

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.03.002

基于 BCSD 降尺度方法的黄河源区气候变化预测

段小兰¹,郝振纯²,陈 奕¹

(1. 福州市规划设计研究院城市研究中心,福建 福州 350003;
2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要: 采用 BCSD 降尺度方法,根据黄河源区 16 个气象站基准期(1961—1990 年)的逐日降水量、气温,最高气温和最低气温资料,对 IPCCAR4 中的 20 个 GCM 模式在 A1B 情景下的气象资料进行降尺度研究,并简单论证了 BCSD 的降尺度效果及其结果的可信性。基于降尺度分析结果,预测在 A1B 情景下,黄河源区温度普遍升高,增幅约为 0.032℃/a,降水量呈现波动状微弱上升趋势,增幅约为 0.50 mm/a,同时从流域空间分布上看,东南部降水和气温的增加效果显著,一定程度上可认为黄河源区东南部有暖湿化的演变趋势。

关键词: 气候模式;BCSD;降尺度;黄河源区;气候变化

中图分类号:P467 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2014)03-0195-05

Climate change forecasting in source region of Yellow River based on BCSD downscaling method

DUAN Xiaolan¹, HAO Zhenchun², CHEN Yi¹

(1. Urban Research Center, Fuzhou Planning Design and Research Institute, Fuzhou 350003, China;
2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The bias-corrected and spatially and temporally downscaled (BCSD) method was used to downscale 20 GCM in IPCC AR4 in an A1B scenario in the source region of the Yellow River based on the data of daily precipitation, daily temperature, maximum temperature, and minimum temperature from 16 meteorological stations during the baseline period from 1961 to 1990. The performance and the confidence of BCSD are demonstrated in brief. The downscaling results show that, in the future, in the source region of the Yellow River, the temperature will increase by 0.032℃ per year and the precipitation will increase by 0.50 mm per year, with fluctuations and a slightly increasing trend, in the A1B scenario. Meanwhile, the temperature and precipitation are increasing significantly in the southeastern area, indicating that the climate there is becoming warm and humid.

Key words: GCM; BCSD; downscaling; source region of Yellow River; climate change

黄河源区位于青藏高原东北部,是黄河的发源地,对整个黄河流域的水资源利用发挥着举足轻重的作用。在全球变暖的大背景下,自 19 世纪以来全球平均地表温度升高了 0.3~0.6℃^[1],这对区域水循环将产生较大影响。然而气候变化存在区域差异性,不同的区域气候变化导致的水文响应必将不同。区域气候信息是研究气候变化对区域水文过程影响的必要条件,因此如何获得黄河源区区域尺度上未来气候变化的信息成为预测黄河源区未来水资源状况的核心问题。

随着计算机水平的提高和人类对自然现象物理机制的进一步认识,气候模式(GCM)得到了很大的发

收稿日期: 2013-04-10

基金项目: 全球变化研究国家重大科学研究计划(2010CB951101);国家自然科学基金(40830639,41101015);高等学校博士学科点专项科研基金(20110094110013)

作者简介: 段小兰(1986—),女,湖南茶陵人,硕士,主要从事城市水文、气候变化对水文水资源影响研究。E-mail:xiaolan-xyz@163.com

展,成为长时间尺度预测气候变化的有力工具,因此以 GCM 输出资料作为未来气候条件耦合水文模型来研究未来水文水资源状况已逐步发展为研究水文对气候变化响应的一种重要方式。然而 GCM 在空间和时间上的粗分辨率很难直接与细分辨率的水文模式相连接,因此如何弥补两者分辨率上的差异是一个急需解决的问题,对 GCM 进行降尺度是弥补这一差异的有效方法。

降尺度方法研究已有几十年的历史,可分为动力降尺度法、统计降尺度法和动力-统计相结合法^[2],每种方法都存在自身的优势和劣势。目前在黄河源区应用较多主要有统计降尺度法和 Delta 法。赵芳芳等^[3]在黄河源区对统计降尺度法和 Delta 法生成的气候情景结果进行比较分析,结果表明,两种方法下,黄河源区的降雨和气温都有增加的趋势;王晓燕等^[4]基于统计降尺度法对黄河源区的气候极值进行了预测;郝振纯等^[5]利用统计降尺度模型对黄河源区的降水进行降尺度,分析未来降水的变化,结果表明,统计降尺度模型对降水的模拟值普遍偏低。本文采用 BCSD(bias corrected and spatially and temporally downscaled)降尺度法对黄河源区气候变化进行研究。

1 研究区域概况与 BCSD 降尺度法

1.1 研究区域与数据

黄河源区位于青藏高原的东北部,指唐乃亥水文站以上的控制区域(32°00′N~36°40′N,95°50′E~103°30′E),如图 1 所示,流域面积 12.2 万 km²,为对气候变化较为敏感的高旱地区。

考虑到 A1B 情景的二氧化碳排放量居于 A2 和 B1 间,在气候变化研究中较常用,故采用 IPCC AR4 中 20 个模式^[14]20C3M 和 A1B 情景下的气象资料、黄河源区内及周边 16 个气象站(图 1)1961—2000 年实测数据进行降尺度研究。

1.2 数据预处理

本文降尺度的目标空间分辨率为 1/12°×1/12°,考虑到 20 个 GCM 的分辨率均不同,因此首先将其统一到 2°×2°的空间分辨率,需对数据进行相关的预处理,主要包括:

a. 将黄河源区 16 个站点的历史观测数据,以 0.003 6 °C/m 的递减率考虑高程对气温的影响,采用反距离加权平均插值法分别插值到 2°×2°和 1/12°×1/12°的网格上。

b. 将 20 个 GCM 的 20C3M 和 A1B 情景数据采用反距离加权平均插值法(0.003 6 °C/m 的递减率)插值到 2°×2°的网格上。

1.3 BCSD 降尺度法介绍

BCSD 降尺度法最早由 Wood 等提出^[6-7],近年来在国外有关研究中被广泛采用^[8-11]。该方法的主要优势在于:(a)对 GCM 数据通过概率分布曲线矫正,利用历史观测资料减少 GCM 的系统误差;(b)通过 SYMAP(synographic mapping system)^[12-13]对扰动因子插值,可考虑气候变化的空间差异性。基于反距离加权法的 SYMAP 插值法,在反距离加权法的基础上同时考虑了方向和梯度问题。

BCSD 降尺度法是一种基于统计关系的降尺度方式,主要计算步骤如下:(a)分别统计每个网格(2°×2°)的观测资料多年月平均降水量和温度值,以及 GCM 在基准期的多年月平均降水量和温度值,并排序计算经验频率;(b)绘制两者(实测序列和 GCM 序列)的频率曲线,用频率曲线校正未来情景下的 GCM 值,得到降水和气温的校正因子;(c)考虑网格自身的区域性特性,将 2°×2°分辨率下的校正因子通过 SYMAP 插值法转化到 1/12°网格上;(d)对基准期中的资料进行随机抽样,得到未来每个月的初始序列,并以相应月份的扰动因子进行扰动(降雨乘以扰动因子,温度加扰动因子),即得到未来的降水序列和气温序列。

BCSD 降尺度法两个关键部分为:GCM 校正和时空上的解集。

1.3.1 GCM 校正

各个 GCM 都存在一定的系统误差,在进一步分析之前,有必要对 GCM 预测的结果进行校正。校正基于

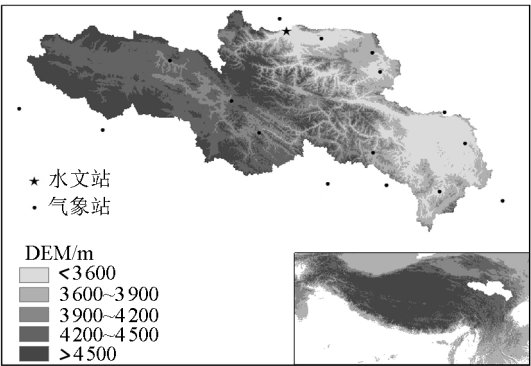


图 1 黄河源区气象站点空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of meteorological stations in source region of Yellow River

以下假设:(a) GCM 能很好地再现月平均温度和月降水序列的概率分布,记作 $F_g(x)$;(b) 若观测序列在基准期的概率分布记作 $F_o(x)$,假设 $F_g(x)=F_o(x)$;(c) $F_g(x)=F_o(x)$ 这种函数关系在未来也保持不变。

GCM 值校正逐个网格逐月进行。如图 2 所示,图 2(a) 是未来时期所有年第 j 月的变量(P,T)的过程线,图 2(b) 为基准期实测资料 and 各个 GCM 在 20C3M 情景下变量在第 j 月累积概率曲线。概率曲线的组成

$$T_{cdf} \begin{cases} \text{正态分布} & (T_{\min} > T_g) \\ \text{经验分布} & (T_{\min} \leq T_g \leq T_{\max}) \\ \text{正态分布} & (T_{\max} < T_g) \end{cases}$$

$$P_{cdf} \begin{cases} \text{韦伯分布} & (P_{\min} > P_g) \\ \text{经验分布} & (P_{\min} \leq P_g \leq P_{\max}) \\ \text{极值分布} & (P_{\max} < P_g) \end{cases}$$

其中, T_{cdf} 、 P_{cdf} 为温度和降雨的概率分布; $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$ 为基准期温度的最小值和最大值; $P_{\min}$ 、 $P_{\max}$ 为基准期降雨的最小值和最大值; T_g 、 P_g 为待校正的 GCM 原始温度值和降雨值。

给定某年第 j 月的 GCM 原始值 T_g 或 P_g (图 2(a) 实线),可在图 2(b) 20C3M 的频率曲线中查到相应经验概率,记为 F_g ,基于假设 $F_o=F_g$,在实测概率分布中由 F_o 可查得相应的变量值,即得到校正后的 GCM 值 T'_g 或 P'_g (图 2(a) 虚线)。

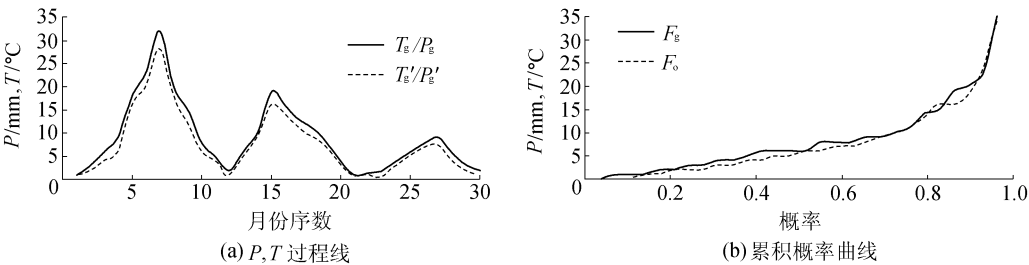


图 2 GCM 校正过程示意图
Fig. 2 Sketch map of GCM correction process

1.3.2 时空上的解集

通过概率分布对 GCM 值进行校正之后,以随机抽样的方式进行时空上的降尺度处理,主要思想类似于 Delta 方法。空间上,粗分辨率下的扰动因子采用 SYMAP 插值法细化到细分辨率下 ($1/12^\circ \times 1/12^\circ$);时间上,从月到日序列由随机抽样实现,具体抽样方法为:首先统计得到黄河源区第 j 月的降水序列(样本容量为 40),将第 j 月降雨序列进行升序排序,在排序序列中选取后 30 a 为湿润年份,对湿润年份随机抽样 100 次,即得到未来情景下各年第 j 月对应于历史期的实测资料月份,以该实测资料月份相应的逐日气象序列作为未来月份的初始扰动序列。

2 降尺度处理结果分析

对 20 个 GCM 初始值做简单算术平均,记做初始模式均值,对 20 个 GCM 的降尺度处理结果做算术平均,记作模式降尺度均值,对比两个模式集合和实测序列(图 3),可明显看到降尺度的必要性和 BCSD 的降尺度效果。气温在基准期(1961—1990 年)内,实测值与初始模式均值接近,但从 1990 年后,GCM 与实测气

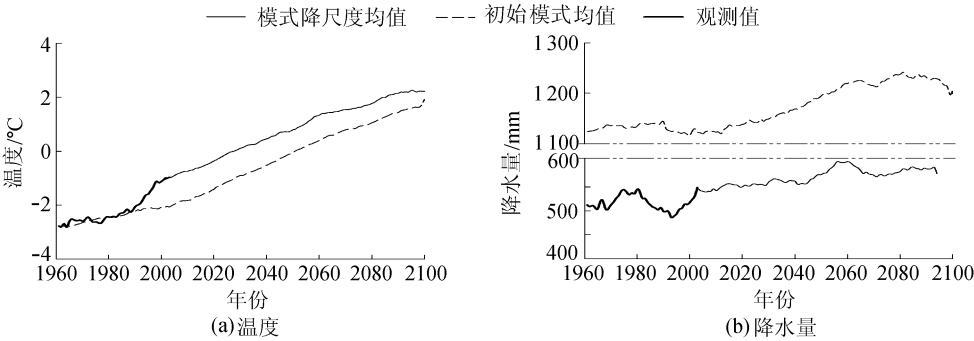


图 3 温度和降水的 10 a 滑动平均序列
Fig. 3 Ten-year moving average series for temperature and precipitation

温发生很大的偏差,通过校正和降尺度处理后,A1B 情景下温度年序列都能与实测序列衔接上,并且延续了历史气温变化的趋势,可认为降尺度处理结果是具有一定可信度的,因此可预测在未来时期内,黄河源区增温趋势很明显,增温幅度达到 $0.032\text{ }^{\circ}\text{C/a}$;基准期内,降水的初始模式均值总体比实测偏大 2 倍左右。通过 BCSD 降尺度法,未来情景下模式降尺度均值的降水与实测降水在量值上相当,在未来时段内呈现波动状的微弱上升趋势,预测增加幅度约为 0.5 mm/a 。

将未来 90 a(2011—2100 年)划分为 3 个时段,分别为 2011—2040 年、2041—2070 年和 2071—2100 年,比较各不同时段(包括 2011—2100 年整个时段)内变量的年内分配过程,结果见图 4(集合模式是指 20 个 GCM 降尺度后的平均值)。从图 4 可以看到,随着时间的推移,温度的增加幅度越大,而降水的年内分配出现降水峰值提前的现象。

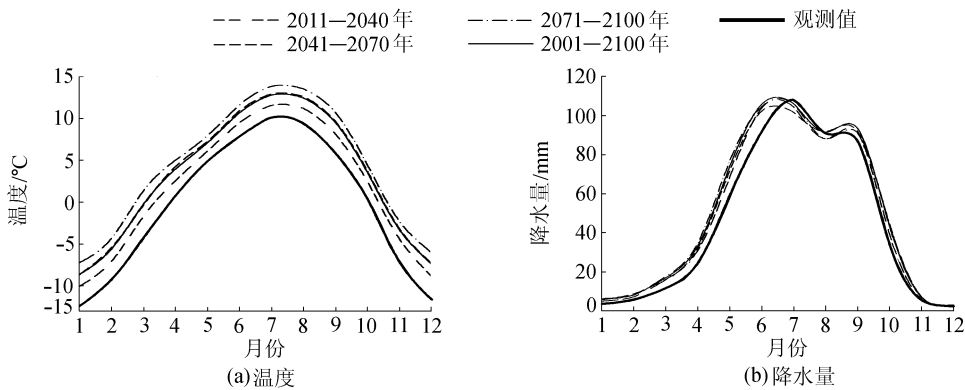


图 4 集合模式在未来不同时段的气温和降水量年内分配过程

Fig. 4 Intra-annual distributions of temperature and precipitation in 20 integrated GCM during different periods in future

图 5 显示,实测序列的温度呈现由东南向西北减小的趋势,区域最低多年平均温度出现在中部地区,全流域平均温度为 $-6\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。未来时期内,温度的空间分布与实测温度空间分布相似,呈现东南到西北的递减趋势,同时全流域范围的温度相对于实测温度明显升高,且出现几个高温点。分析降水的空间分布(图 6),

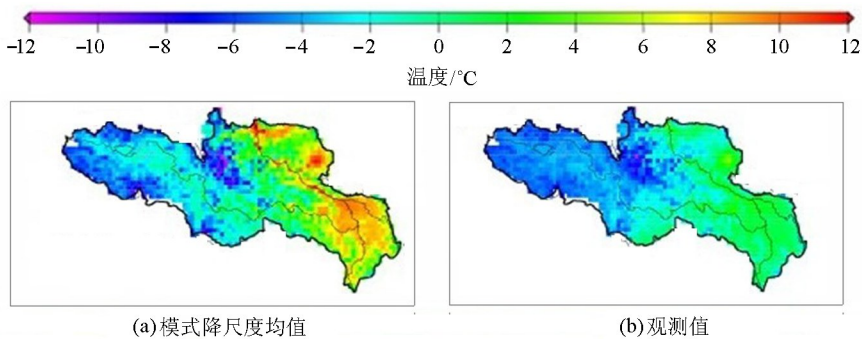


图 5 未来多年平均温度与实测多年平均温度的空间分布对比

Fig. 5 Comparison of spatial distributions of forecasted and observed multi-year average temperature

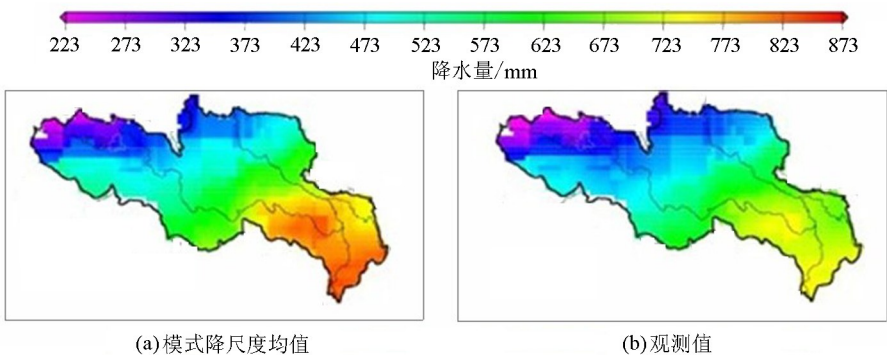


图 6 未来多年平均降水量与实测多年平均降水量的空间分布对比

Fig. 6 Comparison of spatial distributions of forecasted and observed multi-year average precipitation

模式降尺度均值预测的未来降水空间分布与历史基准期的相似,但在流域东南部明显增加。结合温度的变化情况,可认为 A1B 情景下黄河源区东南部有暖湿化的演变趋势。

3 结 论

根据黄河源区内及周边 16 个气象站点的基准期 30 a 的资料,通过 BCSD 降尺度方法,对 IPCC AR4 中 20 个模式在 A1B 情景下的未来气象资料进行降尺度分析,并预测源区未来气候变化情况,得出结论:

a. BCSD 降尺度法涉及的变量较少、简单易行,同时考虑了 GCM 的系统误差和地形差异,是一种实用的降尺度方法,通过分析,BCSD 降尺度法在黄河源区的效果较好,具有一定的可信性。

b. 降尺度处理结果的分析表明,黄河源区在 A1B 情景下,流域温度普遍升高,年平均温度增幅达 0.032℃/a,降水呈现波动状微弱上升趋势,增幅为 0.5 mm/a,且东南部的温度和降水增加最为显著,在未来气候条件下,黄河源区东南部有暖湿化的演变趋势。

致谢:本文在 GCM 数据处理过程中得到了中国科学院青藏高原研究所苏风格研究员的帮助和支持,在此表示感谢!

参考文献:

[1] NICHOLLS N,GRUZA G V,JOUZEL J,et al. Observed climate variability and change[M]. New York:Cambridge University Press,1996: 133-192.

[2] 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]. 地球科学进展,2005,20(3): 320-329. (FAN Lijun,FU Congbin,CHEN Deliang. Review on creating future climate change scenarios by statistical downscaling techniques[J]. Advances in Earth Science,2005,20(3):320-329. (in Chinese))

[3] 赵芳芳,徐宗学. 统计降尺度法和 Delta 方法建立黄河源区气候情况的比较分析[J]. 气象学报,2007,65(4): 653-658. (ZHAO Fangfang,XU Zongxue. Comparative analysis on downscaled climate scenarios for headwater catchment of Yellow River using SDS and delta methods[J]. Acta Meteorological Sinica,2007,65(4):653-658. (in Chinese))

[4] 王晓燕,杨涛,郝振纯. 基于统计降尺度的黄河源区气象机值预测[J]. 水电能源科学,2011,29(4):1-4. (WANG Xiaoyan,YANG Tao,HAO Zhenchun. Climate extreme forecasting in headwater catchment of Yellow River based on statistical downscaling menthod[J]. Water Resoures and Power,2011,29(4):1-4. (in Chinese))

[5] 郝振纯,时芳欣,王加虎. 统计降尺度法在黄河源区未来降水变化分析中的应用[J]. 水电能源科学,2011,29(3):1-4. (HAO Zhenchun,SHI Fangxin,WANG Jiahu. Research and analysis of change of precipitation in headstream reigion of Yellow River by using statistical downscaling model[J]. Water Resoures and Power,2011,29(3):1-4. (in Chinese))

[6] WOOD A W,MAURER E P,KUMAR A,et al. Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States[J]. J Geophys Res,2002,107(D20):4429.

[7] WOOD A W,LEUNG L R,SRIDHAR V,et al. Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs[J]. Climatic Change,2004,62(1): 189-216.

[8] CHRISTENSEN N S,LETTENMAIER D P. A multimodel ensemble approach to assessment of climate change impacts on the hydrology and water resources of the Colorado River Basin[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2007,11(4):1417-1434.

[9] HAYHOE K,WAKE C P,HUNTINGTON T G,et al. Past and future changes in climate and hydrological indicators in the US Northeast[J]. Climate Dynamics,2007,28(4): 381-407.

[10] MAURER E P. Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California, under two emissions scenarios[J]. Climatic Change,2007,82(3): 309-325.

[11] CUO L,BEYENE T K,VOISIN N,et al. Effects of mid-twenty-first century climate and land cover change on the hydrology of the Puget Sound basin, Washington[J]. Hydrological Processes,2011,25(11):1729-1753.

[12] SHEPARD D S. Spatial Statistics and Models[M]. Berlin:Springer Netherlands,1984: 133-145.

[13] HAMLET A F,LETTENMAIER D P. Production of temporally consistent gridded precipitation and temperature fields for the continental United States[J]. Journal of Hydrometeorology,2005,6(3): 330-336.

[14] 段小兰. 气候变化下黄河源区水资源预测分析[D]. 南京:河海大学,2012.