

# 基于流域总降水高分辨估计的暴雨灾害风险评估

张雅斌<sup>1</sup>, 刘安麟<sup>2</sup>, 曲静<sup>3</sup>

(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. 陕西省西安市气象台, 陕西西安 710016)

**摘要** 提出了基于新一代多普勒天气雷达和自动气象站资料的流域总降水高分辨估计方法, 结合灾情定量指标计算和水文资料, 对2011年西安世园会期间陕西3次暴雨过程影响地区灾害风险进行了评估分析。结果表明, 汉江上游流域是陕南灾害预警重点地区, 流域内过程总降水明显增大是引发陕南次生灾害的主要因素; 汉江上游和下游流域同时出现较大总降水时, 由于上游降水对下游水文地质灾害的重叠效应和下游水情对上游自然排洪能力的影响, 相关地市灾情将有所加重; 同时, 降水随时间的不均匀性和突发性也是引发灾害的重要因素。

**关键词** 暴雨; 流域总降水; 高分辨估计; 灾害风险评估; 陕西

**中图分类号** S161.6 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)32-12651-05

## Disaster Risk Assessment of Rainstorm Based on High Resolution Estimation for Basin Total Precipitation

ZHANG Ya-bin et al (Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an, Shaanxi 710014)

**Abstract** The joint estimation method for basin total precipitation by NEXRAD and automated observation stations was proposed, and combining quantitative disaster index and hydrology analysis, regional rainstorm disaster risks were assessed during the 2011 Xi'an World Garden Expo in Shaanxi Province. The results showed that upstream of Hanjiang Basin is the key area to early warning for southern Shaanxi disaster and apparent enlargement of total precipitation is the main factor to disasters happen in southern Shaanxi. The large total precipitation fallen simultaneously in upstream and downstream of Hanjiang Basin, due to the overlap aggravating impact of upstream strong precipitation on the downstream flood disaster and the negative effect of downstream water on natural drainage capacity of upstream at Hanjiang River, will increase disasters in these areas. Meanwhile, temporal in homogeneity and mutability of precipitation are also important factors to disasters.

**Key words** Rainstorm; Basin total precipitation; High resolution estimation; Disaster risk assessment; Shaanxi Province

近年来, 提高气象、水文与山洪地质灾害预警评估水平和防御能力, 为政府决策部门提供及时科学的灾害避险决策信息, 减少人员财产伤亡损失, 已经成为相关行业科技工作者共同关注和研究的热点<sup>[1-5]</sup>。地质灾害风险评估和预警方面, 张雅斌等在黄土高原和秦巴山区地质灾害与降水相关分析基础上, 利用新一代多普勒天气雷达和自动气象站资料实现了单站综合雨量精细预测, 结合GIS和历史灾害分析确定降水影响系数, 通过灾害指标与临界阈值判断实现了陕西省1915个乡镇地质灾害预报预警和业务运行结果检验<sup>[5]</sup>。水文与洪水预报方面, 动力—统计降尺度法和高分辨率“单一”模式及低分辨率相结合已成为水文集合预报试验研究方向<sup>[6-7]</sup>。次生灾害气象条件分析方面, 面雨量是强降雨次生灾害预警与风险评估的一个重要参数, 由于降水空间分布的复杂性, 如何准确估算流域面雨量一直是个科学难题<sup>[8]</sup>。近几年来, 以雷达、卫星估测降水资料为主并结合自动气象站降水观测资料进行流域面雨量估算已成为技术发展趋势<sup>[9-10]</sup>。灾害风险评估方面, 祝新建等根据50年气象资料与当地耕地面积、人口密度和经济状况等资料, 利用ACRGIS对暴雨、冰雹和大风等方面相关致灾因子进行风险区划, 建立了相关地区农业气象灾害损失评估模型<sup>[11]</sup>。

陕西省地处青藏高原东侧, 属于北方暴雨多发地区, 暴雨及其诱发的洪水、滑坡、泥石流等次生灾害是陕西重大自

然灾害之一。由于暴雨天气系统的结构、强度、路径与灾害影响一般随时间和地点动态变化, 做好暴雨灾害的动态预警评估是防灾减灾的关键。笔者结合2011年西安世园会期间陕西3次暴雨过程气象、水文与灾情实况信息, 通过使用新一代多普勒雷达和自动雨量站高分辨资料, 实现了流域总降水的精细化估计, 并结合灾情定量估计, 对受灾地区灾害风险进行分析评估, 以期开展暴雨诱发中小河流洪水和山洪地质灾害气象风险预警服务业务, 以及提升气象风险预警服务、次生灾害风险评估和防御水平提供了科学定量依据。

## 1 实况与灾情

### 1.1 2011年7月3~6日暴雨过程

**1.1.1 实况。**7月3~6日, 陕西省中南部出现暴雨天气过程, 强降水落区位于陕南和关中西部地区(图1a<sub>1</sub>)。期间, 全省共出现41站(次)和6站(次)雨强>10和>20 mm/s的短时暴雨。3日08:00~4日08:00, 紫阳、商南出现暴雨; 4日08:00~5日08:00, 南郑、汉中和岚皋出现暴雨; 5日08:00~6日08:00, 南郑、略阳、汉中、留坝、城固、西乡、宁强、勉县、洋县、石泉、宁陕出现暴雨。过程期间, 最强降水时段主要出现在5日05:00~11:00、6日09:00~17:00。5日05:00~08:00, 汉中市南郑县的新集和忍水2个雨量站3h降水量分别达120.0、104.6 mm, 降水中心南郑站06:00~07:00降水50.6 mm(图1b<sub>1</sub>)。

**1.1.2 灾情。**暴雨过程期间, 汉中地区受灾严重, 全市直接经济损失近2亿元, 受灾人数10.3万, 紧急转移安置4899人, 因灾死亡18人, 失踪1人, 倒塌房屋1400间, 农作物受灾面积7.3万hm<sup>2</sup>, 210国道镇巴境内、309省道略阳境内多处塌方, 全市37条县乡道路受损。同时, 强降水造成岚皋县和镇安县直接经济损失分别达2000万和490万元。

**基金项目** 陕西省社会发展攻关项目(2013K13-04-04); 科技部社会公益项目(GYHY201306006)。

**作者简介** 张雅斌(1976-), 男, 陕西宝鸡人, 高级工程师, 博士, 从事天气预报、信号与信息处理技术研究。

**收稿日期** 2013-10-16

### 1.2 2011年7月28~30日暴雨过程

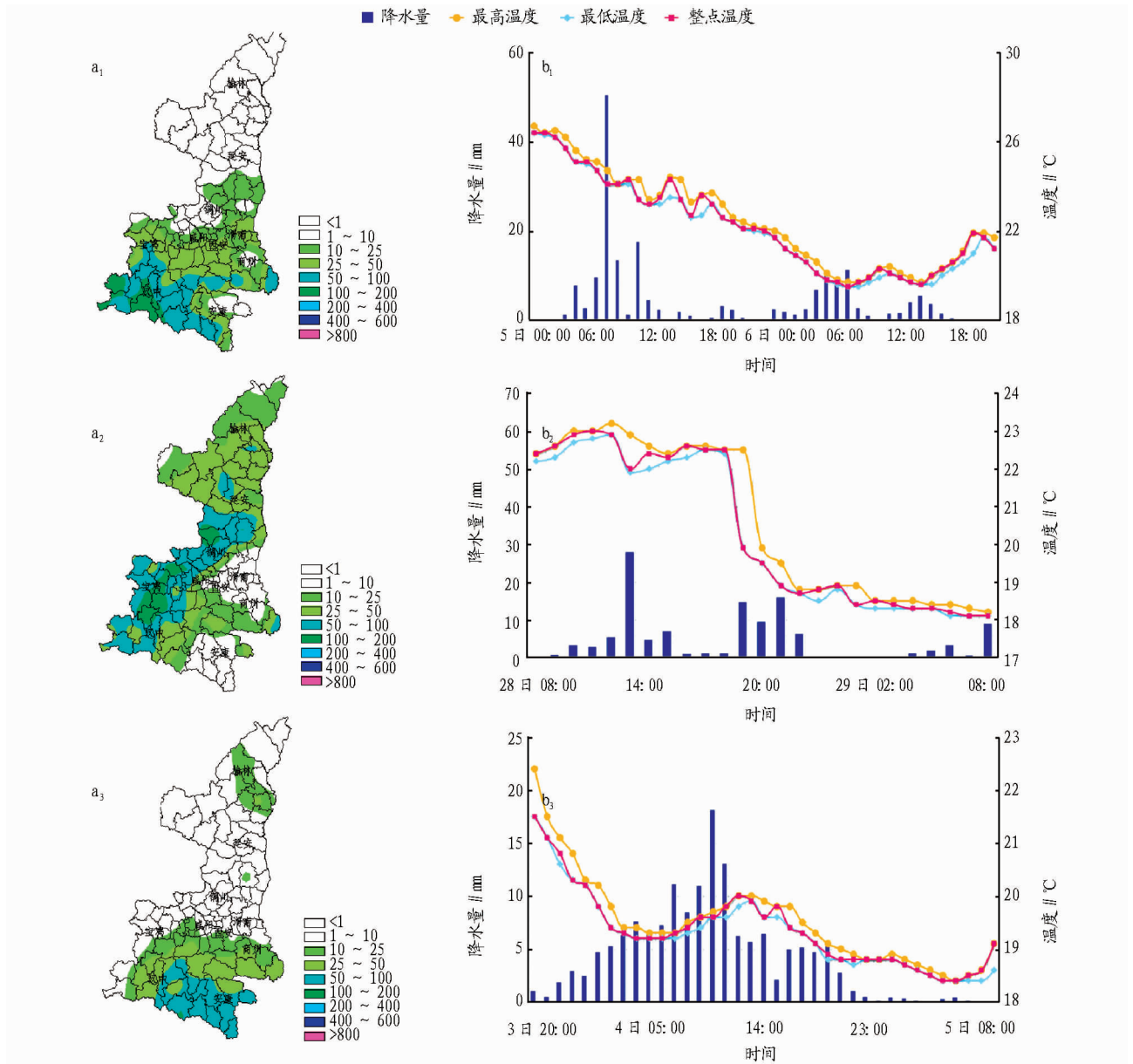
**1.2.1 实况。**7月28~30日,陕西省部分地方出现暴雨天气过程,强降水落区位于榆林南部、延安、铜川、宝鸡、咸阳和汉中地区(图1a<sub>2</sub>)。此次过程范围广、强度大、过程雨量大,全省共出现65站(次)和18站(次)雨强>10和>20 mm/s的短时暴雨。7月28日08:00~29日08:00,宜君、耀州、铜川、陈仓、陇县、宝鸡、岐山、太白、麟游、凤翔、凤县、乾县、旬邑、淳化、永寿、杨凌、长武、彬县、洛川、黄龙、安塞、富县、黄陵、延安出现暴雨,留坝出现大暴雨(120.8 mm)。29日08:00~30日08:00,全省共出现7站大雨。过程期间,最强降水时段出现在28日晚间至29日上午(图1b<sub>2</sub>)。

**1.2.2 灾情。**暴雨过程期间,截至7月29日18:00,延安、宝鸡、汉中、铜川等市县和乡镇因暴雨造成12425人受灾,紧

急安置转移2384人,农作物受灾面积820.14 hm<sup>2</sup>,大牲畜死亡7头;房屋受损655间,倒塌62间;堰渠受损7980 m,河堤受损1160 m,自来水管受受损6925 m,塘库受损2处;道路受损35270 m,桥涵受损8座,道路塌方43处14600 m<sup>3</sup>;电力通信倒杆81根,电线损毁4050 m;暴雨还造成城市内涝和部分县乡镇停电,直接经济损失7693.6万元。

### 1.3 2011年8月4~6日暴雨过程

**1.3.1 实况。**8月4~6日,陕西省中南部出现暴雨天气过程,强降水落区位于陕南汉中和安康地区(图1a<sub>3</sub>),全省共出现6站(次)雨强>10 mm/s的短时暴雨。4日08:00~5日08:00,镇巴、洋县、佛坪、岚皋、镇坪、安康、汉阴、平利、石泉、紫阳出现暴雨。强降水主要出现在3日夜间到4日白天,共有300个乡镇过程雨量超过50.0 mm,有63个乡镇过程雨



注:a<sub>1</sub>为7月3~6日,b<sub>1</sub>为南郑站5日00:00~6日20:00;a<sub>2</sub>为7月28~30日,b<sub>2</sub>为留坝站28日08:00~29日08:00;a<sub>3</sub>为8月4~6日,b<sub>3</sub>为镇巴站3日20:00~5日08:00。

图1 2011年陕西3次暴雨过程雨量分布(a)和降水中心逐小时雨强演变(b)

量超过 100.0 mm,其中汉中镇巴观音站雨量为 215.3 mm(图 1b<sub>3</sub>)。

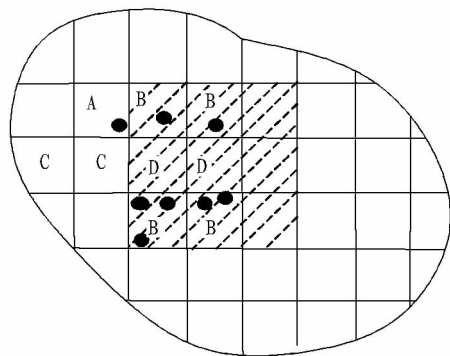
**1.3.2 灾情。**暴雨过程期间,汉中市城固县罗儿湾水库坝体滑塌 1 000 余方,导致溢洪道堵塞无法正常泄洪,镇巴县和西乡县出现多处农田冲毁和房屋倒塌,滑坡 26 处,公路塌方 250 m,安康市紫阳县公路塌方 70 230 m<sup>3</sup>,房屋倒塌 219 间,冲毁河堤 4 310 m,紧急转移安置群众 10 712 人,农作物受灾 1 107.0 hm<sup>2</sup>,207 省道岚皋境内塌方 1 处,转移安置 1 139 人,108 国道水毁路段新增塌方 3 000 余方。

## 2 流域总降水和灾情定量估计

**2.1 基于雷达和自动站资料的总降水高分辨估计** 流域面雨量是中小河流洪水和地质灾害预警和风险评估的基础。一定流域内,人迹难至的偏远地区由于较难安装或不便维护观测仪器而导致雨量监测存在盲区或数据质量不高,虽然这些地区降水不像平原城市一样对社会生产带来直接影响,但对下游水情和防汛决策至关重要。因此,联合使用雷达和自动站高分辨观测资料是进行流域总降水精细化估计的有效手段。陕西省目前有 6 部多普勒天气雷达,每部雷达 6 min 进行一次半径达 200 km 的体扫,距离分辨率精确到 0.5 km。同时,已经建立的 2 000 多个乡镇自动站空间分辨率已达 10~20 km,每小时一次(加密期间 10 min 一次)的雨量观测使得时间和空间上进行流域内降水的高分辨估计成为可能。下面提出基于雷达和自动站的降水联合估计方法,结合流域网格剖分分类和逐网格累加过程,最终实现流域总降水的实时高分辨估计。

这里,结合图 2 对流域网格剖分和分类(标识为 A、B、C 或 D 类型网格)进行说明<sup>[12]</sup>。如果网格是 A 类,在网格标识信息中写入包含的自动站站号;如果网格是 B 类,在网格标识信息中写入包含的自动站站号,同时写入网格中心上空回波在雷达基数据中对应的存储位置;如果网格是 C 类,在网格标识信息中写入距离网格中心最近或天气特征最相似的邻近(几个)自动站的站号;如果网格是 D 类,在网格标识信息中写入距离网格中心最近或天气特征最相似的邻近(几个)自动站的站号和上空回波在雷达中的存储位置,同时写入网格中心上空回波在雷达基数据中的存储位置。对于 A 类网格,仅需将包含的(多个)自动站逐小时(平均)雨量累加后乘以网格面积即可得到网格面雨量。对于 B 类网格面雨量的计算,一般同 A 类计算,但在自动站关闭或非正常运行期间,需要进一步通过基于雷达和自动站的降水联合估计方法使用雷达资料反演后得到。对于 C 类网格面雨量的计算,需要将邻近的(多个)自动站逐小时(平均)雨量累加后乘以网格面积后近似得到。对于 D 类网格面雨量的计算,需要以基于雷达和自动站的降水联合估计方法得到。在此,首先对联合估计方法进行介绍,然后通过实测数据对其性能进行检验分析。记某自动站降水序列为  $R(n)$ ,邻近雷达测得的自动气象站上空基本反射率序列为  $Z(n)$ ,二者之间满足幂指数关系  $Z = aR^b$ ,式中, $a$ 、 $b$  称为雷达降水反演系数,单位分别为  $\text{mm}^6/\text{m}^3$  和  $\text{mm}/\text{h}$ 。实际应用中,降水反演系数根据不同地区、不同季节采用最优拟合方法确定,一般取值为

300、1.4,热带地区常取值为 250、1.2<sup>[13]</sup>。假设某一地点  $O$ (无法直接由雨量计观测得到降水)对应的基本反射率序列为  $Z_o(n)$ ,同一时段距离该地区最近的  $I$  个自动站(选取标准除考虑距离因素外,还要注意地理气候的异同)对应的降水序列分别为  $R_1(n), \dots, R_I(n)$ ,对应的基本反射率序列分别为  $Z_1(n), \dots, Z_I(n)$ ,自动站到地点  $O$  的距离分别为  $l_1, \dots, l_I$ 。那么,第  $i$  个自动站与地点  $O$  处的天气(降水过程)相似性大小可以近似通过归一化因子表示为  $r_i = 1 - l_i / \sum l_i$ ,可见距离越小,相似性越强,当二者重合时数值为 1,表示自身与自身之间是相同的(完全相似的)。使用临近若干小时雷达和自动站观测数据,由雷达降水反演关系式  $Z = aR^b$ ,结合最小二乘法得到第  $i$  个自动站所处区域雷达降水反演系数  $\{a_i, b_i\}$  的估计值为:  $\{\hat{a}_i, \hat{b}_i\} = \arg \min_{a_i, b_i} \sum_{n=1}^N \|Z_i(n) - a_i R_i(n)^{b_i}\|^2$ ,其中, $n$  表示小时序号, $N$  表示使用前  $N$  小时的数据。由于回波基本反射率每 6 min 采样 1 次,而降水每 1 h 采用 1 次,因此需要先对降水线性插值得到扫描时刻的雨强之后再带入上式进行估计。至此,要得到地点  $O$  处的降水逐小时演变,仅需通过公式  $\{\hat{a}_o, \hat{b}_o\} = \{\sum_{i=1}^I r_i \hat{a}_i, \sum_{i=1}^I r_i \hat{b}_i\}$  估计出该地区雷达降水反演系数即可。



注:图中正方形网格表示剖分单元,黑点表示自动站,斜线表示对应区域有雷达回波数据。标识 A 表示网格内包含自动站但无雷达回波数据,标识 B 表示网格内既包含自动站也包含雷达回波,标识 C 表示该网格内既无自动站也无雷达回波数据,标识 D 表示该网格只有某一雷达测得的回波。

图 2 流域网格剖分与分类示意

由于天气系统在一定时间和空间内具有连续性变化特征,以上参数估计和降水反演过程中,使用数据样本在时间上不断滑动更新,在空间上随网格位置变化,能够有效地反映待估单元内降水与雷达回波的动态变化的幂指数关系,因此,联合估计方法要优于固定参数的常规估计方法。同时,相对于预先给定强度阈值在回波低值区和高值区基于最小误差目标函数分别统计确立两组不同  $Z-I$  关系的分段最优法,联合估计方法相当于动态“自适应”地建立多组优化关系。

从 2011 年 7 月 5~6 日暴雨过程期间南郑县新集站(106.8°E,33.0°N)的降水逐小时演变(图 3a)可以看出,新集站既有超过 20.0 mm/h 的短时暴雨(最大雨强达 48.1 mm/h),又有 10.0 mm/h 以下的一般性降水(最小雨强仅 0.1 mm/h),由于降水强度变化具有代表性,因此选取新集站 5

日 03:00~6 日 02:00(24 h 内降水量 238.0 mm, 达大暴雨标准)的降水实况、汉中雷达和邻近自动站观测数据估计对联合估计方法有效性进行验证,并给出与分段最优方法的结果比较。其中,分段最优法采用公式  $Z = aR^b$  以 35 dBz 阈值为界进行回波分段降水反演,低值区和高值区分别选取参数  $a = 101$ 、 $b = 1.6$ 、 $a = 39$ 、 $b = 1.8$ ;联合估计方法中降水估计参数由邻近的南郑(106.9°E、33.0°N)和黄官(106.8°E、32.9°N)2 个自动站和测站上空汉中雷达站观测回波计算得到,雨强每 6 min 进行一次更新估计,最后通过对 10 个估计样本进行平均后得到对应时段的雨强。由图 3b 可见,前 7 h 降水明显,达到了短时暴雨标准,分段最优法的估计误差基本上为负

值,存在一定程度的低估(平均低估 6.4 mm);从第 7 小时以后降水明显减弱(每小时雨量基本在 5 mm 以下),分段最优法对应误差基本均为正值,整体上存在明显的高估(平均高估 1.5 mm)。前 7 h 内,联合估计法既存在低估也存在高估,低估和高估最大幅度分别为 5.8 和 3.5 mm;但在第 7 小时以后的降水明显减弱时段内,并无系统性的偏高或偏低误差,估计误差相对较小(绝对误差平均为 1.2 mm);整个时间段内 2 种方法的平均绝对误差分别为 2.4、1.9 mm。以上新集站实测数据验证结果表明,联合估计方法的降水估计误差小于分段最优估计方法,由此得到的流域总降水估计将更接近真实情况。

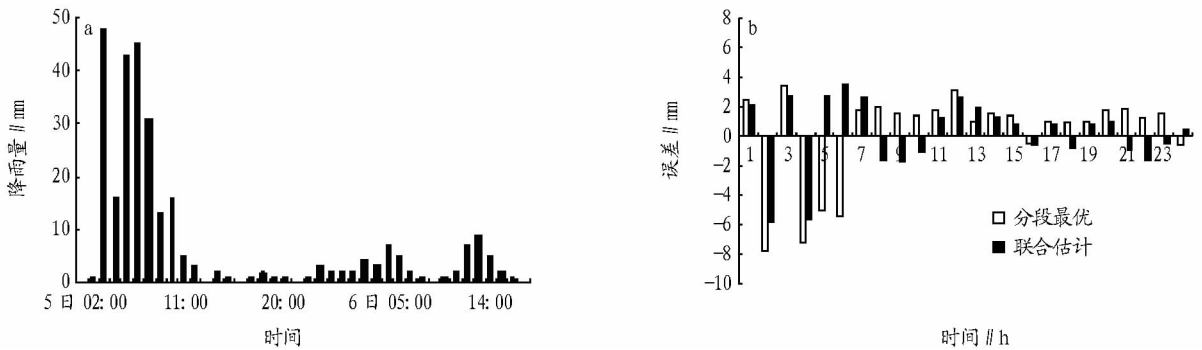


图 3 新集镇 2011 年 7 月 5~6 日逐小时降水实况(a)和基于雷达回波的逐小时降水估计误差(b)

**2.2 灾情定量估计** 灾害损失评估在考虑受灾人数、死亡人数和紧急转移安置人数(表征人数受灾程度)、农作物受灾面积和绝收面积(表征农作物受灾情况)、倒塌房屋间数和损坏房屋间数(表征房屋受损程度)、直接经济损失(表征灾害总体损失)统计分析基础上,通过构建相对指标来综合反映灾害的强度和社会经济影响程度<sup>[14]</sup>,相对指标主要包括灾害影响人数比(受灾人数/年末总人数)、因灾死亡人数比(死亡人数/当年受灾人数)、紧急转移安置人数比(紧急转移安置人数/当年受灾人数)、农作物受灾比(农作物受灾面积/当年农作物播种面积)、农作物绝收比(农作物绝收面积/当年农作物受灾面积)、房屋倒塌比(房屋倒塌间数/损坏房屋间数)、直接经济损失比(直接经济损失/当年 GDP 或财政收入)。基于上述受灾程度相对指标定义,借鉴赵飞等给出的台风灾情指数计算方法<sup>[15]</sup>,由公式  $\sum_{i=1}^I (\lg X_i + 4)$  计算某一地区暴雨灾情指数,其中  $X_i$  表示第  $i$  个相对指标量, $I$  表示选取的相对指标总个数。

文中 3 次暴雨过程灾情分析计算涉及的各行政区内社会、经济与农业数据取自《陕西统计年鉴—2011》,相对指标选取资料完整性和代表性较好的灾害影响人数比、因灾死亡人数比、农作物受灾比和直接经济损失比。4 个因子参与暴雨灾情指数计算,统计表明,2011 年陕西省 10 地市 GDP(亿元)、人口(万人)和农作物播种面积(万  $\text{hm}^2$ )分别为:西安(3 864.2、864、38.2)、榆林(2 292.3、335、46.6)、咸阳(1 359.1、489、39.9)、宝鸡(1 175.8、372、33.5)、延安(1 113.4、219、19.6)、渭南(1 029.0、528、53.8)、汉中(647.5、341、26.7)、安康(407.2、263、26.8)、商洛(362.9、234、13.7)、

铜川(234.5、83、6.3)。

### 3 暴雨灾害风险评估分析

#### 3.1 灾情定量分析

**3.1.1 灾情指数变化。**从 2011 年 3 次暴雨过程期间相关地市灾情指数计算结果(表 1)可以看出,汉中地区在 3 次暴雨过程期间灾情指数最大,均超过 0.20;安康地区除第 2 次暴雨过程灾情指数较小外,其余 2 次均超过了 0.15;商洛地区前 2 次暴雨过程均存在一定程度的灾害损失,灾情指数分别为 0.05 和 0.03;宝鸡、铜川和延安地区在第 2 次暴雨过程中均存在不同程度的损失,灾情指数分别为 0.07、0.03 和 0.01。

表 1 2011 年陕西 3 次暴雨过程相关地区灾情指数

站点	7 月 3~6 日	7 月 28~30 日	8 月 4~6 日
延安	0	0.01	0
铜川	0	0.03	0
宝鸡	0.02	0.07	0
汉中	0.30	0.24	0.21
安康	0.19	0.06	0.15
商洛	0.05	0.03	0

**3.1.2 水文站流量变化。**由 2011 年 6 月 16 日~8 月 16 日陕西省境内汉江和渭河的汉中、咸阳和华县 3 个水文站流量逐日变化(图 4)可见,3 次暴雨期间,汉中水文站观测峰值流量分别为 2 450、1 070、813  $\text{m}^3/\text{s}$ ,咸阳水文站观测峰值流量分别为 346、664、523  $\text{m}^3/\text{s}$ 。7 月 3~6 日陕南暴雨引起汉中水文站流量在 6~7 日达到极大值,流量明显高于其他时段,时间上与流域内强降水时段之间存在 1~2 d 的滞后;7 月 28~30 日暴雨过程引起汉中、咸阳和华县 3 个水文站流量在 7 月

29日~8月2日出现明显波动增大,各水文站峰值流量均突破 $800\text{ m}^3/\text{s}$ ;8月4~6日暴雨过程也引起3个水文站流量出现不同程度的增大。分析3次暴雨过程气象、水文资料可以看出,7月28~30日暴雨过程对应的3个水文站流量峰值持续时间相对较长,这与此次降水中心空间上相对分散,时间上相对其他2次过程存在多个雨强峰值的特点有关(图1b)。水文站前期流量峰值与水文站邻近区域内降水的汇流

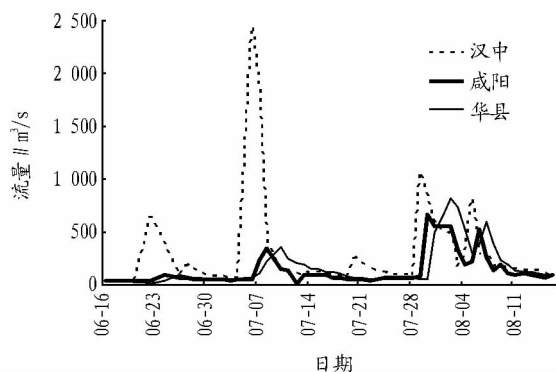


图4 2011年6月16日~8月16日水文站流量逐日变化

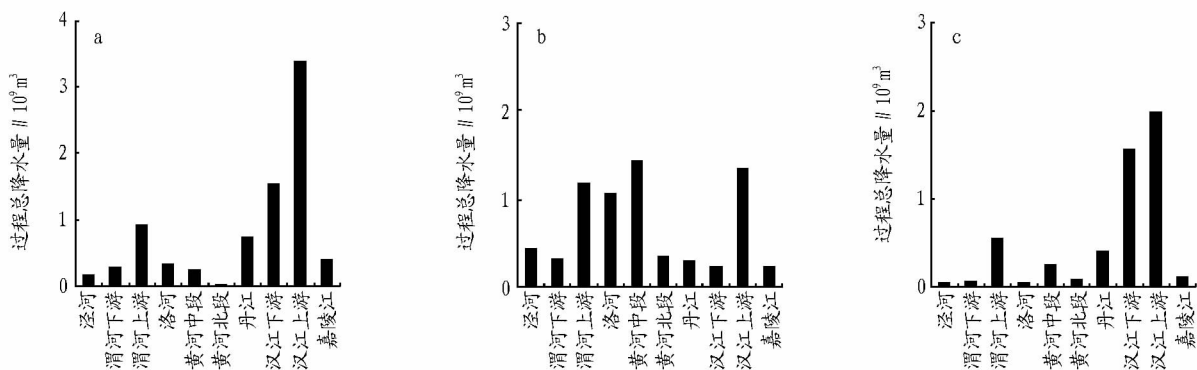


图5 2011年7月3~6日(a)、28~30日(b)和8月4~6日(c)暴雨过程10个流域总降水估计

**3.3 灾害风险评估** 暴雨期间,各个流域总降水一部分将参与植物灌层和土壤地面的吸收和下渗过程,另一部分将参与地表径流过程,并在一定地质条件下产生地面塌陷、山洪泥石流和洪水等次生灾害。对比2011年3次暴雨过程相关地区灾情定量分析与总降水估计结果,结合降水与水文观测的时间演变分析可以看出,3次暴雨过程期间,汉中地区灾害严重,灾情指数平均达0.25,明显高于其他地区,这与汉江上游降水明显、流域总降水大直接相关;比较第1和第3次暴雨过程,汉江下游流域总降水估计量值相当(均超过了 $1.5 \times 10^9\text{ m}^3$ ),但灾害程度明显不同(灾情指数分别为0.19和0.15),这与汉江上游降水差异明显有间接关系,第1次过程期间上游总降水超过了 $3.0 \times 10^9\text{ m}^3$ ,第3次过程期间上游总降水仅 $2.0 \times 10^9\text{ m}^3$ 左右。上述分析表明,汉江上游流域是陕南灾害预警防控的重点地区,该流域内过程总降水明显增大是引发陕南多种次生灾害的主要因素;汉江上游和汉江下游流域同时出现较大总降水时,由于上游强降水对下游山洪等灾害的重叠加重效应和下游水情对上游自然排洪能力的影响,汉江流域灾情从程度、范围和频次上会有所增加。

直接相关,而后期流量峰值主要与上游、周边区域内降水的间接影响有关。

**3.2 总降水估计** 根据地域分布特征,陕西省内共划分为10个流域<sup>[16]</sup>,针对2011年7月3~6、28~30日和8月4~6日暴雨过程,这里以直径8 km的正方网格分别对这些流域进行空间剖分,各流域包含网格总数分别为:渭河上游流域(352)、渭河下游流域(222)、泾河流域(126)、洛河流域(486)、黄河中段流域(640)、黄河北段流域(226)、嘉陵江流域(65)、汉江上游流域(423)、汉江下游流域(417)、丹江流域(262)。从经过每小时逐网格雨量联合估计和空间累加计算得到的3次暴雨过程10个流域总降水估计结果(图5)可以看出,3次过程汉江上游流域均出现了较大的总降水,其中,第1次过程最大,达 $3.4 \times 10^9\text{ m}^3$ ,第2次过程最小,为 $1.5 \times 10^9\text{ m}^3$ ,第3次过程约 $2.0 \times 10^9\text{ m}^3$ ;同时,第2次过程与其余2次过程雨量空间分布明显不同,除汉江上游出现较大总降水外,洛河、黄河中段和渭河上游流域均出现了 $1.2 \times 10^9\text{ m}^3$ 以上的过程总降水。

第2次暴雨过程期间,渭河上游、黄河中段和洛河流域较大的总降水与延安、铜川、宝鸡地区出现的次生灾害密切相关,对应灾情指数分别为0.01、0.03、0.07;结合水文资料分析表明,当各流域降水量相当、分布较为分散时,要注意相关河流出现的双峰乃至多峰水位,加强洪水与山洪灾害防御;同时,流域次生灾害不仅与过程总降水密切相关,还与降水的时间分布特征相关。第2次暴雨过程中,各流域总降水相对较低(均在 $1.5 \times 10^9\text{ m}^3$ 以下),但出现了65站(次)雨强 $>10\text{ mm/s}$ 的短时暴雨和18站(次)雨强 $>20\text{ mm/s}$ 的短时暴雨,短时强降水频次明显高于其他2次过程,这也是此次过程灾情程度和范围较大因素之一。3次暴雨过程汉江上游流域总降水分别达 $3\ 374 \times 10^9$ 、 $1\ 325 \times 10^9$ 、 $1\ 980 \times 10^9\text{ m}^3$ ,汉中水文站观测峰值流量(时间)分别为 $2\ 450$ (7月6日)、 $1\ 070$ (7月29日)、 $813\text{ m}^3/\text{s}$ (8月5日);渭河上游流域总降水分别达 $916 \times 10^9$ 、 $1185 \times 10^9$ 、 $554 \times 10^9\text{ m}^3$ ,咸阳水文站观测峰值流量(时间)分别为 $346$ (7月8日)、 $664$ (7月30日)、 $523\text{ m}^3/\text{s}$ (8月6日)。由此可见,第1与第2次暴雨过

(下转第12689页)

数据带入公式(18)。

表1 串联复合式热载体加热装置检测报告

采样时段	采样时间	下炉体出口热载体温度//℃	上炉体入口热载体温度//℃	热载体流速//kg/s	20 min 热载体流量//kg	20 min 秸秆用量//kg	20 min 燃气消耗量//m <sup>3</sup>	20 min 燃气总热量//MJ
1	9:10	552	211	0.833	1 000	49.43	98.86	454.76
	9:20	555	214	0.833				
	9:30	556	219	0.833				
2	13:30	554	213	0.833	1 000	49.32	98.63	453.71
	13:40	560	220	0.833				
	13:50	558	218	0.833				
3	15:10	550	211	0.833	1 000	49.24	98.47	452.96
	15:20	553	214	0.833				
	15:30	548	209	0.833				

第1组: $Q_{\text{热载体吸热1}} = 340.75 \text{ MJ}$ ,  $\eta_1 = 74.93\%$ 。

第2组: $Q_{\text{热载体吸热2}} = 341.42 \text{ MJ}$ ,  $\eta_2 = 75.25\%$ 。

第3组: $Q_{\text{热载体吸热3}} = 340.08 \text{ MJ}$ ,  $\eta_3 = 75.08\%$ 。

将数据带入公式(17),串联复合式热载体加热装置平均热能利用率为 $\bar{\eta} = 75.09\%$ 。

通过计算可知,串联复合式热载体加热装置热能利用率可以达到75.25%,平均热能利用率为75.09%,满足生物质热解制油工艺要求。

## 5 结论

热载体加热有多种方式,热载体加热装置的合理设计决

定了生物质热解制油工艺的实施。该研究的设计是将热载体的两种不同加热方式串联复合使用,以期提高装置的热能利用率,有利于实现生物质热解制油规模化生产。

## 参考文献

- [1] 汪军. 工程燃烧学[M]. 北京:中国电力出版社,2008:50-73.
- [2] 刘联胜. 燃烧理论与技术[M]. 北京:化学工业出版社,2008:86.
- [3] 袁振宏,吴创之,马隆龙. 生物质能利用原理与技术[M]. 北京:化学工业出版社,2005:175.
- [4] 赵明泉. 锅炉结构与设计[M]. 北京:化学工业出版社,1998:217-223.
- [5] 陈敏恒,丛德滋,方图南,等. 化工原理[M]. 北京:化学工业出版社,2000:263-271.

(上接第12655页)

程对应的流域总降水与水文站峰值流量大小有较好的相关关系,峰值流量在强降水开始1~2 d后出现,而第3次暴雨过程期间总降水与流量大小的相关性不明显。因此,流域总降水是水文站流量趋势预测的有效参数,但要进行更精细的流量预测,还需要在高分辨降水估计基础上对流域做进一步的划分和降水空时分布分型研究。

## 4 结论

(1)2011年西安世园会陕西3次暴雨过程期间,流域总降水估计与影响地区灾害风险定量分析表明,汉中地区灾情明显严重于其他地区,这与汉江上游降水明显、流域总降水大直接相关。汉江上游流域是陕南灾害预警防控的重点地区,流域内过程总降水明显增大是引发陕南多种次生灾害的主要因素。汉江上游和汉江下游流域同时出现较大总降水时,由于上游强降水对下游山洪等灾害的重叠效应和下游水情对上游自然排洪能力的影响,汉江流域灾情将会有所加重。

(2)短时强降水频次明显增加时灾情风险随之增大,降水随时间的不均匀性和突发性也是引发灾害的重要因素。暴雨灾害要从过程总降水和降水时间分布2个方面出发进行分析评估。

(3)基于雷达和气象自动站高分辨资料的降水联合估计方法依据天气系统的时空连续性,利用邻近降水实况信息自适应地调节待估网格单元的降水反演参数,估计性能优于常系数和分段最优方法。结合空间网格划分,高分辨资料降水

联合估计得到的流域总降水是相关地区水文流量趋势预测的有效参数。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 陈守煜,李庆国,李敏. 基于模糊优选神经网络与GIS结合的流域面雨量预测方法[J]. 北京工业大学学报,2009,35(2):163-166.
- [5] 张雅斌,杜继稳,蔡蕊,等. 陕西省精细化地质灾害气象预报预警研究[J]. 灾害学,2011,26(3):28-34.
- [6] 陆桂华,吴娟,吴志勇. 水文集合预报试验及其研究进展[J]. 水科学进展,2012,23(5):728-732.
- [7] 刘家福,梁雨华,马国斌. 基于GIS的淮河流域洪水灾害综合风险评价[J]. 安徽农业科学,2010,38(5):2510-2511.
- [8] 徐晶,姚学祥. 流域面雨量估算技术综述[J]. 气象,2007,33(7):15-20.
- [9] 王志,赵琳娜,张国平,等. 汶川地震灾区堰塞湖流域面雨量计算方法研究[J]. 气象,2010,36(6):7-12.
- [10] 姚燕飞,程明虎,杨洪平,等. 优化ZI关系及其在淮河流域面雨量测量中的应用[J]. 气象,2007,33(6):37-43.
- [11] 祝新建,臧新洲. 河南省获嘉县气象灾害风险评估系统研究[J]. 安徽农业科学,2012,40(26):12873-12875.
- [12] 张雅斌. 基于加密探测资料的流域面雨量估计与水情预测方法研究[C]//第28届中国气象学会年会. 厦门,2011.
- [13] 俞小鼎,姚秀萍,熊延南,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.
- [14] 袁艺,王玉玲. 近30年我国自然灾害灾情时间分布特征分析[J]. 灾害学,2011,26(3):61-64.
- [15] 赵飞,廖永丰,张妮娜,等. 登陆中国台风灾害损失评估模型研究[J]. 灾害学,2011,26(2):81-85.
- [16] 李良序,罗慧. 陕西省气象暨2011西安世界园艺博览会气象服务评估报告[M]. 北京:气象出版社,2012:84-86.