

对国家级渍涝风险气象预报预警业务模型的优化与改进

包红军^{1, 2} 王莉莉¹ 梁莉²

(1 国家气象中心, 中国气象局, 北京 100081; 2 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081)

摘要: 目前的国家级渍涝风险气象预报预警业务是以VIC (Variable Infiltration Capacity) 水文模型与渍涝发布标准为技术基础制作发布的。基于USGS提供的30"分辨率的DEM订正流域数字水系, 基于流域物理特征建立Mukingum-Cunge汇流模型的参数自动优选方案, 利用虚拟线性水库技术解决西部高海拔地区误报情况, 基于ECMWF细网格预报实现未来72小时的渍涝风险气象预报预警, 以提高渍涝风险气象预报预警模型精度与预见期。以2014年3月与5月珠江流域两次强降水引发渍涝为试验个例进行验证, 改进的模型预报预警效果好于原业务模型。

关键词: 渍涝风险气象预报预警, 数字水系, 参数自动优选, 线性水库, 珠江流域

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.02.007

Optimization and Improvement of Water Logging & Water Logged Risk Meteorological Forecast and Warning Operational Technology of China

Bao Hongjun^{1, 2}, Wang Lili¹, Liang Li²

(1 National Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081
2 CMA Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081)

Abstract: National meteorological operation of water logging & water logged meteorological forecast and warning is based on VIC (Variable Infiltration Capacity) hydrological model and its release criteria. In this study, digital watershed is corrected with high resolution DEM data of USGS, Mukingum-Cunge routing model automatic parameters optimization is based on watershed physical characteristic linear reservoir method, and virtual linear reservoir method is used to correct the false alarm cases in high altitude of China West. In order to increase alarm lead time, the high resolution 72 hours forecasts of ECMWF are applied for water logging & water logged meteorological forecast and warning operational service. Taking the water logging & water logged event of the Pearl River in Mar.28 to 31, 2014 as the test case, the result shows the improved model performs better than the original model.

Keywords: water logging & water logged risk meteorological forecast and warning, digital watershed, automatic parameters optimization, linear reservoir, the Pearl River

0 引言

降水引起的渍涝是一种气象灾害, 是由降水过多导致土壤过度浸泡、地面受淹而造成的一种自然灾害^[1-4]。渍强调由于地面径流、排水和土壤透水能力

不足, 使土壤过度浸泡, 植物根部有毒气体聚集、营养成分减少、缺氧, 而导致植物的损害; 涝强调地面受淹导致的直接灾害, 包括城市渍(内)涝和农田渍涝。渍涝灾害还引起土壤盐碱化、土壤结构退化、水污染和疫病等一系列问题。

国内外渍涝预报主要依赖于流域水文水动力学模型的应用^[5-14]。例如, 美国针对城市渍涝(内涝), 采用基于动态降雨径流的城市暴雨雨水管理模式(Storm Water Management Model, SWMM)的预报思路^[15-21]; 在国内, 天津市气象局基于水动力学模型进行城市渍涝(内涝)径流过程模拟^[22], 辽宁省采用基于SCS曲线与汇流模型的降雨径流预报方案进行渍涝预报^[23-24]。

收稿日期: 2014年7月16日; 修回日期: 2014年9月2日
第一作者: 包红军(1980—), Email: baohongjun@cma.gov.cn
资助信息: 中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2014M72); 国家自然科学基金项目(41105068); 中国气象局首届青年英才计划(2014—2017); 中国气象局公共气象服务中心2012年青年英才计划项目“流域洪涝临界雨量阈值确定技术研究”; 中国气象局公共气象服务中心业务基金项目(M2014006)

2005年,中央气象台建立了全国渍涝风险气象预报预警业务,并于2006年7月5日正式对公众发布“渍涝风险气象预报预警”的气象服务产品。目前,渍涝风险气象预报预警业务已经成为中国气象局最重要的水文气象业务之一。

国家级渍涝风险气象预报预警业务模型是以VIC-3L水文模型^[25]与渍涝发布标准为技术基础进行制作发布的。以VIC-3L水文模型实时预报的全国 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 网格点上的径流深度和三层土壤湿度作为渍涝风险气象预报预警发布标准的依据,分一至五级(发生渍涝风险等级的很低、低、较高、高、很高)进行产品的制作与发布。经过近十年的业务发展,渍涝风险气象预报预警模型在预报服务方面仍存在问题:

(1)模型使用的流域水系拓扑结构与实际的水系有一定的偏差;(2)汇流模型参数需要重新率定以适应流域下垫面变化;(3)模型在西部高原地区难于考虑凹地对径流的影响,致使预报预警常于误报。

本研究基于USGS提供的 $30''\times 30''$ 分辨率的DEM订正流域数字水系,基于流域物理特征建立Muskingum-Cunge汇流模型的参数自动优选方案,利用虚拟线性水库技术解决西部高海拔地区误报情况,基于ECMWF细网格预报实现未来72h的渍涝风险气象预报预警,以提高渍涝风险气象预报预警模型精度与预见期。

1 对国家级渍涝风险气象预报预警业务模型的改进

1.1 国家级渍涝风险气象预报预警技术

1.1.1 渍涝业务中使用的VIC-3L模型概述

VIC(可变下渗能力)水文模型是一个基于空间

分布(网格化)的分布式水文模型,参数的网格化特性便于与气候模式和水资源模型嵌套以评价气候变化对水资源的影响。VIC模型最初由Wood等^[26]根据一层土壤变化的入渗能力提出,Liang等^[27]在此基础上将其发展为两层土壤的VIC-2L模型,在一个计算网格内分别考虑裸土及不同的植被覆盖类型,并同时考虑陆一气间水分收支和能量收支过程;后来模型中又增加了一个10cm左右的薄土层,变成三层土壤的VIC-3L模型。Liang等^[28-29]最近发展了其地表径流机制,同时考虑了蓄满产流和超渗产流机制以及土壤性质的次网格非均匀性对产流的影响,并将地下水位的动态表示问题归结为运动边界问题,利用有限元集中质量法数值计算方案,建立了地下水位的动态表示并用于VIC-3L。

VIC模型将发生在地一气界面占主导的水文过程参数化,计算每个网格内植被和土壤结构的水汽通量、热通量等传输过程。

1.1.2 渍涝风险气象预报预警等级发布标准

以VIC-3L水文模型实时预报的全国 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 网格点上的径流深度和三层土壤湿度作为全国渍涝风险气象预报预警发布标准的依据,分一至五级(发生渍涝风险等级的很低、低、较高、高、很高)进行产品的制作与发布(表1)。

1.2 渍涝风险气象预报预警技术的改进

1.2.1 基于精细化DEM技术的流域数字水系订正

在大尺度陆面水文模型中,GIS技术是一个重要的技术支撑平台,DEM是构成GIS的基础数据,利用DEM可以提取流域的重要水文特征参数,如坡度、坡向、水沙运移方向、汇流网络、流域界线等。对于大尺度汇流模型来说,由于空间尺度大,很少有详尽的

表1 渍涝风险气象预报预警发布标准

| 级别 | 名称 | 发布标准 | 物理意义 | 风险等级计算标准 |
|----|------|-------------|---|--|
| 1 | 无影响 | 发生渍涝风险的等级很低 | 降水强度小、持续时间短,土壤湿润 | JLL=0mm |
| 2 | 轻度渍害 | 发生渍涝风险的等级低 | 土壤水分大于田间持水量,开始补给地下水(或形成土壤上层滞水),无地表径流 | TS1=50%~100% TS2=45%~85% TS3=20%~50% R0>10mm, R5>25mm |
| 3 | 严重渍害 | 发生渍涝风险的等级较高 | 逐步抬高地下水位直至地表(土壤饱和),并填满耕地面所有坑洼(地表残积水),有小的地表径流 | JLL=0~10mm TS1=70%~100% TS2=55%~100% TS3=20%~100% R0>25mm, R5>50mm |
| 4 | 轻度涝灾 | 发生渍涝风险的等级高 | 当降雨强度大于土壤入渗速度,能产生更大的地表径流,一般称其为超渗产流 | JLL=10~20mm TS1=70%~100% TS2=50%~70% TS3=20%~50% R0>50mm, R5>100mm |
| 5 | 严重涝灾 | 发生渍涝风险的等级很高 | 径流量大,就会冲刷土壤,冲毁作物,形成水土流失;沟河顶托冒溢,淹没低洼耕地,使作物减产、绝产且破坏耕地 | JLL=20mm以上 TS1=70%~100% TS2=50%~100% TS3=20%~100% R0>100mm, R5>200mm |

注:JLL为径流量,TS1为第一层土壤湿度,TS2为第二层土壤湿度,TS3为第三层土壤湿度,R0为24h预报降水量,R5为过去5日累积降水量。

资料, 因此从DEM提取得到汇流网络在目前看来可以说是进行流域汇流的必要途径^[30-31]。

在本业务中, 从大尺度陆面水文模型尺度出发, 仅考虑网格DEM高程数据。这种方法由于所采用的DEM数据只代表了网格中心点高程或网格平均高程, 因此所提取的河网往往与实际差别较大, 主要集中在河网不连续、DEM中洼地的处理以及平坦区平行河网的处理等方面。比如, 业务应用的珠江流域数字水系图(图1a)。

因此, 需要考虑所有可利用的地理信息, 特别是精细化的DEM数据提取河网。这样所得的河网精确度较高, 但往往需要耗费大量计算资源, 同时也要求很详尽的地理信息资料。本次研究基于USGS提供的30"×30"分辨率的DEM数据订正流域数字水系, 以保证水系河网连续, 与实际流域更相近(图1b)。

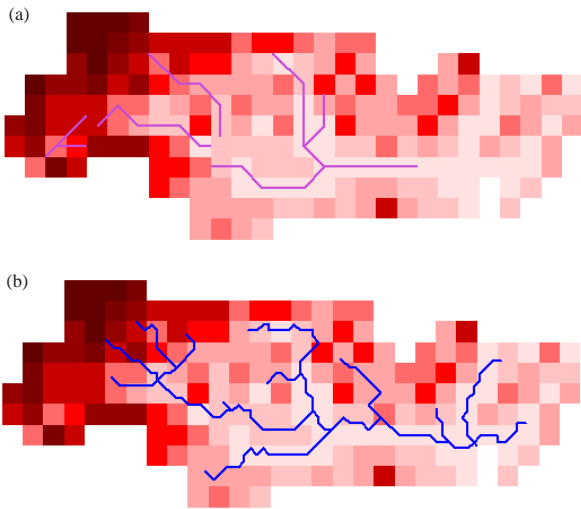


图1 业务使用(a)和订正后(b)的珠江流域数字水系图

1.2.2 渍涝业务中汇流模型的改进

渍涝业务中是采用单位线汇流方法来考虑网格内的坡面汇流, 并认为汇流后的流量沿流域主干河道均匀分布, 然后采用考虑均匀旁侧入流的Muskingum-Cunge进行河道汇流, 最终得到该流域出口网格的径流过程。

汇流模型采用考虑旁侧入流的Muskingum-Cunge方法^[32]进行河道演算。Muskingum-Cunge河道演算中的主要参数包括洪水波在河段长为 Δl 中的传播时间 k 、Muskingum-Cunge法的权重系数 x 。其估算公式如下:

$$k = \frac{\Delta l}{C} \quad (1)$$

$$x = \frac{1}{2} - \frac{D}{C \cdot \Delta l} \quad (2)$$

式中, C 为洪水波波速, D 为洪水波扩散系数, Δl 为河段长度。一般简化认为 $C=1\text{m/s}$, $D=1000\text{m}^2/\text{s}$ 。

实际上, Muskingum-Cunge的参数是河道物理特征相关的^[33]。但在气象部门实际应用中, 由于缺少大量的河道断面资料, 往往采用经验推求 k 和 x 。

k 计算公式为^[34]:

$$k = \frac{\Delta l}{V_w} \quad (3)$$

式中, V_w 为波速。

对于某个抛物线型断面, 波速和断面平均流速的关系如下, 其他如三角断面、矩形断面参见表2所示:

$$V_w = \frac{11}{9} V_{av} \quad (4)$$

表2 不同河道断面形状的波速经验关系

| 河段断面形状 | 曼宁公式 |
|--------|---------------|
| 矩形 | $5/3 V_{av}$ |
| 三角形 | $4/3 V_{av}$ |
| 抛物线形 | $11/9 V_{av}$ |

平均流速 V_{av} 可以由曼宁公式得到:

$$V_{av} = \frac{1}{n} R^{2/3} \sqrt{S} \quad (5)$$

式中, n 为曼宁糙率系数, R 为水力半径; S 为水面比降。可见, 只要能够确定出水力半径 R , 就可以得到断面平均流速。上式可写为

$$AR^{2/3} = \frac{Q_0 n}{\sqrt{S}} \quad (6)$$

式中, A 为过水断面面积。对于参照流量(Reference Discharge) Q_0 的求法, 国内外学者常用的方法为: 对于一场洪水过程, 可取 Q_0 为^[35]:

$$Q_0 = I_b + 0.5(I_p - I_b) \quad (7)$$

式中, Q_0 为参考流量, I_b 为最小流量, I_p 为洪峰流量。

Punmia等^[36]在1981年研究得出在自然流域中湿周与流量的经验关系, 公式如下:

$$P = c \sqrt{Q_0} \quad (8)$$

式中, P 为湿周, c 为系数, 值域在4.71~4.81。宽浅河道时, 可认为湿周 P 等于过水断面的水面宽 W 。抛物线型断面面积可近似按下述公式计算:

$$A = \frac{2yW}{3} \quad (9)$$

式中, y 为水深, W 为水面宽。对于抛物线型断面水力半径可以等于平均水深(表3):

$$R \approx d = \frac{2}{3} y \quad (10)$$

式中, d 为平均水深。

表3 水力半径(R)与水深(y)经验关系

| 断面形状 | 水力半径 |
|------|-----------------|
| 抛物线型 | $\frac{2}{3} y$ |
| 矩形 | y |
| 三角形 | $\frac{1}{2} y$ |

将公式(9)和(8)代入(6)中,可以得到:

$$AR^{2/3} = \left(\frac{2yW}{2}\right) \times \left(\frac{2y}{3}\right)^{2/3} = \frac{Q_0 n}{\sqrt{S}} \quad (11)$$

因为湿周 P 在宽浅河道可以近似的等于水面宽 W ,所以抛物线型断面的水深 y 的推求公式为:

$$y = \left(\frac{Q_0 n}{0.508 P \sqrt{S}}\right)^{3/5} \quad (12)$$

同理,可得到矩形断面的水深 y 的推求公式为:

$$y = \left(\frac{Q_0 n}{P \sqrt{S}}\right)^{3/5} \quad (13)$$

以及三角形断面的水深 y 的推求公式为:

$$y = \left(\frac{Q_0 n}{0.315 P \sqrt{S}}\right)^{3/5} \quad (14)$$

根据表3可得到各种河道断面形状的水力半径 R ,代入公式(4)求得 V_{av} ,同时也得出 V_{av} 是坡度 S 单调增函数,随着 S 的增加而增加。进而根据河段长度由公式(3)确定参数 k 的值。

Muskingum法参数 x 根据1993年Fread^[34]提出的公式来计算:

$$x = \frac{1}{2} - \frac{Q_0}{2SPV_w \Delta L} \quad (15)$$

另外,渍涝业务VIC模型由于空间尺度较大($0.5^\circ \times 0.5^\circ$),致使网格内洼地、凹地等对水流的截流作用无法考虑,常常导致在我国西部高原或者海拔较高地区易出现一定程度的空报现象。本研究中,采用在该流域的网格出流流出网格前,通过一虚拟线性水库调蓄^[37-38]。

1.2.3 基于ECMWF细网格预报的全国渍涝风险气象预报预警

目前的渍涝业务只提供未来24h的全国渍涝风险气象预报预警结果。为了更好地服务于防汛减灾,提高水文气象服务能力,延长渍涝风险气象预报的预见期,本研究采用ECMWF细网格预报($0.5^\circ \times 0.5^\circ$)代替现已经业务停止使用的T213预报,并将预报时效延长至72h。

2 个例验证

2.1 2014年3月28—31日珠江部分流域渍涝

受高空槽和西南气流共同影响,2014年3月28日以来珠江流域中东部出现大范围强降雨过程,3月30日珠江入汛。截至3月31日8时,珠江累积降雨量超过50mm的面积约21.4万 km^2 。其中,黔江、浔江、柳江、桂江下游、贺江、北江中游、东江中游、粤东沿海等地累积降雨量50~100mm,西江下游、北江下游、东江下游、珠江三角洲达100~250mm,较大累积雨量有:广西岑溪市诚谏站261mm、广东龙门县上坪站252mm。受降雨影响,西江支流北流河、长行水发生超警洪水。其中北流河金鸡站3月30日12时水位超警,成为当年珠江首个超警站点。

采用ECMWF细网格预报驱动改进后的渍涝风险气象预报预警模型进行预报预警,预报结果见图2—3。

从上述结果可以看出,改进后的模型能够很好地预报出珠江流域在此次强降水过程出现的流域东部出现农田渍涝,并将预报的预见期延长至72h。根据渍涝风险气象等级为2~3级,与中国气象局决策服务共享平台信息吻合度比原模型更高,原模型预报级别偏低。

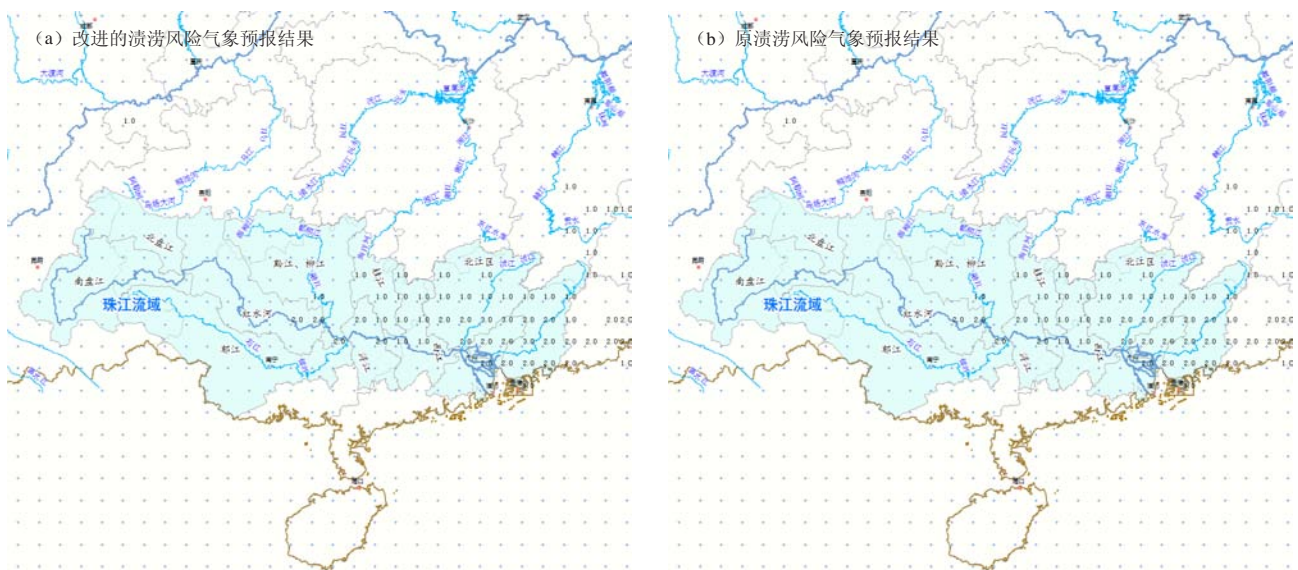


图2 预报时效为24h的渍涝风险预警图(图中数字代表风险级别,后同)

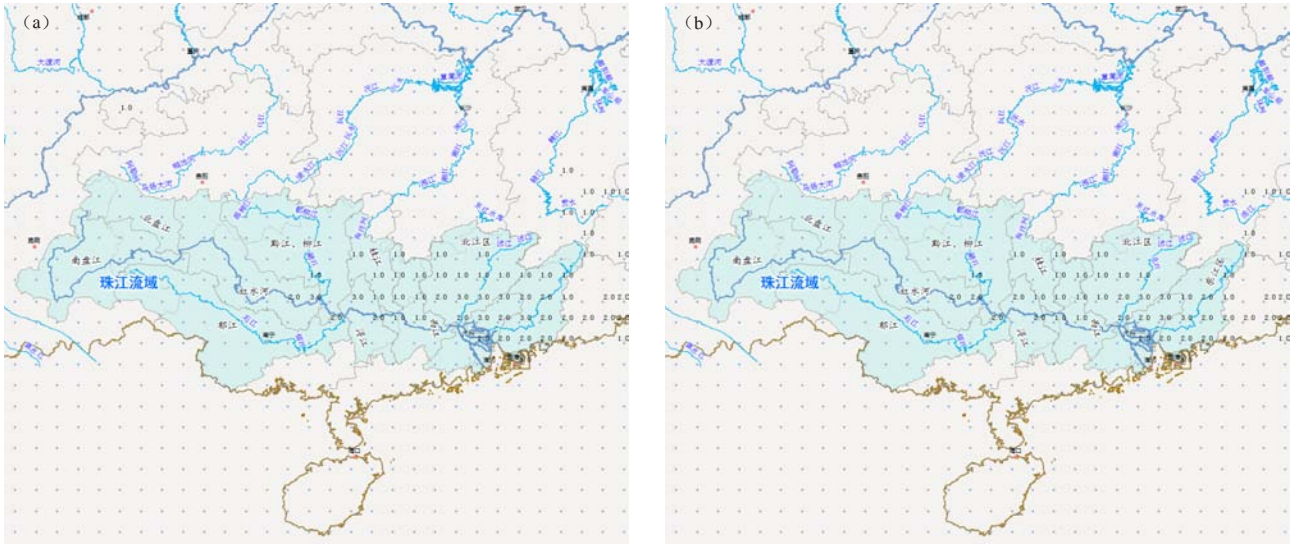


图3 预报时效为48h (a) 和72h (b) 的渍涝风险预警图

2.2 2014年5月8—11日珠江部分流域渍涝

2014年5月8—11日,我国中东部出现强降雨天气过程。其中,安徽西南部、湖北东部、江西中北部、湖南中北部、贵州局地、广西东部、广东西北部和南部降雨100~200mm,广东中部沿海部分地区及湖南、广西东北部局地250~350mm,广东深圳、中山、珠海、江门和阳江局地400~600mm,江门台山市端芬镇达834mm。

据中国气象局灾情直报系统截至5月12前不完全统计,本次降水造成巨大的损失,特别是在珠江流域中东部造成严重的农田渍涝。

采用ECWMF细网格预报驱动改进后的渍涝风险气象预报预警模型进行渍涝风险气象预报预警。预报结果见图4,可以看出,改进后的模型能够很好地预报出珠江流域在此次强降雨过程出现的流域东部出现农田渍涝,并将预报的预见期延长至72h。24h、48h预报时效预报预警,根据渍涝风险气象等级为3~4级,与表4灾情信息吻合度很高;72h预报时效结果由于ECMWF没能准确预报出珠江流域降水,导致该区域72h预报时效渍涝风险气象预报预警出现漏报。

3 结论

降水引发的自然灾害一直是国内外业务与科研部门的研究热点与难点,在防灾减灾工作中占有重要位置。本研究基于30"×30"分辨率的高精度DEM订正流域数字水系,建立Mukingum-Cunge汇流模型参数自动优选方案。为了解决渍涝风险气象预报预警模型在我国西部高海拔地区误报情况,在模型网格径流推求过程中增加虚拟线性水库技术,并将模型的预报时效延

长至72h。选择了2014年珠江流域的个例进行验证,模型很好地提高了渍涝风险气象预报预警模型的精度与预见期的延长。

参考文献

- [1] Bruce J P, Clark R H. Introduction to Hydrometeorology. Oxford: Pergamon Press, 1966.
- [2] Kevin S. Hydrometeorology: forecasting and applications. London, New York: Springer, 2009.
- [3] 矫梅燕. 现代天气业务. 北京: 气象出版社, 2010.
- [4] 胡明思, 骆承政. 中国历史大洪水. 北京: 中国书店, 1992.
- [5] Maidment D R. Hydrology Handbook. New York: McCraw-Hill, 1993.
- [6] Anderson M G, Burt T P. Hydrological Forecasting. New York: John Wiley & Sons, 1985.
- [7] Bao H J, Zhao L N. Development and application of an atmospheric-hydrologic-hydraulic flood forecasting model driven by TIGGE ensemble forecasts. Acta Meteor. Sinica, 2012, 26(1): 93-102.
- [8] Bao H J. Hydraulic model with roughness coefficient updating method based on Kalman filter for channel flood forecast. Water Science and Engineering, 2011, 4(1):13-23.
- [9] Bao H J, Zhao L N, He Y, et al. Coupling Ensemble weather predictions based on TIGGE database with Grid-Xinanjiang model for flood forecast. Advances in Geosciences, 2011, 29: 61-67.
- [10] Yu Z. Assessing the response of subgrid hydrologic processes to atmospheric forcing with a hydrologic model system. Global and Planetary Change, 2000, 25(1-2): 1-17.
- [11] Wang L L. Application of developed grid-GA distributed hydrologic model in semi-humid and semi-arid basin. Transactions of Tianjin University, 2010, 16(3), 209-215.
- [12] 王莉莉, 陈德辉. GRAPES Noah-LSM陆面模式水文过程的改进及试验研究. 大气科学, 2013, 37(6): 1179-1186.
- [13] 包红军. 基于集合预报的淮河流域洪水预报研究. 水利学报, 2012, 43(2): 216-224.
- [14] 包红军. 基于Kalman滤波糙率反演模型的河道洪水实时预报研究. 水力发电学报, 2012, 31(3): 59-64.
- [15] Metcalf and Eddy, Water Resources Engineers, and University of Florida 1971. Storm Water Management Model, US EPA, Washington, D.C. Vol. I - Final Report, 11024DOC 7/71. Vol. II - Verification and Testing, 11024DOC 8/71. Vol. III - User's Manual, 11024DOC 9/71. Vol. IV - Program Listing, 11024DOC 10/71.

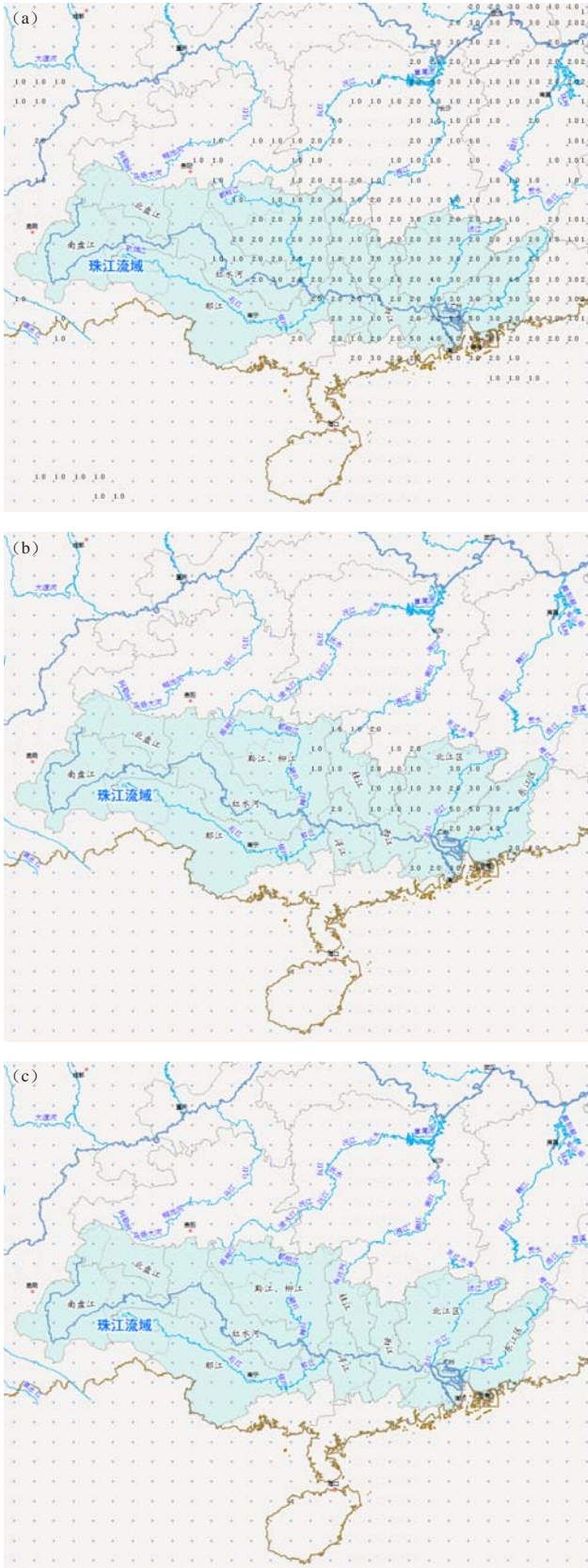


图4 预报时效为24h (a)、48h (b) 和72h (c) 的渍涝风险预警图

- [16] Huber W C, Heaney J P, Medina M A, et al. Storm water management model user's manual, version II. U S Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 1975.
- [17] Huber W C, Heaney J P, Nix S J, et al. Storm water management model user's manual version III. U S Environmental Protection Agency, 1981.
- [18] Huber W C, Dickinson R E. Storm water management model. user's manual version IV. U S Environmental Protection Agency, 1988.
- [19] Roesner L A, Dickinson R E, Aldrich J A. Storm water management model - version 4: user's manual - Addendum 1 EXTRAN; Cooperative Agreement CR-811607; EPA; Athens, Georgia, 1988.
- [20] Rossman L A. Storm water management model user's manual, EPA/600/R-05/040, U S Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, 2007.
- [21] Rossman L A. Storm water management model quality assurance report, dynamic wave flow routing, EPA/600/R-06/097, 2006.
- [22] 解以扬, 李大鸣, 李培彦, 等. 城市暴雨内涝数学模型的研究与应用. 水科学进展, 2005, 16(3): 384-490.
- [23] 陆忠艳, 袁子鹏, 陈艳秋, 等. 基于DEM的辽宁乡镇渍涝预报. 中国农业气象, 2008, 29(4): 463-466.
- [24] 王扬锋, 陆忠艳, 马雁军. 东北地区渍涝风险气象等级预报. 江西农业大学学报, 2009, 31(5): 957-961.
- [25] 林建, 谢正辉, 陈峰, 等. 2006年汛期VIC水文模型模拟结果分析. 气象, 2008, 34(3): 69-77.
- [26] Wood E F, Lettenmaier D P, Zaitarian V G. A land-surface hydrology parameterization with sub-grid variability for general circulation models. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(D3): 2717-2728.
- [27] Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F. One-dimensional statistical dynamic representation of sub-grid spatial variability of precipitation in the two-layer Variable Infiltration Capacity Model. Journal of Geophysical Research, 1996, 101(D16): 21403-21422.
- [28] Liang X, Xie Z H. A new surface runoff parameterization with sub-grid scale soil heterogeneity for land surface models. Advances in Water Resources, 2001, 24(9-10): 1173-1192.
- [29] 谢正辉, 梁旭, 曾庆存. 陆面过程模式中地下水位的参数化及初步应用. 大气科学, 2004, 28(3): 374-384.
- [30] 李致家. 水文模型的应用与研究. 南京: 河海大学出版社, 2008.
- [31] 王莉莉. GRAPES气象-水文模式在一次洪水预报中的应用. 应用气象学报, 2012, 23(3): 274-284.
- [32] Cunge J A. On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). J Hydraul Res, 1969, 7: 205-230.
- [33] 包红军. 基于EPS的水文与水力学相结合的洪水预报研究. 南京: 河海大学博士学位论文, 2009.
- [34] Anderson M G, Burt T P. Hydrological Forecasting. New York: John Wiley & Sons, 1985.
- [35] Wilson B N, Ruffini J R. Comparison of physically-based Muskingum methods. Transactions of the ASAE, 1988, 31(1) : 91-97.
- [36] Punmia B C, Pande B B L. Irrigation and Water Power Engineering. Delhi: Standard Publishers Distributors, 1981.
- [37] Bao H J. Hydraulic model with roughness coefficient updating method based on Kalman filter for channel flood forecast. Water Science and Engineering, 2011, 4(1): 13-23.
- [38] 包红军. 淮河具有行蓄洪区河系洪水预报水力学模型研究. 湖泊科学, 2011, 23(4): 635-641.