

基于 SWAT 模型的内蒙古锡林河流域降水—径流特征及不同水文年径流模拟研究

段超宇¹, 张 生¹, 李锦荣², 张成福¹, 綦俊谕³, 吴 用¹

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020; 3. 新布朗斯维克大学 林业与环境管理学院, 加拿大 弗雷德里顿 E3B 5A3)

摘 要:以我国北方寒旱区草原中典型流域——锡林河流域为研究对象,结合我国北方寒旱区草原型河流域的气候特点、下垫面条件及水文过程的特殊性,通过分析锡林河流域近 30 a 的降水—径流变化特征,利用锡林河水文站的年径流频率曲线,采用一定保证率条件下的年径流量作为划分流域丰平枯水年的标准,对锡林河流域历史水文年进行划分。基于此基础,以 ARCSWAT2012 为操作平台,应用地理统计分析方法,对模型建立过程中所需的各数据库进行基础数据整备与参数化,分析影响模型径流模拟精度的主要参数,进行模型的参数率定与结果精度评价,分别对锡林河流域各丰、平、枯水年进行径流模拟,并对其结果进行了检验。结果表明:SWAT 模型对细化流域降水—径流分配的径流模拟具有不同的精度,即平水年>偏丰水年>丰水年>偏枯水年>枯水年,体现出 SWAT 模型在中国北方寒旱区丰水年和平水年具有较好的可操作性。

关键词:径流模拟;水文年;SWAT;锡林河流域

中图分类号:P333.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)05-0292-06

Analysis on Rainfall-Runoff Characteristics and Simulation of the Different Hydrologic Year Runoff of Xilin River Basin in Inner Mongolia Based on SWAT Model

DUAN Chao-yu¹, ZHANG Sheng¹, LI Jin-rong², ZHANG Cheng-fu¹, QI Jun-yu³, WU Yong¹

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University,

Hohhot 010018, China; 2. Institute of Water Resources for Pastoral Area, Inner Mongolia, Hohhot 010020,

China; 3. Faculty of Forestry & Environmental Management, University of New Brunswick, Fredericton E3B 5A3, Canada)

Abstract: Xilin River is a typical grassland river located in Inner Mongolia, which is a cold-arid-region in the north of China. Its basin was investigated and some necessary experiments were carried out by means of hydrological processes. The hydrological nonlinear system theory, geological statistics, remote sensing and geographic information system were used to determine the parameters that are required by SWAT. In conclusion, using SWAT to simulate the hydrological processes in the cold-arid-regions with a characteristic of snowmelt-runoff could represent different accuracies. The best fitting result between the observed and simulated data was obtained for the normal hydrologic years, the worst for the dry years, between which the accuracies were partial wet years > wet years > partial dry year.

Key words: runoff simulate; hydrologic years; SWAT model; Xilin river basin

锡林郭勒草原位于内蒙古自治区中部,是我国温带典型草原的核心分布区和重要的草地畜牧业生产基地,同时也是我国北方草原牧区和农牧交错带的重要组成部分。它就像是我国北方一道绿色的生态屏障,能有效地阻止草原腹地的土壤侵蚀、沙化及来自

中亚和我国西部的沙尘侵害,对于维持整个华北地区,特别是京、津地区的生态环境安全起着非常重要的作用^[1]。近年来,锡林河流域在以水资源和矿产资源开发利用为标志的高强度人类社会经济活动下,流域自然生态过程发生着明显的变化,以天然植被为主

体的生态系统, 因人为改变水资源的时空格局受到严重影响^[2]。流域内水资源分配的不均匀, 导致中下游流域极度干旱, 目前已出现断流情况, 上游产流区对中下游地区的社会经济和环境变化有着举足轻重的作用。因此, 作为我国北方寒旱区草原资源科学研究中最典型的流域——锡林河流域, 如何运用科学的方法进行水资源分布调查、储量分析、优化管理及水资源的预测和保护已成为目前锡林河流域地区社会经济环境可持续发展的大问题。

锡林河流域的水资源主要来源于降水, 降水的多少对流域水资源的数量及时空分布有着重要的影响, 同时也决定了流域内水资源的丰枯^[3]。目前多数文献对流域内的径流模拟仅限于单一年份^[4]或连续年内^[5-7]的模拟, 对细化水资源分配的不同水文年模拟提及较少。因此, 本研究以国内外应用较为广泛的 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型^[8-10]为操作平台, 通过分析内蒙古锡林河域多年降水—径流特征, 对流域内不同的水文年份进行径流模拟研究, 从而探讨 SWAT 模型在锡林河流域这样特殊的自然环境条件下的适用性及不同水文年份内的径流模拟精度, 为锡林河流域水资源科学管理和可持续利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 流域概况

锡林河属内蒙古内陆河流, 全长 175 km, 流域面积 105 452 km², 地理坐标介于 43°26′—44°39′N, 115°32′—117°12′E 之间。它发源于赤峰市克什克腾旗宝尔图西南山顶, 海拔高度 1 334 m, 自东向西分别流经赤峰市的克什克腾旗与锡林郭勒盟的阿巴嘎旗, 在贝尔克牧场转向西北经过锡林浩特市, 最终注入查干诺尔沼泽地自然消失^[11]。流域自东南向西北依次为多级玄武岩台地、低山塔拉、山前洪积平原^[12]。锡林河流域是我国北方典型的草原区域, 流域内有 90% 的面积覆盖着草原, 植物生长期约 150 d^[13]。

1.2 降水—径流特征及水文年划分

1.2.1 降水—径流特征 锡林河流域地处中国北方寒旱区, 夏季温暖降雨集中, 冬季寒冷积雪丰富, 春季融雪产生较强的径流与夏季降水会形成明显的双峰型地表径流。就流域内降水而言, 锡林河流域在气候类型上为内陆半干旱气候向东南湿润、半湿润季风气候的过渡带^[14]。据统计^[15], 锡林河流域 1971—2000 年的年均降水量为 292.6 mm, 年潜在蒸发量为 1 700 mm, 干旱指数为 2。5—9 月是锡林河流域主要的降

雨期, 其余月份为积雪期。图 1 为锡林河流域 1971—2000 年的多年降水量的年内分配图。

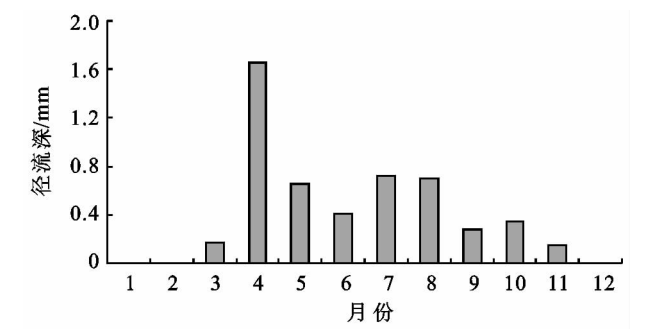


图 1 锡林河流域降水分配

通过对锡林河水文站 1971—2000 年实测径流资料统计可知, 锡林河多年平均径流总量 1 958.5 万 m³, 年均径流深 5.08 mm。由年均径流深仅占年降水量的 1.8% 可知, 锡林河流域每年约有 98.2% 的降水用于蒸发。从图 2 可以看出, 锡林河年内径流分配极不均匀, 表现为明显的双峰型地表径流特征。每年 12 月到次年 2 月, 由于河水封冻, 径流量几乎为零。4 月份后, 伴随着气温的回暖, 地表大量冰雪在太阳辐射的作用下开始融化, 但此时由于土壤层中的温度依旧低于地表温度, 土壤层处于冻结状态, 融雪水难以向土壤层入渗, 导致大量融雪水汇入河道, 形成春汛。经过计算, 锡林河流域 4 月份融雪形成的径流占全年总径流的 32.5%。5—9 月是锡林河流域主要的汛期, 地表径流的产生全部以降雨为主。其中 7 月和 8 月集中了全年 56% 的降水。从图 2 还可以看出, 锡林河流域在 7 月和 8 月产生的径流量相对 4 月份偏低, 这是因为 7 月和 8 月是锡林河流域植被生长最旺盛的时期, 此时的降水一部分用于植被蒸散发消耗, 另一部分用于产生径流。10 月中旬后, 锡林河流域进入到积雪期。

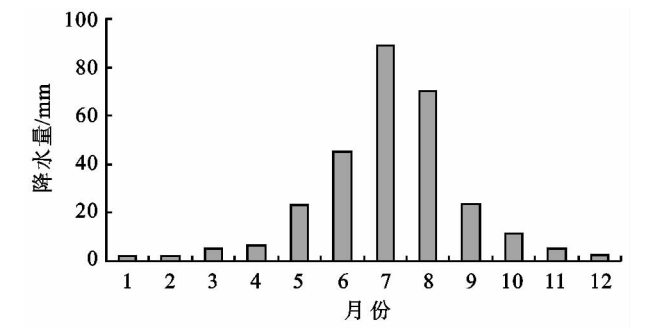


图 2 锡林河流域径流分配

1.2.2 丰平枯水年划分 根据 GB/T50095—98 水文基本术语和符号标准中对河川径流丰平枯水年的划分标准, 本文通过利用锡林河水文站年径流频率曲线, 采用一定保证率^[16]的年径流量作为划分流域丰平枯水年的标准。年径流量丰平枯水年划分标准如表 1 所示。

表 1 锡林河流域年径流量水文年划分标准

水文年划分级别	划分标准 P (保证率)
丰水年	$P \leq 12.5\%$
偏丰水年	$12.5\% < P \leq 37.5\%$
平水年	$37.5\% < P \leq 62.5\%$
偏枯水年	$62.5\% < P \leq 87.5\%$
枯水年	$P > 87.5\%$

通过对锡林河水文站 1971—2000 年的径流量进行水文年划分可知,近 30 年内锡林河流域共出现 11 个丰水年(3 个丰水年和 8 个偏丰水年)、3 个平水年和 16 个枯水年(4 个枯水年和 12 个偏枯水年),分别占 36.7%,10%和 53.3%。同时,从时间尺度上还可以看出,流域径流呈现出以每 10 年为周期的变化规律,即 1971—1980 年偏多,1981—1990 年偏少,1991—2000 年偏多。表 2 为锡林河流域水文年划分结果。

表 2 锡林河流域年径流量水文年划分结果

年份	水文年划分	年份	水文年划分	年份	水文年划分
1971	偏丰水年	1981	偏枯水年	1991	平水年
1972	平水年	1982	偏枯水年	1992	偏丰水年
1973	偏枯水年	1983	偏枯水年	1993	丰水年
1974	偏丰水年	1984	枯水年	1994	偏枯水年
1975	偏枯水年	1985	枯水年	1995	偏枯水年
1976	偏枯水年	1986	偏丰水年	1996	偏丰水年
1977	偏枯水年	1987	丰水年	1997	平水年
1978	偏丰水年	1988	偏枯水年	1998	丰水年
1979	偏丰水年	1989	枯水年	1999	偏枯水年
1980	枯水年	1990	偏丰水年	2000	偏枯水年

1.3 模型构建与数据准备

1.3.1 模型结构 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)是由美国农业部农业研究中心(USDA-ARS)开发的流域尺度模型^[17-19]。针对区域性水文评价而言,SWAT 模型目前在我国各流域的水文过程中已经得到了非常广泛的应用,但是相对于寒旱区降水时空分布不均、下垫面条件复杂、水文气象监测站分布少等特点,SWAT 模型在我国北方寒旱区的模拟仍旧存在很大的困难。本文以中国北方寒旱区典型流域——锡林河流域为研究对象,通过对其径流进行模拟,为寒旱区水资源的利用与保护提供理论依据。

SWAT 模型中对水文循环的模拟计算基于水量平衡方程,见公式(1):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_i - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

式中:SW_t——土壤最终含水量(mm);SW₀——土壤前期含水量(mm);t——时间步长(day);R_{day}——第 i 天降雨量(mm);Q_{surf}——第 i 天的地表径流(mm);

E_i——第 i 天的蒸发量(mm);W_{seep}——第 i 天存在于土壤剖面底层的渗透量和侧流量(mm);Q_{gw}——第 i 天地下水出流量(mm)。

1.3.2 数据准备 构建 SWAT 模型所需要的主要基础数据包括:数字高程模型(DEM)、土地利用类型(Landuse)、土壤空间分布(Soil)及水文气象实测数据等。本研究在划分研究区范围时,考虑到近年来锡林河流域内水资源分配的不均匀性,位于锡林浩特市水库以北的锡林河流域下游已出现极度干旱、断流等现象,且流域内仅有锡林河水文站一个监测站,通过对锡林河流域实地考察,结合流域水文站位置及水文站以北的流域水系走向,以锡林河水文站为中心,东西各取 1 000 km 进行勘探人为确定流域的北面边界。

DEM 数据来源于中国科学院国际科学数据服务平台(<http://datamirror.csdb.cn/index.jsp>)SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)90 m 分辨率原始高程数据(30 m 分辨率的 DEM 拼接后图像上有坏点,图像信息发生丢失,不能继续划分流域)。通过应用 ArcGIS 10.0 对所获得图像进行拼接、投影变化等预处理最终生成锡林河流域 DEM,见附图 6。

SWAT 模型中建议土地利用类型不超过 10 种,如果数据类型超过 10 种,则需要对其进行重分类,目的是减少模型最后生成的 HRU 的数量。土地利用数据是内蒙古师范大学内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室在中国科学数据服务平台上下载 TM 影像并对其进行提取、合并、矢量转化,同时运用 ArcToolbox 中 Reclassify 工具对 2000 年锡林河流域各土地利用类型重新合并,分类结果见附图 7,土壤类型数据来源于寒区旱区科学数据中心 1:100 万土壤数据库,如附图 8 所示。

本研究区地处牧区,地广人稀,由内蒙古气象站点分布可知,研究区内没有气象站点。针对这一现状和特点,本文选择与研究区相邻的气象站作为研究区气象数据的输入依据。研究区周围的气象站点有锡林浩特站(54102)、阿巴嘎旗站(53192)、西乌珠穆沁旗站(54012)及林西站(54115),除锡林浩特站外其余三站都距研究区较远。通过对各站气象数据进行差异分析后可知,各站多年平均降水量为:林西站(389.6 mm)>西乌珠穆沁旗站(353.01 mm)>锡林浩特站(292.62 mm)>阿巴嘎旗站(256.33 mm),四站的平均降雨量为 322.89 mm。在查阅大量文献后和咨询当地水文站工作人员与牧民后,得出锡林河流域上游年降水量一般在 300 mm 左右,因此模型在进行气象数据的输入时,将四站气象数据全部导入到天气发生器,综合考虑锡林浩特站更贴近研究区的实际降水情

况,故选择锡林浩特站($43^{\circ}57'N$, $116^{\circ}07'E$)1971—2000年的日值数据作为模型模拟的依据。气象数据来源于国家气象信息中心气象资料室中国地面气候资料日值数据集,包括日平均气压、最高气压、最低气压、平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、最小相对湿度、平均风速、最大风速及风向、极大风速及风向、日照时数、降水量。水文数据采用锡林河水库上游的锡林河水文站1971—2000年实测逐日径流资料。

2 结果与分析

根据流域内1971—2000年的水文年份划分结果,考虑到模型的率定期必须同时包括丰平枯不同的水文年份,将1971—1987年作为模型的率定期,1988—2000年作为模型的验证期,其中1971—1973年为模型的预热期。参数率定过程中,对流域所划分的9个子流域在径流的校核上遵循先上游后下游;先调整水量平衡再调整过程;先调整地表径流再调整土

壤水、蒸发和地下径流的原则^[20]。通过实地调查流域水文过程进行手动调参,最终确定影响不同水文过程的参数分别是:①地表水分配参数CN2;②植被蒸发参数IPET、CANMX、ESCO、CNOP;③土壤水参数SOL_AWC;④地下水参数ALPHA_BF、GWQMN、GW_REVAP、REVAPMN、RCHRG;⑤融雪参数SFTMP、SMTMP、SMFMX、SMFMN、TIMP、SNOCVMX。

2.1 丰水年径流模拟

(1) 偏丰水年。由表2可知,率定期内的偏丰水年份共有4个,分别为1974年、1978年、1979年和1986年;验证期内的偏丰水年份有3个,分别为1990年、1992年和1996年。模型对偏丰水年的径流模拟结果显示,率定期内的相关系数 R^2 为0.62,纳什系数 E_{ns} 为0.59,验证期内的 R^2 为0.77, E_{ns} 为0.72,模拟结果较满意。图3为率定期和验证期的偏丰水年内 SWAT 模型径流拟合结果。

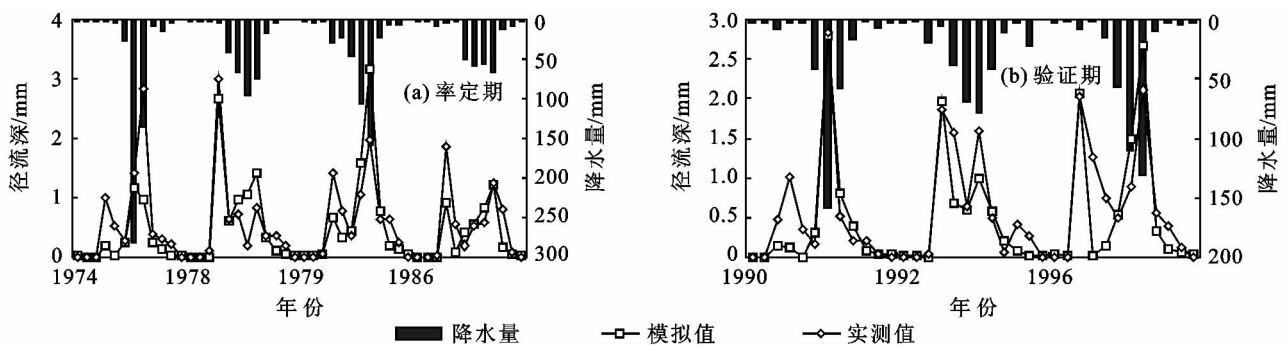


图3 偏丰水年内 SWAT 模型径流拟合结果

(2) 丰水年径流模拟。同样,对流域的丰水年份进行模拟。从模拟结果可以看出,丰水年的径流模拟精度在率定期时($R^2=0.80$, $E_{ns}=0.78$)较优于偏丰水年,而在验证期时的模拟精度($R^2=0.60$, $E_{ns}=0.52$)却

略低于偏丰水期。造成这样的模拟结果可能是由于1998年全国范围内降水量普遍偏大,模型对水量突增的特殊年份没有较好的适应性。图4为率定期和验证期的丰水年内 SWAT 模型径流拟合结果。

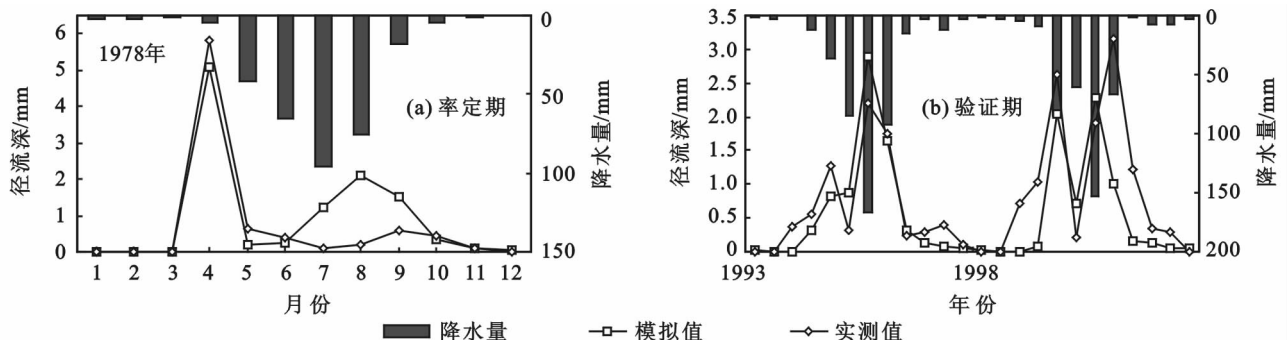


图4 丰水年内 SWAT 模型径流拟合结果

2.2 平水年径流模拟

由于锡林河流域在1971—2000年内平水年出现的频率较少,仅有1972年、1991年和1997年这3个年份,且1972年又处于模型的预热期内,因此模型在对平水年的径流模拟评定中只对平水年做模型的验

证。验证结果显示,平水年的 R^2 为0.7979, E_{ns} 为0.65。率定期和验证期的平水年内 SWAT 模型径流拟合结果见图5。

2.3 枯水年径流模拟

通过对锡林河流域偏枯水年和枯水年进行模拟

发现, SWAT 模型不论在偏枯水年还是枯水年对径流的模拟效果均不理想。枯水年夏季降雨偏少, 蒸发量因植被的生长依旧很高, 实测径流远远低于模拟值。图 6 和图 7 分别是偏枯水年和枯水年内 SWAT 模型径流拟合结果。

通过以上对锡林河流域丰平枯不同的水文年份进行径流模拟的结果可以看出, 模型在模拟流域丰水年和平水年时具有比较理想的模拟效果, 在枯水年时模拟的精度不高。SWAT 模型在不同水文年的模拟精度依次为: 平水年>偏丰水年>丰水年>枯水年>

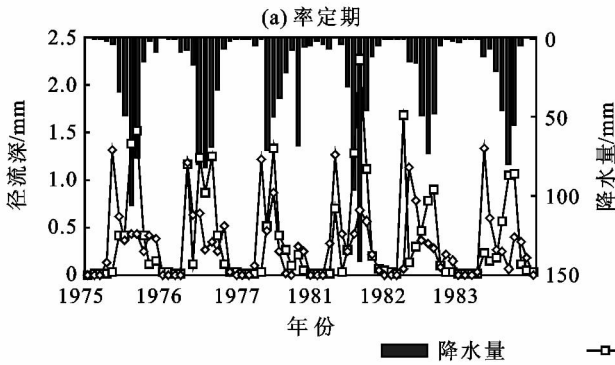


图 6 偏枯水年内 SWAT 模型径流拟合结果

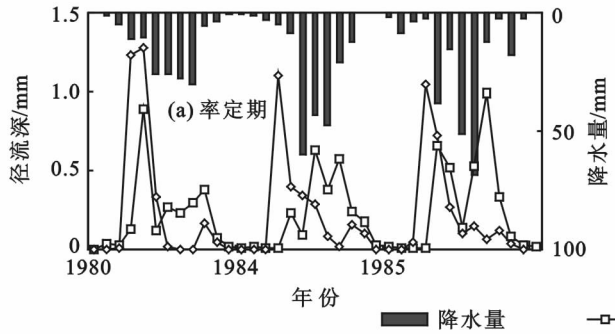


图 7 枯水年内 SWAT 模型径流拟合结果

3 结论

基于 SWAT 模型对内蒙古锡林河流域上游不同水文年展开的径流模拟研究表明, SWAT 模型在细化流域降水—径流模拟时具有不同的精确程度, 即平水年>偏丰水年>丰水年>偏枯水年>枯水年。虽然 SWAT 模型从整体上看在该流域具有满意的模拟效果, 但相比南方半湿润、湿润区, SWAT 模型在中国北方寒旱区的模拟效果上仍旧不尽如人意。造成这样的原因可能有两个方面: (1) 寒旱区降水—径流分配不均匀, 模拟时对蒸发、融雪等物理过程把握不清晰; (2) 该区域地理面积大, 水文气象监测站点分布少, 数据稀缺。数据的准确性与详细性会直接影响到模型对水文过程的模拟, 对寒旱区而言今后应当加强水文气象的监测。此外, 今后还应当对

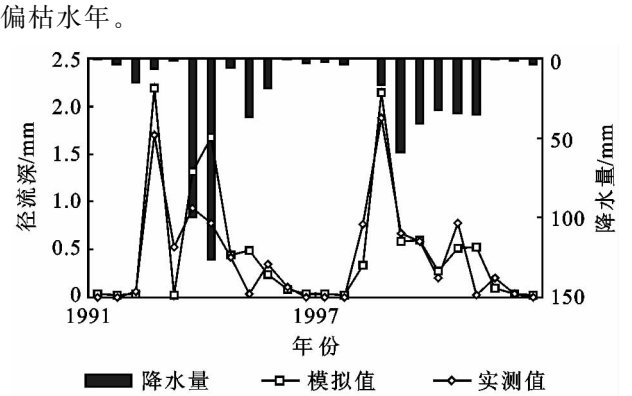
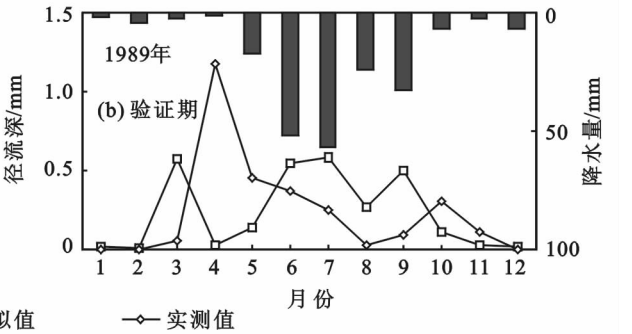
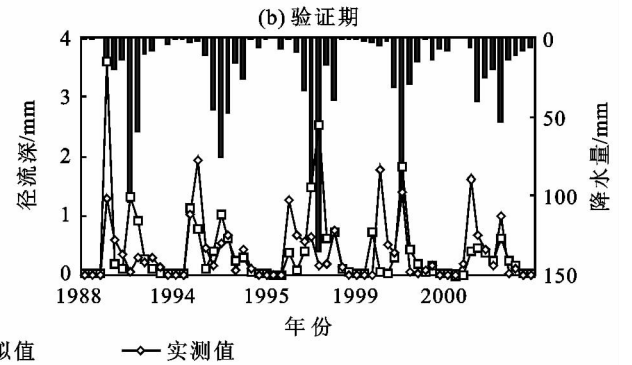


图 5 平水年内 SWAT 模型径流拟合结果



SWAT 模型的积雪融雪模块加以改进, 使 SWAT 模型在模拟我国北方寒旱区径流时具有更高的模拟精度。

参考文献:

[1] 洪立国. 锡林河流域草原利用现状与保护对策研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2009.

[2] 王忠华. 锡林郭勒盟草原退化沙化原因分析及其保护利用对策[J]. 内蒙古科技与经济, 2002, 2(2): 49-51.

[3] 范广洲, 吕世华, 程国栋. 华北地区夏季降水资源特征分析及其对气候变化的响应[J]. 高原气象, 2002, 21(1): 45-50.

[4] 袁军营, 苏保林, 李卉, 等. 基于 SWAT 模型的柴河水库流域径流模拟研究[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2010, 46(3): 361-365.

[5] 李慧, 雷晓云, 靳晟. 基于 SWAT 模型的山区冰雪融水

河流的日径流模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(3): 105-108.

[6] 于磊,朱新军. 基于 SWAT 的中尺度流域土地利用变化对水文响应模拟研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(4): 53-56.

[7] 龙银平,张耀南,赵国辉,等. SWAT 模型水文过程模拟的数据不确定性分析:以青海湖布哈河流域为例[J]. 冰川冻土, 2012, 34(3): 660-667.

[8] Nie W, Yuan Y, Kepner W, et al. Assessing impacts of Landuse and Landcover changes on hydrology for the upper San Pedro watershed[J]. Journal of Hydrology, 2011, 407(1): 105-114.

[9] 张蕾,卢文喜,安永磊,等. SWAT 模型在国内外非点源污染研究中的应用进展[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2387-2392.

[10] 康杰伟,李硕. SWAT 模型运行结构与组织研究[J]. 地球信息科学, 2007, 9(5): 76-82.

[11] 李杨,贾德彬,朱仲元,等. 融雪的水量平衡模型在内蒙古锡林河流域水文模拟中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2003, 22(1): 79-86.

[12] 全川,雍伟义,乌云娜,等. 锡林河流域近 15 年植被空

间结构变化遥感分析[J]. 内蒙古大学学报, 2001, 32(9): 562-566.

[13] 陈佐忠. 草原生态系统研究(第 3 集)[M]. 北京:科学出版社, 1988.

[14] 季劲钧,刘青,李银鹏. 半干旱地区地表水平衡的特征和模拟[J]. 地理学报, 2004, 59(6): 964-971.

[15] 包苏雅. 锡林河流域景观格局动态变化研究[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学, 2012.

[16] 温川,殷战阳. 格尔木河格尔木站年径流特征及丰平枯水年划分[J]. 科技信息, 2011(13): 447-450.

[17] 胥彦,秦耀民,李怀恩,等. SWAT 模型在陕西黑河流域非点源污染模拟中的应用[J]. 水土保持通报, 2009, 29(4): 114-219.

[18] 郭晓军,崔鹏,朱兴华. 典型泥石流流域蒋家沟的降雨—径流模拟[J]. 水土保持通报, 2011, 31(1): 176-179.

[19] 李丽娇,薛丽娟,张奇. 基于 SWAT 的西苕溪流域降雨—径流关系及水量平衡分析[J]. 水土保持通报, 2008, 28(5): 81-85.

[20] 朱新军,王中根,李建新,等. SWAT 模型在漳卫河流域应用研究[J]. 地理科学进展, 2006, 25(5): 105-111.

(上接第 291 页)

[10] 孙桂丽,陈亚宁,李卫红,等. 新疆极端水文事件年际变化及对气候变化的响应[J]. 地理科学, 2011, 31(11): 1389-1394.

[11] 谢平,李析男,许斌,等. 基于希尔伯特—黄变换的非一致性洪水频率计算方法:以西江大湟江口站为例[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(1): 86-91.

[12] 方彬,武见,肖义,等. 混合分布在枯水流量频率分析中的应用研究[J]. 石河子大学学报:自然科学版, 2006, 24(2): 231-233.

[13] 钟瑞森,董新光. 新疆博斯腾湖水盐平衡及水环境预测[J]. 湖泊科学, 2008, 20(1): 58-64.

[14] 施雅风. 简明中国冰川目录[M]. 上海:上海科学技术普及出版社, 2005.

[15] 蓝永超,钟英君,吴素芬,等. 天山南—北坡典型河流出山径流对气候变化响应的分析对比[J]. 中国沙漠, 2011, 31(1): 254-259.

[16] 邓铭江,王世江,董新光,等. 新疆水资源及可持续利用

[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005: 150-167.

[17] 黄俊利,魏文寿,杨青,等. 塔克拉玛干沙漠南缘极端降水变化趋势与突变特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2012, 6(2): 30-34.

[18] 陶辉,宋郁东,邹世平,等. 开都河天山出山径流量年际变化特征与洪水频率分析[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1): 43-48.

[19] 刘贤赵,李嘉竹,宿庆,等. 基于集中度与集中期的径流年内分配研究[J]. 地理科学, 2007, 27(6): 791-695.

[20] 杨帆. 区域气候背景下流域极端气候与水文事件的关系研究[D]. 郑州:郑州大学, 2011.

[21] 钟瑞森,吴彬. 开都河径流年内分配特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(2): 123-125.

[22] 贺斌,王国亚,苏宏超,等. 新疆阿尔泰山地区极端水文事件对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2012, 34(4): 927-932.

[23] 郑祚芳,张秀丽. 北京极端天气事件及其与区域气候变化的联系[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(3): 55-593.