

鄂西山区中小流域水文模拟及参数敏感性分析

彭涛¹ 唐志朋² 殷志远¹ 丁煌³

(1 中国气象局武汉暴雨研究所暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205;
2 长江科学院, 武汉 430015; 3 中国电力科学研究院新能源研究中心, 南京 210009)

摘要: 针对古洞口水库流域的暴雨洪水过程, 利用新安江水文模型开展了水文模拟试验, 结合确定性系数、洪峰流量相对误差、峰现时差等指标对模拟结果进行评定, 并以该流域为例进行参数敏感性分析, 分别基于确定性系数、洪峰流量相对误差、峰现时差为评价指标, 对模型参数敏感性进行定量分析, 确定了关键敏感性参数, 为优化模型结构及评估模型应用可靠性提供参考依据。

关键词: 新安江水文模型, 水文模拟, 参数率定, 敏感性分析

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.04.007

Hydrological Simulation and Parameter Sensitivity Analysis of Small and Medium Basins in the Western Mountains of Hubei Province

Peng Tao¹, Tang Zhipeng², Yin Zhiyuan¹, Ding Huang³

(1 Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430205 2 Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430015
3 Renewable Energy Center, China Electric Power Research Institute, Nanjing 210009)

Abstract: Based on the rainstorm and flood process information for the Gudongkou Reservoir Basin, the Xin'anjiang Hydrological model is used to carry out hydrological simulation tests. The simulation results are evaluated with the determinacy coefficient, the relative error of the flood peak flow and the peak time difference. The parameter sensitivity is analyzed respectively with the deterministic coefficient, the relative error and peak time difference of peak flow as the evaluation indexes, and the sensitivity of the model parameters is carried out quantitatively, then the key sensitivity parameters are determined. It provides a reference for the optimization of model structure and the reliability of the model application.

Keywords: Xin'anjiang Hydrological Model, hydrological simulation, parameter calibration, sensitivity analysis

0 引言

目前, 水文模型众多, 其中概念性流域水文模型广泛应用于洪水预报和水资源管理等众多领域。然而, 流域水文模型的参数优选及其敏感性分析是水文预报中非常重要和困难的工作, 是模型应用的关键, 它们直接关系到水文模拟预报的精确度。由于水文过程的复杂性、历史水文资料误差及水文模型结构误差等因素的存在, 给流域水文模型参数优选及水文预报

带来很大的不确定性。参数敏感性分析一直被认为是用来确定模型关键参数、控制模型效率非常有效的手段。同时, 参数敏感性分析可以帮助理解模型结构, 乃至发现模型结构缺陷, 从而改善模型结构, 国内学者分别基于单纯形法、罗森布洛克法、遗传算法和单纯多边形进化算法来开展参数的优选, 从而提高参数率定效率^[1-7]。因此, 本文以鄂西山区古洞口水库流域为例, 选用在我国应用得非常广泛的新安江水文模型开展中小流域水文模拟试验, 率定流域水文模型参数, 并对新安江模型的参数进行了敏感性分析, 为手动调试参数及模型应用可靠性提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

古洞口水库位于湖北省兴山县境内, 坝址在长江支流香溪河上游古夫河古洞口峡谷处(图1), 下距

收稿日期: 2017年12月14日; 修回日期: 2018年5月18日

第一作者: 彭涛(1980—), Email: pt_mail@sohu.com

资助信息: 湖北省自然科学基金(2018CFB706); 湖北省气象局科技发展基金(2015Z02); 国家电网公司科技项目(NY71-16-032); 武汉暴雨研究所科研业务经费(IHRKYYW201704, IHRKYYW201807); 国家气象中心水文气象预报团队项目

定水文模型参数。根据《水文情报预报规范》^[11]，采用模型的过程确定性系数、洪峰相对误差、峰现时差等指标评定所确定参数（表2），并采用2008—2012年剩余7场洪水过程对参数进行验证（表3）。试验结果表明：洪水过程验证模拟合格率达85.71%，效率系数为84.79%。另外，从2011年11月6日洪水过程的模拟结果与实况对比发现（图4），其模拟结果与实况较为一致。综合表3和图2可知，通过水文模型模拟试验所率定的参数可用于水文模拟试验。

表2 古洞口水库流域新安江水文模型参数率定结果

Table 2 Parameter calibration results of the Xin'anjiang Hydrological Model for Gudongkou Reservoir Catchment

参数	K	WUM	WLM	C	WM	B	IMP	SM	EX	KSS	KG	KKSS	KKG	CS	L
取值	1.22	22	62	0.2	120	0.34	0.01	3.2	1.2	0.37	0.33	1	0.99	0.36	3.2

表3 2008—2012年古洞口水库流域7场洪水过程的模拟参数验证

Table 3 Verification of the simulations for 7 flood processes in the Gudongkou Reservoir Catchment during the period from 2008 to 2012

过程时间	实测洪峰/ (m ³ /s)	模拟洪峰/ (m ³ /s)	洪峰相对误差/%	峰现时差 /h	过程效率系数 /%
2008-08-14	386	369	4.40	3	72.8
2008-08-28	426	329	22.77	1	83.5
2011-11-06	153	137	10.46	1	81.2
2012-05-29	73	68	6.85	0	88.6
2012-06-29	144	139	3.47	1	85.6
2012-07-04	611	629	2.95	1	92.5
2012-08-20	279	246	11.83	1	89.3

注：洪峰相对误差≤20%时，即认定该场洪水预报合格，洪峰合格率为合格场次占总场次比例。

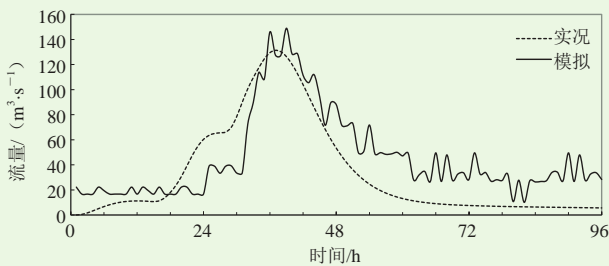


图2 2011年11月6日古洞口水库流域洪水过程模拟与实况对比

Fig. 2 Comparison between simulation and observation for the flood process on in Gudongkou Reservoir Catchment on 6 November 2011

3 参数敏感性分析

3.1 目标函数的设立

在水文模型构建过程中，概化理念使水文模型与实际物理过程存在较大差别，因此众多参数无法通过实验测试量化，进而采用参数率定来达到较好应用精

度。在此之前，参数敏感性分析是一个重要环节。确定哪些参数对模型的输出结果贡献较大，提高参数率定效率和模型预测的可靠性；确定不敏感参数，基于其物理意义设定参数值范围，避免不必要的计算；确定各参数之间的相互作用，分析不同组合对模拟结果的影响，明确模型的差异性。在水文模拟试验的基础上分别以确定性系数（过程效率）洪峰相对误差、洪峰峰现时差作为目标函数，分析新安江水文模型参数在该流域的敏感性，降低参数的不确定性影响，提高模型应用精度。

3.2 参数敏感性分析

参数敏感性分析过程中，采用三水源新安江模型进行场次暴雨洪水水文模拟试验，分层次、分指标对不同模型参数的敏感度进行计算分析，提高模型预报精度及可靠性。其中，蒸散发参数有WUM、WLM、K、C，产流量参数有WM、B、IMP，水源划分参数有SM、EX、KSS、KG，汇流参数有KKSS、KKG、CS、L，共计15个参数。模拟计算过程中，针对不同目标函数，基于优化调试的模型参数相对最优值，对参数进行相应比例的缩放，分别放大缩小10%、20%、50%和100%，进行模拟计算，分层次对各参数的敏感性进行分析。限于篇幅，文中仅给出表3中洪水过程1的分析结果。

3.2.1 以确定性系数为目标函数的参数敏感性分析

分析过程中，采用参数标准化敏感度曲线图来表明参数的敏感性，以某参数相对于其最优值的变化率为横坐标，确定性系数为纵坐标，来量化参数敏感度。从图3中可以看出基于确定性系数为评价指标时，敏感性参数有：WUM、WM、SM、KG、KKG、L；就蒸散发参数敏感度而言，由图3a可看出，蒸散发参数敏感度排序为WUM、K>WLM、C；就产流量参数敏感度而言，由图3b可看出，产流量参数敏感度排序为WM>B>IMP；就水源划分参数敏感度而言，由图3c可看出，水源划分参数敏感度排序为SM、KG>KSS、EX；就汇流参数敏感度而言，由图3d可看出，汇流参数敏感度排序为KKG、L>CS、KKSS。

3.2.2 以洪峰相对误差为目标函数的参数敏感性分析

分析过程中，同样采用参数标准化敏感度曲线图来表明参数的敏感性，以某参数相对于其最优值的变化率为横坐标，洪峰相对误差为纵坐标，来量化参数敏感度。从图4可以看出基于洪峰流量相对误差为评价指标时，敏感性参数有：SM、CS、KKSS、KKG；就蒸散发参数敏感度而言，由图4a可看出，蒸

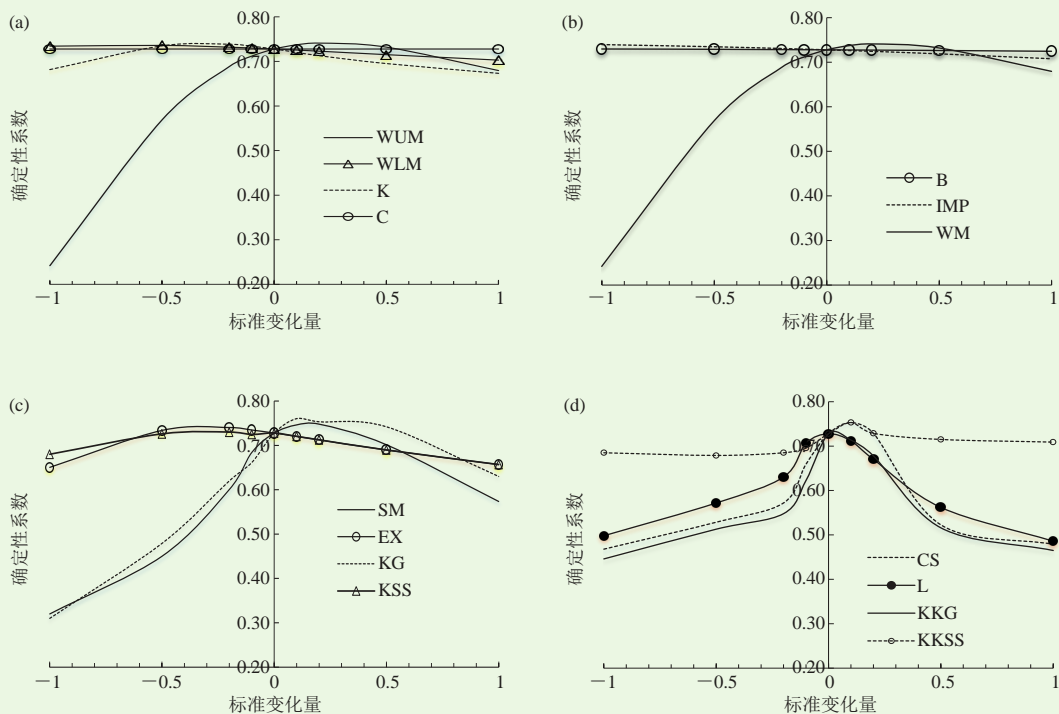


图3 目标函数为确定性系数时模型参数敏感度曲线

(a) 蒸散发参数; (b) 产流参数; (c) 水源地参数; (d) 汇流参数

Fig. 3 Model parameter sensitivity curve when the objective function is deterministic coefficient
(a) evapotranspiration parameters, (b) runoff parameters, (c) water source parameters, (d) confluence parameters

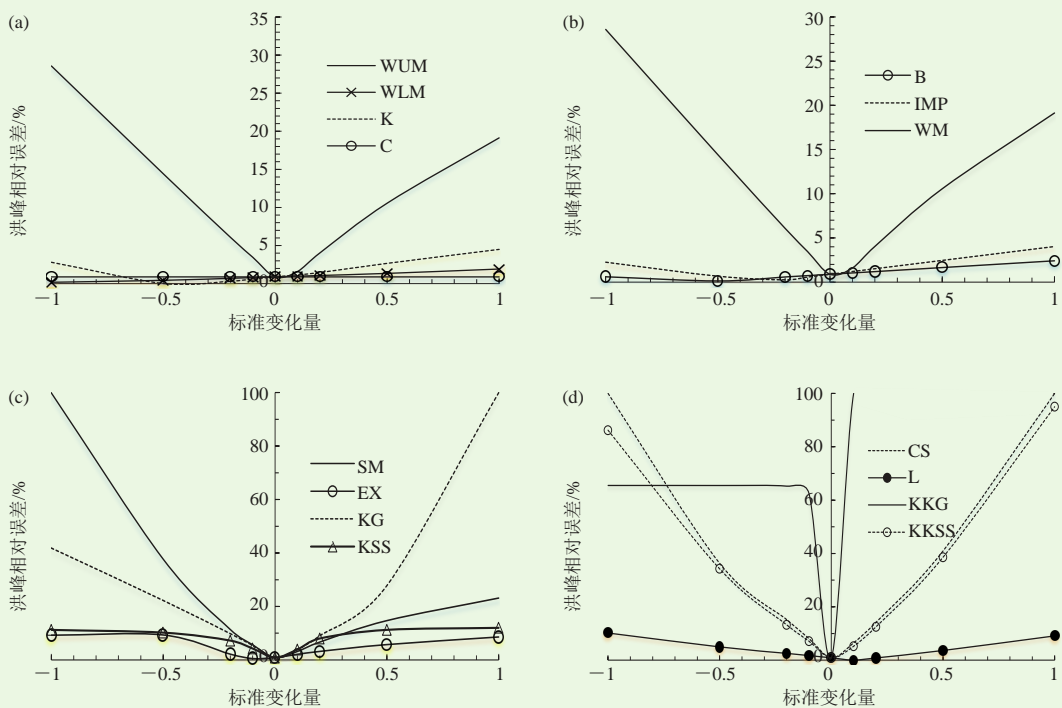


图4 目标函数为洪峰相对误差时模型参数敏感度曲线

(a) 蒸散发参数; (b) 产流参数; (c) 水源地参数; (d) 汇流参数

Fig. 4 Model parameter sensitivity curve when the objective function is the relative error of flood peak
(a) evapotranspiration parameters, (b) runoff parameters, (c) water source parameters, (d) confluence parameters

散发参数敏感度排序为WUM、K>WLM、C；就产流量参数敏感度而言，由图4b可看出，产流量参数敏感度排序为WM>IMP>B；就水源划分参数敏感度而言，由图4c可看出，水源划分参数敏感度排序为SM、KG>KSS、EX；就汇流参数敏感度而言，由图4d可看出，汇流参数敏感度排序为CS、KKSS>KKG、L。

3.2.3 以洪峰峰现时差为目标函数的参数敏感性分析

分析过程中，同样采用参数标准化敏感度曲线图来表明参数的敏感性，以某参数相对于其最优值的变化率为横坐标，洪峰峰现时差为纵坐标，来量

化参数敏感度。从图5中可以看出基于洪峰流量相对误差为评价指标时，敏感性参数有：L、CS、KG、KKG。就蒸散发参数敏感度而言，由图5a可看出，蒸散发参数对峰现时间敏感度较差，排序为WLM、K>WUM、C；就产流量参数敏感度而言，由图5b可看出，产流量参数对峰现时间敏感度较差，排序为WM、IMP、B；就水源划分参数敏感度而言，由图5c可看出，水源划分参数KG对峰现时间敏感，敏感度排序为KG、KSS、SM、EX；就汇流参数敏感度而言，由图5d可看出，汇流参数对峰现时间较为敏感，

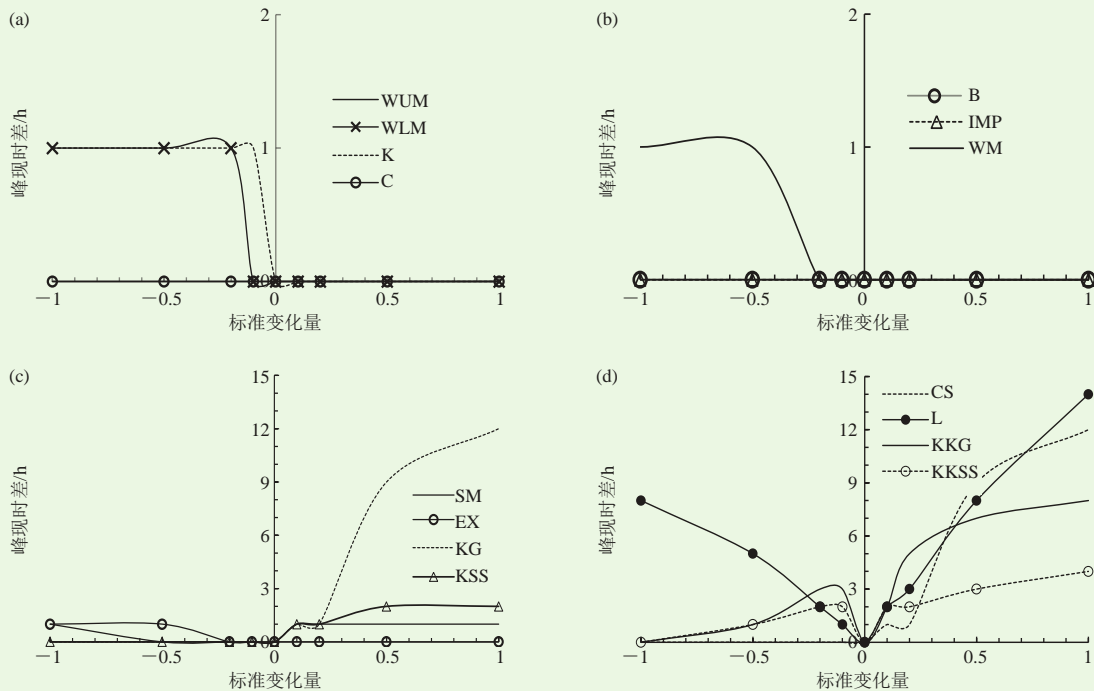


图5 目标函数为峰现时差时模型参数敏感度曲线

(a) 蒸散发参数；(b) 产流参数；(c) 水源地参数；(d) 汇流参数

Fig. 5 Model parameter sensitivity curve when the objective function is the peak happening time difference (a) evapotranspiration parameters, (b) runoff parameters, (c) water source parameters, (d) confluence parameters

排序为L、CS、KKG、KKSS。

3.3 参数敏感性结果分析

从上述分析可知，模型参数对不同的评价指标表现出了不同的敏感度，结果存在不确定性，具体如下：基于确定性系数为评价指标时，敏感性参数有：WUM、WM、SM、KG、KKG、L；基于洪峰相对误差为评价指标时，敏感性参数有：SM、CS、KKSS、KKG；基于峰现时差为评价指标时，敏感性参数有：L、CS、KG、KKG。综上所述，新安江水文模型在该流域模型的敏感性参数为WUM、WM、SM、CS、L、KG、KKG、KKSS，不敏感性参数为B、K、IMP、C、EX、KSS、WLM。本次模拟试验以次洪模

拟为主，影响计算次洪径流总量的主要因素除降雨外是流域初始含水量参数（WM、WUM等），但当已确定的情况下，可通过调整水源的比重来影响计算次洪径流量，可调整SM和KG，两个参数数值越大，地下径流的比重越大，使次洪径流量减少。此外洪峰流量主要由地面径流和壤中流组成，主要取决于SM、KKSS、CS等参数，当SM确定后，调整KKSS和CS等参数，尤其CS是对洪峰起着很大的作用。河网回流滞时参数L主要影响流量过程整体的形态，尤其是峰现时间。

4 结论

本文以湖北省香溪河上游的古洞口水库为例，结

合水库流域暴雨洪水过程，选取新安江水文模型，利用水文模型开展了该流域水文模拟试验及其参数敏感性分析，主要结论如下。

1) 新安江水文模型洪水预报试验结果表明，流域洪水过程模拟及验证试验的合格率及效率系数满足水文预报规范标准，通过水文模型模拟试验所率定的参数可用于水文预报与水文模拟试验。

2) 模型参数对不同的评价指标表现出了不同的敏感度，结果存在不确定性，具体如下：基于确定性系数为评价指标时，敏感性参数有：WUM、WM、SM、KG、KKG、L；基于洪峰相对误差为评价指标时，敏感性参数有：SM、CS、KKSS、KKG；基于峰现时差为评价指标时，敏感性参数有：L、CS、KG、KKG。该新安江水文模型在该流域模型的敏感性参数为WUM、WM、SM、CS、L、KG、KKG、KKSS，不敏感性参数为B、K、IMP、C、EX、KSS、WLM。

3) 通过古洞口水库流域水文模拟试验及参数敏感性分析，确定关键敏感性参数，分清不敏感参数，

为模型参数率定提供参考依据。需要指出的是，随着水文模型以及数学技术的不断发展，基于各种数学理论参数敏感性分析方法不断得到研究应用，进一步优化模型结构、降低参数率定的复杂性。

参考文献

- [1] 张洪刚, 郭生练, 王才君, 等. 概念性流域水文模型参数优选技术研究. 武汉大学学报: 工学版, 2004, 37(3): 18-22.
- [2] 李向阳. 水文模型参数优选及不确定性分析方法研究. 大连理工大学, 2005.
- [3] 王文川, 程春田, 邱林, 等. 新安江模型参数有效优化及不确定性评估. 中国工程科学, 2010, 12(3): 100-107.
- [4] 田雨, 雷晓辉, 蒋云钟, 等. 水文模型参数敏感性分析方法研究评述. 水文, 2010, 30(4): 9-12.
- [5] 曹飞凤, 张世强, 许月萍, 等. 基于SCEM-UA算法和全局敏感性分析的水文模型参数优选不确定性研究. 中山大学学报: 自然科学版, 2011, 50(2): 120-126.
- [6] 宋霖云, 张利平, 李武阶, 等. 水文模型参数优选方法比较与参数敏感性分析. 水电能源科学, 2011, 29(4): 25-27.
- [7] 郝改瑞, 李抗彬, 李智录, 等. 新安江模型参数变化对流域降雨径流过程的影响分析. 水资源与水工程学报, 2012, 23(5): 127-129.
- [8] 彭涛, 王俊超, 唐志鹏, 等. 基于水文模拟的中小流域不同时间尺度临界雨量计算分析. 暴雨灾害, 2017, 36(4): 365-372.
- [9] 赵人俊. 流域水文模拟. 北京: 水利电力出版社, 1984: 5-8.
- [10] 赵人俊, 王佩兰. 新安江模型参数的分析. 水文, 1988, 8(6): 2-9.
- [11] 水利部水利信息中心. SL25—2000 水文情报预报规范. 北京: 科学出版社, 2010: 18-22.

气象水文雨量资料共享显示一张图

■ 岳阳

湖北省气象局与长江水利委员会、湖北省水利厅合作，完成了气象水文共享雨量站点“一张网”，建立了统一、实时同步、高效访问的共享数据库，实现了部门双方雨量资料显示“一张网”，并开发了统一的应用终端，基本实现了“一网、一库、一图、一终端”的目标。其中“湖北气象水文雨量一张图分析

系统”和“长江流域气象水文雨量资料一张图分析系统”在湖北省气象局和省水利厅、省气象局和长江委之间正式投入使用，对提高局地强对流天气预警精度，更加有效地捕捉和精准防范“坨子雨”发挥了重要作用。

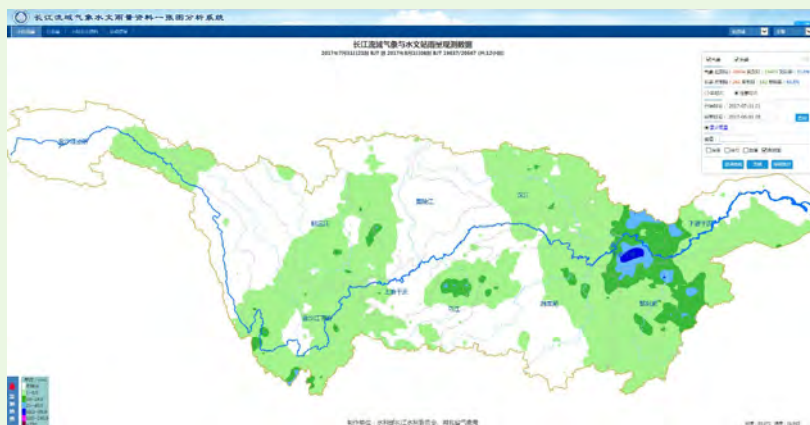


图 长江流域气象水文雨量资料一张图分析系统

(作者单位: 湖北省气象局)