

基于陆面水文耦合模型的淮河流域水文模拟与极值分析

杨传国¹ 林朝晖² 郝振纯¹ 余钟波¹ 刘少锋³

(1 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;

2 中国科学院大气物理所国际气候与环境科学中心, 北京 100029; 3 中山大学大气科学学院, 珠海 519082)

摘要: 陆面水文耦合有助于完整理解区域陆面水循环过程及其反馈作用, 揭示极端水旱灾害对气候变化的响应机制。本文利用一个陆面水文耦合模型, 结合淮河流域水文站的实测流量资料, 首先验证了该模式在淮河流域的适用性; 在此基础上开展了连续56 a的长时间数值模拟, 考察了模式对淮河流域水文过程及水文极值的模拟能力。基于淮河干流蚌埠站逐月模拟量和实测流量的时间序列, 采用Pearson-III型分布计算该站不同重现期的设计流量, 结果表明两者均能得到较为合理的设计流量, 但在极大值区, 实测流量的拟合精度比基于模式模拟流量序列得到的结果更优。

关键词: 陆面水文耦合模型, 水文模拟, 流量, 极值分析, 淮河流域

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.05.015

Hydrological Simulation and Extremes Analysis over the Huaihe River Basin Based on a Coupled Land Surface Hydrology Model

Yang Chuanguo¹, Lin Zhaohui², Hao Zhenchun¹, Yu Zhongbo¹, Liu Shaofeng³

(1 State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing, 210098

2 ICCES, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029 3 School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Zhuhai, 519082)

Abstract: Coupled land surface hydrology is helpful to understand the land hydrological processes and their feedbacks at regional scale, investigate the response of water disasters to climate change. In this paper, a coupled land surface hydrology model is applied for the hydrological simulation over the Huaihe River Basin, with the model being evaluated firstly using the station observation, and a 56-year long term simulation is then conducted for extreme hydrological event analysis. According to the time series of simulated and observed streamflow at Bengbu Station of the Huaihe River Basin, Pearson-III distribution method is used to calculate the designed streamflow values at Bengbu corresponding to five different return periods. The results show that reasonable designed streamflow can be obtained with both the simulated and observed streamflow time series, but for the extremely high values, the fitting accuracy by using observed streamflow is better than the result based on the simulated streamflow series.

Keywords: coupled land surface hydrology model, hydrological simulation, streamflow, extreme value analysis, the Huaihe River Basin

0 引言

水循环是国际地圈—生物圈计划 (IGBP) 提出的地球系统中三个关键性的、最需要加强研究的科学问题之一, 也是全球能量与水循环试验计划

(GEWEX)、水循环生物圈方面计划 (BAHC) 等众多国际计划的重点研究内容^[1-3]。未来地球计划 (FE) 中国委员会将水资源、粮食、能源供给安全及自然生态系统保护列为我国需要优先解决的、与可持续能力建设相关的重大问题之一^[4]。在当前全球变化的背景下, 流域水循环特征发生了改变, 极端水文事件具有发生频率增加、强度增大的趋势, 造成了严重的社会经济损失^[5-6]。

陆面水文模型在水文气象业务应用与科学研究中具有广阔的应用前景。实现大气—陆面—水文耦合是完整认识地气系统水循环过程、模拟地气水循环的历

收稿日期: 2020年5月22日; 修回日期: 2020年8月8日

第一作者: 杨传国 (1981—), Email: cgyang@hhu.edu.cn

资助信息: 公益性行业 (气象) 科研专项项目 (GYHY201406021);

水文水资源与水利工程科学国家重点实验室自主研

究项目 (20185044012); 中央高校业务经费项目

(2018B55114); 国家自然科学基金 (41471016)

史演变、预估水循环未来变化的重要手段，可以提高大气模式和水文模型的预报精度，延长水文水资源预测的预见期，并可用于研究水循环过程及其对气候变化与人类活动的响应^[7-10]。高时空精度的陆面水文模型也是实时洪水预报预警、气象水文灾害防治、水资源可持续利用的重要工具，直接服务于水资源供需矛盾的缓解及区域经济社会可持续发展的战略决策^[11-13]。

基于水文模型的流域水文水循环过程的模拟和预测研究已有很多^[14-15]，但总体说来，这些水文模型的模拟，大都采用降水、温度作为大气驱动输入，忽视陆面能量过程的详细描述以及模块间的水分交换作用，难以反映陆面—水文过程之间的反馈作用，因此陆面水文耦合模型的发展及其应用，已成为现阶段水文水循环流域研究的热点^[16-17]。常用的途径包括：加强陆面模式对产流、汇流和地下水等水文过程描述，或者直接将分布式水文模型的部分模块与陆面模式相耦合建立陆面水文耦合模型^[18-20]。然而，早期陆面模式和水文模型由不同的学科所创立，二者关注的科学问题和应用领域有所差别，侧重点不同，研究尺度存在差异。近年来，国内外许多研究借鉴多学科知识，致力于拓展和改进陆面模式、水文模型，实现陆面—水文模型的耦合。

淮河流域地处我国南北气候过渡带，是GEWEX计划典型研究区之一，历史上极端水旱灾害突出。本文将选取淮河流域为研究流域，利用一个陆面水文的耦合模型开展该流域的长时间序列连续模拟，旨在分析淮河流域极端水文事件的变化规律及模式模拟能力。

1 陆面水文耦合模型介绍

1.1 模型结构

陆面模式和水文模型是描述地球陆地表面植被、土壤、积雪、河流湖泊、地下水等陆面子系统水分能量循环的主要工具。陆面模式通常计算陆地表层水分和能量垂向平衡，而水文模型在产流、汇流和地下水过程等方面的描述更为合理^[21-22]。陆面水文模型LSX-HMS通过陆面模式LSX和水文模型HMS之间主要交换变量的尺度转换，实现了二者的单向耦合，进而反馈到气候模式中，该模型在我国和北美洲得到了成功应用^[13, 21]。

本文采用的陆面水文双向耦合模型，是在LSX-HMS的基础上，消除了模型间的尺度差异和通过尺度转换进行模型间单向耦合的方法，提出了土壤水和浅层地下水的耦合方案，建立了基于物理过程双向耦合、系统集成的陆面水文耦合模型^[22-24]。目前耦合

模型分辨率有10和20 km两组分辨率，包括植被、积雪、河流、土壤和地下水等五个物理模块，其中植被、积雪和土壤模块的计算方法主要来自陆面模式，而河流和地下水模块的计算来自水文模型。通常在一些陆面模式中，土壤水运动方程的下边界水分通量为零边界条件或自由透水边界条件。而耦合模型根据Darcy定律计算下边界水分通量，其中的土壤水势梯度由土壤底层和地下水位之间的水势梯度决定。据此计算的下边界水分通量可为正值或负值，反映了土壤水和地下水之间的水分双向补给关系。

1.2 模型参数与驱动数据

陆面水文耦合模型参数库包括陆面模式参数和水文模型参数两部分。陆面模式参数主要包括下垫面覆被类型和不同层次的土壤质地等。下垫面覆被类型采用1 km分辨率的全球地表覆盖数据AVHRR^[25]进行插值聚类，生成模型所需的下垫面覆被类型数据，其物理特性采用Dorman-Sellers参数化方案，将全球植被划分为12种主要类型，并将冬小麦作为一种特殊植被类型进行了显式考虑。土壤质地数据包括每层的砂粒含量和黏粒含量，用于确定孔隙度、饱和水力传导度等土壤水力学参数；根据标准化全球土壤质地数据库采用距离权重方法插值得到模型所需分辨率数据。

水文模型参数主要用于地表汇流和地下水等过程的计算，包括流域范围、地表高程、高程标准差、河道深度、初始水面高程等数字流域参数，以及含水层厚度、水力传导度和孔隙度等水文地质参数。数字流域参数的数据源采用HYDRO1K数据库提供的1 km DEM、1 km网络累积流，以及USGS 30s水体标示数据。经投影校正匹配后升尺度生成模型网格分辨率，根据相应的参数计算方法得到数字流域参数^[26]。水文地质参数根据我国1:400万地质类型数据库插值设定得到。

耦合模型的气象驱动变量包括地表气温、比湿、气压、风场、降水、云量、辐射等。为了保障陆面水循环要素的模拟精度，降雨采用了全国气象站逐日降水观测资料，而其他气象要素均采用NCEP/NCAR再分析数据。

2 陆面水文耦合模型在淮河流域的率定

为考察陆面水文耦合模型对流域水循环过程的模拟能力，本文选取淮河流域作为研究流域，探讨该模型对长期陆面水文模拟的精度和稳定性。淮河流域面积27万km²，流域西部、西南部及东北部为山区丘陵区，其余为广阔的平原，并伴有众多的湖泊和洼地。流域气候温和，年平均气温为11~16℃，多年平均降

水量约为920 mm。境内人口密度高，日照时间长，光热资源充足，气候温和，是国家重要的商品粮棉油基地。

特殊的地形和地理位置，加之东亚季风特性，使得该流域历史上极端洪水和干旱灾害事件频繁，年内亦经常出现旱涝交替或南涝北旱现象。近年来在全球变暖的背景下，淮河流域极端事件有增多增强的趋势^[27]，如2001年的旱灾和2003年的特大洪水灾害，严重威胁着流域水资源安全和工农业经济的可持续发展。

选择1980—1987年为模型率定时段，利用上述构建的陆面水文耦合模型开展淮河流域陆面水文过程模拟分析，模型网格分辨率为10 km。采用皮尔逊相关系数（ R ）和纳什效率系数（ NSI ）两个统计指标检验耦合模型在研究区不同水文站点的流量模拟精度。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\left[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0.5}}, \quad (1)$$

$$NSI = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}, \quad (2)$$

式中， P_i 和 O_i 分别是第 i 个时段的模型模拟值和观测

值， \bar{P} 和 \bar{O} 分别是模拟序列和观测序列的平均值， N 是样本总数。

根据蚌埠、鲁台子和王家坝三个干流主要水文站的实测逐日、逐月河道径流量与模拟结果对比，结果如表1所示。对于逐日流量模拟结果，蚌埠站和鲁台子站的相关系数接近0.90，效率系数在0.80左右，而王家坝站的相关系数和效率系数分别为0.720和0.506；在逐月尺度上检验上述水文站的流量模拟结果，统计指标均有所提高。王家坝站的模拟精度低于其他两个水文站，其原因可能与该子流域面积较小，模型采用的10 km网格分辨率不足以描述气象输入数据和下垫面特征的空间差异性有关。总体上，耦合模型在该流域具有较好的模拟性能。

表1 主要水文站流量模拟精度统计表
Table 1 Statistics of streamflow simulation at key hydrology stations

	逐日序列			逐月序列		
	蚌埠	鲁台子	王家坝	蚌埠	鲁台子	王家坝
相关系数 R	0.893	0.899	0.720	0.934	0.948	0.858
效率系数 NSI	0.797	0.805	0.506	0.866	0.892	0.704

同时，耦合模型能够给出整个研究流域每个网格的河道流量，如图1所示1981和1984年淮河年平均河道流量模拟值的空间分布，枯水年1981年各个河段的平均流量显著低于洪水年1984的流量值。以洪水年为

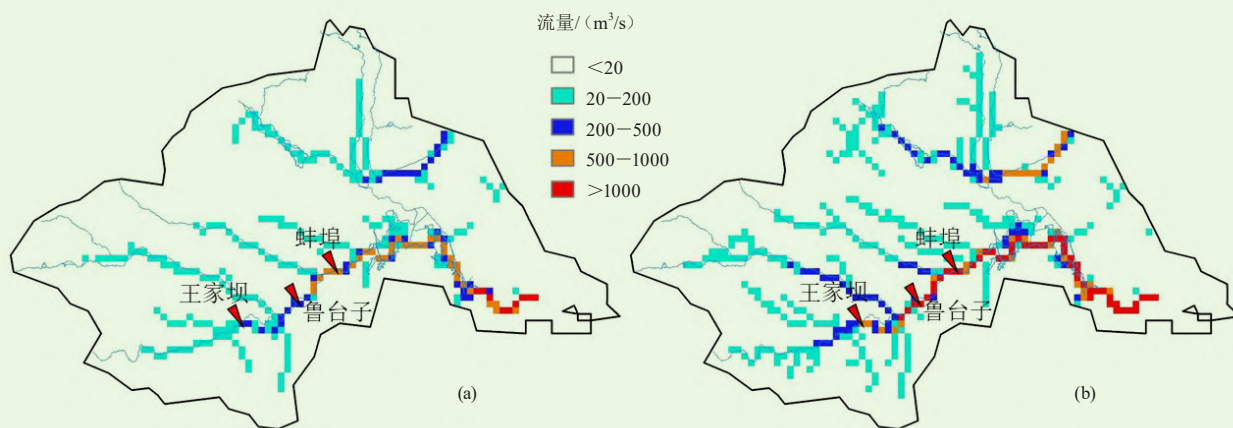


图1 淮河流域模拟的年平均流量空间分布图
(a) 1981年；(b) 1984年

Fig. 1 Spatial patterns of the simulated annual averaged streamflows in the Huaihe River Basin
(a) 1981; (b) 1984

例，淮河流域多数支流和河流上游的年平均流量大多小于500 m³/s，干流王家坝以下的中下游河道年平均流量大于1000 m³/s。沂沭河下游河段的年平均流量在500~1000 m³/s。

3 淮河流域水文模拟与极值分析

3.1 模型对流域月平均流量的模拟

以实测降水数据和NCEP再分析资料为驱动资料，采用上述陆面水文耦合模型开展56 a长时间连

续性模拟得到蚌埠站流量结果，如图2所示。研究期内，蚌埠站逐月模拟流量在各个年代均得到较高的精度与实测流量过程吻合较好，能够准确反映不同时期重要旱涝年份的径流过程，比如1954、1963、1982、1991、2003年等洪水过程，以及1953、1966、1978、1981、2001年等干旱年份的径流过程。

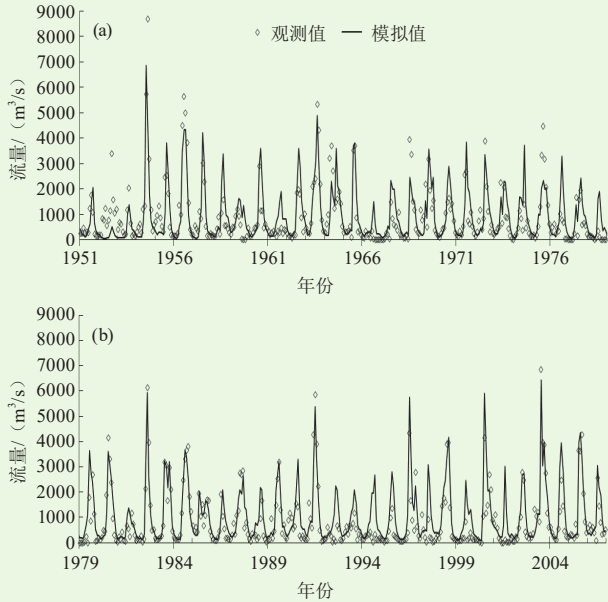


图2 蚌埠站逐月模拟流量结果

Fig. 2 Monthly simulated streamflow of the Bengbu Station

3.2 流量极值频率分析

降雨洪水极值事件通常会造严重的生命和财产损失，分析极值事件的发生概率，可为流域防洪、水库建设运营和水资源管理规划等提供设计标准和技术保障，也是检验模型性能的一个重要指标。我国水文计算规范规定，水文频率曲线线型采用Pearson-III型分布。考虑到观测值的人类活动影响，以1951—2006年蚌埠站逐月实测流量和模拟流量为依据，采用Pearson-III型分布进行频率拟合，计算不同极值事件发生频率下的蚌埠站流量值。

图3a给出了基于蚌埠站模拟流量序列的P-III型分布拟合曲线，拟合精度较高。发生在1954年7月的淮河流域极端降水洪水事件，蚌埠站月平均模拟流量偏小，但仍是整个模拟流量序列中的最大值，在图中亦有所反映，左侧最大值点处于拟合曲线的下方。1954年夏季的极大值事件发生概率的确定显著影响拟合曲线在大值区的走向。作为对比，图3b给出了基于蚌埠站实测流量序列的P-III型分布。1954年7月的淮河流域极端流量是整个模拟流量序列中的最大值，从图中可以看出该数据点准确的分布在拟合曲线附近，在大值区的拟合精度比基于模拟流量序列得到的结果

更优。

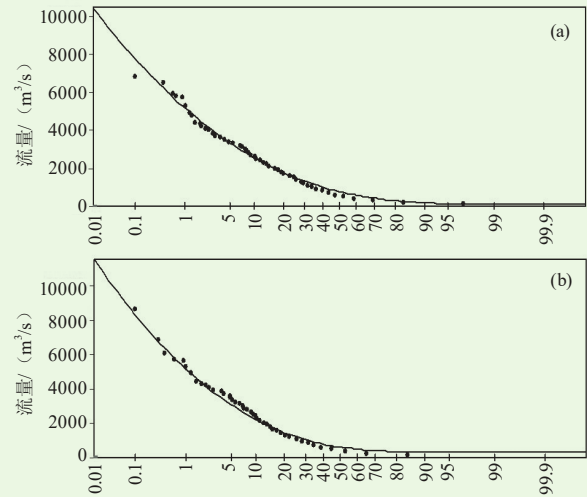


图3 蚌埠站流量频率分布拟合结果

(a) 模拟序列；(b) 实测序列

Fig. 3 Frequency distribution of streamflows at the Bengbu station

(a) simulated series; (b) observed series

根据上述模拟流量和实测流量频率拟合曲线分别计算淮河流域蚌埠站10、20、50、100和200 a等不同重现期下的流量设计值，如图4所示。上述五个重现期下，根据模拟流量序列得到的蚌埠站流量设计值分别为5345.4、6136.2、7184.4、7978.9和8774.6 m³/s；根据实测流量序列得到的蚌埠站流量设计值分别为5403.3、6345.1、7611.0、8580.8和9559.2 m³/s。根据实测值拟合得到的设计值更大，这可能与部分洪水峰值的模拟结果偏小有关。

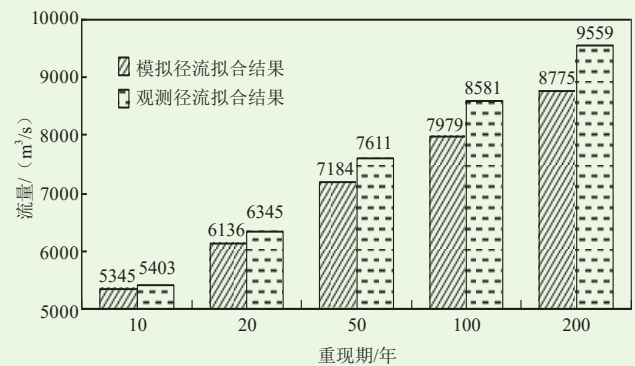


图4 不同重现期的设计流量值

Fig. 4 Designed streamflow values for different return periods

4 结论

陆面过程作为大气模式的下边界条件，是大气过程和陆地水文过程的交界面，陆面水文模型能够更好地解释陆面水循环过程及其反馈作用。本文利用

一个考虑土壤水和浅层地下水双向反馈作用的陆面水文耦合模型, 针对淮河流域对模型进行了适用性评估及率定, 并在此基础上对淮河流域开展了长时间连续模拟。

基于淮河干流主要水文站实测流量的验证表明, 陆面水文耦合模型在淮河流域具有较好的模拟能力, 能够给出流量等变量的合理空间分布。基于陆面水文耦合模型的56 a连续性长期模拟结果, 以及实测的流域流量时间序列, 利用Pearson-III型分布计算了蚌埠站不同重现期的流量设计值, 结果表明在大值区, 实测流量的拟合精度比基于模拟流量序列得到的结果更优。这可能与中华人民共和国成立初期流域降水观测数据较少, 从而导致1954年等洪水年份模拟的径流偏小有关。

本工作仅基于淮河流域的实测流量数据对模型进行比较检验, 未来将进一步结合淮河流域能量与水循环试验(HUBEX)等加密观测数据, 系统评估模拟结果, 继续改进和完善陆面水文耦合模型, 并将其应用于更多的流域开展陆面水热循环及其对气候变化响应的研究, 为深入认识流域水循环机理、应对流域水旱灾害提供重要的科技支撑。

参考文献

- [1] 赵柏林. 全球能量与水循环试验(GEWEX). 气象科技, 1992(2): 18-20.
- [2] Yang X, Lin Z, Dai Y, et al. Validation of IAP94 land surface model over the Huaihe River Basin with HUBEX field experiment data. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, 18(1): 139-154.
- [3] Kleidon A. A basic introduction to the thermodynamics of the Earth system far from equilibrium and maximum entropy production. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2010, 365: 1303-1315.
- [4] 陆大道. “未来地球”框架文件与中国地理科学的发展——从“未来地球”框架文件看黄秉维先生论断的前瞻性. *地理学报*, 2014, 69(8): 1043-1051.
- [5] Nilsson C, Reidy C A, Dynesius M, et al. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, 2005, 308: 405-408.
- [6] Shelton S, Lin Z. Streamflow variability in Mahaweli River basin of Sri Lanka during 1990-2014 and its possible Mechanisms. *Water*, 2019, 11: 2485.
- [7] 杨传国, 林朝晖, 郝振纯, 等. 大气水文模式耦合研究综述. *地球科学进展*, 2007, 22(8): 810-817.
- [8] 占车生, 宁理科, 邹靖, 等. 陆面水文—气候耦合模拟研究进展. *地理学报*, 2018, 73(5): 893-905.
- [9] 林朝晖, 刘辉志, 谢正辉, 等. 陆面水文过程研究进展. *大气科学*, 2008, 32(4): 935-949.
- [10] Dong N, Yu Z, Yang C, et al. Hydrological impact of a reservoir network in the upper Gan River Basin, China. *Hydrological Processes*, 2019, 33:1709-1723.
- [11] Tang W, Lin Z, Luo L. Assessing the seasonal predictability of summer precipitation over the Huaihe River Basin with Multiple APCC Models. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2013, 6(4): 185-190.
- [12] 陈子焯, 林朝晖, 江志红, 等. IAP AGCM 4.1对淮河流域夏季降水的预报技巧评估. *气象科学*, 2018, (4): 489-497.
- [13] 杨传国, 余钟波, 郝振纯, 等. 淮河流域典型洪水年河道流量空间分布的季节特征. *河海大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(1): 33-36.
- [14] 程文飞, 陈军锋, 吴博, 等. HEC-HMS水文模型在圪洞流域洪水模拟中的应用. *水电能源科学*, 2018, 36(8): 52-55.
- [15] Coerver H M, Rutten M M, van de Giesen N C. Deduction of reservoir operating rules for application in global hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22 (1): 831-851.
- [16] Yang Z and Niu G. The versatile integrator of surface and atmosphere processes. Part 1. Model description. *Global and Planetary Change*, 2003, 38: 175-189.
- [17] 高艳红, 程国栋, 崔文瑞, 等. 陆面水文过程与大气模式的耦合及其在黑河流域的应用. *地球科学进展*, 2006, 21(12): 1283-1292.
- [18] 苏凤阁, 郝振纯. 一种陆面过程模式对径流的模拟研究. *气候与环境研究*, 2002, 7(4): 523-531.
- [19] Habets F, Noilhan J, Golaz C, et al. The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area. Part I: Model and database. *Journal of Hydrology*, 1999, 217: 75-96.
- [20] Zeng X, Zhao M, Su B, et al. Simulations of a hydrological model as coupled to a regional climate model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(2): 227-236.
- [21] Yu Z, Pollard D, Cheng L. On continental scale hydrologic simulations with a coupled hydrologic model. *Journal of Hydrology*, 2006, 331: 110-124.
- [22] Yang C, Shao Y, Lin Z, et al. Development of a two-way coupled land surface-hydrology model: method and application. *Proceedings of International Symposium on Climate Change and Water (ISCCCW)*. Nanjing, 2011.
- [23] Li M, Lin Z, Yang C, et al. Application of a coupled land surface-hydrological model to flood simulation in the Huaihe River Basin of China. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2014, 7(6): 493-498.
- [24] 唐伟, 林朝晖, 杨传国, 等. 基于陆面水文耦合模式CLHMS的淮河流域水文过程的模拟评估及其不确定性分析. *气候与环境研究*, 2014, 19(4): 463-476.
- [25] Hansen M C, DeFries R S, Townshend J R G, et al. Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21: 1331-1364.
- [26] 杨传国, 余钟波, 林朝晖, 等. 大尺度分布式水文模型数字流域提取方法研究. *地理科学进展*, 2007, 26(1): 68-76.
- [27] 杨传国, 陈喜, 张润润, 等. 淮河流域近500年洪旱事件演变特征分析. *水科学进展*, 2014, 25(4): 503-510.