

基于GFS的飞来峡流域水文集合预报

叶爱中 段青云 徐静 马凤 邓敦学

(北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 全球变化研究协同创新中心, 北京 100875)

摘要: 传统水文预报都是确定性的预报, 没有充分利用气象预报信息, 并且未给出预报的不确定性信息。分析了美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 提供的全球预报 (Global Forecast System, GFS) 降水数据; 然后通过集合预报前处理, 将预报降水输入到分布式水文模型; 最终给出水文集合预报。通过对比分析, 表明采用了降水预报数据的水文集合预报要比传统水文预报准确率高。采用全球天气预报信息进行水文集合预报是发展水文预报的有效途径。

关键词: 全球降水预报GFS, 水文预报, 集合, 飞来峡

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.03.005

The Hydrological Ensemble Prediction Based on GFS in Feilaixia Basin

Ye Aizhong, Duan Qingyun, Xu Jing, Ma Feng, Deng Xiaoxue

(College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, and Joint Center for Global Change Studies, Beijing 100875)

Abstract: Traditional hydrological prediction is a type of deterministic prediction, which does not make full use of the weather forecast information, or give forecast uncertainty. This paper analyzed the precipitation hindcast data provided by the Global Forecast System (GFS) in National Centers for Environmental Prediction (NCEP); and then the hindcast data was processed by the ensemble pre-processor in order to drive the hydrological model. Finally, we got the hydrological ensemble prediction. The results show that the hydrological ensemble prediction is better than the traditional ensemble streamflow prediction (ESP). The hydrological ensemble prediction on GFS is an effective way of developing hydrological prediction.

Keywords: GFS, hydrological prediction, ensemble, Feilaixia basin

0 引言

水文集合预报是一种既可以给出确定性预报值, 又可以提供预报值不确定性信息的概率预报方法^[1]。水文集合预报的发展得益于气象集合预报的发展^[2]。1963年, Lorenz^[3-4]首先发现大气具有高度非线性的混沌特性。Epstein^[5]提出了动力随机预报理论, 之后Leith^[6]又提出了“蒙特卡罗”预报理论, 单一确定性预报发展为集合概率预报^[7], 奠定了水文气象集合预报的发展基础。水文集合预报实验计划^[8-9] (Hydrological Ensemble Prediction Experiment, HEPEX) 集中了欧美国家与中国的水文集合预报研究

成果, 促进了水文集合预报理论与应用的发展。ESP (Ensemble Stream Prediction) 是经典的水文集合预报方法之一。ESP的基本思想是计算出流域土壤的初始状态后, 采用多年历史同期观测的气象强迫集合作为未来气象强迫输入 (如降水、气温和潜在蒸发) 来预测未来河道的流量^[10]。

虽然最近几年数值天气预报取得了很大的发展, 降水预报的准确率也有很大的提高, 但仍难以满足水文预报的需求。水文集合预报前处理可以将天气/气候预报输出结果处理成水文模型的输入, 从而提高降水与气温的预报准确率。目前前处理方法有: 完美后预报方法 (Perfect Prognosis) ^[11], 模型输出统计法 (Model Output Statistics, MOS) ^[12-13], 贝叶斯方法等。Schaaake等^[14]也提出了基于典型事件的集合预报前处理方法EPP (Ensemble Pre-Processor)。本文将采用EPP方法进行降水的集合预报前处理。

在中国, Zhao^[15]、Liu^[16]等已经在淮河流域分析

收稿日期: 2014年7月21日; 修回日期: 2014年9月3日

第一作者: 叶爱中 (1978—), Email: azye@bnu.edu.cn

资助信息: 国家自然科学基金项目 (41475093), 中央高校基本科研业务费专项资金 (2013YB32), 国家科技支撑计划课题 (2013BAB05B04)

过美国国家环境预报中心（NCEP）提供的全球预报（GFS）信息精度，说明GFS预报具有一定的准确率，尤其在未来3d内的预报准确率较高。最近NCEP将GFS空间分辨率提高到了1.0°，部分数据达到0.5°。所以需要进一步分析GFS的预报产品，并研究应用到水文预报中的效果。

本文旨在研究基于NCEP提供的GFS的水文集合预报，主要的科学问题是：（1）GFS数据在飞来峡流域的预报质量如何？（2）如何消除GFS数据的系统偏差及给出带有不确定性信息的集合？（3）矫正后的GFS降水是否能够显著提高水文预报准确率？主要的工作是：（1）GFS降水预报的前处理；（2）基于降水预报的水文集合预报及同ESP方法对比。

1 降水前处理与水文模型简介

1.1 降水预报前处理

天气事件并不是某个时间点孤立的，而是一个天气系统在某个时间段内产生的事件。数值天气预报可以精确地预报某个天气系统的发生，但难以准确定量预报降水事件发生的精确时间与地点。为了充分利用数值天气预报的有用信息，Schaake等^[14]提出了典型事件模型。所谓典型事件即是从多年历史观测与历史预报中找出统计相关性高的事件。如未来6h的预报降水与观测降水就有很好的相关性，未来6h降水即可作为一个典型事件。未来第14天的预报降水同观测降水相关性很差，就不适合作为典型事件。但未来第6~14天的累积预报降水同观测降水相关性高，即可作为典型事件建模。典型事件是指定的某个时间段内气象信息均值（如1d，3d或者30d平均降水）。典型事件模型集合前处理的思想是通过历史观测与历史后预报的气象要素建立条件概率函数，然后计算未来气象要素预报对应的可能观测值。基于典型事件的集合预报前处理模型框图见图1。具体计算方法可以参考参考文献^[14-16]。

1.2 分布式时变增益水文模型

时变增益水文模型（Time Variant Gain Model, TVGM）是Xia^[17]1989—1995年提出的。后经一些研究^[18-20]多次改进成分布式时变增益水文模型（Distribute Time Variant Gain Model, DTVGM）。本文作者结合黄河、海河等流域对产汇流模块进行了发展^[21-24]。

本研究中，产流发生在每个水文单元（子流域或网格）上，产流模型在垂直方向上分三层：地表以上，表层土壤，深层土壤。地表以上产生地表径流，表层土壤产生壤中流，深层（中间层与潜水层）土壤

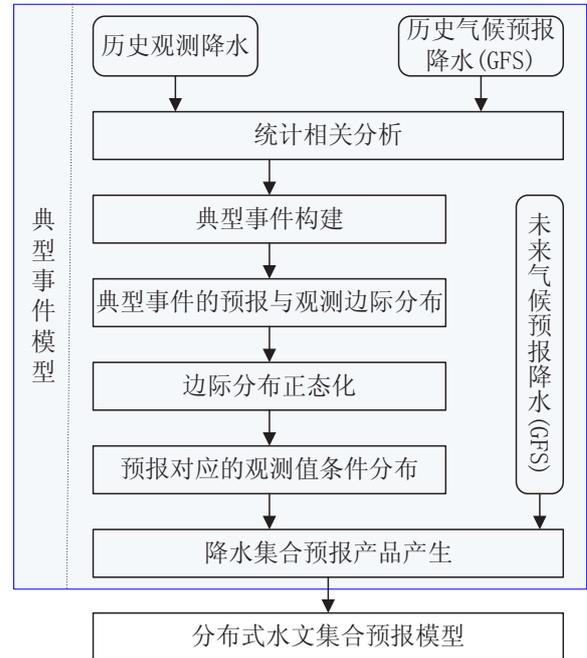


图1 典型事件模型框图

主要产生基流（地下径流）。

DTVGM产流模型是一水量平衡模型。实际计算中通过迭代计算出蒸散发、土壤含水量、地表径流、壤中流与基流。

水量平衡方程为：

$$P_i + W_i = W_{i+1} + R_s + E_i + R_{ss} + R_g \quad (1)$$

式中， P 为降雨（mm）， W 为土壤含水量（mm）， E 为蒸散发（mm）， R_s 为地表径流（mm）， R_{ss} 为壤中流（mm）， R_g 为地下径流（mm）， i 为时段数。

将蒸发、地表水产流、壤中水产流、地下水产流模型代入水量平衡方程中可得：

$$P_i + AW_i = AW_{i+1} + g_1 \left(\frac{AW_{u_i}}{WM_u \cdot C_j} \right)^{g_2} P_i + AW_{u_i} \cdot K_r + Ep_i \cdot K_e + AW_{g_i} \cdot K_g \quad (2)$$

式中， AW 为子流域土壤湿度（mm）； AW_u 为子流域上层土壤湿度（mm）； AW_g 为子流域下层土壤湿度（mm）； WM_u 为上层土壤田间持水量（mm）； u 为英文 up 简写，表示表层土壤； g_1 与 g_2 是时变增益因子的有关参数（ $0 < g_1 < 1$ ， $1 < g_2$ ），其中 g_1 为土壤饱和和后径流系数， g_2 为土壤水影响系数； C 为覆被影响参数； K_r 为土壤水出流系数； K_g 为地下水出流系数； K_e 为蒸散发系数。

汇流在水文模型中同样重要，尤其在分布式水文模型中，汇流模型是否合理与优劣直接影响整个水文模型的模拟效果。分布式时变增益模型中结合动力网络的理论，将河网建立成无尺度网络。分成坡面与河道两部

分来进行汇流计算^[24-25]。在每个节点(产流单元)内用运动波计算,节点间通过网络连接汇流计算。

1.3 验证指标

对预报或模拟结果的检验采用相关系数 R 、NASH效率系数 NSE 与相对偏差 $Bias$ 三个指标进行验证。其中NASH效率系数计算公式如下(相关系数与偏差属于常见指标,此处不再列出计算公式):

$$NSE = \left[1 - \frac{\sum (q_s - q_o)^2}{\sum (q_o - \bar{q}_o)^2} \right] \quad (3)$$

式中, q_o, q_s, \bar{q}_o 为实测、模拟值和实测均值。NSE是NASH效率系数,其值范围为0~1,0表示模拟效果很差,1表示模拟同观测一致。

2 飞来峡集合预报分析

2.1 研究区与数据简介

飞来峡流域是珠江流域的支流,位于广州市的上游,承担着广州市防洪与供水的重要作用。飞来峡水库坝址控制集水面积34097km²,年降水量在1400~2500mm之间,多年平均流量1100m³/s^[26],流域位置见图2。

观测数据主要是气象数据与流量数据。气象数据采用1956—2013年日降水与气温数据,在飞来峡流域有7个气象站。流量数据采用流域出口1981—2010年日流量数据。1981—1998年为水库建库前横石站资料,和飞来峡位于同一位置。站点位置也见图2。

未来预报降水数据采用NCEP发布的全球预报产品GFS。GFS提供了1984年12月1日到现在的后预报与预报的全球降水数据。数据空间分辨率为1°。预见期为未来17d。前三天时间步长是3h,三天后时间步长为6h。GFS网格点信息亦见图2。

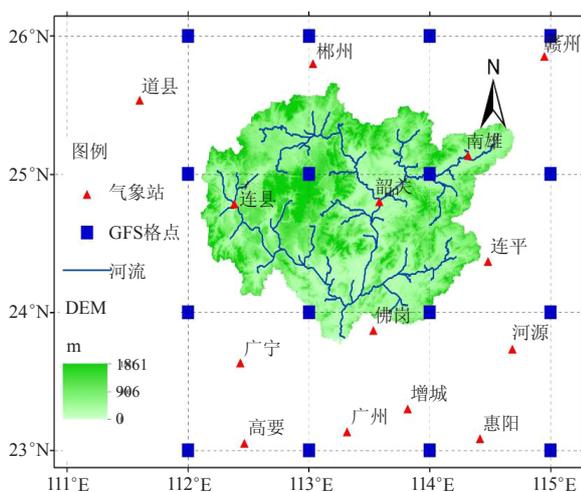


图2 流域及站点空间位置

美国地质调查局(USGS)的最新DEM数据SRTM(Shuttle Radar Topography Mission),分辨率为3"。通过DEM提取了流域的坡度、坡向、流向、水流累积、地形指数、河网等信息,采用了100km²的阈值,将飞来峡流域划分成142个子流域。

2.2 结果与分析

首先对降水预报进行集合预报前处理。集合预报前处理模型的参数主要是0降水判别阈值,此处设置为0.97,即所有观测降水数据的97%频率对应降水量定义为0降水。另外降水预见期采用了GFS数据的前8d。图3给出了GFS预报降水在一年中每日同观测降水的相关系数,采用的数据是1986—2008年全流域的平均观测降水与预报降水。其计算方法是将1986—2008年中每天预报及对应的观测降水计算相关系数,由于数据年数有限,所以每天前后各取7d作为缓冲区,保证了统计的相关系数可靠性。由图3可以看出前三天的相关系数能够超过0.6,说明模型前三天的降水预报准确率相对较高。冬季与春季的相关系数要比夏季高。

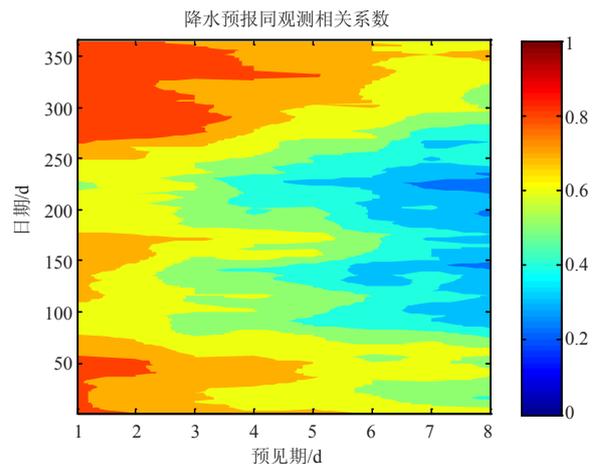


图3 飞来峡流域日降水不同日期相关系数

虽然GFS预报的降水同观测降水相关系数较高,但仍存在系统偏差(图4—5)。所以需要进行集合预报前处理,消除系统偏差才能用于驱动水文模型。图4给出的是多年月平均降水过程。从图中可以看出经过集合预报前处理后的集合平均降水同观测降水过程基本一致,而GFS直接模拟的降水同观测降水有一定系统偏差。图5是日降水过程的验证指标,计算方法是将观测同模拟降水的时间序列进行统计。从图5可以看出,通过集合前处理后的指标均明显优于原始GFS预报。但随着预见期的增加,相关系数与NASH效率系数都下降。相对偏差GFS原始预报略有增加,而集合前处理后的降水没有明显增加。

准备好观测与预报降水数据后,选取1986—2008

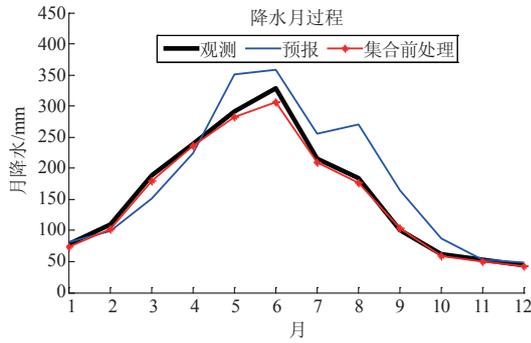


图4 飞来峡流域多年月平均降水过程

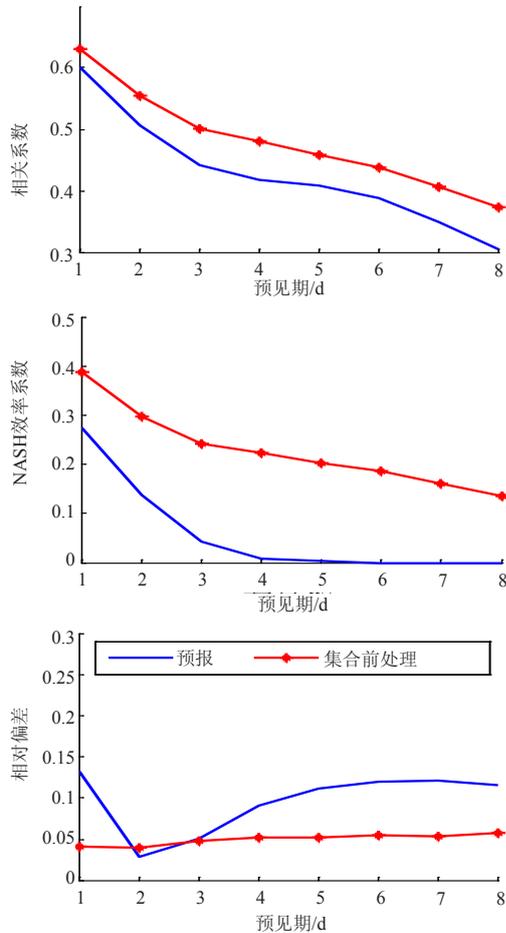


图5 飞来峡流域日降水过程验证指标

年观测降水与流量数据对水文模型进行参数拟定。水文模型主要参数分为产流参数和汇流参数。产流敏感参数是公式(2)中的 g_1 与 g_2 ，拟定后的 g_1 为0.7， g_2 为1.1。汇流参数是河道糙率系数此处为0.05。模型的模拟验证指标分别是：效率系数0.828，相关系数0.913，相对偏差-0.037。说明水文模型能够很好地模拟飞来峡流域降水径流过程。图6给出了1993年的日降水径流观测/模拟过程，可以看出，模型能够很好地拟合出洪水发生的日过程，洪峰及峰现时间模拟同观测一致。

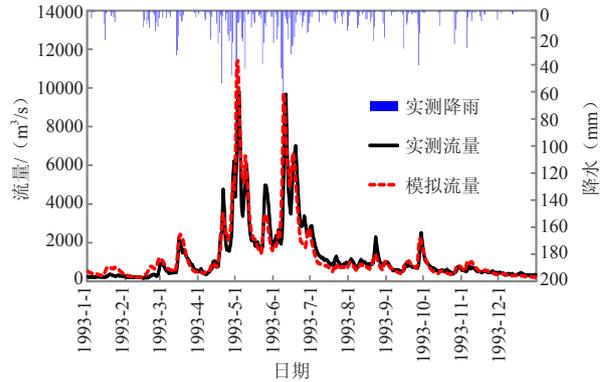


图6 飞来峡流域降水径流观测/模拟过程

水文集合预报的优点是采用了包含降水预报不确定性信息的集合降水当作水文模型的输入。此处以1993年为例，将集合前处理后的多个预报降水集合成员输入到水文模型，将得到一个预报流量的集合。图7给出了飞来峡流域1993年预报未来第1天流量过程线，列举了1%概率、5%概率及99%概率对应的流量过程，在1%与99%区间就是预报未来流量过程可能发生的区间。由于对未来一天的预报不确定性较小，所以该区间也会较小，随着预见期的增加该区间将增大。

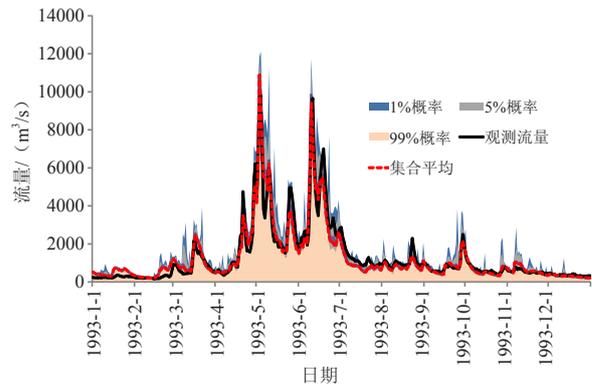


图7 飞来峡流域集合预报过程

在对未来的预报中，我们不可能得到未来的观测降水。ESP方法是采用历史典型年或者多年平均降水代替未来降水，而集合预报方法是将模式预报的未来降水通过集合前处理后作为水文模型的输入。短期水文集合预报一个最重要的目的是预报洪水。将飞来峡流域多年日降水通过频率分析，10%频率对应的日降水为14mm，将超过14mm降水导致的流量进行验证分析，图8给出了ESP算法与GFS降水输入算法对应效率系数与相关系数。可以看出，采用了GFS降水预报信息对流量的预报准确率要明显比高，尤其在第2—4天，提高的精度显著。第1天由于产生流量过程受历史降水影响较大，是否采用预报降水对未来1d预报流量影响较小。第4天后，由于降水预报的精度也不太

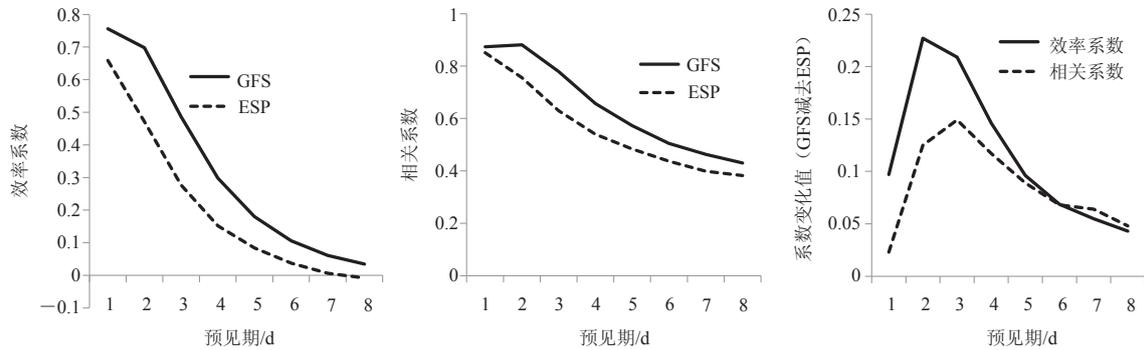


图8 降水频率大于10%降水产生的流量在不同预见期验证指标比较

高，所以采用GFS降水与ESP方法结果的指标相近。

3 结论

随着天气集合预报的发展，高质量的数值天气预报对水文预报的发展起到了推动作用。但数值天气预报给出的降水预报准确率相对于水文预报的需求仍有差距，不能直接应用于水文预报。本文介绍了一种集合预报前处理方法，并将通过集合前处理的降水预报驱动分布式水文模型，从而产生水文集合预报。

通过在飞来峡流域的实例验证表明：（1）集合预报前处理消除了大部分的降水预报的系统偏差，大大提高了降水预报的精度，并给出了包含降水预报不确定性信息的降水集合预报；（2）相对于ESP方法，采用集合前处理后的降水预报驱动水文模型可以大大提高流量预报的精度，并给出了水文流量集合预报；

（3）相对于单值预报，采用降水预报的水文集合预报将提供更多、更高准确率的信息，并延长了水文预报的预见期。

不过，有关基于数值天气预报的水文集合预报的研究与应用仍处于初级阶段，需要进一步研究。

参考文献

- [1] 丛树铮. 水科学技术中的概率统计方法. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 徐静, 叶爱中, 毛玉娜, 等. 水文集合预报研究与应用综述. 南水北调与水利科技, 2014, 12(1): 93-98.
- [3] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1963, 20: 130-141.
- [4] Lorenz E N. The predictability of a flow which possesses many scales of motion. *Tellus*, 1968, 21(3): 289-307.
- [5] Epstein E S. Stochastic Dynamic Prediction. *Tellus*, 1969, 21(6): 739-759.
- [6] Leith C. Theoretical skill of monte carlo forecasts (stochastic atmospheric processes). *Monthly Weather Review*, 1974, 102: 409-418.
- [7] Toth Z, Zhu Y, Marchok T. The use of ensembles to identify forecasts with small and large uncertainty. *Weather and Forecasting*, 2001, 16(4): 463-477.
- [8] Thielen J, Schaake J, Hartman R, et al. Challenges and progress of the hydrological ensemble prediction experiment (HEPEX) following the third HEPEX workshop held in Stresa 27 to 29 June 2007. *Atmospheric Science Letters*, 2008, 9(2): 29-35.
- [9] 陆桂华, 吴娟, 吴志勇. 水文集合预报试验及其研究进展. *水科学进展*, 2012, 23(5): 728-734.
- [10] 李岩, 胡军, 王金星, 等. 河流集合预报方法(ESP)在水资源中长期预测中的应用研究. *水文*, 2008, 28(1): 25-27.
- [11] Klein W H, Lewis B M, Enger I. Objective prediction of Five-day Mean Temperatures During Winter. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1959, 16: 672-682.
- [12] Glahn H R, Lowry D A. The Use of Model Output Statistics (MOS) in Objective Weather Forecasting. *Journal of Applied Meteorology*, 1972, 11(8): 1203-1211.
- [13] Glahn B, Peroutka M, Wiedenfeld J, et al. MOS Uncertainty Estimates in an Ensemble Framework. *Monthly Weather Review*, 2009, 137(1): 246-268.
- [14] Schaake J, Demargne J, Hartman R, et al. Precipitation and temperature ensemble forecasts from single-value forecasts. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss*, 2007, 4: 655-717.
- [15] Zhao L, Bao H, Liu Y, et al. Application of a developed ensemble model based on single numerical weather prediction in the Huaihe River // EGU General Assembly Conference Abstracts, 2013.
- [16] Liu Y, Duan Q, Zhao L. Evaluating the predictive skill of post-processed NCEP GFS ensemble precipitation forecasts in China's Huai River basin. *Hydrological Processes*, 2013, 27(1): 57-74.
- [17] Xia J. A system approach to real time hydrological forecasts in watersheds. *Water International*, 2002, 27(1): 87-97.
- [18] 王纲胜, 夏军, 谈戈, 等. 潮河流域时变增益分布式水循环模型研究. *地理科学进展*, 2002, 21(6): 573-582.
- [19] Xia J, Wang G, Tan G, et al. Development of distributed time-variant gain model for nonlinear hydrological systems. *Science in China Ser D Earth Sciences*, 2005, 48(6): 713-723.
- [20] 夏军, 王纲胜, 吕爱锋, 等. 分布式时变增益流域水循环模拟. *地理学报*, 2003, 58 (5): 789-796.
- [21] 夏军, 叶爱中, 王纲胜. 黄河流域时变增益分布式水文模型(I)——模型的原理与结构. *武汉大学学报(工学版)*, 2005, (6): 10-15.
- [22] 叶爱中, 夏军, 王纲胜. 基于数字高程模型的河网提取及子流域生成. *水利学报*, 2005, 36(5): 531-537.
- [23] Ye A, Duan Q, Chu W, et al. The impact of the South-North Water Transfer Project (CTP)'s central route on groundwater table in the Hai River basin, North China. *Hydrological Processes*, 2013, doi: 10.1002/hyp.10081.
- [24] 叶爱中, 夏军, 王纲胜. 基于动力网络的分布式运动波汇流模型. *人民黄河*, 2006, 2: 26-28.
- [25] Ye A, Duan Q, Zhan C, et al. Improving kinematic wave routing scheme in Community Land Model. *Hydrology Research*, 2013, 44: 886-903.
- [26] 虞云飞. 飞来峡水库水文预报浅析. *广西水利水电*, 2002, 3: 36-39.