陕西省精细化地质灾害气象预报预警研究*

张雅斌[1]，杜继稳[2]，蔡 蕊[3]，李 明[1]

（1. 陕西省气象台，陕西 西安 710014；2. 陕西省气象局，陕西 西安 710014；3. 增城市气象局，广东 广州 511300）

摘 要：在黄土高原和秦巴山区地质灾害与降水相关特征分析基础上，介绍了陕西省气象台精细化地质灾害气象预报预警模型与业务系统。利用新一代多普勒天气雷达和自动气象站加密资料实现了综合雨量的精细估计，结合 GIS 地形地貌信息和历史灾害风险分析确定出降水影响系数后，通过计算指标量与灾害临界阈值判断实现了陕西省 1 915 个乡镇地质灾害的逐日自动预报预警。

关键词：地质灾害；雨量估计；降水影响系数；气象；预报预警；陕西

中图分类号：P642.2；P457　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000－811X(2011)03－0028－07

卫星资料分析表明，我国共有滑坡、泥石流灾害点 100 万处以上，调查证实的大型滑坡灾害点有 7 800 多处，泥石流灾害点有 11 100 多处。陕西省境内存在多处地质灾害易发区，特别是秦岭和大巴山地区地质条件复杂，是我国滑坡、崩塌、泥石流和地面塌陷等地质灾害多发区之一，区内地质灾害分布地域广、突发性强、破坏严重。大量研究表明，因降水诱发灾害占地质灾害总数的 65% ~95%。近年来，随着人类与社会活动的增加和极端降水天气的频繁发生，各类地质灾害呈增加趋势，给人民生命财产安全和社会经济发展带来了严重威胁。因此，研究降水诱发地质灾害预报预警技术实现方法，提高灾害防御能力，为政府和决策部门及时提供科学的灾害避险决策依据，减少人员伤亡和财产损失，已经成为气象和地质科技工作者共同关注和研究的热点[1-4]。

近几年来，针对泥石流滑坡等地质灾害，相关研究在深入分析灾害与降水条件关系基础上建立了灾害预报系统。单九生等通过江西省境内滑坡与降水关系研究发现，滑坡的发生与近 3 d 内的降水强度、过程降水总雨量、降水持续时间等关系十分密切，并建立了用日综合雨量预测滑坡发生的数学模型[5]。张玲等基于 GIS 研究了单个地区的滑坡临界降雨指标，统计得到了日降雨量和累计雨量致灾阈值[6]。张玉成等基于多个省份历史资料对滑坡和降雨之间关系进行统计分析[7]。高华喜等详细研究了深圳市降雨与滑坡的历史资料，对区域性滑坡与降雨量、降雨强度以及降雨时间进行了系统分析，并探讨了区域性滑坡发生的临界降雨量和降雨强度阀值。最后通过耦合滑坡灾害地质模型与降雨模型建立了滑坡灾害的空间预警预报区划指标和等级系统[8]。吴跃东等根据安徽省地质灾害特点及与气象条件的关系，从气象因素和地质灾害隐患入手，应用基于 GIS 的地质灾害气象预警方法，建立了主客观结合的安徽省地质灾害气象预警预报系统[9]。

随着气象现代化装备建设快速发展，陕西省内近 1 200 个乡镇自动气象站和 6 部新一代多普勒天气雷达探测数据已经投入日常气象服务，短期精细化和短时突发性降水的预报服务能力得到明显提升。使用以上加密探测资料，基于 GIS 技术研究精确到全省 1 917 个乡镇的地质灾害气象预报预警方法和客观自动化业务系统已经成为可能。

1 精细化预报预警建模

要对某一区域未来一段时间内的地质灾害进行预报预警，就需要考虑与灾害密切相关的地质和降水条件，通过历史灾害资料统计分析后建立预报预警模型，并对模型涉及的降水与地质影响参数分地区进行精确估计。

1.1 降雨与灾害相关性分析

2000－2008 年黄土高原及秦巴山地发生致人

* 收稿日期：2010－12－24
基金项目：陕西省气象局项目带动计划 01 批重点项目“天气预报业务平台建设”(2008ZD14)
作者简介：张雅斌(1976－)，陕西宝鸡人，博士，高级工程师，主要从事天气预报、信号与信息处理技术研究.
E-mail:ddusa@yeah.net

死亡性地质灾害共计 172 起，其中，降雨、冻融、采矿、修路、工民建和渠系渗漏生引发的灾害次数（比例）分别为 125（73%）、16（10%）、11（6%）、7(4%)、11(6%)、2(1%)，降雨是各类诱发因素中引发地质灾害的最主要因素。图 1 给出了致人死亡性地质灾害的年内逐月分布统计结果，可以看出，灾害主要发生在 7－10 月份，与陕西省强降水发生时段一致。

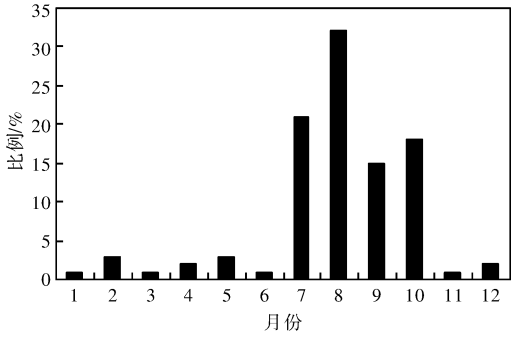

图 1　2000－2008 年地质灾害年内逐月分布

1960－2006 年陕西省黄土高原区地质灾害资料分析(表 1)表明，崩塌、滑坡、泥石流三种地质灾害发生时当日平均降水量为 20 mm 左右，降雨日数为 5 d 左右，10 mm 以上日数 2 d 左右，25 mm 以上日数约 1 d。崩塌发生前一般最多存在 10 个降雨日，小于等于 2 d 的仅有 8 次，占 11.4%；滑坡发生前一般最多有 9 个降雨日，小于等于 2 d 的仅有 3 次，占 8.1%；泥石流发生前降雨日数均在 4 d 以上。地质灾害发生前期往往有多日降雨，且多数有 3 个以上的降雨日数。崩塌发生前期连续降雨日数平均3.8 d，最长达 10 d，连续降雨日 3 d 以上的有 46 次，占 65.7%，连续降雨日小于等于 2 d 共 24 次，占 34.3%；滑坡发生前连续降雨日平均 4.2 d，最长达 9 d，连续降雨日 3 d 以上的有 29 次，占 82.9%。

表 1　黄土高原区地质灾害发生前期降雨情况分析

灾害种类	当日降水量/mm	降雨日数/d	连续降雨日数/d	≥10mm日数/d	≥25mm日数/d	累积降水量/mm	累积次数
崩　塌	20.7	5.3	3.8	2.1	1.0	75	70
滑　坡	19.9	5.5	4.2	2.4	1.1	79	35
泥石流	18.2	5.4	3.2	2.0	0.8	52	5

1972－2007 年的陕西省秦巴山区地质灾害资料分析(表 2)表明，崩塌、滑坡、泥石流灾害发生前降雨日数平均为 5～6 d，大于等于 10 mm 平均日数为 3 d 左右，大于等于 25 mm 的平均日数近 2 d，大于等于50 mm 的平均日数差别较大，崩塌、滑坡、泥石流分别为 0.5 d、0.7 d 和 1 d。崩塌发生前一般最多有 10 个降水日，降水日小于等于 2 d 仅有 3 次，占 6.7%；滑坡发生前一般最多有 11 个降雨日，降雨日小于等于 2 d 的有 46 次，占 6.2%，；泥石流发生前一般最多有 11 个降雨日，降雨日数均在 4 d 以上。崩塌发生前期连续降水日数平均 4.2 d，最长达 10 d，连续降水日大于等于 3 d 有 37 次，占 82.2%，连续降水日小于等于 2 d 有 8 次，占 17.8%。滑坡发生前连续降水日数平均 4.9 d，最长达 11 d，连续降水日大于等于 3 d 有 658 次，占 89.2%，连续降水日小于等于 2 d 有 80 次，占 10.8%。泥石流发生前连续降水日平均 4.5 d，最长达 11 d，连续降水日大于等于 3 d 21 次，占 100%。

表 2　秦巴山区地质灾害发生前期降雨情况分析

灾害种类	当日降水量/mm	降雨日数/d	连续降雨日数/d	≥10 mm日数/d	≥25 mm日数/d	累积降水量/mm	累积次数
崩　塌	22.4	5.8	4.2	3.2	1.8	115	45
滑　坡	32.4	5.9	4.9	3.0	1.7	115	738
泥石流	151.8	6.3	4.5	3.4	1.8	170	21

黄土高原地质灾害和降雨相关性分析(表 3)表明，滑坡和前 3 d 累积降水相关性最高，其次是前 1 d、2 d 累积降水量，从第 3 d 之后相关性开始明显降低，到第 10 d 相关系数已降至 0.45，说明滑坡主要与 3 d 以内的短期降雨密切相关，10 d 以前的降雨与滑坡灾害关系不大。崩塌和前 2 d 的累积降水量相关性最高，其次是当天、前 1 d 累积降水量，从前 2 d 之后二者相关性开始降低，至前 10 d 时降至 0.44，说明 10 d 之前的降雨和崩塌灾害关系不大。统计表明，秦巴山区的灾害发生次数与累积降水之间也具有上述类似关系，此处略去详细说明。

表 3　地质灾害发生次数与各日累积降水相关性分析

灾害发生前雨量累积日数/d	滑坡相关系数	崩塌相关系数
当天	0.63	0.96
1	0.86	0.92
2	0.84	0.96
3	0.91	0.76
4	0.74	0.74
5	0.68	0.69
7	0.65	0.57
10	0.45	0.44

1.2　基于卡尔曼滤波的加密雨量估计

陕西省境内地质灾害与前期降雨强度、降雨日数及连续降雨时间分析表明，引发地质灾害一般都需要 3 d 以上的降雨日，其中，滑坡所需的降雨日数一般多于崩塌。结合以往地质灾害预报预警研究[5-9]，这里引入日综合雨量定义

$$R_c = R_0 + R_1 + \cdots + R_z + \alpha R_{z+1} + \alpha^2 R_{z+2} + \cdots + \alpha^{n-z} R_n, \quad (1)$$

式中：R_0 为当天雨量；z 为相关性较好的地质灾害发生前天数；R_z 为相关性较好的前 z 天降水量；R_n 为第 n 天前的日降水；n 为总天数；α 为权重系数，针对滑坡、崩塌取值分别为 0.8、0.7，z 取值为 3，n 取值为 10。

要进行精细化地质灾害气象预报预警，首先要得到高分辨的降水估计和地形地貌信息，然后通过预报预警模型确定出某一乡镇的地质灾害预报等级。我国开发的 T639 中尺度模式和日本数值预报产品虽然提供了未来 72 h 降水量分时预报，但空间分辨率无法精确到乡镇，同时，产品每 12 h 下发一次，因此对尺度小、历时短、强度大的突发性暴雨等中小尺度天气系统的预报误差较大。每年 5－10 月，黄土高原和秦巴山区突发性暴雨等强天气过程频发，仅使用常规降水产品进行精细化的地质灾害预报预警是难以完成的，必须借助新一代天气雷达、自动气象站等新型探测装备完成降水的高分辨、精细化预测。

陕西省已经在榆林、延安、西安、宝鸡、汉中、安康安装使用了新一代多普勒天气雷达，每部雷达每 6 min 进行一次半径达 200 km 的体扫，空间分辨率达 0.5 km。同时，已经建立的一千多个自动气象站的空间分辨率达到了 10～20 km，每小时一次的温度、雨量等数据，使得时间和空间上精确跟踪、分析强降水落区已成为可能。

新一代天气雷达在降水估计和临近预测方面具有高分辨和直接对偏远地区观测等优势。雷达估计降水时，首先要对反射率因子与降水历史样本统计分析后建立各类天气下反射率因子与降水率反演方程，实时估计时将某地测得的反射率因子带入反演方程后估计降水率。但是，只通过雷达回波进行降水估计，估计结果与实况之间将存在较大误差。例如，波束从降水系统顶部扫过时由于无法得到降水回波采样而导致对实际降水的低估，波束采样位置之下的蒸发将导致对降水的过高估计，采样位置之下地形对降水的加强作用将导致降水的低估。

为了减少新一代多普勒天气雷达降水估计时存在的上述固有误差，这里通过自动气象站实况雨量对雷达估计降水进行误差校正，提出一种基于自动气象站和雷达回波的降水高分辨估计方法。主要思路是利用自动站雨量和雷达回波分别进行降水外推与反演，再以各自结果构造新的自变量序列，利用卡尔曼滤波器进行降水的精细化预测，主要步骤如下：

（1）假设在 1～2 h 内天气系统发展演变具有连续性，中尺度对流系统反射的回波在短时间内呈线性变化。在预报对应时效正点前 10 min 对雷达资料进行处理：对回波可以覆盖到的乡镇，判断以乡镇为中心、直径 20 km（对应 40 个分辨点）范围内过去 1 h 中大于 30 dB 回波的整体变化趋势（对最近 5 次连续体扫平均和过去 5 次平均之间进行比较），判定回波发展属于加强型（R_1）、衰减型（R_2）还是维持型（R_3）。由最近半小时的基本反射率反演实况降水：先对 5 次体扫数据进行时间平均，再对结果中大于 30 dB 的点进行空间平均，最后由得到的反射率因子 $Z(\mathrm{mm^6/m^3})$ 反演第 k 个乡镇的降水率 $R(\mathrm{mm/h})$，具体关系式为[10]：

$$Z(k)=300\times[R(k)]^{1.4}。\tag{2}$$

（2）正点后 10 min 提取进入数据库的自动气象站实况降水及雨强变化趋势信息，具体判断方法为：分钟雨量最大值如果出现在过去 2 h 后半段，则变化趋势为增长型（P_1）；如果出现在过去 2 h的前半段，则变化趋势为衰减型（P_2）；其他情况归入平稳型（P_3）。考虑到仪器噪声误差等实际因素，这里引入了平滑处理（通过最大值和次最大值进行判断）：如果二者之差小于2 mm，则取二者中间时刻作为最大雨强出现时刻；如果二者之差大于 2 mm，则在判断中不考虑次最大值。上述判定时，使用与乡镇关联度最大的 2 个自动站（这里结合距离与气候区域因素设定关联度最大的自动站）资料：如果 2 站都有降水，则取两者平均；如果只有 1 站降水，则不做平均，从“宁空勿漏”原则出发尽量做到对局地暴雨不漏报。

（3）先对雷达回波进行分级预处理（对小于一定阈值且无实况降水的点不考虑，对超过一定阈值且对应冰雹的站点进行特殊处理），再对可能出现液态降水的点引入卡尔曼滤波器进行定量预测，具体包括如下 2 个步骤。

①构造中间自变量矢量：$\boldsymbol{X}_t=[\alpha_1 R_0(k) f_R(R_i(k))\ \alpha_2 P_0(k) f_p(P_i(k))]$。其中，$k$ 表示第 k 个乡镇；下标“0”表示最近一个时次；α_1、α_2 分别表示由雷达和自动站实测资料进行降水线性外推与反演的可信度权重因子，二者满足 $\alpha_1+\alpha_2=1$，这里分别取 0.5；函数 f_R 与 f_P 分别表示通过雷达和自动站资料对降水趋势进行强弱分型后，通过先验信息给出的降水量时间相关函数，这里使用的相关函数为：

$$f_R[R_i(k)]=\begin{cases}1.3, & R_i(k)=R_1;\\ 0.8, & R_i(k)=R_2;\\ 1.0, & R_i(k)=R_3;\end{cases}$$

$$f_p[P_i(k)]=\begin{cases}1.3, & P_i(k)=P_1;\\ 0.8, & P_i(k)=P_2;\\ 1.0, & P_i(k)=P_3。\end{cases} \quad (3)$$

②针对某一区域引入卡尔曼滤波器[11]，对未来雨强 y_t 对应的估计值 $\hat{y}_t$ 进行递推预测，具体方程组如下

$$\hat{y}_t=\boldsymbol{X}_t\hat{\boldsymbol{\beta}}_{t-1}, \quad (4a)$$

$$\boldsymbol{R}_t=\boldsymbol{C}_{t-1}+\boldsymbol{W}, \quad (4b)$$

$$\boldsymbol{\sigma}_t=\boldsymbol{X}_t\boldsymbol{R}_t\boldsymbol{X}_t^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{V}, \quad (4c)$$

$$\boldsymbol{A}_t=\boldsymbol{R}_t\boldsymbol{X}_t^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\sigma}_t^{-1}, \quad (4d)$$

$$\boldsymbol{C}_t=\boldsymbol{R}_t-\boldsymbol{A}_t\boldsymbol{\sigma}_t\boldsymbol{A}_t^{\mathrm{T}}, \quad (4e)$$

$$\hat{\boldsymbol{\beta}}_t=\hat{\boldsymbol{\beta}}_{t-1}+\boldsymbol{A}_t(y_t-\hat{y}_t), \quad (4f)$$

式中：X_t 为 t 时刻对应的预报自变量矢量；$\hat{\beta}_{t-1}$ 和 $\hat{\beta}_t$ 分别为 $t-1$ 和 t 时刻预测方程系数的估计矢量；R_t 是 $\hat{\beta}_t$ 外推值的误差方差阵；C_t 为滤波值 $\hat{\beta}_t$ 的误差方差阵；W 为动态噪声的方差阵；V 为测量动态噪声的方差阵；σ_t 是预报误差方差阵。本例中以上矩阵维数为 2×2。

1.3　基于 GIS 的降水影响系数估计

地质灾害主要受降雨引发外，还与地质地貌特征密切相关。建立地质灾害预报预警模型时，可通过与地形地貌、灾害风险区和灾害分布等因素密切相关的降水影响系数来反映，确定降水影响系数时需要考虑以下因素[12-13]。

(1)环境地质条件指标。通过 GIS 从 DEM 数据中分别提取地貌(地貌 . wp)、岩土体类型(岩土体 . wp)、坡度(坡度 . wp)、地质构造(构造 . wp)等图层，将其属性数据作为评价指标，具体涉及以下信息：① 地貌，不同地貌形态对控制地质灾害发生发育作用差异很大。② 岩土体，岩土体类型很大程度上反映地质构造和地质活动情况。岩石破碎地区，风化速度较快，有利于地表松散固体物质的堆积，为地质灾害的发生提供了条件。③ 坡度，相同条件下坡度越陡，地表松散堆积物质在雨水作用下就越容易被带走，从而形成滑坡、泥石流等灾害。④ 断裂，断裂发育地区往往构造运动活动强烈，易引发地质灾害。例如，2008 年汶川地震的次生地质灾害十分严重，主要原因就是发震断裂处于龙门山断裂带上。⑤ 地质灾害隐患点先验信息。隐患点密集区域，说明地质环境复杂、相同气象条件下出现灾害几率高。

(2)降水程度。一是采用降水不均匀系数，即多年汛期平均降水量与多年平均降水量之比。二是采用年内暴雨平均次数。年内暴雨次数越多，单位时间内对地表岩体物质的冲刷侵蚀越强烈。降水不均匀系数和暴雨次数综合反映了降水对地表物质的侵蚀作用。

(3)历史地质灾害的诱发次数，采用地质灾害年发生率(次数/a)表达。

通过 2000－2008 年陕西省内地质灾情和气象资料整理分析，在参考风险区降水不均匀系数、灾害点年发生率特征和基于 GIS 的地理信息数字处理基础上，表 4 给出了陕西省地质灾害高风险区黄土高原及秦巴山地的降水影响系数。

表 4　黄土高原及秦巴山地地质灾害风险区降水影响系数

地域	风险区名称	降水不均匀系数	年内暴雨次数	年内平均降水天数/d	地质灾害年发生率/%	降水影响系数
黄土高原	神木－府谷地质灾害风险区	0.74	1	73	7	0～0.2
	榆阳－清涧－子洲地质灾害风险区	0.72	3	75	7	0.4～0.6
	安塞－子长－宝塔地质灾害风险区	0.70	2	87	10	0.4～0.6
	定边－吴起－志丹地质灾害风险区	0.73	2	70	13	0.4～0.6
	洛川－黄陵－宜君地质灾害风险区	0.63	0	92	5	0.2～0.4
秦巴山地	商州－洛南地质灾害风险区	0.44	2	101	16	0.4～0.6
	商南－山阳－镇安地质灾害风险区	0.42	2	108	16	0.6～0.8
	白河－旬阳地质灾害风险区	0.30	2	103	23	0.6～0.8
	镇坪－平利地质灾害风险区	0.37	2	125	25	0.8～1
	岚皋－紫阳－镇巴地质灾害风险区	0.36	2	116	26	0.8～1
	石泉－西乡地质灾害风险区	0.39	2	104	20	0.4～0.6
	勉县－洋县地质灾害风险区	0.59	1	103	13	0.4～0.6
	宁陕－佛坪地质灾害风险区	0.64	2	105	15	0.8～1
	宁强－略阳地质灾害风险区	0.68	2	145	20	0.8～1
	留坝－凤县地质灾害风险区	0.64	2	125	13	0.8～1

1.4　综合降雨指标

在日综合雨量和降水影响系数基础上，地质灾害气象预报预警的综合降水指标通过如下公式计算

$$G_f(k)=\alpha(k)\cdot[R_c(k)+R_{\mathrm{for}}(k)], \quad (5)$$

$$G_a(k)=\alpha(k)[R_a(k)+R_{\mathrm{doppler}}(k)], \quad (6)$$

式中：k 为自动气象观测站序号；$\alpha(k)$ 为第 k 站的降水影响系数；$R_c(k)$ 为第 k 站的日综合降雨量，它表示前期降雨状况，由逐小时的实时观测累加得到，要说明的是，这里所用的日综合雨量是不断变化的动态累计雨量，如 08 －08 h 日雨量、09 －09 h 日雨量；$R_{for}(k)$ 为第 k 站短期降水预报值，具有预报时效长但时间分辨率低(6 h)的特点，它由主、客观预报方法或由欧洲中心、国家气象中心中期数值预报或中尺度数值预报模式输出的降水预报，再经预报员订正后得到的降水预报值。这里，使用日本、德国和 T639 三种模式结果由多模式集成预报中的多数表决集中集成法自动计算各站 $R_{for}(k)$。$R_{doppler}(k)$ 为第 k 站的短时降水预报值，$R_{doppler}(k)$ 具有预报时效短但时间分辨率高(1 h)的特点，它由上节基于卡尔曼滤波的加密雨量估计方法预测。实际应用中，当在短期预报时效内预报有降雨发生时，应用式(5)预报地质灾害发生等级和落区；当第 k 站点 $G_f(k)$ 达到地质灾害发生预报级临界值时 $G_a(k)$，应用式(6) 计算逐小时，满足条件时进行地质灾害等级和落区临近预警跟踪服务。

按照 2003 年国土与气象部门地质灾害预报预警分级，将灾害临界值分为预报级(可能性较大)、临报级(可能性大)、警报级(可能性很大)。灾害等级预报中，根据诱发地质灾害一定频率的综合降水指标值作为三个预报等级的临界阈值。假定取累加频率达 15% 、30% 、50% 时综合降水指标作为预报级、临报级、警报级对应的临界阈值，统计陕北黄土高原区 110 次地质灾害和陕南秦巴山区 804 次灾害过程对应综合降水指标后，得到两个地区地质灾害预报级、临报级、警报级的阈值分别为：25 mm、35 mm、65 mm 和 75 mm、100 mm、145 mm。

图 2 给出了陕西省气象台精细化地质灾害预报预警流程。可以看出，地质灾害预报预警基础是诱发地质灾害强降水的预报预警；降雨诱发地质灾害的预报预警通过预报预警时段逐步缩小、预报与预警模型的结合应用而逐步精细化；不同时段预报预警分别同地质灾害预报级、临报级、警报级临界值相衔接；不论是 24 h 短期预报，还是 12 h 或 6 h 短时预报，一旦达到灾害发生临界值，即启动预警模型，进行地质灾害等级和落区预报的逐小时跟踪服务。

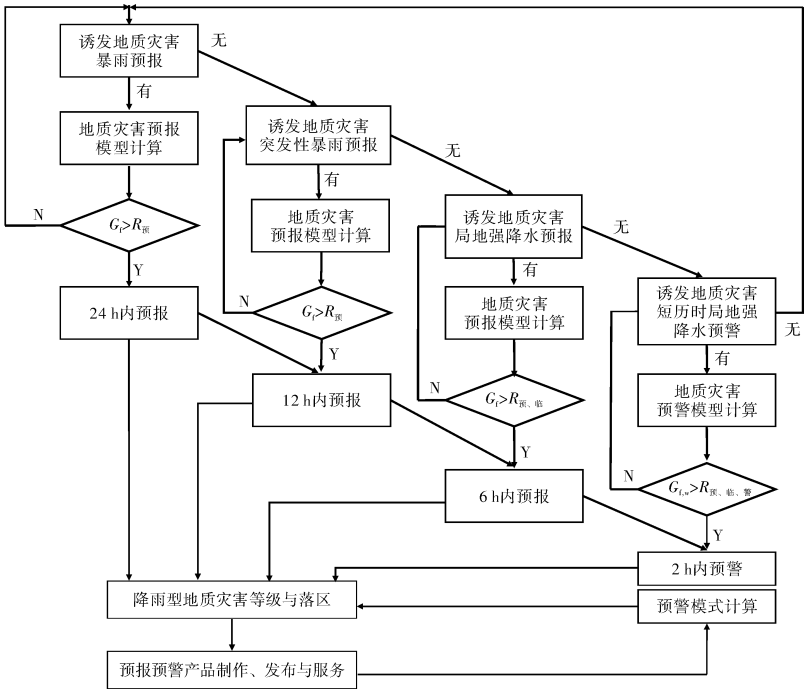

图 2 陕西省气象台精细化地质灾害预报预警系统流程

2 检验分析

陕西省气象台精细化地质灾害气象预报预警系统于 2008 年 8 月 15 日开始业务运行，预报员每日制作全省天气预报时调取灾害预报预警结果，如出现 3 级以上灾害发生可能性较大乡镇后，结合最新天气监测信息第一时间通知相关地区气象台进行乡镇地质灾害跟踪服务。

2008 年 8 月 15 日至 11 月 30 日，陕北黄土高

原共发生了 3 起地质灾害，死亡 6 人，本系统预报正确 1 次、空报 1 次、漏报 2 次(属非降水型地质灾害)。陕南秦巴山区共发生 8 次地质灾害，本系统预报正确 4 次、空报 4 次、漏报 4 次，Ts 评分为 0.33，正确率为 50%。

2009 年陕西省共发生暴雨过程 24 次，暴雨站数达 120 站/次，发生滑坡、崩塌、泥石流灾害 73 d，共计 182 起，死亡 10 人。灾害最早出现在 1 月 8 日(洛川县)，最晚出现在 12 月 2 日(彬县)。对 61 d 地质灾害实况与每日预报结果对比统计表明，系统预报正确 36 次、空报 23 次(完全空报 13 次、部分空报 10 次)、漏报 15 次，Ts 评分为 0.486，正确率为 59%。其中，漏报的 15 次短期预报，对未来 12 h 短时预报结果分析表明，9 次可以通过实时资料滚动分析而成功预警，剩余 6 次漏报，预警结果不理想，原因主要分为 2 类：①前期无明显降水，与降水因素关系不大；②灾害点地形特殊，采集的地貌信息精度不够。

选取 2009 年发生的 2 次明显地质灾害个例，对系统预报预警服务情况进行说明。

2.1　彬县拜家河地质灾害

2009 年 7 月 30 日，彬县拜家河发生了地质灾害。由图 3 可以看出，灾害发生前期，铜川、咸阳、渭南和汉中等地出现了强降雨中心，降水是诱发此次地质灾害的直接原因。图 4 为业务系统在 29 日 17 时生成的地质灾害气象预报图。可以看出，包括咸阳(彬县)在内的多处地区出现了 3 级以上灾害区，个别地区达到了 4 级和 5 级。针对此次彬县境内的地质灾害，下级根据省国土资源厅、省气象局联合发布的预报预警对群众及时撤离，避免了 11 人伤亡。

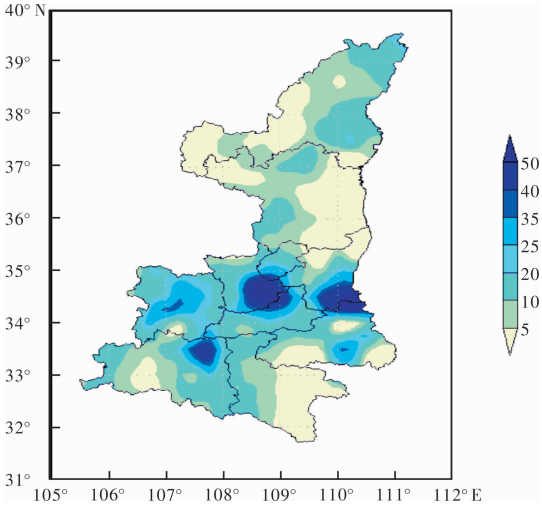

图 3　2009 年 7 月 26 日 08 时－29 日 17 时降水实况

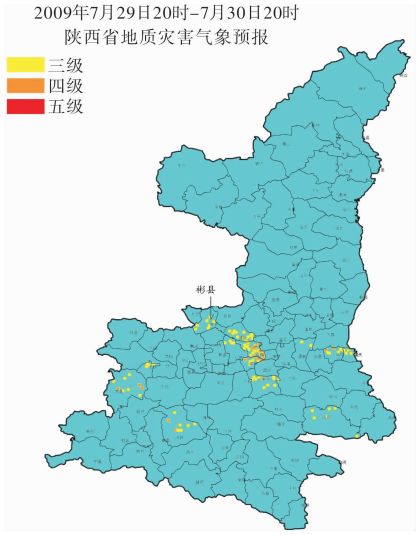

图 4　2009 年 7 月 29 日 17 时地质灾害气象预报

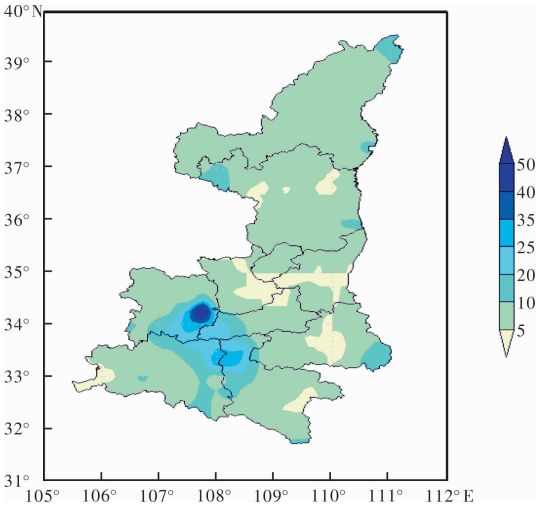

图 5　2009 年 6 月 1 日 20 时 7 日 17 时降水实况

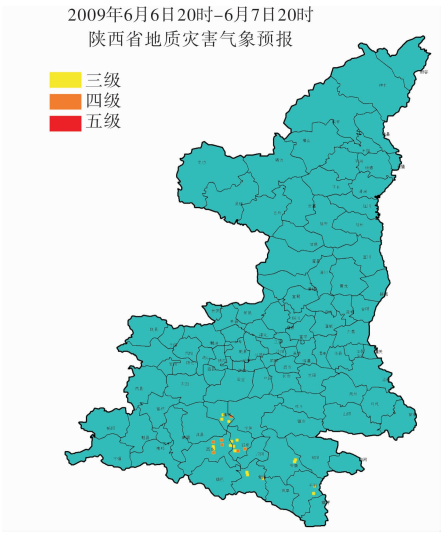

图 6　2009 年 6 月 6 日 17 时地质灾害气象预报

2.2　镇坪县城交警大队地质灾害

图 5 和图 6 分别为前期降水分布与 2009 年 6

月 6 日 17 时发布的地质灾害预报图。经查，6 月 7 日安康市镇坪县发生了一起直接经济损失达 200 万元的中型崩塌，预报结果中无 3 级以上预报，属于漏报。分析表明，此次漏报和灾害点的特殊地貌有关(灾害发生确切地点位于镇坪县城交警大队门前陡崖处)。因此，对于小范围特殊地形，精细化灾害预报能力还有待提高。

3 结论

本文在黄土高原和秦巴山区地质灾害与降雨相关特征分析基础上，对陕西省气象台精细化地质灾害气象预报预警系统与运行服务情况进行了介绍。预报预警系统中，首先基于新一代多普勒天气雷达和自动气象站高密度资料通过卡尔曼滤波进行降水精细估计，然后，结合地理信息系统与历史灾情资料得到的地质灾害降水影响系数，通过指标量计算与灾害临界阈值判断实现了全省 1 917 个乡镇地质灾害的自动预报预警。

业务运行检验结果表明，精细化地质灾害气象预报预警系统对未来 24 h 内地质灾害发生地点有较好的预报能力，但在总体上存在灾害发生范围偏大的问题。同时，地质灾害除了与气象条件有关外，还与地表构造、植被变化和人为间接因素密切相关。因此，需要随着地质灾害监测与天气预报技术的发展，不断完善细化降水诱发地质灾害的预报预警系统流程，提高预测预防精细化、自动化水平。

参考文献：

[1] 张书余. 地质灾害气象预报基础[M]. 北京：气象出版社，2005.

[2] 杜继稳. 降雨型地质灾害预报预警－以黄土高原和秦巴山区为例[M]. 北京：科学出版社，2010.

[3] 刘传正，温铭生，唐灿. 中国地质灾害气象预警初步研究[J]. 地质通报，2004，23(4)：304－309.

[4] 岳建伟，王斌，刘国华，等. 地质灾害预警预报及信息管理系统应用研究[J]. 自然灾害学报，2008，17(6)：60－63.

[5] 单九生，刘修奋，魏丽，等. 诱发江西滑坡的降水特征分析[J]. 气象，2004，30(1)：13－15.

[6] 张玲，黄敬峰，胡先松，等. 基于 GIS 的滑坡临界降雨指标的研究[J]. 浙江大学学报：农业与生命科学版，2003，29(5)：493－498.

[7] 张玉成，杨光华，张玉光. 滑坡的发生与降雨关系的研究[J]. 灾害学，2007，22(1)：82－85.

[8] 高华喜，殷坤龙. 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阀值之探讨[J]. 岩土力学，2007，28(5)：1055－1060.

[9] 吴跃东，向钒，马玲. 安徽省地质灾害气象预警预报研究[J]. 灾害学，2008，23(4)：25－29.

[10] 俞小鼎，姚秀萍，熊廷南，等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京：气象出版社，2007：221－225.

[11] 马鹤年. 省地气象台短期预报岗位培训教材[M]. 北京：气象出版社，1998.

[12] 王雁林. 县级地质灾害防治管理评价指标体系探讨[J]. 灾害学，2005，20(2)：115－120.

[13] 张斌，赵前胜，姜瑜君. 区域承灾体脆弱性指标体系与精细量化模型研究[J]. 灾害学，2010，25(2)：36－40.

Meticulous Meteorological Forecasting and Alarming for Geological Hazard in Shaanxi Province

Zhang Yabin[1], Du Jiwen[2], Cai Rui[3] and Li Ming[1]

(*Shaanxi Meteorological Observatory*, *Xi'an* 710014, *China*; 2. *Shaanxi Meteorological Bureau*, *Xi'an* 710014, *China*; 3. *Zengcheng Meteorological Bureau*, *Guangzhou* 511300, *China*)

Abstract: Based on analysis on correlation relationship between geological hazard and precipitation in Loess Plateau and Qin-Ba mountain area in Shaanxi Province, meteorological model and realization system for geological hazard forecasting and alarming are proposed. Precise estimates on comprehensive precipitation are realized by encrypted data of newly generated Doppler weather radar and automated observation stations. Combining with GIS topography information and risk analysis on historical disasters, impact factors of precipitation are determined. Automatic daily forecasting and alarming for geological hazard of 1915 towns in Shaanxi Province are realized by calculating target volume and judgment on disaster critical threshold.

Key words: geological hazard; precipitation estimate; impact factors of precipitation; meteorological forecasting and alarming; Shaanxi province