

未来气候变化对黄土高原黑河流域水资源的影响

李 志^{1,2}, 刘文兆², 张勋昌³, 郑粉莉²

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;

3. USDA-ARS, Grazinglands Research Laboratory, 7207 W. Cheyenne St., El Reno, OK 73036, USA.)

摘要: 气候变化对黄土高原的水资源有重要影响, 对其影响进行评估可以为区域发展提供重要的决策依据。基于分布式水文模型 SWAT 和 4 种全球环流模式的各 3 种排放情景, 评估了 2010~2039 年黄土高原沟壑区黑河流域水资源对气候变化的潜在响应。结果表明, 黑河流域 2010~2039 年的年均降水变化 $-2.3\% \sim 7.8\%$, 年均最高和最低温度分别升高 $0.7 \sim 2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1.2 \sim 2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年均径流量变化 $-19.8\% \sim 37.0\%$, 1.2 m 剖面年均土壤水分含量变化 $-5.5\% \sim 17.2\%$, 年均蒸散量普遍增长 $0.1\% \sim 5.9\%$; 水文气象变量变化趋势复杂, 但 T 检验表明年降水、径流、土壤水分和蒸散增长的概率较大。对于季节变化, 降水可能在 12~7 月份和 9 月份增长, 8 月份和 10~11 月份减少; 径流在 4~7 月份和 9~10 月份增加, 11~3 月份和 8 月份减少; 土壤水分在各月都增长; 蒸散 11~6 月份普遍增长, 7~10 月份减少的可能性较大。未来气候将发生显著变化并对水资源有重要影响, 需采取必要的措施来减缓其不利影响。

关键词: 气候变化; 水资源; 黄土高原; SWAT; 全球环流模式

文章编号: 1000-0933(2009)07-3456-09 中图分类号: P339 文献标识码: A

The impacts of future climate change on water resources in the Heihe Watershed on the Loess Plateau

LI Zhi^{1,2}, LIU Wen-Zhao², ZHANG Xun-Chang³, ZHENG Fen-Li²

1 College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling Shaanxi 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling Shaanxi 712100, China

3 USDA-ARS, Grazinglands Research Laboratory, 7207 W. Cheyenne St., El Reno, OK 73036, USA.

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3456~3464.

Abstract: Climate changes can influence the water resources in the Loess Plateau greatly, and evaluating the impacts will provide helpful information for decision-making of regional development. Based on the SWAT (soil and water Assessment Tools) model and four GCMs (General Circulation Models) under three emission scenarios, this study assessed the potential impacts of climate change on water resources in the Heihe watershed on the Loess Plateau during 2010–2039. Climate models predicted a -2.3% to 7.8% change in annual precipitation, $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ rises in maximum temperature, and $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ rises in minimum temperature. Climate change will affect the hydrologic situation of Heihe watershed; SWAT model predicted a -19.8% to 37.0% change for annual runoff, a -5.5% to 17.2% change for annual soil water content, and a 0.1% to 5.9% increase for annual evapotranspiration. Though the change trends of hydro-meteorological variables are complex, T -test showed that annual precipitation, runoff, soil water and evapotranspiration would increase with a high probability. For seasonal change, precipitation would possibly increase from December to July and in September while decrease in August and from October to November, runoff would increase from April to July and September to October while decrease in August and from November to March, soil water would possibly increase all the

基金项目: 国家自然科学基金国际合作与交流资助项目(40640420061); 中国科学院海外杰出学者基金资助项目(2005-2-3); 西北农林科技大学人才基金资助项目(01140407)。

收稿日期: 2009-01-06; 修订日期: 2009-04-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lizhibox@126.com

year, evapotranspiration would increase from November to June while decrease from July to October. Overall, the results showed that climate would change significantly and some countermeasures were necessary to reduce the adverse effects.

Key Words: climate change; water resources; the Loess Plateau; SWAT; GCMs

政府间气候变化专门委员会(IPCC)的第四次评估报告(AR4)指出,近 100a 来全球平均地表温度升高了 $(0.74 \pm 0.18)^\circ\text{C}$,降水在 30°N 以北呈增长趋势,温度和降水的极端事件大量增加^[1];这些气候变化对水资源以及生态系统等带来了显著的影响^[2]。黄土高原气候干旱,水资源短缺,未来气候变化可能导致的影响需要进行详尽的评估,从而为采取适应性措施提供决策依据。

气候变化对水资源影响的评估方法较多^[3],其中,将 GCMs 与水文模型结合是评估水资源对气候变化响应的一种有效方法,已有很多研究将该方法应用到不同的空间尺度^[4~9],如从模拟山地小流域的径流^[10,11]到分析世界上 33 个大流域的径流变化趋势^[12]。但 GCMs 基于网格的月数据往往不能满足水文模型基于站点的日数据要求,因此,需要对 GCMs 数据进行时空尺度转换,又称解集(downscaling)。目前,解集方法较多,其中最常用的一种就是比例法(CF),根据 GCMs 预测的气候变化调整实测数据;尽管不能调整降水频率和变化范围等,且容易导致模拟结果偏大^[13,14],但由于其容易实现,该方法仍然是进行气候变化敏感性研究的重要方法^[15]。随着计算机技术的发展,基于物理机制的水文模型如 SWAT(soil and water assessment tools)等的应用越来越广泛,且由于模型效率较高,已成为评估环境变化水文效应的一种有力工具^[16]。

本研究的目标是以黄土高原沟壑区的黑河流域为研究区域,基于 4 种 GCMs 的各 3 种排放情景和水文模型 SWAT,建立该区 2010~2039 年的气候变化情景,并将其作为 SWAT 的输入,来模拟该区水资源(径流、蒸散和土壤水分等)的可能变化,以期能为区域可持续发展提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

黑河是泾河的一级支流,流经甘肃省华亭、崇信、灵台和泾川县,于陕西省长武县入泾河(图 1),位于 $106^\circ.29' \sim 107^\circ.47' \text{ E}$, $35^\circ.03' \sim 35^\circ.19' \text{ N}$ 。流域面积 1506 km^2 ,呈东西走向,形状狭长,地势西高东低。海拔 $1000 \sim 2500 \text{ m}$,地貌属黄土高原沟壑区,包括塬面和沟壑两大单元。属暖温带半湿润大陆性季风气候;多年平均降水量 563.3 mm ,7~9 月份降水占年降水量的 $54.0\% \sim 57.5\%$,南部多于北部,东部多于西部;年均气温 $6.3 \sim 11.7^\circ\text{C}$ 。该区水资源短缺,且过去 50a 来气候趋向暖干趋势发展,严重制约其社会经济发展和生态建设。

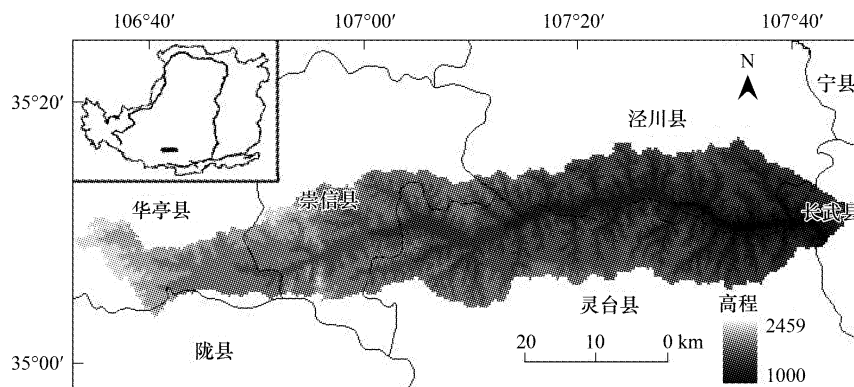


图 1 黑河流域地理位置

Fig. 1 Location of the Heihe Watershed

长武 Changwu; 崇信 Chongxin; 华亭 Huating; 泾川 Jingchuan; 灵台 Lingtai; 陇县 Longxian; 高程 Altitude

1.2 SWAT 模型校准

SWAT 是由美国农业部开发的流域尺度模型,可以预测土地管理措施对水、沉积物和农业化学产物的影响^[17]。SWAT 的水文模拟分为陆地产流和河道汇流两部分,前者控制子流域内主河道水沙等物质的输入量,后者决定水沙等物质从河网向流域出口的输移。SWAT 的水文模拟基于如下水量平衡方程:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw})$$

式中, SW_t 是时段末土壤含水量($\text{mm H}_2\text{O}$), SW_0 是时段初土壤含水量($\text{mm H}_2\text{O}$), t 是时间(d), R_{day} 是第*i*天的日降水量($\text{mm H}_2\text{O}$), Q_{surf} 是第*i*天的地表径流量($\text{mm H}_2\text{O}$), E_a 是第*i*天的蒸散量($\text{mm H}_2\text{O}$), w_{seep} 是第*i*天的渗透量($\text{mm H}_2\text{O}$), Q_{gw} 是第*i*天的地下径流量($\text{mm H}_2\text{O}$)。

水文模拟要求输入的数据包括空间数据和属性数据两种,详见表 1。基于上述数据,将 SWAT 模型应用于研究区域,按照如下流程:(1)建立属性数据库;(2)使用 DEM 划分子流域;(3)读入土地利用图和土壤图,生成水文响应单元;(4)输入各气象站的数据。然后即可运行 SWAT 进行水文模拟,本研究中径流模拟使用径流曲线数法,蒸散采用 Priestley-Taylor 法。校准 SWAT 模型时,首先通过 LH-OAT 敏感性分析选择对模拟结果影响较大的参数,然后调整敏感性参数来校准模型,以 Nash-Sutcliffe 效率系数、相关系数和相对误差作为模型校准的目标函数。使用的实测年径流量介于 1972~2000 年,考虑 1985 和 2000 年两期土地利用图,将 1972~1987 年作为校准期(1985 年土地利用图),将 1988~2000 年作为验证期(2000 年土地利用图)。

表 1 SWAT 模型输入数据的来源与精度

Table 1 Sources and precision of the data for SWAT model

数据 Data	数据项目 Data types	精度 Precision	来源 Sources
空间数据 Spatial data	DEM	1:250000	国家自然科学基金委员“中国西部环境与生态科学数据中心” Environmental & Ecological Science Data Center for West China, National Natural Science Foundation of China
	土地利用图 Landuse map	1:100000	
	土壤图 Soil map	1:500000	
属性数据 Attribute data	土壤性质 Soil properties	—	中国科学院南京土壤研究所“中国土壤数据库” Soil database of China from Institute of Soil Science, CAS
	土地利用属性 Attribute of landuse	—	SWAT 模型默认数据 Default data of SWAT model
气象数据 Meteorological data	降水、最高最低气温、辐射、湿度、风速 *	日数据 Daily data	中国气象局 China Meteorological Administration
水文资料 Hydrological data	流量 Flow	月 Monthly (1972~1987) 年 Yearly (1972~2000)	中国科学院水利部水土保持研究所“黄土高原水土保持数据库” **

* Precipitation, maximum and minimum temperature, solar radiation, humidity and wind speed; * * Database of soil and water conservation from Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR

2.3 气候模式与排放情景

由于气候变化具有不确定性,评估时应使用多种气候模式和排放情景来考虑各种可能性^[19]。本文选取 4 种模式的各 3 种排放情景(表 2),数据由 IPCC 数据发布中心提供。气候模式包括 CCSR/NIES、CGCM2、CSIRO-Mk2 和 HadCM3。排放情景包括 A2、B2 和 GgA,其中 A2 强调经济发展,温室气体排放量较大;B2 强调可持续发展,更注重环保,温室气体排放量增长相对缓慢;GgA 将 1860~1990 年温室气体的增长情况应用到 2099 年以前,常被作为基准气候。3 种排放情景的温室气体排放速度依次为 A2 > GgA > B2,选取此 3 种排放情景旨在分析温室气体在中高排放、中低排放和当前排放标准下的气候变化,并进行影响评估。

表 2 气候模式及其模拟

Table 2 Description of the GCMs and their simulations

气候模式 GCMs		CCSR/NIES	CGCM2	CSIRO-Mk2	HadCM3
网格尺寸 Grid size		5.625° × 5.625°	3.75° × 3.75°	5.625° × 3.25°	3.75° × 2.5°
模拟时段	A2, B2	1890 ~ 2100 年	1900 ~ 2100 年	1961 ~ 2100 年	1950 ~ 2099 年
Simulation period	GGa	1900 ~ 2099 年	1900 ~ 2099 年	1900 ~ 2100 年	1900 ~ 2099 年

2.4 气候情景建立技术

使用比例法调整实测数据来建立未来气候情景,具体过程如下:(1) 计算气象站点与 GCMs 4 个相邻网格中心的角距离后,使用反距离权重法插值获得 6 个气象站点的 GCMs 数据;(2) 根据实测气象数据(1957 ~ 2005 年),选择 GCMs 的两个时段的数据:与实测时段对应的数据(1957 ~ 2005 年)和要评估的未来时段(2010 ~ 2039 年)数据,统计 GCMs 两段数据中降水量、最高和最低温度的月均值;(3) 计算 GCMs 数据 2010 ~ 2039 年相对于 1957 ~ 2005 年的月降水均值比率、月均最高和最低温度的变化量;(4) 使用月降水均值比率放大实测 1957 ~ 2005 年降水,将月均最高和最低温度的变化量分别加到实测 1957 ~ 2005 年的相应值上。

2.5 水文气象变量的变化趋势判断

本研究使用多个 GCMs 和排放情景,由于气候模式和排放情景的不确定性,水文气象变量的最终模拟结果可能变化复杂,难以判断其趋势。因此,本文使用单尾 T 检验来判断气象水文变量相对于目前的变化趋势,将实测值的均值作为检验数据序列的假定平均值,使用 $(1-p) \times 100\%$ (p 为 T 检验的显著水平)衡量气候变化趋势的概率。单尾 T 检验可以判断待检验序列与假定值之间的大小关系,通过设定零假设和备择假设 $H_0: \mu \leq \mu_0$, $H_1: \mu > \mu_0$ 或 $H_0: \mu \geq \mu_0$, $H_1: \mu < \mu_0$, 在一定的显著水平 p 下,根据“小概率事件实际不可能性原理”否定或接受零假设,单尾检验的否定域为 Z_α 。

3 结果与讨论

3.1 预测的气候变化

表 3 列出了黑河流域气候在不同情景下的年均变化,整体而言,各站点具有相似的变化趋势,且变化幅度

表 3 黑河流域 6 个气象站在 4 个 GCMs 不同情景下的年均气候变化

Table 3 Annual averaged change of precipitation, maximum temperature ($T_{\max}$) and minimum temperature ($T_{\min}$) for six weather stations under three scenarios of four GCMs in Heihe watershed

气候模式气候情景		降水变化量 Precipitation change(%)						最高温度变化量 Tmax change(℃)						最低温度变化量 Tmin change(℃)					
GCMs	Scenarios	长武 *	崇信	华亭	泾川	灵台	陇县	长武	崇信	华亭	泾川	灵台	陇县	长武 *	崇信	华亭	泾川	灵台	陇县
CCSR	A2	-1.1	-1.2	-1.1	-1.0	-0.8	-1.2	1.3	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4
	B2	0.8	0.7	0.7	0.8	1.1	0.8	1.4	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.6	1.5	1.6	1.5	1.5	1.6
	GGa	3.0	3.1	3.0	3.0	3.2	3.2	1.4	1.3	1.4	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
CGCM2	A2	-2.1	-2.3	-1.3	-2.1	-2.2	-1.6	1.7	1.5	1.7	1.6	1.6	1.7	2.0	1.8	2.0	1.9	1.9	2.0
	B2	-1.5	-1.4	-0.7	-1.2	-1.6	-1.4	1.8	1.7	1.7	1.8	1.8	1.7	2.0	1.9	1.9	2.0	2.0	1.8
	GGa	2.9	3.1	5.8	3.3	3.0	5.7	2.2	2.1	2.0	2.2	2.2	2.0	2.8	2.7	2.6	2.7	2.8	2.6
CSIRO	A2	3.4	4.2	3.7	3.4	3.4	2.3	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.3	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3
	B2	2.9	3.5	2.9	2.9	3.0	2.3	1.6	1.5	1.6	1.6	1.6	1.6	2.3	2.2	2.3	2.3	2.3	2.3
	GGa	7.8	7.4	7.4	7.7	7.8	7.5	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
HadCM3	A2	3.1	2.7	2.8	3.2	2.9	2.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3	1.2
	B2	7.3	7.7	6.4	7.7	7.3	5.7	0.7	0.7	0.9	0.7	0.7	0.9	1.3	1.2	1.3	1.3	1.3	1.2
	GGa	3.9	3.1	2.2	3.8	3.9	-1.4	1.7	1.6	1.6	1.6	1.7	1.7	1.6	1.5	1.6	1.6	1.6	1.8
增长概率																			
Increase probability(%)		99.1	99.1	99.5	99.3	99.2	97.5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

* 长武 Changwu; 崇信 Chongxin; 华亭 Huating; 泾川 Jingchuan; 灵台 Lingtai; 陇县 Longxian

相近。较 1957~2005 年,2010~2039 年黑河流域的年均降水可能变化 $-2.3\% \sim 7.8\%$,降水变幅虽然不大,但相关研究表明,其对径流的影响将会被放大^[20,21]。不同模式和情景预测的降水变化幅度甚至方向不同,这是由不同模式的气候敏感性不同导致的^[22],并将进而导致其他水文要素变化的不确定性。尽管不同情景预测降水的变化趋势不同,但 T 检验的结果表明,黑河流域各站点的降水将普遍增长,概率均在 97.5% 以上,相关研究也指出中国西北地区的降水一般呈增加趋势^[23]。2010~2039 年,黑河流域年均最高和最低温度分别升高 $0.7 \sim 2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1.2 \sim 2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,且最低温度的升高更明显,表明日较差可能会进一步减小,与《气候变化国家评估报告》的结论一致^[19]。

3.2 SWAT 模型校准与验证

图 2 表示了 SWAT 校准期和验证期模拟和实测的年径流,可以看出,模型对年径流的模拟效果较好。校准期的实测年均径流深为 54.2 mm,模拟值为 52.0 mm,相对误差 -4.0% ,Nash 系数达到 0.87,相关系数为 0.88。验证期的实测年均径流深为 36.7 mm,模拟值为 37.6 mm,相对误差 2.5%,Nash 系数和相关系数均为 0.87。由于月径流数据仅有 1972~1987 年,下面只给出模拟结果,不再验证。可以看出,SWAT 较好地模拟了该时段的月径流,实测与模拟的月径流均值分别为 4.5 mm 和 4.7 mm,相对误差为 2.7%,模型效率系数为 0.68,但线性回归系数为 0.75,且斜率为 1.0027 接近于 1 而截距为 0.021 接近于 0。上述结果说明 SWAT 在黑河流域具有很好的适用性,调参结果是令人满意的。

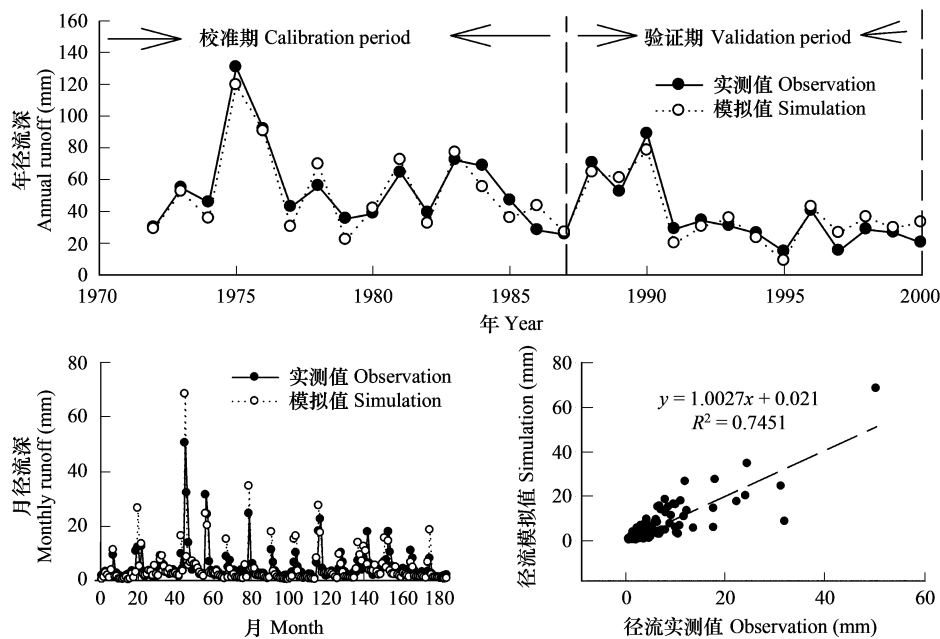


图 2 黑河流域径流量的实测值与模拟值

Fig. 2 Observed and simulated runoff depth of Heihe watershed

3.3 气候变化的水文效应

3.3.1 年均变化

表 4 为 2010~2039 年黑河流域在当前土地利用下的年均水文状况。径流变幅远大于降水,介于 $-19.8\% \sim 37.0\%$,降水的轻微变化导致径流的大幅变化,这与相关研究的结论一致^[20,21]。12 种情景中有 7 种的径流减少, T 检验表明径流增长的概率为 72.9%,而流域降水增长的概率为 99.5%,说明年径流与年降水变化没有很好的相关性,如 3 种降水增加的情景径流减少了,这很可能是受降水月变化影响导致的。1.2m 剖面的土壤水分具有与降水相似的变化趋势,但变幅小于径流,介于 $-5.5\% \sim 17.2\%$,12 种情景有 8 种情景的土壤水分含量增高, T 检验表明土壤水分增高的概率为 97.6%;蒸散普遍增长 $0.1 \sim 5.9\%$,可能是由于温度升高而降水变化不大导致的。黑河流域 2010~2039 年水文变量的主要变化趋势与相关研究的结论一致,

如秦大河等指出西北地区年径流量 2010 ~ 2050 年将增加几个到十几个百分点^[23];游松财等应用水平平衡模型和不同气候变化情景,发现 2090 ~ 2099 年黄河流域的地表径流将增长^[24];莫兴国等基于生态水文模式与 HadCM3,预测本世纪末无定河流域蒸散和地表径流将分别增加 23% 和 45%^[7];Zhang 等和李志等预测黄土长武塬地块尺度上径流、蒸散和土壤水分等都将有所增长^[25, 26]。以上结果和分析说明,黑河流域未来水资源量很可能增加,有利于该区的生态建设和农业生产;但同时也可能带来更加严重的水土流失,从而产生一定的负面效应,需要采取适应性措施。

表 4 黑河流域 2000 年土地利用与 2010 ~ 2039 年气候下的年均降水、径流、土壤水分和蒸散及其相对变化

Table 4 Annual mean precipitation, runoff, soil water, evapotranspiration (ET) and their relative change in Heihe watershed simulated with 2000 landuse and 2010 – 2039 climate

气候模式 GCMs	情景 Scenarios	降水 Precipitation		径流 Runoff		土壤水分 Soil water		蒸散 ET	
		深度	变化	深度	变化	深度	变化	深度	变化
		Depth (mm)	Change(%)	Depth (mm)	Change(%)	Depth (mm)	Change(%)	Depth (mm)	Change(%)
基线	Baseline	567.1	0	44.7	0	146.3	0	512.7	0
CCSR	A2	561	-1.1	41.1	-8.2	141.8	-3.1	513.3	0.1
	B2	568.3	0.2	40.4	-9.5	143.2	-2.1	520.7	1.6
	GGa	585.6	3.3	50.5	12.9	159.6	9.1	524.7	2.3
CGCM2	A2	559.6	-1.3	35.9	-19.8	138.3	-5.5	517.2	0.9
	B2	564.7	-0.4	37.3	-16.6	140.6	-3.9	520.2	1.5
	GGa	584.9	3.1	44.9	0.5	154.2	5.4	530.9	3.6
CSIRO	A2	586.5	3.4	48.2	7.9	156.8	7.2	528.1	3
	B2	584.5	3.1	43	-3.9	153.4	4.9	532.5	3.9
	GGa	606	6.9	51.9	16.2	162.8	11.3	542.9	5.9
HadCM3	A2	592.1	4.4	55.8	24.8	170.8	16.7	522.2	1.9
	B2	609.9	7.6	61.2	37	171.4	17.2	535.3	4.4
	GGa	577.8	1.9	42.8	-4.2	150	2.5	526.7	2.7
增长概率 Increase probability (%)		99.5	-	72.9	-	97.6	-	100	-

3.3.2 季节变化

图 3 表示了 2010 ~ 2039 年黑河流域降水、径流、土壤水分和蒸散变化的季节分布,可以看出,对于同一变量,不同情景模拟的结果不同,除了少数月份的结果相对确定以外,大多数月份的变化趋势难以判断。而 T 检验很好地判断出了水文气象变量的变化趋势和发生概率(表 5),可以看出,降水在 12 ~ 7 月份和 9 月份增长的可能性较大,在 8 月份和 10 ~ 11 月份减少的概率较大;径流在 4 ~ 7 月份和 9 ~ 10 月份增加的概率较大,11 ~ 3 月份和 8 月份减少的可能性较大;土壤水分在各月份都增长,但 6 ~ 8 月份增长的概率较低;蒸散在 11 ~ 6 月份普遍增长,在 7 ~ 10 月份减少的可能性较大。从上述水文气象变量的季节变化来看,径流、土壤水分和蒸散的变化受降水和温度变化的综合作用,如降水为径流提供直接的水源,因此,降水变化与径流变化直接相关(图 3),这种关系在 4 ~ 11 月份表现特别明显;然而,12 ~ 3 月份的降水增长了径流却减少了,这很可能是由于温度变化的影响较降水更大导致的,2010 ~ 2039 年暖冬现象可能更加严重^[26],蒸散加强进而导致减少径流水源。水文变量在不同月份或季节对气候变化的响应不同,受多种机制的影响,除降水增减导致的水源量变化和温度升高导致的蒸发量增加以外,植被在水文变量的变化过程中起到重要的作用,将直接影响各水文变量的变化。如梁玲等基于数值模拟,发现植被改善能使径流量减小、湿度增大^[27];莫兴国等研究无定河流域时发现气候变化可能导致植被净生产力上升,提高植被水分利用效率^[7];Zhang 等和李志等的研究表明,黄土高原作物生长状况不同,将影响径流、土壤水分和蒸散等水文变量对气候变化的响应程度^[25, 26]。

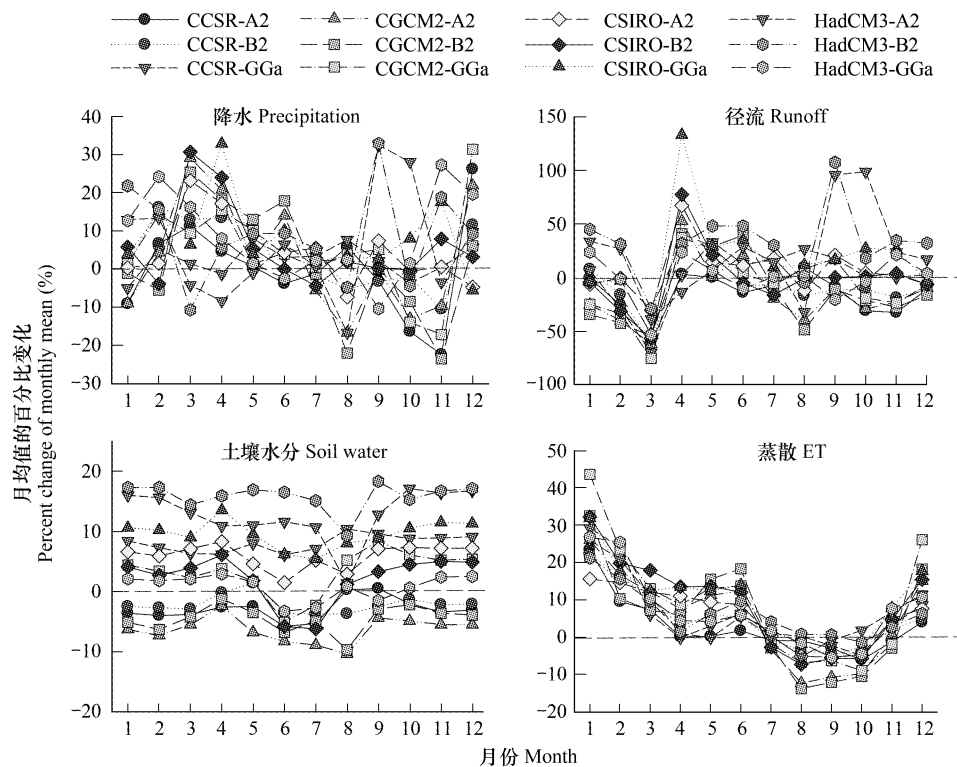


图3 2010~2039年黑河流域月均降水、径流、土壤水分和蒸散的相对变化(%)

Fig. 3 Relative changes of monthly mean precipitation, runoff, soil water and ET during 2010—2039 in Heihe watershed

表5 T检验判断的水文气象变量逐月变化趋势

Table 5 Monthly change trend of hydro-meteorological variables judged by T-test

月份 Month		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
降水 Precipitation	趋势 Trend	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	-	+
	概率 Probability (%)	85.3	99.7	99.7	99.9	99.9	98.6	66.7	90.3	90.6	72.4	59.4	99.7
径流 Runoff	趋势 Trend	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+	-	-
	概率 Probability (%)	57.2	96.1	100	99.8	100	97.6	66.0	88.2	91.6	60.6	57.2	62.2
土壤水分 Soil water	趋势 Trend	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	概率 Probability (%)	95.9	92.8	94.9	99.2	95.6	54.3	63.4	74.3	98.0	98.3	97.6	97.6
蒸散 ET	趋势 Trend	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+
	概率 Probability (%)	100	100	100	99.9	100	100	62.3	99.8	100	100	99.0	100

3 结论

黄土高原沟壑区黑河流域 2010~2039 年的年均降水可能变化 -2.3%~7.8%; 年均最高和最低温度分别升高 0.7~2.2℃和 1.2~2.8℃。这些气候变化影响了流域水文状况, 导致年径流量可能变化 -19.8%~37.0%, 1.2 m 剖面土壤水分含量可能变化 -5.5%~17.2%, 蒸散量普遍增长 0.1%~5.9%。虽然上述水文气象变量年均值的变化较复杂, 但 T 检验结果表明, 年降水、径流、土壤水分和蒸散增长可能性较大。对于季节变化, 降水 12~7 月份和 9 月份增长的可能性较大, 8 月份和 10~11 月份减少的概率较大; 径流 4~7 月份和 9~10 月份增加的概率较大, 11~3 月份和 8 月份减少的可能性较大; 土壤水分在各月份都增长; 蒸散 11~6 月份普遍增长, 7~10 月份减少的可能性较大。上述结果表明, 未来气候变化将对黄土高原沟壑区黑河流域的水资源有重要的影响, 需采取必要的措施来减缓其不利影响, 如通过调整土地利用模式等方式。

References:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. ed. S. Solomon, *et al.* Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [2] IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, ed. M. L. Parry, *et al.*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Kundzewicz Z W, Somlyódy L. Climatic Change Impact on Water Resources in a Systems Perspective. *Water Resources Management*, 1997, 11 (6): 407—435.
- [4] Hao Z C, Wang J H, Li L, *et al.* Impact of Climate Change on Runoff in Source Region of Yellow River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(1): 1—7.
- [5] Lan Y C, Ding Y J, Liu J Q, *et al.* Change of Water Resources in Mountainous Area of Heihe River under Global-Warming Scene. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(6): 863—868.
- [6] Liu X D, An Z S, Fang J G, *et al.* Possible Variations of Precipitation over the Yellow River Valley under the Global-warming Conditions. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(5): 513—519.
- [7] Mo X G, Lin Z H, Liu S X. Climate change impacts on the ecohydrological processes in the Wuding River basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (12): 4999—5007.
- [8] Tang H X, Chen Y Q. Impacts of Global Warming on the Water Resources in the Dongjing River Basin by Stochastic Method. *Advances in Water Science*, 2000, 11(2): 159—164.
- [9] Yuan F, Xie Z H, Ren L L, *et al.* Hydrological variation in Haihe River Basin due to climate change. *Shui Li Xue Bao*, 2005, 36(3): 274—279.
- [10] Battaglin W A, Hay L E, Parker R S, *et al.* Applications of a GIS for modeling the sensitivity of water resources to alterations in climate in the Gunnison river basin, Colorado. *Water Res. Bull.*, 1993, 25(6): 1021—1028.
- [11] Wolock D M, Hornberger G M. Hydrological effects of changes in levels of atmospheric carbon dioxide. *J. Forecast.*, 1991, 10(1-2): 105—116.
- [12] Miller J R, Russell G L. The impact of global warming on river runoff. *J. Geophys. Res.*, 1992, 97(D3): 2757—2764.
- [13] Yu B. Adjustment of CLIGEN parameters to generate precipitation change scenarios in southeastern Australia. *Catena*, 2005, 61(2-3): 196—209.
- [14] Zhang, X C. A comparison of explicit and implicit spatial downscaling of GCM output for soil erosion and crop production assessments. *Climatic Change*, 2007, 84(3-4): 337.
- [15] Deng H P, Liu H F. Impacts of global climate changes the Songnen Steppe. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(6): 958—963.
- [16] Liu C M, Xia J, Guo S L, *et al.* Advances in distributed hydrological modeling in the Yellow River basin. *Advances in Water Science*, 2004, 15 (4): 495—500.
- [17] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, Williams J R. Large area hydrologic modeling and assessment. Part 1. Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 1—17.
- [18] van Griensven, Meixner T, Grunwald S, *et al.* A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology*, 2006, 324 (1-4): 10—23.
- [19] Ding Y H, Ren G Y, Shi G Y, *et al.* National Assessment Report of Climate Change(I): Climate change in China and its future trend. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(1): 3—8.
- [20] Maurer E. Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California, under two emissions scenarios. *Climatic Change*. 2007, 82(3): 309—325.
- [21] Minville M, Brissette F, Leconte R. Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed. *Journal of Hydrology*, 2008, 358(1-2): 70—83.
- [22] Du W P, Miao Q L. Assessing the impacts of greenhouse gas on climate environment and their uncertainties. *Environmental Science and Technology*, 2006, 29(2): 72—74.
- [23] Qin D H, Ding Y H, Wang S W, *et al.* A study of environment change and its impacts in western China. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2): 321—328.
- [24] You S C, Kiyoshi Takahashi, Matsuoka Y. Climate change impact on surface runoff in China. *Quaternary Sciences*, 2002, 22(2): 148—157.
- [25] Zhang X C, Liu W Z. Simulating potential response of hydrology, soil erosion, and crop productivity to climate change in Changwu tableland region

on the Loess Plateau of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 131(3-4): 127—142.

- [26] Li Z, Liu W Z, Zhang X C, *et al.* Downscaling GCM output to simulate potential change of soil water balance on loess tableland. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9): 3769—3777.
- [27] Liang L, Lü S H, Liu Y P. Numerical simulation of effect of vegetation changes of Loess Plateau on environment. *Plateau Meteorology*, 2006, 25(4): 575—582.

参考文献:

- [4] 郝振纯, 王加虎, 李丽, 等. 气候变化对黄河源区水资源的影响. *冰川冻土*, 2006, 28(1): 1~7.
- [5] 蓝永超, 丁永建, 刘进琪, 等. 全球气候变暖情景下黑河山区流域水资源的变化. *中国沙漠*, 2005, 25(6): 863~868.
- [6] 刘晓东, 安芷生, 方建刚, 等. 全球气候变暖条件下黄河流域降水的可能变化. *地理科学*, 2002, 22(5): 513~519.
- [7] 莫兴国, 林忠辉, 刘苏峡. 气候变化对无定河流域生态水文过程的影响. *生态学报*, 2007, 27(12): 4999~5007.
- [8] 唐海行, 陈永勤. 应用随机方法研究全球气候变暖对东江流域水资源的影响. *水科学进展*, 2000, 11(2): 159~164.
- [9] 袁飞, 谢正辉, 任立良, 等. 气候变化对海河流域水文特性的影响. *水利学报*, 2005, 36(3): 274~279.
- [15] 邓慧平, 刘厚凤. 全球气候变化对松嫩草原水热生态因子的影响. *生态学报*, 2000, 20(6): 958~963.
- [16] 刘昌明, 夏军, 郭生练, 等. 黄河流域分布式水文模型初步研究与进展. *水科学进展*, 2004, 15(4): 495~500.
- [19] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势. *气候变化研究进展*, 2006, 2(1): 3~8.
- [22] 杜吴鹏, 缪启龙. 温室气体对气候环境的影响预测及其不确定性. *环境科学与技术*, 2006, 29(2): 72~74.
- [23] 秦大河, 丁一汇, 王绍武, 等. 中国西部环境演变及其影响研究. *地学前缘*, 2002, 9(2): 321~328.
- [24] 游松财, Kiyoshi Takahashi, Matsuoka Y. 全球气候变化对中国未来地表径流的影响. *第四纪研究*, 2002, 22(2): 148~157.
- [26] 李志, 刘文兆, 张勋昌, 等. 解集 GCM 输出模拟黄土塬区土壤水分平衡的潜在变化. *生态学报*, 2007, 27(9): 3769~3777.
- [27] 梁玲, 吕世华, 柳媛普. 黄土高原植被变化对环境影响的数值模拟. *高原气象*, 2006, 25(4): 575~582.