

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.04.002

雅鲁藏布江奴下水文站以上流域 水文过程及其对气候变化的响应

徐冉,铁强,代超,胡宏昌,田富强

(清华大学水利水电工程系,北京 100084)

摘要:以雅鲁藏布江奴下水文站以上流域为研究对象,针对缺资料流域的水文计算和预测问题,采用流域水文模型 THREW,用地面气象观测、遥感植被覆盖和积雪面积等资料,基于断面水文监测数据对模型进行率定,应用 CMIP5 数据对径流演变进行预估。结果表明:对于雅鲁藏布江奴下水文站以上流域,THREW 模型对 1991—1995 年率定期月径流模拟的纳什效率系数为 0.75,对 1996—2000 年验证期月径流模拟的纳什效率系数为 0.76;IPCC AR5 所设置在 CO₂ 排放量最大的情况下,径流明显增加。

关键词:缺资料流域;代表性单元流域;气候变化;径流演变;流域水文过程模拟;雅鲁藏布江奴下水文站以上流域

中图分类号:P339

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2015)04-0288-06

Study on hydrological process in upper basin of Brahmaputra River from Nuxia Hydrological Station and its response to climate change

XU Ran, TIE Qiang, DAI Chao, HU Hongchang, TIAN Fuqiang

(Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Considering the hydrological calculation and prediction of ungauged basins, a distributed hydrological model, the THREW model, was adopted to study the upper basin of the Brahmaputra River from the Nuxia Hydrological Station. Surface meteorological observation, remote sensing of vegetation cover, snow cover area, and section hydrological monitoring data were used to calibrate the model, and the latest CMIP5 data were used to estimate the runoff evolution. The results showed that, in the upper basin of the Brahmaputra River from the Nuxia Hydrological Station, the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient of monthly runoff simulation of the calibration period from 1991 to 1995 was 0.75, the coefficient of monthly runoff simulation of the validation period from 1996 to 2000 was 0.76, and the runoff markedly increased when the CO₂ discharge in the AR5 of IPCC was maximal.

Key words: ungauged basin; representative elementary watershed; climate change; runoff evolution; hydrological process simulation of basin; upper basin of Brahmaputra River from Nuxia Hydrological Station

缺资料流域的水文研究是国际水文界的研究热点,是国际水文科学联合会(IAHS)于 2003 年启动的十年研究计划的主题^[1-2],具有重要的理论意义和实践价值。经过十余年的努力,国际水文界获得了一系列重要成果,其中物理性水文模型和遥感相结合被普遍认为是解决缺资料流域水文模拟和预报问题的重要手段。

气候是径流的首要决定要素^[3],但人类活动可以间接的通过改变气候、地表覆盖类型、土地利用等影响流域的水文循环,同时也可以直接通过取用水量的改变而影响径流^[4-8]。主要的气候因素包括降水和气温

收稿日期:2014-11-12

基金项目:国家自然科学基金(U1202232,51190092)

作者简介:徐冉(1991—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事水文模型研究。E-mail: xuran14@mails.tsinghua.edu.cn

通信作者:田富强,副教授。E-mail: tianfq@tsinghua.edu.cn

等。Dore^[9]的研究结果表明,全球很多地区的降水量、降水强度和降水类型都发生了变化。降水变化可以直接影响径流量,很多学者^[10-12]的研究表明自20世纪70年代以来,随着全美降水呈现趋势性的增加,美国大部分地区的径流也呈增加趋势。近百年来,全球气温大约升高0.74℃(1906—2005年),且近50年的增长速率相比前期更快;同时,全球气候模式(GCM)在多种假设排放情景的模拟结果表明,2100年全球气温将比1900年上升约1.1℃~6.4℃^[13]。

雅鲁藏布江流域是世界上平均海拔最高的流域,由于地处高寒山区且流经多个国家,是监测资料极度缺乏的高原峡谷流域,同时变化环境下的水文情势演变颠覆了径流系列形成的环境背景的“一致性”。由此,需要运用缺资料流域水文预报的方法对雅鲁藏布江河道的径流和洪水演变规律与趋势进行研究。当前,一些学者对该流域进行了相关研究。刘剑等^[14]分析了20世纪下半叶雅鲁藏布江流域径流变化及气候变化的影响,研究表明:流域年径流量年际变化稳定,年内分配极不均匀,枯水期径流量与洪水期径流量相差较悬殊;流域有升温的趋势,流域降水增加趋势明显,降水、径流具有一致的变化周期;从径流年际变化分析认为,受气温、降水变化的影响,可能导致流域径流增加,这些变化也可能与流域地表状况变化有关。黄俊雄等^[15]结合Mann-Kendall非参数检验方法分析了流域内1956—2000年间的年径流演变规律及其驱动因子,结果表明:流域径流总体上呈减少趋势,在演变过程中表现出明显的阶段性和突变性;相关分析揭示出降雨是河川径流演变的主要驱动因子,在一定程度上气候变化控制着径流演变的趋势。贾建伟等^[16]对流域内降水、径流、蒸发和水资源量的时空变化规律进行了分析,认为雅鲁藏布江流域降雨量在流域内差别极大,自上游至下游迅速增加,降雨主要集中于6~9月;流域水面蒸发量较大,且随海拔减小而增加;流域径流量虽然大,但年内分配极不均匀,径流集中于汛期。

上述研究大多分析了雅鲁藏布江流域过去的径流演变规律、降水等的时空分布特征,对于径流过程的模拟以及对于未来径流演变的预测相对较少。因此,笔者考虑采用分布式水文模型THREW,同时结合地面观测、遥感数据,对研究流域的水文过程进行模拟。本研究对于掌握雅鲁藏布江流域的水文演变趋势具有重要意义,期望为研究发源于青藏高原的雅鲁藏布江流域水文过程对气候变化的响应提供参考价值。

1 研究区域及数据来源

1.1 流域概况

雅鲁藏布江是我国最重要的国际河流之一,也是西藏地区最大的河流,出境后被称为布拉马普特拉河,其发源于西藏地区南部的喜马拉雅山北麓杰马央宗冰川,经过我国的巴昔卡后进入印度,与恒河相汇于孟加拉国戈阿隆多市附近,由孟加拉湾汇入印度洋。本研究选取雅鲁藏布江中游干流奴下水文站以上流域(东经81.92°~94.67°,北纬27.61°~31.55°),地理位置如图1所示,流域面积为18.9万km²。奴下水文站的实测径流数据从文献^[17]中得到。

1.2 遥感信息

本研究用到的遥感信息包括NDVI数据、LAI数据和积雪数据。NDVI用来表征地表植被的分布特征以及变化情况。NDVI采用AVHRR探测仪的数据作为数据来源^[18],其数据的空间分辨率为8 km×8 km,时间分辨率为“准半月”(每个月前15 d和当月剩余天数),采用的时段为2001年。

LAI为叶面积指数,是植被叶面面积总和与土地面积的比例。研究采用MOD15A2 Version: 5数据,空间分辨率为1 km,时间分辨率为8 d,采取的时段是2001年,处理后得到每一个子流域的平均LAI值。

积雪的处理与LAI处理步骤相同,采用MOD10A2 Version: 5的数据,空间分辨率为500 m,时间分辨率为8 d,采取的时段是2001年,最终可以得到每一子流域在每天积雪面积所占整个流域面积的比例。

1.3 气象站点数据

气象站点数据来源于中国气象科学数据共享服务网^[19],包括日降水量、风速、气温、气压、相对湿度、日

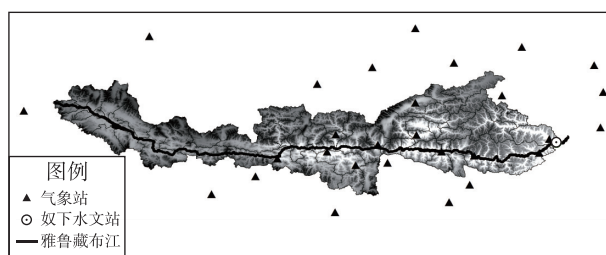


图1 研究流域地理位置及站点分布

Fig. 1 Location and station distribution of study area

照时数等数据。流域位于青藏高原地区,气象数据的空间变异性较大,同时流域面积较大而实测站点较为稀疏,单个站点控制流域面积过大导致气象站点数据无法较精确地反映气象数据的空间分布,这将影响气象站点数据作为输入的模型模拟精度。

根据上述部分气象数据,采用 FAO-Penman-Monteith 公式进行潜在蒸发量计算,其一般形式为

$$E_{T0} = \frac{0.408\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} + \frac{900}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \gamma u_2 (e_s - e_a) \quad (1)$$

式中: E_{T0} ——潜在蒸发量; Δ ——饱和水汽压-温度曲线斜率; R_n ——净辐射; G ——地表热通量; γ ——湿度计常数; u_2 —— z_m 处风速; e_s ——饱和水汽压; e_a ——实际水汽压。

1.4 冰川

冰川数据来源于全国简明冰川目录,用 ArcGis 处理后可以得到每一个代表性流域单元内冰川覆盖面积百分比,作为模型的输入文件。

1.5 未来气候模式情景简介

RCPs 代表了根据 IPCC 第 5 次评估报告中 4 种温室气体的浓度(非排放)轨迹,这个轨迹用于建立气候模型和研究,本文所采取的未来气候模式即建立在 RCPs 基础之上。IPCC 的研究者建立了 4 种可能的未来气候模式情景,这些情景都取决于未来有多少温室气体被释放。4 种 RCPs 的情景包括 RCP2.6、RCP4.5、RCP6 和 RCP8.5,其命名规则是到 2100 年增加多少辐射强迫值,如 2.6 W/m^2 、 4.5 W/m^2 、 6.0 W/m^2 和 8.5 W/m^2 。本文应用最新的 CMIP5 数据对径流演变进行预估,未来气候情景模拟中选用 4 种 RCPs,未来气候模式情景数据的网格分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。

2 模型与方法

采用的水文模型为 THREW 模型,这是一个半分布式水文模型,主要应用于宏观尺度。代表性流域单元(简称 REW)是经过严格定义子流域,也是模拟流域水文响应的基本单元^[20]。THREW 模型将代表性流域单元分为地表和地下 2 层,其中对地下层进行进一步划分,成为 2 个子区,地表层划分为 6 个子区,能够反映植被、裸土、冰川、积雪等 4 种典型下垫面类型。针对上述 3 个级别的子系统,应用连续介质热力学守恒定律及均化方法,得到 REW 尺度上的质量、动量和能量守恒的通用形式,具有较好的扩展性。在本文研究中,REW 的划分如图 1 所示,一共将全流域分为 63 个 REW。

THREW 模型将地面站数据和遥感数据相结合,利用地面观测站资料获得的数据和遥感数据(如 NDVI 数据、LAI 数据和积雪数据)相配合,对模型进行参数率定和验证。模型的主要参数、单位、含义及率定结果有:非饱和子区饱和导水率 $K_{su} = 6.25 \times 10^{-6} \text{ m/s}$,饱和子区饱和导水率 $K_{ss} = 6.25 \times 10^{-6} \text{ m/s}$,非饱和子区孔隙度 $\varepsilon_u = 0.48$,饱和子区孔隙度 $\varepsilon_s = 0.29$,地下径流指数 $K_{KA} = 3.161$,地下径流线性系数 $K_{KD} = 0.0176$,张力水蓄水容量 $W_M = 1.995$,新安江模型形状系数 $B = 0.992$,山坡糙率系数 $n_t = 0.007$,河道糙率系数 $n_r = 0.012$,空间平均渗入能力参数 $\alpha_{IFL} = 1.5$,空间平均渗出能力参数 $\alpha_{EFL} = 0.359$,空间平均蒸发能力参数 $\alpha_{ETL} = 0.419$ 。

用率定好参数的模型,结合未来气候情景数据,模拟雅鲁藏布江流域在未来气候情景下的径流变化情况。所使用的模型评价指标包括年均总径流量、水量平衡系数 I 和纳什效率系数 N 。年均径流总量可以反映实测和模拟年均总水量的相对大小,水量平衡系数的计算如式(2)所示,这 2 个指标是对于径流总量的评价;纳什效率系数主要是对于径流过程的评价指标,其公式如式(3)所示。

$$I = \frac{Q_{sim} - Q_{obv}}{Q_{obv}} \quad (2)$$

$$N = 1 - \frac{\sum (Q_{obv} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obv} - \bar{Q}_{obv})^2} \quad (3)$$

式中: Q_{obv} ——观测径流量; Q_{sim} ——模拟径流量。

3 计算结果

3.1 1991—2000 年有实测数据时段模拟结果

对于模型 1991—2000 年共 10 a 具有实测资料的年份进行率定和验证,为未来预估做好准备。选取奴下水文站以上流域这一典型的流域出口断面。选择 1991 年作为模型的预热期;1991—1995 年为率定期,采用自动率定参数的程序方法;1996—2000 年为验证期。径流过程的模拟结果如图 2(a) 所示,此次模拟率定期 $N=0.75$, $I=-3.3\%$,验证期 $N=0.76$, $I=-17.9\%$ 。模型对较低流量模拟结果偏高,对峰值流量模拟结果偏低。模拟中 10 a 平均年径流总量为 540 亿 m^3 ,实测平均年径流总量为 612 亿 m^3 ,水量平衡系数为 -11.8% 。模拟结果说明模型在该流域较适用,可以做进一步的气候变化分析。

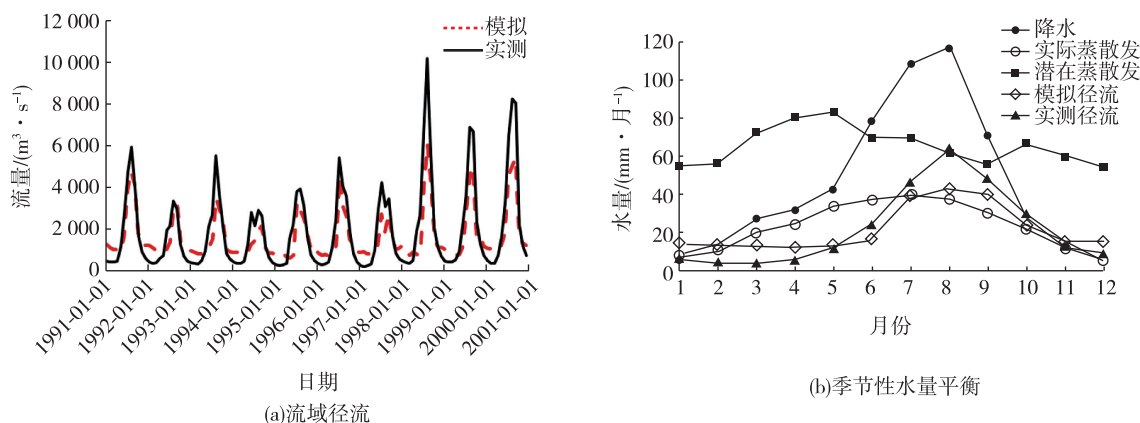


图2 1991—2000 年奴下水文站以上流域径流及季节性水量平衡结果

Fig. 2 Results of runoff and seasonal water balance in upper basin of Brahmaputra River from Nuxia Hydrological Station from 1991 to 2000

季节性水量平衡结果如图 2(b) 所示,可以看出降水和实际蒸散发在年内的变化趋势基本一致,也与实测径流和模拟径流的变化趋势一致。模拟径流在 3—7 月较小,在其余月份较大;实际模拟的蒸散发值小于潜在蒸散发,且在温度高的季节较大;降水在旱季小于潜在蒸散发,在雨季大于潜在蒸散发。

3.2 RCP2.6 情景模拟结果

对于奴下水文站以上流域模拟时段为 2013—2020 年共 8 a,2013 年为预热期,模拟结果如图 3 所示。研究表明,2014—2020 年气候情景 RCP2.6 下,模拟的多年平均年径流总量为 293 亿 m^3 ,比实测期(1992—1998 年)多年平均年径流总量(612 亿 m^3)减少 319 亿 m^3 。

3.3 RCP4.5 情景模拟结果

模拟结果如图 3(b) 所示。从图 3(b) 中可以看出,未来气候情景 RCP4.5 下 2016 年和 2018 年的径流峰值较大,而其余年份尤其是 2020 年径流峰值均变小。2014—2020 年气候情景 RCP4.5 下,模拟的多年平均年径流总量为 228 亿 m^3 ,比实测期多年平均年径流总量(612 亿 m^3)减少 384 亿 m^3 。

3.4 RCP6.0 情景模拟结果

模拟结果如图 3(c) 所示。从图 3(c) 中可以看出,未来气候情景 RCP6.0 下未来气候情景下 2014 年和 2016 年的径流峰值较大,而其余年份尤其是 2020 年径流峰值均变小。2014—2020 年气候情景 RCP6.0 下,模拟的多年平均年径流总量为 440 亿 m^3 ,比实测期多年平均年径流总量(612 亿 m^3)减少 172 亿 m^3 。

3.5 RCP8.5 情景模拟结果

模拟结果如图 3(d) 所示。从图 3(d) 中可以看出,未来气候情景 RCP8.5 所有年份的径流模拟均较大,为实测洪峰的 2~4 倍。2014—2020 年气候情景 RCP8.5 下,模拟的多年平均年径流总量为 1 730 亿 m^3 ,比实测期多年平均年径流总量(612 亿 m^3)增加 1 118 亿 m^3 。

4 结 语

利用 THREW 模型,针对雅鲁藏布江奴下水文站以上流域这一典型的流域出口在 1991—2000 年有实测

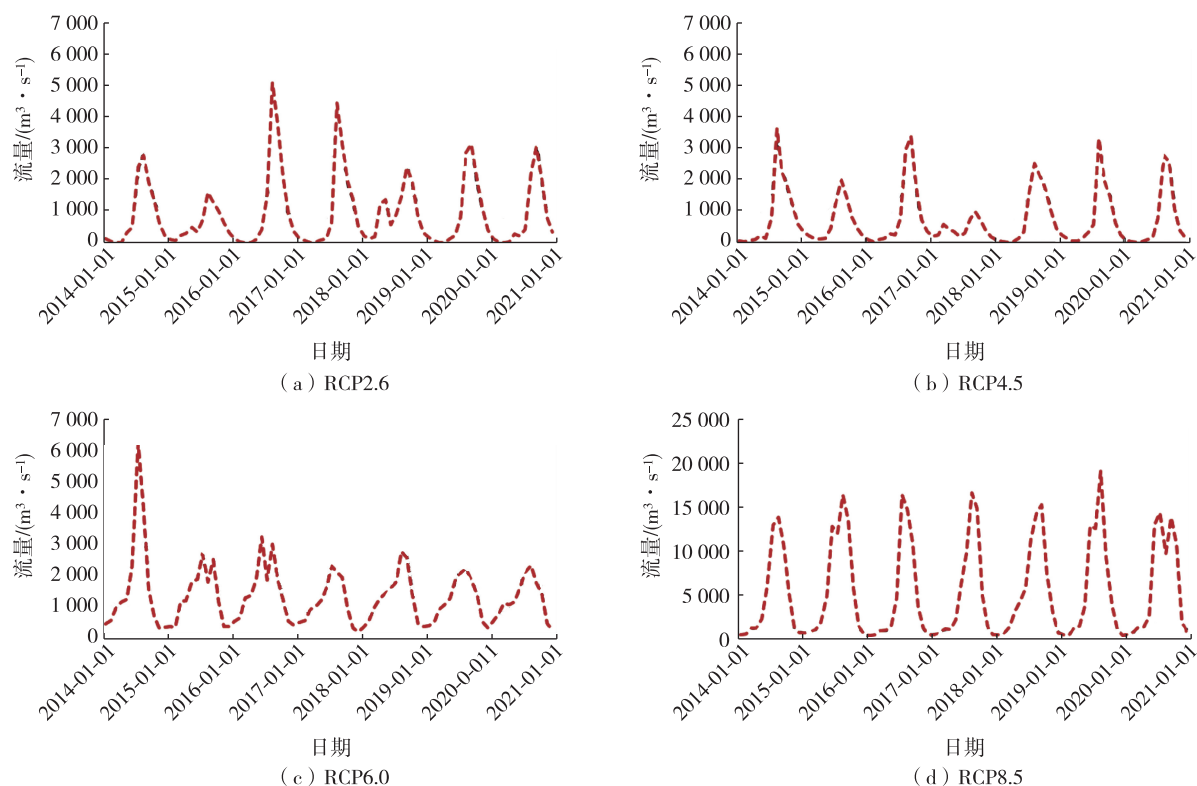


图 3 各情景径流模拟结果

Fig. 3 Results of runoff simulation in different scenarios

资料的时段进行模型率定和验证,采用 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 共 4 种未来气候情景对气候变化下的流域水文响应进行模拟,得到未来气候情景下径流的变化趋势。结果表明,THREW 模型在雅鲁藏布江流域具有较好的适用性,RCP2.6、RCP4.5 和 RCP6.0 情景下径流演变呈现递减趋势,而 RCP8.5 情景下径流则明显增加,径流的未来演变趋势取决于全球温室气体减排措施的实施。

本研究也存在一定不足,由于遥感数据的时间序列与实测径流数据的时间序列不重合,均使用 2001 年这一典型年的数据,这将对模型模拟的精度造成一定影响,需要在进一步收集水文数据的基础上给予改正。另外未来水文响应预估的不确定性来源有很多,气候模式的不确定性是其中之一,本文研究受目前掌握的气候模式种类限制,仅对未来气候模式采取简单的初步分析,得到一种预估的可能性作为代表,在未来的研究中会采用 CMIP5 多个气候模式输出数值产品并做出不确定性分析,从而较科学客观地评估雅鲁藏布江流域径流过程对未来气候变化的响应。

参考文献:

- [1] 罗吉忠,张新华,肖玉成,等. 基于 SWAT 模型的缺资料流域径流模拟研究[J].西南民族大学学报:自然科学版,2013(1):80-86. (LUO Jizhong, ZHANG Xinhua, XIAO Yucheng, et al. Runoff simulation in data-scarce basins based on SWAT hydrological model[J]. Journal of Southwest University for Nationalities: Natural Science Edition, 2013(1): 80-86. (in Chinese))
- [2] GUNTER B, MURUGESU S, THORSTEN W A V, et al. Runoff Prediction in Ungauged Basins[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [3] CAMPBELL J L, DRISCOLL C T, POURMOKHTARIAN A, et al. Streamflow responses to past and projected future changes in climate at the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire, United States[J]. Water Resources Research, 2011, 47(2): 1198-1204.
- [4] PATTERSON L A, LUTZ B, DOYLE M W. Climate and direct human contributions to changes in mean annual streamflow in the South Atlantic, USA[J]. Water Resources Research, 2013, 49(11): 7278-7291.
- [5] PIAO S, FRIEDLINGSTEIN P, CIAIS P, et al. Changes in climate and land use have a larger direct impact than rising CO₂ on global river runoff trends[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(39): 15398-15403.

- 15242-15247.
- [6] ROSSI A, MASSEI N, LAIGNEL B, et al. The response of the Mississippi River to climate fluctuations and reservoir construction as indicated by wavelet analysis of streamflow and suspended-sediment load, 1950—1975[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 377(3/4): 237-244.
- [7] SCHILLING K E, CHAN K S, LIU H, et al. Quantifying the effect of land use land cover change on increasing discharge in the Upper Mississippi River[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 387(3/4): 343-345.
- [8] WANG D, CAI X. Comparative study of climate and human impacts on seasonal baseflow in urban and agricultural watersheds [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(6): 460-472.
- [9] DORE M H. Climate change and changes in global precipitation patterns: what do we know? [J]. *Environment international*, 2005, 31(8), 1167-1181.
- [10] KRAKAUER N Y, FUNG I. Mapping and attribution of change in streamflow in the coterminous United States[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2008, 12(4): 1111-1120.
- [11] MCCABE G J, WOLOCK D M. A step increase in streamflow in the conterminous United States [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 29(24): 2185-2189.
- [12] TOMER M D, SCHILLING K E. A simple approach to distinguish land-use and climate-change effects on watershed hydrology [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 376(1/2): 24-33.
- [13] IPCC. Summary for policymakers of climate change 2007: the physical science basis: contribution of working group i to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- [14] 刘剑, 姚治君, 陈传友. 雅鲁藏布江径流变化趋势及原因分析[J]. *自然资源学报*, 2007(3): 471-477. (LIU Jian, YAO Zhijun, CHEN Chuanyou. Evolution trend and causation analysis of the runoff evolution in the Yarlung Zangbo River Basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2007(3): 471-477. (in Chinese))
- [15] 黄俊雄, 徐宗学, 巩同梁. 雅鲁藏布江径流演变规律及其驱动因子分析[J]. *水文*, 2007(5): 31-35. (HUANG Junxiong, XU Zongxue, GONG Tongliang. Characteristics and driving factor s of the runoff variations in the Yarlung Zangbo River[J]. *Journal of China Hydrology*, 2007(5): 31-35. (in Chinese))
- [16] 贾建伟, 吕孙云, 王政祥. 雅鲁藏布江流域水资源量特性分析[J]. *人民长江*, 2008(17): 71-72. (JIA Jianwei, LYU Sunyun, WANG Zhengxiang. Analysis of water resources characteristics in Yarlung Zangbo River Basin[J]. *Yangtze River*, 2008(17): 71-72. (in Chinese))
- [17] 高冰, 杨大文, 刘志雨, 等. 雅鲁藏布江流域的分布式水文模拟及径流变化分析[J]. *水文*, 2008, 28(3): 40-44. (GAO Bing, YANG Dawen, LIU Zhiyu, et al. Application of a distributed hydrological model for the Yarlung Zangbo River and analysis of the river runoff[J]. *Journal of China Hydrology*, 2008, 28(3): 40-44. (in Chinese))
- [18] 宋富强, 邢开雄, 刘阳, 等. 基于 MODIS/NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价[J]. *生态学报*, 2011(2): 354-363. (SONG Fuqiang, XING Kaixiong, LIU Yang, et al. Monitoring and assessment of vegetation variation in Northern Shaanxi based on MODIS/NDVI[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011(2): 354-363. (in Chinese))
- [19] 中国气象科学数据共享服务网[DB/OL]. [2015-04-20]. <http://cdc.nmic.cn/home.do>
- [20] 田富强, 胡和平, 雷志栋. 流域热力学系统水文模型: 本构关系[J]. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2008(5): 671-686. (TIAN Fuqiang, HU Heping, LEI Zhidong. Thermodynamic watershed hydrological model: constitutive relation[J]. *Science china technological Sciences*, 2008(5): 671-686. (in Chinese))