

文章编号:1672-3031(2012)03-0174-06

气候变化条件下流域径流演变趋势分析

樊慧静^{1,2}, 赵红莉¹, 蒋云钟¹

(1. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038; 2. 辽宁省水文水资源勘测局 沈阳分局, 辽宁 沈阳 110005)

摘要: 为了预测流域未来径流演变趋势, 通过主分量分析、降尺度模型和SWAT模型, 预测分析了流域在大气环流模型(GCMs)A2/B2气候情景下2010—2099年的日最高最低气温、日降水和月径流量。主分量分析提取大尺度下气候预测因子的主成分, 降尺度模型利用提取的主成分预测站点的最高最低气温和降水, SWAT模型利用预测的站点数据计算未来径流量。结果表明, A2/B2两种气候情景下流域未来气温呈波动上升趋势, 降水、径流均呈波动下降趋势, 其中B2情景变化幅度大于A2情景。

关键词: 大气环流模型(GCMs); A2/B2; 主分量分析; 统计降尺度模型; SWAT模型

中图分类号: P333

文献标识码: A

1 研究背景

气温升高、冰雪融化和海平面上升等一系列全球范围气候变化引起的现象已经得到了广泛的关注^[1]。全球气候变化正影响着水资源的数量和分布, 导致全球水资源丰枯两极分化严重, 流域水旱灾害日益频发^[2]。全球大气环流模型(General Circulation Models, GCMs)是预估未来气候变化较为可靠的工具, 但其分辨率通常在 $2\times 2^\circ$ 以上, 缺少区域气候信息。所以在区域尺度气候变化研究方面, 降尺度技术得到了广泛应用^[3]。

通过GCMs降尺度与流域水文模型相耦合研究该流域未来气候和水文变化趋势这一方法已被多位学者采用。於凡等^[4]利用Delta方法进行降尺度处理, 在此基础上采用GIS和SPSS分析了全球气候变化对黄河流域水资源的定量影响。郭靖等^[5]应用统计降尺度法将全球气候模式和VIC分布式水文模型进行耦合研究了汉江流域降水径流变化情况。徐若兰等^[6]利用支持光滑向量机降尺度并与HBV流域水文模型相耦合研究了汉江上游水文极值事件。

本文采用英国Hadley中心GCMs发展的全球气候模式结果, 利用主分量分析和降尺度方法得到流域未来降雨和气温数据, 并通过SWAT模型分析流域未来的水资源演变趋势。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区域 流域面积 3.1万 km^2 , 多年平均年降水深 493.9mm 。气候特点表现为冬季漫长酷寒, 夏季短促湿热, 冬夏温差大, 属典型寒温带大陆性季风气候。

2.2 数据来源 基础空间数据包括流域DEM数据、2000年土地利用数据和2000年土壤数据, 统一分辨率 $1\text{km}\times 1\text{km}$ 。站点数据有3个国家气象站A、B、C和2个国家日射台站的1990—2006年日观测数据, 以及流域出口径流站1990—2006年日观测流量数据。

GCMs数据包括A2/B2气候情景下GCMs运行生成1961—2099年的数据和再分析气象数据NCEP1961—2001年的数据, 以网格 $3.75^\circ(\text{经度})\times 2.5^\circ(\text{纬度})$ 形式提供, 这些数据可直接从加拿大气候

收稿日期: 2011-10-23

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201001024)

作者简介: 樊慧静(1988-), 女, 山东郓城人, 硕士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: f_huijing@163.com

研究所^①下载。该流域下载了 3×3 共 9 个网格的数据。

A2/B2 分别代表 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)发布的温室气体排放情景 SRES (Special Report on Emission Scenarios)中的中高和中低排放情景^[7]。

2.3 研究方法

2.3.1 主分量分析 GCMs 数据每个网格文件下有 3 个文件夹 H3A2a_1961—2099/H3B2a_1961—2099/NCEP_1961—2001, 前两个是 A2/B2 气候情景下 GCMs 运行生成的 1961—2099 年的气象数据, 后一个是 1961—2001 年实测再分析气象数据, 每个文件夹下有 26 个气候因子, 包括平均海平面气压、2m 高度场平均气温等。9 个网格中每种文件夹共有 234 个气候因子, 不可能每个气候因子都参与到降尺度过程中。为了将尽可能多的信息输入到降尺度模型中, 本文采用了主成分分析方法。

主成分分析通过降维技术把多个变量化为少数几个主成分, 这些主成分能够反映原始变量的绝大部分信息, 它们通常表示为原始变量的线性组合^[8]。

本文采用 R 软件进行主成分分析。R 软件由 Auckland 大学的 Robert Gentleman 和 Ross Ihaka 及其他志愿人员开发, 是一个免费的自由使用软件。

2.3.2 统计降尺度模型 降尺度法主要有两种: 一种是动力降尺度法, 一种是统计降尺度法。动力降尺度法即通常所说的区域气候模式, 它物理意义明确, 但是计算量大, 费机时。统计降尺度法利用多年的观测资料建立与大尺度气候状况之间的统计关系, 并用独立的观测资料检验这种关系, 最后再把这种关系应用于 GCMs 输出的大尺度气候信息, 来预估区域未来的气候变化情景(如气温和降水)^[9]。即建立大尺度气候预报因子与区域气候预报变量间的统计函数关系式:

$$Y = F(X) \quad (1)$$

式中: Y 为区域气候预报变量; X 为大尺度气候预报因子; F 为建立的大尺度气候预报因子和区域气候预报变量间的一种统计关系。

一般说来, F 是未知的, 需要通过动力方法(区域气候模式模拟)或统计方法(观测资料确定)得到。统计降尺度中 X 包含了大尺度气候状态, F 包含了区域或当地的地形, 海陆分布和土地利用等地文特征。

SDSM(the Statistical Down-Scaling Model)是一种多元回归和天气发生器相耦合的降尺度方法^[8], 它的应用主要包括两个步骤: (1)建立预报量(区域尺度或站点气象要素数据)与预报因子(大气环流因子)之间的统计关系, 以确定模型; (2)根据已建立的统计模型, 生成区域尺度或站点气候要素的未来日序列。而且统计模型对未来情景的代表性在多位学者的研究中已经得到了验证^[10-11]。本文采用 SDSM 软件, 对流域内 3 个气象站的日降水及日最高最低气温进行了降尺度。

2.3.3 SWAT 模型 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型由 Dr. Jeff Arnold 为美国农业部(USDA)农业研究中心(ARS)于 20 世纪 90 年代初期研制。模型开发的目的是为了预测在大流域复杂多变的土壤类型、土地利用方式和管理条件下, 土地管理对水分、泥沙和化学物质的长期影响。SWAT 模型是基于物理机制的分布式水文模型, 在模拟流域水文过程, 研究流域在不同下垫面和气候情势下的水文响应, 分析流域生态环境影响因素, 以及制定区域水资源规划等方面都得到了普遍应用^[12]。本文利用 SWAT 模型与 GIS 的集成版本 ArcSWAT^[13]进行建模分析。

3 结果分析

3.1 主成分分析 分别对每种文件夹下 9 个网格共 234 个气候因子进行主成分分析, 挑选出前 20 个主分量作为代表, 进行下一步的降尺度处理。主成分筛选结果如表 1 所示。

表 1 按照各主分量方差贡献率从大到小的顺序, 列举了 A2/B2 情景数据和 NCEP 数据筛选出的前 20 个主分量的方差贡献率和累计方差贡献率。从表 1 可以看出, A2/B2 情景下生成数据和 NCEP 再分

^①<http://www.cics.uvic.ca/scenarios/sdsm/select.cgi>

表1 主成分筛选结果

情景	主成分	1	2	3	4	5	6	7
A2	方差贡献率	0.222	0.139	0.103	0.080	0.052	0.043	0.033
	累计方差贡献率	0.222	0.360	0.463	0.543	0.595	0.638	0.671
	主成分	8	9	10	11	12	13	14
	方差贡献率	0.027	0.021	0.019	0.016	0.014	0.013	0.012
	累计方差贡献率	0.698	0.719	0.738	0.754	0.768	0.780	0.793
	主成分	15	16	17	18	19	20	
	方差贡献率	0.011	0.010	0.009	0.008	0.007	0.007	
	累计方差贡献率	0.804	0.814	0.823	0.831	0.839	0.846	
B2	方差贡献率	0.222	0.139	0.103	0.080	0.052	0.043	0.033
	累计方差贡献率	0.222	0.360	0.463	0.543	0.595	0.638	0.671
	主成分	8	9	10	11	12	13	14
	方差贡献率	0.027	0.021	0.019	0.016	0.014	0.013	0.012
	累计方差贡献率	0.698	0.719	0.738	0.754	0.768	0.780	0.793
	主成分	15	16	17	18	19	20	
	方差贡献率	0.011	0.010	0.009	0.008	0.007	0.007	
	累计方差贡献率	0.804	0.814	0.822	0.831	0.838	0.845	
NCEP	方差贡献率	0.245	0.143	0.119	0.068	0.040	0.038	0.036
	累计方差贡献率	0.245	0.388	0.507	0.575	0.615	0.653	0.689
	主成分	8	9	10	11	12	13	14
	方差贡献率	0.028	0.022	0.020	0.016	0.013	0.012	0.011
	累计方差贡献率	0.717	0.739	0.760	0.775	0.788	0.800	0.810
	主成分	15	16	17	18	19	20	
	方差贡献率	0.010	0.009	0.008	0.008	0.007	0.007	
	累计方差贡献率	0.820	0.829	0.837	0.845	0.852	0.858	

析数据筛选出的前20个主分量其累计方差贡献率分别是0.846、0.845和0.858，代表了原数据绝大部分的信息。

3.2 降尺度模型

3.2.1 降水降尺度模型 以1961—1990年为模型率定期，1991—2001年为验证期，首先建立NCEP主成分与各站点降水数据的多元线性回归方程即建立降水降尺度模型，再把A2/B2情景下的主成分输入到已建立的模型中，得到各站点降水预测数据。

对3个气象站的模型进行误差分析，以相关系数 r 表示。模型率定期相关系数 r 如表2所示。

表2 各气象站降水降尺度模型相关系数 r

站点	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0.54	0.59	0.58	0.51	0.50	0.44	0.44	0.46	0.55	0.49	0.49	0.50
B	0.57	0.56	0.63	0.57	0.52	0.51	0.45	0.47	0.57	0.66	0.60	0.59
C	0.57	0.52	0.57	0.57	0.50	0.49	0.44	0.47	0.60	0.62	0.62	0.57

表2显示相关系数在0.44~0.66之间，模型在6、7、8月份的相关系数是全年中最低的，说明模型在汛期效果不如在非汛期效果好。模型的相关系数说明了各站点降水数据和NCEP主成分之间存在一定的线性关系。

分时段统计流域面雨量变化如表3所示。

由降水的预测分析成果可知，2010—2099年流域年降水量呈波动下降趋势，A2/B2情景分别在近

30年和本世纪中期30年(2040—2069年)超过历史多年平均水平,本世纪后期30年(2070—2099年)均低于历史多年平均水平。两种排放情景中,B2情景较A2情景在本世纪后期30年(2070—2099年)下降幅度大。

表3 流域2010—2099年流域面雨量变化预测

情景				情景					
2010—2039		2040—2069		2010—2039		2040—2069			
2070—2099				2070—2099					
A2	降水量/mm	508	477	486	B2	降水量/mm	486	509	471
	百分比	2.81%	-3.44%	-1.56%		百分比	-1.51%	3.09%	-4.69%

注:表中百分比以历史1956—2008年平均年降水量493.9mm为参考进行计算。

3.2.2 气温 气温处理原理及过程与降水相同,三站月最高最低气温降尺度模型相关系数 r 如表4—表5所示。

表4 最高气温相关系数 r

站点	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0.77	0.88	0.93	0.92	0.92	0.90	0.87	0.87	0.91	0.93	0.90	0.79
B	0.83	0.92	0.94	0.91	0.93	0.90	0.86	0.88	0.92	0.94	0.91	0.84
C	0.84	0.93	0.94	0.91	0.93	0.91	0.87	0.89	0.92	0.93	0.92	0.85

表5 最低气温相关系数 r

站点	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0.73	0.75	0.79	0.81	0.75	0.75	0.75	0.81	0.82	0.81	0.81	0.73
B	0.74	0.73	0.82	0.80	0.70	0.73	0.74	0.80	0.83	0.84	0.81	0.77
C	0.76	0.78	0.82	0.81	0.73	0.76	0.78	0.82	0.84	0.84	0.83	0.75

表3、表4显示气温降尺度模型相关系数在0.70~0.94之间,年内变化不明显,相关性良好。以A站为例,分时段统计最高、最低气温变化如表6所示。

表6 A站2010—2099年流域平均气温变化预测

情景				情景					
2010—2039				2010—2039					
2040—2069				2040—2069					
2070—2099				2070—2099					
A2	气温/℃	0.6	1.4	1.0	B2	气温/℃	1.1	1.3	1.2
	变化/℃	+1.6	+2.4	+2.0		变化/℃	+2.1	+2.3	+2.2

注:表中百分比以A站1961—2008年平均年气温-1.0℃为参考进行计算。

由气温的预测分析成果可知,2010—2099年流域年均气温呈波动上升趋势,A2/B2情景在3个时段均超过历史多年平均水平,但本世纪后期30年(2070—2099年)均低于本世纪中期30年(2040—2069年),有所下降。两种排放情景中,B2情景较A2情景在本世纪后期30年(2070—2099年)增加较快。

3.3 利用SWAT模型进行流域建模 依托1km×1km网格的流域DEM数据、2000年土地利用和土壤数据,基于SWAT建立流域水文模拟模型。选用3个气象站点输入降雨、气温、湿度、风速数据,2个辐射站点输入太阳辐射数据,在SWAT模型里将流域划分为25个子流域,在每个子流域单独计算产汇流过程。选用1961—2006年的气象、水文数据进行水文分析。

采用与土地利用状况所在年份相近的时间段2000—2006年的气象数据进行参数敏感性分析,并利用SCE-UA^[11]方法对筛选出的敏感性参数进行优化,最终得到一套最优参数。模型参数优化的纳什系数为0.78。采用1990—1999年气象数据进行验证,验证期效果如图1示。

把通过主分量分析和降尺度方法处理过的降水、最高最低气温数据输入到SWAT模型中,用最优

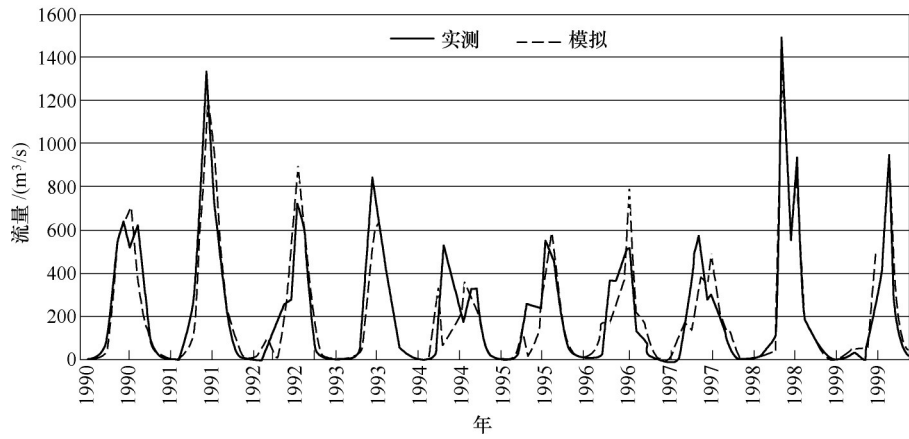


图1 验证期效果

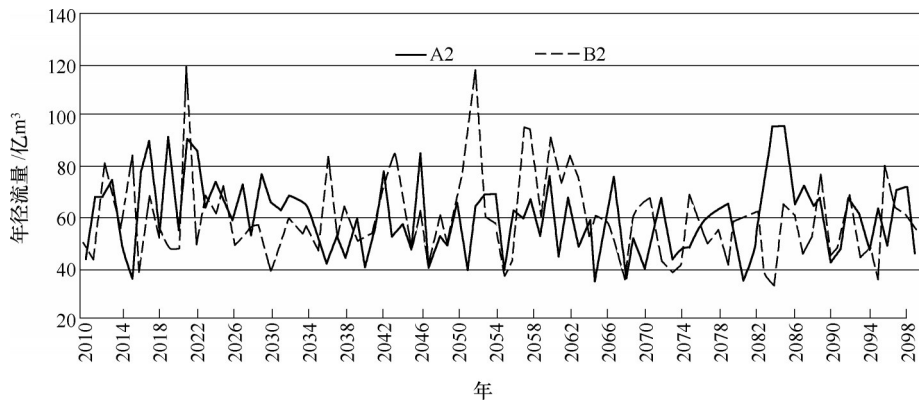


图2 流域出口2010—2099年径流量

参数分别模拟 A2/B2 气候情景下流域出口月径流量，得到流域出口的年径流量，结果如图 2 所示。

A2/B2 气候情景下流域年径流量分时段与历史记录相比较，如表 7 所示。

由径流的预测分析成果可知，2010—2099 年年径流量呈波动下降趋势，仅 B2 情景在本世纪中期 30 年(2040—2069 年)略高于历史平均水平，A2/B2 在其余时间段均低于历史平均。两种排放情景中，B2 情景较 A2 情景在本世纪后期 30 年(2070—2099 年)下降幅度大。

表 7 A2/B2 气候情景下流域年径流量分时段比较

情景	2010—2039	2040—2069	2070—2099	情景	2010—2039	2040—2069	2070—2099
A2	年径流量/亿 m ³	63.9	56.6	B2	年径流量/亿 m ³	59.0	65.4
	百分比	-0.8%	-13.8%		百分比	-9.2%	-18.6%

注：表中百分比以流域历史 1956—2008 年均径流量 64.4 亿 m³ 为参考进行计算。

4 结语

利用主分量分析和降尺度模型对 GCMs 中 A2/B2 气候情景进行了降尺度处理，选择流域 3 个气象站为代表，预测了河流域最高最低气温和降水这 3 种气候因子的未来演变趋势，并且把这 3 种气候因子输入到 SWAT 模型中对未来径流变化进行了预测。结果表明，A2/B2 两种气候情景下未来气温呈波动上升趋势，降水、径流均呈下降趋势，其中 B2 幅度大于 A2。B2 描述的情景人口增长低于 A2 情景，研究结果却显示在本世纪后期 30 年(2070—2099 年)B2 情景要比 A2 情景恶劣，这与 B2 情景下空气中 CO₂ 浓度升高滞后于 A2 情景，因此 B2 情景下气温、降水、水资源量的发展延后于 A2 情景有关。

针对NCEP和A2/B2气候模式采用了不同的主成分分析模型,这对NCEP统计降尺度模型代表性的影响本文未加考虑。此外在预测水资源量时忽略了未来土地利用情况和土壤情况的变化。这些都需要在以后的工作中进行更加深入的研究。

参 考 文 献:

- [1] 李学勇,秦大河,李家洋,等.气候变化国家评估报告[M].北京:科学出版社,2007.
- [2] Dai Aiguo, Qian Taotao, Trenberth Kevin E, et al. Changes in continental freshwater discharge from 1948 to 2004[J]. Journal of Climate, 2009, 22(10): 2773-2775.
- [3] 范丽军,符淙斌,陈德亮.统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展[J]. 2005, 20(3): 320-329.
- [4] 於凡,张光辉,柳玉梅.全球气候变化对黄河流域水资源影响分析[J]. 水文, 2008, 28(5): 52-56.
- [5] 郭靖,郭生练,张俊,等.汉江流域未来降水径流预测分析研究[J]. 2009, 29(5): 18-21.
- [6] 徐若兰,陈华,郭靖.气候变化对汉江流域上游水文极值事件的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(3): 383-386.
- [7] IPCC. Climate Change 2001: The scientific basis climate change 2001 synthesis report[M]. U K: Cambridge University Press, 2001: 61-70.
- [8] 薛毅,陈立萍.数理统计与R软件[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [9] Wilby R L, Dawson C W, Barrow E M. SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change Impacts[J]. Environmental Modeling & Software, 2002, 17: 147-159.
- [10] Chu Jian-ting, Xia Jun, Xu Chong-yu. Statistical downscaling the daily precipitation for climate change scenarios in Haihe River Basin of China[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(6): 1068-1076.
- [11] 黄俊雄,徐宗学,刘兆飞,等.统计降尺度法分析太湖流域未来气候变化情景[J]. 资源科学, 2008, 30(12): 467-470.
- [12] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation[M]. 2002, Published by Texas Water Resources Institute, College Station, Texas, 2002.
- [13] Winchell M, Srinivasan R, Di Luzio M, et al. Arcswat 2.0 Interface for SWAT2005 User's Guide[M]. 2008.

Analysis of runoff trend in basin based on climate change

FAN Hui-jing^{1, 2}, ZHAO Hong-li¹, JIANG Yun-zhong¹

(1. Department of Water Resources, IWHR, Beijing 100038, China;

2. Shenyang Branch Office, Liaoning Investigation Bureau of Hydrology and Water Resources, Shenyang 110005, China)

Abstract: In order to forecast the future runoff trends in a basin, the daily maximum and minimum temperature, daily rainfall and monthly runoff of A2/B2 climate scenarios of General Circulation Models (GCMs) are predicted and analyzed by principal component analysis, downscaling model and SWAT model. Principal component analysis extracts principal components of climate predictors in large-scale climate, and downscaling model predicts the maximum and minimum temperature and rainfall in stations using the principal components, and SWAT model puts the predicted date in stations into the basin model to calculate future runoff. The results show that, in A2/B2 climate scenarios rainfall will show a fluctuating rise, and temperature and runoff will show a fluctuating fall, in which B2 is more unfavorable than A2.

Key words: General Circulation Models (GCMs), A2/B2; principal component analysis; statistical downscaling model; SWAT model

(责任编辑:王成丽)