

基于 Hadgem2_ES 的气候变化对金华江流域枯水变化的影响评估*

高希超¹, 马冲¹, 朱冠天², 朱仟¹, 许月萍¹
(1. 浙江大学建筑工程学院水文水资源研究所, 浙江杭州 310058;
2. 浙江省水文局, 浙江杭州 310009)

摘要: 气候变化引发降雨径流等水文要素的变化已经成为学界的共识, 浙江省内近年来频发的气候极端事件更是引起众多学者的重视。枯水水文作为水文学的一部分, 分析其变化有其积极的实际意义。选取了金华江流域 1975–2004 年的日降水、温度和径流资料, 使用多站统计降尺度方法, 基于最新 CMIP5 中的 Hadgem2_ES 模型, 利用 GR4J 水文模型模拟了未来(2071–2100 年)的径流, 重点分析了几个重要枯水指数 7Q10 和 30Q10 的变化。结果表明, 未来这两个指数都有明显的上升趋势, 即气候变化可能缓和金华江流域未来的枯水情况。

关键词: 气候变化; 多站统计降尺度; 枯水; GR4J

中图分类号: TV 122 文献标志码: A 文章编号: 0529–6579 (2014) 02–0137–05

Hadgem2_ES-based Impact of Climate Change on Low Flow of the Jinhua River Basin

GAO Xichao, MA Chong, ZHU Guantian, ZHU Qian, XU Yueping

(1. Institute of Hydrology and Water Resources Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
2. Bureau of Hydrology, Hangzhou 310009, China)

Abstract: It is a common view that climate change has influenced hydrological elements such as precipitation, temperature and river flow. Zhejiang Province has witnessed the climate extremes with high frequency in recent years and it has drawn a lot attention of hydrologists. Low flow hydrology is a very important part of hydrology. It is quite meaningful to analyze the low flow. The historical daily precipitation, temperature and flow in 1975–2004 in the Jinhua River Basin are used as baseline data in this study. Climate projections from Hadgem2_ES of CMIP5 for 2070–2100 are downscaled to station-scale projections based on a multi-site statistical downscaling model GIST. The flows in future period are generated by a lumped hydrological model GR4J. Two typical low flow indices 7Q10 and 30Q10 are calculated and compared. The results show that the two indices have obvious rising trends, implying a better situation in low flow periods under climate change.

Key words: climate change; low flow; GR4J model; multi-site statistical downscaling

1 背景介绍

21 世纪以来, 气候变化引发的极端水文事件

如洪涝灾害、干旱等有愈来愈严重的趋势, 已引起政府、学者及民众的广泛关注^[1]。国内外专家、学者对气候变化对水文水资源的影响评估作出了比

* 收稿日期: 2013–11–04

基金项目: 科技部国际合作项目(2010DFA24320); 国家自然科学基金资助项目(51379183, 50809058)

作者简介: 高希超(1988 年生), 男; 研究方向: 气候变化对水文过程的影响评估; 通讯作者: 许月萍; E-mail: yuepingxu@zju.edu.cn

较详实的论述。张建云^[2]从防洪安全、供水安全、水生态环境安全和水工程安全四个方面阐述了气候变化对中国水安全的可能影响。王国庆等^[3]采用流域水文模拟方法分析评估了气候变化和人类活动对径流量的影响。Richard 等^[4]评估了最新一代的气候情景模式,为后续气候变化的研究提供了新的思路并奠定了理论基础。然而关于气候变化对枯水径流的影响研究特别是在历史降雨比较充分地区的文章却鲜有发表。近年来浙江省几乎每年都会出现旱情,枯水季水资源严重缺乏,部分地区甚至出现用水危机。因此气候变化对枯水径流的影响同样应该引起重视。

对于不同的研究方向,枯水径流有着不同的含义。在某些研究中,枯水径流被认为是每年旱季中河流的实际径流,也有研究把重点放在两次枯水间隔出现的时间和环境,或者其对整个河滨生态环境的影响^[5]。WMO(世界气象组织)曾经把枯水径流定义为超长干旱天气中河流中的径流,但 Smakhtin^[5]认为,枯水径流是一种季节性的现象,是整个径流体系中不可分割的一部分,从而把它与干旱区分开来。

研究选取了钱塘江流域的子流域金华江流域作为研究区域,以 1975 - 2004 年作为基准期,2071 - 2100 年为预测期,使用多站统计降尺度工具 GIST 来模拟未来的降雨和温度,再使用集总式水文模型 GR4J 来模拟金华江流域的径流,并利用枯水指数 7Q10 和 30Q10 来分析气候变化对金华江流域枯水的影响。

2 研究方法

2.1 数据来源

是钱塘江流域的一部分,位于北纬 28.25° - 29.75°,东经 119.25° - 120.75°之间。流域中五个水文站金华、武义、义乌、东阳和永康有长系列实测数据。金华江流域总面积约 5 996 km²,基准期年均降雨量在 1 600 mm 左右,降雨多集中在 5 - 7 月。流域属于亚热带季风气候,夏季高温多雨,冬季干燥寒冷。流域全年平均温度 17.5 °C,最高温度超过 40 °C,最低温度低于 0 °C^[6]。流域的主要河流金华江是钱塘江的支流之一,发源于磐安县龙乌尖,汇于衢江。河流全长达到 195 km,河流比降为 3%。

本文的研究数据分为 2 个部分:① 金华江流域基准期的实测日数据,包括降雨、径流、最高温度和最低温度。② CMIP5 中 Hadgem2_ES 模型的

全球气候模式模拟结果,数据包括降雨、最高温度和最低温度的月均值。CMIP5 数据包含了 4 个典型浓度路径情景,即 RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 以及 RCP8.5。RCP2.6 情景假定全球平均温度上升被限制在 2.0 °C 之内,其中 21 世纪后半叶能源应用为负排放。辐射强迫在 2100 年之前达到峰值 3 W/m²,到 2100 年下降至 2.6 W/m²。二氧化碳浓度在达到峰值 49 μg/g 后下降。RCP4.5 情景中,2100 年时辐射强迫稳定在 4.5 W/m²,二氧化碳浓度稳定在 65 μg/g。RCP6.0 情景表示在 2100 年之后,辐射强迫稳定在 6 W/m²,二氧化碳浓度稳定在 85 μg/g。RCP8.5 情景下,2100 年的辐射强迫达到 8.56 W/m²,且上升不会停止,二氧化碳浓度达到 137 μg/g^[7]。

2.2 GIST 模型

GIST 是由美国佛罗里达大学的 Baigorria 等^[8]开发的多站统计降尺度工具。在本文中,GIST 用于计算预测期的降雨与温度。与传统的统计降尺度工具不同,GIST 考虑了不同站点降雨量之间的空间相关性。相关系数 ρ_{ij} 被用来表示各站点之间降雨的相关关系。 ρ_{ij} 的计算公式为^[8]:

$$\rho_{ij} = \frac{1}{\eta} \frac{\sum_{i=1}^{\eta} (\chi_{ii} - \mu_i)(\chi_{ji} - \mu_j)}{\sigma_i \sigma_j} \quad (1)$$

式中, η 是降雨时间序列的长度, χ_i 和 χ_j 是不同站点某一天的降雨量, μ_i 和 μ_j 不同站点的降雨均值, σ_i 和 σ_j 则是方差。

降雨的产生分为两个阶段,第一阶段是计算降雨事件是否发生,第二阶段是计算其降雨量。降雨事件是否发生通过初始边界条件和率定的参数,以及后续的重取样和二阶马尔科夫链确定。降雨事件确定后,再通过式(2)确定降雨量。

$$R_m = r_{\text{gam}}^* \beta_m \ln \{ \Gamma(\alpha_m) \} \quad (2)$$

等式中, r_{gam}^* 是服从 Gamma 分布 $\Gamma(\alpha)$ 的表征空间相关关系的随机向量, α 和 β 是 Gamma 分布的形状和尺度参数。

GIST 基本输入包括历史的降雨和最高最低温的时间序列和 Change Factor^[9],输出是未来的降雨和最高最低温度。计算结果表明,GIST 能很好模拟流域的未来降雨,并能较好的保留不同水文站降雨的空间相关性。目前,各种天气发生器都能较好的模拟温度。同样,GIST 温度模拟的准确性非常高,这里不再描述。

2.3 水文模型 GR4J

GR4J 模型是一个概念性水文模型,被广泛用

于水文模拟^[10]。

GR4J 共有 4 个参数，分别为蓄水容量 $X1$ ，地下水交换系数 $X2$ ，前一天的地下水容量 $X3$ ，水文过程线的时间基准 $X4$ 。其主要输入是降雨，径流和潜蒸发。率定过程中，以 Nash 效率系数为主要目标函数来判断率定效果的好坏。GR4J 的模型结构如图 1 所示^[11]。图中 P_n 净雨量， E_s 为实际蒸散发量， P_{erc} 为下渗水，UH1 和 UH2 为控制过程单位线， Q 为最终的径流。

在该模型中，未来的降雨由 GIST 模型模拟所得，潜蒸发则由 HARGREAVES 法计算而得^[12]。计算公式如公式 (3) 下所示。公式中，其中 R_a 为日辐射量，单位为 mm/d， T_{max} 、 T_{min} 分别最大温度和日最小温度，单位为 $^{\circ}C$ 。C 取 0.0023，E 取 0.5，T 取 17.8。

$$ET_H = C \cdot R_a \cdot (T_{max} - T_{min})^E \cdot \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} + T \right) \quad (3)$$

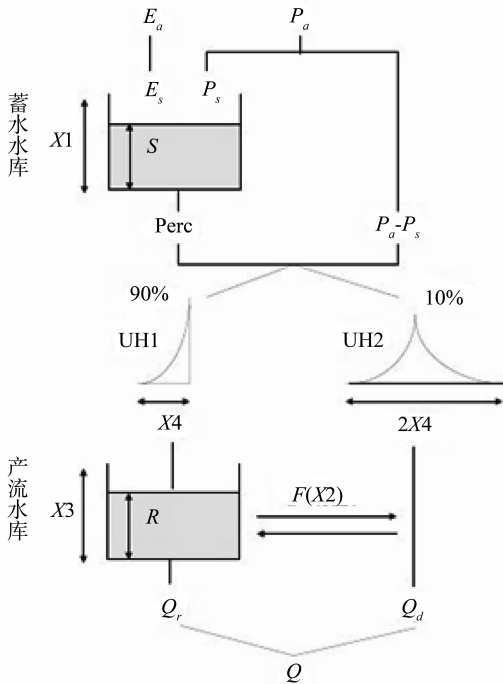


图 1 GR4J 模型结构图

Fig. 1 Model structure of GR4J model

3 结果

3.1 GIST 计算结果

在本文中，GIST 用来模拟未来的降雨量和温度。选取 1975 - 2004 年为模拟的基准期。基准期的历史数据用于率定 GIST 的参数。由于作为多站

统计降尺度方法，模拟和实测的相关系数被用来评估 GIST 模拟的效果。比较结果见图 2。这里，历史数据和基准期内模拟值的月均值比较采用了由泰森多边形计算的面雨量和平均温度比较，结果如图 3 和 4 所示。

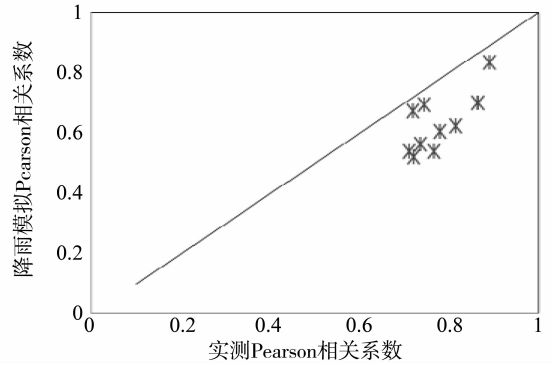


图 2 基准期金华江流域各站点降雨量实测值与模拟值相关系数比较

Fig. 2 Pearson's correlations of daily precipitation in baseline period

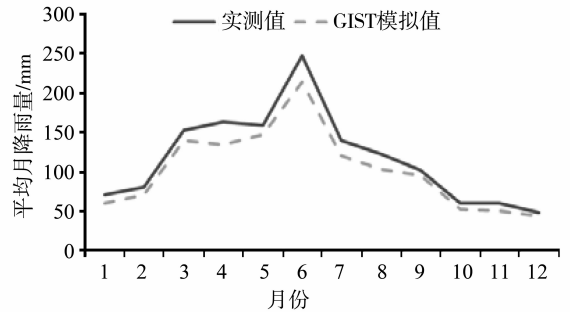


图 3 基准期金华江流域实测月面雨量与模拟月面雨量比较

Fig. 3 Comparison of the daily precipitation of the Jinhua River Basin in baseline period

从图中可以看出，金华江流域的 5 个水文站降雨量具有较高的空间相关性，而 GIST 的模拟结果较好的保留了这些空间相关性。从降雨量的月均值来看，尽管模拟值相对于实测值略有偏小，但接近实测值。而变化趋势则和实测值完全一致。从图中可以看出，温度的模拟值和实测值几乎完全重叠。这表明，GIST 能很好地完成降雨和温度的模拟，这些值用于下一步径流的模拟工作。

3.2 GR4J 率定结果

选取 1975 - 1984 年 10 a 的径流历史数据来率定 GR4J 的参数，选取 1985 - 1994 年为验证期。4 个参数的取值范围见表 1^[11]。

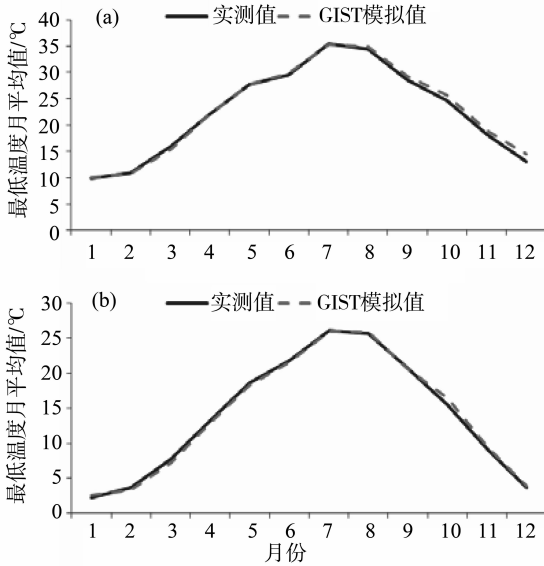


图 4 基准期金华江流域实测温度月均值与模拟温度月均值比较

Fig. 4 Comparison of the daily temperature of the Jinhua River Basin in baseline period

表 1 GR4J 参数边界

Table 1 Ranges of parameters of GR4J

参数代号	意义	最小值	最大值
X1/mm	蓄水容量	10	2000
X2/mm	地下水交换系数	-8	6
X3/mm	前一天的地下水容量	10	500
X4/d	水文过程线的时间基准	0	4

率定过程中, 选取 NS 效率系数作为主要目标函数, 采用自动率定。为了更好的评估模型对枯水的模拟, 还计算了 NS 效率系数的对数形式^[13]。采用相对误差 RVE 反映径流模拟值与实际值的关系, 并计算了均方根值 RMSE。

计算结果表明模型率定期和验证期的 NS 效率系数都高于 0.8, 径流对数形式下的 NS 效率系数也都达到了 0.8, 率定期和验证期 RMSE 分别为 1.11 和 1.38, 即该模型能有效的模拟径流, 且在枯水模拟方面也有较好的效果。从 RVE 来看, GR4J 模型对金华江流域的模拟值比实际值要偏小。为了更直观的了解径流模拟情况, 选取比较有代表性的 1983 年比较流域径流的模拟值和实测值 (图 5)。

3.3 枯水指数分析

对枯水径流进行频率分析方法有很多种, 枯水指数分析是其中应用最普遍的一种。常见的枯水指数, 7Q2, 7Q5, 7Q10, 7Q20 等在工程应用和政策

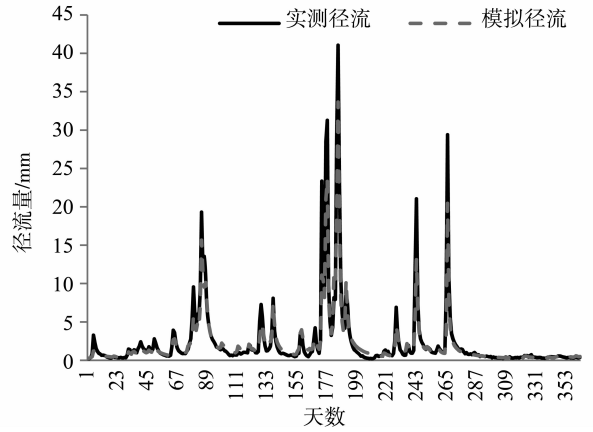


图 5 1983 年金华江流域径流 GR4J 模型实测值与模拟值比较

Fig. 5 Comparison of daily flow at Jinhua station in 1983

制定中发挥着重要的作用。指数中, 7 指 7 天连续径流, 后面的数字则是特定的回归期。如 7Q10 是指 10 年一遇的 7 d 连续枯水径流的平均值。此外, 还有一些根据不同连续天数制定的枯水指数, 如 30Q10, 4Q3, 90Q10 等。本文选取了 7Q10 和 30Q10 作为标准分析未来的枯水指数。7Q10 的应用较为广泛, 如枯水设计参考, 水质保护指标, 污水处理参考依据, 河滨生态保护参考指标以及水资源配置参考等。30Q10 的用处与 7Q10 类似, 但更侧重于水质^[14]。使用 Weibull 分布分析基准期和预测期的径流^[15], 得出的结果如表 2 和 3 所示。

表 2 不同回归期连续 7 天最小平均流量

Table 2 Lowest average flows for a consecutive 7 day

项目	回归期			
	5 a	10 a	20 a	30 a
基准期	5.79	3.86	2.62	2.09
RCP2.6	12.75	11.72	10.81	10.32
RCP4.5	11.93	10.61	9.48	8.89
RCP6.0	12.06	10.76	9.65	9.06
RCP8.5	12.70	11.41	10.29	9.69

从表中可以发现, 四个情景下的 7Q10 和 30Q10 都有增加, 7Q10 的变化更为剧烈。观察不同回归期下的数据发现, 预测期的径流比基准期更为平稳。这也和预测径流时间序列情况相吻合。这意味着, 在 21 世纪的最后 30 a, 金华江流域在枯水季节的水资源量可能增加。四个不同情景下, 随着辐射强迫的增加, 7Q10 和 30Q10 都增加, 但 RCP2.6 情景出现了异常, 可能是由于辐射强迫较低, 蒸发量较少导致。

表 3 不同回归期连续 30 d 最小平均流量

Table 3 Lowest average flows for a consecutive 30 day period of different return periods m^3/s

项目	回归期			
	5 a	10 a	20 a	30 a
基准期	12.87	9.50	7.10	6.00
RCP2.6	15.81	14.58	13.48	12.89
RCP4.5	14.60	12.95	11.54	10.80
RCP6.0	15.36	13.84	12.53	11.83
RCP8.5	15.84	14.16	12.71	11.95

4 结 论

本文选取金华江流域为研究区域, 使用 GIST 模型作为天气发生器, 并用 GR4J 模型和 CMIP5 全球气候环流模式的未来数据预测了 2071 - 2100 年的径流, 分析了枯水指数 7Q10 和 30Q10 的变化情况。计算结果表明, GIST 能较好模拟流域的降雨和温度, 并能保留其空间相关性。同时, GR4J 在率定和验证时的目标函数都达到了 0.85 以上, 因此可以认为在金华江流域使用该模型进行径流模拟是可行的。最后, 本文对水文模型模拟的径流结果进行了频率分析, 发现在 21 世纪末, 各个回归期的枯水径流量增大。以 7Q10 而言, 其在 RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 四个情景下增加的幅度都超过了 150%, 最大变化幅度发生在情景 RCP2.6, 达到了 203%。相对而言, 30Q10 的增幅较小, 最大的变化同样出现在 RCP2.6, 达到了 53%。这些结论可供政策制定者作出相关政策的参考。

参考文献:

[1] 杨涛, 陆桂华, 李会会, 等. 气候变化下水文极端事件变化预测研究进展 [J]. 水科学进展, 2011, 22(2): 279 - 286.

[2] 张建云, 王国庆, 杨扬, 等. 气候变化对中国水安全的影响研究 [J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(5).

[3] 王国庆, 张建云, 刘九夫, 等. 气候变化和人类活动对河川径流影响的定量分析 [J]. 中国水利, 2008

(2): 55 - 58.

[4] MOSS R H, EDMONDS J A, HIBBARD K A, et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment [J]. Nature, 2010, 463(7282): 747 - 756.

[5] SMAKHTIN V U. Low flow hydrology: a review [J]. Journal of hydrology, 2001, 240(3): 147 - 186.

[6] TIAN Y, XU Y P, ZHANG X J. Assessment of climate change impacts on river high flows through comparative use of GR4J, HBV and Xinanjiang Models [J]. Water Resources Management, 2013, 27(8): 1 - 18.

[7] Van VUUREN D P, EDMONDS J, KAINUMA M, et al. The representative concentration pathways: an overview [J]. Climatic Change, 2011, 109(1/2): 5 - 31.

[8] BAIGORRIA G A, JONES J W. GiST: A stochastic model for generating spatially and temporally correlated daily rainfall data [J]. Journal of Climate, 2010, 23(22): 5990 - 6008.

[9] ANANDHI A, FREI A, PIERSON D C, et al. Examination of change factor methodologies for climate change impact assessment [J]. Water Resources Research, 2011, 47(3): W03501.

[10] SIMONNEAUX V, HANICH L, BOULET G, et al. Modelling runoff in the Rheraya Catchment (High Atlas, Morocco) using the simple daily model GR4J. Trends over the last decades [C]//13th IWRA World Water Congress, Montpellier, France, 2008.

[11] 田焯. 气候变化对极端径流影响评估中的不确定性研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.

[12] 胡庆芳, 杨大文, 王银堂, 杨汉波. Hargreaves 公式的全局校正及适用性评价 [J]. 水科学进展. 2011. 22(2): 160 - 167.

[13] KRAUSE P, BOYLE D P, BÄSE F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment [J]. Advances in Geosciences, 2005, 5(5): 89 - 97.

[14] PYRCE R. Hydrological low flow indices and their uses [R]. Watershed Science Centre(WSC) Report, 2004.

[15] 周芬, 郭生练, 熊立华, 等. 枯水频率分析线型的比较研究 [J]. 水文, 2006, 26(1): 28 - 33.