

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2019.01.012

山坡表层关键带结构与水文连通性研究进展

刘金涛^{1,2}, 韩小乐², 刘建立³, 梁忠民², 贺瑞敏⁴

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
3. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008; 4. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学
国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 山丘区是洪水的“策源地”, 山丘区坡地、沟谷及间歇性河道为洪水的形成提供了通道, 同时也是水文连通时空变化最为强烈的地带。然而, 对流域表层关键带结构特征及其水文连通机制等的认识尚存不足, 限制了产汇流理论及模型方法的发展和应用。通过对比国内外山坡水文实验, 发现山坡物理结构连通性控制并深刻影响着水流的连通过程, 现有水文连通实验侧重孔隙等微观尺度的规律研究, 与水文模型理论存在尺度上的巨大偏差。为此, 提出水文连通性应侧重揭示水流在山坡地表、地下的宏观表象通道及分布特征, 探索径流连通的动力学机制, 即山坡水文连通性研究重在剖析其结构特征的水文累积效应, 应保持关键带结构特征合理概化与产汇流理论适度复杂之间的平衡。

关键词: 表层关键带结构; 山坡沟谷; 间歇性河道; 水文连通性; 产汇流理论

中图分类号: P341; G353.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2019)01-0112-11

连通性的概念被地球及环境科学领域所广泛采用, 如生态连通性、景观连通性、水系连通性、水文连通性等^[1-4]。这里, 水文连通性是指流域表层关键带(土壤、基岩等)中水流路径结构本身的连通特性, 也可指流域各部分(如山坡、河道)水流的连接状态, 是理解径流产生及分布的重要理论框架^[2,5]。本文表层关键带侧重指山丘区地表地形、土壤、基岩等与洪水产流密切联系的地球圈层。实际上, 水在生态系统连通中起到媒介或中枢的作用, 山丘区坡地、沟谷及间歇性河道的水文连通(统称为山坡水文连通)性可作为流域系统状态的指示因子^[6-7]。正是认识到这一地带对局地径流形成、下游防洪以及水域生态有重要影响, 美国环境保护署(EPA)^[8]在2014年发布相关法规, 旨在保护上游区的溪流环境。

山坡是流域的重要组成部分, 据统计下游河道平均超过50%的水量源自山坡的产水^[9]。而据EPA对全美河流的研究^[8], 发现约60%的河段是季节性河流或仅降雨后有水流的间歇性河道, 且这些河段多位于河流源头的山丘区流域。显然, 山丘区是水文连通时空变化最为强烈的地带, 是洪水的“策源地”, 山丘区的坡地、沟谷及间歇性河道为洪水的形成提供了通道。因此, 开展水文连通性研究将有助于揭示变化环境下流域水文过程的时空演变规律, 以连通性的角度重新认识流域产流机制, 将为有效预测小流域山洪灾害提供理论支撑^[2,10]。

本文首先介绍山坡水文连通研究的手段方法和重要发现, 侧重阐述山坡水文连通机制的发现与产流理论发展的关系, 讨论山坡水文连通研究中存在的主要问题, 指出山坡表层关键带水文连通研究未来的发展方向, 给出基于水文连通性研究来发展产流、水文模型理论的建议。

收稿日期: 2018-05-21; 网络出版日期: 2018-12-26

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20181224.1307.022.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0401501); 国家自然科学基金资助项目(41730750; 41771025)

作者简介: 刘金涛(1977—), 男, 河北唐山人, 教授, 博士, 主要从事水文物理规律研究。E-mail: jltiu@hhu.edu.cn

1 研究进展述评

1.1 水文连通性的内涵

小流域山丘区的水文连通提供了陆生和水生环境的基本联系,这种连通的方式可以是饱和坡面流^[11],也可以是壤中流^[12],且连通性在时间和空间上是可变的,如产流面积的动态变化。流域内的某些山坡可能全年与河道网络相连接,而其他山坡则可能永远不会与河道连通,或者仅在土壤含水量高或暴雨期间形成短暂的连通^[13]。在强降雨条件下,山坡可以通过坡面流向河道中输送大量的水、泥沙、有机物质和无机养分,但以壤中流的形式向河道中输送的泥沙却相对有限^[7]。

按照其定义,水文连通性可以划分为两类:静态(结构)水文连通性以及动态(功能)水文连通性。静态连通性被用来指山坡结构的空模式,例如影响水流交换和产流路径的土壤基岩等的空间分布;动态连通性是指这些空模式如何与水文过程相互作用,以产生径流以及径流如何连通与转移^[14]。Bracken等^[2]建议使用“基于水流过程的连通性”来替代“功能连通性”,认为使用基于水流过程的连通性更容易描述不同的过程如何在流域空间及时间上连通。在这两方面的研究中,结构连通性更易于具体测量及量化,使得连通性从一个抽象的概念变成一种形象具体的物理结构,因而被广泛研究(如Lexartza-Artza和Wainwright^[15])。但是,基于水流过程连通性的研究较难测量和量化,相比结构连通性研究还不够深入^[2]。

1.2 研究的手段方法和重要发现

由于水文连通性影响因素复杂,如山坡地表地形、土壤、植被和基岩地形等都有可能影响连通的形成,水文连通性的研究往往需要结合多种方法。常用的方法包括染色示踪实验^[16]、开挖排水渠测量流量^[17]、土壤含水量监测^[18]及地下水水位观测^[19]等。Tromp-van Meerveld和McDonnell^[17]通过野外实验发现,当降雨量大于一定阈值后,土壤基质饱和、基岩洼地蓄满、土壤水流通道连通、山坡出流瞬时增大。Jencso等^[13]发现连通持续时间很大程度上决定于上游集水面积(UAA)的大小,UAA大的区域连通持续时间长,UAA小的区域连通时间短,或者不能与下游河道连通。

事实上,以上这些研究认知大部分源自陡坡、薄土的山坡地带。在这种陡坡环境中,水文学家普遍认为水在山坡中的重新分布主要受地形影响^[20]。除了地形之外,通常连通性的形成还受其他因素(如土壤类型、厚度、不同层次间导水率变化等)的影响,且这种影响在缓坡环境中表现得更加明显。在不同土壤层次以及土壤-基岩界面,由于土壤导水率的突变可能导致上层滞水的形成^[21]。再如,Gerke等^[22]通过染色示踪实验发现,生物量丰富的土壤层可以为侧向流提供通道。Anderson等^[16]对长达30 m的山坡进行了染色实验,研究表明,水流通过土壤优先流通道产生,与周围的基质相互作用较少。Graham等^[23]和Hale等^[24]则分别应用开挖、染色示踪及同位素等方法,揭示出基岩特性是控制山坡壤中流路径、滞时及产流阈值的重要因子。

由于山坡水文连通性的研究对象是整个山坡,通常还需要监测整个山坡的水量平衡。在山坡出口处或斜坡的渗出面开挖排水沟,并建设量水堰可以直接测量地下水出流量,借以观测得到山坡何时向河道大量输水^[5]。通过开挖排水渠也可以测量某些大孔隙流对总流量的贡献^[17]。除量水堰外,地下水水井和土壤含水量监测也是研究山坡水文连通性的主要方法,这些方法假定连通性的形成以山坡、沟谷及间歇性河道观测到稳定的地下水水位为标准^[13,19]。

与此同时,现代地球物理的勘测技术和地球化学的示踪技术使得揭示流域山坡表层结构及水分运动路径成为可能^[25]。采用地质雷达(GPR)可以探测流域表层关键带土壤岩石等的界面^[26];GPR还可用于观测土壤含水量及优势流路径^[27];而采用无人机系统则有望获取高分辨率的山坡、河道等间歇性水体的水文连通影像^[28];各种示踪剂则可用于示踪水流路径及水分滞留时间^[29]。由于山坡水文连通往往先发生于地下土壤中,对水文学家来说直接观测土壤孔隙结构及其水文连通仍然是一个挑战。

土壤孔隙结构包括孔隙的几何形态(孔隙半径、周长、面积和成圆率等)、数量特征(孔隙度、孔隙数目

和孔径分布等)及其空间拓扑状况(相关关系、连通性等),控制着水分、溶质和气体在土体内的迁移途径、方式和速率^[30-31]。传统上,多采用实测土壤水分特征曲线或压汞曲线由 Young-Laplace 方程来估计土壤当量孔径的累积分布状况^[32],还可利用物理-经验模型、分形几何理论由土壤颗粒大小来间接估算孔径分布^[33],亦或通过破坏性的土壤切片用超微成像技术对二维孔隙形态进行直观观测^[34]。但上述这些方法均无法直接观察并获取土壤孔隙的三维结构特征,分析结果仅具有统计学或微形态学意义,尤其是无法刻画土壤水分运动时的孔隙连通状态。随着 CT(X 射线断层扫描技术)、NMR(核磁共振)等无损探测技术和数字图像处理技术的发展,对土壤孔隙结构的研究逐渐转向更直接、定量的研究^[35]。冯杰和郝振纯^[36]利用 CT 扫描获得土壤大孔隙数目、形状和连通性在土柱中的分布。吕菲等^[37]利用 CT 扫描和数字图像分析技术确定了土壤孔径分布和孔隙连通性指标,其建立了三维孔隙网络模型并预测了土壤水力学性质。与传统方法相比,CT/NMR 扫描与数字图像分析技术相结合可直观地观测原状土壤孔隙的三维结构,但是其测试成本高昂,图像分析及三维建模难度大,极大地限制了该方法更广泛的应用。

显然,直接观测土壤孔隙及连通性并据此确定山坡水流路径相当困难,即便对于许多观测设施良好的山坡或小流域^[38]。正因如此,许多学者采用同位素示踪技术估算水的“年龄”和“滞留时间”,借以间接地揭示山坡蓄水条件、水流路径及水分来源等综合信息。如 McGuire 等^[38]采用稳定同位素(¹⁸O)示踪技术分析了 7 个不同尺度流域的水分滞留时间,发现与流域面积相比地形地貌是控制流域水流运动的重要因子。Tetzlaff 等^[39]则将此研究延伸至北美及欧洲的 5 个地貌分类的 55 个流域,进一步分析了下垫面地貌结构对不同地貌类型流域水分滞留时间的影响。

1.3 山坡水文连通的机制和产流理论

影响山坡水文连通的因素众多,如地形、土壤等,其中有微观的要素(如土壤孔隙结构),也有相对较大尺度的因子(土壤厚度)。然而,对于山坡水文过程这种间断性连通的现象,人们对其发生机制的认识仍然有限^[40]。受观测条件限制,人们倾向将山坡作为一个整体来认识其水文连通的机制。一直以来,在湿润区山坡及流域上,水文学家发现了产流的阈值行为,即当降雨量超过一定阈值后,水流的快速通道被“连通”,随后降雨与径流累积曲线的斜率接近于“1”^[17,41-44]。这种产流量随降水量增加到一定程度而发生质变的现象,实质反映了山坡土壤内部滞蓄水分的特性发生了“逾渗转变”,即其快速输水的通道被“连通”,是一种对山坡水文连通机制的朴素认识。受这种山坡产流阈值效应的启发,蓄满产流的概念得以提出,并在水文模型中得到广泛采用,如中国著名的新安江模型理论。

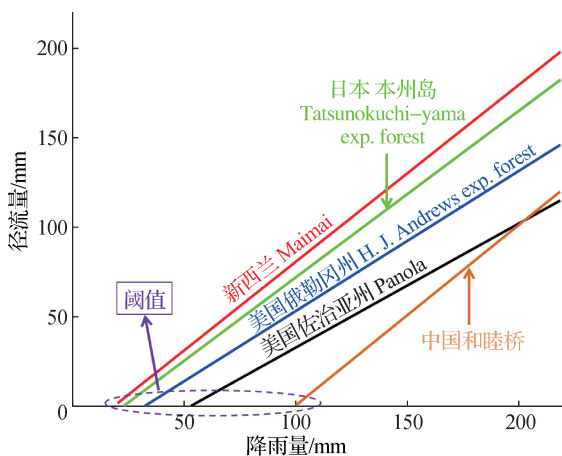


图1 代表性实验流域降雨径流关系线示意

Fig. 1 Rainfall-runoff curves of 5 experimental hillslopes in world wide

根据前人野外实验的成果,图1综合展示了5个国内外比较知名的实验流域的降雨径流关系曲线。从图1可以看出,在各代表性实验流域,当降雨达到一定阈值后,累积降雨量和径流量的关系可用一条直线来拟合。然而,受观测条件等的限制,该关系线并非严格满足45°斜率的理想状态。还可以看出各流域降雨径流阈值各不相同。例如,位于中国浙江省德清县莫干山脉的和睦桥实验流域(119°47'E, 30°34'N),平均降雨径流阈值为100 mm^[45],而新西兰 Maimai 流域仅为23 mm^[43]。分析显示,阈值的大小与流域降水、地形和土壤等多种因素相关,受综合因素的控制。例如,美国佐治亚州的 Panola 流域阈值在55 mm附近,基岩洼地是影响阈值大小的控制因素^[17];而在日本的 Tatsunokuchi-yama 流域,前期降雨量为影响阈值大小的决定性因素,在前期湿润条件下产流阈值约为20 mm,在干燥条件下阈值则上升为

100 mm^[44]。

早期关于产流机制的研究主要关注霍顿产流模式,注重坡面流的观测^[46-47]。随着野外实验的进一步开展,水文学家逐渐意识到河道附近的壤中流也可成为河道径流的主要成分之一^[12]。在同一时期,Dunne和Black^[11]又发现山坡饱和坡面流为洪水的主要成分,且在降雨的过程中,饱和带的范围也是变化的,其与沟谷、间歇性河道为水流提供了连通山坡及河道的快速通道,这就是著名的变动源面积产流理论(VSA)。此理论的建立正是基于对山丘区坡地、沟谷和间歇性河道的这种动态连通机制的认识。VSA理论极大地推动了水文模型理论的发展,产生了历史上最为成功的水文模型之一——TOPMODEL^[48]。

总体来说,人们对山坡水文连通机制的认识仍然停留在黑箱的(如将整个山坡作为一个整体)和表象的(仅考虑地表径流连通的特征)水准。野外实验研究已向人们展示了山坡结构特征的巨大变异性及其对降雨径流过程影响的复杂性,但目前对两者关系的描述多为经验性的或定性的^[49]。换句话说,山坡结构连通性之于水流过程连通性的影响已为人所认识^[13,50],但两者间相互作用的物理机制与动力联系尚难于描述。Nip-pgen等^[50]采用黑箱的转移函数模型(近似于单位线模型)来模拟水文响应时间,间接揭示了山坡结构的水文效应。Lehmann等^[51]采用逾渗理论模拟了山坡降雨径流的这种阈值关系,通过构建虚拟的土壤孔隙网络并制定复杂连通规则,从理论上阐释了山坡蓄水能力及水流路径连通性空间变异对其产流阈值的影响。在山坡尺度上,逾渗模拟需要大量的野外实验数据(例如土壤孔隙结构、基岩形状特征等)以率定模拟山坡水流路径所需的参数。山坡降雨径流过程中水流路径“组合”的随机性和变动性,进一步加深了山坡水文过程研究的复杂性。

2 存在的问题剖析

水文连通性既指关键带结构本身的连通特性,又指水流过程的连通,而后者包括通常所指的产汇流过程。因此,采用山坡水文连通的概念能涵盖更为广泛的流域物理和水文的要素,可能会对水文模拟领域带来理解和认识上的提升,从而使理论上的突破成为可能。然而,受观测条件、认识水平等方面的限制,对山坡水文连通过程的现象认识和理论刻画仍存在一些问題。

第一个重要问题就是对山坡表层关键带结构特征及其对水文连通过程的影响认识不足。由于易于观测和定量表述,山坡地表水文连通性受到了更为广泛的探讨。早在1970年,Dunne和Black^[11]的观测认为产流主要发生在流域内较小的连续面积上,这部分面积上的地表径流对洪峰的形成起决定性的作用。正是源自对地表连通的这种认识,才产生了VSA的理论框架以及随后水文模型领域的突破。然而,水文连通一定和山坡结构与降雨有着密切的关联,需要进一步揭示影响土壤饱和以及水流汇聚背后的机制。

例如,壤中流一般被认为是湿润或半湿润森林流域径流的重要组成部分,但是它何时何地能出露于地表并连通山坡及河道的机制仍然不清晰^[52];就如同大孔隙为土壤中自由水提供了快速通道,山坡中是否存在能够连通基质孔隙—坡面—沟谷—河道的汇水网络,这种结构具有何种连通的特征?此外,为什么饱和和地表径流仅在坡脚及沟谷等少量的面积上分布?除去地形因素外,土壤及基岩结构是否存在独特的分布规律,从而呈现出这种部分面积产流的现象?这就需要揭示山坡壤中及地下水文连通的机制。与地表水文连通相比,地下连通更难于观测和定量描述。

第二个重要问题就是缺乏适合的理论以描述流域水文连通的过程。如前文所述,科学家们做了大量野外观测以揭示降雨径流的机制,然而过多的观测似乎并未带来水文预测理论的突破性进展^[53]。原因主要有两点:①山坡水文以坡地为研究对象,实验总是试图穷尽剖析坡地每一寸土地上的土壤结构及其孔隙的水流连通性^[49]。然而,降雨径流过程中水流路径“组合”具有随机性和变动性,试图直接观测土壤孔隙及连通性,并据此确定山坡水流路径几乎不可能。②水文预测模型则往往以流域为对象,田块或者坡地样方尺度的规律很难拓展到流域尺度,需考虑水流在山坡乃至更大尺度上的结构连通机制。

第三,由于田间实验研究耗费更多的人力物力、周期长且难于获得更快、更多的成果产出,加之近年来

廉价的计算机模型工具的不断发展,田间实验研究正在衰落^[54]。特别地,由于新安江模型以及 TOPMODEL 广泛且成功的应用,水文学家似乎失去了探索自然降水径流机制的兴趣^[54-55]。然而,不论是 VSA 理论还是蓄满产流理论都只呈现了湿润区山坡产流过程的部分关键特质。VSA 理论更多地关注地表连通,对关键带其他部分(土壤及基岩)特征及连通性则考虑不足^[55]。换句话说,计算机模型是建立在人们已有的认知和发现基础上的,仍然有很多基础的问题尚待解决。山坡产流及汇流等水文过程是流域水循环的重要环节,不单是因为小流域产流以及坡地汇流阶段均受坡面控制和影响,还在于山坡水文的研究是深化规律认知,提出新的水文模型概化方案的基础^[56]。因此,开展田间实验是揭示山坡水文连通机制最为迫切的工作之一。山丘区野外实验向人们展示了山坡结构特征的巨大变异性及其降雨径流过程的复杂性,但水文模型则往往要求对流域尺度的过程进行预测,那么问题是山坡尺度过程的复杂性和规律性在多大程度上能为流域水文模型所采用?

3 未来研究的展望

事实上,尽管计算机性能被一再提升,水文建模技术趋于完美,但不论是简单的概化模型还是复杂的数学物理模型仍在很大程度上依赖于参数的率定,这表明模型与现实之间存在着偏差,这是理论认识层面的不足。因此,使得水文模型植根于正确的理论是水文学家尤其是山坡水文学家面临的巨大难题。当前的问题在于要如何开展山坡水文连通性的研究,设置什么样的观测项目,如何架起实验与理论、模型间的桥梁?为解决上述问题,提出“开展山坡表层关键带宏观表象连通及动力机制研究”可作为未来山坡水文观测的发展方向之一,并讨论了山坡水文连通机制如何支撑水文模型理论发展的构想。

3.1 山坡表层关键带宏观表象连通及动力机制研究

正如 McDonnell^[55]提出的问题“Where does water go when it rains(降雨流向何处)”,水文学家一直在探索水流的路径、汇流的时间等问题。也研发了基于山坡野外发现成果的水文模型,如在模型中假设饱和和土壤导水率随深度变化呈指数衰减以及依据地表地形推定水流路径等等。目前,地表地形是广泛采用且易于获取的关键带结构数据之一,然而仅采用地表地形来反映或者代表水分的分布及流动路径往往是不够的。如 Graham 等^[23]的开挖实验表明基岩地形以及渗漏是壤中流速率和路径的决定性因素。事实上,水文学家对山坡结构(地表地形、土壤厚度和质地、基岩渗透性等)是影响径流产生的重要控制因子已普遍达成共识,但这些山坡结构要素往往具有较强的空间变异和协同效应,山坡结构与降雨径流的这种响应关系尚难定量表述,这加大了流域(尤其是无资料流域)洪水预测的难度^[57]。

因此,开展山坡水文连通性研究,首要解决的就是揭示其结构的连通性特征,如土壤导水性、厚度及其分布等等。流域特性是随时间演变的,受水、能量、基岩矿物质、沉积物和生态系统(包括微生物群)之间的相互作用,是流域协同演化作用的结果^[58]。这表明流域特征(如土壤厚度分布)在协同演化框架下有规律可循,可以被预测。Pelletier 和 Rasmussen^[59]预测了不同基岩组成的半干旱山坡的土壤厚度分布。Liu 等^[60]在地貌演化动力模型的基础上,推导了山坡土壤厚度演化及分布的解析模型,并在一个湿润区小流域得到应用,这为模型中考虑山坡结构要素提供了地貌数学基础。

然而,需要特别指出的是,应在模型理论适度复杂与关键带结构特征的合理概化上做一个平衡。也就是说,水文模型的应用对象通常是大的流域,过于复杂的模型不利于建模和应用,因此水文理论的发展应保持适度的复杂性。流域结构特征规律是具有多尺度、高时空异质性的,为搭起理论与实际的桥梁,必然需要得到更为宏观层面的规律,即对微观层面的过程做必要的简化,要侧重剖析山坡结构特征的水文累积效应。地貌瞬时单位线(GIUH)理论是经典的考虑流域结构特征的宏观分布规律的水文研究,其采用统计学方法描述复杂水系结构并用于构建流域水文响应的函数,这无疑对研究山坡土壤孔隙结构与水文响应的关系具有借鉴意义^[61]。因此,需要探索水流在山坡地表、地下的宏观表象通道及其分布特征,研究这种宏观快速通道的

水流传输能力,揭示径流连通的动力学机制。

这里,宏观包含两个层面的含义:一是尺度大,如果基质孔隙属于微观的通道,而满足水流在重力下自由流动的通道(如大孔隙、坡面等)则是相对宏观的;二是累积效应,如单个田块中土壤基质和大孔隙网络的结构和水流状态是微观的,而整个山坡的孔隙网络分布状况及其水流响应函数则属宏观层面的。在坡面或者小流域上,微观层面的水流通道(即土壤基质孔隙)个体蓄滞水能力虽弱,但总体数量要远超宏观层面水流通道(大孔隙、坡面、沟谷、间歇性河道等)数之和。降雨落在山坡上后,首先被数目众多的微观通道所滞蓄,在达到一定阈值后则发生逾渗转变,即由宏观通道快速输送至出口,形成洪峰。因此,从产流过程来看,微观连通性和宏观连通性具有相互联系和制约关系。开展山坡表层关键带宏观表象连通性研究就是要揭示微观通道整体的分布和连通特性,探索土壤基质孔隙—大孔隙—坡面—沟谷—间歇性河道系统的综合蓄滞水能力及其分布特性。显然,这一研究将使得野外实验和模型理论发展保持平衡,有利于新的产流机制的发现。

3.2 水文连通机制与水文模型理论展望

山丘区地带的坡地、沟谷及间歇性河道的水文连通性概念体现了水流赋存的结构及径流(洪水)产生的状态,涵盖了山坡产流及汇流的整个过程。因此,近年来山坡水文连通性研究一直被认为将会带来产汇流机制的革命^[5]。一方面,开展山坡水文连通性研究将深化对地形、土壤和基岩等山坡结构特征规律的认知,这为更加合理地获取水文模型参数和模型结构的概化提供了可能途径;另一方面,随着对水流连通过程、机制的深层次认识和理解,将有助于在水文模型中对产汇流过程更加合理地概化,从而填充观测、理论和建模各领域的缺失环节。

山坡水文连通性实验的对象多为较小的山坡或者实验流域(尺度在 10^0 km^2)。受野外调查和地球物理的勘测技术所限,采用遥感手段探测大范围的土壤、基岩性质仍然是个难题。然而,较小尺度上的研究存在代表性的问题。尽管单个水文实验已向人们展示了流域表层结构特征的巨大变异性及其对降雨径流过程影响的复杂性,但目前对流域结构及其与径流响应关系的描述多为经验性的或定性的^[49]。由于缺乏成熟的定量方法,限制了现有实验观测成果在广大缺观测区域的应用^[25]。所以,需要引入新的数据解析理论和方法以便将单个山坡观测得到碎片化的、经验性的认识上升到规律性的认识。

为弥合山坡水文实验与水文理论之间的差距,揭示流域产汇流机制,水文连通性研究需通过土壤、地貌、地质及水文等多学科交叉:①研究山坡结构的连通性特征,如土壤导水性、厚度及其分布等;②探索水流在坡面及沟谷地表、地下的宏观表象通道及其分布特征,借助统计分布函数描述复杂的土壤孔隙连通网络,定量表达水流的宏观累积效应;③研究这种宏观表象快速通道的水流传输能力,揭示径流连通的动力学机制,发展考虑山坡及河网结构的流域水文响应函数;④构建山坡水文相似分析的理论框架,解析山坡结构连通与水流连通的内在联系。

水文模型理论发展有着内在的规律性,这里水文模型主要指概念性模型(如新安江模型)。图2描绘了水文模型理论发展与山坡水文观测、发现和理论发展的关系。从图2可以看出,水文模型理论经历了从集总到面分布发展的两个阶段,预期未来的水文模拟理论将更多地考虑流域表层关键带结构信息和水文过程连通特征。从前两个阶段的经验来看,不论是蓄满产流还是部分产流面积,产流理论的提出均有赖于山坡水文观测的重要发现(如产流的阈值效应和部分面积的产流)。然而,在前两个阶段,水文模型理论方法一般建立在固化的流域系统之上,水文学家对流域结构的认识是模糊的,甚至将其作为黑箱处理。由于对流域结构、水流的路径、滞时以及蓄滞特性等考虑不足,导致模型(不论是简单的输入输出关系模型,还是更为复杂、对水文过程有所概化描述的模型,如TOPMODEL等)往往高度依赖参数的率定^[62]。在变化环境背景下,这种传统的水文预测理论和方法显然难以适应^[62-63]。

因此,加强对山坡表层关键带结构的认知与产汇流机制的研究显得更为迫切,这也应该是下一阶段水文模型理论发展的重点所在。随着对山坡表层关键带土壤、基岩等性质认识的逐步深入,产流的时空分布和动态变化机制将变得更加清晰。这使得水文连通面积(地表和地下产流面积)、产流量的预测更为准确,产流

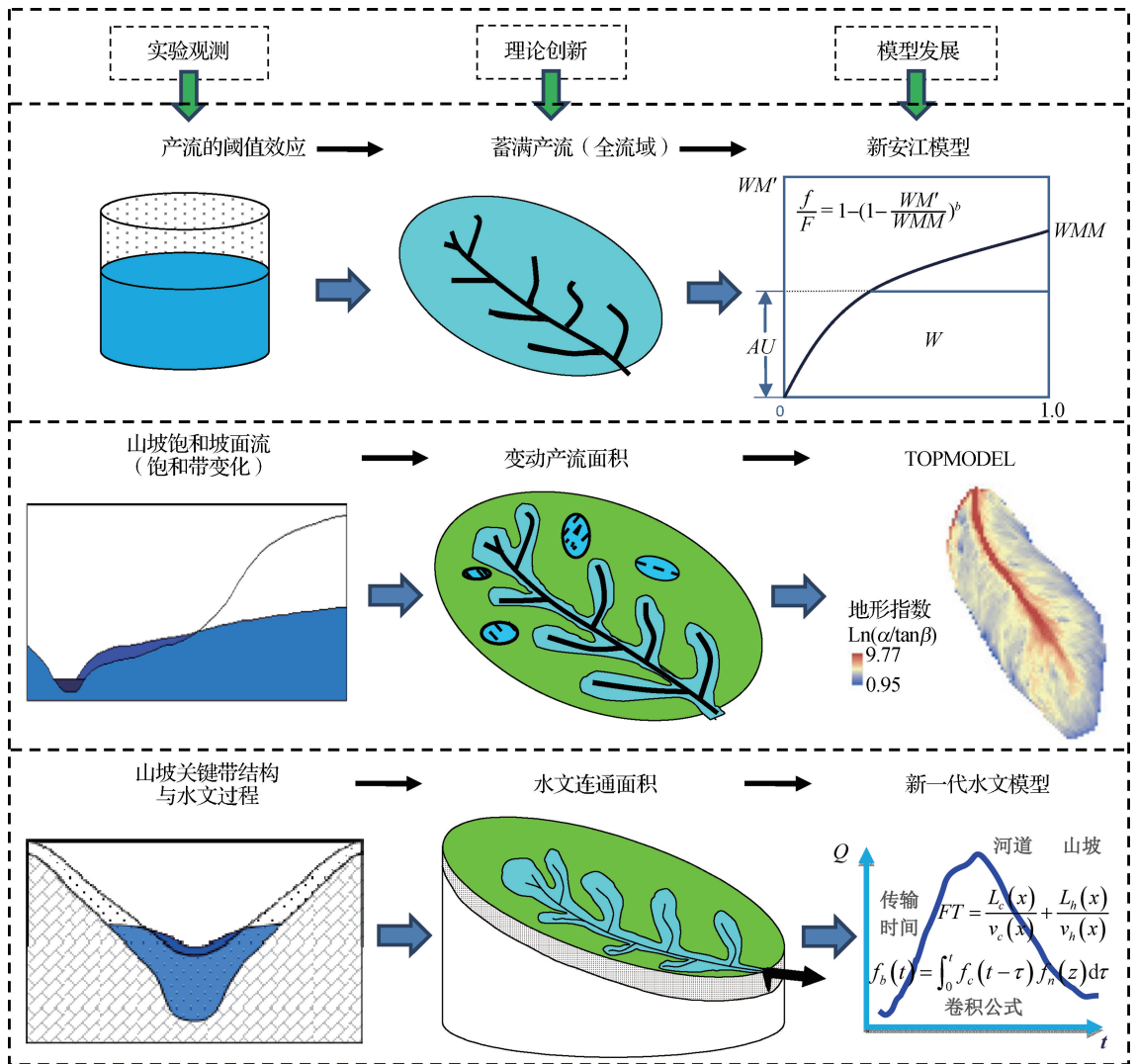


图 2 山坡水文观测、发现及其与水文模型理论发展(三阶段)的关系

Fig. 2 Relations between observations, and hydrological theories in these phases

理论具有更强的物理基础。需要强调的是，未来的水文模拟理论并非要考虑每一寸土壤的孔隙特征，而是要研究流域尺度关键带结构特征的宏观分布规律并用于水文预测。即如何采用更为丰富的流域表层关键带结构信息用于导出流域水文响应的函数将是研究的重中之重。最后，前面两个阶段有关产流阈值和部分面积产流的理论仍然是未来水文模拟理论发展的基础。

4 结 语

本文全面回顾了山坡水文连通性研究的现状，指出山坡水文连通性涵盖了结构特征和径流产生两个方面，是可能带来新的产汇流研究革命的课题之一。然而，目前山坡水文连通更加侧重于孔隙连通以及微观尺度的规律研究，而水文模型理论仍停留在依赖地表地形推定水流路径和汇流时间的层面，这种巨大的偏差是导致山坡水文发现无法用于指导水文理论发展的症结所在。本文提出未来山坡水文连通性研究应着眼于表层关键带结构中更为宏观层面的规律，应能保持模型理论的适度复杂与关键带结构特征合理概化的一个平衡关系。

水文连通性实验工作的开展将进一步增进人们对产流规律的认识,并拉近野外实验与计算机模型之间的距离。山坡水文连通性研究是水文科学的前沿问题,此项研究的开展对于无资料小流域山洪预测、设计洪水计算、水土保持甚至滑坡灾害防治等均有一定指导意义。

参考文献:

- [1] 夏军,高扬,左其亭,等. 河湖水系连通特征及其利弊[J]. 地理科学进展, 2012, 31(1): 26-31. (XIA J, GAO Y, ZUO Q T, et al. Characteristics of interconnected rivers system and its ecological effects on water environment[J]. *Process in Geography*, 2012, 31(1): 26-31. (in Chinese))
- [2] BRACKEN L J, WAINWRIGHT J, ALI G A, et al. Concepts of hydrological connectivity: research approaches, pathways and future agendas[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 119: 17-34.
- [3] 孟慧芳,许有鹏,徐光来,等. 平原河网区河流连通性评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(5): 626-631. (MENG H F, XU Y P, XU G L, et al. Study on rivers connectivity evaluation in plain river network area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, 23(5): 626-631. (in Chinese))
- [4] 夏继红,陈永明,周子晔,等. 河流水系连通性机制及计算方法综述[J]. 水科学进展, 2017, 28(5): 780-787. (XIA J H, CHEN Y M, ZHOU Z Y, et al. Review of mechanism and quantifying methods of river system connectivity[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(5): 780-787. (in Chinese))
- [5] BLUME T, van MEERVELD H J. From hillslope to stream: methods to investigate subsurface connectivity[J]. *WIRES Water*, 2015, 2(3): 177-198.
- [6] 高常军,高晓翠,贾朋. 水文连通性研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(3): 586-594. (GAO C J, GAO X C, JIA P. Summary comments on hydrologic connectivity[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2017, 23(3): 586-594. (in Chinese))
- [7] COVINO T. Hydrologic connectivity as a framework for understanding biogeochemical flux through watersheds and along fluvial networks[J]. *Geomorphology*, 2017, 277: 133-144.
- [8] US EPA. Connectivity of streams and wetlands to downstream waters: a review and synthesis of the scientific evidence (final report) [R]. Washington D C: US Environmental Protection Agency, 2015.
- [9] ALEXANDER R B, BOYER E W, SMITH R A, et al. The role of headwater streams in downstream water quality[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2007, 43(1): 41-59.
- [10] 王盛萍,姚安坤,赵小婵. 基于人工降雨模拟试验的坡面水文连通性[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 526-533. (WANG S P, YAO A K, ZHAO X C. Analyzing hydrological connectivity for a slope-surface on the basis of rainfall simulation experiment[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(4): 526-533. (in Chinese))
- [11] DUNNE T, BLACK R. Partial area contributions to storm runoff in a small New-England watershed[J]. *Water Resources Research*, 1970, 6(5): 1296-1311.
- [12] HEWLETT J D, HIBBERT A R. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas[J]. *Forest Hydrology*, 1967, 1: 275-290.
- [13] JENCISO K G, McGLYNN B L, GOOSEFF M N, et al. Hydrologic connectivity between landscapes and streams: transferring reach- and plot-scale understanding to the catchment scale[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(4): 262-275.
- [14] TURNBULL L, WAINWRIGHT J, BRAZIER R E. A conceptual framework for understanding semi-arid land degradation: ecohydrological interactions across multiple-space and time scales[J]. *Ecohydrology*, 2008, 1(1): 23-34.
- [15] LEXARTZA-ARTZA I, WAINWRIGHT J. Hydrological connectivity: linking concepts with practical implications[J]. *Catena*, 2009, 79(2): 146-152.
- [16] ANDERSON A E, WEILER M, ALILA Y. Dye Staining and excavation of a lateral preferential flow network[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2009, 5(6): 935-944.
- [17] TROMP-van MEERVELD H J, McDONNELL J J. Threshold relations in subsurface stormflow: 1: a 147-storm analysis of the Panola hillslope[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42: W02410.
- [18] KIM S. Characterization of soil moisture responses on a hillslope to sequential rainfall events during late autumn and spring[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(9): W09425.

- [19] van MEERVELD H J, SEIBERT J, PETERS N E. Hillslope-riparian-stream connectivity and flow directions at the Panola Mountain Research Watershed[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(16): 3556-3574.
- [20] DETTY J M, McGUIRE K J. Topographic controls on shallow groundwater dynamics; implications of hydrologic connectivity between hillslopes and riparian zones in a till mantled catchment[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(16): 2222-2236.
- [21] ZIMMER M A, McGLYNN B L. Ephemeral and intermittent runoff generation processes in a low relief, highly weathered catchment[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(8): 7055-7077.
- [22] GERKE K M, SIDLE R C, MALLANTS D. Preferential flow mechanisms identified from staining experiments in forested hillslopes[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(21): 4562-4578.
- [23] GRAHAM C B, McDONNELL J J, WOODS R. Hillslope threshold response to rainfall: 1: a field based forensic approach[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 393: 65-76.
- [24] HALE V C, McDONNELL J J, STEWART M K, et al. Effect of bedrock permeability on stream base flow mean transit time scaling relationships; 2: process study of storage and release[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52: 1375-1397.
- [25] GU W Z, LIU J F, LU J J, et al. Current challenges in experimental watershed hydrology [M]//BRADLEY P M. *Current Perspectives in Contaminant Hydrology and Water Resources Sustainability*. Croutia: In Tech, 2013: 299-333.
- [26] HAN X L, LIU J T, ZHANG J, et al. Identifying soil structure along headwater hillslopes using ground penetrating radar based technique[J]. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(3): 405-415.
- [27] GUO L, CHEN J, LIN H. Subsurface lateral preferential flow network revealed by time-lapse ground-penetrating radar in a hillslope[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50: 9127-9147.
- [28] SPENCE C, MENGISTU S. Deployment of an unmanned aerial system to assist in mapping an intermittent stream[J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30: 493-500.
- [29] McGUIRE K J, WEILER M, McDONNELL J J. Integrating tracer experiments with modeling to assess runoff processes and water transit time[J]. *Advances in Water Resources*, 2007, 30: 824-837.
- [30] 刘建立, 徐绍辉, 刘慧, 等. 预测土壤水力性质的形态学网络模型应用研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(2): 218-224. (LIU J L, XU S H, LIU H, et al. Determination of soil hydraulic properties using a morphology-based pore scale model[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 218-224. (in Chinese))
- [31] CHENG Y N, LIU J L, ZHANG J B. Fractal estimation of soil water retention curves using CT images[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica(Soil & Plant Science)*, 2013, 63(5): 442-452.
- [32] WATSON K W, LUXMOORE R J. Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50: 578-582.
- [33] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53: 987-996.
- [34] JONGERUS A, HEIZBERGER G. *Methods in soil micromorphology: a technique for the preparation of large thin section* [R]. Wageningen: Soil Survey Institute, 1975.
- [35] 程亚南, 刘建立, 张佳宝. 土壤孔隙结构量化研究进展[J]. *土壤通报*, 2012, 43(4): 988-994. (CHENG Y N, LIU J L, ZHANG J B. Advance in the study on quantification of soil pore structure[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(4): 988-994. (in Chinese))
- [36] 冯杰, 郝振纯. CT扫描确定土壤大孔隙分布[J]. *水科学进展*, 2002, 13(5): 611-617. (FENG J, HAO Z C. Distribution of soil macro-pores characterized by CT[J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(5): 611-617. (in Chinese))
- [37] 吕菲, 刘建立, 何娟. 利用CT数字图像和网络模型预测近饱和土壤水力学性质[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(5): 10-14. (LYU F, LIU J L, HE J. Prediction of near saturated soil hydraulic properties by using CT images and network model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(5): 10-14. (in Chinese))
- [38] McGUIRE K J, McDONNELL J J, WEILER M, et al. The role of topography on catchment-scale water residence time[J]. *Water Resources Research*, 2005, 41: W05002.
- [39] TETZLAFF D, SEIBERT J, McGUIRE K J, et al. How does landscape structure influence catchment transit time across different geomorphic provinces? [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(6): 945-953.
- [40] GODSEY S E, KIRCHNER J W. Dynamic, discontinuous stream networks; hydrologically driven variations in active drainage density, flowing channels and stream order[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28: 5791-5803.
- [41] 赵人俊, 庄一鹤. 降雨径流关系的区域规律[J]. *华东水利学院学报*, 1963(S2): 53-68. (ZHAO R J, ZHUANG Y L. Re-

- gional law of rainfall runoff relationship[J]. *Journal of East China College of Hydraulic Engineering*, 1963(S2): 53-68. (in Chinese))
- [42] WHIPKEY R Z. Subsurface stormflow from forested slopes[J]. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology*, 1965, 10: 74-85.
- [43] MOSLEY M P. Streamflow generation in a forested watershed[J]. *Water Resources Research*, 1979, 15: 795-806.
- [44] TANI M. Outflow generation processes estimated from hydrological observations on a steep forested hillslope with a thin soil layer [J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 200: 84-109.
- [45] 韩小乐. 南方湿润山区小流域表层结构及水文连通性研究 [D]. 南京: 河海大学, 2018. (HAN X L. Study on surface structures and hydrological connectivity in an experiment catchment in humid region of Southern China [D]. Nanjing: Hohai University, 2018. (in Chinese))
- [46] HORTON R E. The role of infiltration in the hydrologic cycle[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1933, 14 (1): 446-460.
- [47] BETSON R P. What is watershed runoff? [J]. *Journal of Geophysical research*, 1964, 69(8): 1541-1552.
- [48] BEVEN K J, KIRKBY M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology[J]. *Hydrological Sciences Bulletin*, 1979, 24: 43-69.
- [49] McDONNELL J J, SIVAPALAN M, VACHÉ K, et al. Moving beyond heterogeneity and process complexity: a new vision for watershed hydrology[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43: W07301.
- [50] NIPPGEN F, McGLYNN B L, MARSHALL L A, et al. Landscape structure and climate influences on hydrologic response[J]. *Water Resources Research*, 2011, 47: W12528.
- [51] LEHMANN P, HINZ C, McGRATH G, et al. Rainfall threshold for hillslope outflow: an emergent property of flow pathway connectivity[J]. *Hydrology and Earth System Science*, 2007, 11: 1047-1063.
- [52] McGUIRE K J, McDONNELL J J. Hydrological connectivity of hillslopes and streams: characteristic time scales and nonlinearities [J]. *Water Resources Research*, 2010, 46: W10543.
- [53] TETZLAFF D, CAREY S K, LAUDON H, et al. Catchment processes and heterogeneity at multiple scales-benchmarking observations, conceptualization and prediction Preface[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(16): 2203-2208.
- [54] BURT T P, McDONNELL J J. Whither field hydrology? The need for discovery science and outrageous hydrological hypotheses [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51: 5919-5928.
- [55] McDONNELL J J. Where does water go when it rains? Moving beyond the variable source area concept of rainfall-runoff response [J]. *Hydrological Processes*, 2003, 17: 1869-1875.
- [56] 吴雷, 许有鹏, 王跃峰, 等. 水文实验研究进展[J]. *水科学进展*, 2017, 28(4): 632-640. (WU L, XU Y P, WANG Y F, et al. Advances in hydrological experiment[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(4): 632-640. (in Chinese))
- [57] 刘金涛, 宋慧卿, 王爱花. 水文相似概念与理论发展探析[J]. *水科学进展*, 2014, 25(2): 297-305. (LIU J T, SONG H Q, WANG A H. Advances in the theories of hydrologic similarity: a discussion[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(2): 297-305. (in Chinese))
- [58] TROCH P A, LAHMERS T, MEIRA A, et al. Catchment coevolution: a useful framework for improving predictions of hydrological change? [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51: 4903-4922.
- [59] PELLETIER J D, RASMUSSEN C. Geomorphically based predictive mapping of soil thickness in upland watersheds[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45: W09417.
- [60] LIU J T, CHEN X, LIN H, et al. A simple geomorphic-based analytical model for predicting the spatial distribution of soil thickness in headwater hillslopes and catchments[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49: 7733-7746.
- [61] RODRÍGUEZ-ITURBE I, VALDÉS J B. The geomorphologic structure of hydrologic response[J]. *Water Resources Research*, 1979, 15: 1409-1420.
- [62] BEVEN K. What we see now: event persistence and predictability of hydro-eco-geomorphological systems[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 298: 4-15.
- [63] MILLY P C D, BETANCOURT J, FALKENMARK M, et al. Stationarity is dead: whither water management? [J]. *Science*, 2008, 319(5863): 573-574.

Understanding of critical zone structures and hydrological connectivity: a review*

LIU Jintao^{1,2}, HAN Xiaole², LIU Jianli³, LIANG Zhongmin², HE Ruimin⁴

- (1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 4. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: Upstream areas are the major flood contributing areas in humid regions. Upstream hillslopes, valleys and ephemeral channels provide quick pathways for flows during flood events. These pathways generate flows seasonally and only after a rainfall event, i. e. , the hydrological connectivity is ephemeral. Thus the dynamics of drainage networks such as expansion/contraction, and connection/disconnection, may offer important clues to understanding the patterns and processes of runoff generation. However, the mechanism of what controls the hydrological connectivity and how it connects the hillslope, valley and channels is yet to be understood. Extensive field studies in diverse catchments around the world continue to characterize and catalogue the enormous heterogeneity of hillslope structures and complexity of rainfall runoff processes in multiple watersheds, and at different scales. But, these field findings seem to be meaningless for the modeler, as they usually fail to incorporate the experimentalist's knowledge into their models. There is plenty of knowledge gap in the fundamentals with regard to how catchment are composed, organized and connected through hillslopes, valleys and channels, and how catchment storage affects rainfall-runoff responses. In this study, through comparisons of hillslope experiments, we find that process based connectivity is deeply affected by hillslope soil depth, bedrock terrain and drainage network structures. This review also showed that present research works are focusing on micro-scale mechanism (e. g. , soil pores and flow), and there is a gap between the hydrological connectivity experiments and the modelers. We suggest that experimentalists should find a macroscale pathway hidden in the critical zone that is the pivot of the runoff generation and shapes the flow hydrodynamics in the entire catchment. That is to say hydrological connectivity of hillslopes, valleys and ephemeral channels should focus on the cumulative effects of hillslope processes instead of individual soil pore processes. Finally, there should be a balance between conceptualizing of complex hillslope structures and moderate depiction of runoff generation.

Key words: critical zone structures; hillslope and valley; ephemeral channel; hydrological connectivity; mechanism of runoff generation

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2016YFC0401501) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41730750; No. 41771025).