

滑坡泥石流数值模式研发及其应用

汪君

前言

中国地质构造复杂，山地地形站陆地国土面积的67%以上，这些地形地势变化大，易形成不稳定的地质体，广大的山地为滑坡泥石流的发生提供了基础；中国位于地震带上，频繁发生的地震可能导致山体的破裂和崩塌，进而引发滑坡和泥石流。地理位置处于东亚季风、南亚季风等气候带的交替作用下，季风和降雨带交替影响，暴雨、台风和持续降雨多发，容易引发滑坡和泥石流。滑坡泥石流是我国主要的地质灾害，每年造成大量的人员伤亡和经济损失，然而其机理十分复杂，2010~2015年间，预报成功率仅为3.76%；研发可靠的滑坡泥石流动力预报模式，开展基于动力模式的定时、定点、定量的数值预报，是减少滑坡泥石流灾害的主要手段，也是防灾减灾的迫切需求。

滑坡泥石流动力模型的研发

滑坡泥石流的发生机理非常复杂，控制和影响的因素众多，大致可以归为内部因素（准静态因素）与外部因素（触发因素），其中内部因素主要包括地层岩性、地形、地貌、地质构造、土壤类型、植被覆盖等条件，这些因素决定了该地区发生滑坡泥石流灾害的容易程度；而触发因素主要包括降雨、地下水和地表水活动、温度、地震及人类活动等，这些因素是诱发滑坡泥石流灾害发生的原因，其中90%以上的滑坡泥石流灾害由降雨引发。降雨引发滑坡泥石流的机理非常复杂，涉及到大气、陆面、水文和地质之间相互影响、相互耦合的过程，但其主要过程可以简化如图1。

$$F_s = \frac{c + s}{\tau} = \frac{c + w \cos \theta \tan \phi}{w \sin \theta}$$

如图1所示，土块在坡面主要受到向下的重力，向上的摩擦力及土块内聚力和内摩擦力，定义安全系数 F_s 为摩擦力及内聚力之和与重力分量（下滑力）的比值，当 $F_s < 1$ ，即向上的力小于下滑力，则坡面失稳，发生滑坡。

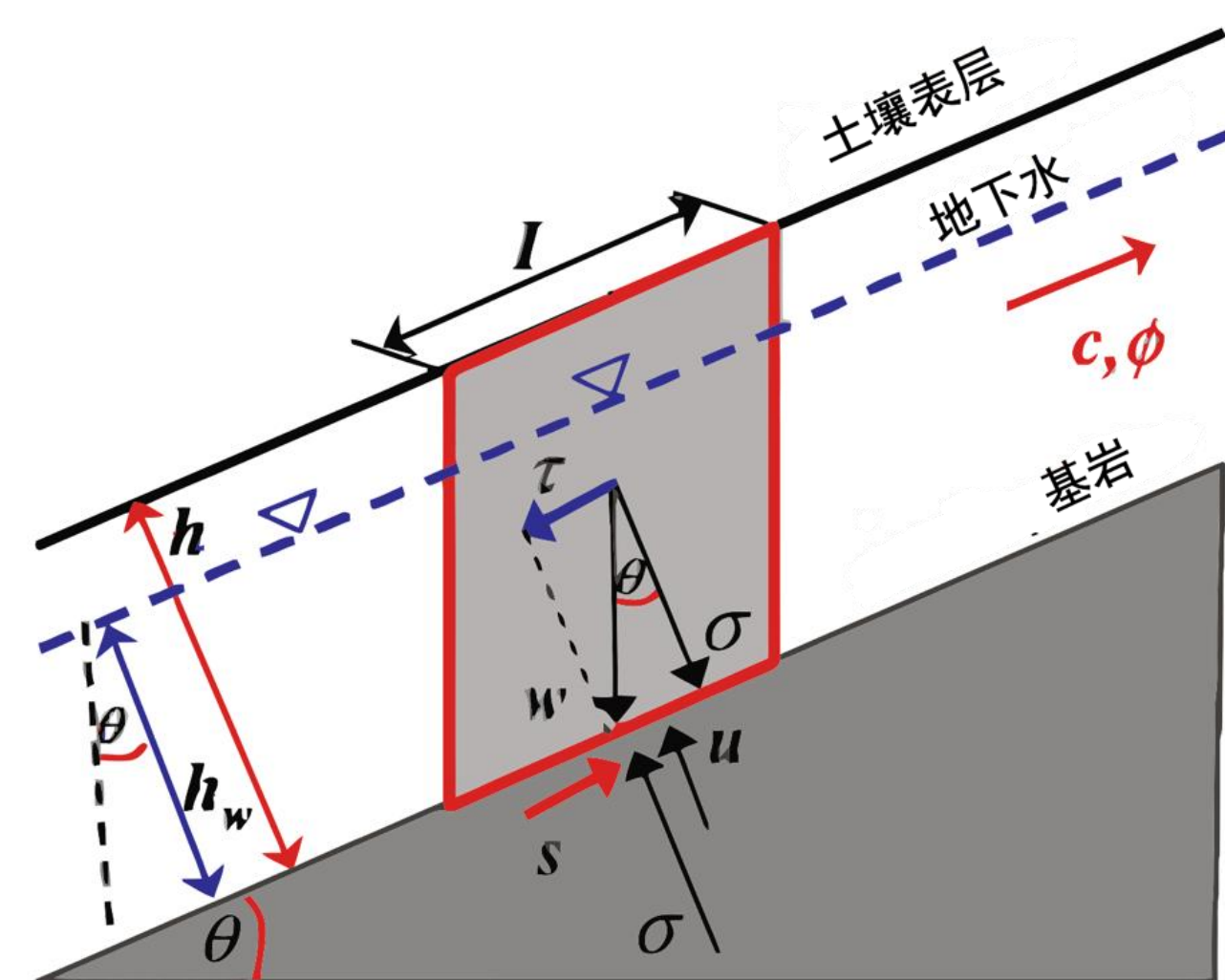


图1 坡面滑块受力分析概念图

一般情况下， F_s 远大于1，坡面是稳定的。当发生降雨时，雨水入渗进入土壤，土壤湿度增加，土壤重力增加，同时摩擦力和内聚力减小，导致 F_s 逐渐减小，当其小于1时，则发生滑坡。当然，在实际情况中，土壤中的植被、土壤、降雨地质过程关系比较复杂，如植被不仅对降雨有冠层拦截、土壤入渗、坡面流的发生等有影响，植被的根系还会直接影响坡面的稳定度，这些也是滑坡泥石流机理复杂性的原因之一。

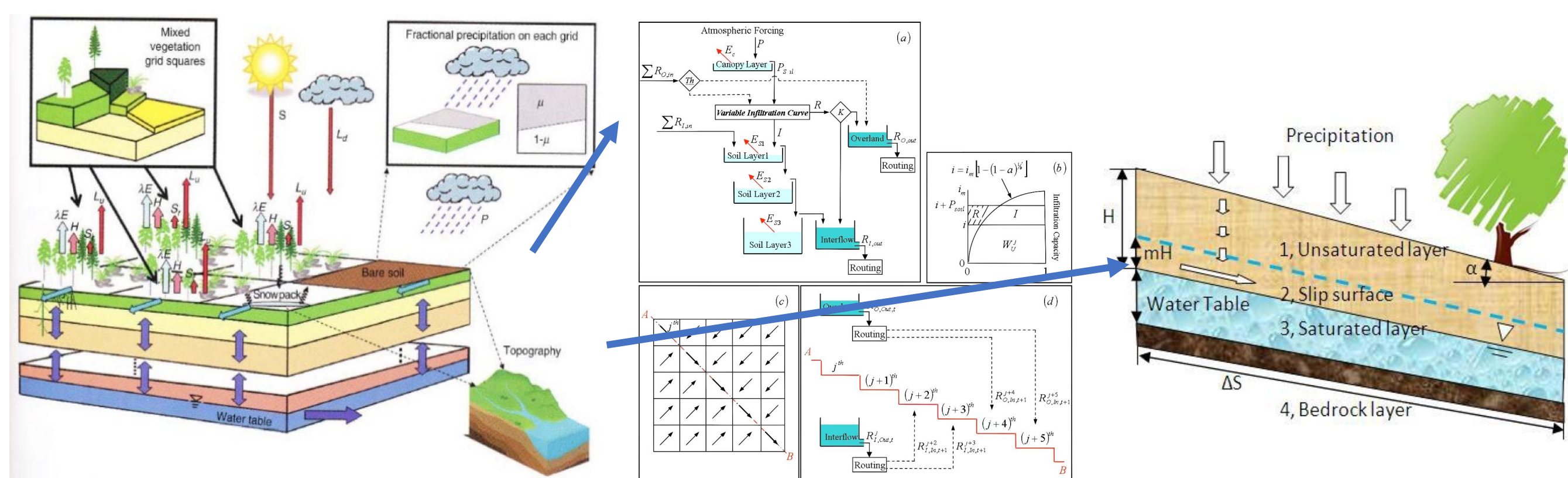


图2 M-SLiDE 模型基本结构示意图

为综合考虑这些物理过程对滑坡的影响，研发了多尺度滑坡泥石流流动力预报模型M-SLiDE(Multi-Scale Landslide inter-sphere Dynamical Early-warning model)，基本架构如图2所示。模型粗网格（1km）包含了较为完善的陆面过程，可以综合考虑不用土壤类型及植被类型对陆面和水文过程的影响；细网格（100m）中则主要包含水文过程和地质岩土力学过程，从而精确计算不同地形条件下地表水、地下水的运动及其对坡面稳定性的影响。

滑坡泥石流动力模型的应用

以滑坡泥石流动力预报模型为基础，创建了滑坡泥石流数值预报预测系统，其基本结构如图3所示。

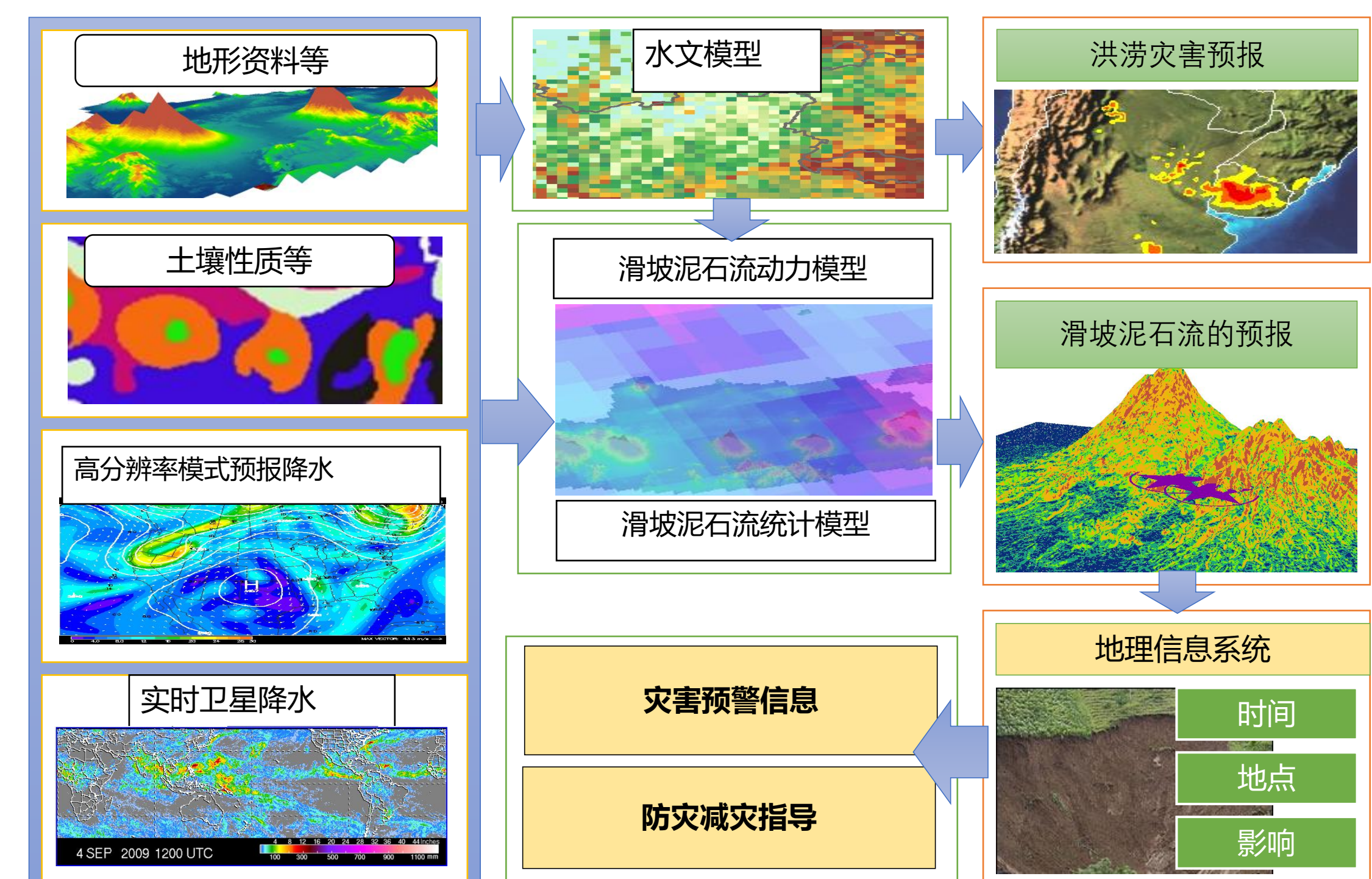


图3 滑坡泥石流数值预报预测系统

系统以滑坡泥石流动力模型为核心，以各种高分辨率地理数据为基础，并以各种时间尺度气象资料为驱动，可以进行滑坡泥石流（以及洪涝、山洪等）灾害的预报预测。以实时反演卫星降水及模式预报降水驱动，可以进行滑坡泥石流的未来7天的预报；以“一步法”短期气候预测的降水及其动力降尺度的结果来驱动，可以进行未来数月的滑坡泥石流预测；以高分辨率气候模式预估结果驱动，则可以进行未来数年、数十年的滑坡泥石流灾害风险预估。

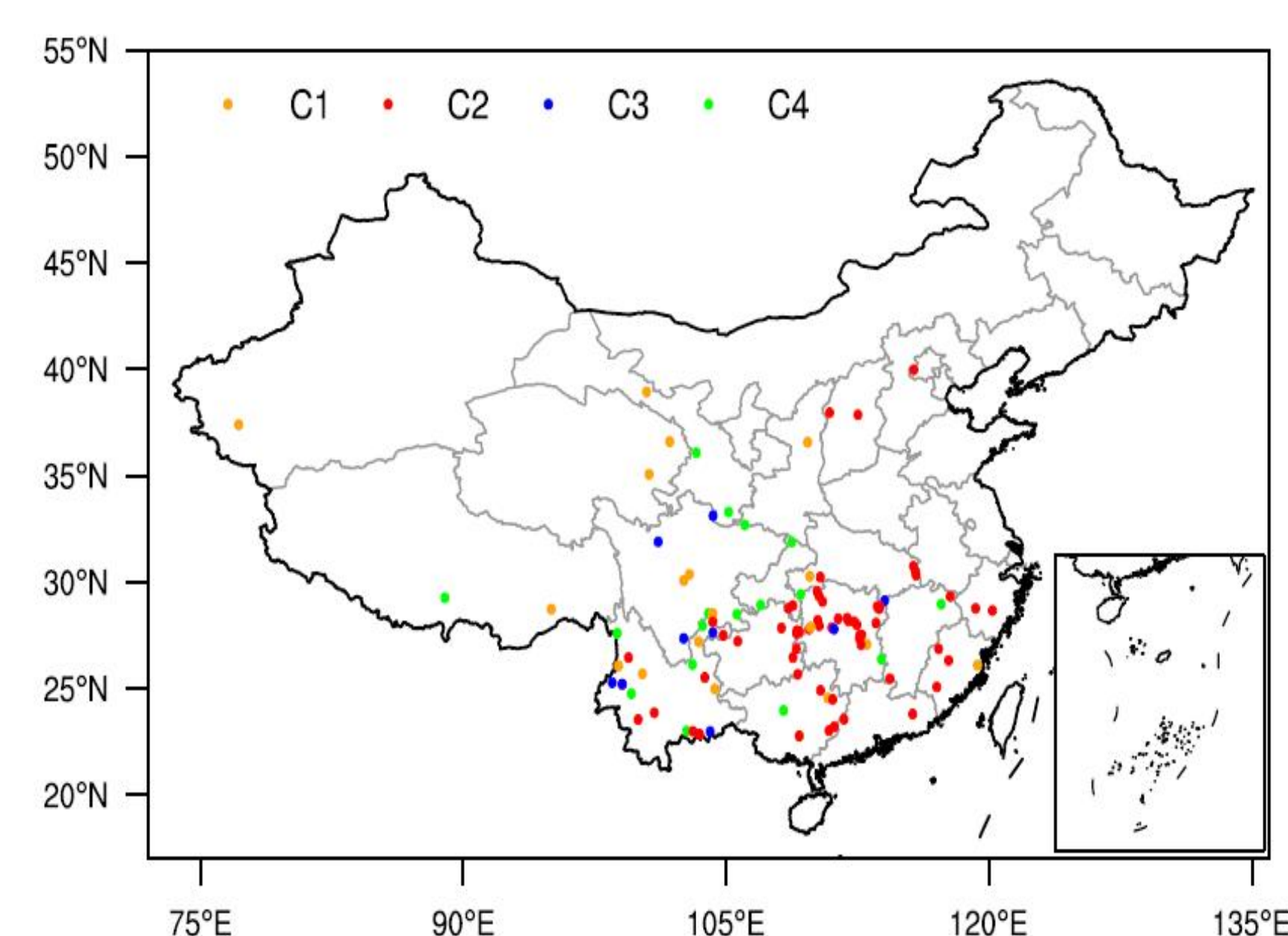


图4 近年来重大滑坡预报结果(C2、C3为成功预报)

对近5年重大滑坡泥石流预报结果进行检验（图4），其中雨季预报成功率可达70%以上，非雨季的预报成功率还较低，正在持续改进中。从2018年来也持续开展夏季滑坡泥石流的短期气候预测，预测结果与实际的滑坡泥石流对应较好（图5左）

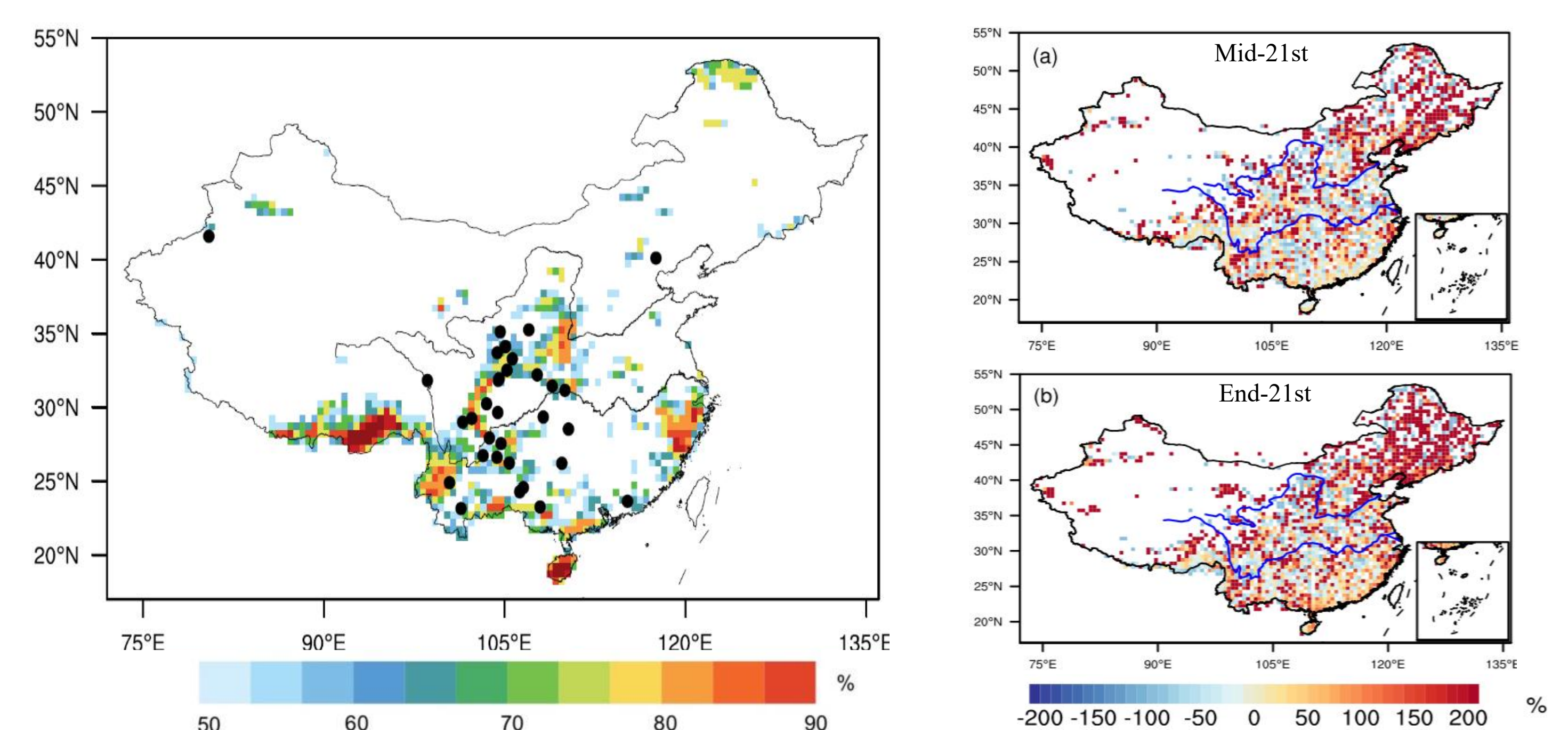


图5 左:2018年预测滑坡泥发生风险(填色)及观测(黑点);右:RCP8.5情景下滑坡频次变化

使用降尺度的 RCP8.5 情景下气象数据驱动滑坡模型运行，得到滑坡发生频次相对近期的变化，我国大部分地区滑坡发生频次显著增加。

参考文献

- 汪君, 王会军, 洪阳, 2016: 《中国洪涝、滑坡灾害监测和动力数值预报系统研究》, 气象出版社, 北京.
Zonghu Liao, Yang Hong, Jun Wang, et al., 2010: Prototyping an experimental early warning system for rainfall-induced landslides in Indonesia using satellite remote sensing and geospatial datasets. Landslides, 7, 317-324
Jun Wang, Huijun Wang, Yang Hong, 2016: Comparison of satellite-estimated and model-forecasted rainfall data during a deadly debris-flow event in Zhouqu, Northwest China. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 9(2), 139-145
马洁华, 孙建奇, 汪君, 等, 2019: 2018年夏季我国极端降水及滑坡泥石流灾害预测. 大气科学学报, 42(1), 93-99
Shuangshuang HE, Jun WANG*, Huijun WANG, 2019: Projection of Landslides in China during the 21st Century under the RCP8.5 Scenario. J. Meteor. Res., 33(1), 138-148