

气候变化对地表水资源的影响

郝振纯¹, 李 丽¹, 王加虎¹, 王振华², 史学丽³

1. 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

2. 山西省气象科学研究所, 山西太原 030002

3. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

摘要: 总结了气候变化对水文水资源影响方面的研究方法, 分析了气候变化条件下水文水资源变化的研究现状和存在问题. 并以山西省和黄河源区为研究对象, 以分布式水文模型为工具, GCMs 输出的气候情景为输入条件, 针对不同的下垫面特征建立不同的分布式水文模型, 分别采用气候情景趋势分析结果和直接利用 GCMs 输出结果两类方法确定气候变化的数据源, 对研究区域未来的地表径流过程和地表水资源可能的变化趋势进行了研究. 从气候情景的预测结果来看, 未来 50 年山西省的气温和降水都呈增加趋势, 但由于各自对水资源带来的影响不同, 将使山西省水资源呈现先增加后减少的趋势; 且由于冬季气温和降水的增幅比夏季大, 使得未来山西省的水资源年内分布有略微平缓的趋势. 对黄河源区而言, 虽然未来 100 年内的降水和气温都呈增加趋势, 但由于降水增长引起的地表水资源的增加不足以抵消气温升高带来的影响, 因此将导致径流量不断降低的总体趋势, 并使径流年内分布略趋平缓, 而年际分布将越来越不均匀, 旱涝威胁日趋严峻.

关键词: 气候变化; GCM; 分布式水文模型; 地表径流.

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2007)03-0425-08

收稿日期: 2006-11-27

Impact of Climate Change on Surface Water Resources

HAO Zhen-chun¹, LI Li¹, WANG Jia-hu¹, WANG Zhen-hua², SHI Xue-li³

1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. Shanxi Institute of Meteorological Sciences, Taiyuan 030002, China

3. The National Climate Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract: In recent years, climate change with its far-reaching influences, has emerged as a popular issue. Among the various aspects of climate change, its impact on the terrestrial water cycle has been regarded as one of the most important issues, because it directly affects human settlement and ecosystem. The paper reviews previous studies first, and then pointed out their weakness and future research focuses. As practices, the impacts of climate change on surface runoff and water resources in Shanxi Province and the head region of Yellow River were studied here. And results of 7 Global Climate Models (GCMs) in the Third Assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change from IPCC Data Distribution Center web page was employed as future potential climate change. Different distributed hydrologic models based on local underlying surface were developed in order to evaluate the impacts on water resources. Future potential climate change of Shanxi Province were assessed by integrating outputs of GCMs, whereas which of the head region of Yellow River were come from results of different GCMs directly. Conclusions show that both precipitation and temperature of Shanxi Province would be increasing before 2050, but the surface water resources would increase before 2030 and then decrease, because the impact of future temperature increase on runoff would be less than that of precipitation increase before 2030 but more than it after 2030. And on the head region of Yellow River, temperature and precipitation would also increase. But the quantity of runoff would be decreasing in next 100 years for the region belongs to high and cold areas, which would make the impact of temperature increase on runoff larger than that of precipitation. And the distribution of runoff would be more even in years

基金项目: 中国气象局气候变化专项(No. CCSF2006-36); 山西省气象局开放式研究基金项目(No. SX052002); 高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20060294003).

作者简介: 郝振纯(1958—), 男, 教授, 博导, 主要从事水文水资源和气候变化影响研究. E-mail: Hzchun@vip.sina.com

but more uneven among years, the latter may imply the higher possibility of drought and flood.

Key words: climate change; global climate model; distributed hydrological model; surface runoff.

0 引言

气候作为人类赖以生存的自然环境的一个重要组成部分, 它的任何变化都会对自然生态系统以及社会经济产生深刻影响(Ding and Geng, 1998). 近些年来, 气候除了自然的周期性波动以外, 越来越多地受到人为因素的影响, 其中最显著的是全球大气化学组成的改变, 主要是臭氧耗减和温室气体的增加. 人类活动是导致过去 100 年中全球气候变化的最重要因素, 人为引起的变化已经可以与自然变化区分开来, 而且人为影响的结果已大于过去 1000 年的气候自然变化的结果(孙成权等, 2003). 在全球变暖的大背景下, 近百年来中国的气候也在变暖, 以西北、华北、东北最为明显, 尤其是华北地区出现了暖干化趋势.

水资源对气候变化尤其是全球变暖的响应问题, 包括水循环过程、水量时空分布、降水极端事件与洪涝灾害等的改变, 事关人类的生存与发展(Gleck, 1989). 长期以来, 水文学者把气候静态地看作某种统计的平衡, 忽略了变化环境下的水资源形成与演化规律问题(Perry, 1993). 随着对全球变化尤其是气候变化认识的不断深入, 水文、水资源对全球气候变化的响应问题引起广泛关注, 已成为国际研究热点问题.

本文针对目前气候变化对水文水资源影响方面的研究进行了回顾和总结, 建立了分布式水文模型, 利用政府间气候变化委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)数据中心(Data Distribution Centre, DDC)发布的 7 个全球气候模式(Global Climate Models, GCMs)预测结果, 以山西省和黄河源区为例, 针对气候变化对水资源、尤其是地表水资源的影响进行了研究.

1 气候变化对水资源的影响研究进展

气候变化对水循环的影响有直接和间接两种方式. 直接影响主要来自大气环流变化引起的降水时空分布、强度和总量的变化、雨带的迁移以及气温、空气湿度、风速的变化等. 间接的影响主要来自陆面过程, 土地利用、地表反照率、粗糙度及界面水汽交换乃至

土壤水热特性的变化. 这些下垫面因素的变化是气候变化和人类活动综合影响的结果, 同时又对气候系统有着反馈作用. 因此气候变化引起了不同时空尺度的降水、土壤水、蒸发、地表水及地下水的变化.

1.1 气候情景

已经发生的气候变化可以通过观测和重建的资料获得, 但人们更关注未来可能发生的气候变化. 关于未来气候变化对水文、水资源影响的研究, 气候情景的选择是先决条件. “情景”一词指“预料或期望的一系列事件的梗概或模式”, 是描绘未来可能会发生怎样变化的可选择的景象, 是分析各种驱动因子如何影响未来排放(温室气体和硫化物气溶胶)结果并评估相关的不确定性的一种较为合适的工具. 各种不同的情景构成了可供选择的未来世界的发展蓝图.

气候情景大致可分为四类: (1) 类比情景, 主要是指古气候比拟法(Heinrich, 1988). 古气候比拟法的实质是分析数千年至万年以上时间尺度的气候数据, 但是难以反映近期人类活动对自然变化越来越大的干扰(Krasovskaia, 1993), 再加上难以获得长度足够而且可信的资料, 所以很少被水文学者使用. (2) 惯性情景, 即假定未来一定时期的气候变化将延续已有的变化趋势. 这种方法着重考察数十至数百年时间尺度的气候变化, 将实测资料各要素之间的关系进行外延, 忽略了实测资料中气候的不同周期及其组合. (3) 增量情景, 即假定到未来某一特定期气候要素(温度、降水等)的变化量, 如 $\Delta T = 1\text{ }^{\circ}\text{C}, 2\text{ }^{\circ}\text{C}; \Delta P = 0\%, \pm 10\%, \pm 20\%$, 以这些假定及其交叉组合为依据来分析探讨流域水文、水资源对气候变化的响应. 这种方法称为增量情景研究. 该方法被许多水文学者使用, 但它只是一种敏感性试验, 不具有气候、水文预测功能(王守荣, 2002). (4) GCMs 情景, 指全球气候模式模拟的全球未来的气候变化情况. 目前的水文学者除了使用 CO_2 倍增情景外, 还有 4 个常用的 GCMs 情景, 分别对应 IPCC 给定的 4 种排放方案, 习惯上简称为 A1、A2、B1、B2 情景. 现有的 GCMs 对一些重要的陆面过程, 特别是水文过程的处理还相当粗糙, 由于地球气候系统的复杂性和缺乏可靠的资料, 不同 GCMs 模型的结果差异甚大, 所有 GCMs 模型的可信度还有待提高.

目前,对未来气候变化的预测具有相当的难度和不确定性。在这种情况下,关于哪一个情景是最好的问题仍然得不到答案。既不能因GCMs 目前的结果还不能准确地模拟当前的平均气候状况就否定应用GCMs 的输出结果,也不能因为假定方法的局限性而削弱使用各种假定气候情景进行水文敏感性分析的价值(Dickinson, 1989)。在目前的气候变化与水资源研究当中,以增量情景和GCMs 情景应用得最多。

1.2 水文水资源变化研究

气候变化将从数量上和时空分布上改变不同地区的水文和水资源状况。定量估算气候变化对水文水资源的影响,对于理解和解决可能引起的与工业、农业、城市发展等经济领域密切相关的水资源系统的规划管理、环境保护以及生态平衡等问题是非常重要的。近年来这些方面的研究工作进展迅速,主要的研究内容包括:(1)径流、水量。包括径流总量(蓝永超等, 2004)、径流的年内分布(季节甚至逐月)和年际变化(郝振纯等, 2006)、土壤含水量、积雪(王建等, 2001)、冰川、地下水(马腾等, 2001)等。(2)水文极端事件(郭生练, 1995)。已有的成果包括暴雨频率、小雨事件概率、洪水位、洪水频率、干旱严重度及持续时间、土壤侵蚀等方面。然而GCMs 还不能明确地模拟极端气象条件。迄今为止,还不能获得水文极端事件可能变化的定量估计。(3)水资源脆弱性研究。

在气候变化对水文水资源影响的研究方法上,有学者直接用气候模式输出的径流结果来研究水资源情势(秦大河, 2002; 丁一汇, 2002),或通过干旱指数、径流系数分析等方法进行水资源评估。但由于气候模式对陆面过程的描述比较粗糙、产流计算简化,难以考虑径流的空间分布,计算的径流过程误差很大,故水文学家一般利用气候模式输出的气温、降水等结果作为输入资料,通过水文模型来计算水资源情景。具体的研究方法大致可分为如下4种:

①敏感性分析:从实测资料中通过回归分析等方法得到气候因子(主要是气温、降水)与水资源(主要是径流)之间逐年或逐月的关系,把拟定的增量情景带入分析结果就可以得到径流对气候各因子的敏感性(施雅风, 2001)。敏感性分析是气候变化与水资源关系研究方法中简洁而成熟的一个,包括利用水文模型进行情景预测等很多更深入的研究,大多以敏感性分析作为定性的基础。

②利用水文模型和增量情景进行分析:选定水文基准系列并建立水文模型,用假定的或根据多个

GCMs 情景综合得出的增量情景(王国庆等, 2002),将基准系列的气温、降水、辐射等气象因素修正后输入水文模型,得到气候变化条件下的径流或水资源变化。这种用增量情景修正典型年资料的思路是近年来使用较多的一种方法,这类研究可以看作是传统水文模型的应用实例。以此为依托,泥沙、供需水等方面的研究也得到了发展。但同时也要看到,这类方法只考虑了气候突变时的情景,缺乏气候缓慢变化过程中的水资源信息。

③气—陆单向连接分析水文水资源对气候变化的响应:由于GCMs 模拟的水文要素有2个主要的局限性(Gleick, 1989),一是水文参数化过于简单,不能提供详细的对水资源管理必需的信息;二是空间分辨率太粗,不能提供水文学方面关心的典型尺度上的水文信息。因此出现了气—陆单向连接的思路,即将GCMs 输出的气象因子利用内插(郝振纯等, 1999)、回归分析(Gates, 1985)、区域气候模式降尺度(Leung *et al.*, 1999)等方法进行空间尺度转换之后,输入到区域水文模型,用水文模型的产汇流计算结果来评估气候变化对水文、水资源的影响。然而,GCMs 与水文模型各自对水量平衡及热量平衡进行演算,由于对陆面参数的处理和取值不同,它们对水量平衡及热量平衡描写不一致。另外,因为不能共享对边界层物理过程模拟的结果,水文模型不能实时地利用大气强迫改进土壤水和蒸发的计算以提高其模拟精度,GCMs 模型也不能借鉴水文模拟的结果及时地对气候过程进行修正,二者基本上处于孤立状态。

④气—陆耦合:气—陆模型耦合是近年才发展起来的边缘学科和交叉学科,也是气象和水文科学发展的前沿研究课题。其主要思路是在气候模型的基础上,通过陆地表面过程参数化给气候模型提供更恰当的大气底层边界条件。陆面过程很可能是今后提高模式模拟能力最重要的方面之一(Dickinson, 1995)。国际国内均有研究成功的报道(Xue *et al.*, 1991; 孙岚等, 2000),但是其中许多重要的与水分循环有关的物理过程(水分循环与输送、土壤水扩散、大尺度降水的非均匀性等)的简化,影响了陆面气候的模拟。目前气—陆耦合研究尚存在网格尺度、网格内部的不均匀性、以及大量参数确定等问题(Gates, 1985, 郭生练和刘春霖, 1997)。

迄今为止,几乎所有的水文模型都曾被不同的水文学家用于气候变化影响下的水资源评价,如统

计回归模型、水量平衡模型(Alley, 1985)等。近年来,随着 GIS 的发展和运用,考虑下垫面不均匀性对模型参数的影响,分布式参数在水文模拟中被广泛采用(Hao *et al.*, 2002)。同时,由于 GCMs 是提供大气对温室气体增加响应有关信息的最好工具,分布式水文模型因为易与 GCMs 成果连接,并能考虑土地利用/土地覆被的变化,越来越多地得到众多学者的青睐。但其对物理过程的描述仍然薄弱,未能充分反映气候、植被、雪盖、土壤和水文过程的相互作用和相互反馈,尚未实现水文过程的动力模拟(陈宜瑜, 2001)。

气候变化与水文水资源关系的研究,需要气象、水文、社会等多学科的密切合作。对于水文学者来说,解决陆面过程模拟中的非线性问题、尺度问题、唯一性问题、等效性问题和不确定性问题,是一个充满机遇的挑战。

2 气候变化对地表水资源的影响

本文以分布式水文模型为工具,根据研究区域实测降水、气温、径流等资料建立水文模型,利用 IPCC 数据发布中心(IPCC Data Distribution Centre)发布的 7 个全球气候模式(表 1)预测结果,分别对山西省和黄河源区地表水资源和径流的未来变化趋势进行了分析。

研究中对地表径流和水资源的未来趋势分析主要分两部分完成,首先是分布式水文模型的构建,包括:根据研究区域的 DEM、电子水系和水文站位置,提取分布式水文模型所需要的流路、数字水系、水文站控制区域及面积等流域特征;根据 DEM 网格和

表 1 选用的气候模式

Table 1 Climate models employed

模式研制机构	缩写	气候模式名称
加拿大气候模式中心	CCCma	CGCM2
日本气候系统研究中心	CCSR	CCSR
澳大利亚联邦科学与工业研究组织 大气研究所	CSIRO	CSIRO-Mk2
德国马普气象研究所	MPI-M	ECHAM4
美国普林斯顿大学地球物理流体动力 学实验室	GFDL	R30
英国气象局哈德莱气候预报和研究 中心	HCCPR	HADCM3
美国国家大气科学研究中心	NCAR	NCAR-PCM

注:摘自 <http://ipcc-ddc.cni.uea.ac.uk>, 2006: 12

表 2 山西省未来气温变化(单位: °C)

Table 2 Changes of future temperature in Shanxi Province

时间	地区	冬 12—2月	春 3—5月	夏 6—8月	秋 9—11月
2010	北	0.13	0.13	0.12	0.09
	中	0.11	0.11	0.10	0.07
	南	0.09	0.09	0.08	0.06
2030	北	1.39	1.39	1.25	0.93
	中	1.21	1.21	1.09	0.81
	南	0.73	0.73	0.66	0.49
2050	北	2.70	2.70	2.43	1.80
	中	2.43	2.43	2.19	1.62
	南	1.87	1.87	1.68	1.24

气象站坐标,将气温、降水等实测气象资料插值到网格上,为模型提供空间分布的历史数据;根据研究区域的气候、地理和下垫面特性建立分布式水文模型,以水文站的实测径流过程为参考率定模型、确定参数(李丽等, 2004)。然后以分布式水文模型为工具,根据 GCMs 的输出结果和分析的变化趋势,研究未来径流和水资源的变化趋势,其中包括:GCMs 输出数据在时间和空间上的降尺度处理(曾涛等, 2004),利用水文模型计算径流情景,分析地表径流和水资源的未来变化趋势等。

2.1 山西省地表水资源变化趋势分析

IPCC 在 2001 年发布的第三次评估报告中,综合国际上 20 多个全球气候模式结果,预测在 21 世纪末全球平均气温将上升 1.4~5.8 °C,其中中国部分约增加 2.7 °C(秦大河, 2002; 丁一汇, 2002),这是过去 1000 年来温度上升最快的时期。综合 IPCC 推荐的 GCMs 输出结果和国家气候中心区域气候模式给出的数据,山西省未来 50 年的气温和降水均呈现增加的趋势。考虑山西省的气温和降水空间分布特性,把全省分为北、中、南部 3 个区域,分析得出了山西省 21 世纪的气候情景(表 2, 3)。

本文根据山西省下垫面及资料情况建立了空间分辨率为 25 km×25 km 的分布式水文模型,其中气温对产汇流的影响主要体现在蒸发上,在区域蒸散发计算中,采用彭曼—蒙特斯公式计算参考作物潜在蒸发蒸腾量,进而根据下垫面的作物分布计算蒸散发能力。研究中选取了山西省 50 个典型流域进行了水文模型的参数率定,在此基础上,将如上所述的气候情景输入该模型,模拟了山西省各行政区的水资源变化趋势(表 4)。

由表 4 的预测结果可以看出,在 2010 年前后,由于气温增加的影响小于降水增加的影响,水资源

表 3 山西省未来降雨变化(单位: mm)

Table 3 Changes of future precipitation in Shanxi Province

时间	地区	冬 12—2月	春 3—5月	夏 6—8月	秋 9—11月
2010	北	7.3	2.7	0.8	2.7
	中	10.3	3.8	1.1	3.8
	南	8.8	3.2	1.0	3.2
2030	北	16.8	6.2	1.8	6.2
	中	15.7	5.8	1.7	5.8
	南	17.4	6.4	1.9	6.4
2050	北	17.4	6.4	1.9	6.4
	中	22.6	8.9	2.6	8.9
	南	20.3	8.0	2.3	8.0

表 4 山西省各行政区未来水资源变化趋势

Table 4 Trends of future water resources change in Shanxi Province

面积(km ²)	1985—1994 平均径流深(mm)	未来水资源变化趋势(%)			
		2010年	2030年	2050年	
大同市	14 097	23	5.5	0.0	-3.5
朔州市	10 656	21	2.5	1.0	-2.0
太原市	6 878	36	7.0	4.5	1.0
阳泉市	4 517	39	13.0	5.0	4.5
忻州市	25 143	33	5.0	5.0	-2.0
吕梁地区	20 988	41	8.0	3.5	0.0
晋中市	16 347	47	3.5	3.0	-0.5
临汾市	20 200	40	7.5	4.5	-1.5
晋城市	9 349	57	8.0	4.0	-6.0
长治市	13 863	59	9.5	7.5	-0.5
运城市	14 233	44	5.5	7.5	0.0

量有所增加,比 1985—1994 年的平均值增加 10% 左右;到 2030 年,随着气温逐渐加速升高,水资源较 2010 年有所减小,但整体趋势比较稳定;到 2050 年,气温增加的影响超过了降水的影响,全省的水资源量在各行政区增减不一致,除太原和阳泉地区外,其他地区的水资源普遍减少。

从气候情景的预测结果看,冬季气温和降水的增幅比夏季要大,因此使得未来山西省的水资源年内分布有略趋平缓的趋势,图 1 所示为其中芦家庄站未来各月的水量分布变化。

2.2 黄河源区径流变化趋势分析

根据水文上的界定,黄河干流唐乃亥断面以上的集水区域称为河源区。该区的集水面积为 12.1 万 km²,仅占黄河流域面积的 15%,但是其产流量占全流域的 38%,是黄河流域最主要的产流区。黄河源区位于青藏高原东北部,平均海拔 4 000 m 左右,属高海拔寒冷地区。在全球变暖的背景下,高寒地区的气温增幅一般都比低海拔地区大(秦大河, 2002)。同

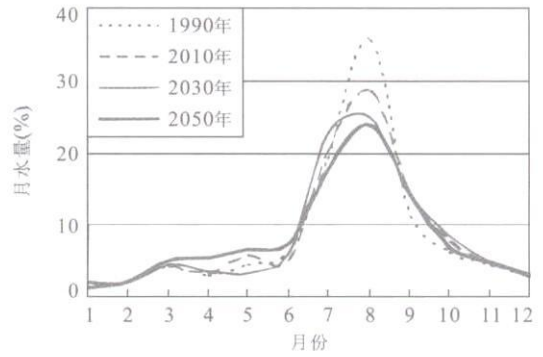


图 1 芦家庄站各月水量分布变化

Fig. 1 Changes of monthly water resources in Lujiashuang gauge

时冰川、融雪、冻土等对增温的响应比较明显,因此气候变化将会对该区域的水循环产生明显影响,进而影响整个黄河流域。研究气候变化对黄河源区水资源的影响,对于该地区的生态环境治理、黄河流域水资源规划以及南水北调西线工程都具有十分重要的科学指导意义。

通过黄河源区气象站历史资料的分析,发现该区气温在 20 世纪 60—70 年代相对偏冷,80—90 年代偏暖,气温上升明显,相对于 60 年代,气温约上升 1.0 °C。近年来,除了主要气候要素演变方面的评估以外(Houghton *et al.*, 2001),气候变化影响下有关黄河源区的研究很多,其中未来水资源变化方面的研究大多限于径流量,而很少有径流过程和水资源情景预测的研究。本文利用 GCMs 输出的气候情景和分布式水文模型,重点从径流特性方面评估未来黄河源区的水资源状况。其中,水文模型采用以栅格为最小计算单元的分布式水文模型,在单元网格内利用彭曼公式计算蒸散发能力(王加虎等, 2003),用混合产流模型计算产流,网格间根据 DEM 生成的虚拟河网进行汇流。模型栅格的空间尺度采取 25 km×25 km,时间计算步长为日。由于黄河源区天气寒冷,积雪时间长,且有冰川、冻土分布,因此在模型中引入融雪模块,采用度—日因子法计算融雪出水量(杨针娘等, 2000);以气温为参变量,通过改变区域不透水面积比例的方法来简单处理冻土层对流域水文过程的影响。

表 1 中的 7 个气候模式在全球不同地区(包括中国)的验证表明,同时考虑温室气体和硫化物气溶胶影响后的模拟(即 B2 情景:人口和经济增长速度中等,着重于局地/区域性的经济、社会和环境的可

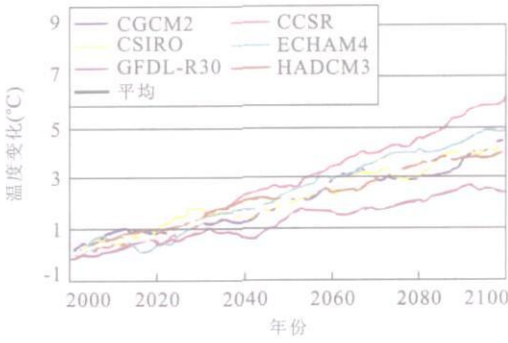


图 2 B2 情景下源区的气温趋势

Fig. 2 Trends of temperate in Scene B2 in study area

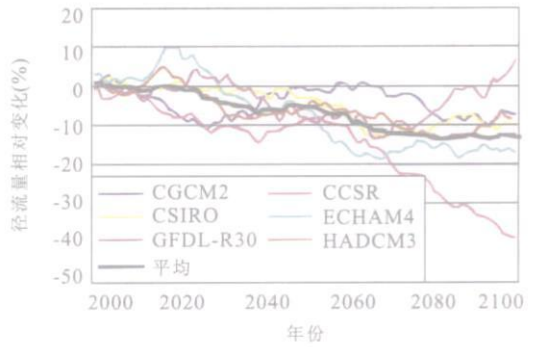


图 4 黄河源区 B2 情景下的径流情景变化趋势

Fig. 4 Trends of runoff in Scene B2 in study area

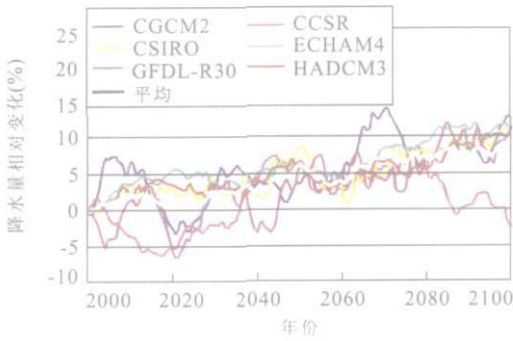


图 3 B2 情景下源区的降水趋势

Fig. 3 Trends of precipitation in Scene B2 in study area

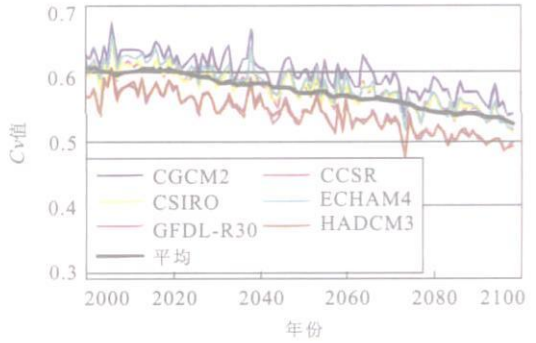


图 5 B2 情景下源区的径流年内分布变化趋势

Fig. 5 Trends of annual Cv of B2 runoff

持续发展)结果更接近观测值.因此本文应用 B2 情景下 6 个模式对黄河源区气候要素的预测结果来研究水资源变化.图 2 和图 3 分别为 6 个气候模式在 B2 情景(NCAR 模式的 B2 情景资料开始于 2000 年,未参与统计)下黄河源区未来 100 年气温和降水的变化趋势(以 1991—2000 年各模式的多年平均气温和降水为基础值).

将 B2 情景下 6 种气候模式的降水、气温输入所建立的分布式水文模型中,即可得出不同气候模式下的径流预测情景及变化特性(图 4~6).图 4 为根据各气候模式输出结果所计算出的唐乃亥站的径流情景相对于基准年的变化趋势,根据几个模式所计算的径流情景变化趋势不太一致,总体来说呈减小趋势;从几个模式的平均结果来看,2020 年以前的年径流总量基本上呈小幅振荡,变化趋势不太明显,2020 年以后年径流总量呈持续减小的趋势,到 2100 年其减小幅度可达 13%.

图 5 所示为各径流情景的年内分布特性(图中的 C_v 表示年内不均匀系数),各径流情景的 C_v 值虽然不尽相同,且有较大幅度的振荡,但总体上呈减小趋势;从几种径流情景的平均结果来看,径流年内

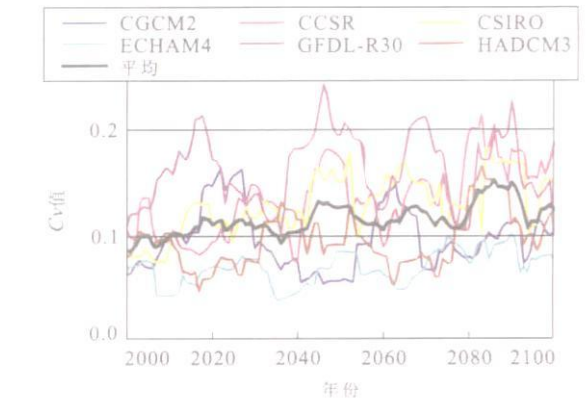


图 6 B2 情景下源区的径流年际分布变化趋势

Fig. 6 Trends of yearly Cv of B2 runoff in study area

分布不均匀性在 2020 年之前比较稳定,2020 年以后持续下降,说明径流的年内分布在 2020 年以后将变得更加均匀.

图 6 所示为各径流情景的年际变化特性,图中的 C_v 表示径流的年际变化不均匀性(计算每年的 C_v 值时,以相邻 10 年为考察对象),从图中来看,6 个径流情景的总体趋势基本一致,从 6 个情景平均的结果来看,径流年际分布的不均匀性在振荡中逐

渐上升,说明未来径流丰枯年组的差异将逐渐明显,水旱灾害的可能性和程度都将加剧。

综上所述,在未来的100年内,尽管黄河源区的降水有可能略有增加,但不足以抵消气温升高的影响,将导致径流量不断降低的总体趋势,并使径流年内分布略趋平缓,然而水量的年际分布将越来越不均匀,旱涝威胁日趋严峻。

3 结论与展望

气候变化是一个最典型的全球尺度的环境问题。气候变化问题直接涉及经济发展方式及能源利用的结构与数量,正成为深刻影响21世纪全球发展的一个重大国际问题。定量估算气候变化对水文和水资源的影响,对于理解和解决可能引起的与工业、农业、城市发展等经济领域密切相关的水资源系统的规划管理、环境保护以及生态平衡等问题非常重要。目前由于气候情景预测、水文水资源研究方法等多方面的限制,气候变化对水文水资源影响方面的研究所能提供的信息和参考价值都还十分有限,尚需要投入更多的精力和关注。

References

- Alley, 1985. Water balance models in one month ahead stream flow forecasting. *Water Resources Research*, 21(4): 597—606.
- Chen, Y. Y., 2001. Future development of IGBP. *Advance in Earth Sciences*, 16(1): 15—18 (in Chinese with English abstract).
- Dickinson, R. E., 1989. A regional climate model for the western United States. *Climate Change*, 15(1): 383—422.
- Dickinson, R. E., 1995. Land-atmosphere interaction. U. S. national report to International Union of Geodesy and Geophysics 1991—1994. *Reviews of Geophysics, Supplement*, 917—922.
- Ding, Y. H., 2002. Prediction of environmental changes in West China. In: Qin, D. H., ed., *Evaluation of environmental changes in West China*. Sciences Press, Beijing (in Chinese).
- Ding, Y. H., Geng, Q. Z., 1998. Atmosphere, ocean, human activity and global warming. *Meteorology Monthly*, 24(3): 12—17.
- Gates, W. L., 1985. The use of general circulation models in the analysis of the ecosystem impacts of climatic

change. *Climate Change*, 7(1): 267—284.

- Gleick, P. H., 1989. Climate change, hydrology and water resources. *Reviews of Geophysics*, 27(3): 329—344.
- Guo, S. L., 1995. Impacts of climate change on flood frequencies and peak discharges. *Advances in Water Science*, 6(3): 224—230 (in Chinese with English abstract).
- Guo, S. L., Liu, C. Z., 1997. A hybrid model for optimal design of sprinkler irrigation system. *Journal of Hydraulic Engineering*, 7: 37—41 (in Chinese with English abstract).
- Hao, Z. C., Ren, L. L., Liu, X. R., 1999. Hydrological modeling in the coupled land-atmospheric model. In: *Study on energy and water cycle over Huaihe River basin I*. China Meteorological Press, Beijing, 237—245 (in Chinese).
- Hao, Z. C., Su, F. G., Xie, Z. H., 2002. Macroscale hydrological modeling over the Huaihe River basin. *Acta Meteorologica Sinica*, 16(3): 363—373.
- Hao, Z. C., Wang, J. H., Li, L., 2006. Impact of climate change on runoff in the riverhead of Yellow River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 28(1): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Heinrich, H., 1988. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the Northeast Atlantic Ocean during the past 130 000 years. *Quaternary Research*, 29: 142—152.
- Houghton, J. T., Ding, Y. H., Griggs, D. J., et al., 2001. *Climate change 2001: The scientific basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Krasovskaia, 1993. Frequency of extremes and its relation to climate fluctuations. *Nordic Hydrology*, 24(1): 1—12.
- Lan, Y. C., Ding, Y. J., Zhu, Y. T., et al., 2004. Possible change of runoff over the upper Yellow River basin under global warming scenarios. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 26(6): 668—673 (in Chinese with English abstract).
- Leung, L. R., Ghan, S. J., Zhao, Z. C., et al., 1999. Intercomparison of regional climate simulations of the 1991 summer monsoon in eastern Asia. *Journal of Geophysical Research*, 104(D6): 6425—6454.
- Li, L., Hao, Z. C., Wang, J. H., 2004. Application of distributed hydrological model based on DEM in Sanmenxia-Xiaolangdi region of the Yellow River. *Progress in Natural Science*, 14(12): 1452—1458 (in Chinese).
- Ma, T., Wang, Y. X., Hao, Z. C., 2001. The cause analysis for the declining discharge of Shentou Spring and forecast of its evolution trend. *Carsologica Sinica*, 20(4): 261—267 (in Chinese with English abstract).
- Perry, J. S., 1993. *Understanding our own planet: An over-*

- view of major international scientific activities. ICSU Secretariat.
- Qin, D. H., 2002. Evaluation of environmental changes in West China—Synthesis report. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Shi, Y. F., 2001. Estimation of the water resources affected by climatic warming and glacier shrinkage before 2050 in West China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 23(4): 333—341 (in Chinese with English abstract).
- Sun, C. Q., Lin, H., Qu, J. S., 2003. Intel global change research key projects and partnership. China Meteorological Press, Beijing (in Chinese).
- Sun, L., Wu, G. X., Sun, S. F., 2000. Numerical simulations of effects of land surface processes on climate; Implementing of SSiB in IAP/LASG L9R15 and its performance. *Acta Meteorologica Sinica*, 58(2): 179—193 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. Q., Wang, Y. Z., Kang, L. L., 2002. Analysis on the sensitivity of runoff in Yellow River to climate change. *Journal of Applied Meteorological Science*, 13(1): 117—121 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Shen, Y. P., Lu, A. X., et al., 2001. Impact of climate change on snow melt runoff in the mountainous regions of Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 23(1): 28—33 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. H., Hao, Z. C., Jiang, T., et al., 2003. Study on reference evaporation in the Yangtze River catchment under increasing temperature. *Journal of Lake Science*, 15(Suppl.): 277—288 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. R., Huang, R. H., Ding, Y. H., et al., 2002. Numerical simulation experiments by nesting hydrology model DHSVM with regional climate model RegCM2/China. *Acta Meteorologica Sinica*, 60(4): 421—427 (in Chinese with English abstract).
- Xue, Y. K., Sellers, P. J., Kinter, J. L., et al., 1991. A simplified biosphere model for global climate studies. *Journal of Climate*, 4: 345—364.
- Yang, Z. N., Liu, X. R., Zeng, Q. Z., et al., 2000. Hydrology in cold regions of China. Science Press Beijing (in Chinese).
- Zeng, T., Hao, Z. C., Wang, J. H., 2004. Modeling the response of runoff to climate change. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 26(3): 324—332 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈宜瑜, 2001. IGBP 未来发展方向. 地球科学进展, 16(1): 15—18.
- 丁一汇, 2002. 中国西部环境变化的预测. 见: 秦大河, 主编. 中国西部环境演变评估(第二卷)北京: 科学出版社.
- 郭生练, 1995. 气候变化对洪水频率和洪峰流量的影响. 水科学进展, 6(3): 224—230.
- 郭生练, 刘春霖, 1997. 大尺度水文模型及其与气候模型的耦合研究. 水利学报, 7: 37—41.
- 郝振纯, 任立良, 刘新仁, 1999. 陆气耦合水文模式研究. 见: 淮河流域能量与水分循环研究(一). 北京: 气象出版社, 237—245.
- 郝振纯, 王加虎, 李丽, 2006. 气候变化下黄河源区径流量及径流特性的趋势分析. 冰川冻土, 28(1): 1—7.
- 蓝永超, 丁永建, 朱云通, 等, 2004. 气候变暖情景下黄河上游径流的可能变化. 冰川冻土, 26(6): 668—673.
- 李丽, 郝振纯, 王加虎, 2004. 基于 DEM 的分布式水文模型在黄河三门峡—小浪底的应用探讨. 自然科学进展, 14(12): 1452—1458.
- 马腾, 王焰新, 郝振纯, 2001. 神头泉流量衰减原因分析及趋势预测. 中国岩溶, 20(4): 261—267.
- 秦大河, 2002. 中国西部环境演变评估综合报告. 北京: 科学出版社.
- 施雅风, 2001. 2050 年前气候变暖冰川萎缩对水资源影响情景预估. 冰川冻土, 23(4): 333—341.
- 孙成权, 林海, 曲建升, 2003. 国际全球变化研究核心计划与集成研究. 北京: 气象出版社.
- 孙岚, 吴国雄, 孙菽芬, 2000. 陆面过程对气候影响的数值模拟: SSiB 与 IAP/LASG L9R15 AGCM 耦合及其模式性能. 气象学报, 58(2): 179—193.
- 王国庆, 王云璋, 康玲玲, 2002. 黄河上中游径流对气候变化的敏感性分析. 应用气象学报, 13(1): 117—121.
- 王建, 沈永平, 鲁安新, 等, 2001. 气候变化对中国西北地区山区融雪径流的影响. 冰川冻土, 23(1): 28—33.
- 王加虎, 郝振纯, 姜彤, 等, 2003. 气温增加对长江流域参照蒸散发的影响研究. 湖泊科学, 15(增刊), 277—288.
- 王守荣, 黄荣辉, 丁一汇, 等, 2002. 水文模式 DHSVM 与区域气候模式 RegCM2/China 嵌套模拟试验. 气象学报, 60(4): 421—427.
- 杨针娘, 刘新仁, 曾群柱, 等, 2000. 中国寒区水文. 北京: 科学出版社.
- 曾涛, 郝振纯, 王加虎, 2004. 气候变化对径流影响的模拟. 冰川冻土, 26(3): 324—332.