

考虑预见期加权的 GFS 降雨预报可利用性分析研究

卢迪, 彭勇*, 王本德, 袁晶瑄, 周惠成

(大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要: 在统计美国全球预报系统(GFS)恒仁流域的数值降雨预报与实际降雨结果的基础上,考虑不同预见期加权,分析了预见期为1~3 d的降雨预报的可利用性.分析结果表明,考虑预见期加权的GFS降雨预报较不考虑预见期加权的预报可利用性明显提高.该方法对水库调度运行有重要的实际指导意义.

关键词: 恒仁流域;GFS降雨预报;加权;可利用性

中图分类号: P338 **文献标志码:** A

0 引言

近年来,随着气象预报技术水平的不断提高,气象预报逐渐成为指导水库调度的重要手段.其中降雨数值预报是研究水库调度理论方法的重要信息,也是提高水库防洪安全和水资源利用效率的有效措施,其精度的高低成为水库能否应用预报信息进行调度决策的关键.在国外,Collischonn等把从巴西天气预报中心获得的降雨数值预报应用于巴拉那依巴河流域的径流预报^[1];Cuo等对降雨数值预报应用于短期、中期径流预报的研究也做了详细的讨论^[2].在国内,郝春洋等在渭河流域对数值天气预报模式WRF的降雨预报进行检验,并与分布式水文模型耦合,说明采用数值气象模式和分布式水文模型相耦合进行流域水文预报是可取的^[3].此外,未来24 h、48 h的降雨预报信息精度较高并已应用于水库实际调度^[4].美国全球预报系统(global forecast system,GFS)发布的未来10 d降雨预报信息也已应用于旬径流预报中^[5],并指导了水电站的发电调度和实时跨流域引水决策^[6-8].由于前期(当前预报时刻之前)GFS发布的滚动预报信息也有一定的参考利用价值,本文首先对GFS滚动发布的某日多个预报值进行加权计算得到相应的加权降雨预报值,然后对加权降雨预报各量级下的实际降雨进行频率分

析,对预见期为1~3 d的降雨预报信息可利用性进行研究.

1 研究背景

1.1 美国全球预报系统简介

GFS是美国研制的全球预报系统,每日格林威治时间00、06、12和18时定时向公众滚动更新发布未来16 d的降雨数值预报信息,如图1所示.GFS降雨预报模型分为两部分:一部分为预报精度较高的未来1~8 d降雨预报模式,以6 h

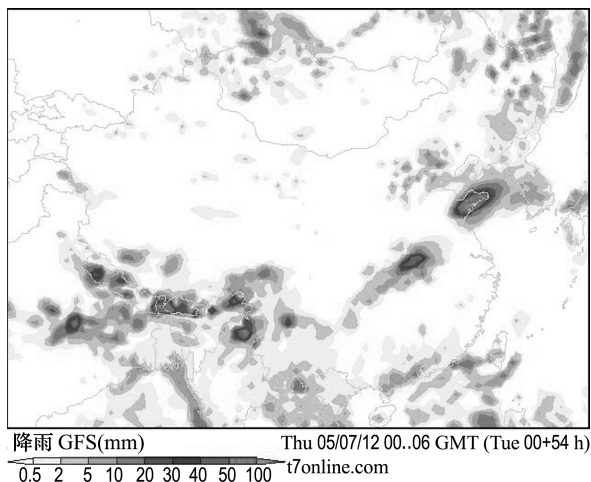


图1 GFS预报降雨的等雨面

Fig. 1 Rainfall iso-surface forecasted by GFS

收稿日期: 2012-08-03; 修回日期: 2013-07-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51109025);水利部公益性行业科研专项经费资助项目(201001024);教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100041120004);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT13JS06).

作者简介: 卢迪(1987-),男,博士生;彭勇*(1979-),男,博士,副教授,E-mail: pengyong@dlut.edu.cn.

为间隔进行数值预报；另一部分为精度较低的未
来 9~16 d 降雨预报模式，以 12 h 为间隔进行数
值预报。信息通过天气在线网站处理后，每张预报
图片由约 3 万个网格点组成，并定时向公众发布。
发布者如实地声明：“降水图每 6 h 更新一次，显
示东亚地区模式计算的降水分布情况。降水区用
等雨量线标出。然而，目前模式算出的降水还不
是很可靠。如果比较一下模式结果和降水实测值，
会发现模式结果只能算得上降水的一级近似值。不
过，这幅图对于专业气象预报员却是个重要参
考。”

1.2 典型流域及样本选择

浑江流域位于东经 124°43′~126°50′，北纬
40°40′~42°15′，流域面积 14 776 km²。浑江梯级
电站以发电为主，兼有防洪、灌溉、养殖及旅游等
综合利用效益，已按自上而下的开发次序先后建
成了桓仁、回龙山、太平哨等水库。首级龙头桓仁
水库具有不完全年调节性能，回龙山及太平哨均
为日调节水库。桓仁坝址控制流域面积 10 364
km²，占浑江流域面积的 70%，多年平均流量 142
m³/s。流域多年平均年降水量 860 mm，5~10 月
降雨量占全年降雨量的 75%以上。浑江流域各雨
量站位置如图 2 所示。

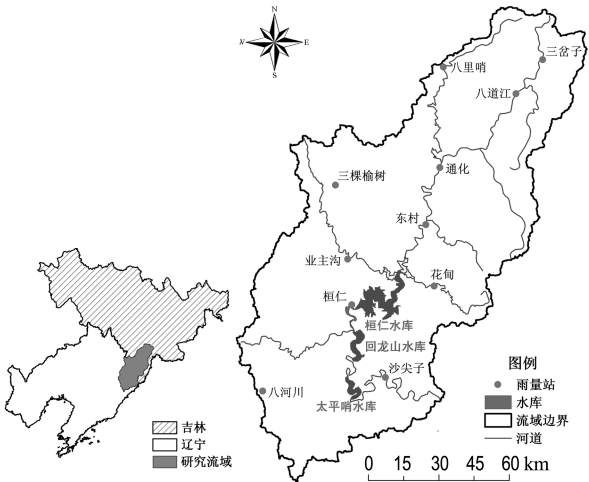


图 2 浑江流域各雨量站位置

Fig. 2 The position of each rainfall station in Hunjiang basin

首先通过课题组自主开发的降雨数据自动获
取程序^[9]，计算雨量站所处坐标与相邻等雨量线
之间的垂直距离^[10]，读取桓仁以上流域 10 个雨
量站的降雨预报数据；然后按照面积加权方法计
算桓仁水库以上流域的 GFS 预报面雨量。由于

GFS 下载及读数的时间滞后当日发布时刻 5 h 左
右，即每日北京时间 8 时发布的未来 1~16 d 预
报信息可在 14 时读取。考虑信息利用的时效性，
本文统计 2001 年至 2011 年 5~10 月 GFS 北京
时间每日 8 时发布的次日 8 时开始的未来 1~7 d
的降雨预报数据作为研究样本。

2 不同预见期预报值加权方法

2.1 加权方法

已知降雨预报值 $P_{t,j}(t = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, 7)$ ， $P_{t,j}$ 表示当前预报时间为 t 时发布的
未来第 j 日的降雨量值， n 为发布预报的次数， j 为
预见期。设加权后预报降雨为 $P'_{t,j}(t = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, 7)$ ，则预见期为 1 d 的加权降雨
量为

$$P'_{t,1} = \sum_{m=0}^6 P_{t-m,1+m} \omega_{1+m} \tag{1}$$

其中 $t - m$ 表示当前预报时间 t 的前 m 日；
 $P_{t-m,1+m}(m = 0, 1, 2, \dots, 6)$ 为不同预见期对同一
天的预报值； $\omega_{1+m}(m = 0, 1, 2, \dots, 6)$ 是预见期为
1 + m 日的降雨量权重。

同理，预见期为 2 d 的加权降雨量为

$$P'_{t,2} = \sum_{m=0}^5 P_{t-m,2+m} \omega_{2+m} \tag{2}$$

预见期为 3 d 的加权降雨量为

$$P'_{t,3} = \sum_{m=0}^4 P_{t-m,3+m} \omega_{3+m} \tag{3}$$

权重的选择为多目标决策问题，本文采用遗
传算法进行权重优选。

2.2 基于遗传算法的权重优选

遗传算法作为一种全局优化搜索算法^[11]，因
其简单通用已广泛用于不同领域。本文的权重优
选目标为

$$\begin{aligned} &\min f(w_i) \\ &\text{s. t. } 0 \leq w_i \leq 1; i = 1, 2, \dots, q \\ &w_1 > w_2 > w_3 > \dots > w_q \end{aligned}$$

其中 $w_1, w_2, w_3, \dots, w_q$ 表示待优选的权重变量。
基于文献[12] 统计分析，随预见期延长，降雨预
报信息的精度在逐步降低，所以本文采用递减的
权重约束，即 $w_1 > w_2 > w_3 > \dots > w_q$ 。

(1) 初始种群设定

设待优选权重 $w_1 = 1, w_2 = w_1 x_1, \dots, w_i = w_{i-1} x_{i-1}, \dots, w_q = w_{q-1} x_{q-1}, x_{i-1}$ 为递减系数，取值
范围[0, 1]。

(2) 适应度函数

$f(w_1, w_2, w_3, \cdots, w_q) = aF_1 + bF_2 + cF_3 \quad (4)$

$F_1 = \sum_{t=1}^n |R(t) - F(t)|; t = 1, 2, \cdots, n \quad (5)$

$F_2 = \sum_{t=1}^n |\log [R(t)/F(t)]| / \sum_{t=1}^n \log [R(t)];$
 $t = 1, 2, \cdots, n \quad (6)$

$F_3 = \sum_{t=1}^n |R(t) - F(t)| / \sum_{t=1}^n R(t); t = 1, 2, \cdots, n \quad (7)$

式中: a 、 b 和 c 为多目标函数的权重; $R(t)$ 表示实测降雨量; $F(t)$ 表示加权后预报降雨量。 F_1 控制预报降雨量与实际的误差; F_2 的取值主要反映预报小雨的误差; F_3 的取值主要反映预报大雨的误差。为了控制各个子目标函数的量级一致,经试算,给定 $a = 1$ 、 $b = 500$ 、 $c = 6\,000$ 。

(3) 选择、交叉、变异

根据适应值的排序,选择适应度较大的个体对应的 $x_1, x_2, \cdots, x_{q-1}$ 替代适应度小的个体对应的 $x_1, x_2, \cdots, x_{q-1}$;采用单点交叉,对经过选择后得到的母体随机配对,并随机指定 $x_1, x_2, \cdots, x_{q-1}$ 的交叉点;变异方法采用非均匀变异。

(4) 优选权重

给定进化代数 100,种群数 500,选择概率 0.7,交叉概率 0.7,变异概率 0.2,计算结果如表 1~3 所示。

表 1 未来第 1 d 预报值的优选权重

Tab.1 Optimized weight of the first day forecast value

预见期/d	权重	预见期/d	权重
1	0.747	5	0
2	0.129	6	0
3	0.124	7	0
4	0		

表 2 未来第 2 d 预报值的优选权重

Tab.2 Optimized weight of the second day forecast value

预见期/d	权重	预见期/d	权重
2	0.584	5	0.049
3	0.270	6	0.047
4	0.050	7	0

表 3 未来第 3 d 预报值的优选权重

Tab.3 Optimized weight of the third day forecast value

预见期/d	权重	预见期/d	权重
3	0.471	6	0.132
4	0.133	7	0.130
5	0.133		

3 可利用性分析

3.1 预报准确率分析

把加权前后不同预报量级下的预报准确率进行比较,预报准确率计算公式为

$\eta = (s/r) \times 100\% \quad (8)$

式中: r 为发布预报次数; s 为实际值落在预报等级区域内的次数,其中预报降雨等级分为五级:[0,5)、[5,10)、[10,20)、[20,25)、 ≥ 25 。计算结果如表 4 所示。

表 4 加权前后预报各个量级准确率比较

Tab.4 Comparison of the accurate rate of each forecast level before and after weighting

预报量级	准确率/%								
	未来第 1 d			未来第 2 d			未来第 3 d		
	加权	未加权	提高	加权	未加权	提高	加权	未加权	提高
[0,5)	93.12	92.29	0.83	90.96	89.84	1.12	89.73	87.85	1.88
[5,10)	23.39	22.91	0.48	16.48	15.53	0.95	17.51	16.78	0.73
[10,20)	30.25	26.92	3.33	29.20	23.21	5.99	26.37	21.93	4.44
[20,25)	22.73	17.39	5.34	5.88	0	5.88	7.69	6.25	1.44
≥ 25	53.57	40.63	12.94	50.00	39.39	10.61	50.00	36.11	13.89

由表 4 可以看出,加权后前两个量级的预报准确率提高仅 1%左右,说明 GFS 对小量级的降雨预报比较稳定。而后三个量级的预报准确率明显提高,尤其是 ≥ 25 量级,预报准确率提高 10%以上,即考虑预见期加权方法是可行的。

3.2 可利用性标准

对于考虑权重后的预报信息尚需要解决可利用性标准的问题,即还需给出预报域值实际发生概率的标准值,来认定预报方法的可利用性。

基于满足桓仁水库调度方式可识别的原则,把[0,5)、[5,10)合并为一级,[20,25)、 ≥ 25 合并为一级,即把降雨量划分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 3 个等级,各级值域分别为[0,10)、[10,20)、 ≥ 20 。Ⅰ级按照系统要求桓仁以保证出力方式发电,Ⅱ级桓仁以补偿下游回龙山发电;Ⅲ级桓仁以装机出力发电。

各预报量级下发生实际降雨的频率分布规律服从皮尔逊Ⅲ型分布^[13],如图 3 所示。若预报的量级范围为 $[a_1, a_2]$,则实际降雨发生在 $[a_1, a_2]$ 的概率为 $P[a_1] \sim P[a_2]$,同理,实际降雨发生在 $[a_1 - k, a_2 + k]$ 的概率为 $P[a_1 - k] \sim P[a_2 + k]$ 。例如:未来 24 h 预报量级为[10,20]时,由概率分布可以计算出 $P[10, 20] = 28.70\%$, $P[5, 25] = 61.37\%$ 。

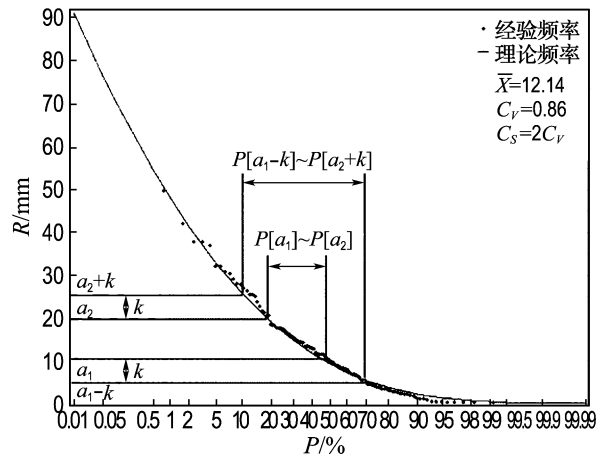


图 3 桓仁流域未来第 1 d 预报[10,20]的实际降雨频率分布适线图

Fig.3 The first day rainfall forecast [10,20] suitable line graph of actual rainfall frequency distribution in Huanren basin

同理,给定预报水平的期望概率 S ,可以反推域值的上下限,如假设 $S=60\%$,则可计算出相应的取值范围为[5. 2,24. 9]. 即可以直观看出各预报量级下满足 S 的实际降雨域值的范围,给水库实际操作提供参考.

考虑目前调度决策对降雨预报水平 S 的期望,首先设第 I 级的预报域值的实际发生的概率期望 $S>90\%$,对第 II、III 级分别考虑 $S=60\%$, $65\%,70\%,75\%$ 四种情况,然后反求取值上下限,最后基于合理性与可用性原则,给出可利用性标准. 结果如表 5、6 所示,其中 y_t 为预报降雨量级取值, y_r 为实际发生降雨量级取值.

表 5 预报 I 级满足某一概率的 y_r 取值范围(单位:mm)

Tab.5 Range to meet the probability of y_r under forecast level I (unit:mm)

预见期/d	y_t /mm	y_r /mm	$S/\%$
1	[0,9.9]	[0,9.9]	93.20
2	[0,9.9]	[0,9.9]	91.80
3	[0,9.9]	[0,9.9]	90.63

由表 5 可见,对量级 I, y_r 取值范围不但没变,而且实际发生的概率很高,达到了 $90.63\%\sim 93.20\%$,即考虑加权的未来 1~3 d 的预报量级 I 是可利用的.

由表 6 可见,对预报量级 II、III, S 由 60% 到 75% , y_r 取值范围明显扩大,主要原因是 GFS 在预报大量级降雨时还具有一定的不确定性,但对

调度决策还是具有一定的参考价值.

表 6 预报 II、III 级满足某一概率的 y_r 取值范围(单位:mm)

Tab.6 Range to meet the probability of y_r under forecast levels II and III (unit:mm)

预报量级	预见期/d	y_t /mm	y_r /mm			
			$S=60\%$	$S=65\%$	$S=70\%$	$S=75\%$
II	1	[10,19.9]	[5.2,24.9]	[4.5,25.6]	[3.8,26.3]	[3.1,27.0]
	2	[10,19.9]	[4.2,25.9]	[3.5,26.6]	[2.9,27.2]	[2.2,27.9]
	3	[10,19.9]	[3.7,26.4]	[3.0,27.1]	[2.4,27.7]	[1.8,28.3]
III	1	≥ 20	>18.1	>16.2	>14.3	>12.4
	2	≥ 20	>10.6	>8.9	>7.2	>5.7
	3	≥ 20	>9.9	>8.2	>6.6	>5.1

4 结 论

考虑不同预见期加权的降雨预报值可利用性明显提高,量级 I 下预报概率高于 90% ,即考虑加权的预报量级 I 对水电站短期优化调度具有很重要的参考价值. 预报量级为 II、III 时,虽然还具有一定的不确定性,但对调度决策也具有一定的参考价值.

参考文献:

[1] Collischonn W, Morelli Tucci C E, Clarke R T, et al. Medium-range reservoir inflow predictions based on quantitative precipitation forecasts [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, **344**(1-2):112-122.

[2] Cuo L, Pagano T C, Wang Q J. A review of quantitative precipitation forecasts and their use in short- to medium-range streamflow forecasting [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2011, **12**(5): 713-728.

[3] 郝春沅,贾仰文,王浩. 气象水文模型耦合研究及其在渭河流域的应用[J]. 水利学报, 2012, **43**(9): 1042-1049.

HAO Chun-feng, JIA Yang-wen, WANG Hao. Atmospheric and hydrological models' coupling and application in flood forecasting of the Weihe Basin [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, **43**(9):1042-1049. (in Chinese)

[4] 周惠成,李丽琴,胡军,等. 短期降雨预报在汛限水位动态控制中的应用[J]. 水力发电, 2005, **31**(8):22-26.

ZHOU Hui-cheng, LI Li-qin, HU Jun, et al. Dynamic control of reservoir normal level in flood season based on short-term rainfall forecast [J]. *Water Power*, 2005, **31**(8):22-26. (in Chinese)

- [5] 梁国华,王国利,王本德,等. GFS 可利用性研究及其在旬径流预报中的应用[J]. 水电能源科学, 2009, **27**(1):10-13,43.
LIANG Guo-hua, WANG Guo-li, WANG Ben-de, *et al.* Usability analysis of global forecasting system (GFS) and its application in ten-day runoff forecasts [J]. **Water Resources and Power**, 2009, **27**(1):10-13,43. (in Chinese)
- [6] 王国利,梁国华,娄莉莉,等. GFS 降雨预报信息用于实时跨流域引水决策可行性初析[J]. 南水北调与水利科技, 2010, **8**(1):58-60.
WANG Guo-li, LIANG Guo-hua, LOU Li-li, *et al.* Study on GFS forecasted rainfall statistic and its feasibility in real-time inter-basin water transfer system operation decision making [J]. **South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology**, 2010, **8**(1):58-60. (in Chinese)
- [7] 王国利,彭 勇,何 斌,等. GFS 降雨预报在大伙房水库实时跨流域调水决策的应用研究[J]. 水资源与水工程学报, 2010, **21**(2):1-4.
WANG Guo-li, PENG Yong, HE Bin, *et al.* Application of GFS precipitation forecast to real time decision making in inter-basin water transfer of Dahuo-fang reservoir [J]. **Journal of Water Resources and Water Engineering**, 2010, **21**(2):1-4. (in Chinese)
- [8] 周惠成,唐国磊,王 峰,等. GFS 未来 10 天数值降雨预报信息的可利用性分析[J]. 水力发电学报, 2010, **29**(2):119-126.
ZHOU Hui-cheng, TANG Guo-lei, WANG Feng, *et al.* Analysis on the exploitability of medium-term quantitative precipitation forecasts by global forecasting system [J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2010, **29**(2):119-126. (in Chinese)
- [9] 唐国磊,周惠成,田 力,等. GFS 降水预报信息服务系统设计与实现[J]. 人民长江, 2008, **39**(18):20-23,100.
TANG Guo-lei, ZHOU Hui-cheng, TIAN Li, *et al.* Design and realization of information service system for GFS precipitation forecast [J]. **Yangtze River**, 2008, **39**(18):20-23,100. (in Chinese)
- [10] 王 峰. 水电站水库优化调度模型及 GFS 预报信息的应用研究[D]. 大连:大连理工大学, 2007.
WANG Feng. Study on the optimal operation model of hydropower station reservoir and the application of GFS information [D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [11] Holland J H. **Adaptation in Natural and Artificial Systems** [M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
- [12] 习树峰. 跨流域调水预报优化调度方法及应用研究[D]. 大连:大连理工大学, 2011.
XI Shu-feng. Research on inter-basin water transfer forecast optimization operation methods and its application [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [13] 王本德,周惠成,程春田,等. 可利用丰满气象台短期降雨预报时效分析[J]. 水利管理技术, 1994(4):41-46.
WANG Ben-de, ZHOU Hui-cheng, CHENG Chun-tian, *et al.* Time-based analysis of available Fengman meteorological short-term rainfall prediction [J]. **Water Management Technology**, 1994(4):41-46. (in Chinese)

Availability analysis of global forecast system forecasting rainfall considering forecast horizon weights

LU Di, PENG Yong*, WANG Ben-de, YUAN Jing-xuan, ZHOU Hui-cheng

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the statistical analysis of global forecast system(GFS) forecasting rainfall and actual rainfall in Huanren basin, considering different forecast horizon weights, the availability of GFS rainfall forecast in a period of 1-3 days is analyzed. The computing results show that the availability of GFS rainfall forecast considering forecast horizon weights is obviously higher than that without considering forecast horizon weights. The proposed method has a great significance for reservoir operation.

Key words: Huanren basin; GFS rainfall forecast; weights; availability