

文章编号: 1008-2786-(2020)1-050-12
DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000490

山地流域水文模拟研究进展与展望

陆文^{1,2}, 唐家良^{1*}, 章熙锋¹, 刘皓雯^{1,2}, 罗专溪³

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院城市环境研究所, 福建 厦门 361021)

摘 要: 山地水文循环是全球水循环的重要组成部分, 山地独特的地形特征、日趋变化的社会经济与新技术(遥感观测和信息科学)发展使得山地水文循环研究成为当前乃至未来水文学关注的热点。山地较大的垂直梯度浓缩了水平自然带的自然地理和生态学特征, 具有多样的环境敏感性, 因此山地水文过程对土地利用变化和气候变化的响应比平坦地区更为剧烈。明晰山地水文过程对区域防洪减灾、制定全球变化背景下区域水资源可持续利用策略、促进经济社会发展具有重要意义。水文模型是研究水循环的重要工具, 但山地产汇流机制的复杂性以及实测水文资料匮乏等一系列问题极大限制了山地水文模拟与预测工作。本文首先系统地从事数据获取、参数计算、模型结构、建模理论四个方面介绍了国内外山地水文模拟的研究进展, 并总结了经验模型、概念模型及基于物理机制的分布式水文模型在我国山地水文模拟中的应用进展, 之后从山地水文要素的空间变异性与垂直变异性、驱动力、数据不确定性、强烈的人为扰动等方面对当前山地水文模拟中面临的挑战与难点进行了论述。通过对国内外相关研究前沿的归纳, 从多过程耦合机理研究、山地自然-社会二元水循环理论、大数据背景下多源数据获取与同化研究等方面对我国未来山地水文模拟的工作方向进行了展望。

关键词: 水文模拟; 山地; 水循环; 分布式模型; 水文参数

中图分类号: P334+.92

文献标志码: A

山地以 24% 的陆地面积提供了 80% 以上的陆地淡水资源^[1-2], 山地作为“水塔”是区域乃至全球水循环的重要组成部分, 也是水文学研究的核心区域。山地流域水文过程对山地及下游水资源量、植被状况、气候特征、生物地球化学过程和社会经济都有重要影响^[3-4]。理解山地水资源的产生、转化、迁移、耗散状况不仅有助于深入了解区域水量、能量平衡和生物地球化学循环, 促进水资源合理利用和经济快速发展, 而且有助于防范洪水、泥石流等局部短时强降雨引发的自然灾害。

水文模型通过数学方式对复杂水文系统和水文过程进行模拟和简化体现, 水文模型的发展不仅为认识水循环过程提供了有效工具, 还在水文预报、水资源规划和管理等方面发挥了重要作用^[5]。从 1851 年 Mulvaney 提出推理公式至今, 水文模型的发展经历了三个阶段, 分别是不具物理基础的经验模型、具有一定物理基础和一定经验性的概念性模型、基于物理机制的水文模型。尽管自水文模型诞生之日起, 其主要研究对象就是山地, 大多数水文模型都以山坡水文学为基础, 但目前“山地水文建模”仍然

收稿日期 (Received date): 2019-07-20; **改回日期** (Accepted date): 2019-12-17

基金项目 (Foundation item): 国家科技重大专项 (2017ZX07101001-02); 中国科学院成都山地所“一三五”方向性项目 (SDS-135-1702); 国家自然科学基金项目 (41371241)。[National Science and Technology Major Project (2017ZX07101001-02); The 135 Strategic Program of the Institute of Mountain Hazards and Environment of CAS (SDS-135-1702); National Nature Science Foundation of China (41371241)]

作者简介 (Biography): 陆文 (1996-), 男, 硕士研究生, 湖南岳阳人, 主要从事水文模拟研究。[LU Wen (1996-), male, born in Yueyang, Hunan province, M. Sc. Candidate, research on hydrological simulation] E-mail: luwen@imde.ac.cn

*** 通讯作者** (Corresponding author): 唐家良 (1975-), 男, 研究员, 四川隆昌人, 主要从事流域水文研究。[TANG Jialiang (1975-), male, professor, specialized in watershed hydrology] E-mail: jltang@imde.ac.cn

面临着对复杂产汇流机制认识不足、资料匮乏、对“水、土、气、生”等自然地理过程的内在联系以及自然—社会耦合系统的协同演化机制认识不足、结果有效性与可信性不足、洪水预报精度较低与预见期较短等问题,复杂山地流域水文建模还将是未来水文学的研究难点。本文着重介绍山地水文建模在“数据获取与应用”和自然—社会二元相互作用方面的研究进展及不同水文循环理论和模型在我国山地流域的应用进展,归纳了目前山地水文建模研究中的难点与挑战,并对未来山地流域水文模拟工作进行展望。

1 山地水文模拟研究进展

山地较大的垂直梯度浓缩了水平自然带的自然地理和生态学特征,具有多样的环境敏感性,因此山地生态水文过程对全球变化的响应比平坦地区更为剧烈^[1]。随着全球变化不断加剧,20世纪90年代以后山地水文模拟逐步成为水文学研究的热点领域。由于绝大多数山地是缺资料或无资料地区,现有水文模型无法在山地有效应用,为解决山地和其他无资料地区水文模拟的难题,国际水文科学学会提出了PUB(Predictions in Ungauged Basins)计划,在该计划的推动下,众多研究从水文模型的数据获取、参数估计、模型结构三个方面开展了山地水文建模数据获取与应用方面的工作。

在数据获取方面,随着遥感技术的迅速发展,当前已有一系列遥感数据集提供包括降水、水汽、土壤湿度、蒸散、植被覆盖、地下水、冰川等水文建模要素资料^[6],同时也发展了一系列遥感数据尺度转换方法^[7-8],但总体来看,对于山地而言遥感数据时空分辨率相对较低,难以满足山地建模工作的需要。为弥补遥感技术的不足,具有高时空分辨率的雷达技术也被应用于建模工作之中,如气象雷达被应用于流域尺度降水数据的实时获取^[9],激光雷达被应用于获取超高精度的DEM(Digital Elevation Model)图像^[10],但从雷达技术本身来看也存在容易受下垫面影响、覆盖范围有限等缺点,因此地面观测仍然非常有价值。一些新的地面观测手段逐渐成为建模数据的重要来源,如山区居民粗略观测降雨量和洪水特征以弥补地面观测站点的不足^[11],基于摄像头视屏

的雨量观测方法等^[12]。这些方法为建立高时空分辨率、低成本的观测网络提供了初步的解决方法,为遥感、雷达数据提供了有效的补充,对山地等缺资料或无资料地区水文建模非常重要。

在参数计算方面,比较流域之间的气候、地形地貌特征、土地利用、径流系数等流量响应特征,建立有资料和无资料流域参数移植的方法是解决山地等缺资料或无资料地区水文模拟难题的重要手段。当前参数移植主要包括两种方法,一是建立校准参数与流域特征的回归关系实现参数移植^[13-14];二是从一个或多个相似流域直接移植参数^[15-16]。但学术界目前仍然缺乏统一的参数移植理论方法,不同地区评价流域相似性的标准往往是不一样的。Singh^[17]在全美国范围进行参数移植工作时指出,对整个美国来说参数移植成功取决于高程、气候、流量特征的相似性,而对于美国东部山区来说,参数移植的关键在于排水面积、地形、气候的相似性,而在潮湿的平原区农业土地利用方式的相似性是决定参数移植是否成功的关键。我国上世纪60年代开始便一直开展相关研究,刘苏峡等通过总结过去数十年的研究进展与经验提出了三种无资料山地水文模拟方法:直接移植法、间接移植法和替代法^[18],这些方法不再关注研究区有无资料,而是从机理上考虑水文问题,但这些方法还不能用数学方式清晰地表达。

在模型结构方面,模型结构不确定性以及网络化建模较为引人关注。在实际研究中往往将结构不确定性和数据不确定性都归于参数不确定性,比如SWAT-CUP(SWAT Calibration and Uncertainty Programs)就用参数不确定性结果代表模型整体的不确定性,此过程易产生参数过度校正的问题^[19]。近年来一些学者针对模型结构的不确定性开展研究^[20],揭示了一种全新的水文建模思路,即先建立一个先验模型结构,用模型结构适应观测数据,当观测数据需要时才加入复杂模块,这与传统的建模理论正好相反。在这一思路的指引下,Leavesley等^[21]提出了灵活建模框架MMS(Modular Modeling System),该框架允许用户根据流域特点选择建模模块。山地建模资料有限,根据结构不确定性分析找到最能适应山地建模资料的模型结构对山地水文模拟工作具有重要意义,因此这一思路被广泛应用于

山地水文建模工作之中^[22-23]。

网络化建模是指将模型运行于具有强大数据存储与计算能力的平台,云平台、集群技术的发展为网络化建模提供了基础支撑。网络化建模在山地洪水实时预报方面具有明显优势,逐步成为山地水文建模的重要途径^[24-26]。

20 世纪 90 年代后,人一水之间的互动关系逐步为研究者所重视,国外学者相继提出综合水资源管理^[27]、社会水文学概念^[28],我国学者王浩^[29]也提出了自然—社会二元水循环理论。基于这些概念框架,国内外学者从水资源^[30]、水生态^[31-32]、水管理^[33-34]等方面进行了诸多研究。目前,国际水文科学学会最新 10 年计划也以“变化中的水文循环与社会系统”为研究主题^[35],部分研究已逐渐将社会水文学和自然—社会二元水循环的框架与理论纳入到水文模拟中^[36]。

2 水文模型在山地应用进展

近二三十年来国内水文模拟研究以基于物理机制的分布式水文模型为主。但在山地,尤其是在山地洪水预报工作中,限于对复杂产汇流机制的认识,经验模型和概念性模型仍有较多应用。

2.1 经验模型在山地水文研究中的应用

经验模型又称系统理论模型、黑箱模型,常见的经验模型有单位线、神经网络、支持向量机、Kalman 算法、小波分析或这些方法的组合等。这类模型主要用于不同条件下的产汇流计算和水文频率分析。一般而言,传统单位线适用于水文数据丰富的地区,且计算量较大,瞬时单位线则可以用于无资料地区且精度较高^[37]。部分案例显示,BP (Back Propagation Network) 神经网络模型对径流峰值和谷值区域拟合效果较差,可能原因是 BP 模型无法识别各径流阶段的主要影响因素,高流量、低流量信息被当做噪声过滤所造成^[38]。Kalman 算法在实际的径流预报中也表现出类似特点,峰值预报结果偏低、谷值预报结果偏高,这主要是因为 Kalman 算法本身在计算过程中带有“均化”特点^[39]。小波网络收敛速度较快但易陷入局部极小等问题,因此小波变换存在计算冗余,且结果强烈依赖于小波函数的选择,不同小波函数得到的结果往

往差距很大^[40-41]。支持向量机对小样本、非线性、高维数问题有较强的处理能力,但核函数与核参数的选择仍有待进一步研究^[41]。

2.2 概念模型在山地水文研究中的应用

只考虑输出精度而忽略水循环内部过程的水文模型不足以满足山地水文研究的需要。概念性模型将物理概念和经验公式相结合,常见的概念模型有 Sacramento、Tank、SCS (Soil Conservation Service)、HSPF (Hydrological Simulation Program Fortran)、API (Antecedent Precipitation Index)、HBV (Hydrologiska Byrans Vattenbalanssektions Model)、新安江模型和 Topmodel 等。其中新安江模型是赵人俊教授提出的具有世界影响力的模型,也是我国目前在洪水预报中最常用的模型之一^[42]。此外,许多研究也尝试对国外成熟概念模型进行适宜性修正,使之在应用中更符合区域水循环的实际特点,以满足我国的水资源研究的需要^[43-47]。与此同时,随着分布式水文模拟思想的提出与发展,具有分布式特征的概念模型应运而生,HSPF、Topmodel 模型便是典型代表。这类模型既能在一定程度上反应水文要素的空间分异,同时对建模资料的要求也相对较低,因此在山地水文模拟中应用比较广泛^[48-49]。总体而言,集总式概念模型在实践过程中虽然衍生出许多改进策略,但概念性模型对具有明显差异性的不同空间尺度水文过程进行刻画和模拟的能力仍然较差。

随着人类对自然水循环的干扰程度不断增大,水循环开始展现出越来越明显的自然—人工二元特征,与之对应的是水文建模的思想也从单一的自然水循环模拟转向自然—人工综合建模乃至社会水文模拟^[27-28]。限于对二元水循环系统协同演化机制的定量关系认识不足,目前许多研究将社会模型与概念性模型进行耦合以研究水文、经济、生态、社会的协同演化机制^[50-51]。

2.3 物理机制模型在山地水文研究中的应用

基于物理机制的分布式水文模型最早于 20 世纪 60 年代末被提出,相比于经验模型和概念性模型,分布式水文模型充分考虑了水文要素和地理要素的时空变化,具有更强的物理机制,能更好地刻画水文循环过程,其突出特点是与 RS (Remote Sensing)、GIS (Geographic Information System) 结合,通过 RS、GIS 获取分布式的下垫面参数以驱动

模型,可为无资料山地水文预报提供更好的支撑。常用的分布式水文模型有 SWAT (Soil & Water Assessment Tool)、MIKESHE、DHSVM (Distributed Hydrology Soil Vegetation Model)、VIC (Variable infiltration Capacity)、TOPKAPI (Topographic Kinematic Approximation and Integration)、DTVGM (Distributed Time Variant Gain Model)等。在我国,这些模型的系统应用主要集中于黑河上游山区、天山西部。如王中根等^[52]最先将 SWAT 模型引入黑河干流山区水文模拟当中,之后其他研究陆续对 SWAT 模型做了改进并应用于黑河干流山区的水文模拟研究,模型模拟结果都比较好^[53-55]。同时,为更好地刻画实际水文过程,考虑能量平衡和多种产流机制的水文模型如 VIC、DHSVM 等模型也被广泛应用^[56-57]。在总结前人研究经验的基础上,我国学者也提出了一些水文模拟思想并开发了相应的分布式水文模型。如夏军等^[58]将水文循环空间数字化信息和水文系统理论相结合,开发了 DTVGM 模型,并将其应用于黑河干流山区。

传统的分布式水文模型主要还是局限于从水文学范围内研究水文过程,尽管这些传统模型还具有比较广泛的应用,但反应多过程相互影响的模型研究越来越多。将气候模式与水文模型耦合^[59-60]或利用生态水文模型^[61-62]研究全球变化条件下水循环与其他过程的互动关系逐步成为山地水文模拟工作的重要发展趋势。

随着自然—社会二元水循环理论的不完善,越来越多的研究尝试利用复杂的分布式模型刻画人—水互动关系,如将城市扩张模型、水分配模型、水文模型结合起来模拟气候变化和城市化等经济活动对水资源的影响^[63]。有研究者将流域水文模型、人工水平衡模型和地下水模型结合起来构建区域水资源与水环境综合模拟模型^[64]。这类模型实际上是认为水资源的开发利用与管理是一个多目标问题,不仅涉及水资源系统本身还涉及经济、环境、社会等系统,其研究的最终目的是通过研究宏观经济系统、生态环境系统与水资源系统的相互作用机制,利用水资源的合理配置以保证社会经济的快速发展,目前已有一些研究尝试利用这类模型辅助区域发展战略决策。如贾仰文等^[65]将分布式流域水文模型(Water and Energy Transfer Process)、水资源调

配模型和多目标决策模型结合起来构建海河流域二元水循环模型,以研究保证区域经济发展的水资源合理配置模式。

3 山地水文模拟的难点与研究展望

3.1 山地水文模拟的难点

山地水文模拟的首要挑战在于山地产汇流机制复杂且认识有限。地形是影响区域降水、气温、土壤、土地利用空间分布的主导因子^[66],也是影响产汇流机制的首要因子,土壤与下垫面因子对山地产汇流机制也有重要影响。对产汇流要素的考虑衍生出两种模拟思路,一是通过描述流域地形实现水文模拟,如 Topmodel,二是描述地形、土壤、土地利用等因素实现水文模拟,如 SWAT。第一种模型没有考虑土壤等下垫面因子的空间变异性对产汇流过程与机制的影响,而大多数第二种模型虽然考虑了土壤特性的空间异质性,对产流过程刻画比较细致,但却没有考虑产流机制的异质性。事实上土壤和土壤水作为连接地表水和地下水的重要纽带,其特性对下渗、蒸发等过程都有重要影响。土壤异质性与前期土壤湿度、降水的空间异质性交织将导致产流机制的时空异质性^[67],在下垫面离散单元(网格、子流域)划分较大时,产流机制的时空异质性还体现于离散单元内部,特别是在与大中尺度气候模式耦合时,网格内的异质性往往比较大。此外,一些特殊的土壤性质与下垫面结构如土壤膨胀性、土石二元结构也使得山地水循环规律更为复杂。土壤胀缩产生的裂隙可能促进优先流的形成^[68],同时减小坡面流流速、单宽流量、雷诺数^[69],当前模型描述刚性土壤水分运动过程的理论并不适用于膨胀性土壤。另一方面,基岩为可溶性岩石的山地,包气带形成大量的溶沟、裂隙,坡面径流与壤中流存在复杂的交互过程^[70-71],而常规分布式水文模型往往忽略了特殊的土壤、下垫面结构对山坡产汇流的影响,导致山地径流模拟精度不高。

山地水热条件、植被类型与生长状况等水文要素除具有明显的空间异质性外,还具有明显的垂直地带异质性,海拔梯度、地形起伏、地表覆盖在一定的空间尺度上镶嵌复合^[72-73]。随着海拔上升,太阳辐射增强、气温下降,复杂的地形使得水热条件的空间异质性大大加强,进而导致土壤发育和植被也展

现出垂直分异,从而对区域产汇流过程造成影响。当前,水文模型能较好地描述水文要素的水平空间变异,但在描述水文要素的垂直变异方面存在明显不足,量化水文要素的空间、垂直异质性及其水文效应是当前山地水文模拟的难题。

产汇流过程具有复杂的相态变化特征,因此产汇流过程不仅遵从水量平衡法则,还遵从能量平衡法则。在气候变化的背景下,陆气间的能量交换和水热条件发生变化,进而改变区域的产汇流过程,山地作为对气候变化最敏感的区域,气候变化对产汇流过程的影响将更为剧烈。目前大多数水文模型仅考虑水量平衡,尽管已有许多研究从土壤冻融^[74]、冰川和降雪融化^[75]等方面耦合了能量平衡机制,但对单一过程的改进隔离了水循环多相态之间复杂的相互作用关系^[76],也未建立水分相变、能量传递对模拟参数的反馈机制^[77]。建立反应复杂相态变化的分布式水热耦合模型仍是当前山地水文模拟亟待解决的问题。

山地产汇流过程还具有明显的尺度效应。从径流小区、山坡尺度到流域尺度之间的产汇流规律存在明显差异^[36],但目前的产汇流基础理论和研究主要针对单次降雨事件下小区和山坡尺度的产汇流机制^[78-81],并直接升尺度应用于流域水文模型之中,这可能存在逻辑性的错误。一方面较大尺度条件下人类活动的空间变异性和地貌特征对水文连通性和水文响应有重要影响^[82],另一方面不同尺度的水文过程对环境因子的敏感性也有差异^[83]。Zhang等^[82]研究海河流域上游山区水文过程的尺度效应时就指出,大尺度流域影响径流过程的敏感性因子较少,其中气候因子是影响径流过程的首要因素,植被和土地利用因子的影响主要体现于中小尺度。山地复杂而陡峭的地形导致降水强度、大气、土壤湿度、植被、地下水等水文要素在短距离内迅速变化,使得尺度效应更明显,尽管已有许多研究从蒸散发^[84-85]、森林覆盖^[86-87]、土壤特性^[88-90]等过程研究了不同尺度的水循环机理,但目前对高异质性山地多过程(特别在山地极端水文事件下)、多尺度的水循环机制的认识仍然不足,因此较难建立合适的水文模型。

自然水循环过程已经与人类社会活动形成了耦合系统,山地(尤其是我国山地)作为下游地区水

塔,其水循环受到人类活动的广泛干预,水循环表现出明显的自然—人工二元特性。一方面大规模取水形成的“取水—给水—用水—排水—污水处理—再生利用”社会水循环与“降水—坡面—河道—地下”自然水循环相互耦合,甚至在我国北方许多地区社会水循环通量占据主导地位,另一方面人类活动改变了流域下垫面,使得流域水文特性和水文响应发生改变^[29],导致基于自然水循环的水文模型不能满足山地水文模拟与预测的需要。目前自然—社会二元水循环理论仍有待完善,在水资源“量—质—效”统一度量与转化问题和水循环系统与人类社会系统的协同演化与反馈机制等方面仍有待深入研究^[91]。如何将复杂高异质性山地水文模型与气候模型、水资源配置模型、宏观经济多目标决策模型结合起来刻画自然、社会系统之间复杂的非线性互动关系,从而为区域水资源的合理调配提供科学依据是山地水文建模的难题。

山地水文模拟中的重要挑战还在于水文资料匮乏,使得山地水文建模工作不具备基础数据支撑,导致模拟结果难以检验,这使得分布式物理水文模型详尽但又具有较大不确定性的分布式输出失去了意义^[36,92]。尽管已经有一系列遥感数据产品,但这些产品本身就具有不确定性,以降水为例,不同数据产品在降水量和降水变化幅度上具有明显差异,甚至年差异可达300 mm^[93]。遥感数据的时空尺度也往往与山地水文模拟不相匹配,山地水文建模需要百米级的空间分辨率,而大部分数据集的分辨率低于5 km×5 km,往往一些中小流域在空间上只能覆盖这些数据集中的几个、几十个栅格,这必将导致高异质性山地细节信息的缺失,从而加大水文模拟的不确定性。在时间尺度上,除部分降水数据集外,大多数数据产品往往是日尺度甚至更长的时间尺度,而山地水文预报往往需要小时尺度的数据,如何在空间与时间上开发有效的尺度转换算法是山地流域水文模拟的关键技术难题。在一些特定的山地水文过程中,遥感技术尚不能发挥很好的作用,比如对融雪径流、冰川融化的反演能力还较差^[6],使得遥感数据在山地应用受到限制。

平原区的地形地貌相对均一,一些参数在较大的范围内变化不明显,参数的空间集总性较强,模型模拟过程中计算单元并不需要划分得很精细就可以

达到较好的模拟精度,而山地复杂的地形地貌导致参数空间异质性大大增强,在很小的范围内模型参数就可能发生剧烈变化,这使得山地水文过程的不均匀性和变异性更为突出,尺度效应更为严重。在此基础上,要想得到参数唯一的模拟单元就必须对模拟区域进行更加精细的划分,正因为此山地水文模拟的参数总量比平坦地区更大,“异参同效”问题可能愈发凸显,由此导致山地水文模型参数确定和率定工作更为复杂,参数不确定性更强。尽管一些研究已经提出了一些无需参数率定的水文模型方法^[94],但这些方法还不成熟,参数率定仍然是山地水文模拟的难点^[36]。

3.2 未来研究展望

在当前对复杂山地产汇流理论及其他水文循环物理过程深入研究的背景下,未来应着重从以下几个方面开展研究。

3.2.1 多过程耦合观测条件下山地水文过程机理研究

当前,所有模型都基于固定公式和关系,然而山地复杂的地形和产汇流机制以及模型参数对气候、生态和土地利用变化的敏感性使得这些基本公式和关系迅速变化,山地水循环机理更加复杂。从水文、土壤、气候、生态等地理过程开展多尺度、多过程耦合的观测与实验,探索不同尺度地理要素空间变异的内在联系,发展单变量与多变量的系统耦合与解耦方法是认清山地水循环的重要基础^[36],也是实现山地水文模拟的重要手段。

3.2.2 自然—社会二元水循环理论研究

我国山区特别是北方山区水循环受到人类活动的强烈影响,表现出明显的二元水循环特征^[91]。针对“全球变化背景下如何科学配置水资源以实现可持续发展”这一问题,亟需能反映水与社会系统复杂耦合机制的水循环理论与模拟方法。加强社会水循环的观测网络,定量评价社会因子对水循环的影响,应明确涉及水利用和管理的各种因素针对政策和技术变化的各种响应情景,这些措施对于预测未来水资源需求、取水和消费如何发展具有重要意义^[95]。

3.2.3 大数据背景下的多源数据利用与同化

遥感技术使得水文模拟工作进入了大数据时代,为缺资料山地水文模拟提供了可能,然而从遥感技术本身来看,存在不确定性突出、容易受天气影

响、时间分辨率和空间分辨率难以平衡、时空分辨率与山地水文建模工作不相匹配、缺乏统一的从遥感数据提取水文参数的方法等问题^[5]。单单依靠遥感数据不能完全解决山地水文模拟难题,提高遥感观测的稳定性和时空分辨率,发展从遥感数据中挖掘关键参数的能力,同时融合雷达、新型地面观测技术、模式预报等手段,开展不同遥感数据集的自我验证、交叉验证以及与其他观测手段的相互验证从而降低不确定性,是获取高异质性山地高精度建模资料的重要手段,也是未来很长一段时间山地水文建模的研究热点。

此外,应着力开展山地比较水文学研究,Sivapalan^[96]指出“与其研究每一个流域的具体水文过程,不如加强比较水文学的研究”。传统的地面观测费时费力,系统地大面积监测全国各地的流域不切实际,因此传统地面观测主要集中于典型流域,如何从这些宝贵的实测数据中建立基于流域特征的参数移植体系是解决山地水文模拟难题的重要途径。

传统水文模型率定时都以径流为参考,这是因为水文模拟中径流是最直观的输出变量,但基于单因素的模型参数优化极有可能导致模型的其他变量产生较大偏差甚至不符合实际。在保证径流模拟精度的同时,利用遥感获取的土壤湿度、蒸散等中间变量矫正中间水文过程有助于降低模型模拟的不确定性,从而更好地刻画山地水文过程。

3.2.4 网络化建模技术研究

山地空间异质性较大,使得水文单元必须划分的更小,遥感等观测技术分辨率的提高以及与其他过程耦合使得输入数据更加庞大,自然水循环模型与社会模型的耦合也使得模型更为复杂,因此无论从数据计算能力还是数据管理能力来看,本地模式的水文模型都不足以满足山地水文模拟研究的需要。从应用和流域管理的角度来看,本地模式的水文模型主要是个体用户使用,其对用户的专业知识要求很高^[97],仅靠个体用户的知识显然不足以完成以水循环为纽带的复杂系统建模工作。此外,本地模式模式的计算速度与综合多方面信息的能力也不足以满足山地洪水实时预报的要求。网络化建模在处理这些问题时具有明显优势,网络化建模能集成多方面专家的知识与决策^[36],具有强大的数据管

理、计算能力,为多源数据的选择与利用提供了坚实基础,更重要的是网络模式的模型便于与管理系统耦合,从而使得水文模型真正在洪水预报和水资源管理中发挥作用。因此,将模型运行于计算和管理能力更为强大的服务终端将是未来山地水文模拟发展的重要趋势。

3.2.5 复杂山地(如喀斯特地区)水文建模

我国西南地区是典型的复杂山地区,既有海拔落差较大的横断山区,也有地貌较为破碎的低山丘陵区。西南喀斯特山地区具有特殊的二元地质系统,该区地表水和地下水交换频繁且难以区分,水流运动并不完全遵从达西定律,除强烈的地表土壤侵蚀外,还有土壤渗漏和地下土壤侵蚀、土壤层移动等特殊土壤再分配过程,其水循环规律随地下岩溶发育不断变化^[98],导致现有基于物理机制的水文模型难以应用于喀斯特地区。当前喀斯特山地水文模拟以概念性集总式水文模型为主^[99],这些模型尽管能较好的刻画地下水补给,有较高的径流预报精度,但在刻画喀斯特地区“水、土、气、生”的相互作用方面无能为力。在全球变化背景下,发展动态观测地下孔隙分布和水文连通性的技术以准确获取不同尺度的水力传导系数等关键参数,研究复杂岩性和地表覆被条件下的产流模式、汇流路径,定量建立土壤、基岩裂隙水文运移与植被、大气等关键要素过程的水文联系,发展基于物理机制和能反映较长时期内岩溶水文特征变化的分布式水文模型,是未来喀斯特山地区水文模拟的重要方向。

4 结语

基于 GIS 和 RS 技术的分布式水文模型将是未来水文模拟研究的理想工具,是未来水文模型发展的主要方向,尤其对于复杂山区而言,其独特的脊薄土层、岩石裂隙特征及其对基流过程的影响将是未来分布式水文模型重点关注的内容。同时也需加强灌溉、水库、经济、政策等社会活动影响下的水文循环模拟。针对全球变化背景下山地水循环模拟问题,开发适宜的山地水文模型,对全球陆地水文模型的发展有着十分重要的理论价值和现实意义,也是我国未来经济社会发展的重大需求。在开发模型的同时应进一步加强山地流域水文过程的实地测验与调查。

参考文献(References)

- [1] 王根绪,邓伟,杨艳,等. 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, et al. The advances priority and developing trend of alpine ecology [J]. Mountain Research, 2011, 29(2): 129-140]
- [2] MARTIN L B, LEISTER I, CRUZ P L, et al. Nature's contributions to people in mountains: a review [J]. Plos One, 2019, 14(6): 1-24.
- [3] HOCK R. Glacier melt: a review of processes and their modelling [J]. Progress in Physical Geography, 2005, 29(3): 362-391.
- [4] JONES D B, HARRISON S, ANDERSON K, et al. Rock glaciers and mountain hydrology: a review [J]. Earth-Science Reviews, 2019, 193: 66-90.
- [5] 徐宗学. 水文模型: 回顾与展望 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010(3): 278-289. [XU Zongxue. Hydrological models: past, present and future [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2010(3): 278-289]
- [6] CUI Xintong, GUO Xiaoyu, WANG Yidi, et al. Application of remote sensing to water environmental processes under a changing climate [J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 892-902.
- [7] ZHANG Yueyuan, LI Yungang, JI Xuan, et al. Fine-Resolution precipitation mapping in a mountainous watershed: geostatistical downscaling of TRMM products based on environmental variables [J]. Remote Sensing, 2018, 10(1): 1-27.
- [8] ZHAN Chesheng, HAN Jian, HU Shi, et al. Spatial downscaling of GPM annual and monthly precipitation using regression-based algorithms in a mountainous area [J]. Advances in Meteorology, 2018, 1-13.
- [9] CREUTIN J D, BORGA M. Radar hydrology modifies the monitoring of flash-flood hazard [J]. Hydrological Processes, 2003, 17(7): 1453-1456.
- [10] JONES K L, POOLE G C, O'DANIEL S J, et al. Surface hydrology of low-relief landscapes: assessing surface water flow impedance using LIDAR-derived digital elevation models [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(11): 4148-4158.
- [11] 李铁键, 李家叶, 史海匀, 等. 基于智能手机互动的资料缺乏山区洪水预警系统 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013(1): 23-27. [LI Tiejian, LI Jiaye, SHI Haiyun, et al. A smartphone-based interactive flood warning system for ungauged mountainous regions [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013(1): 23-27]
- [12] JIANG Shijie, Babovic V, Zheng Yi, et al. Advancing opportunistic sensing in hydrology: a novel approach to measuring rainfall with ordinary surveillance cameras [J]. Water Resource Research, 2019, 55(4): 3004-3027.
- [13] PARAJKA J, MERZ R, BLOSCHE G. A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2005, 9(3): 157-171.

- [14] OUDIN L, KAY A, ANDREASSIAN V, et al. Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar [J]. *Water Resources Research*, 2010, **46**: 1 – 15.
- [15] OUDIN L, ANDREASSIAN V, PERRIN C, et al. Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: a comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments [J]. *Water Resources Research*, 2008, **44**(3): 1 – 15.
- [16] ZHANG Yongqiang, CHIEW FHS. Relative merits of different methods for runoff predictions in ungauged catchments [J]. *Water Resources Research*, 2009, **45**: 1 – 13.
- [17] SINGH R, ARCHFIELD SA, WAGENER T. Identifying dominant controls on hydrologic parameter transfer from gauged to ungauged catchments – a comparative hydrology approach [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, **517**: 985 – 996.
- [18] 刘苏峡, 刘昌明, 赵卫民. 无测站流域水文预测(PUB)的研究方法[J]. *地理科学进展*, 2010(11): 1333 – 1339. [LIU Suxia, LIU Changming, ZHAO Weiming. Towards the methodology for predictions in Ungauged Basins [J]. *Progress In Geography*, 2010(11): 1333 – 1339]
- [19] MOGES E, DEMISSIE Y, LI H Y. Hierarchical mixture of experts and diagnostic modeling approach to reduce hydrologic model structural uncertainty [J]. *Water Resources Research*, 2016, **52**(4): 2551 – 2570.
- [20] SHIN M J, GUILLAUME J H A, CROKE B F W, et al. A review of foundational methods for checking the structural identifiability of models: results for rainfall-runoff [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, **520**: 1 – 16.
- [21] LEAVESLEY G H, MARKSTROM S L, BREWER M S, et al. The modular modeling system (MMS) – The physical process modeling component of a database-centered decision support system for water and power management [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1996, **90**(1–2): 303 – 311.
- [22] HUBLART P, RUELLAND D, DEZETTER A, et al. Reducing structural uncertainty in conceptual hydrological modelling in the semi-arid Andes [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, **19**(5): 2295 – 2314.
- [23] 龚伟, 杨大文. 水文变量高维非线性相关分析与水文模型结构不确定性评估[J]. *水力发电学报*, 2013, **32**(5): 13 – 20. [GONG Wei, YANG Dawen. High-dimensional nonlinear correlation analysis of hydrological variables and model structure uncertainty qualification [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, **32**(5): 13 – 20]
- [24] HORAK J, ORLIK A, STROMSKY J. Web services for distributed and interoperable hydro-information systems [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2008, **12**(2): 635 – 644.
- [25] CASTRONOVA A M, GOODALL J L, ELAG M M. Models as web services using the Open Geospatial Consortium (OGC) Web Processing Service (WPS) standard [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2013, **41**: 72 – 83.
- [26] 李致家, 姚成, 张珂, 等. 基于网格的精细化降雨径流水文模型及其在洪水预报中的应用[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2017, **45**(6): 471 – 480. [LI Zhijia, YAO Cheng, ZHANG ke, et al. Research and application of the high-resolution rainfall runoff hydrological model in flood forecasting [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2017, **45**(6): 471 – 480]
- [27] JAKEMAN A J, LETCHER R A. Integrated assessment and modelling: features, principles and examples for catchment management [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2003, **18**(6): 491 – 501.
- [28] SIVAPALAN M, SAVENIJE H H G, BLOSCHL G. Socio-hydrology: A new science of people and water [J]. *Hydrological Processes*, 2012, **26**(8): 1270 – 1276.
- [29] 王浩, 王建华, 秦大庸, 等. 基于二元水循环模式的水资源评价理论方法[J]. *水利学报*, 2006(12): 1496 – 1502. [WANG Hao, WANG Jianhua, QIN Dayong, et al. Theory and methodology of water resources assessment based on dualistic water cycle model [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006(12): 1496 – 1502]
- [30] 高前兆, 仵彦卿. 河西内陆河流域的水循环分析[J]. *水科学进展*, 2004(3): 391 – 396. [GAO Qianzhan, WU Yanqing. Analysis of water cycle in inland river basins in Hexi Region [J]. *Advances in Water Science*, 2004(3): 391 – 396]
- [31] El Sawah S, Kelly R A, Beverly C, et al. An integrated model to examine the effects of Sustainable Diversion Limits: A case study in the Lower Campaspe catchment. Piantadosi J, Anderssen RS, Boland J, editors. Christchurch: Modelling & Simulation Soc Australia & New Zealand Inc., 2013, 2131 – 2137.
- [32] 张军民. 干旱区内陆河水文循环二元分化生态效应研究——以新疆玛纳斯河为例[J]. *水利经济*, 2006 **24**(6): 20 – 22. [ZHANG Junmin. Studies on the ecologic result of hydrology two dimension division in arid area; Case studies of Manas River basin in Xingjiang [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2006 **24**(6): 20 – 22]
- [33] ELSHAFEI Y, TONTS M, SIVAPALAN M, et al. Sensitivity of emergent sociohydrologic dynamics to internal system properties and external sociopolitical factors: implications for water management [J]. *Water Resources Research*, 2016, **52**(6): 4944 – 4966.
- [34] 刘德地, 陈晓宏, 刘丙军. 面向可持续发展的佛山市水资源优化配置[J]. *水资源保护*, 2008(6): 23 – 27. [LIU Dedi, CHEN Xiaohong, LIU Bingjun. Optimal allocation of water resources in southern humid area for sustainable development: a case study in Foshan City of Guangdong Province [J]. *Water Resources Protection*, 2008(6): 23 – 27]
- [35] MONTANARI A, YOUNG G, SAVENIJE HHG, et al. “Panta Rhei-Everything Flows”: Change in hydrology and society-the IAHS Scientific Decade 2013 – 2022 [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2013, **58**(6): 1256 – 1275.
- [36] BEVEN K. How to make advances in hydrological modelling [J]. *Hydrology Research*, 2019, **50**(6): 1481 – 1494.

- [37] 耿兵,张行南,夏达忠,等. 传统单位线和地貌瞬时单位线在腰古流域的对比研究 [J]. 水力发电,2016,42(5):12-15. [GENG Bing,ZHANG Xingnan,XIA Dazhong,et al. Comparative research on traditional UH and R-V GIUH in Yaogu basin [J]. Water Power,42(5):12-15]
- [38] 王海青. 基于人工神经网络模型的黑河流域径流模拟预报 [D]. 兰州:西北师范大学,2008:7-8. [WANG Haiqing. The simulation and predication of runoff in Heihe river basin based on the artificial neural network [D]. LanZhou: Northwest Normal University,2008:7-8]
- [39] 宋强. Kalman 滤波在黄河上游融雪期径流预报中的应用初探 [J]. 冰川冻土,1991(1):27-34. [SONG Qiang. Research on using Kalman filter in snowmelt runoff in the upper reaches of Yellow River [J]. Journal of Glaciology And Geocryology,1991(1):27-34]
- [40] 刘芳. 基于小波分析和相关向量机的非线性径流预报模型研究 [D]. 武汉:华中科技大学,2007:102-103. [LIU Fang. Research on the nonlinear streamflow forecast models using wavelet analysis and relevance vector machine [D]. WuHan: Huazhong University of Science & Technology, 2007:102-103]
- [41] 程扬,王伟,王晓青. 水文时间序列预测模型研究进展 [J]. 人民珠江,2019,40(7):18-23. [CHENG Yang,WANG Wei,WANG Xiaoqing. Research progress on hydrological time series prediction model [J]. Pearl River,2019,40(7):18-23]
- [42] 夏军,王慧筠,甘瑶瑶,等. 中国暴雨洪涝预报方法的研究进展 [J]. 暴雨灾害,2019,38(5):416-421. [XIA Jun,WANG Huiyun,GAN Yao,et al. Research progress in forecasting methods of rainstorm and flood disaster in China [J]. Torrential Rain and Disasters,2019,38(5):416-421]
- [43] 何应平,卢琼. 萨克拉门托流域水文模型在海滦河流域山区地表水和地下水蓄泄关系研究中的应用 [J]. 水利水电技术,1987(5):1-8. [HE Yingping, LU Qiong. Application of the sacramento model to the study of the relationship between surface water and groundwater storage and discharge in the Luan River basin [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,1987(5):1-8]
- [44] 陈正维,刘兴年,朱波. 基于 SCS-CN 模型的紫色土坡地径流预测 [J]. 农业工程学报,2014(7):72-81. [CHEN Zhengwei, LIU Xingnian, ZHU Bo. Runoff estimation in hillslope cropland of purple soil based on SCS-CN model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014(7):72-81]
- [45] 钟小燕,文磊,余钟波. 连续 API 模型在沂河临沂站径流预报中的应用 [J]. 人民长江,2017,48(13):26-30. [ZHONG Xiaoyan, WEN Lei, YU Zhongbo. Application of continuous API hydrological model at Linyi Hydrological station of Yihe River [J]. Yangtze River,2017,48(13):26-30]
- [46] 康尔泗,程国栋,蓝永超,等. 西北干旱区内陆河流域出山径流变化趋势对气候变化响应模型 [J]. 中国科学(D 辑:地球科学),1999(S1):47-54. [KANG Ersi, CHENG Guodong, LAN Yongchao,et al. Climate change response model of the trend of mountain runoff in the inland river basin in the arid area of Northwest China [J]. Science In China (Series D),1999(S1):47-54]
- [47] 许慧萍. 考虑季节性冻土的黄河源区流域水文 TANK 模型 [D]. 北京:中国地质大学(北京),2009:27-31. [XU Huiping. Tank model with migration of seasonal frozen soil In the original area of Yellow river [D]. Beijing :China University of Geosciences(Beijing),2009:27-31]
- [48] 白晓燕,丁华龙,陈晓宏. 基于 HSPF 模型的东江流域土地利用变化对径流影响研究 [J]. 灌溉排水学报,2014,33(2):58-63. [BAI Xiaoyan, DING Hualong, CHEN Xiaohong. Using the HSPF model to study the effects of precipitation on Nonpoint Source Pollution in Dongjiang Basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2014,33(2):58-63]
- [49] 索立涛,万军伟,卢学伟. TOPMODEL 模型在岩溶地区的改进与应用 [J]. 中国岩溶,2007(1):67-70. [SUO Litao, WAN Junwei, LU Xuewei. Improvement and application of TOPMODEL in karst region [J]. Carsologica Sinica,2007(1):67-70]
- [50] LIU Dengfeng, TIAN Fuqiang, LIN Mu, et al. A conceptual socio-hydrological model of the co-evolution of humans and water: case study of the Tarim River basin, western China [J]. Hydrology and Earth System Sciences. 2015,19(2):1035-1054.
- [51] 桑学锋,王浩,王建华,等. 水资源综合模拟与调配模型 WAS (I):模型原理与构建 [J]. 水利学报,2018,49(12):1451-1459. [SANG Xuefeng, WANG Hao, WANG Jianhua, et al. Water Resources Comprehensive Allocation and Simulation Model (WAS), part I. Theory and development [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2018,49(12):1451-1459.
- [52] 王中根,刘昌明,黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究 [J]. 地理科学进展,2003(1):79-86. [WANG Zhonggen, LIU Changming, HUANG Youbo. The theory of SWAT model and its application in Heihe basin [J]. Progress In Geography, 2003, (1):79-86]
- [53] 黄清华,张万昌. SWAT 分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进及应用 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2004(2):22-26. [HUANG Qinghua, ZHANG Wanchang. Improvement and application of GIS-based distributed SWAT hydrological modeling on high altitude, cold, semi-arid catchment of Heihe River basin, China [J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition),2004(2):22-26]
- [54] 赖正清,李硕,李呈罡,等. SWAT 模型在黑河上中游流域的改进与应用 [J]. 自然资源学报,2013(8):1404-1413. [LAI Zhengqing, LI Shuo, LI Chenggang, et al. Improvement and applications of SWAT model in the upper-middle Heihe River basin [J]. Journal of Natural Resources,2013(8):1404-1413]
- [55] 余文君,南卓铜,李硕,等. 黑河山区流域平均坡长的计算与径流模拟 [J]. 地球信息科学学报,2012(1):41-48. [YU Wenjun, NAN Zhuotong, LI Shuo, et al. Average slope length

- calculation and runoff simulation [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2012(1): 41 – 48]
- [56] 高瑞, 穆振侠. 天山西部山区 VIC 模型的应用 [J]. *南水北调与水利科技*, 2017(4): 44 – 48. [GAO Rui, MU Zhenxia. Application of VIC model in western Tianshan Mountains [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017(4): 44 – 48]
- [57] 康丽莉, 王守荣, 顾俊强. 分布式水文模型 DHSVM 对兰江流域径流变化的模拟试验 [J]. *热带气象学报*, 2008(2): 176 – 182. [KANG Lili, WANG Shourong, GU Junqiang. The simulation test of the distributed hydrological model DHSVM on the runoff change of Lanjiang River basin [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2008(2): 176 – 182]
- [58] 夏军, 王纲胜, 吕爱锋, 等. 分布式时变增益流域水循环模拟 [J]. *地理学报*, 2003(5): 789 – 796. [XIA Jun, WANG Gangsheng, LV Aifeng, et al. A research on distributed time variant gain model [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003(5): 789 – 796]
- [59] 阮宏威, 邹松兵, 陆志翔, 等. 耦合 SWAT 与 RIEMS 模拟黑河干流山区径流 [J]. *冰川冻土*, 2017(2): 384 – 394. [RUAN Hongwei, ZOU Songbing, LU Zhixiang, et al. Coupling SWAT and RIEMS to simulate mountainous runoff in the upper reaches of the Heihe river basin [J]. *Journal of Glaciology And Geocryology*, 2017(2): 384 – 394]
- [60] MENG Xianyong, SUN Zhiqun, ZHAO Honggang, et al. Spring flood forecasting based on the WRF-TSRM mode [J]. *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette*, 2018, 25(1): 141 – 151.
- [61] 张淑兰, 于澎涛, 张海军, 等. 泾河流域上游土石山区和黄土区森林覆盖率变化的水文影响模拟 [J]. *生态学报*, 2015(4): 1068 – 1078. [ZHANG Shulan, YU Pengtao, ZHANG H J, et al. A simulation study on the hydrological impacts of varying forest cover in the stony mountain area and loess area of the upper reaches of Jinghe Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015(4): 1068 – 1078]
- [62] WANG Yuhan, YANG Hanbo, GAO Bing, et al. Frozen ground degradation may reduce future runoff in the headwaters of an inland river on the northeastern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 1153 – 1164.
- [63] WU Feng, ZHAN Jinyan, Guneralp I. Present and future of urban water balance in the rapidly urbanizing Heihe River Basin, Northwest China [J]. *Ecological Modelling*. 2015, 318: 254 – 264.
- [64] 桑学锋, 秦大庸, 周祖昊, 等. 基于广义 ET 的水资源与水环境综合规划研究 III: 应用 [J]. *水利学报*, 2009, 40(12): 1409 – 1415. [SANG Xuefeng, QIN Dayong, ZHOU Zuhao, et al. Comprehensive water resources and environment planning based on generalized evaporation-transpiration water consumption control III: application [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(12): 1409 – 1415]
- [65] 贾仰文, 王浩, 周祖昊, 等. 海河流域二元水循环模型开发及其应用——I. 模型开发与验证 [J]. *水科学进展*, 2010, 21(1): 1 – 8. [JIA Yangwen, WANG Hao, ZHOU Zuhao, et al. Development and application of dualistic water cycle model in Haihe River Basin: I. Model development and validation [J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(1): 1 – 8]
- [66] 易路. 陆面水文模型 TOPX 的改进及其与区域气候模式 WRF 的耦合研究 [D]. 南京: 南京大学, 2018: 15 – 16. [YI Lu. Improvement of Land-surface Hydrological Model TOPX and its Coupling with Regional Climate Model WRF [D]. Nanjing: Nanjing University, 2018: 15 – 16]
- [67] LIANG Xu, XIE Zhenghui. A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models [J]. *Advances in Water Resources*, 2001, 24(9 – 10): 1173 – 1193.
- [68] 张中彬, 彭新华. 土壤裂隙及其优先流研究进展 [J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 477 – 488. [ZHANG Zhongbin, PENG Xinhua. A review of researches on soil cracks and their impacts on preferential flow [J]. *Acta pedologica sinica*, 2015, 52(3): 477 – 488]
- [69] 朱磊, 尤今, 陈玖泓. 裂隙网络对坡面流及土壤水分入渗影响 [J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(12): 95 – 100. [ZHU Lei, YOU Jin, Chen Jiuhong. Preferential flow model coupling soil matrix with fracture network and its validation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 36(12): 95 – 100]
- [70] 杨振华, 宋小庆. 西南喀斯特地区坡地产生流过程及其利用技术 [J]. *地球科学*, 2019, 44(9): 2931 – 2943. [YANG Zhenhua, SONG Xiaoqing. Slope runoff process and its utilization technology in southwest Karst area [J]. *Earth Science*, 2019, 44(9): 2931 – 2943]
- [71] 刘欢. 考虑产流机制空间差异的全国尺度分布式水文模型构建及应用 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019: 17 – 18. [LIU Huan. Development and application of distributed hydrological model at the China national scale considering the spatial difference of runoff generation mechanisms [D]. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019: 17 – 18]
- [72] 杜军凯. 考虑垂直地带性的山区分布式水文模拟与应用 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019: 1 – 2. [DU Junkai. Distributed hydrological simulation and application in mountainous areas considering vertical zonality [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019: 1 – 2]
- [73] SEVRUK B. Regional dependency of precipitation-altitude relationship in the Swiss Alps [J]. *Climatic Change*, 1997, 36(3 – 4): 355 – 369
- [74] 郭志强, 彭道黎, 徐明, 等. 季节性冻融土壤水热耦合运移模拟 [J]. *土壤学报*, 2014, 51(4): 816 – 823. [GUO Zhiqing, PENG Daoli, XU Ming, et al. Simulation of coupling transmission of water and heat in soil under seasonal freezing and thawing [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(4): 816 – 823]
- [75] GRIESSINGER N, SCHIRMER M, HELBIG N, et al. Implications

- of observation-enhanced energy-balance snowmelt simulations for runoff modeling of Alpine catchments [J]. *Advances in Water Resources*, 2019, **133**:1 – 12.
- [76] 刘少华. 怒江上游流域水循环演变规律及其对气候变化的响应 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017:11 – 13. [LIU Shaohua. Water cycle evolution and its response to climate change in the upper reaches of Nujiang River basin [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017:11 – 13]
- [77] 冉洪伍, 范继辉, 黄菁. 冻融过程土壤水热耦合作用及其模型研究进展 [J]. *草业科学*, 2019, **36**(4):991 – 999. [RAN Hongwu, FAN Jihui, HUANG Jing. Review of the coupling of water and heat in the freeze-thaw process and its model of frozen soil [J]. *Pratacultural Science*, 2019, **36**(4):991 – 999]
- [78] SADEGHI S H R, SEGHALEH M B, Rangavar A S. Plot sizes dependency of runoff and sediment yield estimates from a small watershed [J]. *Catena*, 2013, **102**:55 – 61.
- [79] WILSON G V, RIGBY J R, Ursic M, et al. Soil pipe flow tracer experiments: 1. Connectivity and transport characteristics [J]. *Hydrological Processes*, 2016, **30**(8):1265 – 1279.
- [80] 兰旻. 山坡尺度降雨产流过程宏观本构关系研究 [D]. 北京: 清华大学, 2014:1 – 13. [LAN Min. Study on constitutive relationship of runoff generation at the hillslope scale [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014:1 – 13]
- [81] 王林华. 黄土坡耕地地表粗糙度对入渗、产流及养分流失的影响研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017:15 – 24. [WANG Linhua. The role of soil surface roughness on soil infiltration, runoff generation and nutrient loss on the loess sloping farmland, subjected to simulated rainfall [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017:15 – 24]
- [82] ZHANG QIUFEN, LIU JIAKAI, YU XINXIAO, et al. Scale effects on runoff and a decomposition analysis of the main driving factors in Haihe Basin mountainous area [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **690**(1):1089 – 1099.
- [83] SIDLE R C, GOMI T, USUGA J C L, et al. Hydrogeomorphic processes and scaling issues in the continuum from soil pedons to catchments [J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, **175**:75 – 96.
- [84] GERTEN D, SCHAPHOFF S, HABERLANDT U, et al. Terrestrial vegetation and water balance-hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model [J]. *Journal of Hydrology*, 2004, **286**(1 – 4):249 – 270.
- [85] VANDERENT R J, SAVENIJE H H G, SCHAEFLI B, et al. Origin and fate of atmospheric moisture over continents [J]. *Water Resources Research*, 2010, **46**:1 – 12.
- [86] ZHANG Mingfang, LIU Ning, Harper R, et al. A global review on hydrological responses to forest change across multiple spatial scales: Importance of scale, climate, forest type and hydrological regime [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, **546**:44 – 59.
- [87] CRISTEA NC, LUNDQUIST JD, LOHEIDE SP, et al. Modelling how vegetation cover affects climate change impacts on streamflow timing and magnitude in the snowmelt-dominated upper Tuolumne Basin, Sierra Nevada [J]. *Hydrological Processes*, 2014, **28**(12):3896 – 3918.
- [88] ALAOUI A, ROGGER M, PETH S, et al. Does soil compaction increase floods? A review [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, **557**:631 – 642.
- [89] FORMETTA G, CAPPARELLI G. Quantifying the three-dimensional effects of anisotropic soil horizons on hillslope hydrology and stability [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, **570**:329 – 342.
- [90] Ran Qihua, Hong Yanyan, Chen Xiuxiu, et al. Impact of soil properties on water and sediment transport: A case study at a small catchment in the Loess Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, **574**:211 – 225.
- [91] 王浩, 贾仰文. 变化中的流域“自然 – 社会”二元水循环理论与研究方法 [J]. *水利学报*, 2016, **47**(10):1219 – 1226. [WANG Hao, JIA Yangwen. Theory and study methodology of dualistic water cycle in river basins under changing conditions [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47**(10):1219 – 1226]
- [92] 胡和平, 田富强. 物理性流域水文模型研究新进展 [J]. *水利学报*, 2007(5):511 – 517. [HU Heping, TIAN Fuqiang. Advancement in research of physically based watershed hydrological model [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, (5):511 – 517]
- [93] Hall DK, Riggs GA, Salomonson VV, et al. MODIS snow-cover products [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **83**(1 – 2):181 – 194.
- [94] Gao Hongkai, Birkel C, Hrachowitz M, et al. A simple topography-driven and calibration-free runoff generation module [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, **23**(2):787 – 809.
- [95] Bierkens M F P. Global hydrology 2015: State, trends, and directions [J]. *Water Resources Research*, 2015, **51**:4923 – 4947
- [96] Sivapalan M. The secret to ‘doing better hydrological science’: change the question! [J]. *Hydrological Processes*, 2009, **23**(9):1391 – 1396.
- [97] 江净超, 朱阿兴, 秦承志, 等. 分布式水文模型软件系统研究综述 [J]. *地理科学进展*, 2014, (8):1090 – 1100. [JIANG Jingchao, ZHU Axing, QIN Chengzhi, et al. Review on distributed hydrological modelling software systems [J]. *Progress in Geography*, 2014, (8):1090 – 1100]
- [98] Zeng Faming, Jiang Zhongcheng, Shen Lina, et al. Assessment of multiple and interacting modes of soil loss in the karst critical zone, Southwest China (SWC) [J]. *Geomorphology*, 2018, **322**:97 – 106.
- [99] Tritz S, Guinot V, Jourde H. Modelling the behaviour of a karst system catchment using non-linear hysteretic conceptual model [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, **397**(3 – 4):250 – 262.

Hydrological Simulation in Mountainous Region: Present State and Perspectives

LU Wen^{1,2}, TANG Jialiang^{1*}, ZHANG Xifeng¹, LIU Haowen^{1,2}, LUO Zhuanxi³

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, Fujian China*)

Abstract: Water cycle in mountainous region is an essential component of the global water cycles. However unique topography, ever-changing socio-economy and variable environmental gradients make a unique situation and diverse hydrological conditions in these regions. The emergence of modern technologies, such as Remote Sensing and Information Technology have made large scale hydrological studies possible in the mountainous ecosystem and opened up a new horizon for hydrological research in mountains for both current and future researchers all across the globe. Large vertical gradient in mountainous region condenses the natural geographical and ecological characteristics at the horizontal scale and these regions have a variety of environmental sensitivities. Therefore, the responses of hydrological processes due to land use change and climate variability in the mountainous areas are more dramatic than those in the plains. On the other hand, flood control, disaster management, and sustainability assessment of regional water resources are also required to understand the hydrological processes in the mountainous areas due to global climate change. Hydrological models have been proved as the important tools for water cycle researches for decades. With the launch of the PUB program and the application of new observation methods in the past 20 years, hydrological simulations have made a great progress. However, a series of problems such as the complexity of runoff generation and concentration, lack of measured hydrological data still prevent successful hydrological modelling in the mountainous regions. This review systematically introduced the research progress of hydrological modelling in the mountainous regions from four basic aspects: (i) data acquisition, (ii) parameter estimation, (iii) model structure, and (iv) modelling theory. Then, the domestic applications of empirical, conceptual, and distributed hydrological models were reviewed. Moreover, the challenges and difficulties in the current hydrological simulation were discussed for the heterogeneity of hydrological elements, driving force, data uncertainty and intensive human disturbances in the mountainous regions. It is concluded that multi-process coupling, multi-source data acquisition, and assimilation in the context of big data, nature-society dualistic water cycle modeling could foster the future development of hydrological modelling in mountainous regions.

Key words: hydrological modeling; mountainous area; water cycle; distributed model; hydrological parameters