

SWAT 模型在粤北连江流域的应用研究

梁钊雄, 王兮之, 王 军

(佛山科学技术学院 资源环境系, 广东 佛山 528000)

摘 要:选择粤北连江流域为研究区域,以分布式水文模型 SWAT 作为模拟工具,对流域内的水文过程进行模拟。利用流域内高道、凤凰山和黄麝塘 3 个水文站 2001—2010 年的实测月平均径流量进行敏感性分析和参数率定。以 2001—2005 年作为校准期,2006—2010 年作为验证期,以相对误差(Re)、决定系数(R^2)以及 Nash-Sutcliffe 效率系数(Ens)作为模型适用性的评价指标。校准期 3 个水文站的月径流量模拟值的相对误差分别是 2.72%, 5.91%, 1.63%, 决定系数均大于 0.9, Nash-Sutcliffe 系数分别为 0.97, 0.89, 0.70, 而验证期相对误差分别是 2.62%, 5.36%, 9.32%, 决定系数均大于 0.9, Nash-Sutcliffe 系数分别为 0.90, 0.69, 0.69。各项评价指标均符合精度要求,说明 SWAT 模型可以用于连江流域的径流模拟。

关键词:SWAT 模型; 连江流域; 径流模拟; 敏感性分析

中图分类号:TV121

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)06-0140-05

Study on the Application of SWAT Model to Lianjiang Basin in Northern Guangdong

LIANG Zhao-xiong, WANG Xi-zhi, WANG Jun

(Department of Resources and Environment, Foshan University, Foshan, Guangdong 528000, China)

Abstract: The hydrologic process was simulated by using the distributed hydrological model-SWAT in Lianjiang basin of northern Guangdong. Based on observed data of the daily runoff which were measured at Gaodao, Fenghuangshan and Huangjingtang gauging station from 2001 to 2005, the calibration and sensitivity analysis of the model were carried out. The calibrated model was validated for three gauging stations for a period of 5 years(2006—2010). The simulated monthly streamflow has Nash Sutcliffe efficiency value of 0.97, 0.89, 0.70 for the calibration period for the Gaodao, Fenghuangshan and Huangjingtang stations, respectively. The model can successfully simulate streamflow during validation period with the Nash Sutcliffe efficiency value of 0.90, 0.69, 0.69 and R^2 value of 0.94, 0.93, 0.92 for Gaodao, Fenghuangshan and Huangjingtang stations, respectively. The Result showed the SWAT model could be well used for runoff simulation in Lianjiang basin.

Key words: SWAT model; Lianjiang basin; runoff simulation; sensitivity analysis

随着人口的增长、气候变化以及环境的恶化,人类对水资源的管理遇到了极大的挑战。流域水文模型是结合计算机技术、数学模型与系统分析探索和认识复杂水文循环过程和机理的有效手段,也是解决许多水文实际问题的有效工具^[1]。SWAT 模型作为典型的分布式水文模型,是 Neitsch 等^[2]为美国农业部(USDA)下属的农业研究局(ARS)开发的大、中尺度的长时段流域环境模拟模型,该模型具有很强的水文物理机制,可以用来模拟预测大尺度流域长时期不同

的土壤类型、土地利用方式和管理条件下对产水、产沙、水土流失、营养物质运移、非点源污染的影响。

SWAT 模型在北美和欧洲寒区的许多流域的径流模拟中得到了广泛的应用,效果较好。Arnold 等^[3]利用 SWAT 模型模拟美国密西西比河上游的地表水补偿流和基流数据,并与实测径流值进行了比较,结果实测值和模拟值之间的效率系数分别达到 0.63 和 0.65,表明了模型的适用性。Eckhardt and Arnold^[4]在德国中部的一个低山牧区,运用 SWAT

收稿日期:2013-04-08

修回日期:2013-05-02

资助项目:国家自然科学基金“基于植被恢复演替的典型岩溶流域生态水文过程研究”(31070426)

作者简介:梁钊雄(1983—),男,广东佛山人,助理实验师,硕士学位,主要从事地理信息系统应用与开发研究。E-mail:fsnhtlx@163.com

通信作者:王兮之(1971—),男,甘肃兰州人,教授,博士,主要从事基于 3S 技术的应用生态学研究。E-mail:wangxizhi71@163.com

模型的自动校准算法进行径流模拟,流域径流量的模拟值与实测值的效率系数达 0.7,相关系数达 0.8。Gikas 等^[5]利用 SWAT 模型在地中海一集水盆地进行径流模拟,模拟值得出的流域过程线与实测值保持一致。国内 SWAT 模型的应用也取得了不错的效果,赦芳华等^[6]基于亚流域划分分析了黄河下游支流洛河流域在不同土地利用和降雨的空间不确定性对模拟产流量和产沙量的影响,发现其模拟精度较高。王中根等^[7]将 SWAT 模型应用于西北寒区(黑河莺落峡以上流域)的日径流过程模拟。刘昌明等^[8]应用 SWAT 模型在黄河源区进行了不同气候和土地覆被条件的地表径流模拟,结果表明气候变化是引起黄河源区径流变化的主要原因。卢爱刚等^[9]利用 SWAT 模型进行了黄土高原水土流失格局模拟评价。肖军仓等^[10]利用 SWAT 模型在抚河流域进行土壤侵蚀模拟。李佳等^[11]利用 SWAT 模型研究了长江源土地利用/土地覆被情景变化对径流的影响。

由于连江流域位于粤北岩溶山区,而岩溶流域是由溶隙、溶洞、管道等多重复杂介质组成的复杂系统,其水文过程复杂。目前,SWAT 模型在岩溶地区的应用较少。本研究利用 SWAT 模型在连江流域进行径流模拟,通过敏感性分析模型在岩溶流域的主要影响因子,以期为该模型在岩溶流域的推广提供参考依据,也为该区域的生态保护、植被恢复和防灾减灾提供科学依据。

1 研究区概况

连江是珠江流域北江最大的一级支流,发源于连州市潭岭镇三姊妹峰,流经连州、连南、连山、阳山县、英德市,在英德市连江口镇汇入北江,河流全长 275 km。流域位于东经 $112^{\circ}40''$ — $113^{\circ}21''$ 、北纬 $23^{\circ}55''$ — $25^{\circ}12''$ 之间,集水面积 10 061 km²,集水区内多为山区,其中石灰岩山区约占流域面积的 40%,多为溶洞、裂隙发育的喀斯特地形。流域内共有高道、凤凰山和黄麝塘 3 个水文站,其中高道为连江流域的控制站,控制面积为 9 007 km²,凤凰山水文站和黄麝塘水文站的控制面积分别为 1 555 km² 和 645 km²。流域形状呈扇形,地势西北高,东南低,主要由中、低山脉、局部山区丘陵、河谷或盆地组成。该流域属亚热带季风气候区,冬短夏长,气候温和,雨量充沛,年平均气温为 19.5℃,多年平均年降水量为 1 685.7 mm,多年平均蒸发量为 903.9 mm。连江上游森林覆盖率高^[12-13],植被状态相对良好,河流在平水、枯水期含沙量小,汛期河流稍有浑浊。

2 数据处理与模型构建

2.1 基础数据处理

SWAT 模型主要输入数据一般包括数字高程模型(DEM)数据、土壤数据、土地利用数据、以及气象数据。模型校准和验证采用水文站的实测流量数据。

(1) 数字高程模型(DEM)数据。来源于 NASA 提供的 ASTER GDEM 数据,分辨率为 30 m(图 1),高程范围为 10~1 861 m。

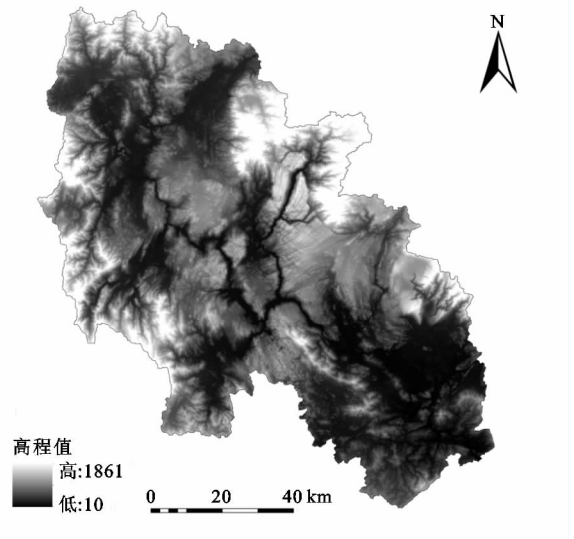


图 1 连江流域地形图

(2) 土地利用数据。利用 2006 年 12 月份 Landsat 5 TM 影像通过 ENVI 软件监督分类并结合模型的土地利用数据库解译生成,土地利用类型包括林地、灌丛、耕地、城镇用地、草地和水域(附图 1),面积百分比分别为 68.9%,16.02%,9.57%,2.47%,0.76%和 0.73%。

(3) 土壤数据。包括土壤空间数据与属性数据。空间数据来源于广东省生态环境与土壤研究所提供的广东省数字土壤图(1:100 万)。属性数据来源于中国科学院南京土壤研究所和广东土种志,由 17 种土类组成(附图 2),主要土壤类型有红色石灰土、麻黄壤、页红壤、水稻土等。

(4) 气象数据。包括气象站数据和雨量站数据。其中气象站数据为流域范围内的连州气象站 1951—2010 年多要素气象数据,来源于国家气象科学数据共享网。雨量站为流域范围内的 16 个雨量自动观测站 2001—2010 年的日平均降水数据。

(5) 流量数据。包括高道、凤凰山和黄麝塘 3 个水文站的实测日径流量数据。

为方便模型运行时的数据叠加分析,所有空间数据统一转换为 ArcGIS 所支持的 GRID 格式的栅格数据,分辨率为 30 m,投影方式设置为 WGS1984 UTM Zone 49N。

2.2 模型构建

SWAT 模型的水文计算过程以水文响应单元 (HRU) 为基础, 每个水文响应单元都具有特定的土地利用、土壤类型和管理方式。计算过程为: 首先以 DEM 为基础进行河网的生成和子流域的划分。然后通过 DEM、土地利用和土壤空间数据的叠加分析操作生成 HRU。再读取实测气象数据和用户土壤、土地利用等属性数据库, 进行流域水文过程演算。最后, 通过参数率定对模型进行校准和验证之后方可以进行径流等模拟。本研究选择 SCS 径流曲线方法模拟子流域径流, Penman-Monteith 法模拟潜在蒸发量, 变动存储系数法 (Variable Storage) 进行河道演算。

由于 SWAT 模型在平原地区提取的河网与实际存在较大偏差, 因此在流域划分前, 添加了流域范围内的实际河网, 同时加载高道、凤凰山和黄麋塘 3 个水文站作为用户自定义出水口, 用来对模拟结果进行校准与验证, 最终生成 97 个子流域, 365 个水文响应单元 (图 2)。

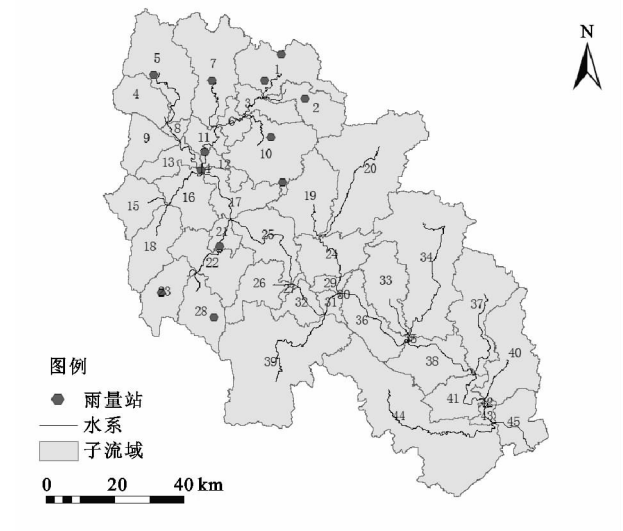


图 2 子流域划分

2.3 参数敏感性分析与模型校准

由于 SWAT 模型的参数众多, 一些参数对模型模拟结果的影响较小, 而一些参数则会显著影响模型的预测结果。因此需通过参数敏感性分析来判断哪些参数值的改变对模型的模拟结果影响更大, 从而提高模型校准的效率和模拟的精度。SWAT 模型中的参数敏感性分析模块采用 LH-OAT 分析方法, 它兼具 LH (Latin Hypercube) 抽样法和 OAT (One-factor-At-a-Time) 敏感度分析法的优点: 模型每运行一次仅一个参数值有变化, 并且某一特定输入参数值变化引起的输出结果灵敏度不受模型其他参数值选取的影响^[14]。通过敏感性分析可有效获取影响模型结果的主要参数因子, 是模型进行参数率定的依据。高

道、凤凰山和黄麋塘 3 个水文站敏感性分析得出的主要参数是 Alpha_Bf、ESCO、Gwqmn 和 SOL_AWC。凤凰山水文站敏感性分析结果见表 1。

表 1 凤凰山水文站敏感性分析结果

变量	参数描述	等级
Alpha_Bf	基流 a 系数	1
CN2	SCS 径流曲线系数	2
ESCO	土壤蒸发补偿系数	3
Gwqmn	浅层地下水径流系数	4
Revapmn	浅层地下水再蒸发系数	5
SOL_AWC	土壤可利用水量	6

2.3 模型适用性评价

由于每个流域受地形、土壤、土地覆被、气候等自然因素的影响, 而且还可能受到各种水利设施、不同的管理措施等人为因素的影响, 模型对不同流域的适用程度也不相同。当模型成功运行后, 需要对模型进行参数校准和验证, 以评价模型在研究区的适应性。模型的校准是使模型模拟结果接近于测量值, 验证是评价模型校准可靠性的过程。本研究选取 3 个评价指标: 相对误差 (Re)、决定系数 (R^2) 以及 Nash-Sutcliffe 效率系数 (Ens)。其中 Ens 的计算公式为:

$$Ens = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_{avg})^2} \quad (1)$$

式中: Q_p ——模拟值; Q_m ——实测值; Q_{avg} ——实测值的平均值; n ——实测数据个数。通常 $Re < 20\%$, $R^2 > 0.8$, $Ens > 0.5$, 即认为模型的拟合精度令人满意^[15]。

3 结果与分析

3.1 模型参数率定

本研究选取的数据时间段为 2001—2010 年。由于模型运行初期, 许多变量, 如土壤含水量的初始值为零, 这对模型模拟结果影响很大, 因此在很多情况下, 需要将模拟初期作为模型运行的启动阶段, 即预热期, 以合理估计模型的初始变量^[16]。因此本研究将数据系列分为预热期、校准期和验证期, 以 2001 年、2006 年作为预热期, 2002—2005 年作为校准期, 2007—2010 年作为验证期。

表 2 参数校准值

变量	取值范围	高道	凤凰山	黄麋塘
Alpha_Bf	0~1	0.048	0.06	0.05
CN2	35~98	62~72	55~82	67~90
ESCO	0~1	0.01	0.85	0.5
Gwqmn	0~5000	0.01	1000	1000
Revapmn	0~500	1	0.9	0.8
SOL_AWC	0~1	0.08	0.13	0.2

校准时,在 3 个子流域分别选取敏感参数 Alpha_Bf、CN2、Gwqmn、ESCO、Revapmn 和 SOL_AWC 进行参数率定,具体校准值详见表 2。

3.2 结果与分析

高道、凤凰山和黄麝塘 3 个水文站的适用性评价指标见表 3。校准期内,3 个水文站的月径流量的相对误差分别为 2.72%,5.91%和 1.63%,Ens 值分别为 0.97,0.89 和 0.70,决定系数均大于 0.9。验证期内,3 个水文站的相对误差分别为 2.62%,5.36%和 9.32%,Ens 值分别是 0.90,0.69 和 0.69,决定系数均大于 0.9,上述评价指标值均达到精度要求。另外,校准期的模拟精度较高、验证期的模拟精度略低,流域下游的高道水文站在校准期和验证期的模拟精

度均高于流域上游的凤凰山水文站和黄麝塘水文站。校准期和验证期年径流量的模拟值与实测值变化趋势和峰值基本一致,曲线拟合度较好,基本上反映了径流量的实际变化趋势(图 3—4)。上述结果表明,SWAT 模型适用于连江流域的径流模拟。

表 3 模型适用性评价指标

指标	时期	高道	凤凰山	黄麝塘
Re/%	校准期	2.72	5.91	1.63
	验证期	2.62	5.36	9.32
R ²	校准期	0.92	0.92	0.91
	验证期	0.94	0.93	0.92
Ens	校准期	0.97	0.89	0.70
	验证期	0.90	0.69	0.69

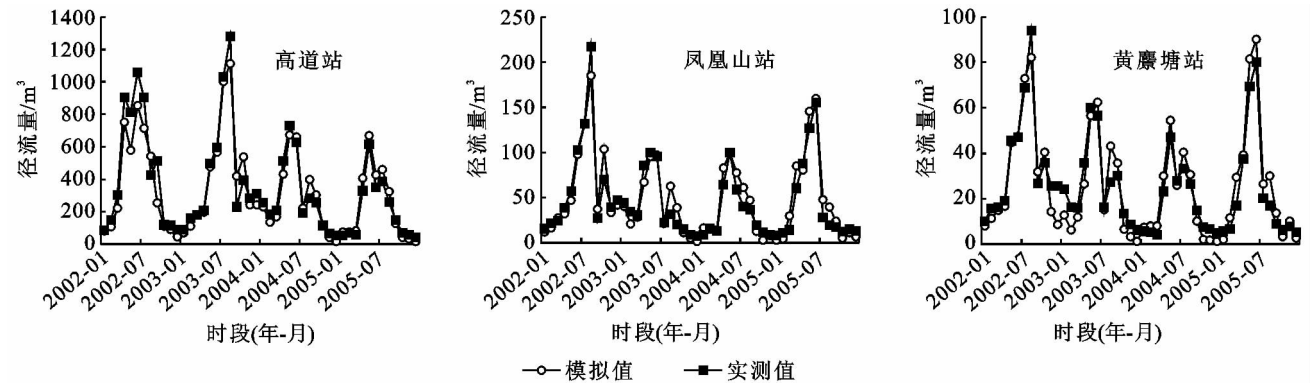


图 3 校准期连江流域各水文站实测值与模拟值拟合曲线

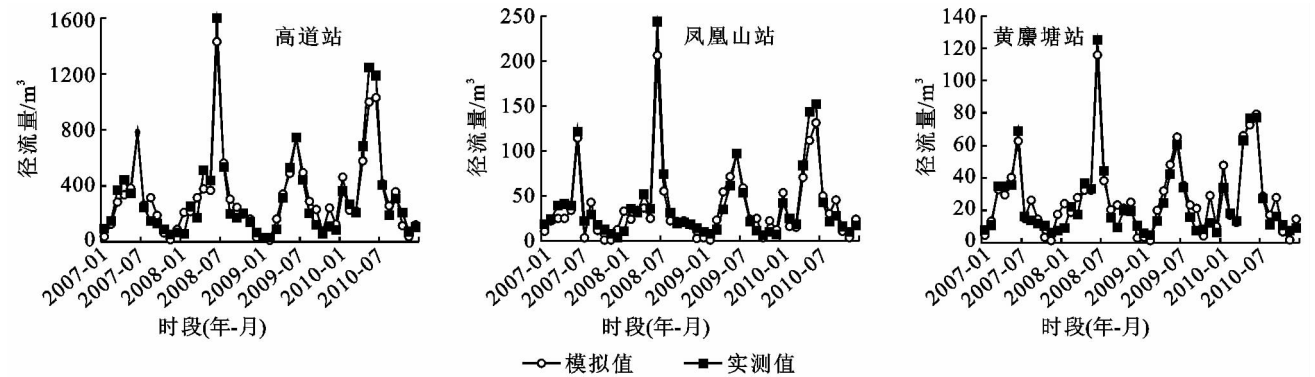


图 4 验证期连江流域各水文站实测值与模拟值拟合曲线

由于连江流域地处岩溶区域,而岩溶水文条件具有特殊性和复杂性,要准确模拟连江流域水文过程,需进一步修正和构建 SWAT 模型的土壤数据库或土地利用数据库,建立岩溶水文响应单元或添加与岩溶有关的土壤参数或土地利用参数来提高岩溶流域径流模拟的精度。

4 结论

本文利用 SWAT 模型对连江流域 2001—2010 年的径流量进行模拟,利用实测数据进行敏感性分析、参数率定和模型验证,运行结果良好,表明

SWAT 模型适用于该地区,并具有以下特点:

(1) 模型经过参数率定后,Nash-Sutcliffe 效率系数均大于 0.5、决定系数大于 0.9、相对误差均小于 20%,表明 SWAT 模型适用于模拟喀斯特流域的径流变化,能较好地反映流域内径流的年内、年际变化特征。

(2) 模拟结果的优劣,取决于模型参数的取值。Gwqmn(浅层蓄水层补偿深度)、ESCO(土壤蒸发补偿因子)、SOL_AWC(土壤可利用水)这 3 个参数的取值对研究区的径流量模拟有重要影响。因此,这些参数调整方法的选取可为模型在该地区的应用提供

必要的参考。

(3) 连江流域下游的控制站高道水文站的 Ens、决定系数和相对误差值高于上游的凤凰山水文站和黄麝塘水文站,而高道水文站的集水面积(9 007 km²)明显大于凤凰山水文站(1 555 km²)和黄麝塘水文站(645 km²),在一定程度上表明 SWAT 模型更适合应用于大尺度流域。

参考文献:

- [1] 徐宗学,程磊. 分布式水文模型研究与应用进展[J]. 水利学报,2010,41(9):1009-1017.
- [2] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation [EB/OL]. <http://www.brc.tamus.edu/swat/downloads/doc/swat2000theory.pdf>, 2002-05-16/2012-10-04.
- [3] Arnold J G, Allen P M, Bernhardt G. A comprehensive surface-groundwater flow model[J]. Journal of Hydrology,1993,142(1/4):47-69.
- [4] Eckhardt K, Arnold J G. Automatic calibration of a distributed catchment model[J]. Journal of Hydrology, 2001,251(1):103-109.
- [5] Gikas G D, Yiannakopoulou T, Tsihrintzis V A. Modeling of non-point source pollution in a Mediterranean drainage basin[J]. Environmental Modeling and Assessment,2006,11(3):219-233.
- [6] 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[J]. 水土保持学报,2003,17(4):75-78.
- [7] 王中根,郑红星,刘昌明. 基于模块的分布式水文模拟系统及其应用[J]. 地理科学进展,2005,24(6):109-115.
- [8] 刘昌明,李道峰. 基于 DEM 的分布式水文模型在大尺度流域应用研究[J]. 地理科学进展,2003,22(5):437-445.
- [9] 卢爱刚,索安宁,张镭. 基于 SWAT 模型的黄土高原典型区水土流失格局模拟评价[J]. 水土保持研究,2011,18(2):57-65.
- [10] 肖军仓,罗定贵,王忠忠. 基于 SWAT 模型的抚河流域土壤侵蚀模拟[J]. 水土保持研究,2013,20(1):14-24.
- [11] 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):119-128.
- [12] 甘春英,王兮之,李保生,等. 连江流域近 18 年来植被覆盖度变化分析[J]. 地理科学,2011,31(8):1019-1024.
- [13] 王兮之,甘春英,梁钊雄,等. 粤北岩溶山区连江流域植被覆盖度动态变化研究[J]. 中国岩溶,2010,29(4):425-433.
- [14] Muleta M K, Nicklow J W. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model[J]. Journal of Hydrology, 2005,306(1/4):127-145.
- [15] 杨军军,高小红,李其江,等. 湟水流域 SWAT 模型构建及参数不确定性分析[J]. 水土保持研究,2013,20(1):82-93.
- [16] 郝芳华,程红光,杨胜天. 非点源污染模型理论与应用[M]. 北京:中国环境科学出版社,2006:54-56.
- [17] Tzzy-Woei Chu. Modeling hydrologic and water quality response of a mixed land use watershed in piedmont physiographic[D]. College Park: University of Maryland, 2003.
- [18] 宋艳华. SWAT 辅助下的径流模拟与生态恢复水文响应研究:以陇西黄土高原华家岭南河流域为例[D]. 兰州:兰州大学,2006:57-59.
- [19] 秦大河. 中国西部环境演变评估综合报告[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [20] 邱国玉,伊婧,熊育久,等. 北方干旱化和土地利用变化对泾河流域径流的影响[J]. 自然资源学报,2008,23(2):211-218.
- [21] 吴宇丹. 变化环境下的北京市典型流域径流演变规律[D]. 北京:北京师范大学,2009.
- [22] 杨军军,高小红,李其江,等. 湟水流域 SWAT 模型构建及参数不确定性分析[J]. 水土保持研究,2013,20(1):82-88.

(上接第 139 页)

- [9] 张利平,秦琳琳,胡志芳,等. 南水北调中线工程水源区水文循环过程对气候变化的响应[J]. 水利学报,2010,41(11):1261-1271.
- [10] 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.
- [11] 罗巧,王克林,王勤学. 基于 SWAT 模型的湘江流域土地利用变化情景的径流模拟研究[J]. 中国生态农业学报,2011,19(6):1431-1436.
- [12] 袁长旭,姜卉芳. 天山山区水文模型参数的区域分布规律[J]. 新疆农业大学学报,2009,32(3):65-69.
- [13] 穆振侠. 高寒山区降水垂直分布规律及融雪径流模拟研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2010:181-184.
- [14] 马丽娟,赵景峰,张宏俊,等. 气候变化背景下冰川积雪融水对博斯腾湖水位变化的影响[J]. 干旱区地理,2010,33(2):210-216.