

雷达估测降雨与水文模型的耦合在洪水预报中的应用

李致家¹, 刘金涛¹, 葛文忠², 赵 坤²

(1. 河海大学水资源与环境学院, 江苏 南京 210098 2. 南京大学大气科学系, 江苏 南京 210008)

摘要 尝试将雷达降雨数据作为水文模型的输入用于洪水预报中. 流域面上的降雨分布是不均匀的, 比较雨量计和雷达两种方式估测的降雨场分布, 后者更接近于实际情况. 从流域地形分布来看也证实了这一点. 从实时洪水预报的角度出发, 选择进行校准雷达降雨的雨量站个数与水情部门采用的报讯站的个数接近. 由于雷达估测的降雨数据为分布式的降雨数据, 需要采用分布式的水文模型. 结合淮河史灌河流域蒋家集站进行洪水预报, 预报结果表明, 雷达测雨在洪水预报中具有广泛的应用前景.

关键词 雷达估测降雨 雨量校正 实时洪水预报 分布式水文模型

中图分类号 TV213 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2004)06-0601-06

近年来, 随着遥感技术被引入水文水资源中, 国内外许多水文工作者正致力于将雷达估测降雨技术应用于水文预报工作的研究中^[1~12]. 雷达具有很好的时空分辨率, 可以获得流域面上的瞬时降雨分布^[1], 这优于雨量计单点观测所得的雨量场分布. 由于雷达测雨是通过 $Z-R$ 关系间接得到的, 雷达测得的降雨数据与实际情况存在一定的差距, 需要实时雨量计资料进行校正. 本次研究中, 采用雷达联合雨量计校准雷达估测的降雨量, 具体校正方法为卡尔曼滤波法. 与以往国内雷达测雨研究不同的是, 本文从实时洪水预报的角度出发, 选择进行校准雷达降雨的雨量计站个数与水情部门采用的报讯站的个数一致, 以便于该方法能够在实时洪水预报中采用.

目前, 在国内的实时洪水预报中把由地面雨量计测得的降雨数据作为水文模型的输入. 本文尝试采用雷达估测降雨作为降雨数据输入. 雷达测得的降雨数据为分布式的栅格数据, 栅格大小为 $2\text{ km} \times 2\text{ km}$ (分辨率高的可达 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$). 在实时洪水预报中采用降雨-径流水文模型, 其子流域大小一般超过 200 km^2 , 因此研究与空间高分率雷达测雨数据匹配的水文模型空间分辨率是一个迫切问题. 国外研究表明, 对于实时洪水预报, 就降水的空间分布而言, 水文模型的空间分辨率并不是越小越好, 而是与降水的空间尺度和空间变化有关^[1,2]. 总体来看, 对于锋面雨, 子流域面积在 100 km^2 的范围是合适的; 对于对流性降水, 则需要较小的子流域. 本文建立了一种分布式产流模型, 即子流域的划分. 在产流阶段, 由于雷达估测的降雨为分布式的栅格数据, 故模型将流域划分为栅格单元, 在单元内分别产流. 为了与雨量计资料比较, 汇流阶段子流域的划分仍然采用泰森多边形方法.

本文采用 1998 年 6 月和 7 月阜阳雷达站测雨资料对史灌河流域蒋家集站径流过程进行模拟, 并与雨量计估测降雨模拟的径流过程对比. 从模拟的结果来看, 雷达估测降雨在水文预报中有很好的应用前景.

1 雷达估测降雨数据的处理

由于雷达直接测量得到的是雷达反射因子 Z , 需要通过 $Z-R$ 关系将其转化成格点降雨, 考虑测量过程的噪声(系统误差和观测误差), 本文采用卡尔曼滤波方法, 因为该方法在导出雷达测雨的平均偏差场时, 滤除观测系统中的误差, 避免在计算 R_g/R_r 比值时, 因 R 小造成的不稳定, 提高了雷达测雨的精度.

1.1 卡尔曼滤波方法^[5]

具体校准步骤:

a. 已知雷达测得降雨场的时间序列 $R_r(i, j, t)$ 以及相应时间由雨量计得到的降雨强度 $R_g(i, j, t)$, 其中 (i, j) 为空间坐标, t 是时间.

b. 计算观测偏差 $\hat{Z}_k$.

$$\hat{Z}_k = \frac{\sum_{i,j} R_r(i, j, t)}{\sum_{i,j} R_g(i, j, t)} \tag{1}$$

c. 卡尔曼滤波方法的状态转移矩阵.

$$\begin{cases} Z_{k+1} = Z_k + \xi_k \\ Z_k = Z_k + \eta_k \end{cases} \tag{2}$$

式中 $:k$ ——离散时刻对应时间 $;\xi_k, \eta_k$ ——随机扰动项, 可以假设为高斯白噪声序列.

d. 卡尔曼滤波计算.

状态预测估计值计算公式为 $Z'_{k+1} = \hat{Z}_{k/(k-1)}$ (3)

预测估计值误差的方差计算公式为

$$P'_{k+1} = P_{k/(k-1)} + Q \tag{4}$$

其中 $P'_{k+1} = E[(B'_{k+1} - B_{k+1})^T (B'_{k+1} - B_{k+1})]$ (5)

最佳增益计算公式为

$$K_{k+1} = P'_{k+1} / (P'_{k+1} + R) \tag{6}$$

状态估计值计算公式为

$$\hat{Z}_{(k+1)/k} = Z'_{k+1} + K_{k+1} (Z_{k+1} - Z'_k) \tag{7}$$

滤波误差的方差阵公式

$$\begin{cases} P_{(k+1)/k} = (E - K_{k+1}) P'_{k+1} \\ P_{(k+1)/k} = (E - K_{k+1}) P'_{k+1} (E - K_{k+1})^T + K_{k+1} R_{k+1} K_{k+1}^T \end{cases} \tag{8}$$

式中 $:Q, R$ ——Gauss 白噪声 ξ_k 和 η_k 的方差阵 $\hat{Z}_{k/(k-1)}$ ——由 $k-1$ 时刻的平均偏差估计 k 时刻的平均偏差.

e. 订正降雨场. 订正后的降雨场为

$$\hat{R}(i, j, t_k) = R(i, j, t_k) \hat{Z}_k \tag{9}$$

式中 $:i, j$ ——格点雨量的空间坐标 $;t_k$ ——时间.

1.2 适合于实时水文预报的站网选择

在雷达联合雨量计校准雷达估测降雨中, 根据 GAME/HUBEX 实验项目在史灌河流域布设的雨量站网布设雨量计, 其中流域范围内有 48 个雨量计, 流域外 13 个. 雨量计在观测期内 1 h 观测一次. 为适应水文预报规范及实时洪水预报对资料的要求, 本文在雨量站网的选取上不同于国内以往的研究方法^[12,13], 此处仅选用流域范围内的 8 个雨量计(图 1)作校准.

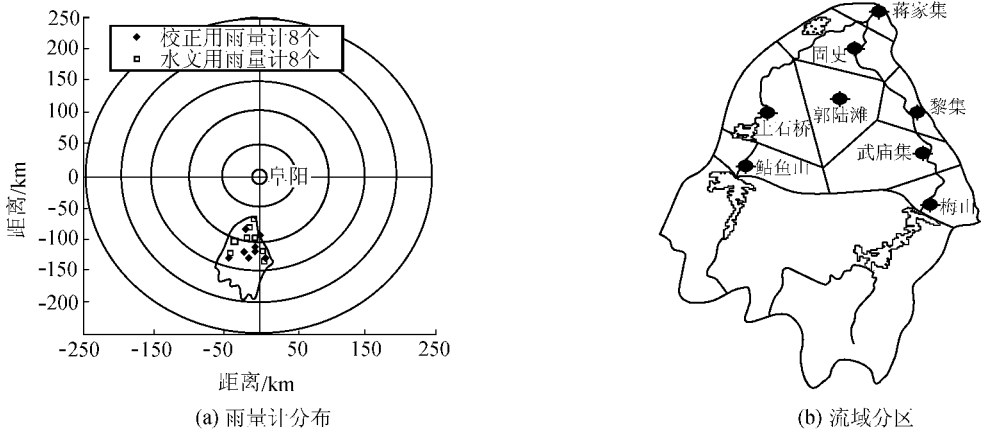


图 1 史灌河流域分区及雨量计分布

Fig.1 Block plan of Shiguanhe catchment and rain gauge distribution

1.3 校正结果分析

选用史灌河流域北部阜阳雷达站(32.92°N,115.82°E)1998 年 6 月 28 日 21 时至 7 月 4 日 14 时所观测的雷达测雨资料进行校正.

测雨的校正结果如图 2 和 3 所示.由图 2(a)为雨量计累积降雨量分布不难看出水文学中将流域分为 8 个子区域,每块区域被假定为均匀降雨,显然实际情况并非如此.流域面上的降雨实际上是分布式的,雷达估测降雨累积结果更接近流域的实际情况(图 2(b)).表 1 统计了雷达估测降雨在面上以及网格上的各项特征值,表明在子区域内各网格点的降雨不是均一的,即使相邻的网格也往往存在较大的差距,从图 3 可以看出这点.

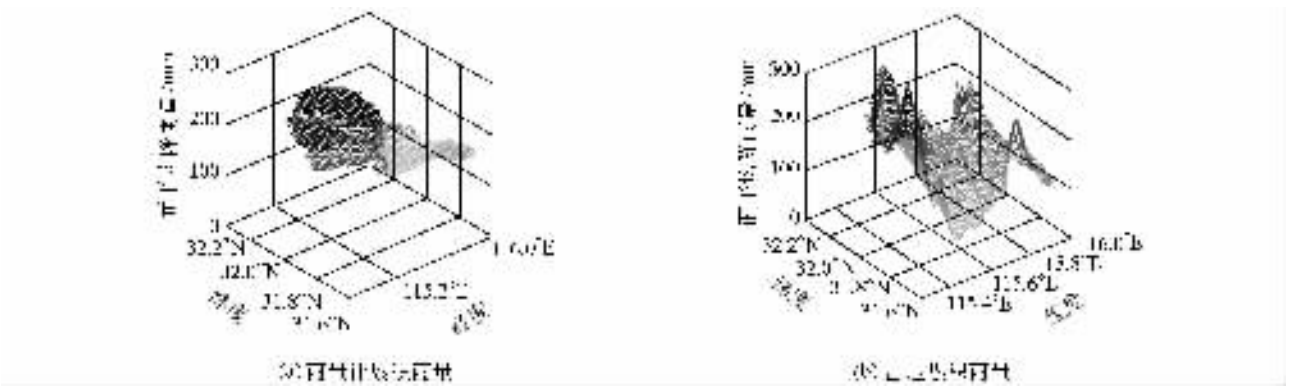


图 2 1998 年 6 月 28 日 8 时至 7 月 3 日 20 时累积雨量分布

Fig.2 Accumulated rainfall distribution from 8:00 on June 28 to 20:00 on July 3,1998

表 1 1998 年 6 月 28 日 8 时到 7 月 3 日 20 时各子区域雷达估测降雨

Table 1 Weather radar rainfall data for each sub-catchment from 8:00 on June 28 to 20:00 on July 3,1998

子区域	面平均雨量/mm		面雨量 偏差/%	网格(2 km×2 km)降雨量/mm		$\frac{a-b}{b} \times 100\%$
	雷达估测	雨量计估测		最大值 a	最小值 b	
梅 山	143.4	164.1	- 12.6	250.5	109.0	56.5
武庙集	117.1	152.7	- 23.3	245.0	42.1	82.8
黎 集	202.3	178.5	13.3	310.2	134.6	56.6
郭陆滩	127.2	232.1	- 45.2	301.9	59.9	83.1
固 史	188.5	225.8	- 16.5	294.3	78.8	73.2
鲇鱼山	176.6	200.0	- 11.7	289.7	34.7	88.0
上石桥	225.4	220.8	2.1	329.3	52.9	83.9
蒋家集	149.1	214.8	- 30.6	200.9	88.4	56.0

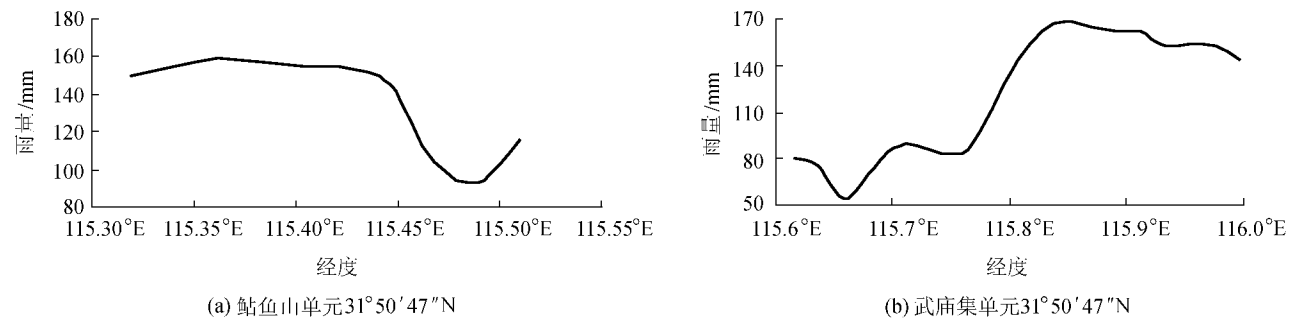


图 3 子区域网格点累积降雨量

Fig.3 Accumulated rainfall at grids of subcatchments

2 实例计算

2.1 史灌河流域概况

史河是淮河流域来自大别山区的一大支流,对淮干洪峰的形成有重要影响.

蒋家集站控制面积 5 930 km²,上游约 5 km 处有一大支流灌河汇入.史灌河上游分别有梅山和鲇鱼山两大水库.流域植被良好,年雨量在 1 250 mm 左右,降雨时空分布不均,年径流系数在 0.6 左右.由流量过程线可以看出,史灌河流域有丰富的地下水和壤中流.扣除鲇鱼山、梅山两水库面积后,蒋家集以上面积还有 3 000 km².该流域内有 8 个雨量报汛站,根据泰森多边形方法,将流域分为 8 个汇流单元,见图 1(a).雨量代表站、面积、权重列于表 2.

2.2 新安江模型参数率定

由于雷达估测降雨资料较少,目前还不能采用其数据率定新安江模型参数,因此本文选取史灌河流域的历史洪水(降雨量为雨量计观测)率定模型参数.采用 1980~1983 年共 4 a 日水文资料率定新安江日模型的参数,结果见表 3,从年径流深和流量过程拟合的确定性系数可以看出精度较高.选择 20 次洪水和 8 次洪水分别进行模型的率定和检验,表 4 是部分洪水的精度统计,从率定和检验的洪水预报特征值来看,均达到甲级方案.

表 3 史灌河流域日模型模拟结果统计							
Table 3 Calibrated results of daily data for Shiguanhe catchment							
年份	年雨量 /mm	年蒸发 量/mm	年实测径 流深/mm	年计算径 流深/mm	误差		确定性 系数
					绝对/mm	相对/%	
1980	1 472.2	705.3	1 121.5	1 142.5	- 21.0	- 1.87	0.95
1981	965.5	773.0	276.1	264.7	11.4	4.13	0.91
1982	1 325.3	580.9	755.8	841.1	- 85.3	- 10.40	0.95
1983	1 392.4	632.9	1 278.0	1 258.8	19.2	1.50	0.94

表 4 史灌河流域次洪模型模拟结果(部分)统计									
Table 4 Calibrated and verified results of partial flood events in Shiguanhe catchment									
洪号	发生时间	洪量			洪峰流量				确定性 系数
		实测值 /mm	计算值 /mm	相对误差 /%	实测值 /(m ³ ·s ⁻¹)	计算值 /mm	相对误差 /%	峰现误差 (时段数)	
率 定	8007	1980-07-16	345.7	340.3	- 1.6	3 020	3 046	0.9	0.94
	8207	1982-07-13	322.7	334.1	3.5	2 400	2 235	- 6.9	0.91
	8208	1982-08-07	195.3	238.1	16.9	1 870	1 631	- 12.7	0.90
	8306	1983-06-30	135.1	180.3	18.4	1 080	1 105	2.4	0.81
	8307	1983-07-12	354.3	383.0	8.1	3 900	3 852	- 1.2	0.92
验 证	7707	1977-07-15	112.4	125.3	11.5	1 790	1 896	5.9	0.95
	8406	1984-06-06	138.6	150.4	8.5	1 890	1 761	- 6.8	0.92
	9106	1991-06-12	180.6	177.4	- 1.8	2 270	2 232	- 1.1	0.93
	9107	1991-06-30	843.6	850.6	0.8	1 270	1 129	- 11.1	0.95
					3 540	3 384	- 6.0	- 1	
					2 650	2 451	- 7.5	1	
					3 200	3 276	2.4	- 1	
	9108	1991-08-15	128.6	139.0	8.1	2 260	2 060	- 8.9	0.92

2.3 建立分布式产流模型

选择 1998 年 6 月 28 日 8 时至 7 月 10 日 8 时的暴雨资料进行雷达测雨与水文模型的耦合实验研究.对于雷达联合雨量计估测降雨,在雨量计所在栅格点处,采用雨量计观测的降雨,其余格点采用雷达估测的降

雨,并且利用已知雨量计栅格数据对其进行校准,得到分布式降雨数据。

本文建立基于栅格单元内的分布式产流模型。雷达测雨数据是分布式的格点数据,栅格单元的面平均雨量用单元中心点估测的降雨量代替。模型首先计算单个栅格单元内的产流,然后汇集于子区域出口,采用马斯京干河道汇流演算法将各子区域的产流量演算到流域出口断面。

用新安江模型进行实时洪水预报,当流域面积较大时要分块。可以采用泰森多边形法或者自然流域法将流域分为若干个子区域。子区域的面积一般不超过几百平方公里。在汇流阶段模型仍然采用这种传统的汇流方式,而且在计算中,认为每个子区域内新安江模型的参数是一样的。

2.4 模拟结果

采用由雨量计测得的次洪降雨资料率定的新安江模型,对雷达估测的降雨进行洪水模拟,洪水模拟过程线见图 4。表 5 是采用两种雨量进行洪水模拟流量过程的精度比较,可以看出,两种预报结果精度相当。图 5(a)为各栅格单元产流量在流域面上的分布状况,从图 5(a)中可以看出,尽管在每一个子流域内,模型计算时其初始条件一致,但由于降雨分布的不均(图 2(b)),最终导致各栅格单元产流量的差异。在图 5(b)中,由于前期降雨较少,流域上各栅格单元张力水容量低于 60 mm 的占 93.7%,而降雨结束时各栅格单元张力水容量大于 105 mm 的占 84.9%,这时流域土壤基本趋向于饱和,见图 5(c)。

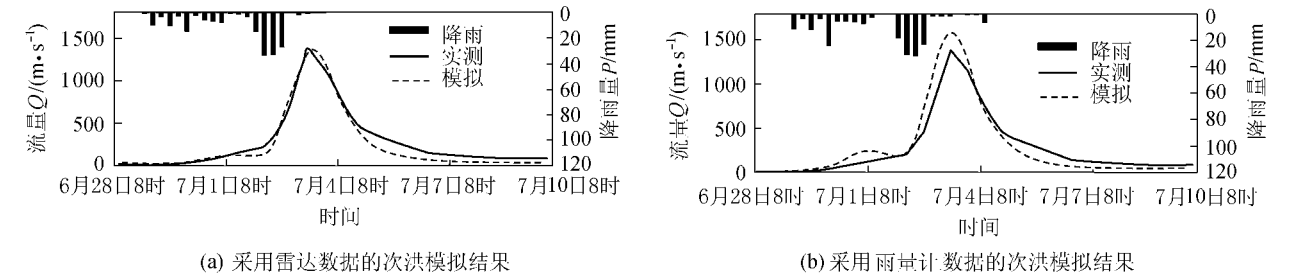


图 4 1998 年洪水模拟过程线
Fig.4 Hydrographs of flood in 1998

表 5 新安江模型洪水特征对比

Table 5 Comparison of flood characteristics simulated with radar rainfall data and rain gauge data						
统计项目	实测洪量/万 m ³	预报洪量/万 m ³	相对误差/%	实测洪峰流量/(m ³ ·s ⁻¹)	预报洪峰流量/(m ³ ·s ⁻¹)	相对误差/%
雷达数据模拟特征值	30 387.527	26 976.656	11.22	1 390	1 439.8	- 3.58
雨量计数据模拟特征值	30 387.527	31 299.018	- 3.00	1 390	1 602.8	- 15.31
统计项目	实测峰现时间	预报峰现时间	峰现时间误差/h	确定性系数	面平均总雨量/mm	预报总径流深度/mm
雷达数据模拟特征值	1998-07-03T20 00 00	1998-07-03T20 00 00	0	0.89	180.2	103.5
雨量计数据模拟特征值	1998-07-03T20 00 00	1998-07-03T20 00 00	0	0.89	200.0	122.1

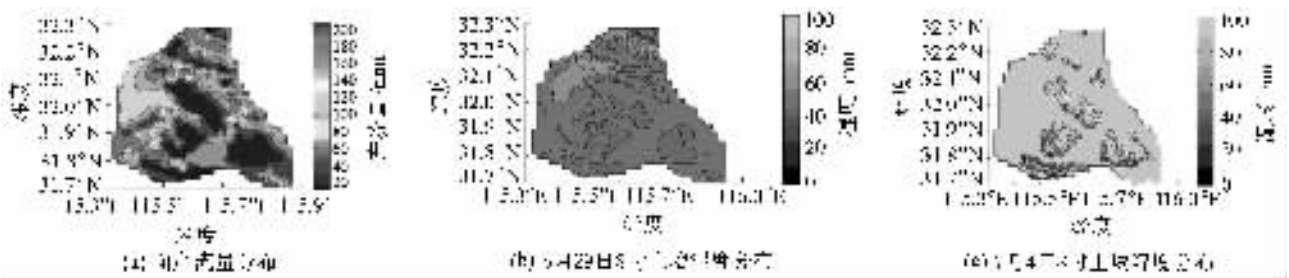


图 5 模型模拟的史灌河流域(不包含水库)面产流量和土壤湿度分布(灰度单位为 mm)
Fig.5 Areal runoff generation and soil humidity distributions(without containing reservoirs)
simulated for Shiguanhe catchmeat with the new method

从以上各图不难看出,由于降雨空间分布的不均,直接导致了模型模拟所得水文要素的不均匀分布.雷达估测的降雨较为真实地反映了流域实际的降雨分布状况,这在一定程度上消除了雨量计以点代面造成的误差,因此采用这种分布式降雨数据进行径流过程模拟能够取得较好的预报结果.

3 结论与展望

本文结合淮河史灌河流域,对雷达测雨资料与水文模型的耦合进行研究.从实时洪水预报的角度出发,选择进行校准雷达降雨的雨量计站个数与水情部门采用的报讯站个数接近,以便于在实时洪水预报中使用.淮河史灌河蒋家集以上流域的1998年6月28日8时至7月10日8时洪水预报计算结果表明采用由雷达测得的降雨数据作为输入的洪水预报过程与采用由雨计测得的降雨数据作为输入的洪水预报过程其精度相当.

本文只是研究的开端,把雷达测雨与水文模型耦合用于实时洪水预报还需进行大量的研究工作,单就水文方面而言,如研究与雷达测雨资料匹配的水文模型的空间分辨率、两种资料情况下水文模型参数率定等^[1].

参考文献:

- [1] ABBOTT M B, REFSGAARD J C. Distributed hydrological modelling[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. 143—163.
- [2] SEO D J, BREIDENBACH J P, JOHNSON E R. Real-time estimation of mean field bias in radar rainfall data[J]. Journal of Hydrology, 1999, 223: 131—147.
- [3] JASPER K, JOACHIM G, HERBERT L. Advanced flood forecasting in Alpine watersheds by coupling meteorological observations and forecasts with a distributed hydrological model[J]. Journal of Hydrology, 2002, 267: 40—52.
- [4] PETERS J C, EASTON D J. Runoff simulation using radar rainfall data[J]. Water Resour, 1997, 32: 753—760.
- [5] SUN Shou-xiang, LIU Guo-qing, GE Wen-zhong. A method of variational analysis combined with kalman filter for radar rainfall field correction[A]. Preprints, 26th International Conf On Radar Meteorology[C]. Norman OK, 1993. 23—27, 755—757.
- [6] THOMS T W, DAVID N Y. Prediction of a flash flood in complex terrain. Part I: A comparison of rainfall estimates from radar, and very short range rainfall simulations from a dynamic model and an automated algorithmic system[J]. Journal of Applied Meteorology, 2000, 39: 797—813.
- [7] THOMS T W, DAVID N Y. Prediction of a flash flood in complex terrain. Part II: A comparison of flood discharge simulation using rainfall input from radar, a dynamic model and an automated algorithmic system[J]. Journal of Applied Meteorology, 2000, 39: 815—825.
- [8] VINCE C, CELIA K. Weather radar and flood forecasting[M]. New York: John Wiley & Sons, 1987. 223—238.
- [9] ANDERSON M G, BURT T P. Hydrological forecasting[M]. New York: John Wiley & Sons, 1985. 77—101.
- [10] 刘晓阳, 毛节泰, 李纪人, 等. 雷达联合雨量计估测降水模拟水库入库流量[J]. 气象科学进展, 2002, 20(2): 210—219.
- [11] 刘晓阳, 毛节泰, 李纪人. 雷达估测降雨在降水径流模型中的应用试验[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2002, 38(3): 342—349.
- [12] 《长江防洪系统实时调度研究》编辑委员会. 长江防洪系统实时调度研究[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1997. 82—93.
- [13] 赵人俊. 流域水文模拟——新安江模型与陕北模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983. 125—129.

Coupling of weather radar rainfall data with hydrological model and its application to flood forecasting

LI Zhi-jia¹, LIU Jin-tao¹, GE Wen-zhong², ZHAO Kun²

(1. College of Water Resources and Environment, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

2. Department of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210008, China)

Abstract: A study was made on the coupling of weather radar rainfall data with the hydrological model for flood forecasting. The comparison of the rainfall distributions on river basins evaluated by precipitation gauges and the weather radar rainfall estimate technique shows that the result from the latter method is more close to the reality, which accords with the landform of river basins. To meet the requirement of real-time flood prediction, the Kalman filter was adopted for correction of the weather radar rainfall data, and the number of rainfall stations selected was the same as that of the flood prediction stations arranged by the water information department. In consideration of the fact that the weather radar rainfall data are of distributed characteristics, the distributed hydrological model was adopted. The flood forecasting performed for the Jiangjiayi Station of the Shiguanhe catchment of the Huaihe River shows that the weather radar rainfall estimate technique has wide scope of application.

Key words: weather radar rainfall estimate technique; rainfall correction; real-time flood forecasting; distributed hydrological model