

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.01.005

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

张少杰^{1,2}, 江玉红², 杨红娟², 刘敦龙²

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;
2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 前期有效降水量是泥石流预报的一个关键因子, 但是确定此关键因子的常用方法存在参数取值过于人为主观化的问题。为解决这一问题, 提出利用模拟降雨截留、入渗和蒸散发等水文过程的方法确定泥石流预报中的前期有效降雨量, 并利用基于流域水土耦合机制的泥石流预报系统预报四川省在2013年7月9日的泥石流灾害来检验该方法。结果表明: 利用水文过程模拟方法确定的前期有效降水更适用于泥石流预报, 泥石流预报的漏报率比常用的降雨衰减经验公式低21.1%, 能更好地为泥石流防灾减灾服务。

关键词: 前期有效降水; 泥石流; 预报; 水文过程模拟; 降雨衰减经验公式

中图分类号: P954 文献标志码: A 文章编号: 1001-6791(2015)01-0034-10

泥石流多由降水诱发, 诱发降水按泥石流发生时间被分为前期降水和当次降水^[1], 其中, 前期降水是指泥石流形成前一天为止已经发生的降水。实际上, 真正对泥石流形成起作用的前期降水, 是到泥石流形成前仍保留在土壤中的那一部分降水, 即前期有效降水量(或前期土体含水量)。前期有效降水量或前期土体含水量在影响泥石流形成的降雨指标中贡献最大^[2], 因为土体含水量能反映泥石流发生前土壤的饱和度^[3]、土体的抗剪强度^[4]和坡面松散储备物质的稳定性^[5]等。这是泥石流预报中的重要因素之一, 其确定方法是否合理将会直接影响到泥石流预报的准确率。学者们在对泥石流预报中的降水因素进行分析时, 主要集中在单一的降水参数^[6], 或是降水参数间的组合^[7-8]。然而, 如何准确获取前期有效降水量的研究却很少涉及, 这也是临界降雨量的统计方法在实际泥石流预报中难以很好应用的原因之一。

前期有效降水量是根据流域范围内的水量平衡原则提出来的水文物理参量, 研究前期有效含水量的最佳方式是通过仪器进行监测, 如学者们利用蒋家沟流域典型位置的监测数据分析前期有效降水量与前期降水量随时间的变化关系, 确定前期有效降水量^[1-2]。但是无论对于流域还是区域尺度而言, 这种方法十分困难^[9-10], 因为这种方式只能监测到流域范围内的点尺度信息, 而无法反应整个流域范围内的前期有效降水量与前期降水量随时间的变化关系。对于流域而言, 以往的研究主要以经验公式为主, 参数取值的人为主观性太强。在降雨经验衰减公式中, 决定泥石流发生当天的前期有效降水量的两个关键参数是降水衰减系数和时间(天数), 而这两个参数却需要人为自主设定^[11]。虽然有学者利用暴雨过程衰退曲线来确定降水衰减系数的取值等一系列的方法改进经验公式^[12-16], 但基本形式未变。基于该前期有效含水量的确定公式, 利用内插方法(如最近邻法、反距离加权法、样条函数法和克里金插值法等)将前期有效降水量从雨量站点扩展到泥石流预报区。前期降雨衰减公式确定前期有效含水量方法简单, 可操作性强, 已被应用在成因预报方法

收稿日期: 2014-07-21; 网络出版时间: 2014-12-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20141225.1508.005.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41101009); 中国科学院成都山地灾害与环境研究所自主部署青年基金项目(SDS-QN-4303)

作者简介: 张少杰(1983—), 男, 山东青岛人, 助理研究员, 博士, 主要从事山地灾害预报研究。

E-mail: sj-zhang@imde.ac.cn

通信作者: 江玉红, E-mail: yjiang@imde.ac.cn

中,成因预报方法较为成功地实现了中国西南地区的泥石流业务预报^[17]。实际上降水的衰减受入渗、蒸散发条件、植被条件、土壤条件和地形条件等多种因素的影响,计算前期有效降水量所应考虑降水衰减系数和时间(天数)这两个参数,也很难确定统一的标准值用于具有不同环境条件的泥石流预报区。因此,利用降雨衰减公式确定前期有效降水量的方法,很难为泥石流预报提供准确可靠的前期降水支持。这也是成因预报方法的漏报率和误报率较高的主要原因之一。

本文针对现有确定前期有效降水量方法的不足,提出了基于模拟水文过程的有效前期降水量的确定方法。在该方法中,以区域内的网格单元为基本计算单元,通过合理的数值边界控制,模拟降水的截留、下渗、产流和蒸散发等水文过程,计算预报前一时刻流域或区域尺度范围内的前期有效含水量的分布。利用基于流域水土耦合机制的泥石流预报模型和野外实际勘查的泥石流灾害点为验证手段,检验新方法常用的降雨衰减公式对泥石流预报的漏报和误报率的影响。

1 基于水文过程的前期有效降水量确定方法

降水作用于下垫面的水文过程是一个极为复杂的非线性过程。该过程通过降水截留、入渗和蒸散发等一系列的水文环节改变下垫面土体含水量的分布,也因此提供了一种用于泥石流预报的前期有效降水量的计算思路。笔者关注的是研究区范围内的前期土壤含水量(即前期有效降水量)的分布,将着重模拟影响土体含水量的水文过程(降水截留、入渗和蒸散发)。

1.1 冠层降水截留

降水的冠层截留是水文过程模拟中较为复杂的一个环节,学者们对该过程的研究已有近百年的历史,研究成果丰富^[18]。目前用于描述降水冠层截留的数学模型主要分为经验模型^[19]、半经验半理论模型中的指数模式^[20]、解析模式^[21]、微气象模式^[22]和理论模型^[23]。本文借鉴微气象模式的思想仅考虑植被冠层叶面截留能力对穿过雨量的影响。植被对降雨截留能力一般随植被种类和季节而变化^[24],可视为叶面积指数的函数^[25]:

$$S_{\max}(t) = I_0 K_v I_{LA}(t) \quad (1)$$

式中 S_{\max} 为 t 时植被冠层的最大截留能力, mm; I_0 为植被截留系数,与植被的类型相关联,取值范围为 0.10~0.20; K_v 为植被的覆盖率; $I_{LA}(t)$ 为 t 时刻植被的叶面积指数,可依据遥感获得的归一化植被指数值估算。降水首先要满足植被的最大截留量之后,才会穿过植被到达地面。某时刻的植被冠层截留能力是降雨强度,与冠层潜在截留能力共同决定, t 时刻的冠层潜在截留能力为

$$S_p(t) = S_{\max}(t) - S(t) \quad (2)$$

式中 $S_p(t)$ 为 t 时刻的植被冠层潜在截留能力, mm; $S(t)$ 为 t 时刻植被冠层的蓄水量, mm。所以,若 t 时刻的降雨强度为 $R(t)$,结合冠层的潜在截留能力便可以确定 t 时刻植被冠层的实际截水量:

$$S_i(t) = \begin{cases} R(t) \Delta t, & R(t) \Delta t \leq S_p(t) \\ S_p(t), & R(t) \Delta t > S_p(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $S_i(t)$ 为 t 时植被冠层的真实截水量, mm; $R(t)$ 为降雨强度, mm/h。

1.2 一维非饱和土降水入渗

降水满足冠层的截留后,便会到达地面。坡面土体在降雨入渗发生之前,一般处于非饱和状态。本文采用一维非饱和 Richard 水分运动方程描述降水入渗的物理过程^[26-27]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D \left(\theta \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \right] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial \theta} \quad (4)$$

$$\theta = \theta_a \quad t = 0, z \geq 0 \quad (5)$$

$$-D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) = R(t) \quad t > 0, z = 0 \quad (6)$$

$$\theta = \theta_a \quad t > 0, z = L \quad (7)$$

式中 θ 为土体的体积含水量, mm^3/mm^3 ; $D(\theta) = K(\theta) / (d\theta/d\psi_m)$ 为非饱和土的扩散率, mm^3/h ; z 为竖向

坐标, 以地表为原点, 向下为正, mm; θ_a 为土层的初始体积含水量, mm^3/mm^3 ; $K(\theta)$ 为土层的非饱和导水率, mm/h; $R(t)$ 为降水强度, mm/h; L 为下边界深度; ψ_m 为非饱和土基质吸力, mm, 由 Mualem-van Genuchten模型描述^[28]:

$$S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha l)^n} \right]^m \quad (8)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (9)$$

式中 S_e 为土壤饱和度; θ_s 和 θ_r 分别为土体的饱和含水量和残余含水量; θ 为某一时刻的土体含水量; α 、 n 和 m 为曲线形状参数, 且 $n = 1 - 1/m$ 。

采用隐式有限差分法离散一维水分运动微分方程, 时域被离散成为 1 h 的等时间间隔, 空间域按照土层划分进行离散(从表面沿土层厚度的方向, 向下为正方向)。利用超渗产流机制控制入渗上边界, 即当降水强度小于地表的入渗能力时, 边界条件由式(6)控制, 而当降水强度超过地表的入渗能力后随即转化为径流流走, 不考虑洼地积水的有压入渗, 此时地表饱和, 式(6)控制的边界条件转化为 $\theta = \theta_s$ (θ_s 为某种土壤类型对应的饱和体积含水量)。至于数值模型的下边界, 根据在云南东川蒋家沟的观测数据研究, 一般降水对地表 40 cm 以下的土壤含水量影响很小^[2], 另外中国地下水位连年下降, 以成都市为例, 20 世纪 70 年代以前地下水位普遍为 1~3 m, 而目前的地下水位普遍降至 10~20 m^[29]。所以下边界采用不透水边界(即不考虑下边界与地下水之间的水分交换)是较为合理的一种选择方式。

1.3 蒸散发量估算

蒸散发过程在水文循环过程中占有极其重要的分量^[30]。所以, 若要较为准确地获取泥石流预报的前期有效降雨量, 必须对蒸散发量进行估算。蒸散发估算模型借助 RS/GIS 技术监测地表能量平衡和水分循环已成为水文学、生态学等学科领域的重点研究手段。本文采用 Penman-Monteith 方程^[24]分别计算水面和其他土地类型的蒸散发量:

$$E_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n + A_h) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{6.43(1 + 0.536U_2)D}{\lambda} \quad (10)$$

$$E_{rc} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma^*} \frac{900}{T + 275} U_2 D \quad (11)$$

式中 Δ 为饱和水汽压~温度曲线斜率, kPa/°C; R_n 为净辐射交换, mm/d; A_h 为以平流形式输送给水体的能量, mm/d; U_2 为 2 m 高处的风速, m/s, $U_2 = 0.749U$, U 为气象站观测风速; D 为饱和水汽压差 $e_s - e$, kPa; G 为土壤热通量, mm/h; T 为平均气温, °C; λ 为单位质量水体蒸发所需的潜热, MJ/kg; γ 为湿度计常数, kPa/°C。

2 在泥石流预报中的应用与检验

2.1 泥石流预报应用系统

基于流域水土耦合机制的泥石流预报模型主要分析降水入渗作用下流域坡面土体在土体含水量变化条件下的坡面土体稳定性并定量分析径流与失稳土体间的动态耦合过程, 利用径流与失稳土体形成的水土混合物的密度来评估流域发生泥石流的概率大小^[31]。模型充分利用了泥石流形成机理的成果, 采用小流域来代替以往的以等分网格为预报单元, 更能完整体现泥石流形成的过程。通过在蒋家沟流域的检验, 预报结果的精度和准确率均有显著提高, 具有极大的推广应用价值。Zhang 等^[32]、熊俊楠^[33]利用潜势泥石流流域的判定方法提取区域尺度范围内具备发生泥石流条件的流域, 以提取出来的潜势泥石流流域为基本预报单元, 结合基于流域水土耦合机制的四川省区域泥石流预报方法, 建立了基于流域水土耦合机制的四川省区域泥石流预报系统。通过对四川省区域泥石流预报的检验, 预报结果的误报率和漏报率均有显著改善。

区域土体含水量的分布计算是基于流域水土耦合机制的四川省区域泥石流预报系统的重点之一。所以, 该预报系统为检验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提供了有利手段。

2.2 前期有效含水量确定方法在泥石流预报中的应用

2.2.1 研究区概况

四川省位于中国西南部, 境内泥石流分布广泛, 主要集中在四川盆地的盆周山地和青藏高原东缘山地, 是中国泥石流灾害最严重的区域之一。特别是 2008 年汶川地震后, 强震区域泥石流活动性显著增强, 给当地社会经济和生命财产带来了巨大损失。2013 年 7 月 9 日, 四川省境内普降暴雨, 此次降雨过程诱发了四川省境内大规模的泥石流灾害, 尤其是地震灾区范围的汶川、绵竹和彭州等地, 造成了严重的经济损失和人员伤亡。本文以该次降水过程和泥石流灾害事件为例, 分别利用降雨衰减公式和基于水文过程的方法计算 7 月 9 日前一天的前期有效降雨量分布, 以前期有效降雨量分布作为泥石流预报的土体含水量的初值, 利用基于流域水土耦合机制的四川省区域泥石流预报系统^[32]对四川省于 2013 年 7 月 9 日发生的泥石流进行预报, 以实际发生的泥石流灾害为验证实例, 检验新方法在泥石流预报的应用。

2.2.2 水文过程模拟所需基础数据

基础数据主要为水文过程数值模拟提供所需的输入参数。在此, 基础数据可以被划分为下垫面数据和气象数据。下垫面数据主要包括研究区 DEM、植被的叶面积指数、土地利用、土壤类型、土层厚度以及土壤类型相关的土壤参数等。其中, 植被叶面指数由 MODIS 数据库获取 (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>); 土地利用、土壤类型和土层厚度由 FAO 数据库获取 (<http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/main.home>) 。

图 1 给出了四川省的 DEM, 精度为 250 m × 250 m, 以研究区内的网格为基本计算单元, 其他基础数据依据 DEM 的精度, 建立针对每个计算网格单元的下垫面基础数据信息, 为每个网格单元的水文过程数值模拟提供计算所需参数。

一般而言, 相邻年份相同季节的叶面积指数可认为相近, 因为区域内的土地利用分布较为稳定, 叶面积指数只与植被类型和季节变化密切相关。所以, 本文采用 2012 年的四川省叶面积指数分布(图 2) 计算 2013 年的植被对降雨的截留能力。

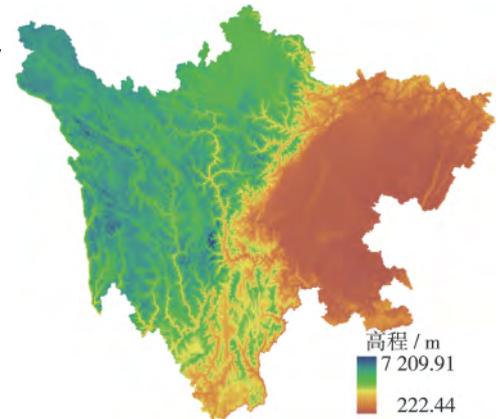


图 1 四川省 DEM
Fig. 1 DEM of Sichuan province

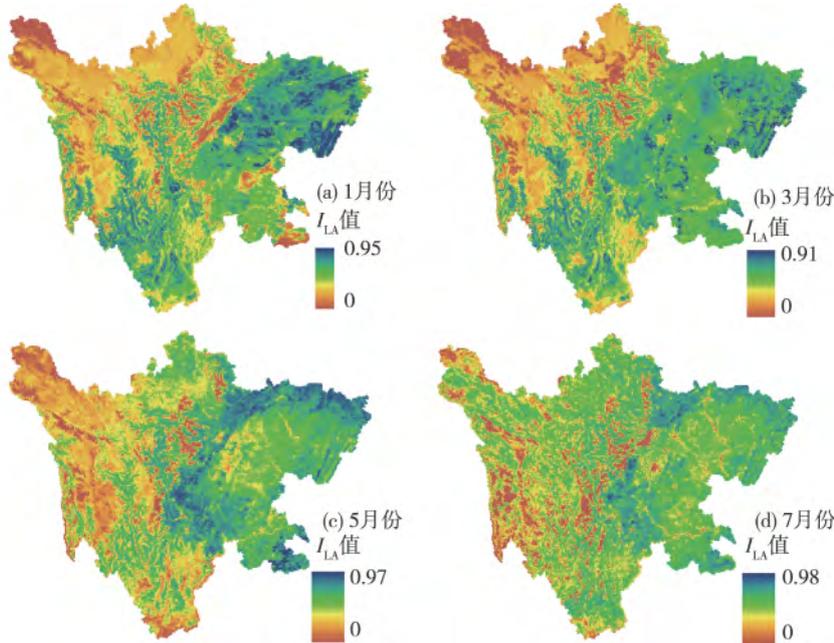


图 2 四川省叶面积指数分布
Fig. 2 Distributions of the I_{LA} in Sichuan province

区域内不同土壤类型表面土体的入渗能力、饱和体积含水量、残余含水量以及土水特征曲线中的 α 、 n 和 m 不同, 图 3(b) 为四川省的土壤类型分布, 表 1 为不同土壤类型对应的土壤水文-力学参数。

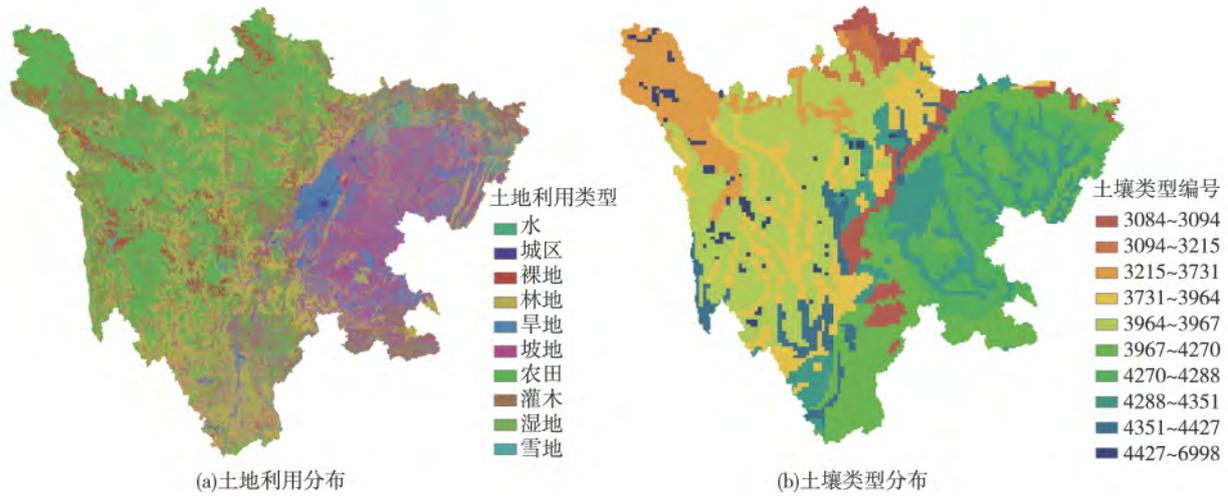


图 3 四川省土地利用及土壤类型分布

Fig. 3 Distributions of the land use and soil types in Sichuan province

表 1 土壤类型编号及其对应的土壤水文-力学参数

Table 1 Soil parameters in Sichuan province

| 土壤类型编号 | 饱和体积含水量 | 残余含水量 | 土水特征曲线参数 | | 表层入渗能力/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) |
|--------|---------|---------|----------|-------|--|
| | | | α | n | |
| 3084 | 0.479 | 0.076 5 | 0.019 3 | 1.403 | 8.934 |
| 3085 | 0.483 | 0.077 7 | 0.019 0 | 1.405 | 22.786 |
| 3090 | 0.472 | 0.073 3 | 0.018 2 | 1.420 | 22.640 |
| 3094 | 0.496 | 0.076 7 | 0.017 8 | 1.442 | 28.784 |
| 3215 | 0.479 | 0.095 6 | 0.017 3 | 1.269 | 6.735 |
| 3723 | 0.495 | 0.076 4 | 0.022 0 | 1.377 | 30.419 |
| 3724 | 0.494 | 0.076 4 | 0.022 0 | 1.377 | 30.419 |
| 3731 | 0.470 | 0.073 3 | 0.017 4 | 1.440 | 22.519 |
| 3963 | 0.473 | 0.073 5 | 0.018 0 | 1.424 | 22.465 |
| 3964 | 0.474 | 0.074 3 | 0.018 1 | 1.419 | 22.637 |
| 3967 | 0.527 | 0.082 6 | 0.018 7 | 1.415 | 35.971 |
| 4257 | 0.468 | 0.075 2 | 0.022 7 | 1.422 | 20.680 |
| 4259 | 0.467 | 0.075 2 | 0.022 7 | 1.421 | 17.596 |
| 4269 | 0.456 | 0.069 1 | 0.023 1 | 1.559 | 32.686 |
| 4270 | 0.453 | 0.070 6 | 0.022 2 | 1.531 | 27.768 |
| 4287 | 0.446 | 0.073 4 | 0.019 7 | 1.472 | 19.308 |
| 4288 | 0.438 | 0.071 8 | 0.020 6 | 1.531 | 24.810 |
| 4329 | 0.450 | 0.079 6 | 0.016 0 | 1.445 | 9.307 |
| 4349 | 0.481 | 0.075 9 | 0.022 2 | 1.421 | 25.521 |
| 4350 | 0.480 | 0.0744 | 0.021 6 | 1.422 | 22.516 |
| 4351 | 0.483 | 0.077 2 | 0.020 4 | 1.419 | 21.613 |
| 4364 | 0.479 | 0.075 3 | 0.016 7 | 1.441 | 22.539 |
| 4391 | 0.428 | 0.064 4 | 0.016 2 | 1.635 | 23.913 |
| 4427 | 0.455 | 0.090 4 | 0.016 6 | 1.309 | 4.630 |
| 6998 | 0.462 | 0.068 2 | 0.017 7 | 1.469 | 23.609 |

土层厚度决定了入渗下边界的深度, 可以依据区域内土层厚度的分布设定每个数值计算网格单元的入渗下边界的深度 L 值, 区域内的土层厚度有 1 m、2 m、4 m 和 5 m, 其中, 1 m 和 4 m 为主要的土层厚度(表 2)。

表 2 四川省内土层厚度信息

Table 2 Information of soil thickness in Sichuan region

| 厚度/m | 占研究区面积百分比 / % | 每层土的厚度/m | | | | | | |
|------|---------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 51.50 | 0.025 | 0.050 | 0.750 | 0.100 | 0.150 | 0.250 | 0.350 |
| 2 | 1.67 | 0.050 | 0.100 | 0.150 | 0.200 | 0.300 | 0.500 | 0.700 |
| 4 | 45.70 | 0.100 | 0.200 | 0.300 | 0.400 | 0.600 | 1.000 | 1.400 |
| 5 | 1.13 | 0.125 | 0.250 | 0.375 | 0.500 | 0.750 | 1.250 | 1.750 |

气象数据主要由四川省气象局提供(共 156 个气象站点), 包括实测降雨、日照时间、相对湿度、风速、日平均气温、日最高气温和日最低气温用于估算区域内的蒸散发量。根据各个气象站点的经纬度信息, 分别对实测降雨、温度、风速、日照时间和相对湿度进行空间插值, 获取与 DEM 分辨率一致的网格数据。

2.3 应用结果分析

在利用基于水文过程计算区域内的前期有效含水量之前, 首先要设定区域内初始的土体含水量值。然而, 受到降水入渗、蒸散发作用的影响, 任意时刻的土体含水量初值无法直接判定。在中国, 冬季一般是少雨季节, 土壤表层较为干燥, 接近土体的残余含水量^[32]。鉴于此, 本文的计算时间从 2013 年 1 月 1 日起, 区域内的表层土体含水量设置为与土地类型相对应的残余含水量值。利用气象局提供的实测气象数据(降雨、日照时间、相对湿度、风速、日平均气温、日最高气温和日最低气温), 从 1 月 1 日起至 7 月 8 日, 分别模拟区域内在该时间段的降水截留、下渗和蒸散发等水文过程, 为 7 月 9 日的泥石流预报提供前期有效含水量初值。图 4 为两种方法(基于水文过程和降雨经验衰减公式)计算的前期有效降水量(即土体含水量)的分布图。

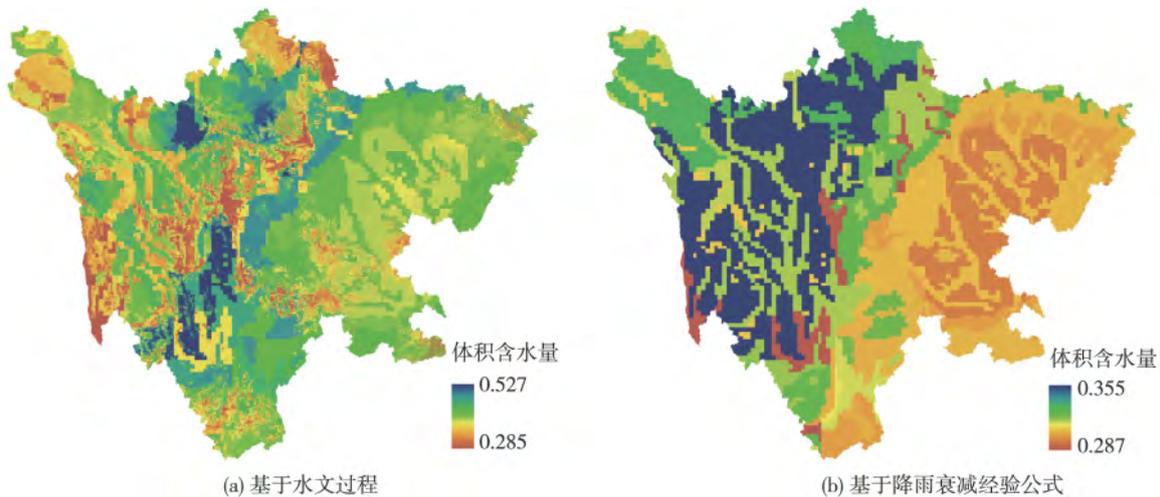


图 4 前期有效降水分布

Fig. 4 Distribution of the antecedent effect rainfall

由图 4 可知, 基于水文过程获取的四川省前期有效降水量最大值要高于利用降雨衰减经验公式获取的值, 且第一种获取的前期有效降水量分布要更为均匀。实际上, 利用监测手段获取整个四川省的前期有效降水的分布极为困难, 而若仅利用某些监测点的信息来验证区域尺度上的结果, 就存在空间尺度的不匹配问题^[34]。所以, 本文采用了一种折中方法, 即利用泥石流预报系统和真实发生的泥石流灾害来验证哪种方法更适用于泥石流预报。

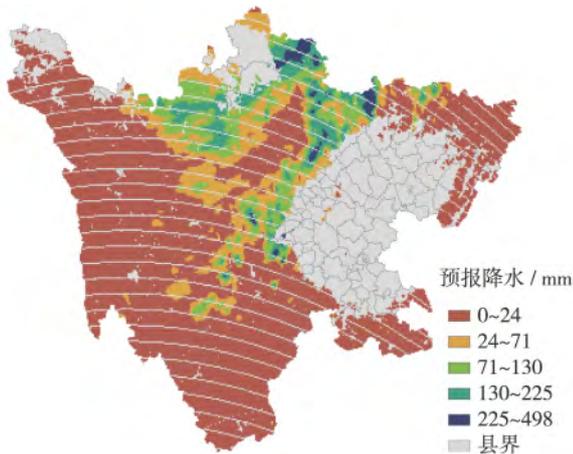


图 5 24 h 累计雷达预报降水总量分布
Fig. 5 Distribution of radar rainfall in Sichuan province on July 9, 2013

本文将分别以上述两种前期有效降水分布作为泥石流预报的土体含水量初值，对四川省在 2013 年 7 月 9 日的泥石流进行预报，结合泥石流预报结果和实际上报的泥石流地质灾害，分析不同前期有效降水确定方法对泥石流预报结果的影响，进而确定更有利于泥石流预报精度的前期有效降水的确定方法。

以上述两种有效降水分布作为泥石流预报时的土体含水量初值，利用基于流域水土耦合机制的泥石流预报方法^[31-32]对四川省 2013 年 7 月 9 日的泥石流灾害进行预报。基于流域水土耦合机制的泥石流预报模型以区域内的潜势泥石流流域为基本预报单元，定量分析降水造成的失稳土体与径流间的动态耦合过程，利用水土混合物容重评估泥石流的发生概率大小，能够更好地体现泥石流形成过程。图 5 为 7 月 9 日 24 h 的累计预报降雨总量分布图。

以 7 月 9 日下午 15: 00 的预报结果为例，图 6 为泥石流预报结果对比图，表 3 为两种不同前期有效含水量条件下泥石流预报的误报率和漏报率对比信息。图 6 中的蓝色和红色的数据点代表了发生泥石流的流域所处的乡镇位置，数据由四川省地质环境监测总站提供。由图 6 可知，图 6(a) 发出预警报的泥石流流域总面积比图 6(b) 大，这是由于在其他条件均相同的情况下，基于水文过程获取的前期有效含水量值普遍要比经验公式获取值高。

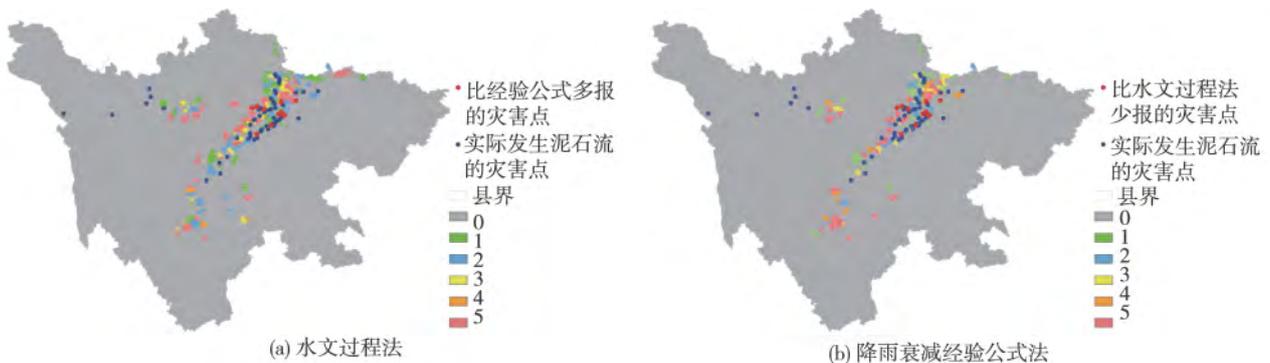


图 6 不同前期有效降水确定方法条件下的泥石流预报结果

Fig. 6 Debris flow forecast results in the conditions of different determining methods for the antecedent effect rainfall

表 3 两种不同前期有效含水量条件下的泥石流预报结果对比信息

Table 3 Comparison information of the forecast results under the action of the two different cases of the antecedent effect rainfall

| 含水量初始值获取方法 | 预报可能发生泥石流的流域个数 | 实际发生泥石流的流域个数 | 成功预报的泥石流流域个数 | 漏报的泥石流流域个数 | 误报的泥石流流域个数 | 漏报率 / % | 误报率 / % |
|------------|----------------|--------------|--------------|------------|------------|---------|---------|
| 水文过程法 | 265 | 252 | 204 | 48 | 61 | 19.0 | 23.0 |
| 降雨衰减经验公式法 | 171 | 252 | 151 | 101 | 20 | 40.1 | 11.7 |

由表 3 可知，以水文过程法获取的前期有效降水为初始土体含水量，利用基于水土耦合机制的泥石流预报模型成功预报了 204 个流域，其漏报和误报率分别为 19.0% 和 23.0%；就采用经验公式获取的泥石流预

报初值条件而言, 其发出泥石流预警报的流域个数要比第一种方法少 94 个。在这 94 个未发出预警报的流域中, 未成功覆盖真实发生泥石流流域有 53 个(图 6 中 12 个乡镇点), 其漏报和误报率分别为 40.1% 和 11.7%。

3 结 论

(1) 利用水文过程模拟来确定区域尺度泥石流预报的前期有效降水的确定方法能够较为真实地体现降水作用下垫面的物理过程, 克服了降雨衰减经验公式的参数取值过于人为主观取值的弊端。由该方法获取的前期有效降雨量分布要比利用降雨衰减经验公式获取的分布更为均匀。就本文的计算条件而言, 利用水文过程的模拟计算得到的前期有效含水量值要比采用降雨衰减经验公式高。

(2) 衡量泥石流预报精度的两项指标包括误报率和漏报率。漏报会导致泥石流沟下游居民无法获得灾害信息, 泥石流爆发之后无法及时躲避, 造成严重的人员伤亡和经济损失; 而误报会导致人力和物力的不必要损失以及居民的心理恐慌, 可对汛期的重点沟道进行人工巡视、联防的方式进行预警, 进而降低预报的漏报和误报造成的不必要损失和恐慌。与利用水文过程模拟来确定区域尺度泥石流预报的前期有效降水的确定方法相比, 降雨衰减经验公式显然无法更好地适用于泥石流预报, 其漏报率要比前者高出 21.1% 之多, 会造成严重的人员伤亡。

(3) 利用水文过程模拟来确定区域尺度泥石流预报的前期有效降水的确定方法建立了降雨和下垫面的本质联系。只要具备下垫面数据和气象数据, 就可以模拟降雨的截留、入渗和蒸散发, 进而确定区域泥石流预报的前期有效降水量, 适用性广。

参考文献:

- [1] 韦方强 胡凯衡 陈杰. 泥石流预报中前期有效含水量的确定[J]. 山地学报, 2005, 23(4): 453-457. (WEI Fangqiang, HU Kaiheng, CHEN Jie. Determination of effective antecedent rainfall for debris flow forecast[J]. Journal of Mountain Science, 2005, 23(4): 453-457. (in Chinese))
- [2] 崔鹏 杨坤 陈杰. 前期降水对泥石流形成的贡献: 以蒋家沟泥石流形成为例[J]. 中国水土保持学报, 2003, 1(1): 11-15. (CUI Peng, YANG Kun, CHEN Jie. Relationship between occurrence of debris flow and antecedent precipitation: Taking the Jiangjia Gully as an example[J]. China Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 1(1): 11-15. (in Chinese))
- [3] 胡凯衡, 马超. 泥石流启动临界土体含水量及其预警应用[J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(2): 73-80. (HU Kaiheng, MA Chao. Critical soil moisture for debris flow initiation and its application in forecasting[J]. Journal of Earth Science and Environment, 2014, 36(2): 73-80. (in Chinese))
- [4] 谢凯, 余宏明, 彭祖武 等. 河南省栾川县泥石流源地土大直剪试验[J]. 山地学报, 2013, 31(6): 738-744. (XIE Kai, YU Hongming, PENG Zuwu, et al. Large scale direct shear test of debris flow source soil in Luanchuan of Henan[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 31(6): 738-744. (in Chinese))
- [5] 倪化勇, 唐川. 中国泥石流启动物理模拟试验研究进展[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 606-613. (NI Huayong, TANG Chuan. Advances in the physical simulation experiment on debris flow initiation in China[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 606-613. (in Chinese))
- [6] 周伟, 唐川, 周春花. 汶川震区暴雨泥石流激发雨量特征[J]. 水科学进展, 2012, 23(5): 650-655. (ZHOU Wei, TANG Chuan, ZHOU Chunhua. Critical rainfall characteristics for rainfall-induced debris flows in Wenchuan earthquake affected areas[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(5): 650-655. (in Chinese))
- [7] CANNON S H, ELLEN S D. Rainfall conditions for abundant debris avalanches, San Francisco Bay region[J]. California Geol, 1985, 38(12): 267-272.
- [8] 周伟, 唐川. 汶川震区暴雨泥石流发生的降雨阈值[J]. 水科学进展, 2013, 24(6): 786-793. (ZHO Wei, TANG Chuan. Rainfall thresholds for debris flows occurrence in the Wenchuan earthquake area[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(6): 786-793. (in Chinese))

- [9] SASSA K , CANUTI P. Landslides: Disaster risk reduction[M]. Berlin: Springer ,2008.
- [10] GIANNECCHINI R , GALANTI Y , D'AMATO AVANZI G. Critical rainfall thresholds for triggering shallow landslides in the Serchio River valley (Tuscany , Italy) [J]. Nat Hazards Earth Syst Sci ,2012 ,12: 829-842.
- [11] CROZIER M J , EYLES R J. Assessing the probability of rapid mass movement[C]//Proceeding Third Australia-New Zealand Conference on Geomechanics. Wellington: The New Zealand Institution of Engineers-Proceedings of Technical Groups ,1980: 47-51.
- [12] GLADE T , CROZIER M J , SMITH P. Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical (Antecedent Daily Rainfall Model) [J]. Pure Appl Geophys ,2000 ,157(6/8) : 1059-1079.
- [13] SENOO K. Rainfall indexes for debris flow warning evacuating program [J]. Shin-Sabo ,1985 ,38(2) : 16-21.
- [14] FUJII K. Study on the Accuracy of warning and evacuation timing for debris flow [J]. Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering ,1994 ,47(2) : 35-42.
- [15] KUBOTA T. A study on a neural network system for critical rainfall determination of debris flow warning and evacuation [J]. Journal of the Japan Society of Erosion on Control Engineering ,1995 ,47(6) : 8-14.
- [16] HAYASHI T , KABEYAMA Y , OSANAI N. Study on the management of critical rainfall determination of debris flow warning [J]. Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering ,2000 ,53(2) : 57-61.
- [17] WEI F Q , GAO K C , JIANG Y H , et al. GIS-based prediction of debris flows and landslides in Southwestern China [C]//CHEN C L , MAJOR J J. Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics , Prediction , and Assessment. Rotterdam: Millpress Science Publishers ,2007: 479-490.
- [18] 张光灿 刘霞 赵玫. 树冠截留降雨模型研究进展及其述评 [J]. 南京林业大学学报 2000 24(1) : 64-68. (ZHANG Guangcan , LIU Xia , ZHAO Mei. On rainfall interception models [J]. Journal of Nanjing Forestry University ,2000 ,24(1) : 64-68. (in Chinese))
- [19] 罗天祥. 龙胜里骆杉木人工林群落的降雨截留和养分淋溶归还 [J]. 自然资源 ,1995(6) : 44-50. (LUO Tianxiang. Rainfall interception and washing nutrient return to the Chinese fir Plantation in Lילו of Longsheng [J]. Journal of Natural Resources ,1995 (6) : 44-50. (in Chinese))
- [20] MERRIAM R A. A note on the interception loss [J]. J Geophys Res ,1960 ,65: 3850-3851.
- [21] GASH J H C. Comparative estimates of interception loss from three coniferous forests in Great Britain [J]. Journal of Hydrology ,1980 ,48: 89-105.
- [22] RUTTER A J. A predictive model of rainfall interception in forest: I: Derivation of the model from observation in a plantation of Corsican pine [J]. Agr Mest ,1971 ,9: 367-384.
- [23] 张学培 郭冬青 王本楠. 林冠截留理论模型的应用 [J]. 北京林业大学学报 ,1997 ,19(2) : 30-34. (ZHANG Xuepei , GUO Dongqing , WANG Bennan. Application of theoretical model of rainfall interception by forest canopy [J]. Journal of Beijing Forestry University ,1997 ,19(2) : 30-34. (in Chinese))
- [24] 许继军. 分布式水文模型在长江流域的应用研究 [D]. 北京: 清华大学 2007. (XU Jijun. Application of a distributed hydrological model of Yangtze River basin [D]. Beijing: Tsinghua University ,2007. (in Chinese))
- [25] SELLERS P J , RANDALL D A. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs: 1: Model formulation [J]. Journal Climate ,1996 (9) : 676-705.
- [26] 杨得军 ZHANG Kefeng 张士乔. 蒸发条件下土壤水分响应模拟 [J]. 水科学进展 2011 22(2) : 208-214. (YANG Dejun , ZHANG Kefeng , ZHANG Tuqiao. Modeling soil moisture responses under evaporative conditions [J]. Advances in Water Science ,2011 ,22(2) : 208-214. (in Chinese))
- [27] 彭振阳 黄介生 伍靖伟 等. 基于分层假设的 Green-Ampt 模型改进 [J]. 水科学进展 ,2012 ,23(1) : 59-66. (PENG Zhenyang , HUANG Jiesheng , WU Jingwei , et al. Modification of Green-Ampt model based on the stratification hypothesis [J]. Advances in Water Science ,2012 ,23(1) : 59-66. (in Chinese))
- [28] van GENUCHTEN M T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Sci Soc Am J ,1980 44: 892-898.
- [29] 周长艳 岑思弦 李跃清 等. 四川省近 50 年降水的变化特征及影响 [J]. 地理学报 2011 66(5) : 619-630. (ZHOU Changyan , CEN Sixuan , LI Yueqing , et al. Precipitation variation and its impacts in Sichuan in the last 50 years [J]. Journal of Geographical Sciences ,2011 ,66(5) : 619-630. (in Chinese))

- [30] 宋璐璐, 尹云鹤, 吴绍洪. 蒸散发测定方法研究进展 [J]. 地理科学进展, 2012, 31(9): 1186-1195. (SONG Lulu, YIN Yunhe, WU Shaohong. Advancements of the metrics of evapotranspiration [J]. Progress in Geography, 2012, 31(9): 1186-1195. (in Chinese))
- [31] ZHANG S J, YANG H J, WEI F Q, et al. A model of debris flow forecast based on the water-soil coupling mechanism [J]. Journal of Earth Science, 2014, 25(4): 757-763.
- [32] ZHANG S J, WEI F Q, LIU D L, et al. A regional-scale method of forecasting debris flow events based on water-soil coupling mechanism [J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11(6): 1531-1542.
- [33] 熊俊楠. 基于遥感与 GIS 的精细化区域泥石流风险评估 [D]. 成都: 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 2013. (XIONG Junnan. Refined regional debris flow risk assessment based on remote sensing and GIS [D]. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, 2013. (in Chinese))
- [34] 赵岩. 土壤含水量遥感反演及其在泥石流预报中的应用 [D]. 成都: 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 2012. (ZHAO Yan. Soil moisture retrieval by remote sensing and its application in debris flow forecasting [D]. Chengdu: Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, 2012. (in Chinese))

An hydrology-process based method for antecedent effect rainfall determination in debris flow forecasting*

ZHANG Shaojie^{1, 2}, JIANG Yuhong², YANG Hongjuan², LIU Dunlong²

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: Antecedent effect rainfall is a key factor in debris flow forecasting, but the current method used to calculate this factor has the defect that the parameters determination of the method is too subjectively. In order to solve this problem, a hydrology-process (e. g. rainfall interception, rainfall infiltration and evapotranspiration) based method to calculate the antecedent effect rainfall for debris flow forecasting is proposed. Taking the antecedent effect rainfall calculated by the hydrology-process based method and the empirical based method as the initial value, the debris flow forecasting system for Sichuan province based on the water-soil coupling mechanism is employed to forecast debris flow disasters induced by the heavy rainfall on July 9, 2013 in Sichuan province. The forecasting results show that the hydrology-process based method that used to calculate the antecedent effect rainfall is more suitable for debris flow forecasting, because the failure prediction rate of debris flow forecasting is 21.1% lower than the method of the empirical formula of the rainfall attenuation. Consequently, the hydrology-process based method that used to calculate the antecedent effect rainfall can serve the debris flow mitigation better.

Key words: antecedent effect rainfall; debris flow; forecast; hydrological process simulation; empirical formula of the rainfall attenuation

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41101009) and Youth Fund Project of Institute of Mountain Hazard and Environment, CAS (No. SDS-QN-4303).