

文章编号: 1008 - 2786 - (2017)5 - 677 - 09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000267

# 贡嘎山山地暗针叶林森林生态系统 水循环及其空间分异规律

孙向阳, 王根绪\*

(中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

**摘 要:** 在全球气候变化背景下, 山区水循环加剧、水文过程和水资源变化更加复杂, 客观认识变化环境下山区流域的水循环规律及其与气候、植被、土壤的相互作用机理, 是全球变化及人类社会可持续发展共同面临的核心问题。本文从森林空间异质性结构对生态系统蒸散发、土壤水分、水量平衡和水碳关系的影响研究, 结合国内外研究进展, 系统阐述了贡嘎山高山生态系统观测试验站目前的研究工作和取得的研究结果。此外, 针对复杂山地条件下生态系统水循环研究, 提出了未来山地水文学重要的研究方向: 系统开展土壤-植被-大气连续体 (SPAC) 系统下各连续体介质相关研究工作; 开展生态水文过程多尺度综合研究; 开展能够准确模拟山地水文过程的模型模拟工作。

**关键词:** 贡嘎山; 森林生态系统; 空间异质性; 水循环; 林龄

山地占地球陆地面积的大约 25%, 至少 1/3 的陆地生物多样性分布在山区<sup>[1]</sup>, 山地至少为全球 1/2 的人口提供淡水资源<sup>[2]</sup>, 同时, 山地提供了绝大部分能源、矿产资源与生态系统服务功能, 在人类社会生存与发展中具有重要作用<sup>[3, 4]</sup>。山地作为“水塔”的生态系统功能对人类社会和陆地淡水生态系统提供不可缺少的水源, 山地水循环与水资源变化也是山地研究的核心内容之一<sup>[5, 6]</sup>。山地具有浓缩的气候和生态环境梯度, 山地植被带谱分布的海拔梯度变化, 尤其是林线分布对气候变暖的正反馈作用得到越来越多的共识<sup>[7, 8]</sup>。与低海拔平原区相比, 山地由于地势陡峭, 植被带谱分布相对集中的特点, 使其成为研究气候变化响应的“天然实验室”<sup>[9-11]</sup>。近几十年来, 高山带增温幅度远高于低海拔地区, 并高于全球平均增温水平; 不同海拔高度降水量变化分异也比较明显, 高山带年降水量趋于减少<sup>[12, 13]</sup>。

全球变化对山地生态系统结构、过程和功能以及植物分布格局和演替进程等方面的影响, 相比平原区更加显著和迅速<sup>[14]</sup>。在气候变化背景下, 摆在我们面前迫切需要解决的关键问题是气候变化和生态系统变化对山地水循环和水文过程将产生何种影响?

山地生态系统对气候变化的响应必将引起山地水循环和山地流域水文过程的变化, 包括径流的时空分布格局、洪水过程与土壤侵蚀等, 对流域乃至区域的水资源供给、旱涝灾害控制以及土壤侵蚀等环境问题的防治等将产生较大影响<sup>[5, 15]</sup>。但是, 现阶段仍然缺乏植被高度空间异质性山地区域生态系统水循环过程的机理认识, 植被系统如何及多大程度上影响山地流域水循环与径流过程仍然是水文学亟待解决的前沿问题<sup>[16]</sup>。这一问题的复杂性还在于山区植被对气候变化的高度敏感性导致的植被结构、分布格局与生产力等的显著改变对水循环过程

收稿日期 (Received date): 2017 - 06 - 20; 改回日期 (Accepted date): 2017 - 09 - 20

基金项目 (Foundation item): 中国科学院前沿科学重点研究项目 (QYZDJ - SSW - DQC006); 国家自然科学基金青年基金 (41401044) [key Research Projects of Frontier Sciences (CASQYZDJ - SSW - DQC006); National Natural Sciences Foundation of China (41401044)]

作者简介 (Biography): 孙向阳 (1985 - ), 男, 汉族, 吉林榆树人, 助理研究员, 山地生态水文研究 [Sun Xiangyang (1985 - ), male, born in Yushu, Jilin Province, research assistant, research on mountainous ecohydrology] E-mail: sunxiangyang@imde.ac.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): 王根绪 (1965 - ), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 生态水文学, 区域环境与变化 [Wang Genxu (1965 - ), male, Ph. D, Professor, specialized in ecohydrology] E-mail: wanggx@imde.ac.cn

产生较大反馈影响,形成了山区极其复杂多变的气候-植被-土壤-水等要素间的相互作用关系与动态格局<sup>[16]</sup>。水循环是水资源形成与再生的基础,只有从机理上认识水文过程的变化,才能正确辨识水资源变化规律,开展山地流域尺度上复杂的生态水循环研究,客观揭示山地水文过程与气候要素、植被的相互作用机制与演变趋势,是解决变化环境下流域水文过程准确认知和水资源科学管理问题的根本途径<sup>[17]</sup>。

我国西南地区拥有面积上仅次于东北地区的丰富的森林资源,并集中分布在横断山区,尤其是川西海拔 2000 m 以上的中、高山区。该地区的森林植被对长江上游水源涵养和减少侵蚀产沙起着重要的作用<sup>[18]</sup>。作为横断山脉的最高峰,贡嘎山在地质构造上处于南亚大陆与欧亚大陆镶嵌交接带的东翼,是我国东部环太平洋带与西部古地中海带的过渡带,该区山地自然生态系统的植被带谱结构在横断山区最具特色和代表性,拥有青藏高原东缘高山峡谷区最完整的垂直带谱结构。贡嘎山东坡植被地理的空间变化主要受环境因子控制,同时部分受区域环境变迁和区系发育历史的影响<sup>[19, 20]</sup>。因此,在贡嘎山东坡植被带谱开展生态水文学及水循环研究对破解山地水文循环的“黑箱”结构,系统认识山地带谱气候、植被和环境变量对水文循环的交叉协同影响,以及准确刻画山地流域中下游地区水资源现状及未来变化趋势具有重要的科学意义。本文系统性的综述贡嘎山植被带谱中暗针叶林带水文循环关键过程及水碳关系的研究进展,并简单阐述贡嘎山未来在生态水文学研究中的重要发展方向,为我国山地生态水文学研究提供一定的参考。

## 1 森林生态系统空间异质性的对蒸散发的影响

空间异质性 (spatial heterogeneity) 是所有尺度的生态学和水文学系统中的一个普遍现象。气候、地形、植被类型等的差异导致水文过程存在较大的差异。森林生态系统蒸散发受空间异质性及尺度效应影响显著,而蒸散发过程的定量化研究一直是森林水文学研究的重点和难点<sup>[21]</sup>。迄今为止,由于研究方法的局限性及山地森林生态系统本身的复杂性,对各向异性的森林生态系统蒸散发的非线性变化过程仍无法做出明确解释,对亚高山地带植被空

间异质性对蒸散发影响仍无完整结论。

### 1.1 森林生态系统降水截留

截留是森林水文循环的重要过程之一,降水截留过程将降水划分为蒸发和径流两个过程,截留的降水会以水汽形式重新返回大气<sup>[22]</sup>。按截留的发生过程及组分划分,降水截留由三部分组成,分别是林冠截留、树干截留和地表凋落物截留<sup>[23, 24]</sup>。林冠截留占降水比例在 10% ~ 50% 之间<sup>[22, 25]</sup>,地表凋落物截留占降水比例在 3.5% ~ 22% 之间<sup>[23, 24]</sup>。虽然截留占降水比重较大,但是实际研究工作中,森林生态系统截留过程在水文模型中的计算方法是最简单的,因此存在一定程度的重视不足导致的估算误差<sup>[26]</sup>。

基于不同的森林生态系统截留组分,在贡嘎山亚高山暗针叶林区域按照森林生长演替的过程,利用穿透雨观测法、人工喷淋法和稳定水同位素方法分别研究了峨眉冷杉幼龄林、中龄林和成熟林的截留过程。结果表明,生长季 5 ~ 10 月幼龄林、中龄林和成熟林的总截留率为 28.8%、25.5% 和 31.1%,其中地表截留占总截留量的 19.1%、18.1% 和 10.0%,不同林龄冷杉截留率的差异主要受叶面积指数的影响<sup>[27]</sup>。林冠截留占森林生态系统截留的比重最大,一方面是因为湿润冠层可以视为利于水汽扩散的气动力学导度的“粗糙”表面<sup>[28]</sup>;另一方面,受林冠遮挡作用导致林冠下方净辐射能量和风速均小于冠层界面,不利于水汽扩散<sup>[29]</sup>。林冠截留的影响因素众多,如降水量、降水强度、冠层结构、林分密度、风速等<sup>[24, 25]</sup>。但是,不同地区、不同森林类型林冠截留的主要影响因素又存在一定的差异。例如贡嘎山地区暗针叶林林冠截留主要受冠层结构和降雨特征决定,风速基本上对林冠截留没有影响<sup>[27]</sup>。而在热带雨林地区、北方森林区和温带森林区,强风往往导致更大的林冠截留率<sup>[30, 31]</sup>。

凋落物截留受凋落物层饱和持水量的影响较大,并且具有较强的空间异质性。研究方法包括同位素方法<sup>[23]</sup>、能量平衡方法<sup>[32]</sup>和连续称重法<sup>[24]</sup>。利用同位素方法研究地表的蒸发过程更加有效,但是研究结果可能会受到优先流的影响<sup>[23]</sup>。为避免优先流对结果的影响,应该在降水事件结束后开展连续的采样。在不考虑森林类型的差异下,凋落物截留与地表凋落物层的厚度具有较好的线性关系<sup>[32]</sup>,而在我国长江上游地区也得到了相同的结论<sup>[33]</sup>。贡嘎山暗针叶林不同林龄地表蒸散发速率

随林龄增加而减小,一是由于叶面积指数变化对达到地表净辐射的影响,二是由于树高增加导致地表水分蒸发的空气动力学导度减小。

## 1.2 森林蒸腾

森林蒸腾作用是森林生态系统蒸散发的重要组成部分,但是精确量化森林蒸腾耗水量仍存在诸多困难。传统研究观点认为饱和水汽压、光和有效辐射、土壤水分等因子均会影响蒸腾量<sup>[34, 35]</sup>。山地受地形变化导致微气象和土壤理化性质极其复杂,受其影响的林分特征也表现为高度的空间异质性,并进而影响森林蒸腾作用,而不考虑空间异质性甚至会导致蒸散发组分估算存在 30% 的误差<sup>[36]</sup>。林龄结构的分布是森林生态系统垂直结构异质性的重要原因。幼龄林阶段针叶和阔叶树种共同生长;中龄林阶段针叶快速生长,获取了更多的光照和养分,阔叶树种由于竞争逐渐死亡;成熟林阶段由于树木枯死倒伏的发生,林窗内大量灌木伴生。近年来,林龄对生态系统能量与质量交换影响的研究受到了广泛关注,特别是森林碳循环与水分循环研究更成为关注的焦点。

贡嘎山东坡亚高山峨眉冷杉林树干液流研究结果表明,幼龄林、中龄林和成熟林乔木层日蒸腾量分别为 0.88、0.70 和 0.37 mm d<sup>-1</sup><sup>[37]</sup>。幼龄林的液流密度大于中龄林和成熟林,但是单株树木的蒸腾量并没有因为林龄增加而受到限制。水力限制假说认为,随着森林林龄增长和树高增加,叶片气孔导度和光合作用逐渐下降,水分传导途径、重力势能和摩擦阻力都增大,水力阻力提高,引起水力传导度下降,因此树木越高越不利于树木水分的向上传输,进而影响了森林的蒸腾作用。峨眉冷杉幼龄林、中龄林和成熟林灌木层日蒸腾量分别为 0.13、0.01 和 0.71 mm d<sup>-1</sup><sup>[37]</sup>。成熟林、中龄林总蒸腾量略小于幼龄林,但是不同林龄之间的差异不显著。灌木层占总蒸腾量的比重主要受不同林龄乔木层林窗结构的差异导致,中龄林主要以乔木为主,因此灌木层蒸腾量所占比重较低;成熟林由于树木倒伏比重较大,相应的林窗面积增加导致下层灌木发育良好,因此灌木层蒸腾量所占比重较高。群落尺度上,乔木层蒸腾量的减少伴随着灌木层蒸腾量的增加,从而使林分总蒸腾量保持平衡<sup>[38]</sup>。

分析贡嘎山亚高山峨眉冷杉林蒸腾速率的年内变化与土壤含水量的关系发现,土壤表层至 60 cm 深度土壤含水量与蒸腾量变化趋势相反,100 cm 深

度土壤含水量变化规律与蒸腾量无关。一方面反映了森林蒸腾消耗土壤中的水分,另一方面也反映了该研究区森林蒸腾消耗的水分主要来自地下 60 cm 以内的土壤水分。与干旱区不同的是,由于贡嘎山东坡年均降水量为 1940 mm,土壤水分并不是树木蒸腾的主要限制因子,因此并不存在土壤水分对蒸腾影响的阈值<sup>[39]</sup>。另外,分析发现贡嘎山东坡亚高山峨眉冷杉林蒸腾量在夏季的主导因素是相对空气湿度,而春秋两季的主导因素是空气温度。

## 2 林地土壤水分动态变化

土壤层是水分、能量在系统中土壤-植被-大气连续体 (SPAC) 中运移和储存的介质。土壤水分的时空动态分布是研究森林土壤水分运移规律的基础,土壤层多孔介质的特征及对雨水再分配过程是径流形成机制的主要环节。土壤水分时空格局是受多重尺度植被、降水、地形、土壤等多因子综合作用而形成。植被的空间异质性对土壤水分含量的影响在山地区域尤其常见。贡嘎山亚高山暗针叶林区域土壤土层薄,砾石含量高,水分渗漏速度较快。不同林龄暗针叶林土壤水分运动的壤中流过程均主要表现为优先流,降水入渗始终沿着优先流路径向下运移,基本没有地表产流过程<sup>[40]</sup>。因此,土壤层水分运动的主要途径是下渗、土壤蒸发和植被蒸腾耗水。受森林植被蒸腾耗水影响,一般来说,森林区域裸地的土壤含水量均高于有林地。

植被覆盖对土壤水分的空间变化格局影响还体现在森林的空间异质性变化上。林龄导致的森林生态系统的空间异质性突出表现为乔木层和灌木层的分布结构及比例的差异。乔木层由于根系分布范围大、埋藏深,蒸腾耗水量大,因而乔木的分布对林下土壤含水量影响较大<sup>[41]</sup>。幼龄林乔木层林龄小,林下灌木分布不均,植被覆盖也不均匀,植被空间变异较大,林下土壤含水量空间变异程度也较高。中龄林植被结构单一,乔木层峨眉冷杉林林龄相对稳定且分布均匀,林下灌木稀疏,林下土壤水分含量空间变异性最小。成熟林由于峨眉冷杉林倒伏导致乔木层分布稀疏,林分密度小,灌木大量分布在林窗内,因此林下土壤水分含量空间变异性也较强。

森林的空间异质性不仅影响土壤水分的空间分布,同时影响土壤水分的垂直分布格局。对比不同土层深度的土壤含水量发现,表层土壤含水量受土

壤蒸发影响变化显著,随土层深度增加土壤含水量也逐渐增加。由于森林植被的蒸腾耗水作用,植被根系分布的旺盛区均出现土壤旱化现象,而旱化现象出现的深度也受不同林龄根系分布深度的影响。利用 TDR 方法研究土壤水分动态,结果表明幼龄林土壤干层出现在 30 cm 和 60 cm 两个深度区域,30 cm 范围为灌木层根系的分布区,40 ~ 60 cm 范围为乔木层根系分布区。峨眉冷杉属于水平根系树种,表层至 60 cm 深度范围是根系吸水的主要范围。裸地主要覆被物为草本植物,20 cm 以上范围为草本植物根系吸水的主要区域,而这一区域同时也是土壤蒸发所影响的深度范围,因此裸地 20 cm 以上区域土壤含水量较低。

### 3 不同林龄暗针叶林对产水量的影响

土壤-植被-大气连续体中,不同界面之间水分的交换过程通过持续的水文循环保持着系统水分的动态平衡。近年来,为减缓温室气体排放对全球气候变化的影响而开始大面积开展植树造林活动,中国目前成为全球植树造林总面积第一的国家。但是研究发现,造林导致流域径流大幅度减少,而造林对干旱地区径流的减小尤其显著,甚至导致径流完全消失<sup>[42, 43]</sup>。对全球尺度森林与径流关系综合研究发现,湿润度指数( $P/PET$ )<sup>[44]</sup>会影响流域径流量对森林覆盖度的响应趋势。在贡嘎山亚高山暗针叶林区,通过对不同林龄水量平衡过程的观测研究发现,林冠截留、树木蒸腾和地表蒸发分别消耗了总降水

的 20.9% ~ 28.2%、12.4% ~ 12.8% 和 3%,除去土壤水分的年际间变化幅度外,大部分的降水形成了径流(图 1)。该研究结果与干旱地区的森林水量平衡过程截然不同,在降水量较小的干旱森林流域,可能不会形成产流,或者产流量较小<sup>[45]</sup>。因此,湿润地区山地森林流域的产流对平原区径流的贡献较高。

根据研究区小流域出口断面的监测数据分析发现,枯季径流的主要补给来源是地下水,湿季主要以降水补给为主,因此径流的年内分配差异较大<sup>[46]</sup>。但是受降水调控作用影响,径流量的年际变化并不显著,原因是该区近 20 多年来降水量并没有表现为显著的增加或减小趋势<sup>[47]</sup>。而研究尺度变化,也会导致森林覆盖对径流的影响发生变化。随着研究尺度的增加,森林植被覆盖度的影响降低而水槽调蓄作用逐渐增加。利用分布式水文模型(SWAT)研究发现,四川梭磨河流域森林覆盖率在 35% ~ 40% 之间具有最显著的滞蓄洪效益,即使流域被森林完全覆盖对洪水的影响差异也仅在 5% 以内<sup>[48]</sup>。因此,研究森林对水文过程的影响,不仅需要考虑林型、覆盖率等影响,同时需要考虑尺度的作用。

### 4 森林生态系统水碳关系

山地是地球上淡水资源的主要发源区,为人类生产生活提供了大量的淡水资源,因此山地的水源涵养功能也是山地生态系统最为重要的服务功能之一。近几十年来,由于气候变化引发的对全球范围

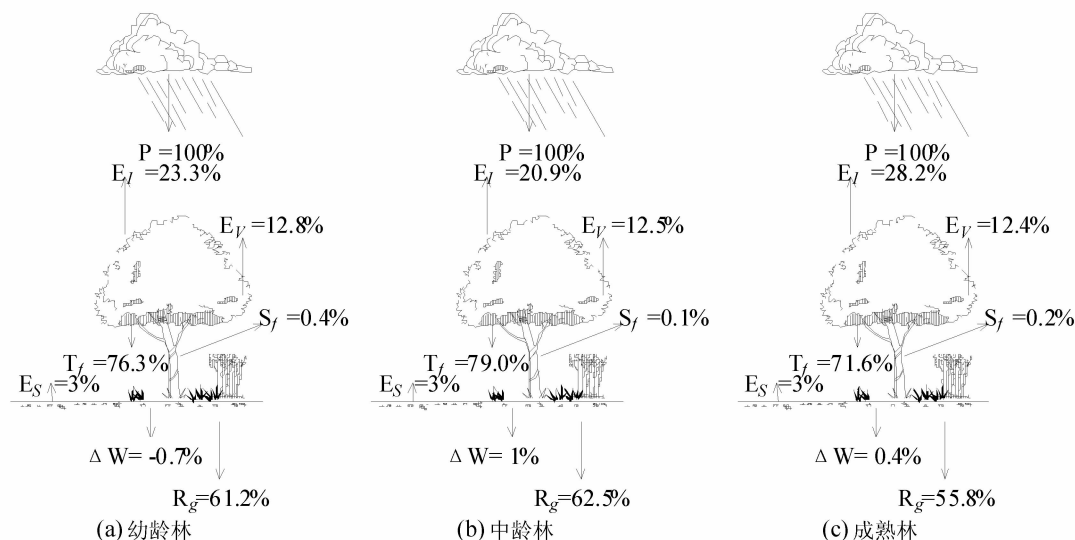


图 1 贡嘎山东坡亚高山峨眉冷杉林不同林龄月土壤-植被-大气系统水分交换示意图

内生态系统碳循环的研究逐步成为各国科学家关注的重点研究领域<sup>[49, 50]</sup>。而气候与生态系统的变化会显著改变水文循环和山地径流过程,继而影响流域水循环<sup>[51]</sup>。山地森林是我国乃至世界上森林生态系统固碳的主要部分,因此山地生态系统固碳与耗水之间的权衡关系成为生态学和在水文学关注的重要研究方向<sup>[52]</sup>。研究植物光合作用-气孔行为-蒸腾作用的耦合关系,及其生物和非生物控制因子,从机理角度分析山地水资源制约的生态系统生产力,是山区水源涵养研究的重点方向。

陆地生态系统的碳循环和水循环是两个紧密相关的两个关键生态过程<sup>[49, 53]</sup>。受海拔梯度变化导致的气候、土壤、植被类型及植物生理等因素影响,生态系统尺度水、碳循环在海拔梯度上的变化尤其复杂<sup>[54, 55]</sup>。水分利用效率(WUE)是表征水、碳循环相互关系的一个重要指示参数,揭示生态系统WUE的时空变异格局及机制对分析和预测未来气候变化对生态系统水、碳过程影响具有重要意义<sup>[53, 56]</sup>。叶片的稳定碳同位素( $\delta^{13}\text{C}$ )与胞间 $\text{CO}_2$ 浓度( $c_i$ )和大气 $\text{CO}_2$ 浓度( $c_a$ )比值( $c_i/c_a$ )之间具有相关关系,并且可以计算植物的WUE<sup>[57]</sup>。在过去的几十年中, $\delta^{13}\text{C}$ 被广泛用于研究不同时空尺度的水分利用效率。大部分研究表明,亚高山带植物 $\delta^{13}\text{C}$ 与海拔梯度之间具有正相关关系,说明水分利用效率随着海拔梯度增加而增加<sup>[55, 58]</sup>。另外,利用树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的研究结果也发现,水分利用效率自20世纪以来是逐渐增加的<sup>[59]</sup>,但是 $\text{CO}_2$ 浓度增加在促进叶片胞间 $\text{CO}_2$ 浓度增加的同时也增加了树木的蒸腾量<sup>[60]</sup>。而海拔梯度水分利用效率变化的驱动因素仍然需要进一步的研究。

针对贡嘎山亚高山暗针叶林生态系统,采用 $\delta^{13}\text{C}$ 和AVIM2模型相结合的方法,研究了水分利用效率沿海拔梯度的变化及其影响机制。结果发现,水分利用效率随海拔升高而增加,而GPP、NPP和蒸散发量均随海拔梯度的增加而减小。由于蒸散发对海拔梯度的响应变化幅度高于GPP和NPP,因此在亚高山森林生态系统中,水分利用效率对海拔梯度变化为正反馈作用。海拔梯度上,年降水量和WUE之间并没有显著的相关关系,原因是降水充沛地区水分并不是水分利用效率海拔梯度变化的限制性条件<sup>[61]</sup>,但是不同的湿润条件会影响 $\delta^{13}\text{C}$ 的海拔梯度变化幅度<sup>[58]</sup>。贡嘎山地区气温随海拔升高而降低,其直减率为 $0.5 \sim 0.7\text{ }^\circ\text{C}/100\text{ m}$ 。低温环境

下,叶片厚度和硬度均发生变化以适应低温条件<sup>[62]</sup>。受低温影响,气孔导度也同样会减小<sup>[63]</sup>。叶片的蒸腾作用因受低温导致叶水势增加而降低<sup>[64]</sup>。气温降低会减小饱和水汽压,同时使得饱和水汽压的边界条件降低,如果蒸发表面的温度与气温接近,就将导致高海拔地区的蒸发力降低<sup>[10]</sup>;而如果蒸发表面的温度高于气温,则可能导致蒸发力显著增加<sup>[65]</sup>,这也就是为什么海拔升高后蒸发量可能增加的原因。另外,海拔梯度升高会导致气压和 $\text{CO}_2$ 分压降低,进而增加了 $\text{CO}_2$ 到达叶片表皮细胞的概率,但是海拔增加导致的温度降低限制了这种概率的发生<sup>[10]</sup>。综上,温度和气压沿海拔梯度变化对植物生理的改变形成了贡嘎山暗针叶林叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 和水分利用效率海拔梯度变化格局。

## 5 未来研究展望

### 5.1 系统开展 SPAC 系统下植被-水文-土壤连续体研究工作

山地生态水文过程的高度异质性是山地水文过程准确识别与定量刻画的难点,深入理解山地SPAC系统水循环过程的相互联系与时空分异规律,探索基于生物学机理的生态水文过程识别途径,是解决以上核心问题的关键,是现代水文科学自身发展面临的最大挑战,也是揭示山地生态系统对全球变化响应机制的重要途径。陆地生态系统参与水循环过程的核心问题在于两方面:一是纵向的水分交换,以大气-植被界面的蒸散发和植被-土壤界面的水分运移为关键环节,目前尚未在基于植物水分机理的蒸散发准确量化与模拟方面取得突破,也无法准确识别流域尺度生态系统中植物蒸腾与土壤蒸发过程及其二者的定量结构,是水文学与陆面过程研究前沿领域最具挑战性的难点之一<sup>[66, 67]</sup>。在植被-土壤水分交换过程及其主导下的土壤水分运动方面,由于缺乏对根系及其他生物因素作用下的大孔隙优先流的系统理论认知和定量描述方法,现阶段以概化为均匀土壤介质的渗流理论来表征,如何准确判识植被群落乃至生态系统尺度上根-土界面水分运移规律与机制,是流域生态水文模型发展最主要的制约因素。二是横向的产汇流过程,山地高度异质性的生态系统参与下的土壤水分运动、地下径流与地表坡面产流以及流域汇流过程等,其形成过程的复杂性和高度时空变异性,始终是流域水文

分析、精确预报与模拟的不确定性根源和理论瓶颈<sup>[15, 17]</sup>。

## 5.2 开展生态水文过程多尺度综合研究

尺度和尺度转换问题一直是生态学和在水文学共同关注的关键科学问题,也是目前生态水文学研究中的热点和难点问题<sup>[68]</sup>。气孔在预测全球水循环和碳循环变化研究中极具关键作用,但是目前仍然缺乏对全球尺度气孔行为变化的预测模型,不同功能型植物的气孔行为在调控固碳与水分损耗之间存在一定的差异,这将导致模拟研究不同空间尺度生态系统固碳和蒸散发的不确定性,进而影响流域水量平衡过程的准确估算<sup>[69]</sup>。而对于空间格局及异质性强烈的山地森林的垂直带谱结构,如何准确分析及模拟气孔行为,会直接导致预测未来气候变化情境下山地水资源响应格局的变化。另外,小流域尺度森林砍伐对径流影响的结果可能与大尺度的研究结果相反,原因是大尺度森林覆盖率的显著变化可能会影响降水量,因此小流域结果的叠加并不能完全解释大流域结果<sup>[70]</sup>。森林覆盖对径流的响应受研究尺度影响,小尺度上森林覆盖率增加会导致径流减少,而大尺度上森林则会增加降水量和水资源量<sup>[71]</sup>。近些年,借助不同研究方法,对气孔尺度、生态系统尺度、流域尺度和全球尺度分别取得了一定的科研成果。但是对于气候变化迅速、地形陡峭、土壤结构复杂、生态系统类型多样的山地区域,如何准确量化评价不同研究尺度的水文过程不仅对认识山地径流对气候变化响应研究具有重要意义,同时对提高水文过程模拟能力具有关键作用。

## 5.3 开展能够准确模拟山地水文过程的模型模拟工作

水文模型的不确定性和限制流域水文过程识别能力的主要原因,可归纳为两方面:一是输入变量和参数的空间变异性导致的模型校验结果的不确定性以及模拟流域的代表性较差<sup>[72]</sup>;二是包括植被覆盖变化在内的流域特征随尺度变化并导致与模型参数之间的原有关系发生改变。对于山地流域,植被类型与群落结构、植被物候与生产力形成、土壤水分及其有效性、气温与降水以及复杂多变的地下水系统结构等诸多因素的垂直带梯度分异,且在气候变化下不同海拔高度植被、土壤水分动态的异质性响应等,导致这两方面的制约性不仅存在而且更加复杂<sup>[73]</sup>。由于对植被动态及其耦合的水循环时空分异性缺乏基于机理的系统描述,蒸散发限制因子以

及土壤水/地下水动态等缺乏地形因子的精细刻画等原因,迄今尚没有对山地流域水文过程具有较高识别能力的水文模型<sup>[73, 74]</sup>。因此,如何克服水文模型中对复杂植被下垫面蒸散发过程、根-土关系控制的大孔隙优先流主导的土壤水分动态、山地复杂地下水系统下的地下水汇流过程等方面的不足和缺陷,是山地流域水文模型发展的最大挑战,也是当前及未来水文模型发展的趋势。

## 参考文献 (References)

- [1] BARTHOLOTT W, LAUER W, PLACKE A. Global distribution of species diversity in vascular plants: towards a world map of phytodiversity (Globale verteilung der artenvielfalt höherer pflanzen: vorarbeiten zu einer weltkarte der phytodiversität) [J]. *Erdkunde*, 1996, **50**(4): 317–327.
- [2] VIVIROLI D, Weingartner R, Messerli B. Assessing the hydrological significance of the world's mountains [J]. *Mountain research and Development*, 2003, **23**(1): 32–40.
- [3] BLYTH S, et al. Mountain watch: environmental change and sustainable development in mountains [M]. 2002.
- [4] BALDASCINI A, Perlis A, Romeo R. International Year of Mountains: concept paper. 2002, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- [5] MESSERLI B, Viviroli D, Weingartner R. Mountains of the World: Vulnerable Water Towers for the 21st Century [J]. *Ambio*, 2004, **13**(7): 29–34.
- [6] 王根绪, 邓伟, 杨燕, 程根伟. 山地生态学的研究进展, 重点领域与趋势[J]. *山地学报*, 2011, **29**(2): 129–140. [WANG Genxu, DENG Wei, YANG Yan, CHENG Genwei. The Advances, Priority and Developing Trend of Alpine Ecology [J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, **29**(2): 129–140]
- [7] WALTHER GR. Plants in a warmer world [J]. *Perspectives in plant ecology, evolution and systematics*, 2003, **6**(3): 169–185.
- [8] BAKER B, R Moseley. Advancing treeline and retreating glaciers: implications for conservation in Yunnan, PR China [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2007, **39**(2): 200–209.
- [9] GOSLING WD, BUNTING MJ. A role for palaeoecology in anticipating future change in mountain regions? [J] *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2007, **259**(1): 1–5.
- [10] KÖRNER C. The use of 'altitude' in ecological research [J]. *Trends Ecol Evol*, 2007, **22**(11): 569–74.
- [11] KÖRNER C. Why are there global gradients in species richness? Mountains might hold the answer [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2000, **15**(12): 513–514.
- [12] OHMURA A. Enhanced temperature variability in high-altitude climate change [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2012, **110**(4): 499–508.
- [13] PEPIN N, LUNDQUIST J. Temperature trends at high elevations: patterns across the globe [J]. *Geophysical Research Letters*,

- 2008, **35**(14).
- [14] BLYTH S. Mountain watch: environmental change & sustainable developmental in mountains. 2002: UNEP/Earthprint.
- [15] TAGUE C, DUGGER AL. Ecohydrology and climate change in the mountains of the Western USA-A review of research and opportunities [J]. *Geography Compass*, 2010, **4**(11): 1648 – 1663.
- [16] ANDERSON RG, GOULDEN ML. Relationships between climate, vegetation, and energy exchange across a montane gradient [J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2015, **116**(G1): 944 – 956.
- [17] SINGH VP, FREVERT DK. Mathematical models of large watershed hydrology. 2002: Water Resources Publication.
- [18] 张信宝, 文安邦, WALLING DE, 吕喜玺. 大型水库对长江上游主要干支流河流输沙量的影响[J]. *泥沙研究*, 2011, **32**(4): 59 – 66. [ZHANG Xinbao, WEN Anbang, WALLING D E, LU Xixi. Effects of large-scale hydropower reservoirs on sediment loads in Upper Yangtze River and its major tributaries [J]. *Journal of Sediment Research*, 2011, **32**(4): 59 – 66]
- [19] 沈泽昊, 方精云, 刘增力, 伍杰. 贡嘎山东坡植被垂直带谱的物种多样性格局分析[J]. *植物生态学报*, 2001, **25**(6): 721 – 732. [SHEN Zehao, FANG Jingyun, LIU Zengli, WU Jie. Patterns of biodiversity along the vertical vegetation spectrum of the east aspect of Gongga Mountain [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, **25**(6): 721 – 732]
- [20] THOMAS A. Overview of the geoecology of the Gongga Shan range, Sichuan province, China [J]. *Mountain Research and Development*, 1999: 17 – 30.
- [21] FERRETTI D, et al. Partitioning evapotranspiration fluxes from a Colorado grassland using stable isotopes: Seasonal variations and ecosystem implications of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. *Plant and Soil*, 2003, **254**(2): 291 – 303.
- [22] MIRALLES D, et al. Magnitude and variability of land evaporation and its components at the global scale [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, **15**(3): 967 – 981.
- [23] KUBOTA T, TSUBOYAMA Y. Estimation of evaporation rate from the forest floor using oxygen-18 and deuterium compositions of throughfall and stream water during a non-storm runoff period [J]. *Journal of Forest Research*, 2004, **9**(1): 51 – 59.
- [24] GERRITS A, PFISTER L, SAVENIJE H. Spatial and temporal variability of canopy and forest floor interception in a beech forest [J]. *Hydrological Processes*, 2010, **24**(21): 3011 – 3025.
- [25] 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]. 1996, 北京: 中国林业出版社. [LIU Shirong, WEN Yuanguang, WANG Bing, et al. Eco-hydrological functions of forest ecosystems in China [M]. Beijing: China forestry publishing house, 1996]
- [26] SAVENIJE HH. The importance of interception and why we should delete the term evapotranspiration from our vocabulary [J]. *Hydrological Processes*, 2004, **18**(8): 1507 – 1511.
- [27] SUN X, et al. Intercepted rainfall in *Abies fabri* forest with different-aged stands in southwestern China [J]. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2013, **37**(4): 495 – 504.
- [28] BLYTH E, HARDING RJ. Methods to separate observed global evapotranspiration into the interception, transpiration and soil surface evaporation components [J]. *Hydrological Processes*, 2011, **25**(26): 4063 – 4068.
- [29] WILSON KB, HANSON PJ, BALDOCCHI DD. Factors controlling evaporation and energy partitioning beneath a deciduous forest over an annual cycle [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, **102**(2): 83 – 103.
- [30] HERWITZ SR, SLYE RE. Three-dimensional modeling of canopy tree interception of wind-driven rainfall [J]. *Journal of Hydrology*, 1995, **168**(1–4): 205 – 226.
- [31] TOBA T, OHTA T. An observational study of the factors that influence interception loss in boreal and temperate forests [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, **313**(3): 208 – 220.
- [32] MARIN CT, BOUTEN I, DEKKER S. Forest floor water dynamics and root water uptake in four forest ecosystems in northwest Amazonia [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, **237**(3): 169 – 183.
- [33] SHI P, et al. Water retention capacity evaluation of main forest vegetation types in the upper Yangtze basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, **19**(3): 351 – 360.
- [34] OTIENO D, et al. Stand characteristics and water use at two elevations in a sub-tropical evergreen forest in southern China [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2014, **194**(3): 155 – 166.
- [35] GRANIER A, BIRON P, LEMOINE D. Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands [J]. *Agricultural and forest meteorology*, 2000, **100**(4): 291 – 308.
- [36] OTIENO D, et al. Spatial heterogeneity in stand characteristics alters water use patterns of mountain forests [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, **236**: 78 – 86.
- [37] 林云. 亚高山森林生态系统植被空间异质对蒸散发过程的影响[D]. 2011, 中国科学院研究生院 中国科学院大学. [LIN Yun. The effect of vegetation spatial heterogeneity in alpine forest ecosystem on evaporation processes [D]. The graduate school of Chinese academy of sciences, 2011]
- [38] KELLIHER F, et al. Partitioning evapotranspiration into tree and understorey components in two young *Pinus radiata* D. Don stands [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1990, **50**(3): 211 – 227.
- [39] CHANG X, ZHAO W, HE Z. Radial pattern of sap flow and response to microclimate and soil moisture in Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) in the upper Heihe River Basin of arid northwestern China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, **187**: 14 – 21.
- [40] 牛健植, 余新晓, 张志强. 贡嘎山暗针叶林森林生态系统土壤水分运移特征分析[J]. *北京林业大学学报*, 2008, **30**(2): 240 – 245. [NIU Jianzhi, YU Xinxiao, ZHANG Zhiqiang. Movement characteristics analysis of soil water flow in the dark coniferous forest ecosystem of Gongga Mountain, Sichuan Province of southwestern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, **30**: 240 – 245]
- [41] WILSON KB, et al. A comparison of methods for determining

- forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance [J]. *Agricultural and forest Meteorology*, 2001, **106**(2): 153–168.
- [42] FARLEY KA, JOBBAGY EG, JACKSON RB. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy [J]. *Global Change Biology*, 2005, **11**(10): 1565–1576.
- [43] BROWN AE, et al. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation [J]. *Journal of hydrology*, 2005, **310**(1): 28–61.
- [44] ZHOU G, et al. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield [J]. *Nat Commun*, 2015, **6**: 5918.
- [45] HE Z, et al. Effect of forest on annual water yield in the mountains of an arid inland river basin: a case study in the Pailugou catchment on northwestern China's Qilian Mountains [J]. *Hydrological Processes*, 2012, **26**(4): 613–621.
- [46] 吕玉香, 王根绪. 贡嘎山东坡不同流域河川径流特征对比分析[J]. *山地学报*, 2008, **26**(2): 196–204. [LU Yuxiang, WANG Genxu. Comparative Analysis on the Annual Runoff Characteristics of Different Basins in the Eastern Slope in Gongga Mountain[J]. *Journal of Mountain Science*, 2008, **34**(4): 196–204]
- [47] WU YH, et al. Temperature and precipitation variations at two meteorological stations on eastern slope of Gongga Mountain, SW China in the past two decades [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, **10**(3): 370–377.
- [48] 程根伟, 石培礼, 田雨. 西南山地森林变化对洪水频率影响的模拟[J]. *山地学报*, 2011, **29**(5): 561–565. [CHENG Genwei, SHI Peili, TIAN Yu. Simulation of Forest Impacts to the Flood Frequency Characteristics of Mountainous River in Southwestern China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, **29**(5): 561–565]
- [49] KEENAN TF, et al. Increase in forest water-use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise [J]. *Nature*, 2013, **499**(7458): 324–327.
- [50] BEER C, et al. Temporal and among-site variability of inherent water use efficiency at the ecosystem level [J]. *Global biogeochemical cycles*, 2009, **23**(2): GB2018.
- [51] JACKSON RB, et al. Trading water for carbon with biological carbon sequestration [J]. *Science*, 2005, **310**(5756): 1944–1947.
- [52] 王根绪, 刘国华, 沈泽昊, 王文志. 山地景观生态学研究进展[J]. *生态学报*, 2017, **37**(12): 3967–3981. [WANG Genxu, LIU Guohua, SHEN Zehao, WANG Wenzhi. Research progress and future perspectives on the landscape ecology of mountainous areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(12): 3967–3981]
- [53] YU G, et al. Water-use efficiency of forest ecosystems in eastern China and its relations to climatic variables [J]. *New Phytologist*, 2008, **177**(4): 927–937.
- [54] GOULDEN M, et al. Evapotranspiration along an elevation gradient in California's Sierra Nevada [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, **117**(G3): 13.
- [55] HULTINE K, MARSHALL J. Altitude trends in conifer leaf morphology and stable carbon isotope composition [J]. *Oecologia*, 2000, **123**(1): 32–40.
- [56] 胡中民, 于贵瑞, 王秋凤, 赵风华. 生态系统水分利用效率研究进展[J]. *生态学报*, 2009, **29**(3): 1498–1507. [HU Zhongmin, YU Guirui, WANG Qiufeng, ZHAO Fenghua. Ecosystem level water use efficiency: A review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(3): 1498–1507]
- [57] FARQUHAR GD, O'LEARY MH, BERRY JA. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves [J]. *Functional Plant Biology*, 1982, **9**(2): 121–137.
- [58] VITOUSEK PM, FIELD CB, MATSON PA. Variation in foliar  $\delta^{13}\text{C}$  in Hawaiian *Metrosideros* polymorpha: a case of internal resistance? [J] *Oecologia*, 1990, **84**(3): 362–370.
- [59] SLEEN P V D, GROENENDIJK P, VLAM M, et al. No growth stimulation of tropical trees by 150 years of  $\text{CO}_2$  fertilization but water-use efficiency increased [J]. *Nature geoscience*, 2015, **8**(1): 24–28.
- [60] FRANK D, et al. Water-use efficiency and transpiration across European forests during the Anthropocene [J]. *Nature climate change*, 2015, **5**(6): 579–583.
- [61] VAN PK, LEAVITT SW, BETANCOURT JL. Leaf delta  $^{13}\text{C}$  variability with elevation, slope aspect, and precipitation in the southwest United States [J]. *Oecologia*, 2002, **132**(3): 332–343.
- [62] TAYLOR SE, SEXTON OJ. Some implications of leaf tearing in Musaceae [J]. *Ecology*, 1972, **53**(1): 143–149.
- [63] PANEK JA, WARING RH. Carbon isotope variation in Douglas-fir foliage: improving the  $\delta^{13}\text{C}$ -climate relationship [J]. *Tree Physiology*, 1995, **15**(10): 657–663.
- [64] COCHARD H, et al. Temperature effects on hydraulic conductance and water relations of *Quercus robur* L [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2000, **51**(348): 1255–1259.
- [65] SMITH W, GELLER G. Plant transpiration at high elevations: theory, field measurements, and comparisons with desert plants [J]. *Oecologia*, 1979, **41**(1): 109–122.
- [66] JASECHKO S, et al. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration [J]. *Nature*, 2013, **496**(7445): 347–350.
- [67] COENDERSGERRITS AMJ, et al. Uncertainties in transpiration estimates [J]. *Nature*, 2014, **506**(7487).
- [68] BLÖSCHL G, SIVAPALAN M. Scale issues in hydrological modelling: a review [J]. *Hydrological processes*, 1995, **9**(3–4): 251–290.
- [69] LIN Y S, et al. Optimal stomatal behaviour around the world [J]. *Nature Climate Change*, 2015, **5**(5): 459–464.
- [70] D'ALMEIDA C, et al. The effects of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia: a review on scale and resolution [J]. *International Journal of Climatology*, 2007, **27**(5): 633–647.
- [71] ELLISON D, FUTTER MN, BISHOP K. On the forest cover-water yield debate: from demand to supply-side thinking [J]. *Global*



- Change Biology, 2012, **18**(3): 806–820.
- [72] WEILER M, MCDONNELL J. Virtual experiments: a new approach for improving process conceptualization in hillslope hydrology [J]. Journal of Hydrology, 2004, **285**(1): 3–18.
- [73] DELLA C, et al. Modelling changes in grassland hydrological cycling along an elevational gradient in the Alps [J]. Ecohydrology, 2014, **7**(6): 1453–1473.
- [74] FATICHI S, IVANOV V, CAPORALI E. A mechanistic ecohydrological model to investigate complex interactions in cold and warm water-controlled environments: 1. Theoretical framework and plot-scale analysis [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2012, **4**: M05002.

## A Review of Forest Hydrology Study and Its Spatial Pattern for Dark Coniferous Forest in Gongga Mountain, Southwest China

SUN Xiangyang, WANG Genxu

(Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The water cycle is intensified, variation of hydrological processes and water resource become more complicated in mountainous areas under global climate change. Understanding the water cycle of mountainous watersheds and its relationship with climate, vegetation and soil in the changing environment is the key issue of both global change and sustainable development of human society. Based on the study of the forest spatial heterogeneity effect on evapotranspiration, soil moisture, water balance and the coupled relationship between water and carbon in Gongga Mountain, a brief review was done to introduce the research work and scientific results in Gongga Mountain. Furthermore, three key scientific issues of mountainous hydrology under complex mountainous regions is put forward: (1) the research of vegetation-hydrology-soil continuum under SPAC system should be carried out systematically; (2) a multi-scale comprehensive research work of ecological hydrological process need to be done; (3) the hydrological model that can simulate the water cycle more accurately in complex mountainous regions still need to be developed.

**Keywords:** Gongga Mountain; forest ecosystem; spatial heterogeneity; water cycle; forest age