HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.02.008

李丹,冯民权, 荀婷. 气候变化对汾河(运城段)径流影响模拟[J]. 水利水运工程学报, 2016(2): 54-61. (LI Dan, FENG Min-quan, GOU Ting. Simulation of climate change impacts on runoff of Yuncheng reach of Fenhe River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(2): 54-61.)

气候变化对汾河(运城段)径流影响模拟

李 丹,冯民权, 苟 婷

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048)

摘要:将分布式水文模型——SWAT模型应用于汾河(运城段)的径流模拟,以期为流域水资源管理、优化配置提供科学依据。首先,分析模型对研究区域的适用性,并在现有资料基础上对流域径流进行模拟研究,从时间、空间两个方面共同诠释了流域内径流与降水的关系;其次,根据流域未来气候可能变化,由增量情景法设定了不同气候情景,模拟未来气候情景下径流的变化趋势以及径流量的年内变化特征。结果表明:①研究区域内径流在时空分布上均与降水量分布吻合;②研究区域内径流量变化与气温变化呈负相关关系,与降水量变化呈正相关关系,且降水量变化对研究区域径流量产生的影响比温度变化产生的影响大;③径流量的年内分布呈季节性特点,汛期(7—10月份)最大,枯水期(11月至翌年3月份)最小;④未来气候变化趋势下,研究区域径流量将呈相应增加趋势,在气温升高0.5℃和降水量增加10%的情景下,河津水文站的径流量将增加1.29亿 m³。

关 键 词: SWAT模型; 径流; 气候变化; 汾河

中图分类号: TV12 文献标志码: A 文章编号:1009-640X(2016)02-0054-08

河川径流是气候条件与流域下垫面综合作用下的产物,直接受气候因素的影响^[1],研究表明气候变化在较长时间尺度上是流域水文水资源变化的一个主要驱动因素^[2]。1880—2012 年间全球温度上升了0.85°C,全球变暖使水文循环过程加快,使水资源在时空上进行了重新分布^[3]。气候变化可能对水资源短缺、洪涝灾害等水系统产生重要影响。因此,研究流域径流对气候变化的响应已成为21世纪的热点问题。

国内外对于气候变化与径流关系的研究方法主要有对比流域实验法、统计分析法和模型模拟法等^[4]。其中,在研究径流对气候变化的响应中多采用对比流域试验法,但它不能用于地质地貌差异较大的大尺度流域中;统计分析法的优点是可以利用长期水文气象数据来研究径流变化规律,进而推求其变化趋势,但却忽略了气候变化与土地利用变化对流域水文的影响,因而其应用也受到了一定限制。WATFLOOD^[5],IHDM^[6],SWAT^[7]等具有较强物理基质的分布式水文模型,因其既考虑了下垫面条件又能反映水文要素的空间变化,所以被广泛应用于各种流域的水文径流模拟中。刘贵花等将 mACRES 模型应用于三江平原挠力河上游,得出气候要素是导致径流变化的主要原因^[8]。M. A. Bann-warth 等也将 SWAT 模型应用于东南亚热带的一个陡峭山区流域,尽管受气候差异的影响,但径流模拟也取得了合理满意的结果^[9]。金君良等以黄河源区为研究对象,利用 10 套情景数据对分布式 VIC 模型驱动,对未来径流和土壤含水量的可能变化进行了分析^[10]。

本研究将分布式水文模型——SWAT模型应用于汾河(运城段)的径流模拟中,分析了SWAT模型在研究区域的适用性。首先,在现有资料基础上对流域径流进行模拟研究,从时间、空间两个方面共同诠释了流

收稿日期: 2015-05-12

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20126118110015);陕西省科技统筹创新工程重点实验项目(2013SZS02-Z01);山西省水利技术研究项目(2013年)

作者简介: 李 丹(1990—), 女, 陕西西安人, 硕士研究生,主要从事水环境模拟与预测研究。E-mail: 364476272@ qq.com 通信作者: 冯民权(E-mail: mqfeng@ xaut.edu.cn)

域内径流与降水的关系;其次,根据流域未来气候可能变化,由增量情景法设定不同气候情景,模拟未来气候情景下径流的变化趋势及径流量变化的年内分布特征,为流域的水资源管理、优化配置提供科学可靠依据。

1 资料及方法

1.1 研究区域概况

汾河流域地处黄土高原生态危急区,且贯穿山西工矿区,具有独特的"水煤共存系统",运城处于汾河最下段。研究区域自新绛县南梁入境至万荣县庙前汇入黄河,总流长 109 km,流域面积2 165 km²,流域年均降水量 537 mm,年际变化较大,且年内分配不均匀,汛期和枯水期界限分明,年头与年尾降水量最少,7—9月3个月降水集中。流域多年水面蒸发能力在 950~1 300 mm间。图 1 给出了研究区域的边界、水系及 DEM 高程。

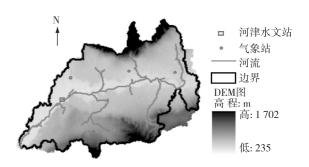


图 1 研究区域边界、水系及 DEM 高程 Fig. 1 Boundary, water system and DEM

elevation of study area

1.2 SWAT 模型概述及原理

SWAT模型有3个子模型,分别为土壤侵蚀、水文

过程和污染负荷子模型。其中,污染负荷子模型可以模拟不同形态的氮的转化过程,包括物理、化学及生物过程[11]。

(1)溶解态 N 污染负荷模型。溶解态 N 在水体中的迁移主要受地表径流、渗流以及侧向流影响。自由水中溶解态 N 的浓度计算公式如下:

$$\rho_{\text{NO}_{3,m}} = \frac{\rho_{\text{NO}_{3\text{ly}}} \exp\left[\frac{-w_{\text{m}}}{(1 - \theta_{e}) w_{\text{s,ly}}}\right]}{w_{\text{m}}}$$
(1)

式中: $\rho_{NO_3,m}$ 为自由水中溶解态 N 的浓度(以 N 计)(kg/mm); w_m 为土壤中的自由水量(mm); ρ_{NO3ly} 为土壤中的溶解态 N 量(以 N 计)(kg/mm²); θ_e 为孔隙度; $w_{s,ly}$ 为土壤饱和含水量。

(2)有机 N 污染负荷模型。有机 N 一般吸附在土壤颗粒上,随径流而迁移,这种形式的 N 负荷跟土壤流失量紧密关联。

$$\rho_{\text{orgN}_{\text{surf}}} = 0.001 \rho_{\text{orgN}} \frac{m}{A_{\text{loc}}} \varepsilon_{\text{N}}$$
 (2)

式中: $\rho_{\text{orgN}_{\text{surf}}}$ 为有机 N 流失量(以 N 计)(kg/hm²); m 为土壤流失量(t); ρ_{orgN} 为表层(10 mm)土壤中有机 N 浓度(以 N 计)(kg/t); A_{orgN} 为水文响应单元的面积(hm²); ε_{N} 为 N 富集系数,即随土壤流失的有机 N 浓度与土壤表层有机 N 浓度的比值。

(3)溶解态 P 污染负荷模型。溶解态 P 主要通过扩散作用实现在土壤中的迁移,扩散指离子由于浓度梯度作用在微小尺度下(1~2 mm)引起的溶质迁移,因为溶解态 P 不活跃,故土壤表层(10 mm)由地表径流以溶解态形式带走的 P 比较少,溶解态 P 的计算式如下:

$$P_{\text{surf}} = \frac{P_{\text{sol,surf}} Q_{\text{surf}}}{\rho_{\text{b}} h_{\text{surf}} k_{\text{d,surf}}} \tag{3}$$

式中: P_{surf} 为地表径流引起的溶解态 P 的流失量(以 P 计)(kg/hm²); $P_{\text{sol,surf}}$ 为土壤表层(10 mm)中溶解态 P 的浓度(以 P 计)(kg/hm²); ρ_{b} 为土壤容质密度(mg/m³); h_{surf} 为表层土壤的深度(mm); $k_{\text{d,surf}}$ 为土壤 P 的分配系数,表层(10 mm)中溶解态 P 的浓度值与地表径流中溶解态 P 的浓度值之比。

(4)吸附态 P 污染负荷模型。吸附态 P 一般吸附在土壤颗粒上,通过径流而迁移,这种形式的 P 负荷跟土壤流失量紧密关联。

$$m_{\rm P_{\rm surf}} = 0.001 \rho_{\rm P} \frac{m}{A_{\rm hru}} \varepsilon_{\rm P} \tag{4}$$

式中: $m_{P_{surf}}$ 为有机 P 流失量(以 P 计)(kg/hm²); ρ_P 为表层(10 mm)土壤中有机 P 浓度(以 P 计)(kg/t); m 为土壤流失量(t); A_{hrrt} 为水文响应单元的面积(hm²); ε_P 为 P 富集系数。

1.3 SWAT 模型数据库建立

本研究采用具有较强物理机理的分布式水文模型——SWAT 对研究区域进行径流模拟研究。模型的成功运行需要大量属性数据和空间数据。空间数据有 DEM 图、土壤类型图以及土地利用类型图;属性数据有水文数据、气象数据等。

- (1)空间数据。DEM 数据是从地理空间数据云下载的 30 m 分辨率的 SRTM 数据,利用 AreGIS 对 DEM 图进行裁剪,投影变化处理,流域边界划分等预处理,最终生成 SWAT 所需要的数据类型(图 1)。土壤类型图是从寒区旱区科学数据中心下载的 1:100 万的全国土壤类型图,利用 AreGIS 裁剪出研究区域的土壤类型图。土地利用类型数据则是从土地局获得的 1:5万的运城市各县区的土地利用类型矢量数据,利用 AreGIS对其进行拼接,并转化成 SWAT 所需的格栅格式。
- (2)属性数据。SWAT 所需水文数据来自于研究区域内河津水文站 2001—2010 年水文资料。气象数据包括气象站、雨量站的位置、降雨量、气温、太阳辐射量等数据,采用万荣、河津、稷山以及新绛四个气象站的资料。在相关平台下将这些资料转化为 SWAT 模型所需要的格式。

1.4 敏感性分析

采用 LH-OAH 敏感性分析方法对模型进行敏感性分析,其优点是确保所有参数在其取值范围内均被采样,并且明确确定了哪一个参数改变了模型的输出,减少了需要调整的参数数目,提高了计算效率。

对模型进行敏感性分析,选出对模拟结果影响较大的8个敏感性参数,8个参数的敏感性排序见表1。

2 模型率定与验证

由于模型自带的算法(SCE-UA 算法)率定结果并不理想,而且对于一般的计算规模(子流域数目在 100~200

表 1 研究区域敏感性参数排序

Tab. 1 Sequence of sensitivity parameters of study area

参数名称	参数意义	参数敏感性排序
CN2	SCS 径流曲线数	1
$ALPH_BF$	基α系数	2
ESCO	土壤蒸发补偿系数	3
SOL_AWC	土壤可利用水量	4
EPCO	植被蒸腾补偿系数	5
CH_K2	河道河床有效水力传导度	6
SOL_Z	土壤深度	7
BLAI	最大潜在叶面指数	8

之间),模型参数率定需要上千次运算才能使模型结果收敛稳定,耗时时间长。本研究采用一种综合优化和梯度搜索方法(SUFI-2 算法^[12]),对模型进行参数率定和验证,考虑到 SUFI-2 算法不仅具有全局搜索功能,同时还具有分析输入数据、模型结构、参数及实测数据的不确定性等优点,希望能够获得适用于研究区域内模型参数率定更高效、精度更好的方法。利用河津水文站断面 2005—2010 年实测径流量对模型进行参数率定。

率定结果显示,校准期与验证期的相对误差 Re 分别为 9%和 8%,均在 10%以内;模拟相关性系数 R² 分别为 0.88 和 0.85;纳什系数 Ens 分别为 0.87 和 0.84,以上参数均满足率定要求。可以看出 SUFI-2 算法对于模型精度的提高作用有效,其结果模拟值与实测值吻合度较高,所以,相对于模型自带的 SCE-UA 算法,SUFI-2 算法更加适用于本研究区域这类西北干旱地区的河流,可以用于研究区域径流的模拟研究。

3 研究区域径流时空分布特征

3.1 研究区域径流时间分布规律

对研究区域径流进行模拟之后,选取3个水文年,丰水年2003年、平水年2005年、枯水年2007年的逐月模拟数据,对其降水量及径流量进行统计(表2),并分析流域内径流量与降水量的关系及时间分布规律(图2)。

表 2 研究区域内降水量、径流量年内统计

Tab. 2 Statistics of precipitation and runoff in hydrological year

年份 一		降水量		径流量			
	年降水量/mm	7—10 月降水量/mm	百分比/%	年径流量/mm	7—10 月径流量/mm	百分比/%	
2003	798	603	75. 6	306	218	71. 3	
2005	445	282	63. 3	223	146	65. 4	
2007	395	259	64. 9	179	118	65. 8	

由图 2 可见,径流量丰水年>平水年>枯水年,且各水文年7—10 月份径流量均占到全年径流量的 65%以上。这是因为每年7—10 月份为汛期,这段时期的降雨量占全年总降雨量的 60%以上。研究区域内径流量与降水量的年内分布一致,7—10 月份汛期降水量较大,产生的径流相应较大,这说明流域内降水是径流变化的一个主要驱动力。



图 2 降水量、径流量年内分布

3.2 研究区域内径流空间分布特征

Fig. 2 Distribution of precipitation and runoff in hydrological year

选取3个水文年,丰水年2003年、平水年2005年、枯水年2007年的逐月模拟数据,对流域径流的空间分布特征进行分析。图3给出了各水文年降水量与径流量的空间分布。

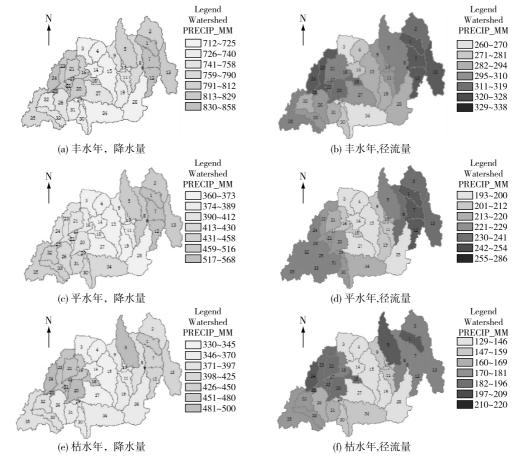


图 3 降水量与径流量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of precipitation and runoff in hydrological year

由图 3 可见,各水文年的径流量空间分布均与降水量空间分布基本一致,降水量大的子流域径流大,降水量小的子流域径流量小,这说明径流量的大小与降水密切相关。研究区域内径流量较大的是河津跟新绛县部分子流域,而稷山县的径流量则最小。

研究区域内径流不管是在时间还是空间分布上都与降水量的分布有着密切关系。降水量大的汛期径流 大,降水量较大的子流域相应的径流量也大。

4 气候变化对研究区域径流变化的影响

国内外常用的气候变化情景设定方法有两种:增量情景法、基于 GCM(大气环流模型)输出的气候变化情景[13]。增量情景法指的是,根据研究区域气候可能的变化,人为假定升高降低的温度、降水量上升、下降的量或者对降水温度进行两两组合,构成气候变化的假想情景。虽然 GCM 模型法能够预测气候过程,但气候变化的预测有很多不确定性。而不同 GCM 模型在同样增量的 CO_2 方案情景下,对温度、降水的预测有很大差异,尤其对降水的增减预测甚至有时会出现相反结果。

联合国政府气候变化专门委员会 IPCC 第五次评估报告《气候变化 2013:自然科学基础》提出,2016—2035 年间全球地表温度可能提升(0.3~0.7) $^{\circ}$,降水也会在不同地区出现不同程度的增加趋势,到 2050 年可能增加 5%~7%。秦大河也在《未来 100 年全球气候将继续变暖》中提到,到 2020—2030 年全国气温将上升 1.7 $^{\circ}$,到 2050 年全国气温将上升 2.2 $^{\circ}$,变暖幅度由南向北增加,不少地区降水也会出现增加趋势[14]。

4.1 气候变化对年径流的影响

基于以上预测变化趋势,本研究采用增量情景法建立的未来气候变化情景为:①气温分别在原来基础上设置为减 1.0℃、减 0.5℃、不变、增加 0.5℃、增加 1.0℃;②降水量分别在原有历史数据基础上减 20%、减 10%、保持不变、增加 10%、增加 20%。将不同气温、降水变化组合,形成不同气候情景(表 3)。

利用河津水文站 2001—2010 年水文资料,通过 SWAT 模型 对表 3 中不同气候情景进行径流模拟,得到研究区域内河津水文站不同情景下的径流量及径流变化量(表 4)。当气温与降水量均不变时,模拟径流量的变化量为 0.02,并不是 0,这是因为模型模拟结果与实测值有一定误差,但在可接受范围内。分析

表 3 研究区域不同气候情景

Tab. 3 Different climate scenarios of study area

气温/℃	降水量						
-(fiii/ C	0. 8P	0. 9P	P	1. 1 <i>P</i>	1. 2P		
T-1.0	S11	S12	S13	S14	S15		
T=0.5	S21	S22	S23	S24	S25		
T	S31	S32	S33	S34	S35		
T+0.5	S41	S42	S43	S44	S45		
T+1.0	S51	S52	S53	S54	S55		

这 25 种气候情景的年径流结果,分别绘出研究区域内河津水文站降水量不变时年径流与气温变化的关系(图 4),以及气温不变时年径流量与降水量的关系(图 5)。

表 4 河津水文站不同气候情景下径流量

Tab. 4 Runoff of different climate scenarios of Hejin hydrological station

亿 m³

降水量 -	径流量				径流变化量					
	T-1.0	T-0.5	T	T+0.5	T+1.0	T-1.0	T-0. 5	T	T+0. 5	T+1.0
0. 8P	1. 88	1. 61	1. 44	1.41	1. 13	-1.85	-2. 12	-2. 29	-2. 32	-2. 6
0.9P	3. 14	2. 7	2.41	2. 38	2. 11	-0.59	-1.03	-1.32	-1.35	-1.62
P	4. 59	3. 96	3.73	3.65	3. 29	0.86	0. 23	0.02	-0.08	-0.44
1. 1 <i>P</i>	6. 3	5. 54	5. 18	5. 02	4. 58	2. 57	1.81	1. 45	1. 29	0. 85
1. 2P	7.84	7. 3	6.86	6. 63	6. 21	4. 11	3.57	3. 13	2. 9	2. 48

由图 4 和 5 可以看出:①研究区域内河津水文站年径流量随降水量增加而增加,随气温增加而减少;②研究区域内河津水文站年径流量与降水量变化呈正相关关系,而与气温变化呈负相关关系;③降水量每变化10%比气温变化 0.5℃对径流量的变化更大。

因而在未来气温与降水均会相应增加的趋势下,研究区域径流量会呈现增加趋势,在气温增加 0.5℃、

降水量增加 10%的情景下,河津水文站的径流量将会增加 1.29 亿 m3。

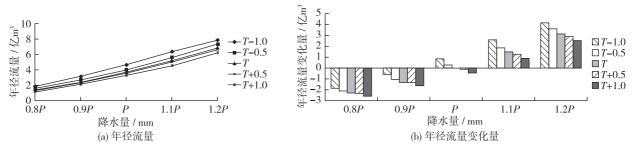


图 4 气温不变时河津水文站年径流量与降水量关系

Fig. 4 Relationships between annual runoff and precipitation at Hejin hydrological station during constant temperature

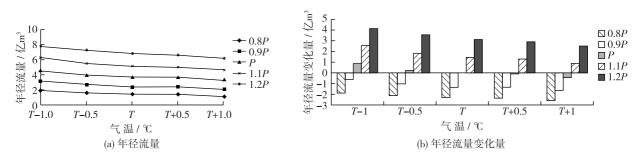


图 5 降水量不变时河津水文站年径流量与气温的关系

Fig. 5 Relationships between annual runoff and temperature at Hejin hydrological station during constant precipitation

4.2 降水量变化对月均径流的影响

根据研究区域内河津水文站 2001—2010 年逐月水文资料,利用率定好的 SWAT 模型分别模拟年降水量增加 20%、增加 10%、减少 10%、减少 20%这 4 种情景下径流量,径流变化率结果如图 6。

可见:①不同降水量条件下,月径流量的变化趋势相同;②1—3月、11—12月是一年中的枯水期,这一时期月径流变化与降水量的变化大小比较接近;③6—9月的月径流变化率全年最大,主要因为这一时段属于汛期,降水量占全年降水量的60%以上;④4月,5月,10月属于过渡期,径流量变化大于枯水期小于汛期。

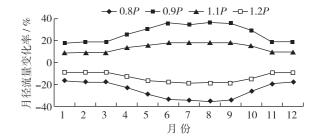


图 6 不同降水量情景下月径流量变化率

Fig. 6 Changes in monthly runoff under different precipitation scenarios

5 结 语

- (1)研究区域内径流在时间与空间分布上均与降水量分布吻合,这说明流域内降水量的时空分布与变化对径流有直接影响。
- (2)研究区域内径流量的变化与气温变化呈负相关关系,与降水量变化呈正相关关系,且降水量变化对研究区域径流量的影响比温度变化产生的影响大。
 - (3)研究区域内径流变化量随降水量呈现汛期、过渡期及枯水期的季节性变化。
- (4)未来气候变化趋势下,研究区域径流量将呈现相应增加的趋势,在气温增加 0.5 ℃、降水量增加 10 % 的情景下,河津水文站的径流量预计将会增加 1.29 亿 m^3 。

研究区域水资源管理与调配的依据是径流量大小、径流量的变化情况等。基于上面的研究,研究区域内 径流量的季节性变化和未来流域径流将增加的趋势,希望可以为研究区域的水资源管理提供可靠的依据。 同时由于非点源污染与径流变化有直接关系,也期望可以为非点源变化情况的研究提供一定参考依据。

参考文献:

- [1] 赵阳, 余晓新, 郑江坤, 等. 气候和土地利用变化对潮白河流域径流变化的定量影响[J].农业工程学报,2012,28(22): 252-260.(ZHAO Yang, YU Xiao-xin, ZHENG Jiang-kun, et al. Quantitative effects of climate variations and land-use changes on annual stream flow in Chaobai River basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 (22): 252-260. (in Chinese))
- [2] 姜德娟,李丽娟,侯西勇,等. 洮儿河流域中上游水循环要素变化及其原因[J]. 地理研究,2009,28(1):55-64,275. (JIANG De-juan, LI Li-juan, HOU Xi-yong, et al. Variations in the hydrological cycle components and their influencing factors in the middle and upper reaches of Tao'erhe River basin[J]. Geographical Research, 2009,28(1):55-64, 275.(in Chinese))
- [3] FURAT A M, MIKLAS S, DIMITRIS T. Sensitivity of surface runoff to drought and climate change: application for shared river basins [J]. Water, 2014, 6(10): 3033-3048.
- [4] 郭军庭,张志强,王盛萍,等. 应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响[J]. 生态学报,2014,34 (6):1559-1567.(GUO Jun-ting, ZHANG Zhi-qiang, WANG Sheng-ping, et al. Appling SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern China[J]. Acta Ecology Sinica, 2014,34(6): 1559-1567.(in Chinese))
- [5] 吕雁翔,李致家,王秀庆. WATFLOOD 模型的应用分析[J]. 水力发电, 2014, 40(3):16-19.(LV Yan-xiang, LI Zhi-jia, WANG Xiu-qing. Analysis of the application of WATFGOOD model[J]. Water Power, 2014, 40(3):16-19.(in Chinese))
- [6] 齐伟,张弛,初京刚,等. Sobol' 方法分析 TOPMODEL 水文模型参数敏感性[J]. 水文,2014,34(2): 49-54.(QI Wei, ZHANG Chi, CHU Jin-gang, et al. Sensitivity analysis of TOPMODEL hydrological model parameters based on Sobol' method[J]. Journal of China Hydrology, 2014,34(2): 49-54.(in Chinese))
- [7] 李佳,张小咏,杨艳昭. 基于 SWAT 模型的长江源土地利用/土地覆被情景变化对径流影响研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3):119-124,128, 301.(LI Jia, ZHANG Xiao-yong, YANG Yan-zhao. SWAT model of runoff study under different land use land cover scenarios in source region of the Yangtze River[J]. 2012, 19(3): 119-124, 128, 301.(in Chinese))
- [8] 刘贵花,栾兆擎,阎百兴,等.三江平原挠力河上游径流演变趋势及其驱动因素[J].地理科学,2011,31(8):952-957.(LIU Gui-hua, LUAN Zao-qing, YAN Bai-xing, et al. Tendency and driving forces of runoff changes for upper stream of Naoli River in the Sanjiang Plain[J]. Scientia Geography Sincia,2011,31(8):952-957.(in Chinese))
- [9] BANNWARTH M A, HUGENSCHMIDT C, SANGCHAN W, et al. Simulation of stream flow components in a mountainous catchment in northern Thailand with SWAT, using the ANSELM calibration approach[J]. Hydrological Processes, 2015,29(6): 1340-1352.
- [10] 金君良,王国庆,刘翠善,等.黄河源区水文水资源对气候变化的响应[J].干旱区资源与环境,2013,27(5):137-143.(JIN Jun-liang, WANG Guo-qing, LIU Cui-san, et al. Responses of hydrology and water resources to the climate change in the Yellow River source region [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2013,27(5):137-143.(in Chinese))
- [11] 郝芳华,程红光,杨胜天. 非点源污染模型—理论方法与应用[M]. 北京:中国环境科学出版社,2006.(HAO Fang-hua, CHENG Hong-guang, YANG Sheng-tian. Non-point source pollution model-theory and application [M]. Beijing: China Environmental Science Press[M]. 2006.(in Chinese))
- [12] 刘睿,霍艾迪,王菊翠,等. 基于 SUFI-2 算法的 SWAT 模型在陕西黑河流域径流模拟中的应用[J]. 干旱地区农业研究, 2014(5):213-217,222.(LIU Rui, HUO Ai-di, WANG Ju-cui, et al. Application of the SWAT model to the runoff simulation based on SUFI-2 algorithm in Heihe River basin of Shanxi Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014(5): 213-217, 222.(in Chinese))
- [13] 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(1): 52-58.(JIA Yang-wen, GAO Hui, NIU Cun-wen, et al. Impact of climate change on runoff process in headwater area of the Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008(1): 52-58.(in Chinese))
- [14] 秦大河.未来 100 年全球将继续变暖[J]. 中国改革, 2009(11):10-13. (QIN Da-he. The global climate will continue warming in the next 100 years[J]. China Reform, 2009(11):10-13.(in Chinese))

Simulation of climate change impacts on runoff of Yuncheng reach of Fenhe River

LI Dan, FENG Min-quan, GOU Ting

(State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to provide a scientific and reliable basis for water management and optimization, a distributed hydrological model (SWAT) was applied to the runoff simulation of the Yuncheng reach of the Fenhe River. Firstly, based on the available data, the relationships between runoff and precipitation were explained from both time and space by simulating the runoff of the study area. Secondly, by use of the method of incremental scenario, different climate scenarios were assumed according to the possible changes of the future climate. Then, the SWAT model was used to simulate the runoff under different climate scenarios of the study area. The analysis results show: (1) the runoff distribution was consistent with the precipitation in both time and space; (2) there was a negative correlation between the annual runoff and temperature, and a positive correlation between the annual runoff and precipitation. Compared with the temperature changes, the precipitation changes played a more important role in the runoff of the study area; (3) the runoff changes of the study area showed a tendency of seasonal variation. The runoff variation reached the maximum in the flood season (from July to October) and the minimum in the dry season (from November to March); (4) the runoff of the survey area will increase with the future climate change. The runoff of the Hejin hydrological station will increase by 129 million m³ when the temperature increases by 0.5°C and precipitation increases by 10%.

Key words: SWAT model; runoff; climate change; the Fenhe River