

文章编号:1005-0930(2013)03-0501-011 中图分类号:P467 文献标识码:A
doi:10.3969/j.issn.1005-0930.2013.03.012

永定河流域水循环特征及其对气候变化的响应

曾思栋, 张利平, 夏军, 杨珍

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北 武汉 430072)

摘要:气候变化对我国各地区水资源时空格局的影响是气候变化影响评估的重要内容.本文以永定河流域为研究对象,采用线性回归法、Mann-Kendall非参数检验等方法,分析了1957—2001年的水文气象要素变化特征;基于数字高程模型、土地利用和土壤类型等资料,建立了SWAT分布式水文模型,验证了SWAT模型在该流域的适用性;根据IPCC第四次评估报告多模式结果,分析了IPCC SRES-A2、A1B、B1情景下2050年以前降水、气温、径流、蒸发的响应过程.结果表明1957—2001年永定河流域年均降水量呈递减趋势,气温呈缓慢上升的变化趋势,年均径流量呈缓慢减少趋势,蒸发量呈缓慢下降趋势,20世纪60年代为丰水期,90年代为枯水期.在IPCC SRES-A2、A1B、B1情景下永定河流域2050年以前气温将持续增高,年降水量将增加,径流量较基准期将出现先减少后增大的趋势,结果预示着永定河流域的水资源在21世纪前期将出现减少,21世纪中期才有可能增加.这对于经济发达、人口稠密、用水量大并且严重缺水的永定河流域而言,水资源危机将进一步加剧.

关键词:永定河流域;气候变化;水文循环;SWAT模型

气候变化对水资源的影响及其适应性是国际社会普遍关注的全球性问题^[1-2].气候变化对我国各地区的水资源影响的时空格局变化,尤其是对水资源工程和规划的影响,将是气候变化影响评估的重要内容.未来气候变暖背景下我国水资源面临着很多不确定性,将给水资源可持续利用和管理及社会经济系统带来新的巨大挑战^[3-5].气候变化对水文水资源的影响研究方法已经从过去的采用假定的气候变化值,或由GCMs输出的大气CO₂浓度加倍达到稳定状态时的气候情景值,由此构建气候平均态变化驱动水文模型,发展到IPCC第三、四次评估报告期间开始采用SRES排放情景和众多气候模型来研究.在气候变化研究中,各个模式对不同地区的模拟效果不尽相同,单一GCM的模拟预测值输入到水文模型中,会引起径流杂乱无章的变化^[6-7].许多科学家的研究证明,多个模式的

收稿日期:2011-08-24;修订日期:2012-12-17

基金项目:国家自然科学基金(51279139);国家重点基础研究发展计划(973计划)(2010CB428406)

作者简介:曾思栋(1987—),男,博士研究生.

通信作者:张利平(1971—),男,教授,博导. E-mail:zhanglp@whu.edu.cn

平均效果优于单个模式的效果. 近年来,为减少气候模型对降水模拟的不确定性,开始采用多个气候模型集合平均的方法^[8].

永定河流域(112°—117°45',北纬 39°—41°20')是海河流域的七大水系之一(图 1),全长 747km,流域面积 47016km². 该区地处干旱和湿润气候的过渡地带,属中纬度大陆性季风气候,春季干旱多风,夏季炎热多雨,秋季凉爽湿润,冬季寒冷干燥. 流域多年平均降水不足 450mm,且径流量年内分配很不均匀,80%左右集中在汛期. 流域内的官厅水库是北京市主要的供水水源之一. 该流域水资源系统适应自然变化(如气候变化)的能力很低,是我国水资源系统最脆弱的地区之一,因此永定河流域水文循环过程对未来气候变化的响应研究具有重要的现实意义. 为此本文以永定河为研究流域,采用实测资料分析了流域水文气象要素的变化特征;基于数字高程模型、土地利用和土壤类型等资料,建立了 SWAT 分布式水文模型,验证了 SWAT 模型在该流域的适用性;根据 AR4 多模式 GCMs 输出结果,分析了 IPCC SRES-A2、A1B、B1 情景下 2050 年前降水、气温、径流和蒸发量的响应过程. 结果将为北京市水资源的可持续利用和管理提供较为科学的理论依据,对于保证海河流域社会经济可持续发展等方面具有重要参考价值.

1 资料与方法

1.1 数据资料

研究中使用了站点观测、GCMs 模式输出的逐月数据系列以及流域数字化资料.

(1) 站点观测数据. 来自中国气象科学数据共享服务网,包括永定河流域的 6 个气象站点 1957—2001 年共 45 年的逐日降水、最高最低气温、风速、相对湿度、日照时数等气象要素数据序列,以及 32 个雨量站的逐日降雨量数据. 逐月径流量为石匣里、响水堡水文站 1956—2000 年天然径流量系列,站点分布见图 1;

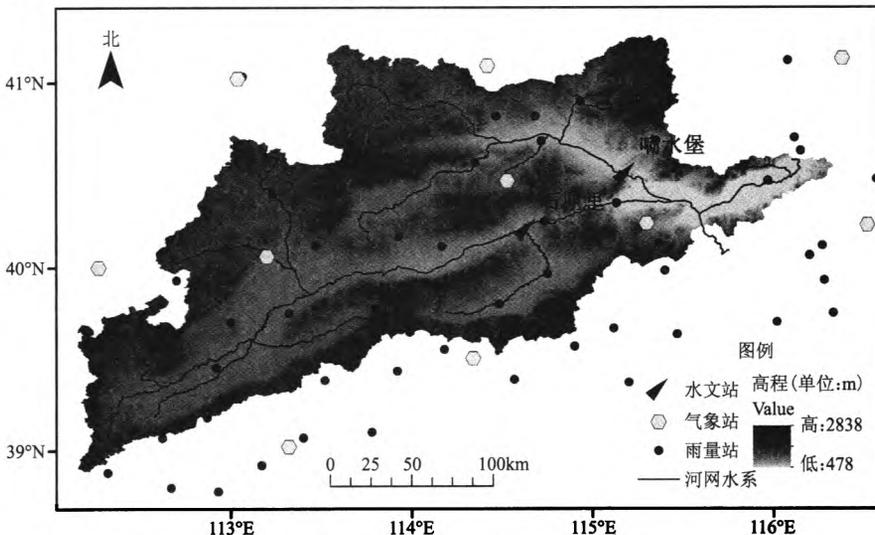


图 1 永定河流域水文站、气象站和雨量站分布图

Fig. 1 Locations of meteorological, rainfall and hydrological stations in the Yongding River Basin

(2) GCMs 模式数据. 世界气候研究计划(WCRP)的耦合模式比较计划阶段3的多模式数据,是国家气候中心对参与IPCC第四次评估报告的20多个不同分辨率的全球气候系统模式的模拟结果经过插值降尺度计算,将其统一到同一分辨率($1^{\circ} \times 1^{\circ}$)下,对其在东亚地区的模拟效果进行检验,进行多模式集合的结果. 未来温室气体排放情景采用IPCC第四次评估报告中假定的注重经济增长的区域发展情景(A2,高排放)、注重经济增长的全球共同发展情景(A1B,中等排放)和注重经济、社会和环境可持续发展的全球协调发展情景(B1,低排放)^[9];

(3) 流域数字化高程资料. 从美国地质调查局(USGS)提供的GTOPO30公共域中获取,分辨率为500m \times 500m. 土壤空间分布资料来源于中国科学院地理科学与资源研究所土壤数据库,并按照中国资源与环境数据库中土地资源与环境大类下土壤小类进行描述. 土地利用空间分布资料来源于国家测绘总局提供的国家土地覆盖分幅TIF图,并参照SWAT模型自带的美国土地利用参数库,将其分为12类.

1.2 研究方法

本文采用线性回归法、Mann-Kendall(M-K)非参数检验、滑动平均检验等方法进行水文气象要素的趋势分析. Mann-Kendall非参数检验法能够在一定程度上消除时间序列的分布类型的影响,是WMO推荐使用的一种方法. 由于采用的SWAT分布式水文模型需要输入日数据资料,由此本文通过天气发生器对资料进行时间上的降尺度处理. 天气发生器采用的是北京气候中心联合瑞典哥德堡大学地球科学中心区域气候研究小组共同研究开发的适用于中国广大地区的中国天气发生器BCCRCG-WG 3.00. 检验表明该天气发生器模拟日降水量的年平均降水量、各月平均降水日数及各月雨日平均降水量与实测值的统计结果非常接近,相关性很好^[10].

2 永定河流域水文气象要素变化情势

2.1 降水变化趋势分析

从永定河流域年降水量变化趋势和5年滑动平均过程(图2)可以看出,永定河流域多年平均年降水量呈递减趋势,变化率大致为 -1.67mm/a ,从其M-K检验(表1)可以看出,其变化趋势为 -1.42 ,年降水量减小趋势显著,不存在明显突变现象.

从表2可以看出永定河流域20世纪60、70年代的年均降水量高于多年平均,年降水量距平百分率分别达到3.4%、3.6%,说明20世纪60—70年代永定河流域为丰水期. 20世纪80、90年代的年均降水量距平百分率为 -2.8% 、 -4.2% ,说明20世纪80—90年代永定河流域是枯水期.

表1 永定河流域年降水量、气温和天然径流量M-K检验

Table 1 M-K test results of annual precipitation, temperature and runoff of Yongding River Basin

水文气象要素	降水量	气温	蒸发量	径流深
M-K 检验	-1.42	4.2	-0.73	-4.74

表2 永定河流域年降水量、气温和天然径流量年代特征统计表

Table 2 Decadal characteristics of annual precipitation, temperature and runoff of Yongding River Basin

年份	降水量		气温		蒸发量		径流深	
	年均值 /mm	距平百分率 /%	年均值 /°C	距平/°C	年均值 /mm	距平百分率 /%	年均值 / × 10 ⁸ m ³	距平百分率 /%
1961—2000	422.7		6.7		387.6		35.1	
1961—1970	437.2	3.4	6.2	-0.5	395.3	2.0	41.9	19.4
1971—1980	437.8	3.6	6.4	-0.2	398.7	2.9	39.1	11.2
1981—1990	410.7	-2.8	6.7	-0.01	378.7	-2.3	32.1	-8.7
1991—2000	405.0	-4.2	7.4	0.7	377.6	-2.6	27.5	-21.8

2.2 气温变化趋势分析

从永定河流域气温变化趋势及其5年滑动平均过程(图3)可以看出,永定河流域多年平均气温的变化呈缓慢上升趋势,变化率约为0.038°C/a.从M-K检验(表1)可以看出,其变化趋势为4.2,气温上升趋势显著,气温的趋势突变点发生在1989年.从表2可以看出永定河流域20世纪90年代平均气温相对较高,增幅为0.7°C.20世纪60年代和70年代平均气温低于多年平均值0.5°C和0.2°C.

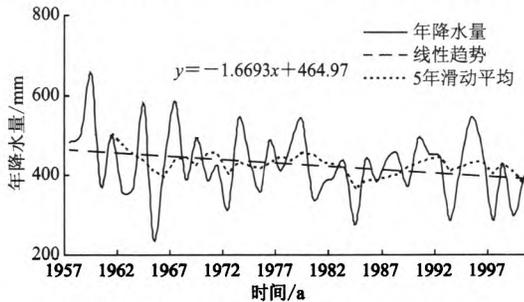


图2 永定河流域年降水量变化趋势
Fig. 2 Annual precipitation change of Yongding River Basin

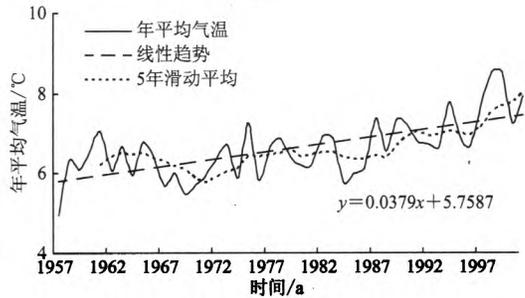


图3 永定河流域气温变化趋势
Fig. 3 Annual temperature change of Yongding River Basin

2.3 径流变化趋势分析

从永定河流域年径流深变化趋势及其5年滑动平均过程(图4)可以看出,永定河流域多年平均径流深呈缓慢减少趋势,变化率约为-0.57mm/a.从其M-K检验(表1)中可以看出,其变化趋势为-4.74,减小趋势显著,年径流深的趋势突变点发生在1985年.从表2可以看出永定河流域年径流深在20世纪60、70年代比多年平均偏大,其中20世纪60年代平均径流深高于多年平均19.4%,为丰水期.20世纪90年代年平均径流深较多年平均偏小,低于多年平均21.8%,为枯水期.这与前面分析的降水年代变化的特征基本一致.

2.4 蒸发量变化趋势分析

从永定河流域年蒸发量变化趋势及其5年滑动平均过程(图5)可以看出,永定河流域多年平均蒸发量呈缓慢下降趋势,变化率约为0.85mm/a.从其M-K检验(表1)中可以看出,年蒸发量减小趋势不显著,也不存在明显突变现象.从表2可以看出永定河流域年

蒸发量在 20 世纪 60、70 年代均比多年平均偏大,高于多年平均 2.0%、2.9%,20 世纪 80、90 年代年平均蒸发量较多年平均偏小,低于多年平均 2.3%、2.6%。这与流域的降水量和径流量的年代变化特征基本一致。

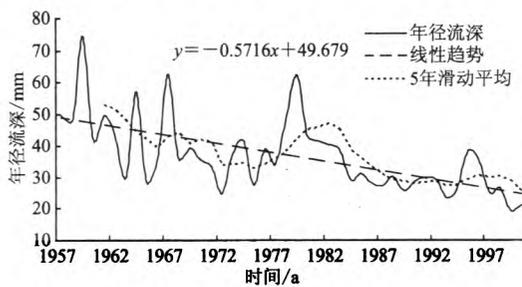


图 4 永定河流域径流变化趋势

Fig. 4 Annual runoff variation of Yongding River Basin

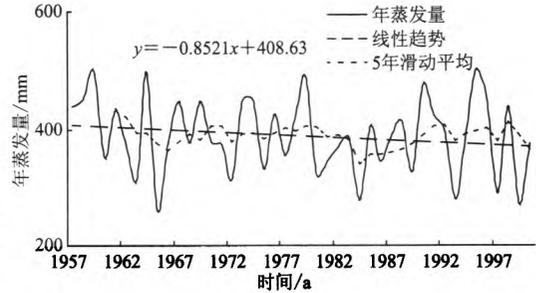


图 5 永定河流域蒸发量变化趋势

Fig. 5 Annual evaporation variation of Yongding River Basin

3 SWAT 模型在永定河流域径流模拟中的适用性研究

3.1 SWAT 模型概述

SWAT 模型由美国农业部农业服务中心于 20 世纪 90 年代初期研制开发,目前已被国内外学者广泛应用于流域水文过程模拟,以及流域在不同的气候变化、土地利用变化的水文响应,评价人类活动等对流域的生态环境影响^[11-12]。

3.2 模拟方法选择

由于只有日降水观测资料,故径流模拟方法选择“日降雨数据/SCS 径流曲线数方法,以日为时间单位”进行径流演算。潜在蒸发量的模拟方法选择 Priestly-Taylor 方法。河道演算采用马斯京根法。径流模拟的时间尺度为月,参数率定也以月径流效率系数为评价指标。

3.3 SWAT 参数的率定

SWAT 模型参数众多,可分为两类,第一类可根据参数的物理意义直接标定,如土壤物理属性参数、土地利用/植被覆盖属性参数的取值,主要利用 SWAT 模型自带的数据库中的参数值确定。本文侧重于流域的径流模拟研究,因而第二类参数主要是流量参数的率定,率定的参数分别有径流曲线数(CN)、土壤有效含水量(SOL_AWC)、土壤蒸发补偿系数(ESCO)、地下水蒸发系数(GW_REVAP)、基流消退系数(ALPHA-BF)。参数率定过程中遵循先上游后下游;先调整水量平衡,再调整过程;先调整地表径流,再调整土壤水、蒸发和地下径流的原则^[13-15]。考虑到 SWAT 模型结构的复杂性,本文采用自动优选与手工优选相结合的方法优选第二类参数。

3.4 模拟结果分析

本文采用 Nash-Sutcliffe 效率系数(简称 Nash 效率系数)、相关系数和相对误差 3 个指标评价模型在研究区的适应性。Nash 效率系数越大,相关系数越高,表明模拟效率越好。如果该值 < 0,说明模型模拟值比实测值可信度更低,通常取该值 > 0.5 作为径流模拟

效率的评价标准.

研究中采用 1959—1990 年日资料进行模型参数率定, 1991—2000 年日资料进行模型参数检验. 模拟期和检验期模型评价结果见表 3 和图 6. 可以看到在年尺度径流量模拟期 Nash 效率系数达到 0.68, 相关系数为 0.89, 相对误差 5.6%; 检验期 Nash 效率系数达到 0.91, 相关系数为 0.97, 相对误差 11.4%. 结果表明在永定河流域此类地理环境下, 分布式水文模型 SWAT 进行年径流模拟是可行的, 为在此基础上的流域水资源对气候变化响应研究奠定了基础.

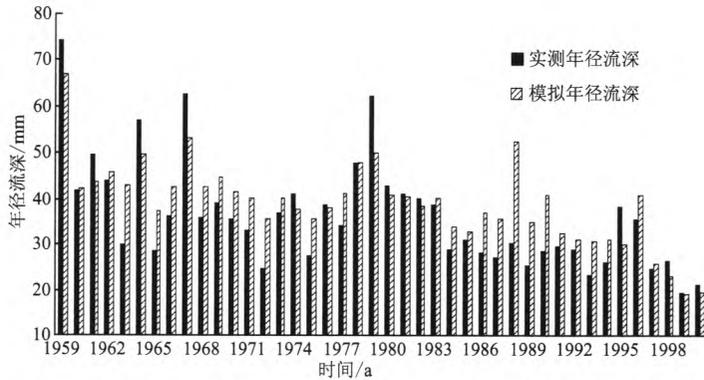


图 6 永定河流域 1959—2000 年模拟检验期年径流量模拟与实测比较

Fig. 6 Simulated and observed yearly runoff during 1959—2000 of Yongding River Basin

表 3 永定河流域 1959—2000 年模拟检验期径流评价

Table 3 Simulated and observed runoff evaluation of Yongding River Basin

评价时段	率定期(1959—1990)			检验期(1991—2000)		
	效率系数	相对误差	相关系数	效率系数	相对误差	相关系数
年	0.68	5.6%	0.89	0.91	11.4%	0.97

4 永定河流域水资源对未来气候变化的响应分析

根据 WCRP 的耦合模式比较计划—阶段 3 的多模式数据结果, 选取 1961—1990 年作为气候基准期, 分析永定河流域未来降水、气温的变化. 然后根据上述多模式数据, 利用天气发生器将月资料降解为日资料, 并输入至 SWAT 模型中, 模拟 A2、A1B 和 B1 情景下永定河流域 2011—2050 年的水文循环响应过程. 为便于分析, 将未来 2011—2050 年划分为 2020s(2011—2030 年) 和 2040s(2031—2050 年) 2 个时期, 对各年代的降水、气温、蒸发和径流的年际变化、年代际变化和年内变化进行比较分析.

4.1 未来降水变化分析

A2、A1B 和 B1 情景下永定河流域未来 2011—2050 年降水量变化如图 7 所示, 可以看出 3 种气候情景下未来降水量变化趋势总体一致, 较基准期都呈现出增加趋势, 年变化率分别为 0.17%、0.20% 和 0.04%, A2 和 A1B 情景下降水量增加趋势明显.

从未来各年代平均降水量相对基准期的变化表(表 4)可看出, 3 种情景下各年代降水量大都呈增加趋势, A2、A1B 和 B1 情景下年平均降水量在 2020s 分别较基准期变化

2.3%、1.1%、6.2%，在 2040s 分别较基准期增加 5.4%、2.9%、6.2%，其中 A1B 情景下 21 世纪 20—30 年代降水量较基准期呈现微弱减少。降水量在 2020s 和 2040s，B1 情景下增幅最大。

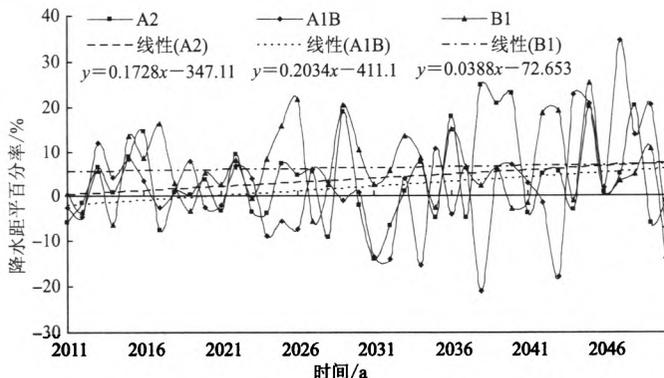


图7 各气候背景下永定河流域 2011—2050 年降水量变化

Fig. 7 Projected annual precipitation variations from 2011 to 2050

4.2 未来气温变化分析

A2、A1B 和 B1 情景下永定河流域未来 2011—2050 年平均气温变化如图 8 所示。可以看出 3 种气候情景下未来年平均气温较基准期都呈现出显著的上升趋势，年增幅分别为 0.03℃、0.04℃和 0.02℃，A2 情景下年平均气温增幅最大，B1 情景下增幅最小。

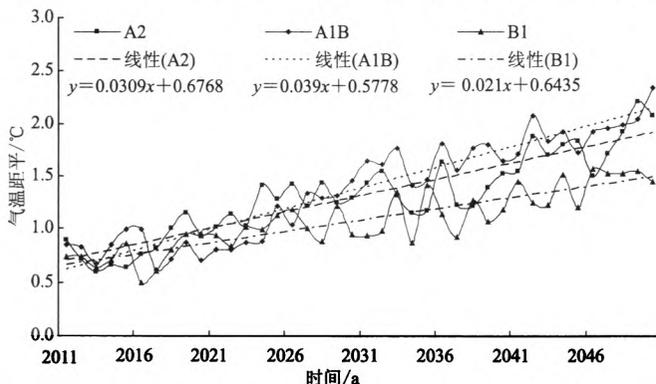


图8 各气候背景下永定河流域未来 2011—2050 年均气温变化

Fig. 8 Projected annual temperature variations from 2011 to 2050

从表 4 还可看出，在 2020s 时期 A2、A1B 和 B1 情景下年平均气温分别较基准期增加 1.1℃、1.0℃和 0.9℃；在 2040s 时期 A1B 情景下增温最为明显，较基准期增加 1.8℃，A2 情景下增温趋势次之，为 1.6℃，B1 情景下增温略缓，为 1.3℃，在 2020s 和 2040s 中 B1 情景下增温最小。

4.3 未来径流量变化分析

A2、A1B 和 B1 情景下永定河流域未来 2011—2050 年径流量变化如图 9 所示。可以看出 3 种气候情景下未来永定河流域年径流量变化趋势一致，较基准期都呈现出随时间增加的趋势，年增加率分别为 1.41%、1.41%和 1.72%，B1 情景下径流量变化幅度相对

A2、A1B 情景较大.

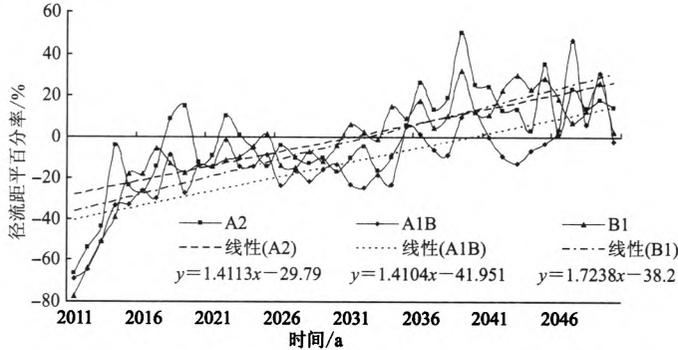


图9 各气候背景下永定河流域未来 2011—2050 年径流变化

Fig. 9 Projected annual runoff variations from 2011 to 2050

从未来各年代平均径流量相对基准期的变化表(表 4)中看出,3 种情景下各年代径流量较基准期都出现先减少后增大的态势. 在 2020s 时期 A2、A1B 和 B1 情景下年径流量较基准期减少,减少量分别为 14.7%、25.1%、20.4%;A2 和 B1 情景下年径流量在 21 世纪 30 年代开始较基准期增加,而 A1B 情景下年径流量在 21 世纪 40 年代开始增加. 在 2040s 时期 A2 和 B1 情景下年径流量较基准期增幅分别为 13.0% 和 14.7%,而在 A1B 情景下径流仍然减少 1.1%.

4.4 未来蒸发分析

A2、A1B 和 B1 情景下永定河流域未来 2011—2050 年蒸发量变化如图 10 所示. 可以看出 3 种气候情景下未来永定河流域年蒸发量变化趋势一致,较基准期都呈现出增加的趋势,年增幅分别为 0.10%、0.18% 和 0.01%,A1B 情景下蒸发量变化幅度最大,A2 情景次之,B1 情景最小. 从未来各年代平均蒸发量相对基准期的变化表(表 4)中看出,3 种情景下各年代蒸发量较基准期都出现增大的态势. 在 2020s 时期 A2、A1B 和 B1 情景下年蒸发量较基准期增幅分别为 4.1%、3.1%、8.0%;在 2040s 时期 3 种情景下年均蒸发量较基准期增幅分别为 4.8%、3.8%、6.6%.

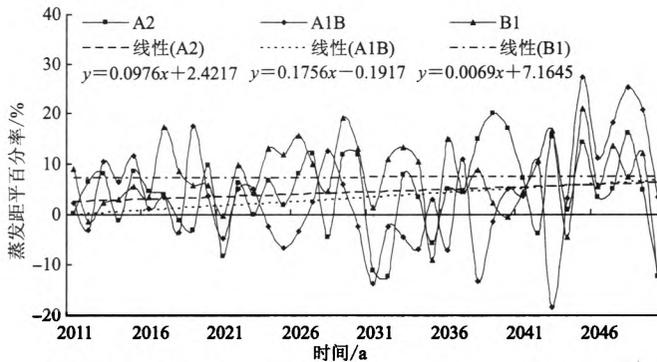


图 10 各气候背景下永定河流域未来 2011—2050 年蒸发量变化

Fig. 10 Projected annual evaporation variations from 2011 to 2050

表4 气候变化情景下未来各年代水文循环要素相对基准期的变化

Table 4 Decadal changes of annual water cycle elements under the climate scenarios 单位:%

年代	A2				A1B				B1			
	降雨	气温	蒸发	径流	降雨	气温	蒸发	径流	降雨	气温	蒸发	径流
2011—2020	2.1	0.8	3.6	-22.1	2.5	0.8	5.0	-35.7	4.0	0.8	5.9	-31.7
2021—2030	2.5	1.3	4.6	-7.2	-0.4	1.1	1.2	-14.4	8.4	1.0	10.1	-9.0
2020s	2.3	1.1	4.1	-14.7	1.1	1.0	3.1	-25.1	6.2	0.9	8.0	-20.4
2031—2040	6.5	1.4	4.4	9.9	-3.4	1.7	-3.0	-7.5	5.6	1.1	5.7	11.0
2041—2050	4.3	1.8	5.1	16.0	9.1	1.9	10.5	5.4	6.7	1.4	7.5	18.3
2040s	5.4	1.6	4.8	13.0	2.9	1.8	3.8	-1.1	6.2	1.3	6.6	14.7

5 结论和讨论

本文针对永定河流域,采用1957—2001年实测资料分析了流域水文气象要素的变化特征,年均降水量呈递减趋势,气温呈缓慢上升的变化趋势,年均径流量呈缓慢减少趋势,蒸发量呈缓慢下降趋势,20世纪60年代为丰水期,90年代为枯水期.建立了水源区SWAT分布式水文模型,采用1959—2000年数据分别进行了模型参数率定和验证,取得了较好的模拟效果,表明在永定河流域利用分布式水文模型SWAT进行径流模拟是完全可行的.在此基础上选取1961—1990年作为基准期,根据WCRP的耦合模式比较计划一阶段3的多模式数据结果,分析了IPCC SRES-A2、A1B、B1情景下永定河流域2050年以前降水、气温、径流和蒸发的响应过程,得到以下结论:

(1) A2、A1B和B1情景下永定河流域2011—2050年降水量变化较基准期呈现出增加趋势,A2和B1情景下降水量增加趋势明显.3种气候情景下未来年平均气温较基准期都呈现出显著的上升趋势,A1B情景下年平均气温增幅最大,B1情景下增幅最小;

(2) A2、A1B和B1情景下永定河流域2011—2050年各年代径流量较基准期都出现先减少后增大的态势,A1B情景下径流量变化幅度相对A2、B1情景较大.A2、A1B和B1情景下未来永定河流域年实际蒸发量变化趋势一致,较基准期都呈现出增加趋势;

(3) 在IPCC SRES-A2、A1B、B1情景下永定河流域2050年以前气温将持续增高,年降水量将增加,径流量较基准期出现先减少后增大的趋势,结果预示永定河流域的水资源在21世纪前期将出现减少,21世纪中期才有可能增加.这对于经济发达、人口稠密、用水量大并且严重缺水的永定河流域而言,水资源危机将进一步加剧.

由于人类对气候复杂系统认识的局限性,预测未来气候变化对流域水文循环过程的影响是一个复杂过程,其研究存在着不同程度的不确定性.如GCM模式对未来气候变化的预估、未来降水量预测、SWAT模型没有考虑未来下垫面变化对径流的影响等,这也对未来的预测结果造成了一定的不确定性.因此需要提高气候系统变化的认识和预测,加强气候变化对水资源系统影响的研究,从而减少水资源系统对气候变化的脆弱性,提高对气候变化的适应能力.本文虽然研究了永定河流域径流过程对未来气候变化的响应,但预测结果的不确定性、气候变化背景下极端水文事件的变化、水文模型中没有考虑未来下垫面的变化对径流的影响等问题希望下一步的研究工作能对此进行深入的探讨和研究.

致谢:本研究所使用的全球气候模式气候变化预估数据,由国家气候中心研究人员对其进行整理、分析和惠许使用.原始数据由各模式组提供,由WGCM(JSC/CLIVAR Working Group on Coupled Modelling)组织PCMDI(Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison)搜集归类.多模式数据集的维护由美国能源部科学办公室提供资助.在此一并致谢!

参 考 文 献

- [1] Zhu T, Jenkins M W, Lund J R. Estimated impacts of climate warming on California water availability under twelve future climate scenarios[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2005, 41(5):1027-1038
- [2] Chiew F H S, Tenga J, Vazea J, et al. Influence of global climate model selection on runoff impact assessment[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 379(1-2):172-180
- [3] 夏 军. 跨流域调水及其对陆地水循环及水资源安全影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2009, 17(6):831-842
Xia Jun. Impact of water diversion project across basins on land water cycle and water security[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2009, 17(6):831-842
- [4] Wai Cheung Ip, Zhang Liping, Wong Heung, et al. Multi-scale variability and trends of precipitation in North China[J]. *Water Resources*, 2011, 38(1):18-28
- [5] 张建云, 王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007
Zhang Jianyun, Wang Guoqing. *Studies for climate change impact on hydrology and water resources* [M]. Beijing: Science Press, 2007
- [6] 张利平, 陈小凤, 胡志芳. 气候变化对水文水资源影响的研究进展[J]. *地理科学进展*, 2008, 27(3):60-67
Zhang Liping, Chen Xiaofeng, Hu Zhifang. Progress in study of climate change impacts on hydrology and water resources [J]. *Progress in Geography*, 2008, 27(3):60-67
- [7] 刘春臻. 自然气候变异与人为气候变化对径流影响研究进展[J]. *气候变化研究进展*, 2008, 4(3):133-139
Liu Chunzhen. Advances in studying impacts of natural climate variability and anthropogenic climate change on streamflow[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4(3):133-139
- [8] Murphy J M, Sexton D M H, Barnett D N, et al. Quantification of modeling uncertainties in a large ensemble of climate change simulation[J]. *Nature*, 2004, 430:768-772
- [9] IPCC. IPCC fourth assessment report (AK4) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- [10] 廖要明, 陈德亮, 高歌, 等. 中国天气发生器降水模拟参数的气候变化特征[J]. *地理学报*, 2009, 64(7):871-878
Liao Yaoming, Chen Deliang, Gao Ge, et al. Impacts of climate changes on parameters of a weather generator for daily precipitation in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(7):871-878
- [11] Darren L F, Luo Yuzhou, Luedeling E, et al. Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 374(1-2):16-29
- [12] 张利平, 陈小凤, 张晓琳. VIC 模型与 SWAT 模型在中小流域径流模拟中的对比研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(8):745-752
Zhang Liping, Chen Xiaofeng, Zhang Xiaolin. A compare application research of VIC model and SWAT model in the Mid-Small valley flow simulation[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(8):745-752
- [13] Zhang Liping, Qin Linlin, Yang Zhen, et al. Climate change impacts on hydrological processes in the water source area of the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project[J]. *Water International*, 2012, 37(5):564-584
- [14] 张利平, 曾思栋, 王任超. 气候变化对滦河流域水文循环过程的影响研究[J]. *资源科学*, 2011, 33(5):966-974
Zhang Liping, Zeng Sidong, Wang Renchao. Impacts of climate change on the hydrological cycle in Luan River Basin [J]. *Resources Science*, 2011, 33(5):966-974
- [15] 张利平, 曾思栋, 夏 军. 漳卫河流域水文循环过程对气候变化的响应研究[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(7):1217-1226
Zhang Liping, Zeng Sidong, Xia Jun. Simulated hydrologic responses to climate change of the Zhangwei River Basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(7):1217-1226

Water Cycle Characteristic and Its Responses to Climate Change of the Yongding River Basin

ZENG Sidong, ZHANG Liping, XIA Jun, YANG Zhen

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract

Assessment of climate change impacts on water resources of the temporal and spatial pattern in various regions is an important aspect of climate change impact studies in China. In this paper, the linear regression and Mann-Kendall non-parametric test methods were used to analyze the change characteristics of the hydro-climatic series in the Yongding River Basin during 1957—2001 firstly. Then the SWAT model was applied and validated based on the digital elevation model, land use and soil type etc. in the basin. Finally the responses of precipitation, temperature, runoff and evaporation to climate change were analyzed based on the IPCC AR4 multi-mode climate models under different GHG emission scenarios (SRES-A2, A1B and B1) in the 21st century before 2050. The results show decrease trends for precipitation, runoff and evaporation, while the temperature increases during 1957—2001. Under the different GHG emission scenarios in the 21st century, the precipitation, temperature will increase while runoff will reduce and then increase in the mid-21st century, which indicate that the water resources crisis may be aggravated in the early-21st century in the basin as the development of economy and large amount of water consumption.

Keywords: the Yongding River Basin; climate change; water cycle; SWAT model