

SWAT 模型在青海湖布哈河流域径流变化成因分析中的应用

刘吉峰¹, 霍世青¹, 李世杰², 杜宇³

(1. 黄河水利委员会水文局信息中心, 河南 郑州 450004; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008;
3. 广东重工建设监理工程有限公司, 广东 广州 510004)

摘要: 为了探讨气候变化和人类活动对流域水文过程的影响, 利用分布式水文模型 SWAT 对青海湖布哈河流域过去几十年径流变化进行了模拟研究. 研究表明, 20 世纪 80~90 年代流域径流减少的主要原因是气候变化. 在此基础上, 根据未来不同气候情景的变化趋势, 对布哈河径流变化进行了预测, 得出未来 30 年径流增加的可能性比较大, 青海湖水位下降速度将会减缓甚至出现上升趋势的结论.

关键词: SWAT 模型; 径流变化; 气候变化; 土地利用; 水文模拟; 布哈河流域; 青海湖

中图分类号: P338 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-198X(2007)02-0159-05

青海湖是我国最大的内陆咸水湖泊, 由于中纬度气候暖干化^[1]和流域人类活动的加剧, 近几十年湖泊萎缩速度加快, 湖泊水位每年下降的平均速度接近 $10\text{ cm}^{[2-4]}$, 引起了人们的高度关注, 有关专家对青海湖也进行了许多研究^[5-7]. 丁永建等^[8]根据径流和蒸发与气温和降水的相关关系建立了流域水量平衡方程, 证明了湖泊水位变化对气候的敏感性; 马钰^[9]综合分析了前期降水量、蒸发量、水汽饱和气压差、冰融期气温等多要素对流域径流贡献的相对大小; 秦伯强^[10]则利用改进的蓄满产流模型模拟了流域径流变化和青海湖水位的变化过程. 这些研究主要利用水量平衡方程或者概念性水文模型进行计算, 较少考虑流域地表特征的空间非均匀性. 从 20 世纪 80 年代至今, 青海湖流域土地利用等发生了很大变化, 植被退化, 土地沙化, 流域生态环境日趋恶化, 这些变化对流域水文水资源有何影响是非常值得研究的问题. 布哈河是青海湖流域最大的河流, 径流量占青海湖入湖径流总量的 50% 以上, 因此模拟预测布哈河径流变化对分析青海湖水量变化和资源利用具有重要意义.

SWAT 模型是美国农业部农业研究服务中心开发的分布式流域水文模型, 其主要功能是模拟预测气候变化、土地利用和土地经营管理方式等对流域水量、水质方面的影响. SWAT 模型具有很强的物理机制, 特别适用于具有不同的土壤类型、不同的土地利用方式和管理条件下的复杂的大流域, 并能在资料缺乏的地区建模. 在加拿大和北美寒区已被广泛地应用^[11]. SWAT 模型在结构上考虑融雪和冻土对水文循环的影响, 因而较适用于我国西北的高寒区^[12-13].

本文利用分布式 SWAT 模型, 综合考虑流域地形、植被、土壤和土地利用等因素, 模拟青海湖布哈河流域的水文过程, 研究流域径流变化的主要影响因子, 预测未来气候情景下径流的变化趋势.

1 研究区概况

青海湖流域位于青海省东北部, 流域西北高、东南低, 海拔在 $3\,194\sim 5\,174\text{ m}$ 之间, 流域面积为 $29\,661\text{ km}^2$. 流域属内陆高原半干旱气候. 流入青海湖的河流有 50 余条, 其中布哈河是最大的河流.

布哈河流域地处整个青海湖流域的西北部, 主要在青海省海西藏族自治州天峻县境内. 布哈河发源于疏勒南山, 从西北向东南流入青海湖. 作为青海湖水系最大的河流, 布哈河集水面积近 $15\,000\text{ km}^2$, 占青海湖流域总面积的一半以上. 水系呈树枝状, 南北岸支流不对称, 南岸支流相对较短, 水量较小; 北岸河网稠密, 支流繁多, 水量也较为丰富. 布哈河多年平均径流量为 7.85 亿 m^3 , 约占入湖径流总量的 50%~60%. 布哈河径流

量年内分配很不均匀,汛期(6~9月)径流量集中了全年的82.7%,枯季(12~次年3月)径流量仅占全年的3.24%。布哈河流域主要的植被类型为草地(以草甸草原为主),裸岩砾石和沼泽,三者约占流域总面积的95%以上。由于地下水位下降和人口增加等,出现了草场退化和土地沙化的现象^[14]。根据资料分析,流域的年平均气温在20世纪80~90年代明显升高,降水和径流均呈下降趋势,20世纪90年代平均气温比80年代升高了约0.5℃,降水减少了30mm左右,径流量则相应减少了7.4m³/s。气温升高和降水减少对流域径流量变化的影响是明显的。

2 资料及处理

SWAT模型计算需要输入的数据包括流域的数字高程模型DEM(图1)、水文和气象测站的空间分布数据、土壤类型和土地利用类型空间分布数据等。地形资料是国家基础信息中心标准1:250000的DEM,栅格单元大小为100m×100m,用来提取流域的地形特征,如坡度、坡向、水沙运移方向、流域面积、流域界限和汇流网络等。土壤分布图是以青海湖流域1:1500000的土壤分布为底图^[15],利用Arc/info进行数字化,然后转成Grid格式,其属性数据源自《青海土壤》,是第二次土壤普查的成果^[16]。SWAT模型采用的土壤质地采样指标和我国第二次土壤普查采样标准不同,必须经过土壤质地采样标准的尺度转换,本文根据朱秋潮等的方法进行转换^[17]。土壤密度、有效田间持水量、饱和导水率等参数由软件SPAW6.1中的SWCI(soil water characteristics for texture)模块计算而得。采用青海省国土资源厅20世纪80年代中期1:1000000土地利用图和1995年土地详查绘制的1:250000土地利用图,在原有分类基础上,根据SWAT模型的特点,对土地利用进行了聚分,形成了草场、裸地、林地、水田、旱地、园地、水体、湿地、城镇用地、农村居民点等10种土地类型。土壤类型空间分布和土地利用等空间信息都采用Albers等积圆锥投影,并在GIS平台上栅格化为100m×100m的GRID文件。

青海省境内气象站较为稀少,所以气象资料库是由流域及其附近的6个气象站1957~2003年的降水、最高和最低气温、平均风速、相对湿度逐日数据构成的,太阳辐射要素由SWAT自带的天气生成器模块模拟产生,各气象站的多年平均气候参数数据库由各气象站1957~2003年逐日气象数据计算产生。因为降水控制着流域的水量平衡,所以精确地模拟降水的时间和空间分布以及降水量是模型是否成功的关键。考虑到流域的实际情况,采用了带有高度校正的梯度距离平方权重反比法(GIDW)^[18]对逐日气温和降水进行空间插值处理,以适应分布式水文模型对气象要素空间精度的要求。

应用SWAT模型进行流域河网的提取和空间离散化。流域河网提取的阈值大小以提取的河网尽可能地逼近真实河网为原则。但在空间离散化的过程中,为了避免生成的子流域太多从而导致太多的空间数据转换和计算等工作量,对生成的子流域出水口进行了调整,以确保二级河流为主。按照该空间离散化原则,形成了33个子流域和92个水文相应单元(图2)。为了保证提取的河网与真实河网一致,采用了SWAT模型中的“Burn-In”方法辅助提取河网。这里的真实河网是指在1:250000GIS数字河网的基础上经过概化而保留的主要河网(以三级河网为主)。

3 模型率定和校验

当模型的结构和输入参数初步确定后,就需要对模型进行率定和验证。选用相关系数 R^2 和Nash-Sutcliffe模型效率系数 E_{NS} 来衡量模型模拟值与观测值之间的拟合度^[19],其表达式为



图1 布哈河流域的DEM
Fig.1 DEM of Buha River Basin



图2 布哈河流域的子流域划分
Fig.2 Dividing scheme for
subbasin of Buha River Basin

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_0 - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_0 - Q_{avg})^2}$$

式中： Q_0 ——流量实测值； Q_p ——流量模拟值； Q_{avg} ——流量实测平均值； n ——实测数据个数。 E_{NS} 的值可以在 0~1 之间变动,1 表示模拟值与实际值完全一致,0 表示模拟效果与采用实测值的平均值代替的模拟效果是一样的,模拟值与实测的平均值没有差异,若 E_{NS} 为负值,则模拟结果无效。

选用 1983~1990 年布哈河口水文站的径流数据进行逐年和逐月水量平衡校正,相应土地利用数据为 20 世纪 80 年代中期的数据,采用模型校准过程中得到的参数,应用 1995~2003 年的径流数据进行模型验证,验证期使用 1995 年的土地利用资料。

3.1 参数率定

西部地区冰雪融化对径流有重要的影响,对融雪参数和地下径流参数分别进行了调整。1983~1990 年径流的模拟值与实测值的拟合很好, $R^2=0.96$, $E_{NS}=0.89$ 。SWAT 模型所调整的敏感参数及其最终调整结果如表 1 所示。

3.2 模型验证

由图 3 和图 4 可以看出,1991~2000 年径流量的模拟较为准确, $R^2=0.95$, $E_{NS}=0.87$,逐月经流的模拟结果 $R^2=0.93$, $E_{NS}=0.82$,模拟精度也比较高。由于模型的率定和验证分别采用了相应时段的气候和土地利用资料,说明模型运行比较稳定,能够较为真实地模拟流域的水文过程。

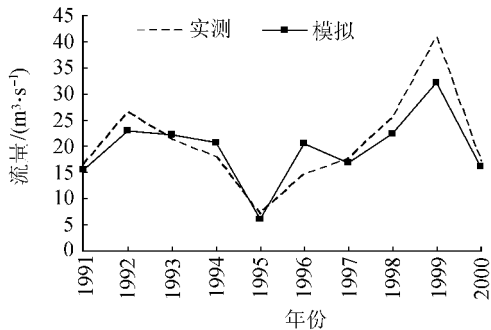


图 3 年径流量模拟与实测值
Fig.3 Simulated and observed values
of yearly runoff

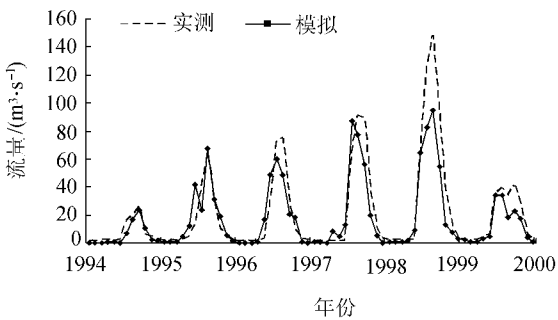


图 4 月经流量模拟与实测值
Fig.4 Simulated and observed values
of monthly runoff

4 结果分析

4.1 水文变化因子分析

应用率定好的 SWAT 模型,采用敏感性试验方法分析了 20 世纪 80~90 年代气候变化和土地利用变化对径流的影响。试验中气候和土地利用组合如下:(a)方案 1,20 世纪 80 年代气候与土地利用;(b)方案 2,20 世纪 80 年代气候与 90 年代的土地利用;(c)方案 3,20 世纪 90 年代气候与 80 年代的土地利用;(d)方案 4,20 世纪 90 年代气候与土地利用。模拟结果(表 2)表明,模拟的径流量大约减少了 6.152 m³/s。径流变化中 80% 以上是由气候因素造成的,因为 20 世纪 80~90 年代,流域的气温增加了 0.42℃,而降水减少了 29.11 mm;土地

表 2 气候和土地利用变化情形比较
Table 2 Comparison of simulated runoff variation
under different combinations of climate and land use

模拟方案	模拟径流量/ (m³·s ⁻¹)	径流变化量/ (m³·s ⁻¹)	径流量模拟 变化百分比/%
方案 1	24.061	0	0
方案 2	22.767	-1.294	21.03
方案 3	18.696	-5.365	87.21
方案 4	17.909	-6.152	100
误差		0.507	8.24

利用造成的径流变化占近 20%。由于人类活动对青海湖流域影响很小^[10 20],因此气候变化是影响布哈河流域水文过程的主要因素。

4.2 未来气候变化对径流影响

采用假定气候情景的方法对未来进行预测。本文主要考虑径流量对于降水与气温变化的敏感性,并且假定输入因子的月际分布保持不变。未来气候变化组合及其模拟径流变化结果(表 3,表中 ΔP 为降水增量)显示,随着温度的升高,其对径流的影响逐渐减弱,即使未来 30 a 温度升高 2℃,降水仅增加 10%,径流量仍然是增加的。

表 3 布哈河流域不同水热组合下径流量的变化

Table 3 Runoff variation of Buha River Basin under different combinations of water and heat

$\Delta T/^\circ\text{C}$	径流量的变化/%				
	$\Delta P = -5\%$	$\Delta P = 0$	$\Delta P = 5\%$	$\Delta P = 10\%$	$\Delta P = 20\%$
0	-21.73	0	16.12	32.68	86.12
1	-37.83	-17.50	0.24	17.74	65.74
2	-41.80	-32.23	-10.02	13.08	57.66

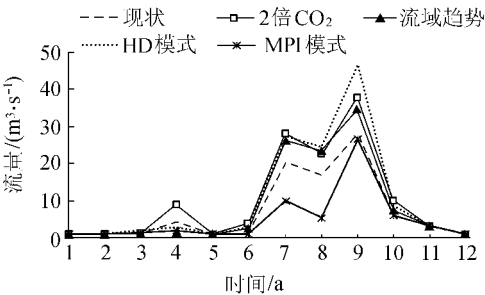


图 5 不同情境下气候变化对径流的影响
Fig.5 Influences of climate variation on runoff under different conditions

王守荣等^[21]分析了英国研究中心 HD 模式和德国 Max Planck 研究所的 MPI 模式模拟 2030 年气候变化情景。预计 2030 年中国西北内陆河流域年平均变化:气温 2.0℃(HD)和 2.7℃(MPI),降水 15.7%(HD)和 -7.1%(MPI)。把逐月变化结果输入 SWAT 模型,显示 HD 情景的结果是青海湖布哈河流域径流将增加 45.36%,而 MPI 情景的结果是径流减少 29.29%。利用 SWAT 模拟 CO₂ 倍增情况下径流将会增加 42.64%,而流域近 40 a(1961~2000 年)气温和降水平均每 10 a 分别以 0.30℃、3.4% 的速度增加,根据这一结果,未来 30 a(至 2030 年)流域径流量的变化应该与组合($\Delta T = 0^\circ\text{C}$ 或者 1°C $\Delta P = 10\%$)更为接近,即径流量将增加约 25%(图 5)。综合上述结果,流域未来径流变化应该趋向于增加的,相应地,青海湖水位下降的速度将会减缓,甚至出现上升趋势。湖泊周围地下水位会随之升高,植被得到恢复。如果合理控制人类活动,流域的生态环境会逐步改善。

5 结论与讨论

分布式 SWAT 水文模型考虑了融雪和冻土对水文过程的影响,可以应用于我国西部高原的寒冷区域,逐年和月模拟均取得较好效果,因此 SWAT 模型适用于我国西部长期水资源评估。SWAT 模型对数据的空间分布精度要求较高,而我国西部地区地形起伏较大,气象站点稀少,必须对气象数据先插值处理,并进行高程校正,然后再输入模型。

正确评价布哈河径流对气候变化的响应对青海湖水位预测具有重要意义。敏感性试验表明,气候仍然是布哈河径流变化的主导因素,在土地利用和气候对径流的影响中,气候因素占 80%;气候对径流影响的趋势预测表明,流域未来 30 a 径流量有增加的趋势,这对青海湖水量补给具有重要意义。

致谢:中国科学院盐湖研究所的马海州、山发寿、周笃军研究员和沙占江博士在资料收集过程中提供了大量帮助,在此表示感谢!

参考文献:

[1] 施雅风. 山地冰川与湖泊萎缩所指示的亚洲中部气候干暖化趋势与未来展望[J]. 地理学报, 1990, 45(1): 1-13.
[2] 周陆生, 汪青春. 青海湖年际变化规律的分析和预测[J]. 高原气象, 1996, 15(4): 478-484.
[3] 杨贵林, 刘国冬. 青海湖水位下降与趋势预测[J]. 湖泊科学, 1992, 4(3): 17-24.
[4] 刘小园. 青海湖水位变化趋势分析[J]. 干旱区研究, 2001, 18(3): 58-62.
[5] 冯松, 汤懋苍, 周陆生. 青海湖近 600 年的水位变化[J]. 湖泊科学, 2000, 12(3): 205-210.
[6] 朱琰, 崔广柏, 杨珏. 青海湖萎缩干涸原因、发展趋势及对生态环境的影响[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2001, 29(4): 104

[7] 李林,王振宇,秦宁生,等.环青海湖地区气候变化及其对荒漠化的影响[J].高原气象,2002,21(1):59-65.

[8] 丁永建,刘凤景.近三十年来青海湖流域气候变化对水量平衡的影响极其趋势预测[J].地理科学,1995,15(2):128-135.

[9] 马钰.青海湖水位变化与湖区气候要素的相关分析[J].湖泊科学,1996,8(2):103-106.

[10] 秦伯强.气候变化对亚洲内陆湖泊影响研究:过去、现在与未来[D].北京:中国科学院,1993.

[11] NEITSCH S L,ARNOLD J G,KINLRY J R,et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation :Version 2000[M]. Texas : Texas Water Resources Institute ,College Station,2002:3-5.

[12] 黄清华,张万昌.SWAT 分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进及应用[J].南京林业大学学报,2004,28(2):22-27.

[13] 杨桂莲,郝芳华,刘昌明,等.基于 SWAT 模型的基流估算及评价:以洛河流域为例[J].地理科学进展,2003,22(5):463-471.

[14] 沈芳,匡定波.青海湖最近 25 年变化的遥感调查与研究[J].湖泊科学,2003,15(4):289-297.

[15] 中国科学院地理研究所.青藏高原地图集[M].北京:科学出版社,1990:96-97.

[16] 青海省农业资源区划办公室.青海土壤[M].北京:中国农业出版社,1997.

[17] 朱秋潮,范浩定.土壤颗粒组成分级标准的换算[J].土壤通报,1999,30(2):53-54.

[18] 庄立伟,王石力.东北地区逐日气象要素的空间插值方法应用研究[J].应用气象学报,2003,14(5):605-615.

[19] NASH J E,SUTTELIFE J V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1 :A discussion of principle[J]. Journal of Hydrology ,1970,10(3):282-290.

[20] 周立华,陈桂琛.人类活动对青海湖水位下降的影响[J].湖泊科学,1992,4(3):32-37.

[21] 王守荣,郑水红,程磊.气候变化对西北水循环和水资源影响的研究[J].气候与环境研究,2003,8(1):43-51.

Application of SWAT model to analysis of runoff variation of Buha River Basin of Qinghai Lake

LIU Ji-feng¹, HUO Shi-qing¹, LI Shi-jie², DU Yu³

- (1. Information Center of Hydrology Bureau , Yellow River Water Conservancy Commission , Zhengzhou 450004 , China ;
2. Nanjing Institute of Geography and Limnology , Chinese Academy of Sciences , Nanjing 210008 , China ;
3. Supervision Company of Heavy Industry Construction , Guangzhou 510004 , China)

Abstract:The study was performed to investigate the influences of climate variation and human activities on the hydrological process of the river basin. With the distributed hydrological model SWAT , runoff variation of the Buha River of the past decades was simulated. From the analysis , it is concluded that the climate variation is the main cause of runoff decrease in the river basin from the 1980s to the 1990s. Then , the runoff variation of the Buha River was predicted according to the variation trend of climate condition. The result shows that the runoff will possibly increase in the following 30 years , which will lead to the deceleration of the lowering or even to the rise of the water level of Qinghai Lake.

Key words:SWAT ; runoff variation ; climate change ; land use ; hydrological simulation ; Buha River Basin ; Qinghai Lake