

基于 SWAT 模型的乌裕尔河流域气候变化的水文响应

冯夏清^{1,2}, 章光新¹, 尹雄锐¹

(1. 中国科学院湿地生态与环境重点实验室, 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 乌裕尔河流域是气候变化的敏感区, 其径流量是扎龙湿地的重要补给水源, 探讨气候变化情景下乌裕尔河流域径流量的变化对区域社会经济发展和扎龙湿地生态环境保护具有重要的现实意义。本文利用 SWAT 模型对乌裕尔河流域进行径流模拟, 并分析未来气候变化情景下河流径流量的变化。结果表明: SWAT 模型可以较好地模拟乌裕尔河流域的径流量变化过程, 尤其是产流量大的站点, 模拟效率较高; 气候变化对径流量影响较为显著, 未来气候变化情景下, 流域径流量随着时间的推移不断减少, 而且不同水文站径流量减少幅度不同。

关 键 词: 气候变化; SWAT 模型; 径流模拟; 乌裕尔河流域

气候变暖是全世界关注的热点问题, 近 50 年的实测数据显示东北地区气温呈上升趋势, 其增温幅度约为 $0.3^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 显然高于全球平均升温的幅度 ($0.1^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)^[1]。气候变暖将给全球水循环带来巨大影响, 加剧水文循环过程, 增大极端水文事件发生的概率。河流径流量和区域水资源量与气候变化的关系十分密切, 乌裕尔河流域地处内陆半干旱区, 是气候变化的敏感区, 同时乌裕尔河是扎龙湿地的重要补给水源, 其径流量对区域经济社会发展和扎龙湿地生态环境保护具有战略意义, 因此探讨气候变化情景下乌裕尔河流域的水文响应具有重要的现实意义。

流域水文模型是模拟流域水文过程和认识流域水文规律的重要理论基础, 分布式水文模型以其强大的优势^[2]已经成为流域水文模拟的重要发展趋势, 也是最有前景的水循环模拟方式。SWAT(Soil and Water Assessment Tool)是 Arnold 等^[3-4]于 20 世纪 90 年代早期为美国农业部(USDA)下属的农业研究中心(ARS)开发的面向大中流域、长时间尺度的分布式水文模型, 它建立在 SWRRB 模型^[5]的基础上并结合美国农业研究中心的 CREAMS^[6]、

GLEAMS^[7]、EPIC^[8]、ROTO^[9]等模型的优点发展而来, 是一个集成遥感(RS)、地理信息系统(GIS)和数字高程模型(DEM)技术的基于水文过程的、具有较强物理机制的、可以连续模拟的分布式流域水文模型。SWAT 模型可以对不同土壤条件、土地利用类型、气候状况和人类活动干扰下做出有效的产流、产沙模拟, 用于研究流域水平衡、河流流量预测和非点源污染控制评价等诸多方面, 适用于面向水资源管理的长时段的分布式水文过程模拟, 并且能够在缺乏资料的地区建模^[10-14]。

本文利用 SWAT 模型, 综合考虑流域地形、气候、土壤和土地利用等因素, 对乌裕尔河流域进行径流模拟, 并分析未来气候变化情景下河流径流量的变化, 以为水资源管理部门提供参考依据。

1 研究区概况

乌裕尔河是嫩江水系的一级支流, 也是嫩江左岸的一条无尾河, 发源于黑龙江省北安市小兴安岭西麓山区, 流经黑龙江省的北安、克山、克东、依安、富裕等市县, 最终流入扎龙湿地, 是扎龙湿地重要的

收稿日期: 2009-10; 修订日期: 2010-01.

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q06-2); 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB428404)。

作者简介: 冯夏清(1985-), 女, 山东省滕州人, 博士研究生, 主要研究方向为水资源配置与水文模型。

E-mail: qingqing_2002j@163.com.

通讯作者: 章光新, 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事水文学与水资源学研究。E-mail: zhgx@neigae.ac.cn.

补给水源。河源高程 418 m,河道全长 576 km,流域面积 15084 km²,地势东北高、西南低。上游山区支流较多,是主要的产流区;中下游为平原区,龙安桥以下区域失去明显河道,河水漫溢形成永久性及季节性淡水沼泽地。本流域地处松嫩平原西部大陆性季风盛行区,属于典型内陆半干旱气候,冬季气候干燥严寒,夏季温热多雨,春秋两季气温变化急剧,干旱多风。流域径流补给方式主要为降水,其次为冰雪融水;年降水量为 496.7 mm,年蒸发量为 1110~1780 mm,而且降水年际变率大,年内降水分布极为不均匀,主要集中在汛期 6~9 月份,占全年降水量的 80%。本研究的区域范围是乌裕尔河流域龙安桥水文站以上的部分,集水面积为 12345 km²;龙安桥以下为河流溢散区,在此不做模拟计算。

2 基础数据及研究方法

2.1 基础数据

本研究空间数据的分辨率、格式和数据来源如表 1 所示,所有输入数据均采用的是 Albers 等积圆锥投影系统,参考椭球体为 Krasovsky。

流域的水文气象数据选取 1985–2006 年的数据,站点分布见图 1。气象数据采用北安、克山、富裕、齐齐哈尔、海伦、明水 6 个气象站逐日的最高和最低气温、相对湿度、风速、太阳辐射;降水量采用了降水系列资料较长的 12 个雨量站的日监测数据;水文数据采用乌裕尔河流域北安、依安和龙安桥 3 个水文站实测的径流量数据,其中龙安桥站仅具有 1955–1977 年 23 年实测水位资料和 1968 年 7 月–1977 年 12 月 10 年实测径流量系列,1978 年以后该站撤销,流域内具有同期观测资料且距离较近的水文站为依安站。龙安桥 1985–2006 年年径流系列采用依安与龙安桥站年径流相关关系线插补,并用依安站同期年内分配比获得龙安桥站月径流系列数据。水文和降水数据由黑龙江省水文局提供,气象数据由黑龙江省气象科学数据共享服务中心提供。

模型中用到的土壤数据主要包括两大类:物理属性数据和化学属性数据。物理属性主要包括土壤分层数、各层厚度、土壤颗粒组成、土壤水文分组、饱和水力传导系数等。化学属性主

要是土壤中氮、磷的初始浓度。物理属性决定着土壤剖面中水和气的运动状况,并对各个水文响应单元中的水循环起着重要作用。由于本文是针对流域的径流量模拟,不涉及水质问题,所以主要是确定土壤物理属性数据。一般来说,国内可获得的数据难以满足构建 SWAT 土壤库的要求。为此,土壤可利用有效水量、饱和水力传导系数等参数可根据土壤颗粒组成(美制)以及土壤有机质采用由美国农业部开发的土壤水特性计算程序 SPAW 进行估算,估算结果可以初步反映出这些土壤参数的空间分布特征,最终结果还需在模型率定过程中进行调整。乌裕尔河流域包括 16 种土壤类型,输入模型之前的重分类值与模型中对应的代码统计如表 2 所示。

表 1 SWAT 模型空间数据来源与精度

Tab.1 Sources and precision of the spatial data for SWAT model

空间数据	比例尺/分辨率	格式	来源
DEM	90m	ESRI Grid	美国航空航天局和美国地质调查局
土地利用图	1 : 10 万	Arc/Info Coverage	中国科学院东北地理与农业生态研究所
土壤图	1 : 100 万	Arc/Info Coverage	中国西部环境与生态科学数据中心
水系图	1 : 25 万	Arc/Info Coverage	中国科学院东北地理与农业生态研究所

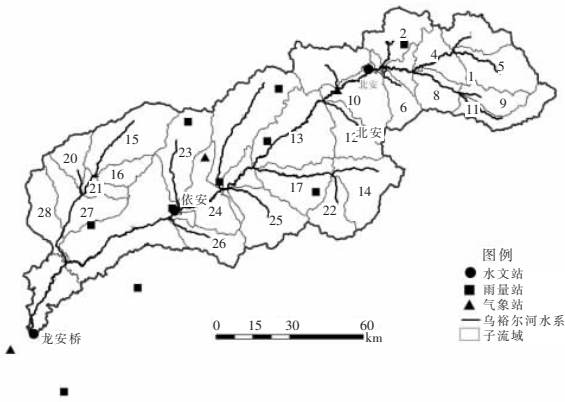


图 1 乌裕尔河流域水文气象站点分布图
Fig.1 The distribution of hydrology and weather stations in Wuyur River Basin

表 2 乌裕尔河流域土壤类型重分类代码转换表

Tab.2 Code conversion of soil reclassification in Wuyur River Basin

代码	土壤类型	SWAT 模型中的代码	代码	土壤类型	SWAT 模型中的代码
23110151	暗棕壤	AZR	23112104	淡黑钙土	DHGT
23110154	草甸暗棕壤	CDAZR	23112105	草甸黑钙土	CDHGT
23111131	黑土	HT	23116101	草甸土	CDT
23111132	草甸黑土	CDHT	23116103	白浆化草甸土	BJCDT
23111134	表潜黑土	BQHT	23116106	碱化草甸土	JHCDT
23112101	黑钙土	HGT	23117101	沼泽土	ZZT
23112102	淋溶黑钙土	LRHGT	23117104	草甸沼泽土	CDZZT
23112103	石灰性黑钙土	SHHGT	23124101	湖泊、水库	HPSK

土地利用数据来源于中国科学院东北地理与农业生态研究所,采用的是 1986 和 2000 年的数据。土地利用数据在建模时需要将数据源的分类代码转化成 SWAT 能够识别的代码,土地利用类型代码与 SWAT 土地利用代码的对应参照郝芳华等^[15]的研究成果。表 3 统计了乌裕尔河流域内土地利用/覆被类型与 SWAT 内部代码的对应情况。

2.2 研究方法

采用 90m 精度的 DEM 提取流域河网时,阈值大小应以提取的河网尽可能地逼近真实河网为原则,最终集水面积阈值设定为 160 km²,生成的流域面积为 11977 km²,相对实际的流域面积误差仅为 3.0%。由于受 DEM 精度和人为因素影响,由 DEM 形成的河网可能与实际情况会有偏差。针对这一问题,研究中采用 SWAT 模型中的“Burn-in”方法将 1:25 万水系图导入模型中辅助提取河网,获得符合实际情况的数字河网。在流域离散化的过程中,为了避免生成的子流域太多而导致工作量过大以及受 DEM 精度影响会生成与实际不符的出水口等问题,对生成的子流域出水口进行了调整,以确保二级河流为主。HRU 的生成采用优势土地利用类型/优势土壤类型方法,阈值为 20/10,即占子流域面 20%以上的土地利用类型和占此类土地利用 10%以上的土壤类型生成 HRU。本文根据实际的气象水文资料,并兼顾分布式子流域划分的意义^[16-17],将研究流域分成 30 个子流域和 158 个 HRU,其中子流域划分结果如图 1。径流模拟采用了“Daily Rain/Cn/Daily”方法,潜在蒸发模拟选择“Penman-Monteith”方法,河道演算采用“Variable Storage”方法。

3 基于 SWAT 模型的径流模拟

当模型的结构和输入参数初步确定后,就需要对模型进行校准和验证。根据 1985-2006 年的水文气象资料,考虑到许多参数在模拟初期初始值为 0 的情况,将 1985 年作为模型的初始条件形成期,选取 1986-1997 年北安、依安和龙安桥站径流数据对模型进行逐年和逐月的径流校准(1986 年土地利用图);采用校准后的参数,应用 1998-2006 年北安、依安和龙安桥站径流数据进行模型验证(2000 年土地利用图)。本文选取 3 个指标用于评价模型适用性,分别是 Nash-Sutcliffe^[18]提出的模型效率系数 Ens、相对误差 Re 及相关系数 R²。

3.1 模型参数敏感性分析与率定

采用 Arc SWAT2005 提供的参数敏感度分析模块进行参数敏感性分析,此模块采用的是 LH-OAT 灵敏度分析方法^[19]。在径流模拟中,影响 SWAT 模型产、汇流过程的参数有 26 个,经过敏感性分析后,得到影响乌裕尔河流域径流模拟结果精度的 8 个重要参数(表 4)并对其进行参数率定。同时考虑到冰雪融化对径流的重要影响,对 SWAT 模型中的 SMFMX (最大融雪因子)、SMFMN (最小融雪因子)、SMTMP(融雪的最低气温)等融雪参数也进行率定。

3.2 模型结果的分析

表 5 为各站校准期和验证期月径流模拟结果。北安站和依安站年径流相对误差均为负值,说明模

表 3 乌裕尔河流域土地利用/覆盖类型重分类代码转换表
Tab.3 Code conversion of land use/cover reclassification in the Wuyur River Basin

编码	土地利用类型	SWAT 模型中代码	编码	土地利用类型	SWAT 模型中代码
21	有林地	FRST	51	城镇用地	URBA
22	灌木林地		53	独立工矿用地	
24	其它林地		52	农村居民点	RURL
23	园地	ORCD	63	盐碱地	
31	高覆盖度草地	PAST	65	裸土地	BALD
32	中覆盖度草地		66	裸岩、石砾	WETL
33	低覆盖度草地		64	沼泽地	
41	河渠	WATR	113	水田	RICE
42	湖泊		121	山区旱地	AGRC
43	水库、坑塘		122	丘陵旱地	
46	滩涂		123	平原旱地	

表 4 SWAT 参数定义及其敏感度值
Tab.4 The definition of parameters in SWAT and their sensitivity values

参数名称	定义	敏感 度值	参数名称	定义	敏感 度值
ESCO	土壤蒸发补偿系数	1.32	SOL_AWC	土壤可利用有效水量	0.45
CN2	SCS 径流曲线系数	1.30	ALPHA_BF	基流 a 系数	0.37
SOL_Z	土壤深度	0.68	REVAPMN	浅层地下水再蒸发系数	0.26
GWQMN	浅层地下径流系数	0.58	CH_K2	河道水力传导率	0.14

表 5 模型校准期和验证期月径流模拟结果评价
Tab.5 Evaluation of the simulation results of monthly streamflow during calibration and validation periods

模拟期	北安站			依安站			龙安桥站		
	Ens	Re	R ²	Ens	Re	R ²	Ens	Re	R ²
校准期									
1986-1997 年	0.74	-25.53%	0.77	0.85	-2.94%	0.85	0.43	20.07%	0.78
验证期									
1998-2006 年	0.57	-30.36%	0.70	0.83	3.16%	0.84	0.37	21.32%	0.62

拟值小于实测值,而龙安桥站模拟值大于实测值,3个站年径流模拟精度均满足模拟要求。从各站月径流量模拟结果来看,依安站和北安站校准期 Ens 均大于 0.70,验证期均大于 0.50,各时期相关系数都大于 0.70,模拟结果较好;龙安桥站在校准期和验证期 Ens 均较低,但模拟结果还是可接受的^[20-21]。因此模型能够比较准确地模拟研究区的流量过程,尤其是产流量大的站点,模拟效率较高。龙安桥站径流量模拟结果比北安、依安模拟效果差的原因在于:①用于模拟结果检验的数据不是全来自实测数据,一部分是通过插补而来,数据本身就存在误差;②降雨是影响径流的主要因素,依安至龙安桥区间雨量站较少,由于降雨的空间不均匀性可能会影响模拟效果;③乌裕尔河下游受人类活动影响较频繁,虽然在下游参数率定的过程已经考虑了人类取水的影响,但还有其他方面的影响未考虑。

依安站位于乌裕尔河流域中游,由于北安至依安之间有大量支流汇入以及下游河流两岸湿地的蓄滞水量功能,使得依安站各年年径流量均比北安站和龙安桥站大,径流模拟效果要稍好于其他两站。图 2 和图 3 分别为依安站率定期、验证期月平均径流量模拟值和实测值的比较结果。从年径流量变化过程来看,丰水年月流量过程模拟好于枯水年;从各月流量模拟结果来看,每年的最高月流量与实测最高月流量基本一致,同时由于率定了融雪参数和地下水参数,所以枯水期流量模拟效果也较好,模拟误差均在允许范围内,且月流量过程与降水过程表现出较好的对应关系。

4 未来气候变化情景下流域水文响应模拟

为考察未来气候变化情景下乌裕尔河流域径流量的变化,应用 SWAT 模型,应用 SWAT 模型设置未来 10 年(2020s)和 20 年(2030s)流域气候变化状况,模拟计算乌裕尔河流域未来时期径流量可能发生的变化。

4.1 气候变化情景

本文采用已有关于气温变化和未来降水变化的研究成果^[122]设置未来 10–20 年内气候变化情景(表 6),气候变化情景中主要考虑气温和降水的变化,并且假定输入因子的月际分布保持不变。

4.2 未来气候变化的水文响应

根据未来气候变化情景建立不同时期的气候

序列,输入率定后的 SWAT 模型中,模拟未来径流量,分析气候变化情景下不同时期的水文响应。表 7 列出了乌裕尔河流域基准期(2000–2006 年)径流量和未来气候变化情景下的模拟径流量。

未来气候变化情景下流域径流量模拟结果表明,各时期流域模拟的年径流量均比基准期小,这

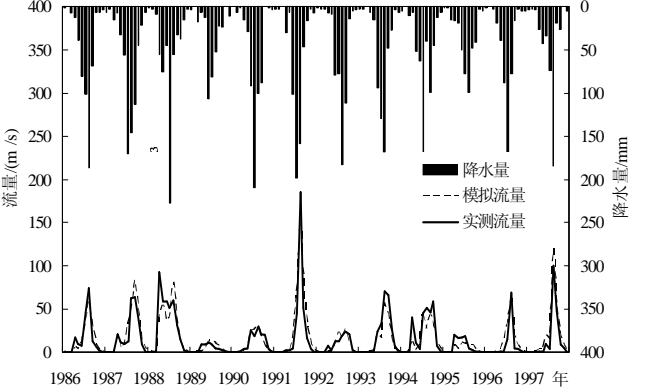


图 2 依安站率定期月平均流量模拟值与实测值比较
Fig.2 Comparison between the simulated and observed monthly streamflow during calibration period at Yi'an station

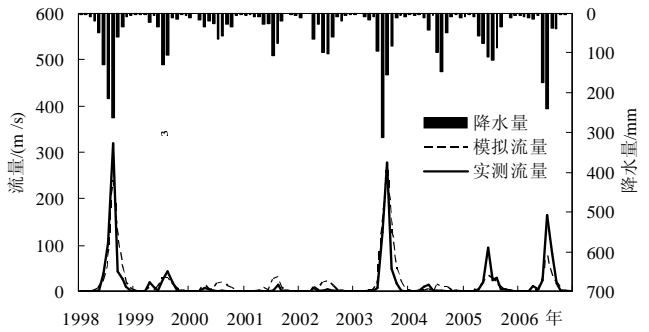


图 3 依安站验证期月平均流量模拟值与实测值比较
Fig.3 Comparison between the simulated and observed monthly streamflow during validation period at Yi'an station

表 6 未来气候变化情景		
Tab.6 Climate change scenario in the future		
年代	温度/℃	降水/mm
2020	+0.6	+12.6
2030	+0.9	+18.9

注:表中“+”表示该年相对于 2000–2006 基准年的增加值。

表 7 乌裕尔河流域未来气候变化情景下径流量模拟结果			
Tab.7 Results of simulated streamflow under future climate change scenarios			
水文站点	基准期径流量 /(m³/s)	2020s模拟径流量 /(m³/s)	2030s模拟径流量 /(m³/s)
北安	2.57	2.48	2.39
依安	6.66	6.51	6.16
龙安桥	2.61	2.35	2.03

对于水资源规划是相当不利的。随着时间的推移,各水文站径流量均存在不断减少的趋势,减少幅度越来越大,各水文站变幅有很大的不同。

综上所述,乌裕尔河流域径流量与气候变化(主要指气温和降水)关系十分密切。乌裕尔河是扎龙湿地的重要补给水源,未来时期径流量减少比较明显,这势必增加水资源短缺的趋势。乌裕尔河是扎龙湿地的重要补给水源,乌裕尔河径流量的减少,严重制约着区域经济社会发展和扎龙湿地生态环境保护,在以后的水资源规划中,应更加重视流域和湿地的水资源合理配置,实现区域社会经济和生态环境的和谐发展。

5 结论

基于物理过程的分布式水文模型在径流模拟和气候变化情景下水文响应研究中显现出明显的优势。本文利用 SWAT 模型对乌裕尔河流域径流量进行模拟,并进行不同气候变化情景下水文响应模拟,在对模拟结果分析的基础上得到如下结论:

(1) 基于 SWAT 模型的乌裕尔河流域径流模拟结果表明,模型在乌裕尔河流域径流模拟中的应用基本成功,可以较好地模拟流域的径流量变化过程,尤其是产流量大的站点(如依安站)模拟效率较高。

(2) 通过建立未来气候变化情景,对气候变化情景下的水文响应进行了研究。结果表明:气候变化对乌裕尔河流域径流量变化影响很大,从模拟结果来看,未来气候变化情景下,径流量随着时间的推移存在不断减少的趋势。未来气候变化对水资源有着重要影响,需要通过流域湿地的水资源合理配置来减缓其不利影响。

参考文献

[1] 刘昌明. 东北地区水与生态—环境问题及保护对策研究. 北京: 科学出版社, 2007.

[2] 王中根, 郑红星, 刘昌明, 等. 黄河典型流域分布式水文模型及应用研究. 中国科学 E 辑, 2004, 34(增刊 I): 49–59.

[3] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment (Part I): Model development. Journal of American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73–89.

[4] Neitsch S L, Arnold L G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool. Theoretical documentation version 2000. College Station: Texas Water Resources Institute, 2002.

[5] Arnold J G, Williams J R, Nicks A D, et al. SWRRB: A

basin scale simulation model for soil and water resources management. College Station: Texas A&M Press, 1990.

[6] Knisel W G. CREAM: A field scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. Conservation Research Report No 26.1980.

[7] Leonard R A, Knisel W G, Still D A. GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. Transaction of the American Society of Agricultural Engineers, 1987, 30(5): 1403–1418.

[8] Williams J R, Jones C A, Dyke P T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. Transaction of the American Society of Agricultural Engineers, 1984, 27(1): 129–144.

[9] Arnold J G, Williams J R, Maidment D R. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins. Journal of Hydraulic Engineering –ASCE, 1995, 121 (2): 171–183.

[10] Hotchkiss R H, Jorgensen S F, Stone M C, et al. Regulated river modeling for climate change impact assessment: the Missouri River. Journal of the American Water Resources Association, 2000, 36(2): 375–386.

[11] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究. 地理科学进展, 2003, 22(1): 79–86.

[12] 张银辉. SWAT 模型及其应用研究进展. 地理科学进展, 2005, 24(5): 121–130.

[13] 庞靖鹏, 徐宗学, 刘昌明. SWAT 模型研究应用进展. 水土保持研究, 2007, 14(3): 31–35.

[14] 梁犁丽, 汪党献, 王芳. SWAT 模型及其应用进展研究. 中国水利水电科学研究院学报, 2007, 5(2): 125–131.

[15] 郝芳华, 程红光, 杨胜天. 非点源污染模型: 理论方法与应用. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.

[16] 郝芳华, 张雪松, 程红光, 等. 分布式水文模型亚流域合理划分水平刍议. 水土保持学报, 2003, 17(4): 75–78.

[17] 张雪松, 郝芳华, 程红光, 等. 亚流域划分对分布式水文模型模拟结果的影响. 水利学报, 2004(7): 119–123.

[18] Nash J E, Sutcliffe J V. River forecasting through conceptual models: Part I A discussion of principles. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282–290.

[19] 王海龙, 余新晓, 武思宏, 等. SWAT 模型灵敏度分析模块在黄土高原典型流域的应用. 北京林业大学学报, 2007, 29(S2): 238–242.

[20] Motovilov Y G, Gottschalk L, England K, et al. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. Agricultural and Forest Meteorology.1999, 98–99: 257–277.

[21] 姚允龙, 王蕾. 基于 SWAT 的典型沼泽性河流径流演变的气候变化响应研究: 以三江平原挠力河为例. 湿地科学, 2008, 6(2): 198–203.

[22] 张存杰, 李栋梁, 王小平. 东北亚近 100 年降水变化及未来 10–15 年预测研究. 高原气象, 2004, 23 (6): 919–929.

Study on the Hydrological Response to Climate Change in Wuyur River Basin Based on the SWAT Model

FENG Xiaqing^{1,2}, ZHANG Guangxin¹, YIN Xionggrui¹

(1.Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS,
Changchun 130012, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Wuyur River Basin, located in the inland semi-arid region, is sensitive to climate change. The streamflow of Wuyur River is an important recharge source of Zhalong Wetland. The study on the streamflow change associated with the future climate change scenarios has a practical significance for the local socio-economic development and eco-environmental protection of Zhalong Wetland. With the distributed hydrological model of SWAT, the streamflow in the Wuyur River Basin was simulated, and the hydrological response to climate change was analyzed. The simulated results showed that the SWAT model could effectively simulate the streamflow change in the Wuyur River Basin. Especially, at the stations with large amounts of streamflow, the efficiency of simulation was satisfactory. The influence of climate change on streamflow was significant. The streamflow in the future climate change scenarios decreased gradually over time, and different hydrological stations had different streamflow change amplitude. Considering the decrease in streamflow, we need to apply a reasonable water resources allocation for the wetlands in the watershed to alleviate the adverse effects.

Key words: climate change; SWAT model; streamflow simulation; Wuyur River Basin

本文引用格式:
冯夏清, 章光新, 尹雄锐. 基于 SWAT 模型的乌裕尔河流域气候变化的水文响应. 地理科学进展, 2010, 29(7): 827-832.