

壤中暴流水文机理与致灾效应

崔 鹏^{1,2}, 张国涛¹, 张晨笛¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国—巴基斯坦地球科学研究中心, 巴基斯坦 伊斯兰堡 45320)

摘要: 壤中暴流是山丘区陡峭坡体包气带壤中流的一种特殊存在形式,也是山洪形成最为重要的产流机制之一。然而,现有研究对壤中暴流的科学内涵、机理过程与致灾特征的认知尚缺乏系统梳理和总结,限制了产汇流理论体系和山洪模型方法的发展。通过对国内外壤中暴流研究发展历程的梳理和产流物理过程的解析,本文厘清了壤中暴流的科学内涵与概念,提炼出壤中暴流发生的三大物理条件及其对非线性响应过程的影响,总结了壤中暴流对山洪、滑坡与泥石流致灾过程的影响机制。最后,凝练出未来需要深化的3个关键科学问题:包气带岩土体大孔隙水分输移过程与水文连通机制、坡面内部岩土体通道界面的水分交换过程及机理、复杂坡面地形条件下多产流机制综合的山洪形成机理。可为复杂山区的山洪形成机理与水文理论框架构建提供新的研究视角,更好支撑山洪灾害预测预报与防灾减灾的国家科技需求。

关键词: 壤中暴流;产流机制;包气带;山洪;致灾机理

DOI: 10.11821/dlxb202307005

1 引言

山洪广泛发育于约占中国陆地面积2/3的山丘区,是山地小流域表层物质快速输移的过程^[1],暴发突然,破坏性强,形成过程复杂,预测预报困难,往往造成毁灭性灾害,严重威胁广大山丘区人民生命财产和重大工程安全,制约社会经济的高质量发展。而且,随着全球气候变化加剧,山区局地极端强降雨频次增加,进一步增大了山洪灾害的不确定性和危害性^[2]。壤中暴流(Subsurface Stormflow)作为山洪形成的主要水源和重要产流机制,深刻地影响着山洪的孕育、形成和发展过程^[3-4],是特大山洪泥石流链生灾害研究的重要突破口。然而,壤中暴流的来水具有强非恒定特点、主要流通路径为复杂多孔介质^[5]且空间不均匀性较高^[6],导致其演变过程及成灾效应表现极端复杂性和高度不确定性^[7-9],加之水文数据资料的稀缺^[10],对深入认识壤中暴流的水文机理和灾害效应、构建基于物理过程的理论体系形成巨大挑战,限制其内涵、外延、研究对象、物理过程等理论方法体系与核心内容的发展和完善。

自“1965—1974年国际水文发展十年计划”颁布以来^[11-13],众多学者主要基于壤中暴流和降雨量的线性关系假设开展系列水文现象学研究,直到21世纪初,逐渐认识到壤

收稿日期: 2023-03-23; 修订日期: 2023-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41941017, 42201086); 国家重点研发计划(2022YFC3002902); 博士后创新人才支持计划项目(BX20220293) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41941017, No.42201086; National Key R&D Program of China, No.2022YFC3002902; The National Postdoctoral Program for Innovative Talents, No.BX20220293]

作者简介: 崔鹏(1957-), 男, 陕西西安人, 中国科学院院士, 主要从事山地灾害与水土保持研究。

E-mail: pengcui@imde.ac.cn

中暴流与输入变量降雨之间的非线性关系,并开展水文过程的机理研究^[4,14-17]。壤中暴流与山洪灾害关联密切,而山洪死亡人口占中国洪涝灾害死亡总人口年均比例高于70%^[18],使得山洪形成机理研究成为当前新时期水灾害及水文科学发展面临最重要的任务之一。深化壤中暴流水文机理与致灾效应研究,有助于揭示变化环境下山区流域水文过程与山洪形成的时空演变规律,构建考虑壤中暴流机制的山洪形成理论体系和模型,可为山区小流域山洪的预测预报和防灾减灾工作提供重要理论与科技支撑。

本文拟针对壤中暴流科学内涵的复杂性,从物理过程和发生条件出发界定壤中暴流概念的内涵与外延,梳理壤中暴流的发生条件和水文响应过程,总结其对成洪致灾机制的影响,最后提炼了未来研究需要关注的关键科学问题。

2 壤中暴流的概念与科学内涵

2.1 壤中暴流定义

国际上,壤中暴流(subsurface stormflow)也称间流(interflow/throughflow)、侧流(lateral flow)、地下径流(subsurface runoff)、瞬时地下水流(transient groundwater)与土壤水流(soil water flow)^[11,15,19]。众多术语的存在主要由于对降雨或融雪、融冰、灌溉渗漏等供水后壤中暴流水文响应物理过程理解的不全面。虽有研究将壤中暴流认为非饱和区的非饱和流^[11],但大多研究认为,壤中暴流是一种饱和(或接近饱和)的水流过程,主要是由地下水位上升至透水性更强上部土壤中形成侧向流动,或在低透水层上方出现瞬时饱和流的过程^[4,20-22]。

国内学者对该术语的概念表述与译文,最早可以追溯到1984年地质矿产部水文地质工程地质研究所出版的《水文地质词汇(英中法德俄文对照)》^[23],将“subsurface runoff”“subsurface flow”“subsurface stormflow”放在同一项目下解释为“地下径流,暴雨渗流,地下水流由下渗的降水在地面下作侧向运动而形成的水流”,1985年刘光文等编订的《英汉水文学词汇》^[24],并将其译为“[次]表层流,壤中流”;《英汉给水排水辞典》^[25](1989年)译为“暴雨渗入地下水流”;《现代英汉水利水电科技词典》^[26](1990年)译为“[次]表层流,壤中流,暴雨渗入地下水流”;《汉英英汉水利土木工程词典》^[27](1992年)将其译作“暴雨地下流量;表层流;壤中流”;《英汉水科学词汇(新编)》^[28](2002年)翻译为“暴雨渗流,土壤浅层侧向流”;亦有文献或书籍^[29-30]将其译为“地下暴雨径流、地下洪流、快速壤中流”。芮孝芳编著的《水文学原理》^[31](2012年)将其译为“壤中水径流”,并提出与“超渗地面径流”、“饱和地面径流”、“地下水径流”产生物理条件的差异性,但并没有给出明确的定义和概念;张艳军等主编的《山区小流域洪水过程及其模拟》(2021年)^[32]将其译为“壤中暴雨流”,在国内首次给出了基本概念,突出了“subsurface stormflow”在山洪形成与模拟中的重要性,但概念中对其物理过程和发生条件表述仍有所欠缺。

总体而言,国外学者并没有从物理过程和形成条件出发给予“subsurface stormflow”准确的概念和定义。笔者认为“壤中暴流”作为“subsurface stormflow”的中文译法更为合适,主要原因包括:①机理层面上,它是供水(降水)与下渗矛盾在一定介质条件下的发展机理和过程,是一种产流机制,如蓄满产流与超渗产流,而区别于单纯的“优先流”渗流过程(图1);②水源层面上,该过程主要区别于蓄满、超渗产流形成的表面径流,也不同于喀斯特地区深层地下流或地下河,主要是壤中流起主导作用,发生位置主要位于土壤—基岩界面及其以上的包气带。③形成特征上,它极易发生

于地形陡峭、气候湿润、土壤渗透强的土石山区,产流多且流速高,是山洪来水的重要组成部分,表现为:快而多,“暴”字形象表征了这一特点。

在此,我们认为壤中暴流主要指供水充足且高渗透性坡体的包气带,由重力自由水主导通过大孔隙通道、相对不透水界面而快速出流的现象。它具有非饱和带—暂存饱和带界面共存、水力梯度大、多界面变动产流的特点(图1)。壤中暴流作为一种产流机制的具体定义为:通常由暴雨或融雪、融冰、灌溉渗漏等供水期间,地表以下水流透过土层或风化层基岩等高渗透区,并在土壤间低渗透界面或基岩—土壤界面形成的坡面—河道水文连接通道向坡下快速运动的一种产流机制。

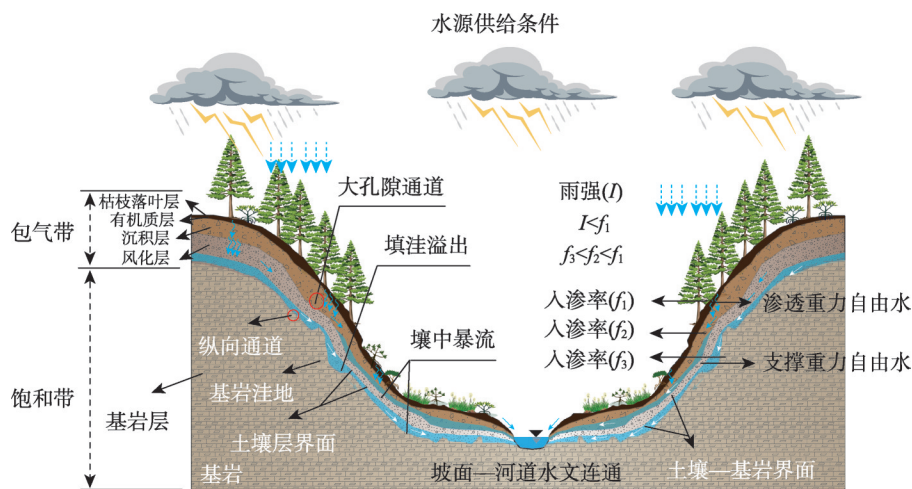


图1 壤中暴流形成机理示意图

Fig. 1 Schematic diagram in formation mechanism of subsurface stormflow

2.2 壤中暴流研究的渊源

壤中暴流的研究主要经历了3个主要发展阶段:发现提出阶段(1919—1960年)、规律探索阶段(1960—1980年)与形成机理研究阶段(1980年至今)。

(1) 壤中暴流现象发现与初期研究阶段(1919—1960年)

壤中暴流水文理论最早可追溯到1919年,瑞士著名水文学家Engler教授^[33]通过自然降雨观测到森林实验流域坡面根际区的强烈入渗作用以及土壤中或基岩—土壤界面上的“无数缝隙”的横向坡下运动过程,且并无坡面漫流出现,首次强调壤中暴流在森林水文过程的重要性。1936年,“Subsurface stormflow”由美国伊利诺伊州水文学家Hursh教授在著名的科维塔(Coweeta)实验流域水文研究中提出^[34]。后来10多年,他通过流域暴雨洪水过程的原型观测,开展径流分割与水源研究^[35-37],首次明确暴雨过程中流域尺度壤中暴流是洪水过程的重要组成水源。虽然壤中暴流产流理论与1933年Horton超渗产流理论^[38]的提出时间几乎同步,但因为壤中暴流形成运动过程的复杂性、流路径的隐蔽性与数学概化的高难度性,并未引起水文学者广泛重视。

(2) 壤中暴流规律探索阶段(1960—1980年)

直到20世纪60—70年代,通过国际水文十年计划(International Hydrological Decade, IHD),Whipkey^[39]、Dunne等^[40]、Weyman^[41]、Harr^[42]、Mosley^[43]等一些水文学家逐渐开始通过野外坡面观测与人工降雨实验,开展坡面尺度壤中暴流的现象学研究。如英国布里斯托大学水文学家Weyman^[41]开展坡面天然降雨观测(开挖60 cm深槽,剖面呈

现上覆土与不透水基岩),建立了坡面侧向排泄径流、水位与时间的函数关系,是最早采用坡面地下非饱和流与饱和流总势能概念对壤中暴流进行现场定量的研究。此外,美国农业部Harr^[42]教授通过流域精细化观测发现了降雨期间侧向下坡流域垂直下渗流大致相等,壤中暴流是洪水过程的主要径流来源,占据降雨总量比例高达38%。基于坡面、流域(非)饱和流过程的定性认识与定量论证,推动了壤中暴流的现象学研究,为壤中暴流水文机理在其他地质地貌环境下产流路径与响应过程的研究奠定了理论基础,对坡面壤中暴流研究具有深远的意义。

(3) 壤中暴流形成机理研究阶段(1980年至今)

为了解决流域壤中暴流水源形成、水流路径的科学难题,20世纪90年代左右,一些水文学家开始尝试借助染色剂、水化学(电导率EC、Cl⁻)、水同位素(δD 、 $\delta^{18}O$)等示踪剂定性或半定量研究“老水”“新水”问题、“水流路径与水源”问题,并阐明了“基岩—土壤界面水位寿命极短,与坡面渗流速率几乎相近”的观点,证实了壤中暴流快速补给径流的特点^[44-48]。同时,Woods等^[49]、Harris^[50]、McDonnell等^[51]、Burns等^[52]、Freer等^[14]研究发现,坡面基岩形态可显著控制壤中暴流过程,特别是基岩洼地能够影响壤中暴流初期产流过程。该发现有力推动壤中暴流理论的发展,直到21世纪仍在众多实验区得到验证^[4, 8, 16, 53-54],逐渐形成研究的主要模式与概念、理论模型。例如,两种典型的壤中暴流产流模式(图2d、2e)被广泛接受,第一种模式主要指暴雨过程中更深、更持久的地下水位上升后,与渗透性更强的多孔介质相交,导致横向快速流动^[16, 55]。第二种模式主要指在渗透差异大的界面(如土壤层、土壤—岩石界面)^[8, 53-54],通过土壤管网^[15]或风化层基岩裂缝^[56]产生横向快速下坡流,贡献于洪水径流。其中,第二种模式更为普遍。

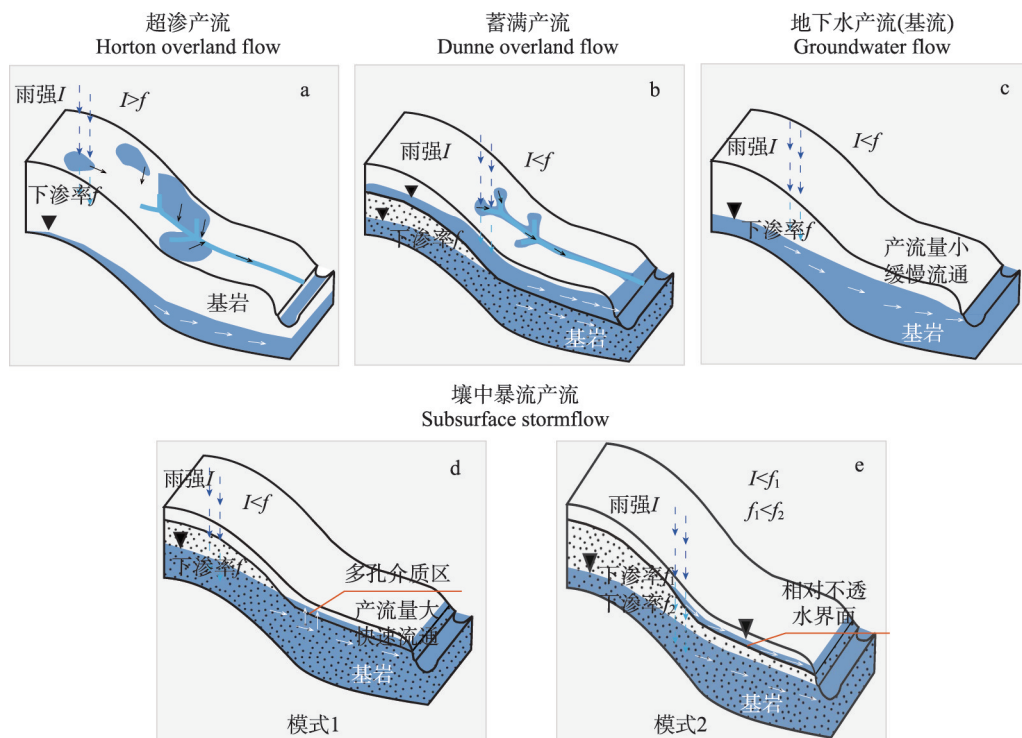
随着壤中暴流实验研究方法发展,如染色示踪提取技术、非侵入式影像获得技术、地下雷达探测技术、声波探测技术、电阻率层析成像技术、3S技术等^[32],国内外研究逐渐发现,壤中暴流产生主要受地形坡度、基岩洼地形态、前期土壤湿度、植被覆盖度、总降雨量、地形收敛性或辐合程度、以及多孔介质的储存特性等因素影响^[20, 54-55, 57-59]。现阶段壤中暴流的研究主要聚焦于山坡结构发育和微观水文过程相似性规律、壤中暴流发生的物理过程等方面的理论研究,但仍未取得有效突破。

2.3 壤中暴流与其他产流机制的差异性

从产流物理条件(雨强 I 和地面下渗率 f 关系)和水源组分来看,自然流域形成的径流主要包括4种:超渗地面径流、饱地面径流、壤中水径流和地下水径流(图2),壤中暴流产流机制主要以壤中水径流过程贡献于洪水径流,仅极少甚至没有表面径流与地下水径流对山洪形成的补给(图1、图2e),因此,区别于超渗、蓄满产流产生较高的地面径流量以及地下水产流形成较高的地下水径流量。

从产流发生部位来看,壤中暴流过程主要存在于包气带中下部,包气带上部岩土体孔隙大,下部一般含有若干相对不透水界面^[11](图2)。而超渗产流一般发生在包气带表层的不透水界面,岩土体孔隙小;蓄满产流横跨空间大,包括包气带与饱和带,具有可变水源层的特点^[31];地下水产流发生在饱和带部位,这些区域岩土体孔隙与壤中暴流发生部位相比均较小。

从产流变化速率和时间效应来看,壤中暴流过程以重力自由水为主,包气带水力梯度大,壤中水流速度快,岩土体—坡面—河道具有较好的内部水文连通条件^[6],但水流通过包气带若干界面水分再分配过程,产流响应时间较超渗产流略有滞后。对比之下,超渗产流变化速率快,响应时间短;蓄满产流以束缚水和毛管水为主、重力自由水为辅,产流前期包气带至饱和带水力梯度小,内部水流速度慢,产流响应时间更加滞后,产流



注: 改自于Ebel等^[9]。

图2 不同产流机制类别概念图

Fig. 2 Conceptual diagram of different runoff generation mechanisms

后期流动特点与超渗产流相似; 地下水产流流速慢, 响应时间最慢, 有时以年来计量。综上所述, 4种产流模式在响应时间方面的整体排序为: 超渗<壤中<蓄满<地下水。

3 壤中暴流的发生条件与水文响应过程

3.1 壤中暴流发生条件

不同气候区、地形地貌、坡面土体结构和内部通道等因素均影响着壤中暴流发生^[55, 58]。基于对壤中暴流发生物理机理的剖析和研究, 控制其发生的物理条件可归纳为水源供给条件、岩土体孔隙结构与水流通道条件、水力梯度条件3个方面。

(1) 水源供给条件

降雨雨强或融雪、融冰速率小于包气带上部地面下渗率, 水源供给量应充足, 通过包气带上部所损耗的束缚水、毛管水、重力水与蒸散发量, 在下部应有多余的土壤水超过饱和含水量阈值, 在通道界面形成的支持重力水量可达到土壤—坡面—河道自由水水文连通阈值, 确保坡面出口壤中产流发生。

(2) 岩土体孔隙结构与水流通道条件

壤中暴流所发生的包气带中存在相对不透水界面, 界面上部岩土体孔隙极为发育, 常伴有大孔隙结构, 且孔隙率远大于下部孔隙率, 同时, 界面处横向孔隙结构与孔隙率应略大于界面上部的等效孔隙率。包气带岩土体应存在上部孔隙通道和界面通道, 并与坡面、河道连通, 界面上部流路路径较为复杂, 以大孔隙非连续流为主, 水流速度快,

处于非饱和状态；界面处流路路径相对单一，但摩擦系数较垂向通道适当增加，水流过程主要以壤中浅层近似饱和流为主，连通坡面与河道水文通道，空间动力过程易被概化。

(3) 水力梯度条件

包气带所存界面上部主要由土水重力势主导，渗透重力自由水垂直贯穿包气带，水流阻力小；界面处形成暂存饱和带，横向水流阻力较垂向有所增大，主要有土水重力势和压力势共同主导，形成支撑重力自由水。当坡面达到一定坡度阈值时，包气带和暂存饱和出现较高的水力梯度条件，促进重力自由水与支撑重力水以较高流速流动，在土壤—坡面—河道瞬时连通可发生壤中暴雨。

3.2 水文响应非线性过程

输入变量降雨或融雪、融冰等水通量通过结构复杂的包气带与饱和带，受到输入条件的时空变异性、地形地貌的差异性、岩土体内部孔隙结构的复杂性、岩土体内部水分迁移的随机性与不均匀性等条件的约束，形成的壤中水径流量与输入水量间往往呈非线性水文关系，如Ali等^[60]提出的4种水文非线性行为表现形态（图3）：① 曲棍球棒曲线式（Hockey Stick Shape）^[11]；② 赫维赛德阶跃函数式（Heaviside Step Function）^[61]；③ 狄拉克函数式（Dirac Function）^[62]；④ S型函数式（Sigmoid Function）^[63]，其中，国内外水文学家通过野外实验观测到二线段水文阈值行为——曲棍球棒曲线式（图3a），更为普遍存在^[17, 57, 64-67]。即当降雨量达到一定的量值后，产流量出现突变的现象，并呈近似线性关系。

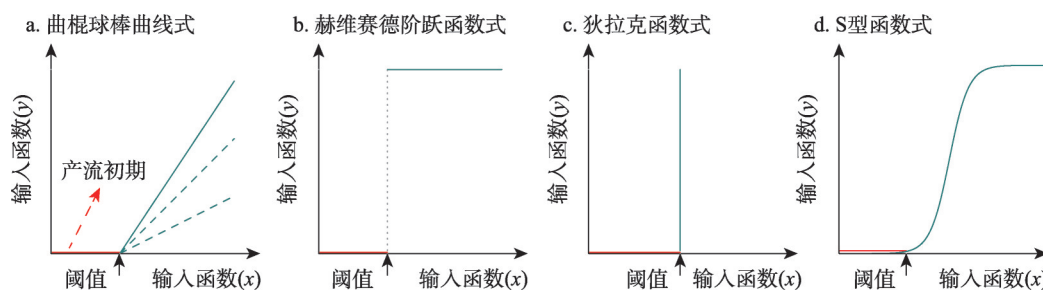


图3 典型非线性函数关系

Fig. 3 Relationship diagram of typical nonlinear functions

从输入水源供给条件看，降雨强度、规模、历时与空间分布均可造成水文非线性响应在时间与规模上产生明显差异。如前期降雨量大、历时短，空间分布集中，产流初损时间显著缩短，土壤—坡面—河道壤中水文过程瞬时连通。

从黑箱系统内部结构看，坡面岩土体孔隙结构复杂、相对不透水界面随机性强、垂直与横向水流通道多变、水力坡降空间分布不均等条件使流域与坡面过程无法满足线性叠加，导致壤中水流过程要素的时空耦合作用并非唯一性，具有极强的非线性特征。如坡面基岩洼地深且分布多，岩土体蓄水容量少，致使初期产流阈值增大。坡面地形越陡峭，水力坡降增加，产流时间缩短，产流量变化率增加，斜率增大（图3a）。

研究表明，流域产流初期阈值主要受坡面岩土体蓄水容量特性、坡面基岩洼地形态与数量、坡面包气带层理结构与界面特征控制^[4, 20, 54-55, 58, 68]，水流主要以受分子力作用形成的吸湿水或薄膜水形式出现^[69]，不易快速流动，响应时间较长。水流也可能以重力自由水形式填充基岩洼地但未达到溢出，坡面与河道的水文过程尚未连通^[4, 54]。当土壤内部蓄水容量达到一定值时会发生“逾渗转变”过程，坡面与河道连通的水文过程出现，致使产流发生首次突变现象。理想条件下降雨全部转化为径流时，降雨—径流阈值函数关系

的斜率(k)应呈 45° ($k=1$),但受流域气候水源条件及地形条件、岩土体前期蓄水容量、孔隙结构与流通过程等实际条件的影响,流域产流也呈现不同的非线性特征(图4),在世界范围内各代表区均发现该特征,新西兰 Maimai^[43]、墨西哥瓜达拉哈拉 Lake Zapotlan^[70]、中国四川龙溪河^[4]、日本冈山附近山区(Tatsunokuchi-yama)示范区流域^[71]、美国加利福尼亚科维塔实验流域(Coweeta Hydrologic Laboratory)^[68]及中国和睦桥流域^[72]。该产流现象揭示了坡面产流的阈值效应及突变特点,解析了不同气候区森林流域山坡优先流大量发育、壤中暴流的快速流出过程^[16, 20, 61, 65],阐明了流域山洪形成的激增特征和水源贡献路径。

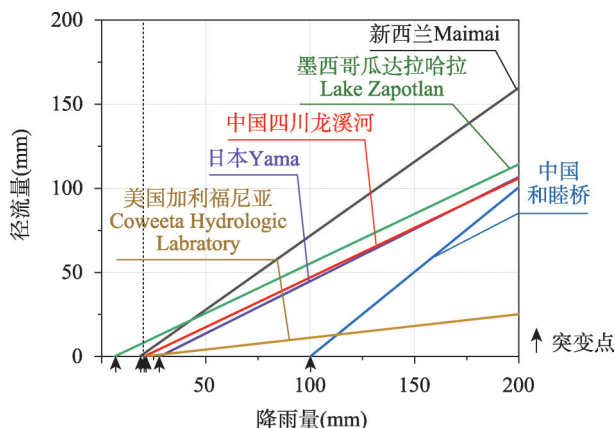


图4 不同代表区流域降雨径流非线性关系示意图

Fig. 4 Diagram of non-linear relationship between rainfall and runoff in different representative basins

4 壤中暴流致灾机理

壤中暴流作为陡峭湿润山区的重要水源路径和主导产流机制,深刻影响着山洪规模、峰现时间与成灾过程,主要体现以下3个方面。

(1) 壤中暴流具有水文连通性强与流动迅速的特点,是山洪突发性强的重要原因。壤中暴流发生的坡面地形陡峭,水力坡降大,坡面内部大孔隙结构极为发育,土壤—坡面—河道结构连通性强,通道内部水流阻力系数小,壤中水流以重力自由水出流,相对蓄满产流机制来说,速度更快,响应时间更短^[73];山洪成洪阶段,坡面基岩洼地填满溢出,形成坡面—河道快速流通的水文通道,且坡面下部位置饱和区面积逐渐扩大,表面径流响应时间显著缩短,坡面径流与河道洪水迅速形成,径流贡献量快速增加,峰值流量快速提高,峰现时间显著缩短,突发性强。如中国西南湿润区壤中暴流产流机制主导的龙溪河流域,流域滞时(T_L)可短至 0.58 h ^[4],成洪迅速,具有很高的山洪灾害风险。

(2) 壤中暴流具有多产流过程叠加的时空耦合非线性特征,可诱发高强度、大规模山洪。壤中暴流在坡面实际环境需要流通包气带复杂孔隙路径,受坡面地形、岩土体前期蓄水容量、坡面水力梯度、基岩洼地与形态等因子的协同影响,常伴有蓄满产流与地下水产流过程,具有坡面表面径流、壤中径流、地下径流三水源的多空间耦合的产流过程和非线性响应特征(图5)。如坡面壤中暴流发生时,在坡度作用下不断地向坡脚方向流动,坡脚逐渐形成饱和区(也称变水源产流面积),水流遇到应力薄弱的饱和土壤与非饱和土壤分界处,壤中水出流形成饱和地面径流,连通土壤—坡面—河道水文过程,变动源产流面积显著增加(图5b~5d);壤中暴流流经基岩—土壤界面时,基岩下部区域常伴有一定的裂隙通道,渗漏至基岩裂隙通道中,引起地下水产流。

降水渗入流经坡面内部微观系统复杂结构与路径,形成的壤中暴流响应过程较超渗产流表面快速响应略滞后,但因系统中水流的随机性、无序性、复杂性与不均匀性,产流的宏观累积效应常表达出高强度非线性行为,可解析山洪的径流激增机制。如,降雨产流过程普遍存在二线段突变行为,即当降雨量达到一定量值后,产流量出现突变现

象,同时,随着雨强增加,产流阈值后期产流量表现出较强的离散特性^[74],单一线性关系不能很好刻画暴雨成洪过程,限制了在山洪形成发展及其激增致灾过程的认识。由此,2017—2022年笔者结合已有山洪形成理论研究,联合国内外学者,提出了流域尺度的产流初期、成洪突变的双阈值—线性三阶段规律和响应函数^[4](图5),解决了山洪成洪突变非线性过程难以定量描述的难题,揭示了非饱和土壤蓄水容量与降雨深度对山洪形成—发展的动态控制作用,定量研究了暴雨强度与规模对成洪的主要控制作用,推动了微观水文机理研究到宏观成灾水文响应过程的跨尺度理论研究。

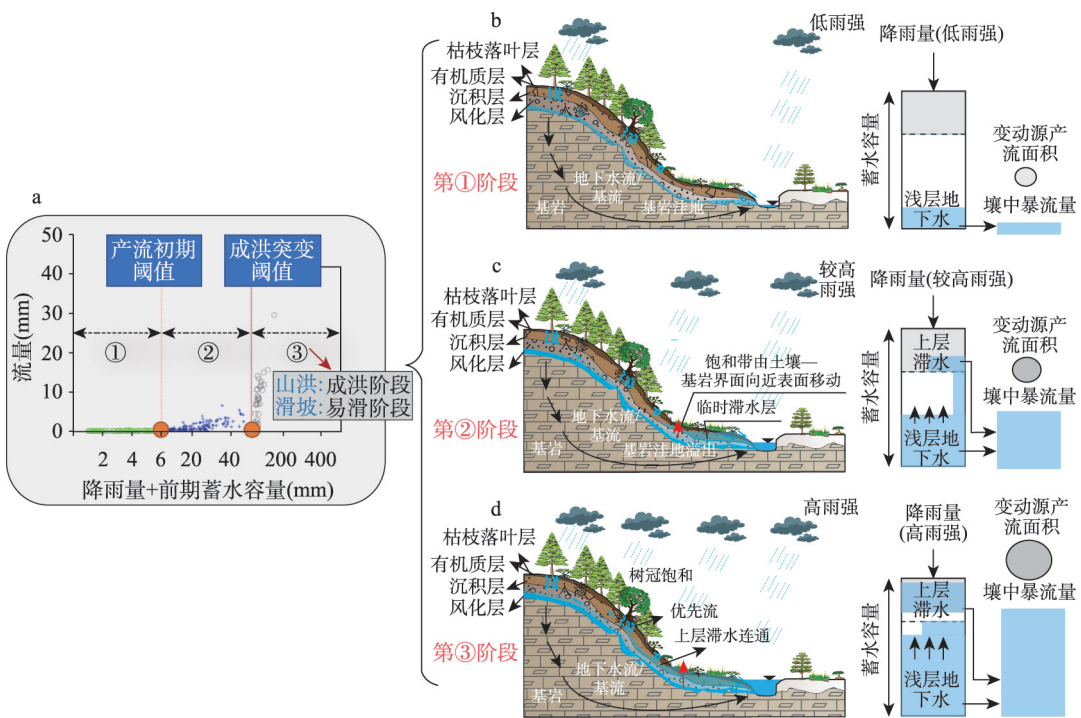


图5 高陡山区壤中暴流影响下的坡面水文过程与山洪成灾机制概念图
Fig. 5 Conceptual map of hillslope hydrological process and disaster-causing mechanism of flash flood affected by subsurface stormflow in high and steep mountain regions

(3) 壤中暴流发生的水文通道与界面,影响坡面岩土体物源结构稳定性和破坏过程,可诱发强破坏力的滑坡、泥石流灾害。山区斜坡包气带结构常由树根生长和腐烂等生物活动、在张力作用下开裂、干湿循环或冻融作用而引起的大孔隙,水流入渗过程中因横向差异流动,可驱动或侵蚀土壤颗粒,形成横向大孔隙土管道,普遍存在于滑坡的后缘陡壁中^[75],直径可达几厘米至几米不等^[19, 76]。暴雨径流通过垂直或横向大孔隙渗入至低渗透界面或基岩—土壤界面(图6b),形成近似饱和的壤中暴流过程或暂存饱和带,土管道网中水文活跃部分开始扩展,孔隙水压力增加,土体抗剪强度弱化,极易形成浅层滑坡^[77-78]。在水源充足条件下,考虑坡面与沟道运动中的水—土耦合过程,山洪、滑坡灾害可逐渐演化成泥石流灾害(图6a),灾害规模与破坏力度可成倍增加。

特别需要注意的是地震扰动区^[79-80]、林火扰动区^[81]、高寒冰川退缩区^[82-83]等内源性灾害与强外源性扰动耦合形成或遗留的大颗粒、宽级配、多介质土石体,具有如下共同的特征:① 植被破坏或稀疏,截留与蒸散发较少,包气带界面效应明显,增加地下径流、河流径流和物源破坏产沙能力;② 大孔隙结构发育,改变土壤水力特性,强烈的人渗能

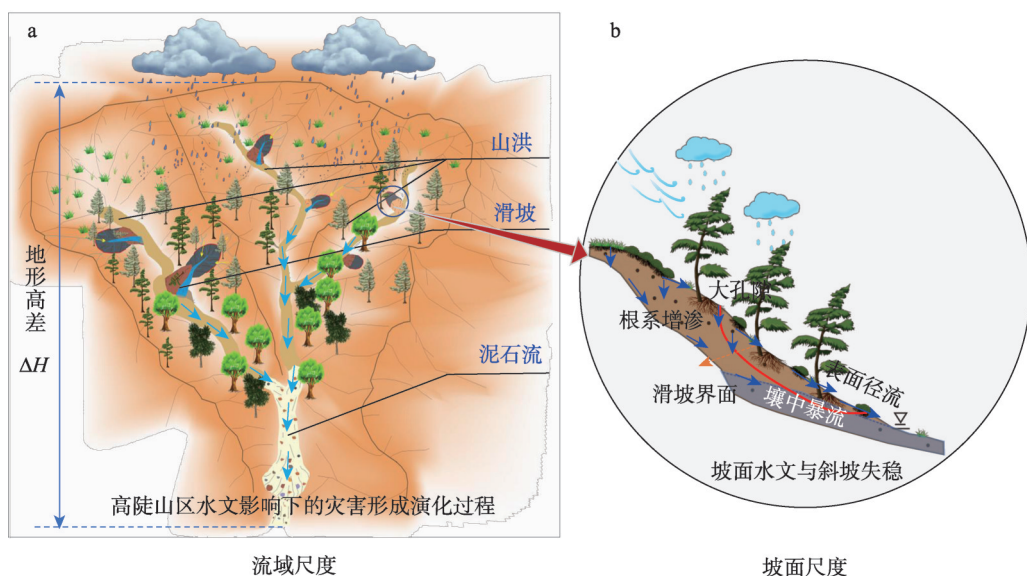


图6 壤中暴流影响下的山洪、滑坡与泥石流链生灾害发生过程

Fig. 6 Diagram of flash floods, landslides and debris flow chain disasters affected by the subsurface stormflow

力加剧壤中暴流和泥沙输移, 改变水源组分; ③ 景观格局分布与功能连通性改变, 影响坡面、流域的蓄水能力和传输路径。这些特征可诱发山洪、滑坡、泥石流同步发生的复合型链生灾害, 具有强大破坏力和高风险的特点, 需要水文、水力、地质、地貌、灾害等多学科交叉研究与持续关注。

5 需要深化研究的科学问题

深化壤中暴流水文机理的理解和理论认知, 对于高陡湿润土石山区山洪形成关键过程理论体系构建和预警预报发展具有重要科学价值。本文主要针对壤中暴流形成过程中坡面岩土体微观孔隙路径复杂性与水文输移动力演化的不确定性、通道界面水分交换的不均匀性、以及成灾过程多产流机制的时空叠加性3个方面的不足, 提炼出未来需要关注的3个关键科学问题。

5.1 包气带岩土体大孔隙水分输移过程与水文连通机制

包气带岩土体内部孔隙结构复杂、通道多变, 在不同的气候区、地形地貌及土壤植被类型中均有不同, 影响整个包气带壤中暴流形成过程中的水文流通性与水分储量。特别是地震、火山、冰川退缩等内源性灾害与外源性强扰动地表过程的区域, 岩土体大孔隙通道内水分输移动力过程更为复杂。因此, 明确不同典型区包气带岩土体大孔隙空间的结构特征(如数量、长度、宽度、空间水力半径及分布特征)、孔隙水压力与局部渗透系数等微观信息, 定量刻画外部水源补给条件下岩土体内部垂向与侧向的水力特性与动力演化特征, 建立微观流动特性与宏观产流过程的映射关系, 构建具有一定水文相似性分析的理论模块与框架, 对于延伸或过渡到坡面宏观累积水文响应规律和区域水文地理研究^[84-85]具有重要的理论价值。

5.2 坡面内部岩土体通道界面的水分交换过程及机理

自然坡面内部结构的大孔隙通道具有高度的复杂性和水流随机性, 造成内部岩土体

颗粒界面与水分交换时空分布极不均匀,具有不同的土壤水赋存形态。而且,内部通道交叉纵横,垂向、侧向通道内部界面主要以渗透重力自由水、支撑重力自由水通过,对周边多孔介质水文交换的影响程度、范围、时效及作用机理依旧存在很大不确定性,影响坡体水文通量的准确评估和参数化量化方案,如新水与旧水的交换^[54]。加强量化壤中暴流形成过程中坡面内部不同界面的水文交换模式与过程,是坡面壤中暴流物理过程机理与理论建模研究的前提条件与核心问题。

5.3 复杂坡面地形条件下多产流机制综合的山洪形成机理

自然环境坡面壤中暴流发生时,常伴有蓄满产流与地下水产流过程,具有坡面表面径流、壤中径流、地下径流三水源、变动产流层多空间耦合的产流特点^[86],土壤—坡面—河道水文连通过程中,坡面漫流的变动源产流面积显著增加,不同水源发生位置、饱和状态、面积占比以及贡献量等信息也模糊不清,对峰现流量的贡献依旧未能准确量化。此外,不同的坡面、基岩形态、长度等背景参数控制了产流过程的水力梯度和流通时间,影响山洪峰现时刻。因此,应加强壤中暴流影响下变动产流层的理论概化与理论建模,量化坡面条件对山洪成灾的影响,构建考虑多产流机制的山洪形成理论体系和模型,支撑国家山洪的预警预报与防灾减灾工作。

6 结语

立足于山洪产流机理的科学目标和国家防灾减灾的战略目标,本文系统回顾了山洪形成中“壤中暴流”研究的兴起与发展历程,科学界定了“壤中暴流”内涵与概念,剖析了壤中暴流发生的物理条件、非线性水文响应规律及其致灾特征,突出体现壤中暴流是当前山洪、滑坡、泥石流复合链生灾害形成研究的关键水文机制与理论突破口。并凝练出未来需要深化的3个关键科学问题,可促进不同气候地貌区山洪灾害研究从单一产流机制描述向多产流机制综合刻画转变,推动山洪灾害理论体系发展和减灾原理的深化,支撑国家防灾减灾的理论与技术需求。

参考文献(References)

- [1] Cui Peng, Zou Qiang. Theory and method of risk assessment and risk management of debris flows and flash floods. *Progress in Geography*, 2016, 35(2): 137-147. [崔鹏, 邹强. 山洪泥石流风险评估与风险管理理论与方法. *地理科学进展*, 2016, 35(2): 137-147.]
- [2] Yin J B, Gentile P, Zhou S, et al. Large increase in global storm runoff extremes driven by climate and anthropogenic changes. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 4389. DOI: 10.1038/s41467-018-06765-2.
- [3] Ebel B A, Shephard Z M, Walvoord M A, et al. Modeling post-wildfire hydrologic response: Review and future directions for applications of physically based distributed simulation. *Earth's Future*, 2023, 11(2): e2022EF003038. DOI: 10.1029/2022EF003038.
- [4] Zhang G T, Cui P, Gualtieri C, et al. Stormflow generation in a humid forest watershed controlled by antecedent wetness and rainfall amounts. *Journal of Hydrology*, 2021, 603. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.127107.
- [5] Yu X, Duffy C, Baldwin D C, et al. The role of macropores and multi-resolution soil survey datasets for distributed surface-subsurface flow modeling. *Journal of Hydrology*, 2014, 516: 97-106.
- [6] Liu Jintao, Han Xiaole, Liu Jianli, et al. Understanding of critical zone structures and hydrological connectivity: A review. *Advances in Water Science*, 2019, 30(1): 112-122. [刘金涛, 韩小乐, 刘建立, 等. 山坡表层关键带结构与水文连通性研究进展. *水科学进展*, 2019, 30(1): 112-122.]
- [7] Braud I, Ayrat P A, Bouvier C, et al. Multi-scale hydrometeorological observation and modelling for flash flood understanding. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(9): 3733-3761.
- [8] Liang W L. Dynamics of pore water pressure at the soil-bedrock interface recorded during a rainfall-induced shallow landslide in a steep natural forested headwater catchment, Taiwan. *Journal of Hydrology*, 2020, 587. DOI: 10.1016/j.

- jhydrol.2020.125003.
- [9] Mirus B B, Smith J B, Baum R L. Hydrologic impacts of landslide disturbances: Implications for remobilization and hazard persistence. *Water Resources Research*, 2017, 53(10): 8250-8265.
- [10] Liu Changming, Bai Peng, Wang Zhonggen, et al. Study on prediction of ungauged basins: A case study on the Tibetan Plateau. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(3): 272-282. [刘昌明, 白鹏, 王中根, 等. 稀缺资料流域水文计算若干研究: 以青藏高原为例. *水利学报*, 2016, 47(3): 272-282.]
- [11] Weiler M, McDonnell J J, Tromp-van Meerveld I, et al. Subsurface Stormflow//Anderson M G (ed.). *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. Hoboken: John Wiley & Sons Press, 2005: 1-14.
- [12] Dunne T. Field studies of hillslope flow processes//Kirkby M J (ed.). *Hillslope Hydrology*. New York: Wiley-Interscience Press, 1978: 227-293.
- [13] Beasley R S. Contribution of subsurface flow from the upper slopes of forested watersheds to channel flow. *Soil Science Society of America Journal*, 1976, 40(6): 955-957.
- [14] Freer J, McDonnell J J, Beven K J, et al. The role of bedrock topography on subsurface storm flow. *Water Resources Research*, 2002, 38(12). DOI: 10.1029/2001WR000872.
- [15] Uchida T, Tromp-van Meerveld I, McDonnell J J. The role of lateral pipe flow in hillslope runoff response: An intercomparison of non-linear hillslope response. *Journal of Hydrology*, 2005, 311(1-4): 117-133.
- [16] 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. *Hydrological Processes*, 2010, 24(16): 2222-2236.
- [17] Scaife C I, Singh N K, Emanuel R E, et al. Non-linear quickflow response as indicators of runoff generation mechanisms. *Hydrological Processes*, 2020, 34(13): 2949-2964.
- [18] Zhang Guotao. Emergent behaviors of post-earthquake flash floods in the Longxi river watershed [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021. [张国涛. 龙溪河震后山洪径流激增机制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.]
- [19] Lu N, Godt J W. *Hillslope Hydrology and Stability*. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [20] Xiao H B, Xu K, Zhan Y M, et al. Physical structure and rainfall controls on subsurface hydrological connectivity in hillslope-riparian-stream continuums. *CATENA*, 2022, 214: 106286. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106286.
- [21] Ross C A. Moving towards a unified threshold-based hydrological theory through inter-comparison and modelling [D]. Winnipeg: University of Manitoba, 2021.
- [22] Barthold F K, Woods R A. Stormflow generation: A meta-analysis of field evidence from small, forested catchments. *Water Resources Research*, 2015, 51(5): 3730-3753.
- [23] Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Ministry of Geology and Mineral Resources. *Hydrogeological Vocabulary*. Beijing: Geology Press, 1984. [地质矿产部水文地质工程地质研究所. 水文地质词汇. 北京: 地质出版社, 1984.]
- [24] Liu Guangwen, Zhou Enji. *English and Chinese Hydrology Vocabulary*. Beijing: Science Press, 1985. [刘光文, 周恩来. 英汉水文学词汇. 北京: 科学出版社, 1985.]
- [25] Wang Yejun, Xu Baojiu. *English-Chinese Dictionary of Water Supply and Drainage*. Beijing: China Building Industry Press, 1989. [王业俊, 许保玖. 英汉给水排水辞典. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.]
- [26] Zhang Zezhen. *English-Chinese Dictionary of Water Conservancy and Hydropower Technology*. Beijing: China Water Power Press, 2005. [张泽祯. 英汉水利水电技术词典. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.]
- [27] Qin Dayong, Jiang Chao, Wang Hao, et al. *Chinese-english Dictionary of Hydraulic and Civil Engineering*. Beijing: China Science and Technology Press, 1992. [秦大庸, 蒋超, 王浩, 等. 汉英—英汉水利土木工程词典. 北京: 中国科学技术出版社, 1992.]
- [28] Wu Zhicai, Ding Genhong. *English-Chinese Glossary of Water Science (New Edition)*. Beijing: Science Press, 2002. [吴志才, 丁根宏. 英汉水科学词汇(新编). 北京: 科学出版社, 2002.]
- [29] Hendriks M. *Introduction to Physical Hydrology*. New York: Oxford University Press, 2017: 225-230.
- [30] Jian Wenxing, Wang Jing'e, Hou Long. *Hillslope Hydrology and Stability*. Beijing: Higher Education Press, 2014. [简文星, 王菁莪, 侯龙. 斜坡水文与稳定. 北京: 高等教育出版社, 2014.]
- [31] Rui Xiaofang. *Principles of Hydrology*. Beijing: Higher Education Press, 2012. [芮孝芳. 水文学原理. 北京: 高等教育出版社, 2012.]
- [32] Zhang Yanjun, Xu Wensheng, Cheng Lei, et al. *Flood Process and Simulation in Small Mountain Watersheds*. Beijing:

- Science Press, 2021. [张艳军, 许文盛, 程磊, 等. 山区小流域洪水过程及其模拟. 北京: 科学出版社, 2021.]
- [33] Engler A. Untersuchungen über den Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer. Zürich: Beer Press, 1919.
- [34] Lee C H. Report of the Committee on Absorption and Transpiration, 1935-36. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1936, 17(2): 296-302.
- [35] Hursh C R. Appendix B: Report of the subcommittee on subsurface flow. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1946, 27(1): 123-124.
- [36] Hoover M D, Hursh C R. Influence of topography and soil - depth on runoff from forest land. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1943, 24(2): 693-698.
- [37] Hursh C R, Brater E F. Separating storm-hydrographs from small drainage-areas into surface-and subsurface-flow. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1941, 22(3): 863-871.
- [38] Horton R E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1933, 14 (1): 446-460.
- [39] Whipkey R Z. Subsurface Stormflow from forested slopes. *International Association of Scientific Hydrology Bulletin*, 1965, 10(2): 74-85.
- [40] Dunne T, Black R D. Partial area contributions to storm runoff in a small new England watershed. *Water Resources Research*, 1970, 6(5): 1296-1311.
- [41] Weyman D R. Measurements of the downslope flow of water in a soil. *Journal of Hydrology*, 1973, 20(3): 267-288.
- [42] Harr R D. Water flux in soil and subsoil on a steep forested slope. *Journal of Hydrology*, 1977, 33(1-2): 37-58.
- [43] Mosley M P. Streamflow generation in a forested watershed, New Zealand. *Water Resources Research*, 1979, 15(4): 795-806.
- [44] McGlynn B L, McDonnell J J. Role of discrete landscape units in controlling catchment dissolved organic carbon dynamics. *Water Resources Research*, 2003, 39(4): 1090. DOI: 10.1029/2002WR001525.
- [45] Sklash M G, Stewart M K, Pearce A J. Storm runoff generation in humid headwater catchments: 2. A case study of hillslope and low-order stream response. *Water Resources Research*, 1986, 22(8): 1273-1282.
- [46] Pearce A J, Stewart M K, Sklash M G. Storm runoff generation in humid headwater catchments: 1. Where does the water come from? *Water Resources Research*, 1986, 22(8): 1263-1272.
- [47] McDonnell J J, Owens I F, Stewart M K. A case study of shallow flow paths in a steep zero-order basin 1. *Journal of the American Water Resources Association*, 1991, 27(4): 679-685.
- [48] McDonnell J J. The age, origin and pathway of subsurface stormflow in a steep humid headwater catchment [D]. Christchurch: University of Canterbury, 1988.
- [49] Woods R, Rowe L. The changing spatial variability of subsurface flow across a hillside. *Journal of Hydrology (New Zealand)*, 1996, 35(1): 51-86.
- [50] Harris D M, McDonnell J J, Rodhe A. Hydrograph separation using continuous open system isotope mixing. *Water Resources Research*, 1995, 31(1): 157-171.
- [51] McDonnell J J, Freer J, Hooper R, et al. New method developed for studying flow on hillslopes. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1996, 77(47): 465-472.
- [52] Burns D A, Hooper R P, McDonnell J J, et al. Base cation concentrations in subsurface flow from a forested hillslope: The role of flushing frequency. *Water Resources Research*, 1998, 34(12): 3535-3544.
- [53] Tromp-van Meerveld H J, McDonnell J J. Threshold relations in subsurface stormflow: 2. The fill and spill hypothesis. *Water Resources Research*, 2006, 42(2). DOI: 10.1029/2004WR003800.
- [54] McDonnell J J, Spence C, Karran D J, et al. Fill-and-spill: A process description of runoff generation at the scale of the beholder. *Water Resources Research*, 2021, 57(5): e2020WR027514. DOI: 10.1029/2020WR027514.
- [55] Wu S, Zhao J, Wang H, et al. Regional patterns and physical controls of streamflow generation across the conterminous United States. *Water Resources Research*, 2021, 57(6): e2020WR028086. DOI: 10.1029/2020WR028086.
- [56] Montgomery D R, Dietrich W E, Torres R, et al. Hydrologic response of a steep, unchanneled valley to natural and applied rainfall. *Water Resources Research*, 1997, 33(1): 91-109.
- [57] Lan Min. Study on constitutive relationship of runoff generation at the hillslope scale [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014. [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.]
- [58] Gutierrez-Jurado K Y, Partington D, Shanfield M. Taking theory to the field: Streamflow generation mechanisms in an intermittent Mediterranean catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25(8): 4299-4317.
- [59] Sidle R C, Tsuboyama Y, Noguchi S, et al. Stormflow generation in steep forested headwaters: A linked

- hydrogeomorphic paradigm. *Hydrological Processes*, 2000, 14(3): 369-385.
- [60] Ali G, Oswald C J, Spence C, et al. Towards a unified threshold-based hydrological theory: Necessary components and recurring challenges. *Hydrological Processes*, 2013, 27(2): 313-318.
- [61] Tromp-van Meerveld H J, McDonnell J J. Threshold relations in subsurface stormflow: 1. A 147-storm analysis of the Panola hillslope. *Water Resources Research*, 2006, 42(2). DOI: 10.1029/2004WR003778.
- [62] James A L, Roulet N T. Investigating hydrologic connectivity and its association with threshold change in runoff response in a temperate forested watershed. *Hydrological Processes*, 2007, 21(25): 3391-3408.
- [63] Zehe E, Elsenbeer H, Lindenmaier F, et al. Patterns of predictability in hydrological threshold systems. *Water Resources Research*, 2007, 43(7). DOI: 10.1029/2005WR004236.
- [64] Haga H, Matsumoto Y, Matsutani J, et al. Flow paths, rainfall properties, and antecedent soil moisture controlling lags to peak discharge in a granitic unchanneled catchment. *Water Resources Research*, 2005, 41(12). DOI: 10.1029/2005WR004236.
- [65] Detty J M, McGuire K J. Threshold changes in storm runoff generation at a till-mantled headwater catchment. *Water Resources Research*, 2010, 46(7). DOI: 10.1029/2009WR008102.
- [66] Graham C B, Woods R A, McDonnell J J. Hillslope threshold response to rainfall: (1) A field based forensic approach. *Journal of Hydrology*, 2010, 393(1/2): 65-76.
- [67] Wang S, Yan Y, Fu Z Y, et al. Rainfall-runoff characteristics and their threshold behaviors on a karst hillslope in a peak-cluster depression region. *Journal of Hydrology*, 2022, 605. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141375.
- [68] Scaife C I, Band L E. Nonstationarity in threshold response of stormflow in southern Appalachian headwater catchments. *Water Resources Research*, 2017, 53(8): 6579-6596.
- [69] Jin Z, Guo L, Yu Y L, et al. Storm runoff generation in headwater catchments on the Chinese Loess Plateau after long-term vegetation rehabilitation. *Science of the Total Environment*, 2020, 748: 141375. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141375.
- [70] Farrick K K, Branfireun B A. Soil water storage, rainfall and runoff relationships in a tropical dry forest catchment. *Water Resources Research*, 2014, 50(12): 9236-9250.
- [71] Tani M. Runoff generation processes estimated from hydrological observations on a steep forested hillslope with a thin soil layer. *Journal of Hydrology*, 1997, 200(1): 84-109.
- [72] Han X L, Liu J T, Srivastava P, et al. Effects of critical zone structure on patterns of flow connectivity induced by rainstorms in a steep forested catchment. *Journal of Hydrology*, 2020, 587: 125032. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125032.
- [73] Zhang G T, Cui P, Jin W, et al. Changes in hydrological behaviours triggered by earthquake disturbance in a mountainous watershed. *Science of the Total Environment*, 2021, 760: 143349. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143349.
- [74] Wei L Z, Qiu Z J, Zhou G Y, et al. Stormflow threshold behaviour in a subtropical mountainous headwater catchment during forest recovery period. *Hydrological Processes*, 2020, 34(8): 1728-1740.
- [75] Brand E W, Dale M J, Nash J M. Soil pipes and slope stability in Hong Kong. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 1986, 19(3): 301-303.
- [76] Uchida T, Kosugi K i, Mizuyama T. Effects of pipeflow on hydrological process and its relation to landslide: A review of pipeflow studies in forested headwater catchments. *Hydrological Processes*, 2001, 15(11): 2151-2174.
- [77] Sidle R C, Bogaard T A. Dynamic earth system and ecological controls of rainfall-initiated landslides. *Earth-Science Reviews*, 2016, 159: 275-291.
- [78] Lanni C, Borga M, Rigon R, et al. Modelling shallow landslide susceptibility by means of a subsurface flow path connectivity index and estimates of soil depth spatial distribution. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(11): 3959-3971.
- [79] Cui P, Lin Y M, Chen C. Destruction of vegetation due to geo-hazards and its environmental impacts in the Wenchuan earthquake areas. *Ecological Engineering*, 2012, 44: 61-69.
- [80] Sidle R C, Gomi T, Loaiza Usuga J C, et al. Hydrogeomorphic processes and scaling issues in the continuum from soil pedons to catchments. *Earth-Science Reviews*, 2017, 175: 75-96.
- [81] Lei M Y, Cui Y F, Ni J J, et al. Temporal evolution of the hydromechanical properties of soil-root systems in a forest fire in China. *Science of the Total Environment*, 2022, 809: 151165. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151165.
- [82] Gharari S, Clark M P, Mizukami N, et al. Improving the representation of subsurface water movement in land models. *Journal of Hydrometeorology*, 2019, 20(12): 2401-2418.

- [83] Bondevik S, Sorteberg A. Groundwater fluctuations during a debris flow event in western Norway: Triggered by rain and snowmelt. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25(7): 4147-4158.
- [84] Liu Changming, Liu Xuan, Yang Yafeng, et al. A discussion on some issues of hydro-geographical research. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(1): 3-15. [刘昌明, 刘璇, 杨亚锋, 等. 水文地理研究发展若干问题商榷. *地理学报*, 2022, 77(1): 3-15.]
- [85] Liu Changming, Zheng Du, Cui Peng, et al. Innovative development and prospect of physical geography. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(12): 2547-2569. [刘昌明, 郑度, 崔鹏, 等. 自然地理学创新发展与展望. *地理学报*, 2020, 75(12): 2547-2569.]
- [86] Zhao Jianfei, Liang Zhongmin, Liu Jintao, et al. Variable runoff generation layer distributed hydrological model for hilly regions. *Advances in Water Science*, 2022, 33(3): 429-441. [赵建飞, 梁忠民, 刘金涛, 等. 山丘区变动产流层分布式水文模型. *水科学进展*, 2022, 33(3): 429-441.]

Hydrological mechanism and disaster-causing effects of subsurface stormflow

CUI Peng^{1,2}, ZHANG Guotao¹, ZHANG Chendi¹

(1. Institutes of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. China-Pakistan Joint Research Center on Earth Sciences, Islamabad 45320, Pakistan)

Abstract: Subsurface stormflow is a special form of subsurface flow in the vadose zone of steep slopes in mountainous and hilly regions, and it is also one of the most important runoff generation mechanisms in the process of flash flood formation. However, the systematic summary on the scientific connotation, mechanisms, and disaster-causing characteristics of the subsurface stormflow in current research is very rare and this limits the development of the theoretical system of runoff generation, routing, and modeling methods of flash floods. Herein, we clarify the scientific connotation and definition of subsurface stormflow based on the division of the development periods of the subsurface stormflow research around the world as well as the analysis of physical processes for the runoff generation. Meanwhile, three physical conditions for the occurrence of subsurface stormflow, together with their influences on the nonlinear response process, are highlighted. The influences of the subsurface stormflow on the dynamic development of flash floods, landslides, and debris flow hazards are analyzed and summarized. Finally, three key research directions are proposed: water transport processes and hydrological connectivity mechanism of the macropores in the vadose zone, processes and mechanisms of water exchange at the geotechnical channel interfaces inside the slopes, and the formation mechanism for flash flood from multiple runoff generation processes with complex slope topography conditions. This work can provide new research perspectives for the formation mechanism and hydrological theoretical framework of flash floods in complex mountainous regions, and better support the national scientific and technological needs for flash flood forecast as well as disaster prevention and mitigation.

Keywords: subsurface stormflow; runoff generation mechanism; vadose zone; flash flood; disaster-causing mechanism