

基于GRAPES-MESO的淮河流域精细化 渍涝风险气象预报模型

梁莉^{1, 2} 包红军² 田华^{1, 2}

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

摘要: 通过单向耦合GRAPES-MESO中尺度数值模式与淮河流域精细化水文模型, 建立了淮河流域精细化渍涝风险预报模型。首先将GRAPES-MESO的降水和日最高、最低温度预报结果输入精细化可变下渗容量(variable infiltration capacity, VIC)水文模型, 然后输出15km×15km网格点上的径流深度和三层土壤湿度, 按照全国渍涝风险气象预报预警发布标准计算风险等级。最后选择2008年7月淮河流域两次强降雨过程进行试验, 同时与原始国家级大尺度50km×50km渍涝风险预报模型对比预报效果。结果表明: 该模型有效解决了原始国家级渍涝风险预报模型的漏报问题。在连续雨日可能造成的渍涝风险上, 比原始大尺度渍涝模型有更好的预报效果, 提高了渍涝风险气象预报模型精度。

关键词: 渍涝风险气象预报, GRAPES-MESO, 淮河流域

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.01.016

A Highly-Resolved Model of Meteorological Forecast of Water Logging and Water Logged Risk in Huaihe River Basin Based on GRAPES-MESO

Liang Li^{1, 2}, Bao Hongjun², Tian Hua^{1, 2}

(1 China Meteorological Administration Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081

2 National Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: A forecast model of waterlogging and water logged risk for Huaihe basin is established by coupling the GRAPES-MESO numerical model and the hydrological model VIC (Variable Infiltration Capacity) with fine resolution. Firstly, the precipitation and temperature forecasts by the GRAPES-MESO are used to force the VIC in order to calculate the runoff depth and three layers of soil moisture with 15 km×15 km grids. Then the risk level of water logging and water logged are obtained based on the results of VIC according to the national forecast and early warning publishing standards of water logging and water logged. Finally, the forecasts resulted from the highly-resolved model were compared with those from the raw large scale model in 50 km×50 km grids by taking 2 heavy rainfall events in July, 2008 in Huaihe River Basin as test cases. The results show that the highly-resolved model is effective to solve the problem of omission of forecast and performs better than the original large scale model with lower resolution when the forecast periods are on continuous rainy days.

Key words: meteorological forecast of water logging and water logged risk, GRAPES-MESO, Huaihe River Basin

0 引言

我国的渍涝灾害比较普遍, 历史上多次洪灾(例如1991、1998年的长江洪灾)都造成了渍涝灾害。暴雨产生的渍涝灾害会给农业生产带来严重影响, 一

般而言, 渍涝灾害往往由连续性的较大降水造成。渍主要由于地下水位过高, 导致土壤水分经常处于饱和状态, 农作物根系活动层水分过多, 不利于农作物生长; 涝是雨后农田积水, 超过农作物耐淹能力而形成。渍和涝灾害在多数地区是共存的, 故统称为渍涝灾害。目前国内外多为基于流域水文水动力学模型对渍涝预报进行研究, 并已取得一系列成果^[1-7]。其中, 城市暴雨雨水管理模型(storm water management model, SWMM)是美国的一种关于城市降水径流模型及城市排水系统的数值计算模型, 相关研究都证明了该系统具有较好的模拟效果^[3-5]。近年来国内的模型

收稿日期: 2016年8月26日; 修回日期: 2016年12月5日

第一作者: 梁莉(1985—), Email: liangli@cma.gov.cn

资助信息: 中国气象局公共气象服务中心业务基金项目

(M2014006); 国家重点研发计划(2016YFC0402702);

国家自然科学基金项目(51509043); 中国气象局首批

青年英才计划“中小河流洪水气象预警关键技术研究”

(2014—2017)

也取得了一些进展, 柳州市气象局应用天津大学和天津市气象科学研究所联合开发的城市暴雨渍涝数学模型开发了柳州市暴雨渍涝气象预警系统^[6]; 辽宁省采用基于SCS径流预报模型建立了东北渍涝风险气象等级预报服务系统^[7]。

国家级渍涝风险气象预报预警业务模型是基于全球T213数值模式产品, 驱动陆面水文模型以VIC-3L水文模型输出土壤湿度等产品, 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, 以经过渍涝风险等级计算后得到渍涝风险气象预报客观产品与渍涝发布标准为技术基础进行制作和发布的^[8]。随着天气预报数值模式分辨率日益提升, GRAPES-MESO中尺度数值模式具有业务化产品时空分辨率高的特点, 能保证渍涝风险气象预报客观模型稳定运行和优化。为了增长渍涝预报的预见期, 提高预报精度, 本文以GRAPES-MESO的预报产品驱动VIC-3L水文模型, 在国家级渍涝风险气象预报预警业务模型的基础上, 建立精细化淮河流域渍涝风险预报模型, 并挑选了2008年两次强降水过程进行预报试验。

1 水文和气象模型的选取

1.1 水文模型 VIC 的概述

VIC水文模型是华盛顿大学、加利福尼亚大学伯克利分校以及普林斯顿大学共同研制的基于空间分布(网格化)的分布式水文模型。它最初由Wood等^[9]根据一层土壤变化的入渗能力提出, 最初的模型把土壤分为两层, 称为VIC-2L模型, Liang等^[10-11]后来在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。其中, 第一层顶薄层反映土壤水分的动态变化, 上层(第一层和第二层)土壤用来反映土壤对降雨过程的动态影响, 下层土壤(第三层)用来刻画土壤含水量的季节特性。VIC模型作为基于土壤-植被-大气传输方案(Soil Vegetation Atmospheric Transfer Schemes, SVATS)的一种大尺度分布式水文模型, 可同时进行陆-气间能量平衡和水量平衡的模拟, 也可只进行水量平衡的计算, 输出每个网格上的径流深和蒸发量, 再通过汇流模型将网格上的径流深转化成流域出口断面的流量过程, 弥补了传统水文模型对热量过程描述的不足^[12]。

1.2 淮河流域精细化水文模型的建立

淮河流域精细化水文模型的构建流程如图1所示, 主要包括陆面水文模型VIC及汇流模式两部分。

建立的水文数值预报模型参数分VIC模型参数和

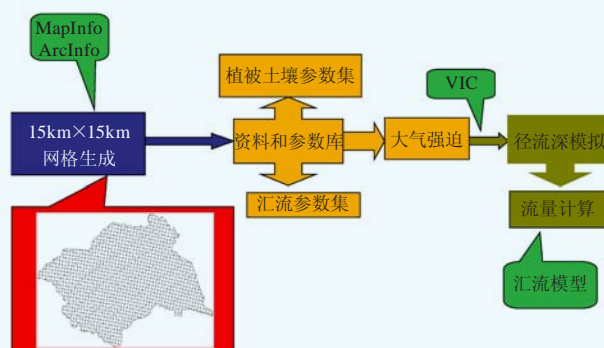


图1 淮河流域精细化水文模型构建流程

Fig1 The flow chart of highly-resolved hydrological model for Huaihe River Basin

汇流模型参数, 其中大部分参数可以由土壤质地、植被类型和地理信息等来确定, 但也有一些水文经验参数必须通过率定才能应用。在对各水文经验参数进行率定时, 需要通过计算流量过程和实测流量过程的拟合程度来确定参数的影响效果。为了简化, 在不对结果产生很大影响的前提下, 模型只对7个水文经验参数进行率定, 分别是: 上层、下层、深层的三层土壤深度($d_i, i=1,2,3$), 蓄水容量曲线方次 B , 以及地下基流方案中的三个参数 D_s 、 D_m 和 W_s (D_m 是最大基流, D_s 是 D_m 的一个比例系数, W_s 是下层土壤最大水分含量的一个比例系数)。这几个参数在模式中对产流的影响较大。

文中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马斯京根-康吉(Muskingum-Cunge)方法进行河道汇流, 最终得到该流域出口网格的径流过程。

1.3 GRAPES-MESO 中尺度数值模式简介

全球/区域多尺度通用同化与数值预报系统GRAPES(Global/Regional Assimilation and Prediction System)是我国自主研发发展的、先进的新一代数值预报系统^[13], 模式分辨率为15km, 预报时效为0~72h。本文用到的预报要素有降水、日最高温度和日最低温度。VIC模型积分步长为日, 由于没有长系列的日辐射资料, 在模式中太阳辐射是根据温度和儒略日(Julian Day)计算; 水汽压、向下短波辐射、长波辐射是根据日最高气温和日最低气温计算。

2 精细化水文模型与GRAPES-MESO中尺度数值模式的单向耦合

虽然GRAPES-MESO输出产品和淮河流域精细化水文模型的分辨率一样, 但是从图2可以看出, 网格

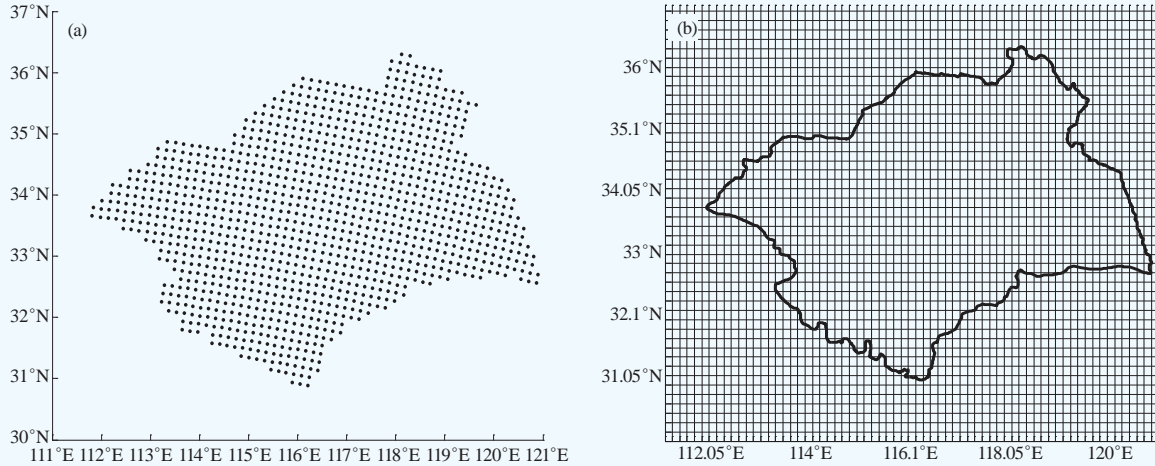


图2 淮河流域 $0.15^{\circ} \times 0.15^{\circ}$ 精细化水文模型 (a) 和 $0.15^{\circ} \times 0.15^{\circ}$ GRAPES-MESO预报 (b) 示意图
Fig2. The illustration of the highly-resolved hydrological model (a) and GRAPES-MESO forecast model (b) in $0.15^{\circ} \times 0.15^{\circ}$ grads for Huaihe Basin respectively

的划分是不一样的，因此需要将GRAPES-MESO输出产品按水文模型网格精度进行双线性插值，实现气象模式与水文模式尺度匹配。

3 渍涝风险气象等级预报

以淮河流域精细化水文模型预报的 $0.15^{\circ} \times 0.15^{\circ}$ 网格点上的径流深度和三层土壤湿度为基础，依据全国渍涝风险气象预报预警发布标准（表1），计算出渍涝风险等级，1~5级分别表示发生渍涝风险等级很低、低、较高、高和很高。

4 淮河流域精细化渍涝模型的个例试验

2008年7月淮河流域出现两次强降水过程。第一次为2008年7月21—23日，受冷、暖空气共同影响，淮河流域普降大到暴雨，淮河出现当年第二次洪水过程。第二次为7月28—31日，强台风“凤凰”及其减弱后的系统造成江苏大部、安徽大部有大到暴雨。本例针对淮河流域2008年7月21—31日的降水过程进行水文模拟试验。首先将GRAPES-MESO降水及最高、最低温度预报输入到精细化VIC模型，采用已

表1 渍涝风险气象预报预警发布标准

Table 1 The release standards of meteorological forecast and warning of water logging and water logged risk

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	—
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	$JLL=0\text{mm}$ $TS_1=50\% \sim 100\%$ $TS_2=45\% \sim 85\%$ $TS_3=20\% \sim 50\%$ $R_0>10\text{mm}, R_5>25\text{mm}$
3	严重渍害	发生渍涝风险的等级较高	逐步抬高地下水水位直至地表（土壤饱和），并填满耕地表面所有坑洼（地表残积水），有小的地表径流	$JLL=0 \sim 10\text{mm}$ $TS_1=70\% \sim 100\%$ $TS_2=55\% \sim 100\%$ $TS_3=20\% \sim 100\%$ $R_0>25\text{mm}, R_5>50\text{mm}$
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	$JLL=10 \sim 20\text{mm}$ $TS_1=70\% \sim 100\%$ $TS_2=50\% \sim 70\%$ $TS_3=20\% \sim 50\%$ $R_0>50\text{mm}, R_5>100\text{mm}$
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	$JLL=20\text{mm}$ 以上 $TS_1=70\% \sim 100\%$ $TS_2=50\% \sim 100\%$ $TS_3=20\% \sim 100\%$ $R_0>100\text{mm}, R_5>200\text{mm}$

注：JLL为径流量； TS_1 、 TS_2 和 TS_3 分别为第一、二和三层土壤湿度； R_0 为24h预报降水量， R_5 为过去5d累积降水量。

率定好的淮河流域模型参数，输出15km×15km网格点上的径流深度和三层土壤湿度，按照全国渍涝风险气象预报预警发布标准计算风险等级。由于原始50km×50km渍涝模型只有24h预报，因此只对比了淮河流域精细模型24h的预报效果。

4.1 第一次强降水过程(2008年7月21—23日)的渍涝风险预报

由于降水后土壤达到饱和直至渍涝发生有滞后响应，为了分析和显示强降水带的逐日变化，图3~图8叠加了降水实况落区，以初步对比原始大尺度模型和精细化模型在预报风险等级上的合理性。

从图3可以看出，7月23日淮河流域普遍都有降水，强降水带位于河南南部，部分站点24h降水量都超过了100mm，其中沈丘站达到227.1mm、汝南站为196mm、泌阳站为166mm。7月22日24h预报时效的渍涝风险预报中，原始大尺度渍涝模型在整个淮河流域出现漏报，精细化模型预报出淮河流域东部及中西部有渍涝风险，其中4级（高等级）风险区域全部位于强降水带内。

7月23日24h预报时效的渍涝风险预报（图4）中，原始大尺度渍涝模型淮河流域北部及西部部分地

区报出了2级低风险，不够发布标准。经过7月23日强降水后，渍涝风险明显增高，而原始大尺度渍涝模型预报的2级风险明显偏低，精细化模型则在淮河流域东部及中西部预报为4级（高风险）。

经过7月23和24日连续2d降水，土壤水分逐渐饱和。7月24日24h预报时效的渍涝风险预报（图5）中，原始大尺度渍涝模型仅在山东南部预报出了2级（低风险）渍涝风险，精细化模型预报在河南南部、安徽北部与江苏大部都预报出了4级（高风险）渍涝风险，与7月23和24日的连续降水区较吻合。

由于渍涝是一种气象灾害，目前仅能根据灾情“有”“无”来做效果检验。另外，由于目前能收集到的灾情描述范围与预报格点的精度不相匹配，尚不能计算预报区域内的所有格点预报产品的准确率、漏报率和空报率，不能像天气预报那样采用实况数据做严格的定量检验，仅能根据灾情进行整体评估和检验。据国家防汛抗旱总指挥部办公室公布的灾情来看，受7月21—24日强降雨影响，江苏省沂沭泗、淮河地区普降暴雨到大暴雨，部分地区发生内涝。造成徐州等市12个县（市）约56.45万人受灾，倒塌房屋约100间，农作物受灾面积14.798万hm²，成灾7.095万hm²，

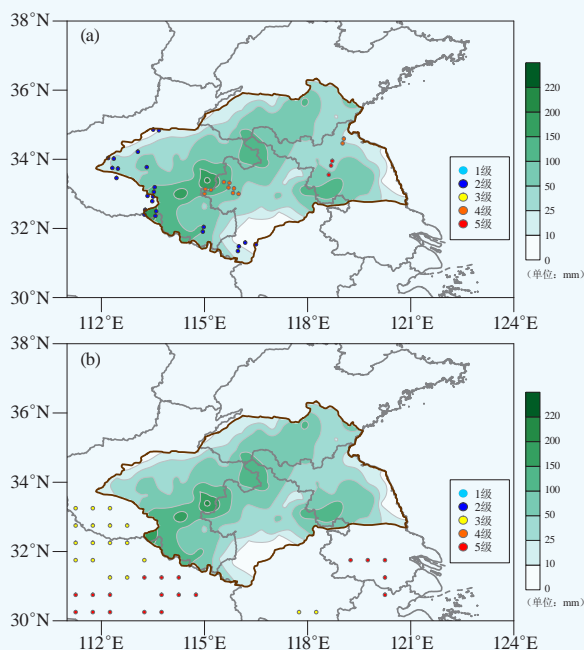


图3 淮河流域7月22日24h预报时效的渍涝风险预报（散点）与7月23日降水实况（填色）

(a) 精细化渍涝模型；(b) 原始大尺度渍涝模型

Fig.3 The meteorological forecast of water logging and water logged risk on 22 July for 24h leading time (scatter) and the observed precipitation on 23 July (shade).

(a) from the highly-resolved model ; (b) from the raw model with lower resolution respectively

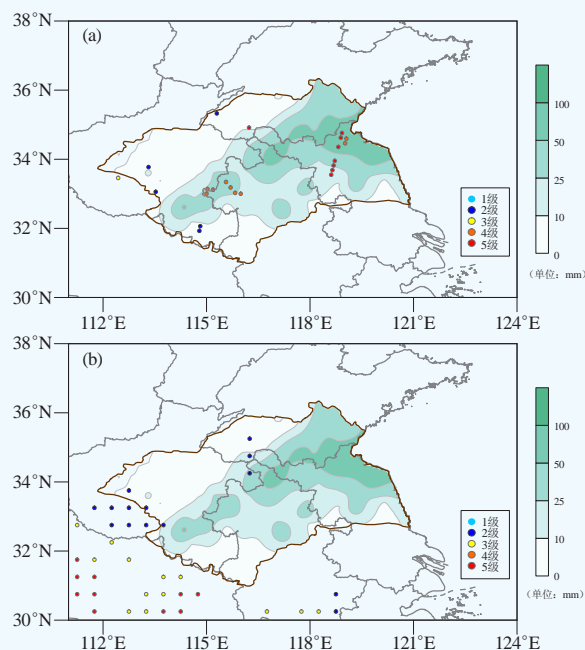


图4 淮河流域7月23日24h预报时效的渍涝风险预报（散点）与7月24日降水实况（填色）

(a) 精细化渍涝模型；(b) 原始大尺度渍涝模型

Fig.4 The meteorological forecast of water logging and water logged risk on 23 July for 24h leading time (scatter) and the observed precipitation on 24 July (shade)

(a) from the highly-resolved model; (b) from the raw model with lower resolution respectively

直接经济总损失4.84亿元^[14]。7月21—23日，安徽省沿淮淮北、江淮之间东部及大别山区降大到暴雨，部分地区大暴雨，致使沿淮淮东北地区出现洪涝灾害^[14]。灾情与精细化模型预报的高风险区较接近。

4.2 第二次强降水过程(2008年7月28—31日)的渍涝风险预报

7月21—23日第一次强降水过程过后，7月26—27日淮河流域局部地区仍有少量降水，直至7月28日又开始大范围降水。在7月29日24h预报时效的渍涝风险预报(图6)中，原始大尺度渍涝模型在整个淮河流域出现漏报，精细化模型预报在河南、安徽交界处、江苏北部预报出了4级(高风险)渍涝风险。

7月31日受强台风“凤凰”影响，江苏北部出现了强降水。在7月30日24h预报时效的渍涝风险预报(图7)中，原始大尺度渍涝模型在整个淮河流域出现漏报，精细化模型预报的4级(高风险)风险区域位于流域东部。

经过7月31日的强降水，原始大尺度渍涝模型在7月31日24h预报时效的渍涝风险预报(图8b)上报出了江苏北部的4级(高等级)风险区域；但对比图8a

可以看出，精细化模型预报的精度更高。

同样，从灾情方面来看，受7月31—8月2日淮河流域普降暴雨到特大暴雨影响，河库水位陡涨，部分地区积涝成灾。江苏省农作物受灾面积14.184万hm²，直接经济损失7.09亿元^[14]。另外，安徽省淮河流域和巢湖流域受灾严重。据统计，农作物受灾面积22.1万hm²，倒塌房屋1万多间，因灾直接经济损失29.3亿元，其中农业损失14亿元，水毁水利工程1万余处，损失近5.8亿元^[14]。灾情涉及区域与精细化模型预报的高风险区较接近。

综上所述，精细化模型在连续雨日可能造成的渍涝风险上，比原始大尺度渍涝模型有更好的预报效果，预报精度显著提高，能客观指示出高风险区，从而能为预报员做出正式预报提供参考。

5 结论与讨论

本文单向耦合GRAPES-MESO中尺度数值模式与淮河流域精细化水文模型，即将GRAPES-MESO降水及最高和最低温度预报结果输入精细化VIC模型，采用已率定好的淮河流域模型参数，输出15km×15km网格点上的径流深度和三层土壤湿度，按照全国渍涝

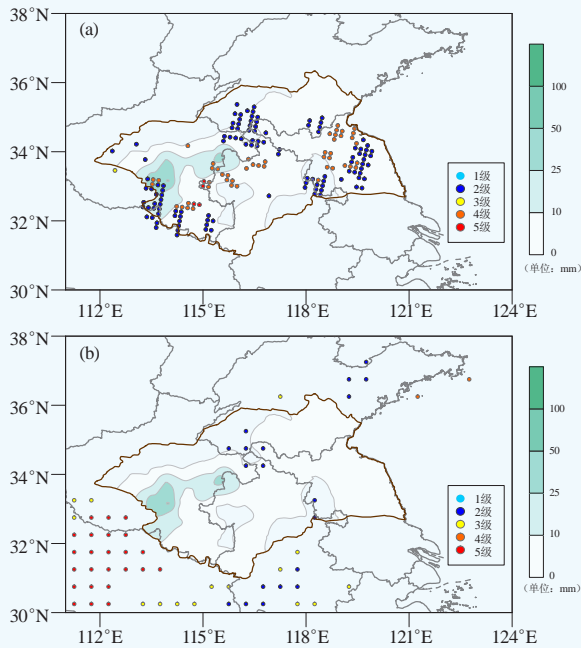


图5 淮河流域7月24日24h预报时效的渍涝风险预报(散点)与7月25日降水实况(填色)

(a) 精细化渍涝模型; (b) 原始大尺度渍涝模型

Fig.5 The meteorological forecast of water logging and water logged risk on 24 July for 24h leading time (scatter) and the observed precipitation on 25 July (shade).

(a) from the highly-resolved model; (b) from the raw model with lower resolution respectively

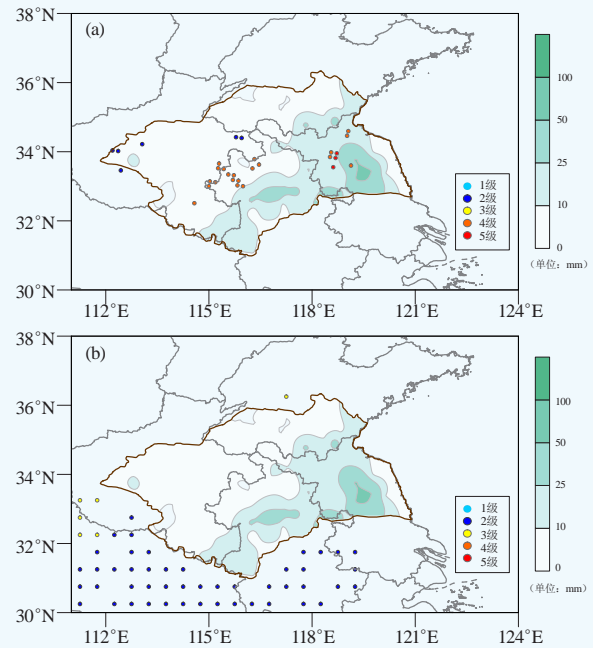


图6 淮河流域7月29日24h预报时效的渍涝风险预报(散点)与7月30日降水实况(填色)

(a) 精细化渍涝模型; (b) 原始大尺度渍涝模型

Fig.6 The meteorological forecast of water logging and water logged risk on 29 July for 24h leading time (scatter) and the observed precipitation on 30 July (shade)

(a) from the highly-resolved model; (b) from the raw model with lower resolution respectively

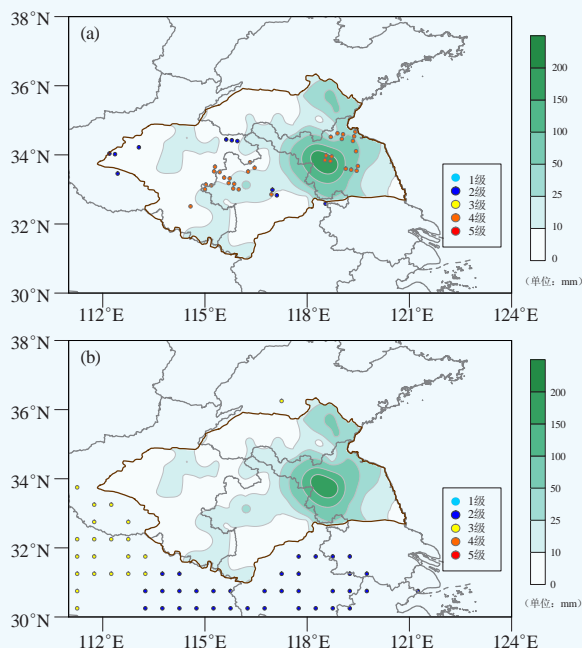


图7 淮河流域7月30日24h预报时效的渍涝风险预报（散点）与7月31日降水实况（填色）

(a) 精细化渍涝模型；(b) 原始大尺度渍涝模型

Fig.7 The meteorological forecast of water logging and water logged risk on 30 July for 24h leading time (scatter) and the observed precipitation on 31 July (shade) (a) from the highly-resolved model; (b) from the raw model with lower resolution respectively

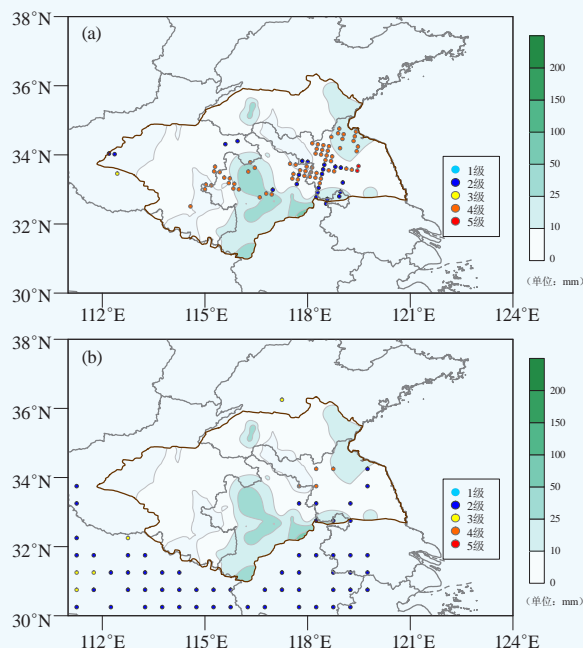


图8 淮河流域7月31日24h预报时效的渍涝风险预报（散点）与8月1日降水实况（填色）

(a) 精细化渍涝模型；(b) 原始大尺度渍涝模型

Fig.8 The meteorological forecast of water logging and water logged risk on 31 July for 24h leading time (scatter) and the observed precipitation on 1 August (shade) (a) from the highly-resolved model; (b) from the raw model with lower resolution respectively

风险气象预报预警发布标准计算风险等级。选择2008年7月淮河流域两次强降水过程进行验证，精细化渍涝模型有效解决了原始大尺度模型的漏报问题，在连续雨日可能造成的渍涝风险上，比原始大尺度渍涝模型有更好的预报效果，提高了渍涝风险气象预报预警模型精度。

参考文献

[1] Schmitt T G, Thomas M, Etrich N. Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems. *J Hydro*, 2004, 299(3/4): 300-311.
 [2] Endreny T, Black J. Increasing stormwater outfall duration, magnitude, and volume through combined sewer separation. *J Hydro Engineering*, 2006, 11(5): 472-481.
 [3] 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.
 [4] 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.
 [5] Huber W C, Dickinson R E. Storm water management model

user's manual version IV. U S Environmental Protection Agency, 1988.

[6] 米浦强, 郑传新, 刘梅, 等. 2005年6月20日柳州市大暴雨渍涝灾害模拟分析. *气象*, 2008, 34(3): 69-77.
 [7] 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.
 [8] 包红军, 王莉莉, 梁莉. 对国家级渍涝风险气象预报预警业务模型的优化与改进. *气象科技进展*, 2015, 5(2): 42-47.
 [9] Wood E F, Lettenmaier D P, Zaitarian V G. A land-surface hydrology parameterization with sub-grid variability for general circulation models. *J Geophys Res*, 1992, 97(D3): 2717-2728.
 [10] 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. *J Geophys Res*, 1996, 101(D16): 21403-21422.
 [11] Liang X, Xie Z H. A new surface runoff parameterization with sub-grid scale soil heterogeneity for land surface models. *Adv in Water Res*, 2001, 24(9/10): 1173-1192.
 [12] 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.
 [13] 陈德辉, 沈学顺. 新一代数值预报系统GRAPES研究进展. *应用气象学报*, 2006, 17(6): 773-777.
 [14] 闫淑春. 2008年全国洪涝灾情. *中国防汛抗旱*, 2009, 20(1): 60-67.