生态地理区域不同林型水量平衡的研究. 广西森林水文及流域治理论文集. 北京: 气象出版社, 1994, 1-13

- 58 周国逸, 余作岳等. 小良试验站3种生态系统中蒸发散的对比研究. 生态学报, 1995, 15(增刊A辑): 230-236
- 59 余新晓. 土壤动力水文学及其应用. 北京: 中国林业出版社, 1995, 196
- 60 周国逸, 彭少麟. 马占相思人工林某些水文学过程的基本规律初探. 生态学报, 1995, 15(增刊A辑): 211-216
- 61 周国逸, 余作岳. 小良试验站3种生态系统中土壤及地下水动态的对比研究. 生态学报, 1995, 15(增刊A辑): 217-222
- 62 吴长文. 北京密云水库水源保护林水土保持效益的研究. 北京林业大学博士研究生学位论文, 1994
- 63 黄锡荃等. 水文学. 北京: 高等教育出版社, 1997, 269
- 64 Vandana Shiva, Bandyopadhyay J. *Eucalyptus* — a disastrous tree for India. *The Ecologist*, 1983, 13(5): 184-187
- 65 Ghosh R C, Kaul O N, Subba Rao B K. Some aspects of water relations and nutrition in *Eucalyptus* plantations. *Indian For*, 1978, 104: 517-524
- 66 Greenwood E A N, Beresford J D. Evaporation from vegetation in landscapes developing secondary salinity using the ventilated-chamber technique. I. Comparative transpiration from juvenile *Eucalyptus* above saline groundwater seeps. *J Hydrol*, 1979, 42: 369-382
- 67 黄礼隆, 杨玉坡. 试论四川西部高山原始森林的水源涵养效能. 全国森林水文学术讨论会文集. 北京: 测绘出版社, 1989, 297
- 68 Greenwood E A N, Beresford J D, Bartle J R et al. Evaporation from vegetation in landscapes developing secondary salinity using the ventilated-chamber technique. IV. Evaporation from a regenerating forest of *Eucalyptus wandoo* on land formerly cleared for agriculture. *J Hydrol*, 1982, 58: 357-366
- 69 Vandana Shiva, Bandyopadhyay J. *Ecological Audit of Eucalyptus Cultivation*. The English Book Depot, Dehre Dun, India, 1985, 451
- 70 Bren L J, Papworth M. Early water yield effects of conversion of slope and a eucalypt forest catchment to radiation pine plantation. *Water Resource Research*, 1991, 27(9): 2421-2428
- 71 Vertessy R A, Hatton T J et al. Predicting water yield from a mountain ash forest catchment using a terrain analysis based catchment model. *J Hydrology*, 1993, 150: 665-700