



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.03.005

庄晓雯, 李永平, 曾雪婷. 多 GCM 模型集合下开都河流域未来气候变化预估[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 24-29, 42. ZHUANG Xiaowen, LI Yongping, ZENG Xueting. Prediction of climate change in Kaidu River basin under multi-ensemble GCM[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 24-29, 42. (in Chinese)

多 GCM 模型集合下开都河流域未来气候变化预估

庄晓雯, 李永平, 曾雪婷

(华北电力大学 资源与环境研究院, 北京 102206)

摘要: 基于逐步聚类分析的统计降尺度模型(SCADS模型), 在多GCM模型集合的9个大尺度气象变量与开都河流域6个气象变量之间, 建立统计降尺度关系, 并进行开都河流域未来气候变化的预估。结果表明, SCADS模型生成的开都河流域各气象变量的模拟值与实测值拟合较好。各气象变量在率定期(1961年-1990年)和验证期(1991年-1999年)的NSE系数均大于0.55, 精度较高。此外, 利用SCADS模型进行开都河流域各气象变量的预估。发现在三个不同时期内(2011年-2040年, 2041年-2070年和2071年-2100年), 月均气温升高, 月均蒸发量、降水量、日照时数增加, 月均相对湿度升高。

关键词: GCM; 气候变化情景; 逐步聚类分析; 统计降尺度模型; 开都河; 预估

中图分类号: P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)03-0024-06

Prediction of climate change in Kaidu River basin under multi-ensemble GCM

ZHUANG Xiaowen, LI Yongping, ZENG Xueting

(Institute of Resource and Environment, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: A statistical downscaling model that based on the stepwise cluster analysis(SCADS), was employed to establish a statistical downscaling relationship between the large scale climate variables from the multi-ensemble GCM, and the regional climate variables of the Kaidu River basin, as well as to calculate the prediction of climate change in the future. The results indicated that the outputs of SCADS could model the climate variables of Kaidu River basin with a satisfactory. The NSE for all climate variables in the calibration (1961-1990) and validation (1991-1999) periods were larger than 0.55, indicating a good precision of SCADS. Besides, in terms of the prediction of climate change in the future of Kaidu River basin, it was shown an upwards of monthly average temperature, and a larger amount of evaporation, precipitation, sunshine hour, and relative humidity in three different periods (2011-2040, 2041-2070 and 2071-2100).

Key words: GCM; climate change scenario; stepwise cluster analysis; statistical downscaling model; Kaidu River; prediction

未来气候变化所造成的影响是水文学家首先要考虑的问题^[1-3], 因为水文过程对气候模式输出的变化非常敏感^[4]。如降水、温度、湿度、辐射和风速等, 都是驱动水文过程的重要因素^[5]。全球气候模型(GCM)可提供未来可能气候情景, 广泛应用在气候

预测、气候研究和气候变化上^[6]。但是 GCM 的输出描述是大气环流和全球气候的大尺度气候特征, 对地形和陆地-海洋分布描述有限, 不能直接应用^[7-9]。

在中国西北部的典型干旱区, 气候变化导致了

收稿日期: 2015-12-23 修回日期: 2016-04-16 网络出版时间: 2016-05-05
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160505.1059.005.html>
基金项目: 国家自然科学基金项目(51379075)

Fund: National Natural Sciences Foundation of China (51379075)

作者简介: 庄晓雯(1989), 女, 山东青岛人, 博士研究生, 主要从事不确定条件下流域水文径流模拟与预测方面研究。E-mail: zhuangzi1989@126.com。

干旱区水资源的剧烈变化,而水资源的消长变化直接制约着水域生态系统及相关生态系统的发育过程及演变趋势。因此,预测未来时期气象要素的时空变化,是干旱区水资源合理配置的基础^[10]。开都河是塔里木河四条源流中在下游补给的重要水源,对干流下游生态的恢复起着关键的作用^[11]。然而,目前有关开都河水文气象要素的研究主要以基于历史数据序列的多年变化特征分析为主,得到相关规律性认识^[12]。但是关于开都河流域未来气候条件,特别是利用全球气候模型定量模拟流域气象水文变化的研究还很少^[13]。而加拿大学者于 2013 年开发了一种基于逐步聚类分析理论的统计降尺度模型(SCADS),已在环境系统分析及径流预报中得到了良好的应用^[14-16]。本文应用逐步聚类统计降尺度模型,将多 GCM 模型集合的大尺度气象变量与开都河流域的区域气象变量,作为 SCADS 模型的输入与输出,建立其统计降尺度关系,达到将 GCM 输出的未来气候情景降尺度到开都河流域的目标,并采用开都河流域气象变量的实测值进行 SCADS 模型的率定(1961 年-1990 年)和验证(1991 年-1999 年)。此外,由已建立的大尺度气象变量与区域气象变量的统计关系,基于逐步聚类树,预估开都河流域各气象变量在未来不同时段的变化,为开展气候变化的水文响应研究和气候变化的适应性研究提供科学依据。

1 研究方法与研究区概况

1.1 SCADS 统计降尺度模型

本文采用加拿大学者于 2013 年开发的一种基于逐步聚类方法的统计降尺度模型(SCADS)^[14]。逐步聚类分析法(stepwise cluster analysis)是根据给定的标准,把一组样本分割成两类,或者把两组样本合并成一类,一步一步,直到将所有的样本进入相应的类之中。其分类和合并的标准由一系列根据 Wilks 准则进行的 F 检验构成。为了将含有 n_h 个样本的类 h 分割成两个子类 e 和 f ($n_e + n_f = n_h$),根据 Wilks 似然率准则,如果分割点最佳, Wilks 值 Λ ($\Lambda = |W|/|T|$) 应该最小。其中 T 是总样本矩阵 $\{t_{ij}\}$, $|T|$ 是矩阵 $\{t_{ij}\}$ 的行列式; W 是组内矩阵 $\{w_{ij}\}$, $|W|$ 是矩阵 $\{w_{ij}\}$ 的行列式。而当 Λ 值非常大时,类 e 和 f 不能再分,必须被合并到上一级的类 h 中。通过 F - 近似(R - 统计量)可以得到:

$$R = \frac{1 - \Lambda^{1/s}}{\Lambda^{1/s}} \times \frac{Z \cdot S - P(K-1)/2 + 1}{P(K-1)} \quad (1)$$

$$Z = n_h - 1 - (P + K)/2 \quad (2)$$

$$S = \frac{P^2(K-1)^2 - 4}{P^2 + (K-1)^2 - 5} \quad (3)$$

式中:统计量 R 是近似的服从自由度 $\nu_1 = P(K-1)$ 和 $\nu_2 = P(K-1)/2 + 1$ 的 F 分部; K 是组的个数; P 是因变量的个数。在此方法中 $K = 2$, 根据 Wilks 准则进行 F 检验。即:

$$F(P, n_h - P - 1) = \frac{1 - \Lambda}{\Lambda} \times \frac{n_h - P - 1}{P} \quad (4)$$

因此,分类和合并的标准就变成了—系列的 F 检验。此基于逐步聚类方法的统计降尺度模型(SCADS)可在相关网站(<http://env.uregina.ca/sca>)免费注册使用。SCADS 模型应用主要由五个步骤组成:(1)输入输出数据集的缺省值检验、维度检验;(2)构建输入输出变量的矩阵;(3)根据分类合并标准,将所有样本分入相应类;(4)生成逐步聚类树,代表输入输出变量间的统计关系;(5)基于此逐步聚类树,根据输入变量,生成输出(预估)变量值。SCADS 模型能够有效的处理自变量和因变量之间复杂的非线性关系,以及处理连续或离散型的随机变量。因此,在有足够先验统计信息(即足够长的训练数据)情况下,SCADS 模型可有效地利用逐步聚类树,代表多气象输入自变量与输出因变量之间复杂的非线性关系,可准确地进行变量的预报。

1.2 研究区概况

开都河流域位于新疆维吾尔自治区天山南麓焉耆盆地北缘,发源于天山中部萨尔明山的哈尔尕特和扎克斯台沟,从东向西流入小尤尔都斯盆地。盆地底部海拔在 2 400 ~ 2 600 m 之间,地势平坦;周围高山环绕,山地海拔 4 000 ~ 5 500 m。流域总的地势是北高,南低,高山、峡谷和盆地交错,地形复杂^[17]。

研究区气候具有明显的干旱特征,年平均降雨仅 273 mm,山区年降雨量为 200~500 mm,而盆地仅为 50~80 mm^[18-19]。降雨的季节变化也非常明显,超过 80% 的降雨发生在 5 月-9 月。年平均器皿蒸发量为 1 157 mm,远远高于年降雨量,部分地区有地下水补给。开都河流域内存在一定面积的永久性积雪和冰川分布,属典型的高寒气候,年平均气温为 -4.16 °C,冬季最低气温可达 -48 °C^[20]。本文选择开都河出山口以上为研究区域,流域集水面积为 $19 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。

1.3 数据资料

本研究用到的数据主要包括气象站点与 GCM 数据。

(1) 实测气象站点数据。选取了研究区内 3 个

气象站点(大山口、巴音布鲁克和焉耆站) 1961 年–2000 年共 40 年月均最高最低气温、月均蒸发量、月降水量、月均相对湿度及月日照时间共六个气象变量的数据序列, 作为 SCADS 模型的预报量。各气象站点的经纬度及海拔高度, 见表 1。

表 1 各气象站的基本情况

Tab. 1 The basic information of the meteorology stations

站点	纬度	经度	海拔/m
大山口	85°44′	42°13′	1 340
巴音布鲁克	84°09′	43°02′	2 458
焉耆	86°34′	42°02′	1 058

(2) GCM 数据。来源于 PCMDI 提供的 IPCC AR4 中的 4 个 GCM 模型在 1961 年–2000 年和 2011 年–2100 年内的模拟结果。4 个 GCM 模型的名称、国家、时段、分辨率以及在开都河流域的格点数, 均列在表 2 中。例如, GFDL_CM2_0 来源美国, 是地球流体力学实验室模式, 收集时段为 1961 年–2100 年, 水平分辨率约为 $2.5^{\circ} \times 2.0^{\circ}$ (经度 \times 纬度), 在全球共 144×90 个网格点, 在开都河流域范围内为 4 个格点。此外, 本文仅选择 IPCC 情景中的 A1B (中碳排放, 注重经济增长的全球共同发展情景) 作为代表性情景进行分析。各 GCM 模型提供了包括平均气温、最高气温、最低气温、降水量、相对湿度、绝对湿度、地表下行短波辐射、平均风速及纬向风速, 共 9 个大尺度变量。

表 2 各 GCM 模型的介绍

Tab. 2 Introduction of GCM

模型名称	国家	大气分辨率 (经度 \times 纬度)	时段	开都河流域 格点数
CGCM3T47	加拿大	3.75×3.75	1961–2100	2
GFDL_CM2_0	美国	2.5×2.0	1961–2100	4
HadCM3	英国	3.75×2.75	1961–2099	2
NCARCCSM3	美国	1.4×1.4	1961–2100	8

2 结果分析

2.1 SCADS 模型率定与验证

图 1 是开都河流域月均最高气温在率定期 (1961 年–1990 年) 和验证期 (1991 年–1999 年) 内的实测值和 SCADS 模型模拟值的对比图, 图 2 是月均最低气温在率定期和验证期内的实测值和模拟值。月均最高气温在率定期及验证期内的纳斯系数 (NSE) 分别为 0.98 和 0.96, 月均最低气温在率定期及验证期内的 NSE 分别为 0.99 和 0.95。由图中看出, 采用 SCADS 统计降尺度模型生成的开都

河月均最高气温变量和月均最低气温的模拟值均与实测值拟合较好, 其峰值和年际年内变化趋势都得到较好地呈现。

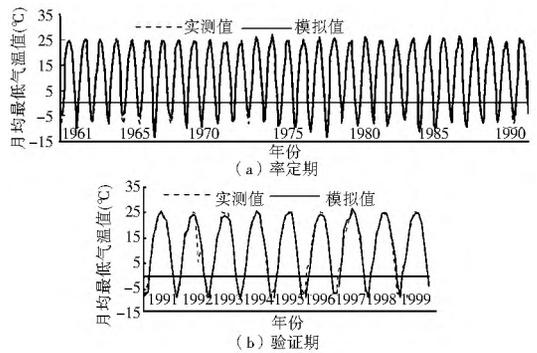


图 1 开都河流域月均最高气温在 (a) 率定期 (1961 年–1990 年) 和 (b) 验证期 (1991 年–1999 年) 实测值和模拟值
Fig. 1 Simulated and observed monthly average maximum temperature during (a) calibration (1961–1990) and (b) validation (1991–1999) periods in Kaidu River basin

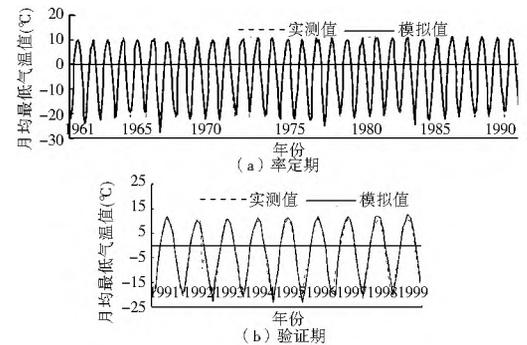


图 2 开都河流域月均最低气温在 (a) 率定期 (1961 年–1990 年) 和 (b) 验证期 (1991 年–1999 年) 实测值和模拟值
Fig. 2 Simulated and observed monthly average minimum temperature during (a) calibration (1961–1990) and (b) validation (1991–1999) periods in Kaidu River basin

图 3 是开都河流域月降水量在率定期和验证期内的实测值和模拟值。月降水量在率定期及验证期内的 NSE 分别为 0.75 和 0.62。由图中可以看出, 采用 SCADS 统计降尺度模型生成的开都河月降水量的模拟值, 与实测值拟合较好, 月降水量的年际年内变化趋势得到较好呈现。在率定期内, 1971 年 8 月和 9 月份月降水量的实测值分别为 40.06 和 45.83 mm; 其对应模拟值分别为 42.61 和 22.09 mm。其中, 1971 年 8 月份的月降水量模拟值与实测值相差不大, 而 9 月份月降水量的模拟值与实测值相差较大。这是因为, 开都河流域月均降水量实测值在 9 月份的多年平均值为 24.54 mm, 而 1971 年 9 月份月降水量的实测值远超于其平均值。同时, SCADS 模型为统计模型, 建立在多年数据的统计基础上, 因此 1971 年 9 月份月降水量的模拟值小于其实测值。在验证期内, 由图中看出, 1995 与

1999 年的月降水量的峰值均未得到准确模拟,这也是因为,SCADS 模型是根据所收集月降水量的历史数据建立起的统计关系,对远超平均值的峰值,模型未能准确把握。此外,开都河流域月均蒸发量在率定期及验证期内的 NSE 分别为 0.95 和 0.91;月日照时数的 NSE 分别为 0.70 和 0.66;月均相对湿度的 NSE 分别为 0.80 和 0.56。

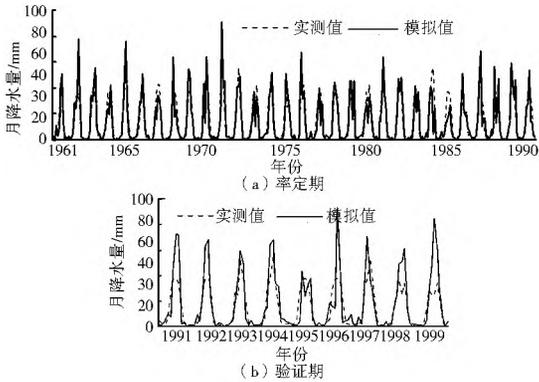


图 3 开都河流域月降水量在(a)率定期(1961年-1990)和(b)验证期(1991年-1999)实测值和模拟值
Fig. 3 Simulated and observed monthly precipitation during (a) calibration(1961-1990) and (b) validation (1991-1999) periods in Kaidu River basin

2.2 开都河流域未来气候变化预估

本文采用多 GCM 模型在 SRA1B 情景下 9 个大尺度气象变量(平均气温、最高气温、最低气温、降水量、相对湿度、绝对湿度、地表下行短波辐射、平均风速及纬向风速),在三个不同时期内(2011年-2040年,2041年-2070年和 2071年-2100年)的模拟数据作为输入,利用 SCADS 模型生成开都河流域的 6 个气象变量(月均最高气温、月均最低气温、月均蒸发量、月降水量、月日照时数和月均相对湿度)的预估值。图 4 是开都河流域月均最高、最低气温和月降水量在 2011 年-2040 年的预估值。由月均最高、最低气温和月降水量的预估值可以看出,月均最高、最低气温具有相同的年际年内变化趋势,年际变化较小;月降水量的年际变化较大。表 3 分别列出开都河流域各气象变量在 2011 年-2040 年内的多年平均月预估值。由表 3 中看出,开都河流域各气象变量预估值的最大值集中出现在 6 月、7 月份,最小值集中出现在 1 月、2 月份,符合开都河流域温带大陆性干旱气候特征。例如,月降水量的最大值为 53.28 mm,出现在 7 月份,与干旱区降水集中在夏季的特征一致,进一步证明,开都河流域降水量年内分配不均。此外,开都河地处内陆,云量少,日照率高,太阳能资源丰富。表 3 中月日照时数的预估值从 1 月到 12 月,在 184.84~297.72 h 之

间变化,符合开都河流域日照时间长的特征。

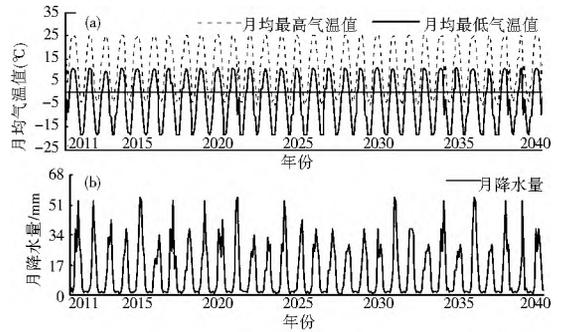


图 4 开都河流域(a)月均最高、最低气温和(b)月降水量在 2011 年-2040 年内的预估值

Fig. 4 Prediction of (a) monthly average maximum and minimum temperatures and (b) monthly precipitation during 2011-2040 in Kaidu River basin

表 3 开都河流域各气象变量在 2011 年-2040 年内的月平均预估值

Tab. 3 Monthly average of the prediction meteorological variables during 2011-2040 in Kaidu River basin

时间	变量					
	月均最高气温(°C)	月均最低气温(°C)	月均蒸发量/mm	月降水量/mm	月日照时数/h	月均相对湿度(%)
1月	-2.87	-18.37	0.43	0.68	196.86	56.89
2月	2.61	-15.84	0.42	0.45	204.56	55.54
3月	5.68	-8.82	1.13	1.50	242.07	51.52
4月	14.73	-0.09	3.88	5.55	261.37	44.47
5月	23.26	9.02	5.72	37.27	274.51	51.79
2011年-2040年	25.39	10.57	6.19	24.93	297.72	51.14
6月	24.85	10.82	5.73	53.28	288.57	56.00
7月	24.93	9.70	5.40	28.77	268.30	57.67
8月	19.88	4.60	4.50	22.09	259.61	56.11
9月	12.61	-2.84	2.42	4.45	244.56	55.54
10月	2.91	-10.48	0.78	1.85	186.82	61.55
11月	-4.06	-18.18	0.45	2.01	184.84	60.29
12月						

图 5 是开都河流域月降水量在未来不同时期(2041 年-2070 年和 2071 年-2100 年)的预估值。发现降水量在 2071 年-2100 年内的预估结果,小于其在 2041 年-2070 年内的预估值,呈现降低趋势。例如,月降水量在 2076 年 8 月份的预估值为 28.77 mm,小于其在 2046 年 8 月份的预估结果(53.28 mm)。表 4 分别列出开都河流域各气象变量在 2041 年-2070 年和 2071 年-2100 年的多年平均月预估值。由各气象变量的预估值对比可以看出,开都河流域月均最高和最低气温在 2071 年-2100 年内在冬季(12 月-2 月)的预估值大于其在 2041 年-2070 年的预估结果。月均蒸发量各月的

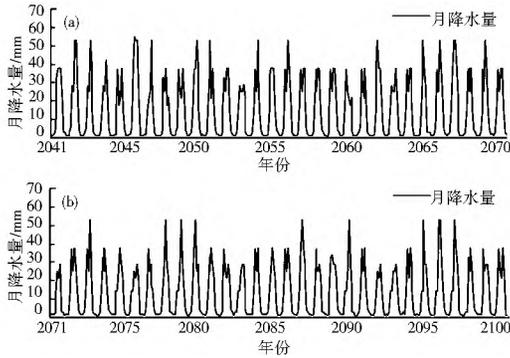


图 5 开都河流域月降水量在(a)2041 年- 2070 年和 (b) 2071 年- 2100 年的预估值

Fig. 5 Prediction of monthly precipitation during (a) 2041-2070 and (b) 2071-2100 in Kaidu River basin

表 4 开都河流域气象变量在 2041 年- 2070 年和 2071 年- 2100 年内的月平均预估值

Tab. 4 Monthly average of the prediction meteorological variables during 2041-2070 and 2071-2100 in Kaidu River basin

时间	变量						
	月均最高气温 (°C)	月均最低气温 (°C)	月均蒸发量 /mm	月降水量 /mm	月日照时数 /h	月均相对湿度 (%)	
2041 年- 2070 年	1 月	- 7.62	- 20.28	0.30	1.07	171.53	52.83
	2 月	- 5.70	- 19.57	0.39	1.58	197.37	57.88
	3 月	5.66	- 9.46	1.37	2.80	252.00	50.74
	4 月	14.73	- 0.09	3.88	5.55	261.37	44.47
	5 月	23.26	9.02	5.72	17.27	274.51	51.79
	6 月	25.39	10.57	6.19	24.93	297.72	51.14
	7 月	25.57	10.92	6.40	21.67	283.90	54.83
	8 月	25.21	10.84	5.62	37.58	288.55	55.04
	9 月	19.88	4.60	4.50	22.09	259.61	56.11
	10 月	12.61	- 2.84	2.42	4.45	244.56	55.54
	11 月	2.91	- 10.48	0.78	1.85	186.82	61.55
	12 月	- 5.14	- 17.22	0.23	1.08	153.72	68.18
2071 年- 2100 年	1 月	- 4.06	- 18.18	0.45	2.01	184.84	60.29
	2 月	3.41	- 10.07	0.84	0.94	190.39	64.86
	3 月	5.66	- 9.46	1.37	2.80	252.00	50.74
	4 月	15.80	1.80	4.00	14.23	268.73	49.00
	5 月	23.26	9.02	5.72	17.27	274.51	51.79
	6 月	25.39	10.57	6.19	24.93	297.72	51.14
	7 月	24.93	9.70	5.40	28.77	268.30	57.67
	8 月	24.87	9.70	5.45	17.73	287.98	52.50
	9 月	19.91	3.85	3.72	15.11	269.86	54.53
	10 月	12.61	- 2.84	2.42	4.45	244.56	55.54
	11 月	2.91	- 10.48	0.78	1.85	186.82	61.55
	12 月	- 5.70	- 19.57	0.39	1.58	177.37	57.88

预估结果也不同,但总体变化不大。月降水量在 2071 年- 2100 年内 4 月、12 月份的预估值,大于其

在 2041 年- 2070 年内的预估结果。月日照时数在冬季的预估结果相差较大,在其他季节相差不大。月均相对湿度总体呈现增加趋势。

图 6 为开都河各气象变量在不同时期(2011 年- 2040 年、2041 年- 2070 年和 2071 年- 2100 年) 预估结果的对比分析图。图 6(a) 表示月均最高气温预估值的不同变化。由图 6(a) 看出,2 月份月均最高气温在 2011 年- 2040 年内的预估值,大于在 2041 年- 2070 年的预估值,但都小于其在 2071 年- 2100 年内的预估结果。此外,月均最高气温在未来不同时段内的预估结果在冬季(12 月- 2 月) 相差较大,在其他季节内的预估结果则相差不大。图 6(b) 至 6(f) 分别是月均最低气温、月均蒸发量、月降水量、月日照时数和月均相对湿度在未来不同时段内预估结果的对比分析图。由各图可以看出,月降水量和月均相对湿度在未来不同时段内的预估结果变化较大,其他气象变量如月均最低气温、月均蒸发量和月日照时数的预估结果则总体上相差不大。此外,计算开都河流域各气象变量在未来时期内的多年平均值,列于表 5 中。可以看出,开都河流域各气象变量,总体呈现月均气温升高,月均蒸发量、月降水量、月日照时数增加,月均相对湿度升高的趋势。

3 结论

本文应用逐步聚类统计降尺度模型 SCADS,在 有足够先验统计信息(即足够长的训练数据) 情况下,有效地建立 GCM 模型输出的大尺度气象变量与开都河区域气象变量间的统计关系,将 GCM 输出的未来气候情景降尺度到开都河流域,并分析了流域未来的气候变化趋势。

作为 SCADS 模型的输入和输出数据集,多 GCM 模型集合得出的 1961 年- 1990 年的 9 个大尺度气象变量(相对湿度、极端湿度、降水量、日照辐射、最高气温、最低气温、平均温度及风速),与开都河流域 6 个实测月变量(月最低最大气温、月降水量、月均蒸发量、月日照时数及月相对湿度),能够建立有效的统计降尺度关系。6 个气象变量在率定期(1961 年- 1990 年) 内的 NSE 系数分别对应为 0.98、0.99、0.95、0.75、0.70、0.80,在验证期(1991 年- 1999 年) 内的 NSE 系数分别为 0.96、0.95、0.91、0.62、0.66、0.56。

SCADS 统计降尺度模型生成的开都河月降水量的模拟值与实测值的年际年内变化趋势拟合较

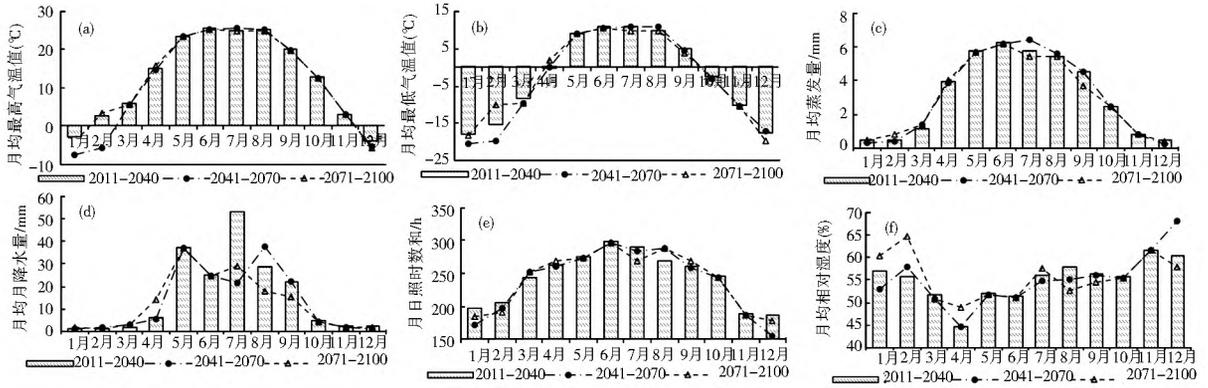


图6 开都河流域各气象变量: (a) 月均最高气温(b)月均最低气温(c)月均蒸发量(d)月降水量(e)月日照时数和(f)月均相对湿度在2011年-2040年、2041年-2070年和2071年-2100年预估值的对比变化

Fig. 6 Comparison of the prediction of (a) monthly average maximum temperature, (b) monthly average minimum temperature, (c) monthly average evaporation, (d) monthly precipitation,

(e) monthly sunshine hour and (f) monthly average relative humidity during 2011-2040, 2041-2070 and 2071-2100 in Kaidu River basin

表5 开都河流域气象变量在不同时段预估值的多年平均值

Tab. 5 Multiyear average values of the prediction meteorological variables in Kaidu River basin in different periods

时段	变量					
	月均最高气温(℃)	月均最低气温(℃)	月均蒸发量/mm	月降水量/mm	月日照时数/h	月均相对湿度(%)
2011-2040年	11.48	-3.12	2.98	13.60	248.67	55.14
2041-2070年	12.31	-1.91	3.12	15.36	246.05	57.08
2071-2100年	12.57	-1.97	3.07	13.73	249.38	55.62

好,但峰值的模拟有偏差。这是因为 SCADS 模型为统计模型,是建立在多年历史数据的统计基础上,当月降水量的实测值远超于其多年平均值时,对其的模拟值将会小于其实测值。

利用 SCADS 统计降尺度模型进行开都河流域气象变量在三个不同时期(2011年-2040年,2041年-2070年和2071年-2100年)的预估,结果发现总体呈现增加或升高的趋势。

参考文献(References):

[1] IPCC. Climate change 2007: impacts, adaptation, and vulnerability [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 1-976.
 [2] 田琳,王龙,文俊,等.气候变化对大海波水库来水及用水影响[J].南水北调与水利科技,2012,10(5):27-31.(TIAN Lin, WANG Long, WEN Jun, et al. Effects of climate change on inflow and water consumption in Dahaibo Reservoir[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(5): 27-31. (in Chinese))
 [3] 易卿,程彦培,张健康,等.气候变化对黑龙江-阿穆尔河流域的生态环境影响[J].南水北调与水利科技,2014,12(5):90-103.(YI Qing, CHENG Yanpei, ZHANG Jiankang, et al. Impact of climatic change on ecological environment of Heilongjiang Amur River Basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(5): 90-103. (in Chinese))
 [4] Fische B M, Mellese A M, Romano E, et al. Statistical downscaling of precipitation and temperature for the Upper Tiber

Basin in Central Italy[J]. International Journal of Water Sciences, 2012, 1(3): 1-14.
 [5] Mearns L O, Bogardi I, Giorgi F, et al. Comparison of climate change scenarios generated from regional climate model experiments and statistical downscaling[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104: 6603-6621.
 [6] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Climate change 2001, the scientific basis, contribution of working group I to the third assessment of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
 [7] Cohen S J. Bringing the global warming issue close to home: the challenge of regional impact studies[J]. Bulletin American Meteorological Society, 1990, 71: 520-526.
 [8] VonStorch H, Zorita E, Cubasch U. Downscaling of global climate change estimates to regional scales: an application to Iberian rainfall in wintertime[J]. Journal of Climate, 1993, 6(6): 1161-1171.
 [9] Zhang H, Huang G H. Development of climate change projections for small watersheds using multi model ensemble simulation and stochastic weather generation[J]. Climate Dynamic, 2013, 40: 805-821.
 [10] 杨青,崔彩霞.气候变化对巴音布鲁克高寒湿地地表水的影响[J].冰川冻土,2006,27(3):397-404.(YANG Qing, CUI Caixia. Impact of climate change on the surface water in Bayanbuluk Alpine Cold wetland in the Tianshan Mountainous[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 27(3): 397-404. (in Chinese))

(下转第42页)

- [10] 王志良, 杨弘. 天津市水源地降水丰枯遭遇性分析[J]. 海河水利, 2004(06): 15-18. (WANG Zhiliang, YANG Hong. Tianjin water sources suffered the precipitation analysis[J]. Haihe Water Resources, 2004(06): 15-18. (in Chinese))
- [11] 周芬. Kendall 检验在水文序列趋势分析中的比较研究[J]. 人民珠江, 2005(2): 35-37. (ZHOU Fen. Kendall test in the analysis of hydrological sequence trend in comparative study[J]. Pearl River, 2005(2): 35-37. (in Chinese))
- [12] 罗蔚, 张翔, 邓志民, 等. 1956-2008 年鄱阳湖流域水沙输移趋势及成因分析[J]. 水科学进展, 2014(05): 658-667. (LUO Wei, ZHANG Xiang, DENG Zhimin, et al. Runoff and sediment load transport and cause analysis in Poyang Lake basin over the period 1956-2008[J]. Advances in Water Science, 2014(05): 658-667. (in Chinese))
- [13] Yue S, Wang C Y. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test[J]. Water Resources Research, 2002, 38(6): 1-4.
- [14] 李文文, 傅旭东, 吴文强, 等. 黄河下游水沙突变特征分析[J]. 水力发电学报, 2014(01): 108-113. (LI Wenwen, FU Xudong, WU Wenqiang, et al. Study on runoff and sediment process variation in the lower Yellow River[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014(01): 108-113. (in Chinese))
- [15] Hengyi W, 刘纪元. 小波周期频率分析及其应用于热带西太平洋对流变化研究[J]. 海洋技术, 1997, 16(02): 62-75. (Hengyi W, LIU Jiyuan. Wavelet cycle frequency analysis and its application in the tropical western Pacific convection change research[J]. Marine Technology, 1997, 16(02): 62-75. (in Chinese))
- [16] 张宇, 钟平安, 万新宇, 等. 近 57 年江苏沿海降水量演变特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015(02): 36-39. (ZHANG Yu, ZHONG Pingan, WAN Xin Yu, et al. Analysis of characteristics of Jiangsu coastal precipitation evolution nearly in 57 years[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015(02): 36-39. (in Chinese))
- [17] 潘杰. 常州地区 1978 年-2012 年降水量时空分布特征[J]. 南水北调与水利科技, 2015(02): 34-36. (PAN Jie. Spatial and temporal characteristics of precipitation in Changzhou Area from 1978 to 2012[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015(02): 34-36 (in Chinese))
- [18] 张蔚, 严以新, 郑金海, 等. 珠江三角洲年际潮差长期变化趋势[J]. 水科学进展, 2010(01): 77-83. (ZHANG Wei, YAN Yixin, ZHENG Jinhai, et al. Interannual tidal range trend in Pearl River Delta[J]. Advances in Water Science, 2010(01): 77-83. (in Chinese))
- [19] 周园园, 师长兴, 范小黎, 等. 国内水文序列变异点分析方法及在各流域应用研究进展[J]. 地理科学进展, 2011(11): 1361-1369. (ZHOU Yuan Yuan, SHI Changxing, FAN Xiaoli, et al. Advances in the research methods of abrupt changes of hydrologic sequences and their applications in drainage basins in China[J]. Progress in Geography, 2011(11): 1361-1369. (in Chinese))

(上接第 29 页)

- [11] 徐海量, 叶茂, 宋郁东. 塔里木河源流区气候变化和年径流量关系初探[J]. 地理科学, 2007, 2: 219-224. (XU Hailiang, YE Mao, SONG Yudong. Relationship between climate changes and annual runoff of head streams of Tarim River[J]. Scientia Geographica Sinica, 2007, 2: 219-224. (in Chinese))
- [12] 张玉江. 塔里木河源流区径流量年内变化特征[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(5): 124-128. (ZHANG Yujiang. Intrannual variation analysis of runoff in the headstream area of Tarim River basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(5): 124-128. (in Chinese))
- [13] 孙美平, 姚晓军, 李忠勤, 等. 21 世纪天山南坡台兰河流域径流变化情景预估[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(5): 342-349. (SUN Meiping, YAO Xiaojun, LI Zhongqin, et al. Estimation of TAILAN river discharge in the Tianshan Mountains in the 21st century[J]. Advances in Climate Change Research, 2012, 8(5): 342-349. (in Chinese))
- [14] Wang X Q, Huang G H, Lin Q G, et al. A stepwise cluster analysis approach for downscaled climate projection: a Canadian case study[J]. Environmental Modelling and Software, 2013, 49: 141-151.
- [15] Qin X S, Huang G H, Chakm A. A Stepwise inference based optimization system for supporting remediation of petroleum contaminated sites[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2007, 185: 349-368.
- [16] Wei S, Huang G H, Zeng G M, et al. A stepwise cluster microbial biomass inference model in food waste composting[J]. Waste Management, 2009, 29: 2956-2968.
- [17] Chen Y N, Yang Q, Luo Y, et al. Ponder on the issue of water resources in the arid region of northwest China[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(1): 1-9.
- [18] Dou Y, Chen X, Bao A M, et al. The simulation of snowmelt runoff in the ungauged Kaidu river basin of Tianshan Mountains, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62: 1039-1045.
- [19] Ling H B, Xu H L, Fu J Y. Temporal and spatial variation in regional climate and its impact on runoff in Xinjiang, China[J]. Water Resources Management, 2013, 27: 381-399.
- [20] Shangguan D H, Liu S Y, Ding Y J, et al. Glacier changes during the last forty years in the Tarim Interior River basin, northwest China[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19: 727-732.