

引用格式:金鑫,金彦香,杨登兴.SWAT模型在土地利用/覆被变化剧烈地区的改进与应用,2018,20(8):1064-1073. [Jin X, Jin Y X, Yang D X. Improved SWAT and its application to a region with severe Land Use/ Land Cover changes[J]. Journal of Geo-information Science, 2018,20(8):1064-1073.] DOI:10.12082/dqxxkx.2018.170606

SWAT模型在土地利用/覆被变化剧烈地区的改进与应用

金鑫¹,金彦香^{1*},杨登兴¹

青海师范大学地理科学学院, 西宁 810016

Improved SWAT and Its Application to a Region with Severe Land Use / Land Cover Changes

JIN Xin¹, JIN Yanxiang^{1*}, YANG Dengxing¹

Qinghai Normal University, College of Geographical Science, Xining 810016, China

Abstract: Population growth, climate change, institutional change and urbanization etc. would cause the change of land use / land cover, which in turn would further affect the hydrological process (e.g. infiltration, surface runoff, evapotranspiration and lateral flow) and water balance. Currently, because of the difficulties in obtaining the yearly land use / land cover data and the problems in calculating process in hydrological models, the simulation of hydrological process under the impact of land use / land cover change is conducted on one period each time and the impacts of multiple periods (e.g. multiple years) of land use / land cover change cannot be simulated continuously. That is the models could not call land use / land cover data year by year seamlessly. SWAT (Soil and Water Assessment Tools) is a distributed hydrological model. During its simulation period, it could not call land use / land cover data year by year and neglects the land use / land cover change in time scale. This would impact its applications in regions with severe land use / land cover changes (e.g. the Middle Reaches of the Heihe River). Heihe River Basin is the second largest and a typical endorheic river basin in China. The middle reach consumes a major portion of the water in the Heihe River. For the weakness of SWAT model, this research developed a model called LU-SWAT that could simulate the impacts of multiple years of land use / land cover change continuously. Furthermore, we applied SWAT and LU-SWAT to simulating streamflow in the Middle Reaches of the Heihe River, and compared their efficiency. The results showed that the LU-SWAT model, which could call land use / land cover data year by year is more suitable to simulate the streamflow in the Middle Reaches of the Heihe River.

Key words: SWAT; land use / land cover; model modification; streamflow simulation; middle reaches of the Heihe River

***Corresponding author:** JIN Yanxiang, E-mail: jinyx13@lzu.edu.cn

收稿日期 2017-12-13;修回日期:2018-04-09.

基金项目 青海省科技厅自然科学基金项目(2017-ZJ-961Q);青海师范大学中青年科研基金项目(15ZR10);国家自然科学基金项目(D010102-91125010) [**Foundation items:** Natural Science Foundation of Qinghai Province, No.2017-ZJ-961Q; Foundation for Yong and Middle aged teachers of Qinghai Normal University, No.15ZR10; National Natural Science Foundation of China, No.D010102-91125010.]

作者简介 金鑫(1988-),女,讲师,博士,研究方向为GIS与水文模型的耦合。E-mail: jinx13@lzu.edu.cn

***通讯作者** 金彦香(1989-),女,讲师,博士,研究方向为水文学与水资源。E-mail: jinyx13@lzu.edu.cn

摘要: 人口增长、气候变化、制度变迁、城市化等均会导致土地利用/覆被的变化,进而引起流域水文过程(截留、入渗、蒸散发和地下水补给等)和水循环过程的改变。当前,由于逐年土地利用/覆被数据获取困难、水文模型本身计算缺陷等问题,所有在流域尺度上开展的借助水文模型进行的土地利用/覆被变化影响下的水文模拟研究都存在一个共同缺点,就是采用的水文模型并不能逐年调用土地利用/覆被数据,即水文模型无法真实体现或模拟土地利用/覆被的时空变化。SWAT作为一个广泛应用的分布式水文模型,在其模拟期内,不能逐年调用土地利用/覆被数据,即在进行水文模拟时忽略了土地利用/覆被时间上的变化,这可能会影响其在土地利用/覆被变化剧烈地区(如黑河中游)的应用。黑河流域是典型的内陆河流域,也是中国西北地区第二大内陆河流域。黑河中游是黑河流域的径流耗散区。本文针对SWAT模型在考虑土地利用/覆被变化时的缺点,对其进行了改进并开发出能够逐年调用土地利用/覆被数据的LU-SWAT模型。在土地利用/覆被变化剧烈的黑河中游对SWAT和LU-SWAT模型的径流模拟效果进行比较,发现LU-SWAT模型更适用于黑河中游水循环模拟。

关键词: SWAT; 土地利用/覆被; 模型改进; 径流模拟; 黑河中游

1 引言

有物理基础的分布式(或半分布式)水文模型能明确地反映流域水文过程的空间变异性,其在分析研究气候变化、人类活动等影响下流域水文过程的变化方面有重要的应用^[1-2]。SWAT (Soil and Water Assessment Tools)模型作为一个典型的分布式水文模型,由于其代码开放、功能强大、在很多流域的模拟效果令人满意等特点,在全世界范围内得到了广泛运用。例如,刘昌明等^[3]在黄河源区运用SWAT模型模拟了其月、年河道径流量; Jin等^[4]在黑河上游采用SWAT模型分析了土壤属性空间异质对水文过程的影响;王胜等^[5]利用SWAT模型分析了气候变化对淮河流域中上游水量平衡要素的影响。

土地利用/覆被变化是全球环境变化的重要组成部分和主要原因^[6]。大量研究表明,土地利用/覆被是水文过程模拟的关键参数,影响截留、入渗、蒸散发和地下水补给等水文过程^[7-8]。SWAT作为一个分布式的水文模型,它首先将整个研究流域根据流域的地形因子、河网分布等特征划分为若干子流域。在此基础上,进一步按流域的土地利用/覆被类型、土壤类型和坡度面积阈值划分水文响应单元 (Hydrological Response Units, HRUs)^[9]。为了模型计算的简洁性,在SWAT模型的模拟期内,假设流域内的土地利用/覆被类型、土壤类型和坡度不变^[9]。然而,在某些受人类活动干扰强烈的流域,土地利用/覆被类型发生剧烈变化,进而影响流域水循环过程。而SWAT模型忽略了这一点,其不论模拟期多长,仅使用某一年的土地利用/覆被数据。这使得模型在土地利用/覆被变化剧烈地区的应用存在缺陷。目前,部分研究在模型模拟时考虑了土地利用/覆被的变化:Zhou等^[10]在中国长江三角洲地区通过

SWAT模型模拟了在城市化过程中,流域水文过程的变化; Li等^[11]在中国的延河流域,通过SWAT模型研究了人类活动影响下流域土地利用/覆被的变化及其对流域水平衡的影响;张凌等^[12]在SWAT模型中模拟多个情景下土地利用发生变化后对黑河流域中游水文过程的影响;王学等^[13]基于SWAT模型研究了白马河流域土地利用/覆被的变化对径流的影响。这些研究中,由于SWAT模型假设模拟时段内研究区土地利用/覆被类型不变,因此将模拟时段进行了均匀的划分。例如,若模拟时段为1995-2014年,先将此20年分为相等的4个子时段:1995-1999年、2000-2004年、2005-2009年、2010-2014年,再分别利用这5个模拟时段内某一年的土地利用/覆被数据在这些时段内分别驱动SWAT模型。这种方式基本关注了土地利用/覆被在整个模拟时段内的变化,但是对于模型操作者而言,这复杂化了水文模型的建立和模拟运行过程,且这种方式可能依然难以反映土地利用/覆被的剧烈变化。

因此,本研究针对SWAT模型不能反映模拟时段内土地利用/覆被变化的特点,在HRUs生成方式、模型计算等方面对SWAT模型进行了相应改进,使其在模拟时段内能够逐年调用土地利用/覆被数据。最后,将改进后的SWAT模型应用于近几十年来土地利用/覆被类型发生了复杂而剧烈变化的黑河中游^[14-15],并验证其模拟效果。

2 研究区概况与数据源

研究区位于黑河流域中游(图1),地形为南北倾斜,地势呈西高东低、南高北低,海拔在1400~1700 m之间,土壤主要为灰棕漠土,约占整个中游面积的61%。其余土壤类型有栗钙土及淡栗钙土、棕漠土、荒漠风沙土等^[4]。黑河流域中游走廊平原

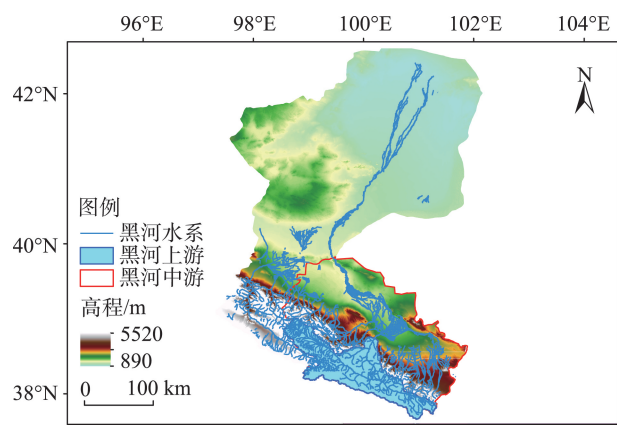


图1 研究区
Fig. 1 The study area

区降水量东高西低,东部降水大概在 250 mm 左右,西部只有 50 mm 以下,但是蒸发量则自东向西递增,东部蒸发量大概在 2000 mm 以下,而西部则有 4000 mm 以上。黑河中游走廊平原丰富的光热资源和地下水资源以及来自黑河河道的水资源,使其成为了发展农业的理想地区^[16]。因此,在黑河中游,河水被大量引入水渠,用于农业灌溉。2000 年以来,由于调水和上游的截引,使中下游部分县区用水压力激增,威胁着当地居民的生产生活用水。为了保证中游城市用水和农业灌溉用水量,中游对地下水的开采量逐年增加。中游地区在人类活动影响下的剧烈土地利用/覆被变化改变了区域水循环过程以及水资源的空间分布^[16-17]。

建立 SWAT 模型所需的地表参数有土壤数据、土地利用/覆被数据、地形、河网数据以及流域出口位置^[9]。其中,土壤类型数据为甘肃省 1:100 万土壤类型数据,相关土壤水文属性数据查自《甘肃省土壤志》以及《青海省土壤志》。模型模拟期内的逐年土地利用/覆被数据基于黑河中游 1990–2009 年 Landsat TM 影像,采用人机交互的监督分类方法进行遥感影像解译得到。综合考虑《中国土地利用分类系统》和 SWAT 水文模型中的土地利用类型分类,此处将土地利用类型分为:耕地、林地、草地、水域、居民用地和裸地。除此之外,DEM 数据的空间分辨率为 30 m × 30 m,由 DEM 提取的河网仅仅考虑了地形因子,没有考虑到人类活动等因素对河网的影响。因此,本研究还需要用实际流域河网对 DEM 数据得到的河网进行修正。流域实际河网从 1:10 万地形图上人工数字化得到。建立模型所需的气象数据来自于高台、金塔、酒泉、临泽、民乐、山丹、肃南、张掖、祁连、托勒、野牛沟、

永昌 12 个站点的降水、温度、风速、相对湿度、日照时数数据。以上数据均来自于基金委寒区旱区科学数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn/>)。图 2 显示了在黑河中游提取的河网以及子流域,此处共划分了 92 个子流域。



图2 黑河中游子流域划分结果
Fig. 2 Division of sub-watershed in the middle reach of the Heihe River

黑河中游流域光照充足、土地资源丰富、地势平坦,集中了整个黑河流域约 97.6% 的人口及上中游流域 98.5% 的耕地^[18]。因此本研究在研究区重点调查、收集了中游农田管理措施以及生活用水的相关资料,调查得到的流域内农田管理信息主要包括灌溉措施、耕作、收获时间等。黑河中游不同灌区的灌溉水量、灌溉水源等都不同(表 1),在 SWAT 模型中设定灌溉措施时需考虑灌溉措施的空间异质性。

表 1 黑河中游灌区灌溉量(m^3/m^2)
Tab. 1 The irrigation volume in districts in the middle reach of the Heihe River

	黑河灌区			梨园河灌区		沿山灌区			
	甘州	高台	临泽	临泽	甘州	高台	山丹	民乐	
河水	0.93	0.91	1.06	0.72	1.2	0.89	0.19	1.67	
地下水	0.28	0.36	0.19	0.02	0	0	0.09	0	

3 研究方法

3.1 SWAT 模型简介

SWAT 作为一个半分布式的水文模型,它首先将整个研究流域根据流域的地形因子、河网分布等特征划分为若干子流域。在此基础上,SWAT 进一

步按流域的土地利用类型、土壤类型和坡度面积阈值划分水文响应单元,即HRUs。由于SWAT假设模拟时段内土地利用类型、土壤类型和坡度不变,因此生成的HRUs不会因为模拟年份的不同而改变属性。每一个单独的HRU上,SWAT采用概念性模型估算降雨、产流、泥沙等。这些计算完成后进行河道汇流演算。最后求得出出口断面的流量、泥沙量和污染负荷量^[9]。

SWAT模型模拟的流域水文过程可分为:①水循环之陆面部分(产流和坡面汇流部分),它控制着每个子流域内主河道的水、沙、营养物质等的输入量;②水循环之水面部分(河道汇流部分),它决定水、沙等物质从河网向流域出口的输移^[9]。

根据水量平衡原理,SWAT模型的水量计算遵循下式^[9]:

$$S_t = S_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} - E_t - S_{\text{seep}} - Q_{\text{gw}}) \quad (1)$$

式中: S_t 为土壤含水量/mm; S_0 表示前期的土壤含水量/mm; t 表示模型模拟的时间步长; R_{day} 表示第 i 天的降水量/mm; Q_{surf} 表示第 i 天的地表径流量/mm; E_t 表示实际的蒸发量/mm; S_{seep} 表示第 i 天的土壤渗透量/mm; Q_{gw} 表示基流量/mm。

此外,SWAT模型中的灌溉操作有人工灌溉操作和自动灌溉操作2种。本研究采取人工灌溉操作的方式。SWAT模型通过日期或者热单位来安排人工灌溉操作。用户输入的灌溉量是指到达土壤的水量。SWAT模型通过灌溉效率来考虑从水源到土壤的损失水量,包括传输损失以及蒸发损失。以地表径流离开田间的水量占灌溉水量的分数为地表

径流比,剩余的水分渗入田间土壤,用SWAT模型的土壤水演算方法计算。这样可以真实地表达土壤坡面的农业漫灌方式^[9]。

3.2 SWAT模型改进

SWAT模型的基本计算单元是HRUs。每个HRU由土地利用、土壤类型和坡度共同定义^[9]。同一个HRU由多个栅格组成,这些栅格可以在空间上相邻,也可以彼此分离。HRUs的数量、面积和空间位置由土地利用图、土壤类型图和坡度图中的斑块数量、斑块面积和斑块位置共同决定^[9]。本研究用于生成HRUs的数据中,土壤类型和坡度不变,而土地利用逐年变化。使SWAT模型逐年调用土地利用/覆被数据,首先要保证利用多年土地利用/覆被数据生成的HRUs的数量、面积和空间位置不变。如图3所示,为了保证利用多年土地利用/覆被数据生成的HRUs的数量、面积和空间位置不变,在生成HRUs之前,首先将研究时段内的逐年土地利用数据进行空间叠加(按照年份先后),生成叠加后的土地利用图并得到其对应的属性表,该属性表中有斑块号以及各个斑块所对应的不同年份的土地利用类型等属性。将空间叠加后的土地利用图与土壤类型图、坡度图再次进行空间叠加,叠加过程中逐年调用前一步生成的属性表中各个斑块对应的不同年份的土地利用类型,生成不同年份的HRUs。这样一来,将原本不同年份的土地利用图对应到叠加后的图上,各个年份的土地利用图具有相同的斑块数量、面积和空间位置,但是每个斑块对应的属性(土地利用类型)可能因年份而不同。这保证了最后生成的每一年的HRUs的数量、面积

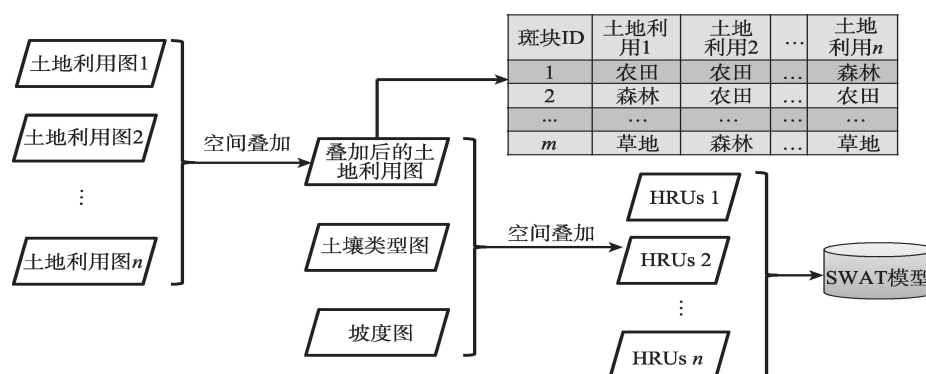


图3 HRUs生成过程修改示意图

Fig. 3 The sketch map of HRUs producing process

和空间位置不变,给基于土地利用变化的SWAT模型的后续计算提供了可能。

实现SWAT模型对土地利用/覆被数据的逐年调用,不仅仅要重新定义生成HRUs的过程,使得用不同年份土地利用数据生成的HRUs保持数量、面积和空间位置的一致。更重要的,需要修改原始SWAT模型的运算流程。原始的SWAT模型在计算之前先进行参数初始化,后进入日循环。这并不能实现土地利用的逐年调用。图4为作了相应改进后的SWAT模型的运算流程。与原始的SWAT模型相

比,新的SWAT模型在参数初始化之前加入了一层循环结构,使程序在初始化参数之前读取当前年份的输入数据(HRUs数据),而后计算进入日循环阶段。程序所读取年份的上一年若是模拟时段的最后一年,则结束计算。否则每年最后一天的模拟结束之后将模型模拟结果写入文件并再次读取本年份的输入数据并进行相应的参数初始化,再进入日循环。根据新的模型计算结构修改SWAT源代码,使其能真正体现土地利用数据的逐年变化。本研究用Fortran语言在Windows平台应用程序开发

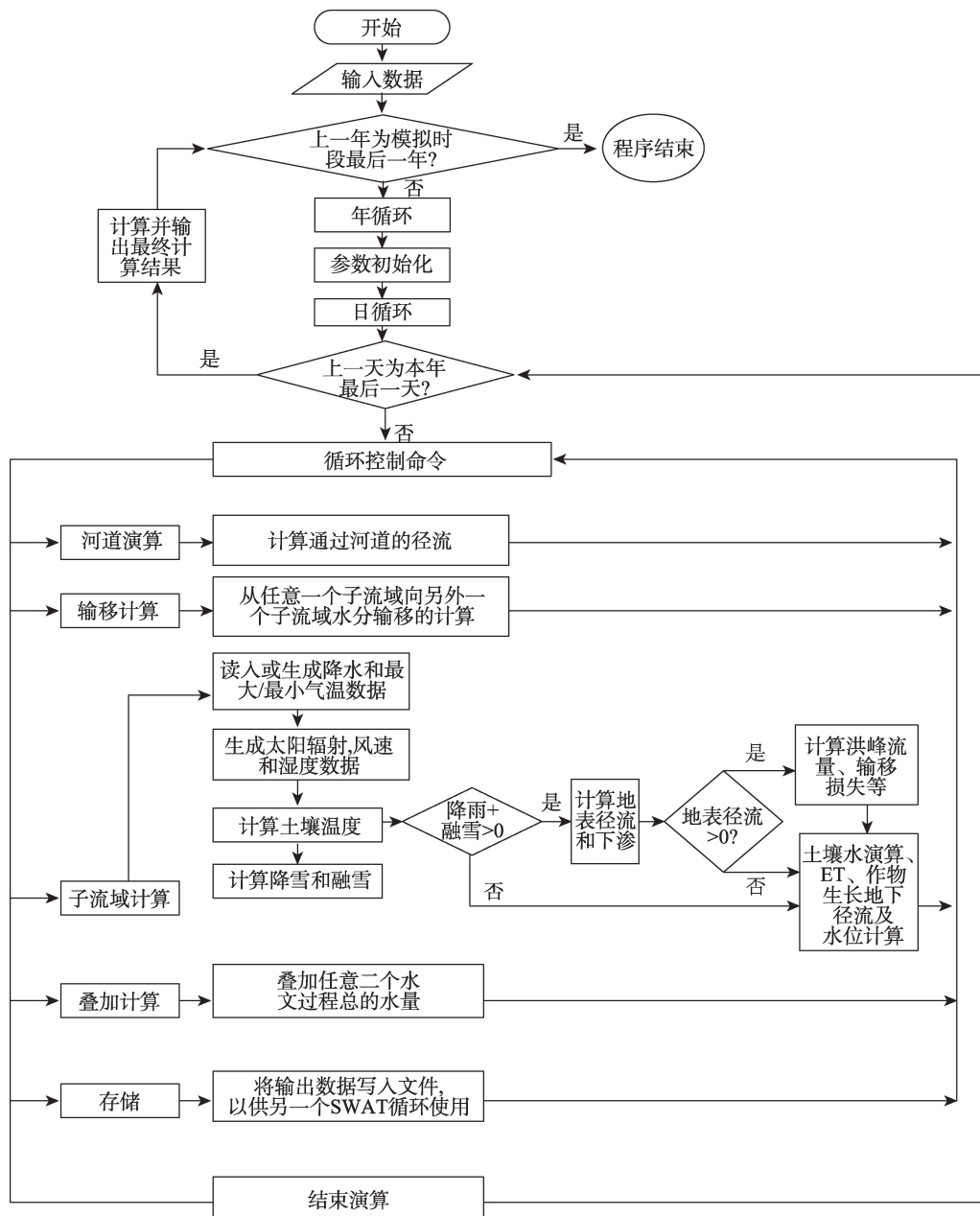


图4 改进后的SWAT模型计算流程

Fig. 4 Calculating steps of modified SWAT model

环境 Visual Studio 2010 中根据以上结构对 SWAT 源代码 (Rev. 635) 进行修改。主要修改 simulate.f、main.f 等子程序。修改并编译成功后, 替换原始的 SWAT.exe 可执行程序。由于改进后的 SWAT 模型实现了对土地利用/覆被数据的逐年调用, 因此本文将改进后的 SWAT 模型命名为 LU-SWAT。

3.3 模型模拟效果评价因子

选取那什系数 (Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)、误差百分数 (Percent Bias, PBIAS)、均方根误差与标准误差比率 (Ratio of the Root Mean Square Error to the Standard Deviation of Measured Data, RSR) 评价 SWAT 模型的适用性。NSE 的取值范围为 $(-\infty, 1)$, NSE 越接近 1, 则表示 SWAT 模型的模拟效果好且模型的可信度高; NSE 越接近 0.5, 则表示模型模拟结果接近观测值的平均水平, 模型总体结果可信。而 PBIAS 介于 -10% 到 10% 之间, 则表明模型模拟效果好。RSR 越小则表明模型模拟效果越好。对于 3 个评价因子的详细计算过程以及意义, 请参考 Moriasi 等^[19]的研究。

4 结果分析

4.1 黑河中游土地利用/覆被变化

表 2 显示了黑河中游土地利用动态度, 黑河中游的土地利用变化存在以下规律: 耕地、林地和城镇均为增加趋势, 但是城镇面积占整个研究区面积的比例较小。1990–2009 年黑河中游的土地利用变化主要表现在: 耕地、林地和城镇均为增加趋势, 其中, 城镇面积增加较快, 增幅较大, 增加了原面积的 1 倍多。但城镇面积占研究区总面积的比例较小。林地面积呈稳定增加趋势, 20 年增加了 55.70%。耕地面积增加了 14.78%。草地和裸地面积为减少趋势, 其中草地面积减少了 10.15%, 裸地面积减少了 21.11%。水域面积增加了 14.10%。本文所述均为各土地利用/覆被类型 20 年的总体变化趋势, 但由表 2 可看出, 任何一种土地利用/覆被类型的逐年变化是不同的。例如, 耕地面积逐年增加, 但增加的幅度有大有小; 草地面积总体为减少趋势, 但个别年份有增加趋势。因此, 更说明某一年的土地利用/覆被数据无法代表长时段的区域土地利用/覆被情况。还需要说明的是, 土地利用/覆被变化本身会对水循环过程产生影响, 而因土地利用/覆被变化导致

表 2 黑河中游土地利用动态度 (%)

Tab. 2 The land use/ cover dynamic degrees in middle reach of the Heihe River (%)

时段	耕地	林地	草地	水域	城镇	裸地
1990–1991	0.91	0.91	-1.28	-2.56	15.39	0.023
1991–1992	1.03	2.41	-1.43	27.19	10.66	-1.96
1992–1993	1.15	1.83	-1.25	-10.34	6.61	0.43
1993–1994	1.08	2.40	-0.20	-5.76	11.85	-1.14
1994–1995	1.00	2.26	-1.47	-7.34	6.05	0.15
1995–1996	1.04	1.98	-1.05	14.10	10.05	-1.65
1996–1997	1.18	2.89	-1.33	5.78	7.35	-1.29
1997–1998	0.96	2.65	-1.32	1.09	10.87	-1.14
1998–1999	1.01	2.13	-0.25	-1.44	5.81	-1.33
1999–2000	0.74	1.65	0.10	-0.36	4.12	-1.32
2000–2001	0.27	3.50	-0.22	-1.47	3.29	-1.44
2001–2002	0.35	3.75	0.01	-0.37	7.02	-2.24
2002–2003	0.55	3.61	-0.21	2.24	0.59	-1.84
2003–2004	0.34	1.05	-0.03	0.36	2.96	-0.93
2004–2005	0.50	3.58	-0.32	-0.36	2.30	-1.81
2005–2006	0.32	1.07	-0.07	-1.46	4.50	-0.98
2006–2007	0.36	3.30	-0.18	-0.37	2.96	-1.94
2007–2008	0.53	3.13	0.03	-1.11	2.87	-2.17
2008–2009	0.41	0.70	-0.10	0.75	2.28	-0.86

的流域取用水变化亦在一定程度上影响水循环。例如, 在黑河中游, 耕地面积从 1990–2009 年增加了 14.78%, 这会进一步影响农业灌溉量。而在黑河中游, 农业灌溉是影响流域水循环的重要因素^[16,18]。此外, SWAT 模型改进前, 其在黑河中游划分的 HRUs 数量为 2661 个, 而经过改进后的 LU-SWAT 模型, 其 HRUs 数量增加为 4816 个。在土壤类型和地形数据不变的情况下, 说明在 LU-SWAT 模型中有 2155 个 HRUs 上的土地利用/覆被在 20 年间发生了变化。这对模型计算有必然的影响。

4.2 SWAT 与 LU-SWAT 在黑河中游的模拟效果对比

4.2.1 模型调参

由于 LU-SWAT 模型与 SWAT 模型相比, 并没有物理过程、计算方法等方面的改变, 因此本研究认为 SWAT 与 LU-SWAT 的敏感性参数一致。此处参考 White 和 Chaubey 的研究, 选取 SWAT 模型中与水循环过程相关的 22 个参数进行了敏感性分析^[20]。敏感性分析方法采用多元回归模型将拉丁超立方 (Latin Hypercube) 抽样生成的参数与目标函数值进行回归:

$$g = \delta + \sum_{i=1}^n \theta_i a_i \quad (2)$$

式中: g 为目标函数; δ 、 θ_i 为回归方程的系数; a_i 为参数值; n 为参数数目。表3中 t 值用于检测每个参数的敏感性,其绝对值越大表明参数越敏感,表3中 p 值用于确定敏感度的显著程度,值越接近0表明越显著。

表3 SWAT 参数敏感性分析结果
Tab. 3 Sensitivity analysis of SWAT model

参数名	参数意义	t 值	p 值
ESCO	土壤蒸发补偿因子	0.39	0.86
CANMX	最大冠层截留量	-0.41	0.85
HRU_SLP	平均比降	0.44	0.81
RCHRG_DP	深层含水层的渗透系数	0.49	0.78
SURLAG	地表径流滞后系数	0.52	0.76
OV_N	坡面漫流的曼宁系数	-0.55	0.68
EPCO	植物吸收补偿因子	0.6	0.67
BIOMIX	生物混合效率	-0.63	0.63
SLSUBBSN	平均坡长	0.64	0.6
GWQMN	发生回归流所需的浅层含水层的水位阈值	0.7	0.45
SMFMX	6月21日的融雪因子	-0.74	0.41
REVAPMN	渗入深层含水层所需的浅层含水层水位阈值	0.92	0.37
TIMP	积雪温度滞后因子	0.97	0.34
SFTMP	降雪气温	-0.99	0.32
GW_DELAY	地下水的延迟时间	1.02	0.31
GW_REVAP	地下水的再蒸发系数	-1.15	0.25
SMFMN	12月21日的融雪因子	-1.37	0.17
GWQMN	发生回归流所需的浅层含水层的水位阈值	1.86	0.06
CH_N2	主河道的曼宁系数	-2.49	0.01
ALPHA_BF	基流因子	6.11	0
CN2	水分条件II时的初始SCS径流曲线数	8.59	0
CH_K2	主河道冲积物的有效渗透系数	-14.09	0

表3显示了参数敏感性分析结果。对于SWAT模型,本研究选取表3中最敏感的前10个参数进行率定,即主河道冲积物的有效渗透系数(CH_K2),水分条件II时的初始SCS径流曲线数(CN2),基流因子(ALPHA_BF),主河道的曼宁系数(CH_N2),发生回归流所需的浅层含水层的水位阈值(GWQMN),每年12月21日的融雪因子(SMFMN),地下水的再蒸发系数(GW_REVAP),地下水的延迟时间(GW_DELAY),降雪气温(SFTMP)和积雪温度滞后因子(TIMP)。水文模型的参数率定过程并不是简单的对实测数据的拟合,而是综合考虑流域特征,在不超出参数合理范围的前提

下进行参数率定,使模拟数据接近实测数据。因此,本文在进行参数率定时首先根据黑河流域已有研究对各个敏感性参数进行取值范围限定^[21-22],而后利用Arnold等^[9]的研究中提到的多步骤手动调参法进行。

由于LU-SWAT模型逐年调用土地利用/覆被数据,因此在参数率定时,为了体现土地利用/覆被变化对模型参数的影响,本研究采用“参数动态率定”的方法,使不同的土地利用数据对应不同的最优参数组合。如上文所述,在对SWAT进行参数率定时选取了10个敏感参数。因此,在对LU-SWAT模型进行参数率定时,选取10个参数中受土地利用/覆被影响的4个参数进行率定(CH_K2、CN2、ALPHA_BF、GW_REVAP),其他参数值不变。用模拟得到的20年逐年土地利用/覆被数据分别驱动LU-SWAT模型,并利用正义峡水文站实测出山径流数据校正LU-SWAT模型,得到20组最优参数组合。

4.2.2 SWAT与LU-SWAT模拟效果对比

图5和表4显示了SWAT模型对黑河中游正义峡水文站月径流量的模拟效果。由表4可知,NSE值为0.67;PBIAS值达到4.33%;RSR值达到0.57。因此,SWAT模型对黑河中游月出山径流量的模拟效果较好。黑河中游正义峡站年径流量的SWAT模型模拟效果也较好(图6、表4):NSE值为0.72,PBIAS值达到4.33%,RSR为0.53。与黑河中游已有研究相比^[12,22],本研究中SWAT模型的模拟效果略好。前已述及,在黑河中游,农业灌溉是影响流域水循环的重要因素。本研究在SWAT模型建立时分不同灌区输入了详细的农业灌溉数据,考虑了农业灌溉在空间上的变化,因此本研究建立的SWAT模型在黑河中游获得了更好的径流模拟效果。

图5、6和表4还显示了黑河中游正义峡站LU-SWAT模型月、年径流量模拟效果。与SWAT模型相比,月尺度上,NSE值达到了0.74,PBIAS值为7.42%,RSR值为0.51;年尺度上,NSE值达到了0.77,PBIAS值为7.42%,RSR值为0.48。也就是说,LU-SWAT模型在黑河中游的径流模拟效果更好。这可能是因为黑河中游正义峡的径流量主要受该流域农业灌溉的影响,而农业灌溉水量主要受当年农田面积、作物种类等的影响。本研究中,不仅使LU-SWAT模型逐年调用了土地利用/覆被数据,还在调用相应年份的HRUs时针对不同灌区、不同作物逐年输入了详细的农业灌溉数据。原始的SWAT

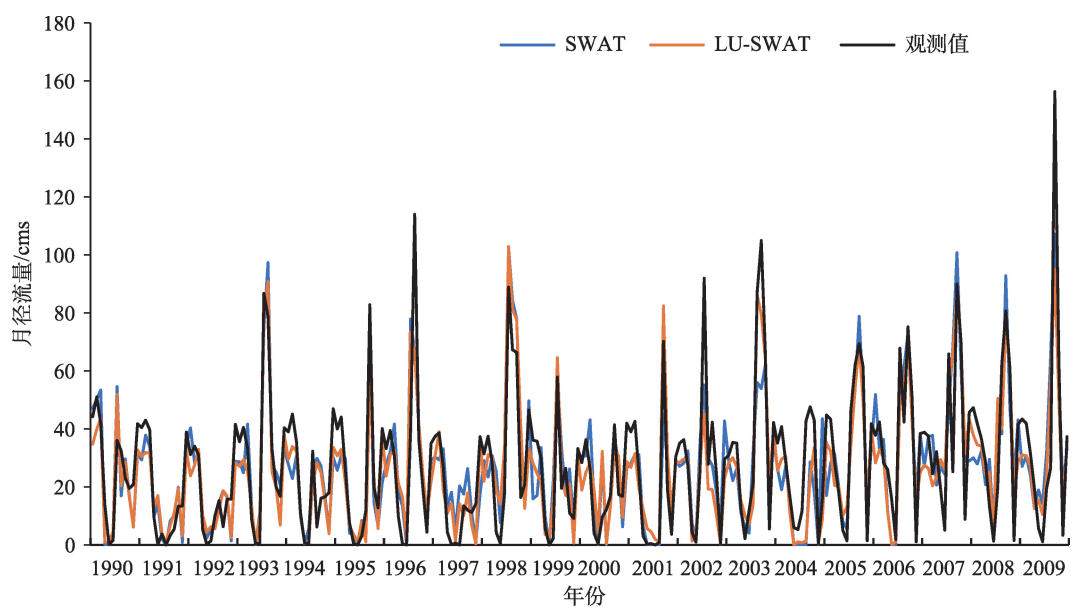


图5 黑河中游正义峡站SWAT及LU-SWAT模型模拟的月径流量与实测值对比

Fig. 5 Comparison of SWAT and LU-SWAT simulated and observed monthly stream flow in middle reach of the Heihe River

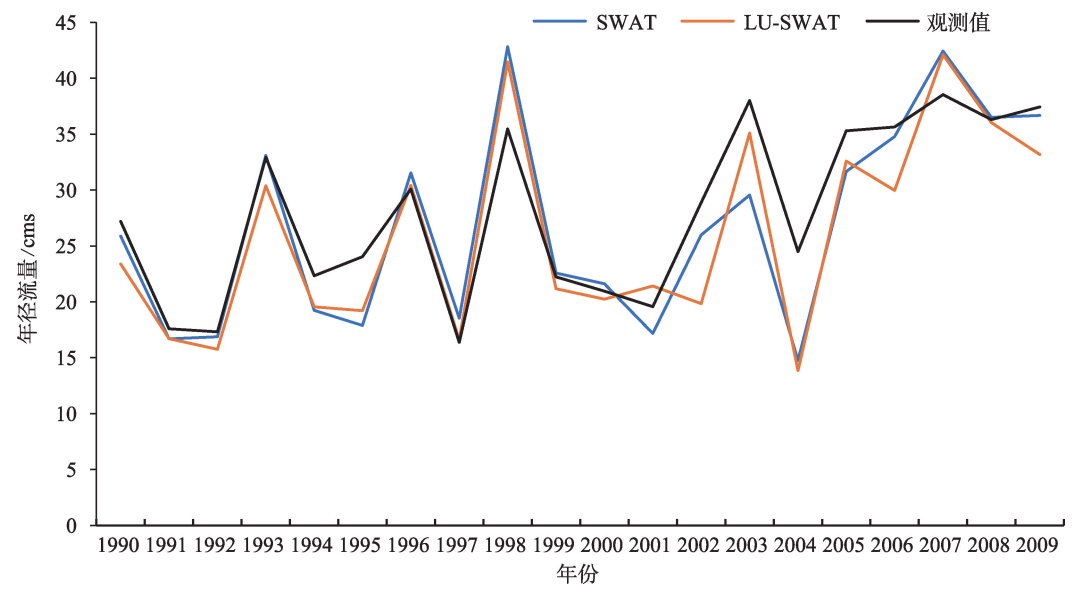


图6 黑河中游正义峡站SWAT模型模拟的年径流量与实测值对比

Fig. 6 Comparison of simulated and observed yearly stream flow in middle reach of the Heihe River

模型由于其HRUs保持不变,也就很难反映HRU上可能发生的灌溉量的逐年改变。但改进后的LU-SWAT模型不仅可以反映流域土地利用/覆被的变化,也能体现黑河中游不同HRUs的农业灌溉逐年变化情况。这使得LU-SWAT模型能够更准确地模拟黑河中游的径流量变化。因此,与SWAT模型相比,能够逐年调用土地利用/覆被数据的LU-SWAT模型更适合于土地利用/覆被变化剧烈的黑河中游。

表4 黑河中游正义峡站SWAT及LU-SWAT模型月、年径流量模拟效果评价

		Tab. 4 Performance assessment of SWAT and LU-SWAT model with simulating of monthly and yearly stream flow in middle reach of the Heihe River		
		NSE	PBIAS/%	RSR
月径流量	SWAT	0.67	4.33	0.57
	LU-SWAT	0.74	7.42	0.51
年径流量	SWAT	0.72	4.33	0.53
	LU-SWAT	0.77	7.42	0.48

5 结论

(1)本研究针对SWAT模型不能反映模拟时段内土地利用/覆被变化的特点,在HRUs生成方式、模型计算等方面对SWAT模型进行了相应改进,实现了其在模拟时段内对土地利用/覆被数据的逐年调用,开发了LU-SWAT模型;

(2)将SWAT模型与LU-SWAT模型应用到土地利用/覆被变化复杂、剧烈且受农业灌溉影响大的黑河中游并比较2个模型的模拟效果,发现能够逐年调用土地利用/覆被数据的LU-SWAT模型更适用于黑河中游。

参考文献(References):

- [1] Droogers P, Avau L, Immerzeel W W. Quantifying the impact of model inaccuracy in climate change impact assessment studies using an agro-hydrological model[J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2008,12(2):669-678.
- [2] Bhatti A M, Koike T, Shrestha M. Climate change impact assessment on mountain snow hydrology by water and energy budget-based distributed hydrological model[J]. *Journal of Hydrology*, 2016,543(B):523-541.
- [3] 刘昌明,李道峰,田英,等.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. [Liu C M, Li D F, Tian Y, et al. An application study of DEM based distributed hydrological model on macroscale watershed[J]. *Progress in Geography*, 2003,22(5): 437-445.]
- [4] Jin X, Zhang L H, Gu J, et al. Modelling the impacts of spatial heterogeneity in soil hydraulic properties on hydrological process in the upper reach of the Heihe River in the Qilian Mountains, Northwest China[J]. *Hydrological Processes*, 2015,29(15):3318-3327.
- [5] 王胜,许红梅,高超,等.基于SWAT模型分析淮河流域中上游水量平衡要素对气候变化的响应[J].*气候变化研究进展*,2015,11(6):402-411. [Wang S, Xu H M, Gao C, et al. Water balance response of the climate change based on SWAT model in the Upper-Middle Reach of Huaihe River Basin[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2015, 11(6):402-411.]
- [6] 刘纪远,匡文慧,张增祥,等.20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J].*地理学报*,2014, 69(1):3-14. [Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014,69(1):3-14.]
- [7] 王根绪,杨玲媛,陈玲,等.黑河流域土地利用变化对地下水资源的影响[J].*地理学报*,2005,60(3):456-466. [Wang G X, Yang L Y, Chen L, et al. Impacts of land use changes on groundwater resources in the Heihe River Basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005,60(3):456-466.]
- [8] 刘剑宇,张强,陈喜,等.气候变化和人类活动对中国地表水文过程影响定量研究[J].*地理学报*,2016,71(11):1875-1885. [Liu J Y, Zhang Q, Chen X, et al. Quantitative evaluations of human and climate induced impacts on hydrological processes of China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016,71(11):1875-1885.]
- [9] Arnold J G, Moriasi D N, Gassman P W, et al. SWAT: Model use, calibration, and validation[J]. *Transactions of the Asabe*, 2012,55(4):1345-1352.
- [10] Zhou F, Xu Y, Chen Y, et al. Hydrological response to urbanization at different spatio-temporal scales simulated by coupling of CLUE-S and the SWAT model in the Yangtze River Delta region[J]. *Journal of Hydrology*, 2013,485(5):113-125.
- [11] Li J, Zhou Z X. Coupled analysis on landscape pattern and hydrological processes in Yanhe watershed of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015,505(1):927-938.
- [12] 张凌,南卓铜,余文君.基于模型耦合的土地利用变化和水文响应多情景分析[J].*地球信息科学学报*,2013,15(6): 829-839. [Zhang L, Nan Z T, Yu W J. Coupling LUCC and Hydrological models to predict land use and hydrological response under multiple Scenarios[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2013,15(6):829-839.]
- [13] 王学,张祖陆,宁吉才.基于SWAT模型的白马河流域土地利用变化的径流响应[J].*生态学杂志*,2013,32(1):186-194. [Wang X, Zhang Z L, Ning J C. Runoff response to land use change in Baimahe basin of China based on SWAT model[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013,32(1): 186-194.]
- [14] 李传哲,于福亮,刘佳,等.近20年来黑河干流中游地区土地利用/覆被变化及驱动力定量研究[J].*自然资源学报*,2011, 26(3):353-363. [Li C Z, Yu F L, Liu J, et al. Research on Land Use/ Cover Change and its driving force in Midstream of the Heihe Mainstream Basin during the past 20 years[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011(3):353-363.]
- [15] 王雅,蒙古军.基于InVEST模型的黑河中游土地利用变化水文效应时空分析[J].*北京大学学报(自然科学版)*, 2015,51(6):1157-1165. [Wang Y, Meng J J. Spatial-temporal features of hydrological effects caused by land use changes in middle reaches of Heihe River based on InVEST model[J]. *Journal of Peking University (Natural Science Edition)*, 2015,51(6):1157-1165.]
- [16] 程国栋,肖洪浪,徐中民,等.中国西北内陆河水问题及其应对策略——以黑河流域为例[J].*冰川冻土*,2006,28(3):

- 406-413. [Cheng G D, Xiao H L, Xu Z M, et al. Water issue and its countermeasure in the inland river basins of Northwest China: Take Heihe as an example[J]. Journal of Glaciology and Geology, 2006,28(3):406-413.]
- [17] 陈仁升,阳勇,韩春坛,等.高寒区典型下垫面水文功能小流域观测试验研究[J].地球科学进展,2014,29(4):507-514. [Chen R S, Yang Y, Han C T et al. Field experimental research on hydrological function over several typical underlying surfaces in the cold regions of western China [J]. Advances in Earth Science, 2014,29(4):507-514.]
- [18] 张凯,宋连春,韩永翔,等.黑河中游地区水资源供需状况分析及对策探讨[J].中国沙漠,2006,26(5):842-848. [Zhang K, Song L C, Han Y X, et al. Analysis on supply and demand of water resources and related countermeasures in the Middle Reaches of Heihe River[J]. Journal of Desert Research, 2006,26(5):842-848.]
- [19] Moriasi D, Arnold J, Vanliew M, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007,50(3):885-900.
- [20] White K L, Chaubey I. Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable swat model 1[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2010,41(5):1077-1089.
- [21] 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(自然科学版), 2004,28(2):22-26. [Huang Q H, Zhang W C. Improvement and application of GIS-based distributed SWAT hydrological modeling on high altitude, cold, semi- arid catchment of Heihe River Basin, China[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2004,28(2):22-26.]
- [22] 赖正清,李硕,李呈罡,等. SWAT模型在黑河中上游流域的改进与应用[J].自然资源学报,2013,28(8):1404-1413. [Lai Z Q, Li S, Li C G, et al. Improvement and applications of SWAT model in the Upper-middle Heihe River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2013,28(8):1404-1413.]