

包红军,张珂,晁丽君,等,2017. 基于水土耦合机制的流域滑坡预报研究[J]. 气象,43(9):1117-1129.

基于水土耦合机制的流域滑坡预报研究^{*}

包红军¹ 张珂^{2,3} 晁丽君^{2,3} 赵晓萌⁴ 刘艳辉⁵ 王晟^{2,3} 刘凑华¹

1 国家气象中心,北京 100081

2 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,南京 210098

3 河海大学水文水资源学院,南京 210098

4 陕西省气候中心,西安 710014

5 中国地质环境监测院(国土资源部地质灾害应急技术指导中心),北京 100081

提 要: 降水诱发型滑坡灾害涉及水文与土壤失稳过程,是个非常复杂的预报难题。本研究应用 CRESLIDE(Coupled Routing and Excess Storage and Slope-Infiltration-Distributed Equilibrium)模型,研究基于水土耦合机制的流域滑坡预报。模型输入格点降水由基于流域逐小时加密雨量站的反距离权重法插值获取;基于 GIS、DEM 和遥感技术,提取滑坡流域下垫面信息;采用分布式水文模型 CREST 模拟预报出滑坡研究区域的流域水文过程,作为中间变量驱动滑坡模型 SLIDE,实现降水诱发型滑坡的预报。选择陕南月河流域 2012 年 7 月 3—5 日降水诱发型滑坡过程进行模拟预报,验证模型的适用性。结果表明,基于 CRESLIDE 模型的流域水土耦合滑坡预报模型在滑坡时空预报上表现稳定;通过 ROC 曲线分析 CRESLIDE 模型取得的特异性(87.8%)和敏感性(52.9%)均较好;本研究基于流域水土耦合机制研究滑坡机理预报,耦合了流域水文过程与土力学过程,使得流域水文模拟更为合理,在滑坡的预报与早期预警中表现良好,对同类滑坡预报有一定的借鉴意义。

关键词: 滑坡预报,水土耦合,CRESLIDE 模型,CREST 模型,月河

中图分类号: P442,P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.09.009

Landslides Forecasting Using a Physically-Based, Coupled Hydrological-Geotechnical Framework

BAO Hongjun¹ ZHANG Ke^{2,3} CHAO Lijun^{2,3} ZHAO Xiaomeng⁴

LIU Yanhui⁵ WANG Sheng^{2,3} LIU Couhua¹

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098

3 College of Hydrology and Water Recourses, Hohai University, Nanjing 210098

4 Shaanxi Climate Center, Xi'an 710014

5 China Institute of Geo-Environmental Monitoring (Technical Center for Geo-Hazards Emergency of MLR), Beijing 100081

Abstract: Rainfall-induced landslide disasters, which involve hydrological processes and geotechnical processes, are a complex prediction problem. In this study, a coupled hydrological-geotechnical model called CRESLIDE (Coupled Routing and Excess Storage and Slope-Infiltration-Distributed Equilibrium) was applied for landslides forecasting in the Yuehe River Basin. The hourly gridded precipitation data as the input of the CRESLIDE model were calculated using the inverse-distance weighted interpolation

^{*} 国家自然科学基金(41775111、51509043)、国家重点研发计划(2016YFC0402702、2016YFC0402701)、中国气象局首批青年英才计划(2014—2017)、中央高校基本科研业务费项目(2015B28514)、水文水资源与水利工程科学国家重点实验室基金(20165042212)、中国气象局气象预报业务关键技术的发展专项[YBGJXM(2017)06]和国家气象中心水文气象预报团队项目共同资助

2017 年 1 月 3 日收稿; 2017 年 3 月 8 日收修定稿

第一作者:包红军,主要从事水文气象、流域水文与山洪地质灾害气象预报预警业务与科研工作. Email: baohongjun@cma.gov.cn

通信作者:张珂,主要从事水文水资源、水文气象研究工作. Email: kzhang@hhu.edu.cn

method from reported values by encryption rainfall stations of China Meteorological Administration (CMA). By utilizing GIS, DEM and RS technology, the characteristic information of the test basin was extracted. The CREST distributed hydrological model was applied for simulating hydrological processes and computing the key intermediate variables as forcings of the SLIDE model to forecast rainfall-induced landslide events. We chose the Yuehe River Basin, located in the south of Shaanxi Province, as the test region for landslide forecasting. The results show that the CRESLIDE model has a generally good reliability to accurately predict occurrence of landslides (location and timing). Receiver Operating Characteristic (ROC) analysis indicated that the CRESLIDE model perform well with a high specificity (87.8%) and a reasonably good sensitivity (52.9%). Coupled hydrological-geotechnical framework like the CRESLIDE model is based on physical processes and has a more realistic representation of hydrological processes, so this type of model is very useful for landslide prediction and early warning. This study provides valuable information and insight for similar studies in this field.

Key words: landslides forecasting, coupled hydrological-geotechnical framework, the CRESLIDE model, the CREST model, Yuehe River Basin

引 言

我国是世界上地质灾害最为严重的国家之一,其中滑坡灾害发生点多面广、突发性强,是我国地质灾害最主要的类型之一(刘传正等,2009;刘艳辉等,2015)。滑坡灾害主要是在一定的地质环境条件下,受到自然因素(如降水、地震)和人为因素(如工程活动)激发导致的,常见的触发强迫因子为降水(李铁锋和丛威青,2006;刘艳辉等,2015)。短历时强降水诱发型浅层滑坡往往造成人员伤亡生命财产重大损失(Hong et al, 2006; Kirschbaum et al, 2010)。突发的滑坡体带来大量的碎石与泥浆导致道路被损毁、房屋被掩埋、大量人员与牲畜死亡。据统计,在美国每年有 25~50 人死于滑坡灾害,超过 20 亿美元的经济损失(Spiker and Gori, 2003)。2013 年 9 月 11—13 日,持续降水导致了北科罗拉多发生了大范围的山体滑坡事件;2014 年 3 月发生在华盛顿州附近的滑坡造成了毁灭性的灾难,灾害发生前 45 天的降水量高于正常年度的两倍以上,强降水引发的洪水和滑坡灾害摧毁了 49 个家庭,并造成 43 人死亡(Godt et al, 2014)。在中国,滑坡灾害也造成明显的直接经济损失,间接损失更大(谢全敏等,2006;李媛等,2013)。仅 2014 年全国共发生地质灾害 10907 起,共造成 400 人死亡失踪,218 人受伤,直接经济损失高达 54.1 亿元人民币,其中滑坡占其总数目的 74.5%(国土资源部地质灾害应急技术指导中心,2015)。2014 年 6 月 20 日凌晨江西省宜黄县神

岗乡党口小学后山发生山体滑坡造成学校教学楼倒塌、4 人遇难,并损毁学校厕所与附近民房与移动基站,直接经济损失约 200 万元。该滑坡区域雨量充沛,近 30 年年平均降水量达 1907 mm,滑坡灾害发生前一周累计降雨量约 400 mm,发生前 3 h 累计降雨量达到 107.5 mm。目前,考虑到普查出所有地质灾害隐患点并实现完全防治并不现实,因此开展降水诱发型地质灾害预报预警技术(模型)研究是提高地质灾害预报预警精度,有效减轻地质灾害造成人员伤亡和财产损失的主要手段之一(刘艳辉等,2015)。

刘传正和刘艳辉(2007)结合国内外地质灾害预报预警技术与我国大陆诱发地质灾害的降水特征(刘艳辉等,2012)将地质灾害预报预警方法划分为统计预报(隐式统计预报、显式统计预报)和动力机理模型预报。中国地质环境监测院的地质灾害气象预报预警业务模型(刘艳辉等,2008)和国家气象中心地质灾害气象预报预警业务模型(姚学祥等,2005;薛建军等,2005;徐晶等,2007;张国平等,2013;张国平,2014)均属于前者。一般来说,滑坡预报模型也分为统计模型与动力机理模型。近年来,随着卫星遥感技术的快速发展,滑坡统计预报模型在降水诱发型滑坡预报中应用越来越多(Hong et al, 2007; 2015; He et al, 2014)。模型主要基于经验统计的雨强与持续时间阈值与下垫面地质环境信息(Hong et al, 2006; 2007; 刘艳辉等, 2008; Brunetti et al, 2010; 张少杰等, 2015)实现滑坡预报预警。另外,还有学者使用基于数据挖掘与机器学习的方

法进行滑坡预报,但由于其对滑坡发生时间预测主要是经验方法,精度往往不高(Korup and Stolle, 2014; He et al, 2016)。

用于预报降水诱发型滑坡的统计模型中,难以考虑降水入参与产汇流等流域水文过程对滑坡响应的影响(He et al, 2016)。而基于物理动力机理的滑坡预报模型利用地形、地质环境与水文信息,实现边坡失稳过程模拟(Dietrich et al, 1995; Wu and Siddle, 1995; Lu and Godt, 2008; Wooten et al, 2008; Ren et al, 2009; 2015; Hergarten, 2012; Raia et al, 2014; Zhang et al, 2016)。降水引发的边坡失稳基本机制可分为两类:一种主要是强降水触发的快速径流;另一种主要是由于降水下渗导致土壤特性发生变化,其中土壤含水量在确定边坡是否失稳上起着至关重要的作用。虽然已经有一些关于降水引发的山体滑坡研究,但主要都是集中在山体滑坡的静态触发因素(如坡度角、地质环境和土地利用等),耦合降水过程和边坡稳定性的动态系统模型仍然很少见(夏蒙等, 2013; He et al, 2016)。一种耦合方法是利用 Richard 方程解析解模拟无限边坡模型(Taylor, 1948)。这种方法主要用于不同时间尺度上检验评估降水入渗对滑坡发生时间的影响。基于这种短历时降水下渗与网格区域边坡稳定性模型(Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional Slope-Stability, TRIGRS)已经被应用于区域滑坡灾害和易损性评估(Godt et al, 2008; Morrissey et al, 2008; Liao et al, 2011; Zhang et al, 2016; 夏蒙等, 2013, 陈悦丽等, 2016; Alvioli and Baum, 2016)。另一种类型就是耦合分布式水文模型的无限边坡稳定性模型。例如, GEOTOP-FS(Simoni et al, 2008)模型就是将 GEOTOP 分布式水文模型(Rigon et al, 2006)与地质模型耦合进行山体滑坡发生有无的概率预报。HIRES(SHHigh Resolution Slope Stability Simulator; Rossi et al, 2013)是用蒙特卡罗技术考虑水文模型与地质模型参数的不确定性,并实现实时并行计算的滑坡模型(Mergili et al, 2014)。Lanni et al(2012)提出的浅层滑坡模型(CI-SLAM)引入一个基于地形的水文模型描述流域水文过程(主要描述土壤含水量的空间分布),这与浅层滑坡触发与否有非常重要的关系。Zhang et al(2014; 2015)将 GBHM 分布式水文模型耦合到泥石流流模型中进行泥石流预报预警,并在四川省业务预报应用中取得较好的应用效果。

近年来,遥感技术的快速发展,使得作为模型输入量之一的下垫面遥感信息越来越精准,也使滑坡动力机理预报模型逐渐从单点向更大尺度的区域预报预警转变。Liao et al(2010)提出的基于卫星遥感的降水诱发型滑坡实时监测与预报系统就是针对区域滑坡预报的机理模型。模型系统应用遥感资料分析区域滑坡灾害脆弱性分布与隐患点识别,并将卫星反演的降水与数值天气模式降水预报产品输入 SLIDE(Slope-Infiltration-Distributed Equilibrium, SLIDE)滑坡机理模型,实现区域滑坡预报,并成功应用到印度尼西亚与洪都拉斯地区(Liao et al, 2010; 2012)。然而,SLIDE 模型没有完整考虑流域水文效应的时空响应,在流域产流中忽略了植被冠层截留、蒸散发,简化了降雨入渗等过程,缺少流域汇流(Liao et al, 2010)。因此,在 SLIDE 模型中,耦合分布式水文模型,通过完善的流域水文过程更为准确计算触发滑坡的有效降水,提高滑坡模型预报精度。He et al(2016)将 CREST(Coupled Routing and Excess STorage)分布式水文模型(Wang et al, 2011; Shen et al, 2016)与 SLIDE 模型耦合,形成了 CRESLIDE(Coupled Routing and Excess Storage and Slope-Infiltration-Distributed Equilibrium)模型。本研究在滑坡物理模型中引入分布式水文模型技术,针对陕西省南部月河流域 2012 年 7 月 3—5 日的滑坡灾害过程,建立基于流域水土耦合机制的月河流域滑坡机理预报模型,并验证模型的适用性。

1 基于水土耦合机制的流域滑坡机理模型

原 SLIDE 模型中忽略土壤植被冠层截留、蒸散发与水流汇流过程,并简化流域产流过程,难以完整描述水文过程对滑坡过程的响应,导致模型在流域水文过程模拟的精度不高,特别是在边坡失稳过程起关键作用的流域土壤含水量,往往使得滑坡预报精度较低(Liao et al, 2010; He et al, 2016)。而在 CRESLIDE 水土耦合模型中,应用能够完整表征流域水文过程的 CREST 分布式水文模型模拟出流域下渗、产流与汇流过程,得到更为准确的土壤含水量等滑坡动力机理模型中的中间水文变量,驱动描述流域水土力学过程的 SLIDE 模型实现滑坡动力机理预报。流域降水下渗过程是连接 CREST 分布式

水文模型与 SLIDE 模型的主要物理过程。

1.1 CREST 分布式水文模型

CRESLIDE 模型中用于模拟水文过程的 CREST(Wang et al, 2011)分布式水文模型是由俄克拉荷马大学和美国宇航局项目团队(NASA SERVIR Project Team)共同开发的基于栅格的分布式水文模型。CREST 分布式水文模型将流域分成规则网格,在每个网格内模型降雨径流过程首先从土壤植被的冠层截留开始,降水(P)通过冠层截留,剩余降水(P_{soil})进入土壤层并分成两部分:地表径流(R)和基于新安江水文模型蓄水容量曲线计算得到的下渗量(I)(Zhao et al, 1980; Zhao, 1992; Liang et al, 1994; 1996)。根据饱和水力传导度, R 进一步被划分为坡面径流与地下径流。应用逐栅格的线性水库法进行坡面与地下径流汇流演算。CREST 分布式水文模型中的产流过程和汇流演算,能更好地反映地表径流与地下径流的相互作用(Wang et al, 2011)。

目前,CREST 模型不仅被应用于极端洪水的估测与预报(Zhang et al, 2015),基于多种卫星遥感降水产品的水文预报评估(Xue et al, 2013),以及无资料流域的洪水淹没风险图(Khan et al, 2011)等研究上,并且在多个业务系统中得到应用:如美国本土和非洲纳米比亚等国家的山洪预报系统(Clark et al, 2016),以及美国本土水文实时模拟与洪水监测演示系统(<http://eos.ou.edu>)。CREST 水文模型在防灾减灾中逐渐得到广泛的应用与验证评估(Gourley et al, 2016; Martinaitis et al, 2016)。

1.2 SLIDE 滑坡模型

在 SLIDE 模型中,对降水下渗过程作了简单假设,并在滑坡安全系数(FS)和边坡降水量之间建立了定量关系,在实际的滑坡预报中被验证具有较好的滑坡预测性能(Liao et al, 2010; 2012; Hong et al, 2015; He et al, 2016)。在 SLIDE 模型中,模型考虑了土壤表观粘聚力对抗剪强度的贡献和下渗过程大于下渗层厚度的影响,滑坡边坡是否失稳是用安全系数(FS)表示。 FS 是抗切变强度与切变力的比值。降水量与 FS 之间的关系已经通过一个简化的数学公式建立起来。一个滑坡体被认为当 $FS \geq 1$ 是稳定的, $FS < 1$ 时将被预报将要发生滑坡。SLIDE 模型假定滑坡发生在浅表层,并且无限边坡

方程由土壤粘聚力(c')与表观摩擦力 $[c_\phi(t)]$ 构成,而 $c_\phi(t)$ 主要由流域土壤饱和度(S_r)和渗透层无量纲厚度(m_t)决定(Montrasio and Valentino, 2008; He et al, 2016; Zhang et al, 2016)。

1.3 CRESLIDE 水土耦合模型

在 CRESLIDE 模型中,采用 CREST 分布式水文模型与 SLIDE 模型的单向耦合:通过 CREST 分布式水文模型完整的流域土壤植被冠层截留、蒸散发、降水下渗、产汇流等物理过程,更好地考虑滑坡体前期土壤湿度和当前不同降水强度与持续时间情况下降水入渗过程的双重影响,从而得到更为准确的 S_r 。

连接 CREST 水文模型与 SLIDE 模型最重要的水文物理过程就是流域降水入渗。很显然,用于流域降水入渗的净雨是经过土壤植被冠层截留和蒸散发计算后的降水量。而且,并不是所有净雨都下渗,部分净雨由于土壤饱和、超渗产流或者土壤不透水性很强直接形成地表径流。Valentino et al (2014)提出引入一个表示降水衰减的参数,表征总降水量到有效雨量的比值,但是这个参数是个纯粹的参数,需要率定,并且考虑到土壤空间异质性,很难得到其准确的空间分布。在 CRESLIDE 模型中,有效雨量推求 m_t 过程可以分为基于蓄水容量曲线的降水入渗和地表直接径流两部分计算(Zhao et al, 1980; Zhao, 1992)。水文过程变量(土壤湿度、下渗量等)可以直接通过 CREST 模型计算得到,用于 SLIDE 模型。这样就既可以更好地考虑滑坡体前期土壤湿度影响,又能够考虑不同降水强度与持续时间情况下入渗过程影响。即参数 m_t 的估计可表达为:

$$m_t = \frac{W_t}{nZ_t(1 - S_r)} \quad (1)$$

式中, W_t 是栅格内三层土壤平均含水量,是 CREST 模型中一个中间过程变量; n 为土壤孔隙度; Z_t 为 t 时刻土层深度,单位: m。式(1)需要一个实际的下渗率。 S_r 可以通过下式而得:

$$S_r = \frac{W_t}{W_m} \quad (2)$$

式中 W_m 是土壤最大蓄水能力。

在原 SLIDE 模型中,考虑数据不足而往往忽略次网格尺度过程参数推导。但在 CRESLIDE 耦合模型中,通过 CREST 水文模型模拟可以实现获取

次网格土壤水参数。土壤的异质性和水力特性对滑坡发生时间与深度有很大的影响(Lu and Godt, 2008),这也一直是滑坡模型建模的主要关注点(Bogaard and Greco, 2014)。CREST模型和SLIDE模型共用相同的土地利用和土壤类型。原SLIDE模型用一个参数代表整个区域,这显然不能代表区域的空间变异性。在CRESILDE耦合模型中,土力学过程参数可以通过水文过程中获取。

2 研究区域与数据

2.1 研究区域

本研究选择的是陕西省南部的月河流域。月河流域处于陕西省安康市,位于 $32^{\circ}28' \sim 33^{\circ}20'N$ 、 $108^{\circ}26' \sim 109^{\circ}00'E$,南接凤凰山、北靠秦岭、东邻旬河流域、西与池河流域交界。月河发源于秦岭凤凰山,流经陕西省安康市的汉阴县和汉滨区,隶属于长江一级支流汉江,全长95.2 km,流域面积2830 km²。流域地处陕南山区,流域内地势西北高、东南低。上游断崖发育、坡陡沟短、地势起伏剧烈、沟壑纵横;中游多为低山丘陵和川道,地形呈带状,俗称月河盆地;下游地势平坦、河网密布。月河流域处于亚热带季风气候区,由于秦岭和巴山的影响,冬季受蒙古高压控制,气温低、干燥少雨;夏季受西太平洋副热带高压和四川盆地热低压影响,多雨且伴随有伏旱天气。流域内年降水量在700~1100 mm,降水年际和年内变化较大,时空分布不均,时间上降水集中在汛期5—10月,汛期降水占全年的80%以上,空间上南部大于北部,山区大于川道。图1和图2分别

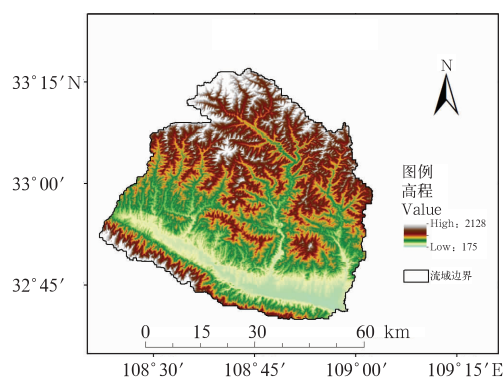


图1 月河流域地形高程图

Fig. 1 Topographic map of the Yuehe River Basin

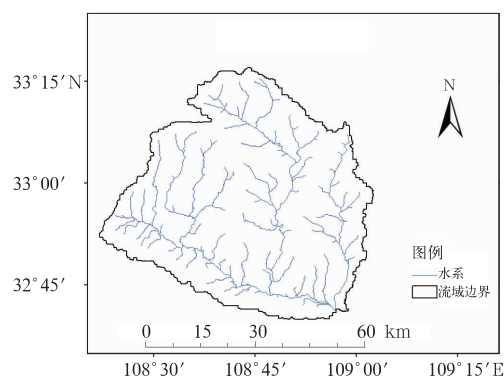


图2 月河流域水系图

Fig. 2 Drainage network of the Yuehe River Basin

是基于 $3'' \times 3''$ 的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据(U. S. Geological Survey, 2016)的研究流域地形高程图和水系图。

2.2 山体滑坡灾情和大气强迫数据

根据中国气象局气象站网监测2012年7月3日20时至4日20时,陕西省安康市境内发生暴雨过程,月河流域内发生特大暴雨,其中最大累计降水量和最大雨强均发生在中国气象局站号为865125的自动站,分别为184 mm和 $55 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。这次强降水过程也导致了2012年7月4—5日月河流域发生降水诱发地质灾害共40起。滑坡灾害的空间分布如图3所示(山体滑坡数据来自于中华人民共和国国土资源部地质环境监测部门调查结果);降水数据来自于中国气象局逐小时加密雨量资料,并采用反距离权重法(芮孝芳, 2004)插值为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 空间分辨率格点降水,输入滑坡预报模型。

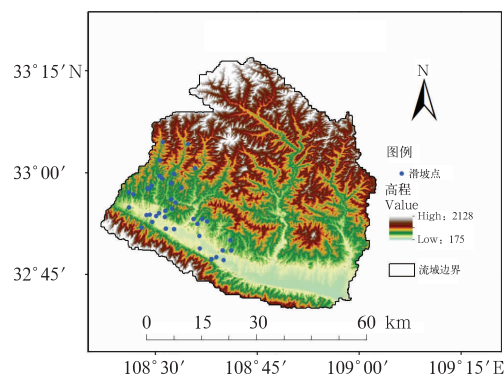


图3 2012年7月3—5日降水引起的滑坡点观测分布图

Fig. 3 Spatial distribution of reported landslide events during 3—5 July 2012

2.3 CRESLIDE 模型参数率定

CRESLIDE 模型的参数分为水文参数与滑坡模型参数。本研究的 DEM 数据是基于 $3'' \times 3''$ 分辨率的原始数据,地形参数直接从 DEM 获取作为模型输入,比如高程、坡度等(图 1 和图 4)。其他水文参数如流域不透水面积比、最大土壤蓄水容量、土壤饱和和传速率等参数信息,这些参数的空间分布见图 5。由于能够获取的月河流域水文历史资料十分有限,本研究中水文参数是通过高分辨率的 DEM、土地覆盖和土壤质地数据直接采用先验参数提取方法自动获取(Chow et al, 1988; Yao et al, 2012)。

土壤非均质性和水力特性在滑坡模型建模过程是非常重要的。在 CRESLIDE 模型耦合框架下,根据高分辨率的土壤数据、土地覆盖数据获取土壤与土地覆盖类型空间分布和与水土特性应用于 SLIDE 模型。土壤数据获取自联合国粮农组织的统一化的全球土壤数据(Harmonized World Soil Database; Nachtergaele et al, 2009)。数据定义了全球 $30'' \times 30''$ 分辨率的 13 种土壤质地分类。在本研究中,土壤类型数据被重新分析处理成 $3'' \times 3''$ 分辨率,并且研究区域主要土壤类型为壤土、粘土和粉质粘土(图 6),相应的土壤参数参照 Mergili et al (2014)提出的方法获取。土地覆盖数据(图 6)来自国家基础地理信息中心的全球 $1'' \times 1''$ 地表覆盖数据(GlobeLand30, <http://glc30.tianditu.com>)。一共 10 类土地覆盖类型,在边坡稳定性分析时,某种植被的粘聚力可以叠加到土壤内聚力上。在本研究区域,一共有 5 种土地覆盖类型,其中森林与耕地所占比率最高。

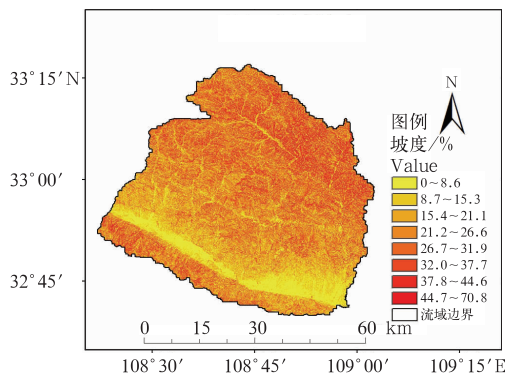


图 4 月河流域坡度图
(分辨率 $3'' \times 3''$)

Fig. 4 Slope angle, flow direction and flow accumulation with resolution of $3'' \times 3''$ of the Yuehe River Basin

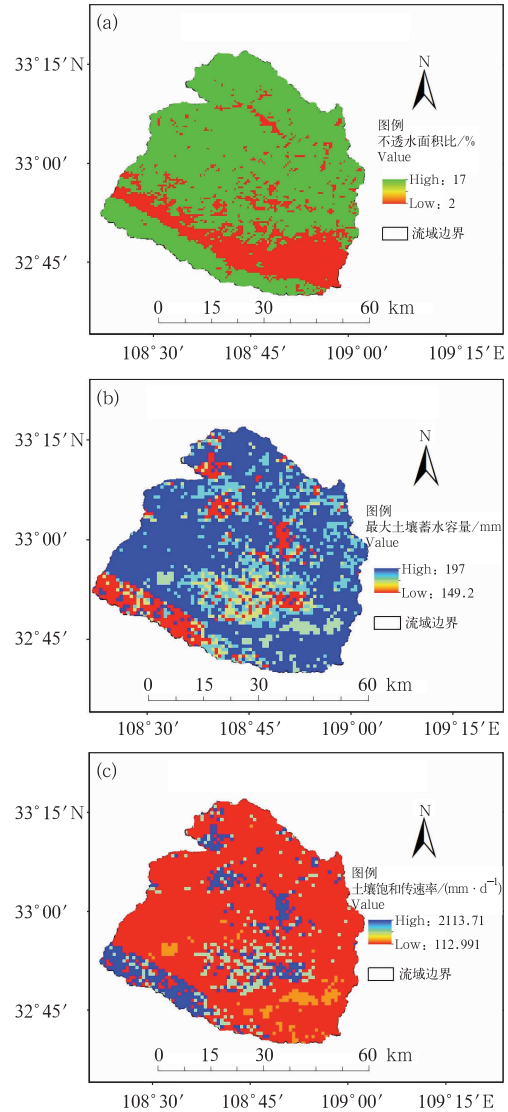


图 5 CRESLIDE 主要分布式模型
参数的空间分布

(a)不透水面积比,(b)最大土壤蓄水容量,
(c)土壤饱和和传速率
(分辨率 $3'' \times 3''$)

Fig. 5 Spatial distributions of key CRESLIDE
model parameters with a spatial
resolution of $3'' \times 3''$

(a) ratio of impervious area, (b) maximum
of soil water storage capacity,
(c) soil saturated conductivity

2.4 CRESLIDE 模型统计评估方法

为了客观评估 CRESLIDE 模型滑坡预报效果,本研究引入皮尔逊相关系数(CC)、相对误差和确定性系数评估模型对水文过程模拟的适用性与合理

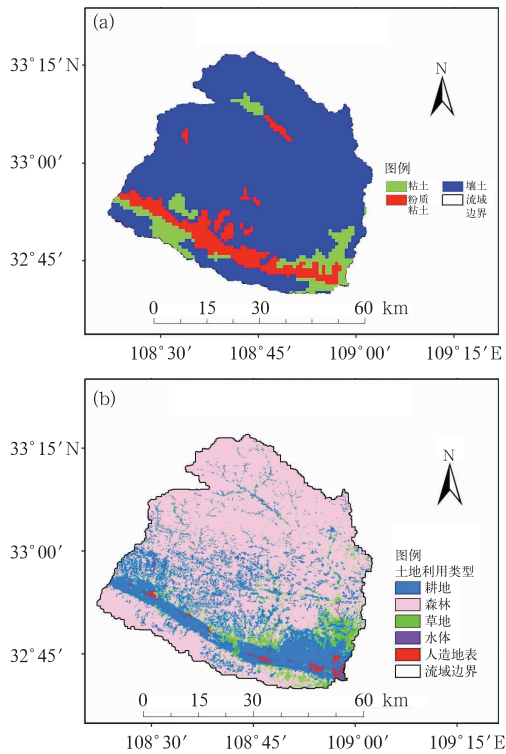


图 6 CRESLIDE 模型在月河流域的土壤类型(a)和土地利用类型(b)
Fig. 6 Soil (a) and land cover (b) types used in CRESLIDE for Yuehe River Basin

性,并引入了受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic, ROC; Beguería, 2006; Valentino et al, 2014)来量化分析每个模型的预报预测能力。

在使用 ROC 曲线分析之前,首先要建立通过比较二元的预报与滑坡实况建立混淆矩阵(Fawcett, 2006)。混淆矩阵的四个评估指标显示根据 FS 分布图滑坡预测正确与否(表 1)。如果计算出来不稳定网格包含在滑坡实况区域,就被统计为预报正确[true positive, TP, 也被称为命中(hit)];如果其不在滑坡实况区域,则统计为预报错误[false positives, FP, 也被称为空报(false alarm)];如果计算出来的稳定网格被包含在滑坡实况区域,称之为漏报(false negative, FN);其余为 TN(true negatives)。基于混淆矩阵,使用灵敏度(Sensitivity)和特异度(Specificity)两个统计变量,可由下面两个公式得到(Zhang et al, 2016):

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP + FN} \tag{3}$$

$$Specificity = \frac{TN}{FP + TN} \tag{4}$$

表 1 量化评估指标的混淆矩阵
Table 1 Confusion matrix for quantitative evaluation indices

		实况	
		P	N
预报	Y	命中(TP)	空报(FP)
	N	漏报(FN)	TN

灵敏度统计表明滑坡事件正确预测的比例,而特异度统计是表明边坡稳定正确预报比例(Beguería, 2006)。灵敏度统计值越高,表明滑坡预报命中率越高;特异度统计值越高,表明空报率越低。ROC 曲线显示了灵敏度与特异度的关系。ROC 图(图 9)中的不同的灵敏度与特异度对应的值为不同的阈值点。在 ROC 中,右上角的点($Sensitivity=1, Specificity=1$)表示完美预报,但对角线表示随机预报预测。模型的全局统计精度可以用 ROC 曲线的右侧面积(即 AUC 曲线指数)表示。

3 应用结果分析

3.1 月河流域径流模拟分析

针对 2012 年 7 月 3—5 日月河流域的洪水过程,应用 CRESLIDE 耦合模型进行模拟预报(图 7)。从图 7 可以看出,模型对洪水预报的模拟预报效果很好,其中 CC 为 0.92,相对误差为 15.6%,确定性系数达到 0.80。也验证了 CRESLIDE 耦合模型对水文过程模拟的适用性和合理性。

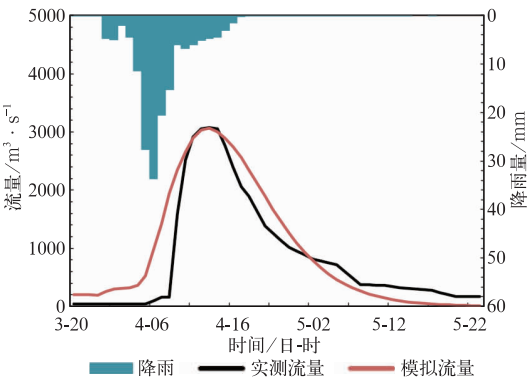


图 7 2012 年 7 月 3—5 日月河流域出口断面模拟洪水过程线
Fig. 7 Simulated and observed hydrographs at the outlet of the Yuehe River Basin during 3—5 July 2012

3.2 模拟预报结果分析

图 8 为 CRESLIDE 模型在陕西省月河流域降水诱发型滑坡有无和滑坡风险预报结果图。从图 8 中可以看到, CRESLIDE 模型基本预报出月河流域大部分滑坡事件。预报有滑坡危险的区域与实际出现滑坡区域具有较为明显的一致性, 体现了水土耦合模型在边坡失稳空间分布预报上的优势; 但在流域北部存在较大区域的空报, 也是模型在下一步深入研究的地方。

从 ROC 曲线图(图 9)可以看出, CRESLIDE 模型的 ROC 曲线是比较接近右上角, 并且 CRESLIDE 模型的 AUC 指数(全局精度)为 0.679, 说明模型预报有较高的准确率。CRESLIDE 模型的特异度统计值为 87.8%, CRESLIDE 模型的灵敏度统计值为 52.9%, 意味着 CRESLIDE 模型的漏

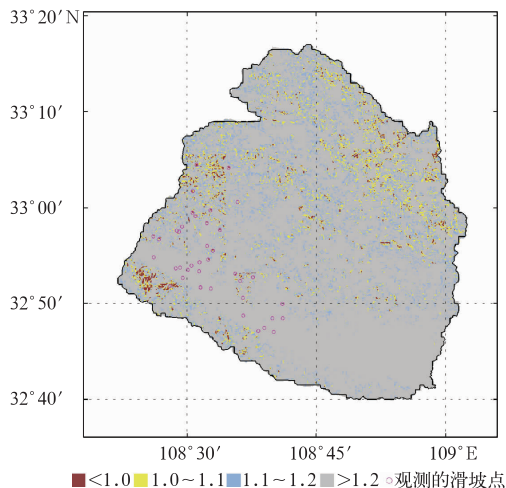


图 8 2012 年 7 月 3 日 20 时至 4 日 19 时的 FS_{\min} 空间分布与实际观测的滑坡点分布

(红色区代表模型预报的滑坡点, 黄色代表模型预报具有较大的滑坡危险, 蓝色代表模型预报具有一定的滑坡危险, 而灰色则表示没有滑坡危险)

Fig. 8 Map of modeled minimum FS values (FS_{\min}) during the 3-4 July 2012 storm and the locations of reported landslide events (Red, yellow, blue and grey colors indicate occurrence of landslide, high landslide risk, medium landslide risk and low risk simulated by the CRESLIDE model)

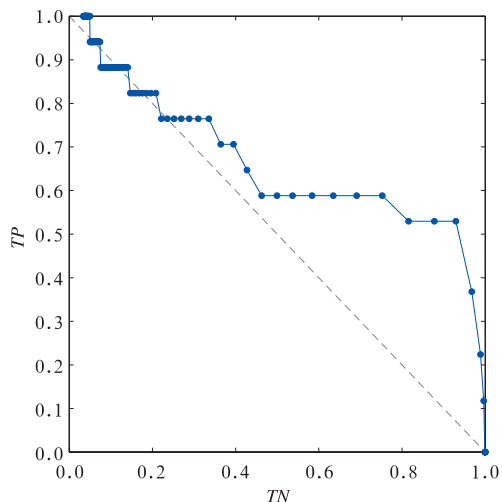


图 9 2012 年 7 月 3 日 20 时至 4 日 19 时 CRESLIDE 模型模拟的 FS 的 ROC 曲线图
Fig. 9 ROC plot for the FS map simulated by the CRESLIDE model corresponding to the rainfall event from 20:00 BT 3 to 19:00 BT 4 July 2012

报率较低, 但灵敏度高于 50%, 表明模型仍存在一定的改进空间来提高预报精度, 减少空报。本研究应用 ROC 曲线的主要目的是通过测试灵敏度与特异度如何随着 FS 阈值变化而变化, 说明滑坡模型是否合适。

ROC 曲线揭示了利用完整的水文物理过程对 SLIDE 模型改进 (CRESLIDE 模型) 在月河流域滑坡预报中取得不错的预报精度。实质上, SLIDE 模型与 CRESLIDE 模型两个性能差异主要体现在对用来计算 FS 的两个中间参数变量 m_i 和 S_r 的推求上。图 10 显示了降水、下渗和土壤饱和度的时空演变过程。可以看出, 在强降水过程早期 (7 月 3 日 20 时至 4 日 02 时), 下渗显示与降水相似的空间分布, 表明大部分降水都下渗至土壤中。这是因为在降水之初, 雨强明显小于流域下渗能力, 降水被土壤有效吸收。当雨强逐渐增大并大于下渗率, 降水量也超过土壤的缺水量时, 多余的降水将不再下渗直接形成地表径流。在 7 月 4 日 09—14 时明显可以看出降水与下渗的明显不同 (图 10g ~ 10i)。在 CRESLIDE 模型中, 根据式 (1), 利用更为科学的下渗过程代替降水来估计土壤层无量纲厚度, 这些较小的输入值减少了 m_i 的量级, 这导致更大的 $c_\phi(t)$ 和更大的 FS 值, 表明更多保持边坡稳定的网格, 与

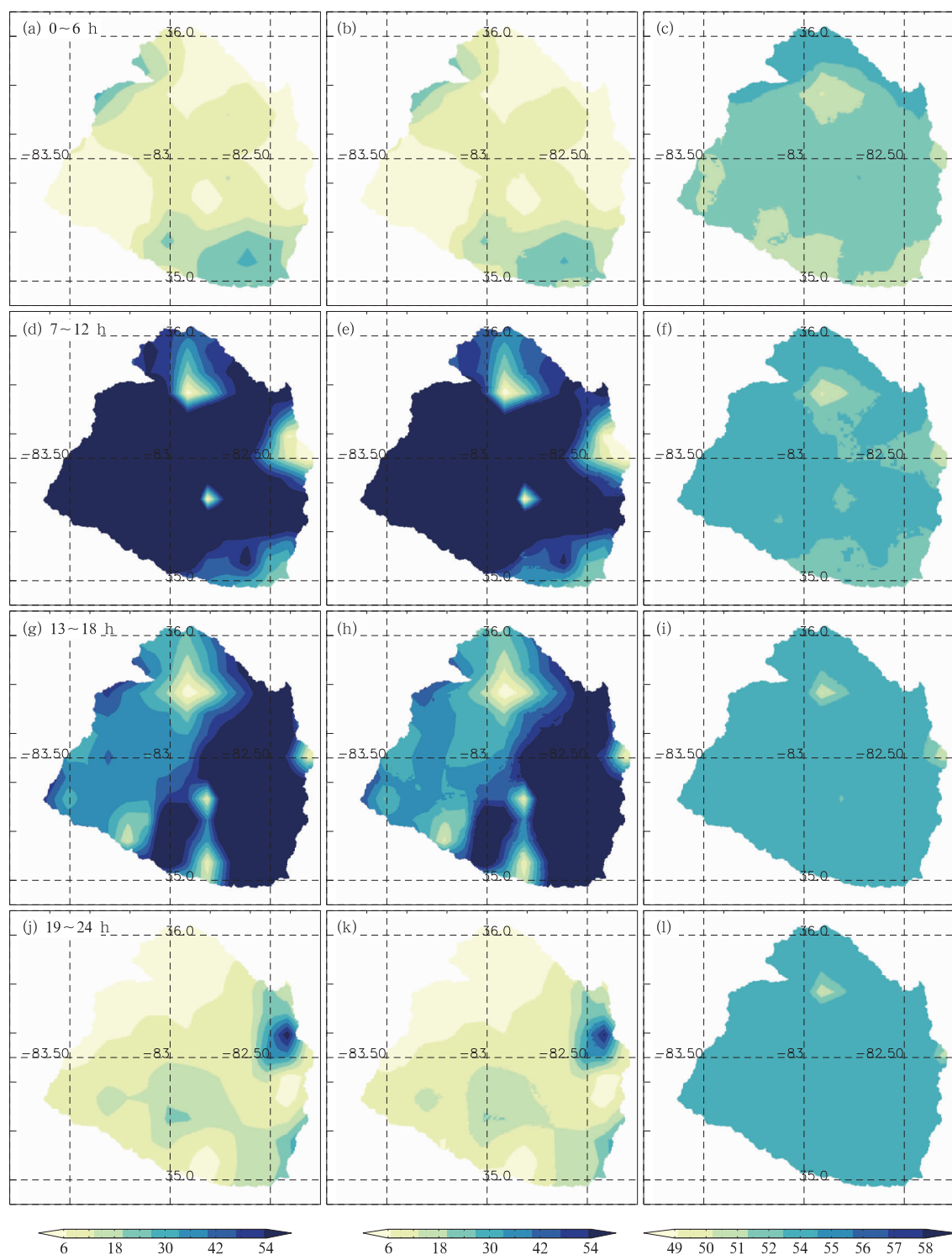


图 10 2012 年 7 月 3 日 20 时至 4 日 19 时随时间变化的累计降水量(a, d, g, j; 单位: mm)、
下渗量(b, e, h, k; 单位: mm)和平均土壤饱和度(c, f, i, l; 单位: %)的空间分布

(a, b, c) 0~6 h, (d, e, f) 7~12 h, (g, h, i) 13~18 h, (j, k, l) 19~24 h

Fig. 10 Temporal evolution of the spatial patterns of accumulated rainfall (a, d, g, j; unit: mm),
accumulated infiltration (b, e, h, k; unit: mm) and mean degree of saturation (c, f, i, l; unit: %)
from 20:00 BT 3 to 19:00 BT 4 July 2012

(a, b, c) 0—6 h, (d, e, f) 7—12 h, (g, h, i) 13—18 h, (j, k, l) 19—24 h

实况更为吻合,得到特异度较高。如果比较滑坡出现位置(图3)与 S_r 的空间分布(图10),可以看出滑坡通常出现在土壤高饱和度区域,进一步说明得到更准确的 S_r 空间不均匀性分布。

4 结论与讨论

本研究通过引入 CRESLIDE 模型技术,针对 2012 年 7 月 3—5 日的陕西省南部滑坡灾害,建立基于水土耦合机制的月河流域滑坡动力机理预报模型。模型耦合了 CREST 分布式水文模型,将 CREST 水文模型模拟的水文中间状态与变量作为 SLIDE 模型的输入,更好地考虑在不同雨强与降水持续时间影响的土壤湿度变化与降水下渗过程,形成水土耦合机制的 CRESLIDE 模型,用于陕西南部月河流域降水诱发型滑坡预报。与原 SLIDE 模型相比,CRESLIDE 模型在物理机理上描述了更多水文水动力过程细节,包括植被冠层截留、蒸散发和产汇流过程,并且完善的水文过程主要是用来改进下渗过程,得到决定滑坡发生与否的更为精确的安全系数(FS)的值。通过在月河流域 2012 年 7 月 3—5 日强降水引发的滑坡预报中验证得出,CRESLIDE 模型在月河流域的滑坡预报中具有较高的精度,虽然模型在边坡不稳定区域存在一定的空报现象,但能够说明了水土耦合的滑坡动力机理预报模型有较小的空报率;模型还存在一定的错报率,仍需要对模型从模型输入、水文物理过程以及不确定性进一步分析与完善。

CRESLIDE 模型主要输入强迫为大气降水。本次研究使用的降水数据来自气象部门地面自动站插值而成的格点降水资料。目前,雷达、卫星与地面自动站多源降水融合的定量降水估测(QPE)在反映空间降水分布和降水量估计上具有明显优势,技术已经相对成熟,并已经在我国气象部门业务化,时间分辨率已经达到 30 s,空间分辨率为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 。这为提高模型输入降水的空间分布和量级的精度提供了有利的途径。另外,中央气象台的格点化定量降水预报产品近年来已经有了长足的发展,时、空分辨率分别已经达到 1 h 和 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$,预报产品经检验精度较高(包红军等,2017b)。在我国地质灾害(滑坡)预报预警业务中,

精细格点化定量降水预报产品的引入,可提升 CRESLIDE 模型在实时预报中的精度与延长预报预见期,更好地为防灾减灾服务(包红军等,2016c)。

CRESLIDE 模型的水文过程目前采用的基于新安江水文模型的蓄满产流机制为基础的分布式模拟。由 Beven(1997)提出的基于 TOPMODEL 模型的产流反映的也是蓄满产流机制,并且逐步发展为分布式水文模型,如 TOPKAPI(Liu et al, 2005)、BTOPMC(Bao et al, 2010)、GTOPMODEL(张珂等,2005;Li and Zhang, 2008)等。如何结合两种产流机制优势,并能够考虑我国复杂下垫面条件导致的径流形成物理机理的产汇流模型是 CRESLIDE 模型下一步着重改进的方向之一(Bao et al, 2017;包红军等,2016a;2016b;2017a)。

由于月河流域所能获取的水文资料有限,本研究中的 CRESLIDE 模型参数主要是从流域地形地貌与遥感资料直接先验获取,并应用于滑坡预报。模型参数与实际相比,不可避免有一定的偏差与不确定性。在接下来的研究中将选择资料相对完整的流域进行滑坡预报试验,采用模型参数先验估计与多年资料率定相结合的方法进行参数优化,进一步验证 CRESLIDE 模型在滑坡预报中的适应性和合理性。

参考文献

- 包红军,王莉莉,李致家,等,2016a. 基于混合产流与二维运动波汇流分布式水文模型[J]. 水电能源科学,34(11):1-4,21.
- 包红军,王莉莉,沈学顺,等,2016c. 气象水文耦合的洪水预报研究进展[J]. 气象,42(9):1045-1057.
- 包红军,王莉莉,李致家,等,2016b. 基于 Holtan 产流的分布式水文模型[J]. 河海大学学报(自然科学版),44(4):340-346.
- 包红军,李致家,王莉莉,等,2017a. 基于分布式水文模型的小流域山洪预报方法与应用[J]. 暴雨灾害,36(2):156-163.
- 包红军,张珂,魏丽,等,2017b. 淮河流域 2016 年汛期洪水预报试验[J]. 气象,43(7):831-844.
- 陈悦丽,陈德辉,李泽椿,等,2016. 降雨型滑坡的集合预报模型及其初步应用的试验研究[J]. 大气科学,40(3):515-527.
- 国土资源部地质灾害应急技术指导中心,2015. 2014 年度全国重大地质灾害事件与应急避险典型案例[M]. 北京:地质出版社.
- 李铁锋,丛威青,2006. 基于 Logistic 回归及前期有效雨量的降雨诱发型滑坡预测方法[J]. 中国地质灾害与防治学报,17(1):33-35.
- 李媛,曲雪妍,杨旭东,等,2013. 中国地质灾害时空分布规律及防范重点[J]. 中国地质灾害与防治学报,24(4):71-78.

- 刘传正,刘艳辉,2007. 地质灾害区域预警原理与显式预警系统设计研究[J]. 水文地质工程地质, 34(6):109-115,125.
- 刘传正,刘艳辉,温铭生,等,2009. 中国地质灾害区域预警方法与应用[M]. 北京:地质出版社.
- 刘艳辉,刘传正,连建发,等,2008. 基于显式统计原理的地质灾害区域预警方法初步研究[J]. 中国地质, 35(2):344-350.
- 刘艳辉,唐灿,方志伟,2012. 2011年汛期典型强降水诱发崩塌滑流灾害分析[J]. 工程地质学报, 20(增刊):550-555.
- 刘艳辉,刘传正,温铭生,等,2015. 中国地质灾害气象预警模型研究[J]. 工程地质学报, 23(4):738-746.
- 芮孝芳,2004. 水文学原理[M]. 北京:中国水利水电出版社.
- 夏蒙,王家鼎,谷天峰,等,2013. 基于 TRIGRS 模型的浅层黄土滑坡破坏概率评价[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 49(4):453-458.
- 谢全敏,李道明,陈立文,等,2006. 滑坡灾害破坏损失综合评价模型及应用[J]. 武汉理工大学学报, 28(11):98-102.
- 徐晶,张国平,张芳华,等,2007. 基于 Logistic 回归的区域地质灾害综合气象预警模型[J]. 气象, 33(12):3-8.
- 薛建军,徐晶,张芳华,等,2005. 区域性地质灾害气象预报方法研究[J]. 气象, 31(10):24-27.
- 姚学祥,徐晶,薛建军,等,2005. 基于降水量的全国地质灾害潜势预报模式[J]. 中国地质灾害与防治学报, 16(4):97-102,129.
- 张国平,2014. 有效雨量和滑坡泥石流灾害概率模型[J]. 气象, 40(7):886-890.
- 张国平,许风雯,狄靖月,等,2013. 国家级地质灾害气象预报技术与业务化应用实践[J]. 中国减灾, (9):18-19.
- 张珂,李致家,包红军,2005. GTOPMODEL 模型与 TOPMODEL 模型比较[J]. 河海大学学报(自然科学版), 33(5):509-512.
- 张少杰,江玉红,杨红娟,等,2015. 基于水文过程的泥石流预报中前期有效降水量的确定方法[J]. 水科学进展, 26(1):34-43.
- Alvioli M, Baum R L, 2016. Parallelization of the TRIGRS model for rainfall-induced landslides using the message passing interface[J]. Environ Model Softw, 81:122-135.
- Bao Hongjun, Wang Lili, Li Zhijia, et al, 2010. Hydrological daily rainfall-runoff simulation with BTOPMC model and comparison with Xin'anjiang model[J]. Water Sci Engin, 3(2):121-131.
- Bao Hongjun, Wang Lili, Zhang Ke, Li Zhijia, 2017. Application of a developed distributed hydrological model based on the mixed runoff generation model and 2D kinematic wave flow routing model for better flood forecasting[J]. Atmos Sci Lett, 18(7):284-293.
- Begueria S, 2006. Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management[J]. Nat Hazards, 37(3):315-329.
- Beven K, 1997. TOPMODEL: a critique[J]. Hydrological Processes, 11(9):1069-1085.
- Bogaard T, Greco R, 2014. Preface "Hillslope hydrological modeling for landslides prediction"[J]. Hydrol Earth Syst Sci, 18(10):4185-4188.
- Brunetti M T, Peruccacci S, Rossi M, et al, 2010. Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy[J]. Nat Hazards Earth Syst Sci, 10(3):447-458.
- Chow V, Maidment D, Mays L, 1988. Applied Hydrology[M]. New York: McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering.
- Clark III R, Flamig Z L, Vergara H, et al, 2016. Hydrological modeling and capacity building in the Republic of Namibia[J]. Bull Am Meteor Soc. DOI:10.1175/BAMS-D-15-00130.1.
- Dietrich W E, Reiss R, Hsu M L, et al, 1995. A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data[J]. Hydrol Process, 9(3/4):383-400.
- Fawcett T, 2006. An introduction to ROC analysis[J]. Pattern Recognit Lett, 27(8):861-874.
- Godt J W, Baum R L, Savage W Z, et al, 2008. Transient deterministic shallow landslide modeling: requirements for susceptibility and hazard assessments in a GIS framework[J]. Eng Geol, 102(3/4):214-226.
- Godt J W, Coe J A, Kean J W, et al, 2014. Landslides in the northern Colorado Front Range caused by rainfall, September 11-13, 2013[Z]. U. S. Geological Survey Fact Sheet 2013-3114. 6, <http://dx.doi.org/10.3133/fs20133114>.
- Gourley J J, Flamig Z L, Vergara H, et al, 2016. The Flooded Locations And Simulated Hydrographs (FLASH) project: improving the tools for flash flood monitoring and prediction across the United States[J]. Bull Am Meteor Soc. DOI: 10.1175/BAMS-D-15-00247.1.
- He Xiaogang, Hong Yang, Yu Xiaodi, et al, 2014. Landslides susceptibility mapping in Oklahoma State using GIS-based weighted linear combination method[C]// Sassa K. Landslide Science for a Safer Geoenvironment. Heidelberg: Springer:371-377.
- He Xiaogang, Hong Yang, Vergara H, et al, 2016. Development of a coupled hydrological-geotechnical framework for rainfall-induced landslides prediction[J]. J Hydrol, 543:395-405. DOI:10.1016/j.jhydrol.2016.10.016.
- Hergarten S, 2012. Topography-based modeling of large rockfalls and application to hazard assessment[J]. Geophys Res Lett, 39(13):13402.
- Hong Yang, Adler R, Huffman G, 2006. Evaluation of the potential of NASA multi-satellite precipitation analysis in global landslide hazard assessment[J]. Geophys Res Lett, 33(22):L22402.
- Hong Yang, Adler R, Huffman G, 2007. Use of satellite remote sensing data in the mapping of global landslide susceptibility[J]. Nat Hazards, 43(2):245-256.
- Hong Yang, He Xiaogang, Cerato A, et al, 2015. Predictability of a physically based model for rainfall-induced shallow landslides: model development and case studies[C]// Scaioni M. Modern Technologies for Landslide Monitoring and Prediction. Berlin

- Heidelberg: Springer; 165-178.
- Khan S I, Hong Yang, Wang Jiahu, et al, 2011. Satellite remote sensing and hydrologic modeling for flood inundation mapping in Lake Victoria basin; implications for hydrologic prediction in ungauged basins[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(1): 85-95.
- Kirschbaum D B, Adler R, Hong Yang, et al, 2010. A global landslide catalog for hazard applications: method, results, and limitations[J]. *Nat Hazards*, 52(3): 561-575.
- Korup O, Stolle A, 2014. Landslide prediction from machine learning[J]. *Geol Today*, 30(1): 26-33.
- Lanni C, Borga M, Rigon R, et al, 2012. Modelling shallow landslide susceptibility by means of a subsurface flow path connectivity index and estimates of soil depth spatial distribution[J]. *Hydrol Earth Syst Sci*, 16(11): 3959-3971.
- Li Zhijia, Zhang Ke, 2008. Comparison of three GIS-based hydrological models[J]. *J Hydrol Eng*, 13(5): 364-370.
- Liang Xu, Lettenmaier D P, Wood E F, et al, 1994. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 99(D7): 14415-14428.
- Liang Xu, Lettenmaier D P, Wood E F, 1996. One-dimensional statistical dynamic representation of subgrid spatial variability of precipitation in the two-layer variable infiltration capacity model [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 101(D16): 21403-21422.
- Liao Zonghu, Hong Yang, Wang Jun, et al, 2010. Prototyping an experimental early warning system for rainfall-induced landslides in Indonesia using satellite remote sensing and geospatial datasets[J]. *Landslides*, 7(3): 317-324.
- Liao Zonghu, Hong Yang, Kirschbaum D, et al, 2011. Evaluation of TRIGRS (transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis)'s predictive skill for hurricane-triggered landslides: a case study in Macon County, North Carolina [J]. *Nat Hazards*, 58(1): 325-339.
- Liao Zonghu, Hong Yang, Kirschbaum D, et al, 2012. Assessment of shallow landslides from Hurricane Mitch in central America using a physically based model[J]. *Environ Earth Sci*, 66(6): 1697-1705.
- Liu Z, Martina M L V, Todini E, 2005. Flood forecasting using a fully distributed model: application of the TOPKAPI model to the Upper Xixian catchment[J]. *Hydrol Earth Syst Sci*, 9(4): 347-364.
- Lu Ning, Godt J, 2008. Infinite slope stability under steady unsaturated seepage conditions[J]. *Water Resour Res*, 44(11): 2276-2283.
- Martinaitis S M, Gourley J J, Flamig Z L, et al, 2016. The HMT multi-radar multi-sensor hydro experiment[J]. *Bull Am Meteor Soc*. DOI:10.1175/BAMS-D-15-00283.1.
- Mergili M, Marchesini I, Alvioli M, et al, 2014. A strategy for GIS-based 3-D slope stability modelling over large areas[J]. *Geosci Model Develop*, 7(4): 5407-5445.
- Montrasio L, Valentino R, 2008. A model for triggering mechanisms of shallow landslides[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 8(5): 1149-1159.
- Morrissey M M, Wiecezorek G F, Morgan B A, 2008. A comparative analysis of simulated and observed landslide locations triggered by Hurricane Camille in Nelson County, Virginia[J]. *Hydrol Process*, 22(4): 524-531.
- Nachtergaele F, van Velthuizen H, Verelst L, 2009. Harmonized world soil database (version 1.1) [R]. Rome, Italy, Laxenburg, Austria: FAO, IIASA.
- Raia S, Alvioli M, Rossi M, et al, 2014. Improving predictive power of physically based rainfall-induced shallow landslide models: a probabilistic approach[J]. *Geosci Model Develop*, 7(2): 495-514. DOI:10.5194/gmd-7-495-2014.
- Ren Diandong, Wang Jiahu, Fu Rong, et al, 2009. Mudslide-caused ecosystem degradation following Wenchuan earthquake 2008 [J]. *Geophys Res Lett*, 36(5): 277-291.
- Ren Diandong, Leslie L M, Shen Xinyi, et al, et al, 2015. The gravity environment of Zhouqu Debris flow of August 2010 and its implication for future recurrence[J]. *Int J Geosci*, 6(4): 317-325.
- Rigon R, Bertoldi G, Over T M, 2006. GEOTop: a distributed hydrological model with coupled water and energy budgets[J]. *J Hydrometeorol*, 7(3): 371-388.
- Rossi G, Catani F, Leoni L, et al, 2013. HIRESSES: a physically based slope stability simulator for HPC applications[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 13(1): 151-166.
- Shen X Y, Hong Y, Zhang K, et al, 2016. Refining a distributed linear reservoir routing method to improve performance of the CREST model[J]. *J Hydrol Eng*. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001442.
- Simoni S, Zanotti F, Bertoldi G, et al, 2008. Modelling the probability of occurrence of shallow landslides and channelized debris flows using GEOTop-FS[J]. *Hydrol Process*, 22(4): 532-545.
- Spiker E C, Gori P, 2003. National Landslide Hazards Mitigation Strategy, A Framework for Loss Reduction[M]. Circular: U. S. Geological Survey; 1244.
- Taylor D W, 1948. Fundamentals of soil mechanics[J]. *Soil Sci*, 66(2): 161.
- U. S. Geological Survey (USGS), 2016. HydroSHEDS Data Downloads[2015-07-12]. <http://hydrosheds.cr.usgs.gov/datadownload.php?reqdata=3demg>.
- Valentino R, Meisina C, Montrasio L, et al, 2014. Predictive power evaluation of a physically based model for shallow landslides in the area of Oltrepò Pavese, Northern Italy[J]. *Geotech Geol Eng*, 32(4): 783-805.
- Wang Jiayu, Hong Yang, Li Li, et al, 2011. The coupled routing

- and excess storage (CREST) distributed hydrological model [J]. *Hydrol Sci J*, 56(1):84-98.
- Wooten R, Gillon K, Witt A C, et al, 2008. Geologic, geomorphic, and meteorological aspects of debris flows triggered by Hurricanes Frances and Ivan during September 2004 in the Southern Appalachian mountains of Macon county, North Carolina (southeastern USA)[J]. *Landslides*, 5(1):31-44.
- Wu Weimin M, Sidle R C, 1995. A distributed slope stability model for steep forested basins[J]. *Water Resour Res*, 31(8):2097-2110.
- Xue Xianwu, Hong Yang, Limaye A S, et al, 2013. Statistical and hydrological evaluation of TRMM-based Multi-satellite Precipitation Analysis over the Wangchu Basin of Bhutan: are the latest satellite precipitation products 3B42V7 ready for use in ungauged basins? [J]. *J Hydrol*, 499:91-99.
- Yao Cheng, Li Zhijia, Yu Zhongbo, et al, 2012. A priori parameter estimates for a distributed, grid-based Xinanjiang model using geographically based information[J]. *J Hydrol*, 468-469:47-62.
- Zhang Shaojie, Wei Fangqiang, Liu Dunlong, et al, 2014. A regional-scale method of forecasting debris flow events based on water-soil coupling mechanism[J]. *J Mt Sci*, 11(6):1531-1542.
- Zhang Yu, Hong Yang, Wang Xuguang, et al, 2015. Hydrometeorological analysis and remote sensing of extremes: was the July 2012 Beijing flood event detectable and predictable by global satellite observing and global weather modeling systems? [J]. *J Hydrometeorol*, 16(1):381-395.
- Zhang Ke, Xue Xianwu, Hong Yang, et al, 2016. ICRESTRIGRS: a coupled modeling system for cascading flood-landslide disaster forecasting[J]. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss*, 20(12):5035-5048. DOI:10.5194/hess-2016-143.
- Zhao Renjun, Zhang Yilin, Fang Leren, et al, 1980. The Xinanjiang model[C]//Name A, *Hydrological Forecasting (Proceedings Oxford Symposium, April 1980)*. Wallingford: IAHS Press, IAHS Publishing:351-356.
- Zhao Renjun, 1992. The Xinanjiang model applied in China[J]. *J Hydrol*, 135(1/2/3/4):371-381.