

# 滦河流域气候变化的水文响应研究

史晓亮<sup>1</sup>, 杨志勇<sup>2</sup>, 吕杰<sup>1</sup>, 刘峰<sup>1</sup>

(1. 西安科技大学 测绘科学与技术学院, 西安 710054; 2. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038)

**摘要:**以滦河流域为研究区,基于未来气候变化研究成果建立了 16 种气候变化情景,结合 SWAT 分布式水文模型模拟了不同气候变化情景下的水文过程,对滦河流域气候变化的水文响应进行了分析。结果表明:SWAT 模型可以较好地模拟滦河流域的月流量过程,在研究区具有较好的适用性;流域气温升高将会导致蒸发量增加、径流减少。在以升温为主、降水变化存在很大不确定性的情况下,滦河流域径流量可能进一步衰减。在未来降水增加的情况下,流域年均地表径流增加趋势的空间差异显著,尤其是流域下游的迁西县等地增加幅度超过 12 mm,研究结果将为变化环境下滦河流域的水资源管理提供参考。

**关键词:**气候变化; SWAT 模型; 径流; 滦河流域

中图分类号:P339; P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)02-0123-05

## Hydrological Response to Climate Change in Luanhe River Basin

SHI Xiaoliang<sup>1</sup>, YANG Zhiyong<sup>2</sup>, LÜ Jie<sup>1</sup>, LIU Feng<sup>1</sup>

(1. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Taking the Luanhe River Basin as the research area, we constructed a total of sixteen climate change scenarios on the basis of the previous studies in the context of future climate change in Haihe River Basin. With the distributed hydrological model of SWAT (Soil and Water Assessment Tool), the monthly streamflow in the study area was simulated, and the hydrological response to climate change was evaluated. The results showed that the calibrated SWAT model was able to well simulate the monthly flows and thus extensively applicable in the Luanhe River Basin. Besides, temperature rising might result in increased evaporation and decreased runoff. Therefore, the runoff in the Luanhe River Basin could be further deteriorating under the changing climate that is characterized by rising in temperature and the uncertainty in precipitation trends. Under the climate scenario with increased precipitation, the increase trend of average annual surface runoff had significantly spatial variability, especially in the downstream of the basin, including Qianxi County etc. The results would be greatly helpful for providing some references for water resources management under the changing environment in Luanhe River Basin.

**Keywords:** climate change; SWAT model; runoff; Luanhe River Basin

在全球气候变暖背景下,近 100 a 来中国平均气温升高 0.5~0.8℃<sup>[1]</sup>,以全球变暖为主要特征的气候变化已是不争的事实<sup>[2]</sup>,并已成为全球变化的重要内容之一。气温升高将加快水循环过程,引起水资源在时空上的重新分配,可能加剧水文极端事件发生的频率和强度,进而对流域和区域生态、水资源管理产生影响<sup>[3-4]</sup>。

海河流域是中国水资源最为紧张的地区,随着全

球气候变化和人类活动影响的加剧,1980 年以来海河流域水资源量大幅度衰减<sup>[5]</sup>。杨志勇等<sup>[5]</sup>以海河流域中受人类活动影响较小的伊逊河流域为对象,对气候变化对伊逊河流域水资源量的影响分析后认为,在以升温为主,降水变化存在很大不确定的情况下,伊逊河流域天然径流量可能将进一步衰减。袁飞等<sup>[6]</sup>通过对气候变化情景下海河流域水资源的变化趋势预测后认

收稿日期:2015-04-08

修回日期:2015-05-01

资助项目:国家自然科学基金资助项目(51409204);陕西省教育厅科学研究计划资助项目(15JK1473);西安科技大学博士启动金资助项目(2014QDJ039)

第一作者:史晓亮(1985—),男,陕西宝鸡人,讲师,研究方向:遥感与地理信息系统在水文学中的应用。E-mail:s\_xiaoliang@126.com

通信作者:杨志勇(1979—),男,湖南常德人,高级工程师,主要从事水文水资源、分布式水文模拟,气候变化对水资源影响等基础研究。

E-mail:yangzy@iwahr.com

为,未来气候情景下,即使海河流域降水量增加,年平均径流量仍将可能减少,海河流域的水资源将十分短缺。丁相毅等<sup>[7]</sup>将全球气候模式与分布式水文模型 WEPL 耦合分析了气候变化对海河流域水资源的影响,结果表明流域径流量呈减少趋势,未来气候变化条件下海河流域水资源管理将面临更加严峻的挑战。滦河是海河流域的四大水系之一,该区经济发达,人口稠密,用水量大,水资源系统适应气候变化的能力较低,是我国水资源系统最脆弱的地区之一<sup>[8]</sup>,未来气候变化将可能加剧滦河流域水资源短缺情势。因此,深入分析滦河流域水文过程对气候变化的响应规律,对于流域水资源管理和开发利用具有重要意义。

目前多采用气候模式与水文模型耦合的方法来研究气候变化对水文的影响。通常遵从“未来气候情景设计—水文模型—影响研究”的模式<sup>[9]</sup>。SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型是由美国农业部农业研究服务中心 (USDA-ARS) 于 20 世纪 90 年代早期开发的面向大中流域、长时间尺度的分布式水文模型<sup>[10]</sup>,目前已被国内外学者广泛应用于流域水文过程模拟,以及流域气候/土地利用变化的水文响应等方面<sup>[8,11]</sup>。因此,本文以滦河流域为研究区,综合考虑流域地形、土地利用和土壤等因素,构建 SWAT 分布式水文模型;根据已有气候观测成果,建立未来气候变化情景,进而应用 SWAT 模型分析不同气候变化情景下水文响应结果,以期水资源管理部门提供参考依据。

## 1 研究区概况

滦河是海河流域的四大水系之一,发源于河北省张家口地区的巴彦古尔图山北麓,流经河北省、内蒙古自治区以及辽宁省的 25 个市县区后,于河北省乐亭县兜网铺注入渤海湾。滦河全长 888 km,流域面积 44 750 km<sup>2</sup>,主要支流有伊逊河、武烈河、老牛河、瀑河、青龙河等。

滦河流域位于华北平原东北部,属典型的温带大陆性气候,夏季炎热多雨,春秋干旱少雨,冬季寒冷干燥。流域年均气温 5~12℃,多年平均降雨量为 400~700 mm,降水量年内主要集中在 6—9 月,占全年降水总量的 67%~76%。流域多年平均径流量为 46.94 亿 m<sup>3</sup>,但年内分配不均,年际丰枯变化悬殊,常出现连续丰水年和枯水年的异常现象。流域主要土地覆被类型为林地,占总面积的 40%左右,其次为草地和耕地。主要土壤类型为棕壤和褐土。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

本研究所用 DEM 为美国地质调查局的 SRTM 数据,分辨率为 90 m。土地利用数据来源于中国土地利用/覆被数据集,采用的是 1985 年,2000 年的 1:10 万数据。为保证本研究土地利用分类系统与 SWAT 模型一致,对获取的土地利用数据进行重分类,将其转换为 SWAT 模型能够识别的土地利用类型代码。

土壤类型分布数据根据 1:100 万土壤图矢量化获得。属性数据包括物理属性和化学属性数据库,由于本文主要针对径流量模拟,不涉及水质问题,所以主要确定土壤物理属性数据。通过查阅河北省土种志,以及采用美国农业部开发的土壤水特性计算程序 SPAW 等方式获取各土壤物理属性参数<sup>[12]</sup>。

气象数据采用流域内及周边的多伦、围场、丰宁、承德、遵化、青龙、乐亭 7 个气象站 1970—2010 年的逐日最高和最低气温、相对湿度、平均风速和日照时数,数据来源于中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.nmic.cn>)。日太阳辐射量根据童成立等建立的基于站点位置和日照时数的模拟方法估算得到<sup>[13]</sup>。

由于流域内 83 个雨量站实测降雨数据序列较短 (1970—1988 年),在一定程度上限制了该流域长时间尺度的分布式水文模拟。本文结合 7 个气象站点逐日降雨资料,利用反距离加权平均法,估算得到各雨量站 1989—2010 年的逐日降雨量<sup>[14]</sup>。

水文数据选取三道河子(滦河)、韩家营(伊逊河)、承德(武烈河)、下板城(老牛河)和滦县(滦河)5 个水文站 1970—2000 年的月还原径流数据用于模型率定和验证。

### 2.2 模型参数率定

SWAT 模型对于流域的划分基于最小集水面积阈值,本文中最小集水面积取 150 km<sup>2</sup>,将滦河流域划分为 174 个子流域。本研究地表径流估算采用 SCS 径流曲线数法,潜在蒸散发选择 Penman-Monteith 法,河道汇流演算采用变动存储系数法。

考虑到滦河流域内分布有许多大中型水库,以及引滦入津等调水工程,而本文旨在研究气候变化条件下自然产流过程的响应,为剔除水利工程的影响,本研究采用了 1970—2000 年的月还原径流对模型进行率定和验证。其中 1970—1972 年作为模型的初始条件形成期,选取 1973—1988 年 5 个水文站的月还原径流

数据进行模型率定,以 1985 年土地利用数据作为输入;采用率定后的参数,应用 1989—2000 年水文气象数据进行模型验证,以 2000 年土地利用数据为输入。本文采用常用的决定系数( $R^2$ )、Nash-Sutcliffe 效率系数( $E_m$ )和相对误差( $E_R$ )3 个指标评价模型在研究区的适用性。一般认为, $R^2$  越高, $E_m$  越大, $|E_R|$  越小,表明模拟效果越好,当  $R^2 > 0.6$ ,  $E_m > 0.5$ ,  $|E_R| < 15\%$  时,即认为模型在研究区适用<sup>[8,15,16]</sup>。

本文通过敏感性分析得到影响滦河流域径流模拟精度的 7 个重要参数并对其进行率定,分别为径流曲线数(CN2)、土壤蒸发补偿系数(ESCO)、基流消退系数(ALPHA\_BF)、浅层地下水再蒸发系数(RE-VAPMN)、主河道河床有效的水力传导度(CH\_K2)、土壤可利用有效水量(SOL\_AWC)、土壤饱和导水率(SOL\_K)。参数率定过程中遵循先上游后下游,先调整水量平衡,再调整过程的原则<sup>[8]</sup>。首先采用瑞士联邦水生物科学与技术研究院开发的 SWAT-CUP 中的 SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting Version 2) 优化算法进行自动校准,进而结合手动校准进行模型参数优化。

2.3 气候变化情景

国内外常用的气候变化情景设定主要有 2 种方法。一是增量情景,即根据区域未来气候可能的变化,人为任意给定降水量、气温等气候要素的变化值,或者不同要素变化的组合<sup>[17-19]</sup>。另一种是基于 GCMs(大气环流模型)来模拟不同温室气体排放情景下输出的气候情景。尽管 GCM 模型能够模拟复杂的物理过程,将地球辐射平衡与大气环流和水文循环联系起来,并能够较准确的模拟气候因子,但是各种 GCM 模型对相同的 CO<sub>2</sub> 增量方案,对气温和降水的预测结果差异很大,特别是对降水的增减预测可能是完全相反的结果,气候变化预测具有很多不确定性<sup>[20]</sup>。

众多学者对海河流域气候变化的预测结果一般认为,未来气温将持续升高,具体的升温幅度有一定差

别,相比 2000 年 2030 年升温在 1.0~2.8℃,2050 年升温约 2.3~3.3℃;而关于降水变化趋势与幅度的预测则存在分歧,一般认为到 2050 年海河流域降水会有所增加,幅度在 3%~7%,但是 2030 年降水可能减少,也可能增加,变化幅度在-1%~3%<sup>[5]</sup>。因此,综合多位学者对海河流域气候变化的预测成果,本文采用增量情景法建立滦河流域未来气候变化情景,具体设置为:降水量( $P$ )变化-1%,+3%,+5%和不变;气温( $T$ )分别在原来的基础上增加 1℃,2℃,3℃和不变,共生成 16 种气候情景组合。

3 结果与分析

3.1 SWAT 模型在滦河流域径流模拟中的适用性分析

表 1 为各水文站径流模拟的评价结果,可以看出,率定期各水文站均达到模拟精度的要求,除三道河子站外,其他水文站  $R^2$  和  $E_m$  均大于 0.8,反映了模型对径流趋势的模拟能力较好。韩家营、承德和下板城 3 个主要支流水文站的月径流模拟结果小于实测值,而三道河子与滦县水文站的模拟结果略微偏高,但各站的相对误差均不超过±5%。由于 1988 年之后缺少雨量站降雨资料,本研究采用了基于气象站资料的降雨插补值,但是由于在部分年份无法有效描述流域降雨的高值信息,导致验证期各站模拟值均小于实测值,且  $R^2$  和  $E_m$  有所降低,但结果均达到了模拟精度的要求,月径流拟合结果较好(图 1)。模拟结果表明应用 SWAT 模型进行滦河流域的径流模拟是可行的,适用于研究区气候变化的水文响应研究。

表 1 模型月径流模拟结果评价

地点	率定期(1973—1988 年)			验证期(1989—2000 年)		
	$R^2$	$E_m$	$E_R/\%$	$R^2$	$E_m$	$E_R/\%$
韩家营	0.89	0.89	-3.30	0.73	0.66	-1.09
承德	0.86	0.85	-1.34	0.71	0.71	-7.32
下板城	0.87	0.87	-5.82	0.68	0.62	-2.75
三道河子	0.78	0.72	1.05	0.71	0.62	-12.01
滦县	0.93	0.93	3.40	0.92	0.91	-2.59

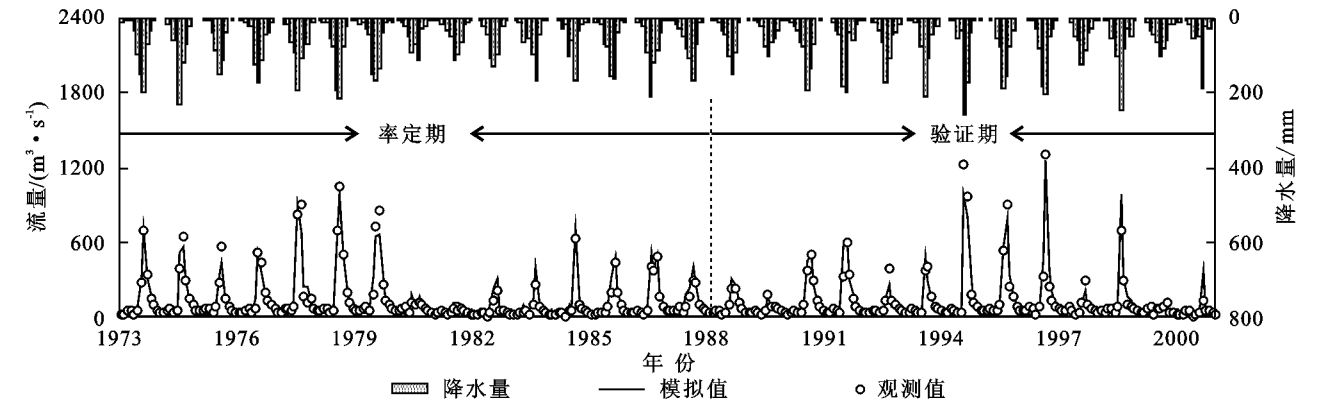


图 1 滦县站月径流模拟值和实测值对比

3.2 滦河流域气候变化的水文过程响应分析

以 1970—2010 年的历史系列为基准,根据 16 种气候变化情景生成不同的气候系列数据,均采用 2000 年的土地利用数据,基于已经过校验的 SWAT 模型模拟各种气候情景下滦河流域水文过程,将不同情景下模拟得到的平均径流深、蒸发量等主要水文要素与现状气候条件下的模拟结果进行对比,进而分析气候变化对滦河流域水文过程的影响。

从表 2 和表 3 可以看出,滦河流域未来的径流深和蒸发量变化存在较大的不确定性,在设定的不同情景下滦河流域径流深的变化幅度为-11.53%~14.68%,蒸发量的变化幅度为-0.48%~5.20%,不同气候变化情景下径流和蒸发量变化差异明显。径流增加最多的气候情景是温度不变,降水增加 5%,此时径流量比现状气候条件下增加 14.68%;实际蒸发增加最多的气候情景是温度增加 3℃,降水增加 5%,此时蒸发量比现状气候条件下增加 5.20%。表明未来气候情景下气温升高,降水变化将会导致滦河流域水资源量的重新分配。在降水量不变的情况下,气温升高将使降水更多的转化为蒸发,增加幅度为 0.65%~2.35%,而形成的径流将减少 2.59%~14.68%。而在气温保持不变时,降水的增加将使径流和蒸发均有所增加,增加幅度分别为 8.66%~9.09%和 1.49%~2.47%,径流变化幅度明显大于实际蒸发。由以上分析可以看出,滦河流域气温升高将会导致蒸发量增加、径流减少。在以升温为主、降水变化存在很大不确定性的情况下,滦河流域径流量可能进一步衰减。

此外,当降水保持不变,气温增加 3℃,径流减少 9.09%;而当气温保持不变,降水增加 5%,径流将增加 14.68%。因此,降水对径流的影响要大于温度,表明滦河流域未来降水的变化是影响水资源变化的主要因素。

表 2 不同气候变化下的平均径流深变化 %

气温 变化 $T(^{\circ}\text{C})$	$P_{-1}$	$P_0$	$P_{+3}$	$P_{+5}$
$T$	-2.73	0	8.66	14.68
$T_{+1}$	-5.23	-2.59	5.83	11.70
$T_{+2}$	-9.12	-6.60	1.39	6.98
$T_{+3}$	-11.53	-9.09	-1.34	4.08

注:P 表示降水,角标表示变化幅度(%),下表同。

3.3 滦河流域地表径流对于气候变化的空间响应特征

为进一步从空间尺度上分析流域未来气候变化对地表径流的影响,本研究以子流域为分析单元,分

别计算了径流变化最显著的气候情景( $P_{+5}$ ,  $T$ )与现状气候条件两种情景下 1973—2010 年的年均地表径流,得到两种气候情景下年均地表径流变化的空间分布(图 2)。

表 3 不同气候变化下的平均月实际蒸发变化 %

气温 变化 $T(^{\circ}\text{C})$	$P_{-1}$	$P_0$	$P_{+3}$	$P_{+5}$
$T$	-0.48	0	1.49	2.47
$T_{+1}$	0.14	0.65	2.20	3.22
$T_{+2}$	1.16	1.69	3.35	4.43
$T_{+3}$	1.80	2.35	4.07	5.20

从图 2 可以看出,未来降水增加将导致整个流域年均地表径流发生不同程度的增加。其中流域上游的多伦县、沽源县,中游的围场县等地的年均地表径流增加幅度相对较小。分析原因在于上述地区的主要土地利用类型为林地和草地,由于冠层截留部分降水,以及枯枝落叶层的影响,导致增加的降水转化为地表产流的比例较小,因此地表径流增加幅度相对较小。而除此之外的流域其他大部分地区人类活动影响显著,主要土地利用类型为耕地和建设用地。相对于林草地,耕地和建设用地的下层土壤相对紧实,入渗率较低,从而增加了土壤保水性,使得降水在土壤剖面能够更快的饱和<sup>[21]</sup>,产流能力较强,使得由于气候变化增加的降水转化为地表径流的比例增大,从而导致年均地表径流增加幅度较大,尤其是流域下游的迁西县以及迁安县等地增加幅度更为显著。

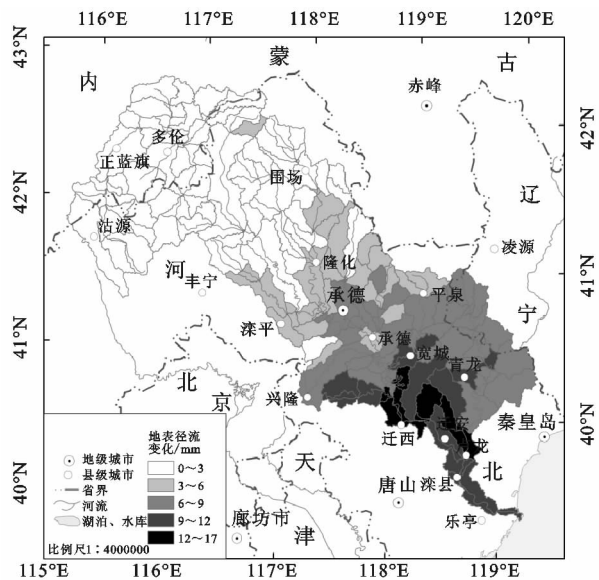


图 2 滦河流域年均地表径流变化空间分布

4 结论

(1) 滦河流域 SWAT 模型在率定期模拟效果较

好,但是由于1988年之后缺少详细的雨量站降雨信息,使得验证期部分水文站的模拟精度有所下降,但均达到了模拟精度的要求,月径流模拟结果可以应用于气候变化的水文响应分析。

(2) 在流域降水量不变的情况下,气温升高将使蒸发增加幅度为 $0.65\% \sim 2.35\%$ ,而径流将减少 $2.59\% \sim 9.09\%$ 。在气温保持不变时,降水增加将导致径流和蒸发均有所增加,增加幅度分别为 $8.66\% \sim 14.68\%$ 和 $1.49\% \sim 2.47\%$ 。因此,滦河流域气温升高将会导致蒸发量增加、径流减少。在以升温为主、降水变化存在很大不确定性的情况下,滦河流域径流量可能进一步衰减。

(3) 在未来降水增加的情况下,滦河流域年均地表径流均呈增加趋势,且空间差异显著,尤其是流域下游的土地利用类型以耕地和建设用地为主,使得增加的降水转化为地表径流的比例增大,从而导致年均地表径流增加幅度较大,尤其是流域下游的迁西县以及迁安县等地增加幅度更为显著。

#### 参考文献:

- [1] 《气候变化国家评估报告》编写委员会. 气候变化国家评估报告[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [2] IPCC. Climate change 2007: Synthesis report [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] 王国庆,王兴泽,张建云,等. 中国东北地区典型流域水文变化特性及其对气候变化的响应[J]. 地理科学, 2011, 31(6): 641-646.
- [4] 张淑兰,于澎涛,张海军,等. 气候变化对干旱缺水地区中尺度流域水文过程的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(10): 70-74.
- [5] 杨志勇,于赢东,王建华,等. 气候变化对伊逊河流域水资源量的影响[J]. 水科学进展, 2011, 22(2): 175-181.
- [6] 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[J]. 水利学报, 2005, 36(3): 274-279.
- [7] 丁相毅,贾仰文,王浩,等. 气候变化对海河流域水资源的影响及其对策[J]. 自然资源学报, 2010, 25(4): 604-613.
- [8] 张利平,曾思栋,王任超,等. 气候变化对滦河流域水文循环的影响及模拟[J]. 资源科学, 2011, 33(5): 966-974.
- [9] 王顺久. 全球气候变化对水文与水资源的影响[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(5): 223-227.
- [10] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: model development [J]. Journal of American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [11] 梁小军,江洪,朱求安,等. 岷江上游流域不同土地利用与气候变化的径流响应研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(5): 30-33.
- [12] Saxton K E, Rawls W J, Romberger J S, et al. Estimating generalized soil-water characteristics from texture [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(4): 1031-1036.
- [13] 童成立,张文菊,汤阳,等. 逐日太阳辐射的模拟计算[J]. 中国农业气象, 2005, 26(3): 165-169.
- [14] 史晓亮,杨志勇,绪正瑞,等. 降雨输入不确定性对分布式流域水文模拟的影响研究:以武烈河流域为例[J]. 水文, 2014, 34(6): 26-32.
- [15] Kumar S, Merwade V. Impact of watershed subdivision and soil data resolution on SWAT model calibration and parameter uncertainty [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2009, 45(5): 1179-1196.
- [16] 庞靖鹏,刘昌明,徐宗学. 密云水库流域土地利用变化对产流和产沙的影响[J]. 北京师范大学学报:自然科学版, 2010, 46(3): 290-299.
- [17] 张利平,陈小凤,赵志鹏,等. 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.
- [18] 于磊,顾鑫,李建新,等. 基于 SWAT 模型的中尺度流域气候变化水文响应研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(4): 152-154.
- [19] 张建云,王国庆,贺瑞敏,等. 黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 153-158.
- [20] 贾仰文,高辉,牛存稳,等. 气候变化对黄河源区径流过程的影响[J]. 水利学报, 2008, 39(1): 52-58.
- [21] 史晓亮,杨志勇,严登华,等. 滦河流域土地利用/覆被变化的水文响应[J]. 水科学进展, 2014, 25(1): 21-27.