

基于 SWAT 模型的流域径流模拟研究进展

孙 瑞¹⁻², 张雪芹¹

(1.中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2.广西大学林学院, 广西 南宁 530005)

摘 要:本文概述了国内外应用 SWAT 模型在流域径流模拟研究方面的主要进展。简要介绍了 SWAT 模型的径流模拟功能,概括了在不同流域、不同时间尺度上基于 SWAT 模型的径流模拟的适用性,并针对模型在具体应用时受特定区域下垫面影响这一限制因素,归纳了模型径流模拟功能的开发、改进与拓展。在此基础上,介绍了模型输入参数和环境变化对径流模拟结果的影响,特别是气候和土地利用/覆被变化对径流的影响。最后,总结了现有基于 SWAT 模型的流域径流模拟研究存在的问题,并就这些问题的解决方案进行了讨论。

关键词:SWAT 模型; 径流模拟; 气候变化; 土地利用; 覆被变化

中图分类号:P338[·]9

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2010)03-0028-05

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)^[1-2]模型是美国农业部(United States Department of Agriculture, 简称 USDA)开发的分布式水文物理模型。它以日为时间步长,可同时连续长时段模拟流域的水文过程、水土流失、化学过程、农业管理措施和生物量变化,并能预测在不同土壤条件、土地利用类型和管理措施下人类活动对上述过程的影响。SWAT 模型以其强大的功能、先进的模型结构及高效的计算,在世界各国得到了广泛应用。其中,径流模拟是 SWAT 模型最基本、最重要的功能,基于 SWAT 模型的径流模拟是 SWAT 研究的焦点。

1 SWAT 模型与径流模拟

SWAT^[1-2]是在 SWRRB(Simulator for Water Resources in Rural Basins)模型基础上发展起来的。20 世纪 70 年代中期以来,美国农业部陆续开发了 CREAMS(Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems)、GLEAMS(Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems)和 EPIC(Erosion Productivity Impact Calculator)等模型,但它们在模拟较大流域时均存有不足。因而开发了 SWRRB 模型,它将流域划分为多个子流域并单独模拟。为“连接”各个子流域的运行结果,Arnold 等开发了 ROTO(Routing Outputs to Outlet)模型。但该模型仍有局限性:在进行河道和水库调洪演算时,必须将多个 SWRRB 模型单独运行的结果输入到 ROTO 模型,这样不仅输入输出文件繁琐,且对计算机的存储容量要求较高。为此,20 世纪 90 年代,融合 SWRRB 和 ROTO 两个模型为一体的新的分布式流域水文模型,即 SWAT 模型应运而生。

SWAT 模型自开发以来不断完善,发展出一系列版本。其中,SWAT94.2 引入多个水文响应单元(Hydrologic Response U-

nits, 简称 HRU);SWAT96.2 添加植物截流和壤中流、Penman-Monteith 潜在蒸散发计算模块;SWAT98.1 修正融雪模块,增加放牧和施肥等管理措施选项;SWAT99.2 改进对水库、池塘和湿地水量平衡的处理方法,增加城市径流模拟计算;SWAT2000 改进天气发生器,增加 Green-Ampt 渗流计算方法和马斯京根河道汇流演算方法,提供更多的潜在蒸散发计算方法,且水库数量不再受限。目前模型最新版本为 SWAT2005,该版本添加气象预报情景和半日降雨发生器,并将保持率参数作为土壤水分含量的函数计算每日径流曲线数值。

SWAT 模型的径流模拟通常将研究流域划分成若干个单元流域,以减小流域下垫面和气候要素时空变异对模拟精度的影响。流域离散的方法有自然子流域、山坡和网格 3 种。根据不同植被覆盖和土壤类型,单元流域进一步细分为若干个 HRU。每个 HRU 都单独计算径流量,最后得到流域总径流量。SWAT 模型提供 Green-Ampt 方法或 SCS 曲线法计算地表径流;度-日因子模型计算融雪量;动态存储模型计算壤中流;Hargreaves 法、Priestley-Taylor 法或 Penman-Monteith 法计算潜在蒸散发。SWAT 将地下水分为浅层和深层地下水,浅层地下径流汇入流域内河流,深层地下径流汇入流域外河流。河道水流演算采用变动存储系数模型或马斯京根法。

2 模型径流模拟的适用性

SWAT 模型最早应用于美国多个全国或区域性项目。采用 SWAT 模型,Arnold 等^[3-6]验证了模型径流模拟在全美、伊利诺斯州 3 个流域、密西西比河支流等不同时空尺度、不同水文条件、不同地形特征流域的适用性。模型对长期径流量模拟准确,短期则较差,特别是日尺度的模拟效果不理想,日径流的模拟存

收稿日期:2009-06-30

基金项目:国家自然科学基金项目(40871044)资助

作者简介:孙瑞(1985-),女,陕西榆林人,硕士研究生,主要从事气候变化及其影响研究。

在系统误差。譬如,在宾夕法尼亚州东北部的 Ariel Creek 流域,月、日径流模拟的效率系数分别为 0.55 和 0.2^[7]。

基于美国经验,SWAT 模型在其他国家得到应用与推广^[8-12]。瑞典西南部 Ronnea 流域径流模拟表明:模型适用于不同水文气象及下垫面条件;年、月径流模拟在面积约 250km² 流域上的效果最好;日径流模拟在面积约 1 000km² 的流域上的效果最好;大于 1 000km² 面积的流域,模型校准需 12~15 年的水文数据^[8]。在突尼斯北部 Medjerda 流域,径流量模拟与流域内水文测站的实测值较为吻合^[9]。非洲西部的工作表明,选用 SWAT 模型和 SUFI-2 校准方法适用于特大流域^[10]。加拿大 Alberta 南部的研究评价了径流模拟在降雨量少、包含融雪过程的流域中的适用性^[11]。肯尼亚 Sondu 河流域的研究表明,需开发更好的输入数据系列,以满足模型在数据资料缺乏地区的应用^[12]。

近年来,SWAT 模型在国内得到了广泛应用^[13-15],如太湖西苕溪流域、三江平原挠力河流域等流域的径流模拟。其中,黄河中游三川河流域的月平均流量过程的模拟,模型率定期和验证期的效率系数分别为 0.71 和 0.73,但月平均流量较实测结果偏大^[13]。西北黑河莺落峡以上流域分布式日径流过程的模拟表明,模型在结构上考虑了融雪和冻土对水文循环的影响,较适用于我国西北寒区^[14]。此外,有研究结合湖泊水量平衡模型模拟了青海湖过去几十年水位变化过程^[15]。

3 模型开发与改进

在实际应用中,受特定区域下垫面所限,需根据研究目标对 SWAT 模型的具体模块或算法进行开发与改进。譬如,为研究火灾和森林砍伐对径流的影响,修改了 SWAT2000 的代码开发出 SWAT-C 模型^[16];为模拟蓄满产流,修正了模型中计算壤中流的动力存储模型,开发出 SWAT-KSM 模型^[17];考虑到德国中部低山地区坡陡和浅层土壤含水层覆盖在坚硬的岩石上,地下水对径流的贡献相对较小,产流形式以壤中流为主的特点,修正了 SWAT 模型中渗透和壤中流的计算,开发出 SWAT-G 模型^[18];在密西西比河流域,开发了一个输入输出数据软件扩展程序,即 i_SWAT 模型^[19];通过改进地表径流和河道汇流算法,开发出 ESWAT 模型^[20];为将 SWAT 模型应用于高海拔山区,改进了融雪模块^[21]。

为克服模型自身弱点,基于 SWAT 模型和其他模型开发新模型成为研究的一个重点方向。如,与 MATSALU 模型结合,开发出 SWIM 模型^[22],这为中尺度流域模拟提供了综合工具;结合水动力模型 MOHID,开发出 SWAT-MOHID 模型^[23],提高了模拟结果的分析能力;结合地下水模型 MODFLOW,开发出 SWAT-MOD 模型^[24],克服了 SWAT 模型对地下水模拟不准确的弱点。另外,随着卫星探测技术的发展以及遥感卫星资料可提取气象参数的日益增多,SWAT 模型输入数据精度与模拟效率均有所提高。例如,在模拟美国 Blue 河流域 24 次降雨事件小时水文过程时,采用 NEXRAD 降雨数据和格式化率定方法,改善了 SWAT 模型小时步长的模拟能力^[25]。

鉴于我国自然条件和资料特点,国内学者改进了模型以提高其模拟精度。其中,为克服 SWAT 地下水模块的弱势,应用 SWAT 和地下水模型 GAM 对华北平原地下水系统进行了联合模拟调参^[26];考虑到黄河流域干旱,修改了叶面积指数曲线和地下水蒸发的计算,改进了模型的植物、土壤水和地下水模块^[27];为研究西南岩溶流域表层岩溶带和岩溶浅层水的调蓄功能,改进了产流模块^[28];针对模型在黑河流域和汉江流域水文模拟中存在的问题,增加了土壤粒径转换模块和天气发生器(WGEN)数据预处理模块,改进了模型的 WGEN 算法、潜在蒸散量模拟算法以及气象参数的空间离散方法^[29]。另外,在高海拔地区,由于空间差异大,气象站资料空间插值后代表性较差。为此,需对气温和降水资料做高度校正,譬如带有高度校正的梯度距离倒数加权法(GIDW)^[30]。针对青藏高原特殊下垫面,刘昌明等加入流域高程带划分、气温递减率和降水递减率等参数,以改进高原控制融雪的水文和大气过程^[31]。

4 输入参数对径流模拟的影响

模型径流模拟主要输入参数包括地形特征、土地利用/覆被、土壤、气象以及其他参数。

4.1 地形特征参数

包括地形高程、坡度、坡向等,主要由流域数字高程模型(DEM)获得,用来划分子流域和寻找出流路径等。DEM 分辨率影响流域地形特征参数的提取、河网水系的生成和子流域的划分。较高分辨率数据模拟的径流量较大,特别是对坡度值的提取以及受坡度因素影响的流域汇流时间和滞时影响较大。因此,在模拟流域产流时,应进行坡度校正^[32]。

4.2 土地利用/覆被参数

包括植被覆盖类型、叶面积指数等,一般通过高清晰遥感影像解译获得,主要用来计算植被生长、耗水和地表产汇流。SWAT 模型利用单种植物的生长模型模拟所有类型的植被覆盖。植物生长模型用来判定根系区水的移动和蒸腾,它能区分一年生植物和多年生植物。模型对土地利用数据非常敏感,流域各空间数据的精度均会影响径流模拟的效率,尤其是土地利用数据的详实程度对于径流模拟的影响很大^[33]。

4.3 土壤参数

包括土层厚度、密度、有机碳、有效田间持水量和土壤饱和导水率等,多根据土壤类型查阅文献、遥感数据反演等途径获得。土壤参数对 SWAT 模型水文响应很重要,主要用来计算壤中流和浅层地下水量。SWAT 模型对土壤类型图的分辨率非常敏感。高分辨率的土壤数据会获得多种土壤类型和多个水文响应单元,故径流预测值比较高,校准后模拟的效果较好^[34]。另外,土壤图比例尺对模拟结果影响也较大^[35]。

4.4 气象参数

包括日降水量、最大最小气温、太阳辐射、风速和相对湿度等。这些参数可直接输入实测数据,也可通过天气发生器自动生成。天气发生器可用于有资料地区气象资料不全时的补缺和

无资料地区气象资料的模拟生成。流域气候控制着水量平衡,并决定了水循环中不同要素的相对重要性。降雨数据的空间分辨率对模拟结果影响很大^[36],模拟时如能更好地表达降水的时空差异可提高模拟效果。

4.5 其他参数

模型通过自带的 LH-OAT (Latin Hypercube One-factor-At-a-Time) 敏感性分析方法和 SCE-UA (Shuffled Complex Evolution) 自动校准分析方法来确定敏感性参数的取值。这些参数需要模型通过率定获得,具有不确定性,从而导致模型模拟结果的不确定性。研究表明,SWAT 模型径流模拟中最敏感的 3 个参数分别为土壤蒸发补偿系数 (ESCO)、土壤前期含水量 (FFCB) 及半湿润条件径流曲线数 (CN₂)^[37]。

5 环境变化对径流模拟的影响

全球环境变化对水文过程影响显著。主要通过改变 SWAT 模型的气象和土地利用/覆被等 2 方面输入数据,来分析环境变化对径流模拟的影响。

5.1 气候变化对径流的影响

国外学者主要通过改变 CO₂ 浓度和气候要素(降水、温度、湿度、太阳辐射等)量值,来研究气候变化对径流的影响。在密苏里河流域,应用历史数据模拟了 CO₂ 浓度倍增时的水文响应:流域入口处的产水量春夏季减少,秋冬季增加;流域南部产水量减少,北部增加^[38]。在密苏里河河源高海拔山区,对年产水量、径流时间分配影响最大的要素分别为降水、气温,且每个要素对产水量影响的作用与程度均不同^[39]。在美国南达科塔州黑山地区,气温升高年产水量减少,降水增加年产水量增加;降水增加(或减少)10%以及气温增加 4℃时,径流变化最为敏感;CO₂ 浓度倍增且降水增加 10%对径流的影响最大^[40]。在爱荷华州 Walnut Creek 流域和德克萨斯州 Bosque 流域,降水变化比 CO₂ 浓度和温度变化对径流的影响要大;湿润地区的影响比半干旱地区大^[41]。

国内学者大多根据 GCMs (General Circulation Models) 模拟的全球气候变化,假设不同的气候变化情景,研究未来气候变化对径流的影响。在漳卫南流域,气候变化对流域地表径流量和产水量均影响显著^[42];流域降水量增加,径流量和产水量都随之增加;流域气温增加,径流量和产水量反而降低。在汉江流域,未来降水变化对水资源的影响要大于气温变化^[37]。在黄河河源区,降水变化对径流量的影响强于气温变化,径流量随降水增加而增大^[43];降水增加 20%且气温减少 2℃时,流域径流量增加最大^[44]。在青海湖,未来 30 年布哈河径流增加的可能性较大,青海湖水位下降将会减缓甚至出现上升趋势^[30]。

5.2 土地利用/覆被变化对径流的影响

土地利用/覆被类型是区域短期水量平衡的主要影响因子。SWAT 模型可分析不同土地利用/覆被变化下的水文效应,但其本身不具备预测土地利用/覆被变化的能力,需预先设计或采用其他模型生成土地利用/覆被变化情景。国外研究多利用农业经济模型 ProLand (Prognosis of Land use) 获得土地利用分布情

景,再将土地利用情景输入 SWAT 模型模拟。土地利用/覆被变化对水量平衡的各个分量有重要影响,变化最显著的是地表径流^[45,46];河道流量与地表径流量随林地面积减少和草地面积增加而增加^[46]。国内大多预先设计几种土地利用情景,用来定量分析土地利用/覆被变化对流域径流的影响程度。譬如,在长江上游梭磨河流域,随着土地覆被状况由无植被到全是有林地覆被,径流深减小^[47]。

不同土地利用/覆被类型影响模型输出结果,其变化引起的土壤属性变化对地表径流和地下水补给影响显著。随着城市化加快、木本植物入侵以及农业用地增加和草地减少,流域径流量增加^[48]。因流域面积、气候和覆被类型等因素的不同,流域土地利用/覆被变化对径流的影响差异显著。例如,1986~2000 年,黑河流域土地利用/覆被变化使得流域河川径流量减少 17.7%^[49];1980~1990 年代,泾河流域土地利用/覆被变化使流域多年平均年径流增加 26.5m³/s^[50]。再如,与草地和农业用地相比,黄河下游支流洛河上游卢氏水文站以上流域的森林具有增水作用^[51];而陇西华家岭南河流域草地比森林植被涵养水源的作用更强,模拟年均径流深比林地低 9.1%^[52]。

6 存在的问题与建议

尽管 SWAT 模型在世界各国径流模拟研究中得到了广泛而成功的应用,但在具体的应用中仍然存在着以下几方面不足,需加以改进。

(1) 数据精度低,参数值不确定性大,模拟精度有待提高。由于模型自带的数据库是针对北美土壤、植被和流域水文结构设计的,其标准与世界其他国家数据库标准不一致,对不同的流域,需对模型的数据库部分进行更新,特别是建立用户自己的土壤属性数据库。实际研究中,数据缺乏、数据精度低、参数值存在很大不确定性,这都影响到模拟精度,特别是对日径流的模拟和预测效果不理想。随着 3S 技术的发展,高精度的微波遥感数据和 GIS 技术相结合可获取较高分辨率的参数值,有望提高 SWAT 模型的模拟精度。另外,空间参数的率定、校准和验证亦为 SWAT 模型今后研发的重点。

(2) 基于 SWAT 模型研究环境变化对径流的影响时,蒸发变化对径流的影响研究相对较弱。蒸发是水量转化中的主导成分,直接影响径流的形成。区域蒸发能力对径流有直接的影响,特别是在我国年降水量小于 800mm 的区域,蒸发能力远大于降水量。因此,研究流域蒸发变化对径流的影响应作为 SWAT 模型的一个重要研究内容。另外,我国目前尚处在采用假设不同变化情景研究环境变化对径流影响的阶段,建议借鉴国外的研究方法,即结合其它模型(如农业经济模型 ProLand)等进行研究。

(3) SWAT 模型在数据资料匮乏、有冰川分布的高寒地区的研究几乎空白。建立具有物理机制的水文模型,削弱模型对资料的依赖性,用于无资料流域的径流模拟预测,是国际水文十年计划无资料流域的水文预报(PUB)研究方法之一。因此,

应用 SWAT 模型在高寒区开展径流模拟,具有重要的研究价值,这将拓展 SWAT 模型的应用区域和研究内容。目前,SWAT 模型并没有考虑冰川融水对水文循环的影响,建议在分布有冰川的高寒地区应用模型径流模拟时需对模型的融雪模块进行改进,或结合冰川径流模型开展研究。

参考文献:

- [1] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development [J]. Journal of American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [2] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. Soil and water assessment tool theoretical documentation, version 2000 [EB/OL]. <http://www.brc.tamus.edu/swat/doc.html>, 2001.
- [3] Srinivasan R, Arnold J G, Jones C A. Hydrologic modeling of the United States with the soil and water assessment tool [J]. Water Resources Development, 1998, 4(3): 315-325.
- [4] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Continental scale simulation of the hydrologic balance [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1999, 35(5): 1037-1051.
- [5] Arnold J G, Allen P M. Estimating hydrologic budgets for three Illinois Watersheds [J]. Journal of Hydrology, 1996, 176: 57-77.
- [6] Bingner R L. Runoff simulated from Goodwin Creek Watershed using SWAT [J]. Transactions of American Society of Agricultural Engineers, 1996, 39(1): 85-89.
- [7] Peterson J R, Hamlett J M. Hydrologic calibration of the SWAT model in a watershed containing fragipan soils and wetlands [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(3): 531-544.
- [8] Bekiaris I G, Panaopoulos I N, Mimikou M A. Application of the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) Model in the Ronnea Catchment of Sweden [J]. Global NEST Journal, 2005, 7(3): 252-257.
- [9] Bouraoui F, Benabdallah S, Jrad A, et al. Application of the SWAT model on the Medjerda river basin (Tunisia) [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2005, 30: 497-507.
- [10] Jurgen S, Karim C A, Raghavan S, et al. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic Model [J]. Journal of Hydrology, 2008, 352: 30-49.
- [11] Chanasyk D S, Mapfumo E, Willms W. Quantification and simulation of surface runoff from fescue grassland watersheds [J]. Agricultural Water Management, 2003, 59: 137-153.
- [12] Jayakrishnan R, Srinivasan R, Santhi C, et al. Advances in the application of the SWAT model for water resources management [J]. Hydrological Processes, 2005, 19(3): 749-762.
- [13] 罗睿, 徐宗学, 程磊. SWAT 模型在三川河流域的应用 [J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(5): 28-33. (LUO Rui, XU Zong-xue, CHENG Lei. Application of SWAT model in the Sanchuan river catchment [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2008, 19(5): 28-33. (in Chinese))
- [14] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究 [J]. 地理科学进展, 2003, 22(1): 79-86. (WANG Zhong-gen, LIU Chang-ming, HUANG You-bo. The theory of SWAT model and its application in Heihe Basin [J]. Progress in Geography, 2003, 22(1): 79-86. (in Chinese))
- [15] 舒卫先, 李世杰, 刘吉峰. 青海湖水量变化模拟及原因分析 [J]. 干旱区地理, 2008, 31(2): 229-236. (SHU Wei-xian, LI Shi-jie, LIU Ji-feng. Simulation of water change in Qinghai Lake and affecting factors [J]. Arid Land Geography, 2008, 31(2): 229-236. (in Chinese))
- [16] McKeown R A, Gordon P, Arnold J G. Modifications of the soil water and assessment tool (SWAT-C) for stream flow modeling in a small, forested watershed on the Canadian Boreal plain [EB/OL]. http://www.brc.tamus.edu/swat/conf_3rd.html, 2005-7-11.
- [17] Watson B M, Selvalingam S, Ghafouri M. Modification of SWAT to simulate saturation excess runoff [EB/OL]. http://www.brc.tamus.edu/swat/conf_4th.html, 2007-7-4.
- [18] Eckhardt K, Arnold J G. Automatic calibration of a distributed catchment model [J]. Journal of Hydrology, 2001, 251: 103-109.
- [19] Gassman P W, Campbell T, Secchi S, et al. The i_SWAT Software Package: A Tool for supporting SWAT watershed applications [EB/OL]. http://www.brc.tamus.edu/swat/conf_2nd.html, 2003-7-1.
- [20] Griensven A V, Bauwens W. Integral water quality modelling of catchments [J]. Water Science and Technology, 2001, 43(7): 321-328.
- [21] Fontaine T A, Cruickshank T S, Arnold J G, et al. Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT) [J]. Journal of Hydrology, 2002, 262: 209-223.
- [22] Krysanova V, Muller-Wohlfeil D I, Becker A. Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds [J]. Ecological Modelling, 1998, 106: 261-289.
- [23] Chambel-Leitão P, Braunschweig F, Fernandes L, et al. Integration of MOHID model and tools with SWAT model [EB/OL]. http://www.brc.tamus.edu/swat/conf_4th.html, 2007-7-4.
- [24] Sophocleous M A, Koelliker J K, Govindaraju R S, et al. Integrated numerical modeling for basin-wide water management: The case of the Rattlesnake Creek basin in south-central Kansas [J]. Journal of Hydrology, 1999, 214(1-4): 179-196.
- [25] Luzio M D, Arnold J G. Formulation of a hybrid calibration approach for a physically based distributed model with NEXRAD data input [J]. Journal of Hydrology, 2004, 298(1-4): 136-154.
- [26] 王宏, 娄华君, 田延山, 等. SWAT/GAMS 联合模型在华北平原地下水研究中的应用 [J]. 世界地质, 2005, 24: 368-372. (WANG Hong, LOU Hua-jun, TIAN Yan-shan, et al. Application of coupling model of SWAT/GMS on groundwater reservoir of North China [J]. Plain Global Geology, 2005, 24: 368-372. (in Chinese))
- [27] Luo Yi, He Chan-sheng, Sophocleous M, et al. Assessment of

- crop growth and soil water modules in SWAT2000 using extensive field experiment data in an irrigation district of the Yellow River Basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2008,352:139-156.
- [28] 任启伟. 基于改进 SWAT 模型的西南岩溶流域水量评价方法研究[D]. 中国地质大学,2002.(REN Qi-wei. Water quantity evaluation methodology based on modified SWAT hydrological modeling in Southwest Karst Area[D]. China University of Geosciences, 2002.(in Chinese))
- [29] 张东,张万昌,朱利,等. SWAT 分布式流域水文物理模型的改进及应用研究 [J]. *地理科学*,2005,25 (4):434-440.(ZHANG Dong, ZHANG Wan-chang, ZHU Li, et al. Improvement and application of SWAT-A physically based, distributed hydrological model [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(4): 434-440.(in Chinese))
- [30] 刘吉峰,霍世青,李世杰,等. SWAT 模型在青海湖布哈河流域径流变化成因分析中的应用[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2007,35 (2):159-163.(LIU Ji-feng, HUO Shi-qing, LI Shi-jie, et al. Application of SWAT model to analysis of runoff variation of Buha River Basin of Qinghai Lake[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2007,35(2):159-163.(in Chinese))
- [31] 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 Chang-ming, LI Dao-feng, TIAN Ying, et al. An application study of DEM based distributed hydrological model on macroscale watershed [J]. *Progress in Geography*, 2003, 22 (5):437-445.(in Chinese))
- [32] 任希岩,张雪松,郝芳华,等. DEM 分辨率对产流产沙模拟影响研究 [J]. *水土保持研究*,2004,11 (1):1-5.(REN Xi-yan, ZHANG Xue-song, HAO Fang-hua, et al. Effects of DEM resolutions on simulated runoff and sediment yields [J]. *Research of Soil and Water Conservation*,2004,11(1):1-5.(in Chinese))
- [33] Luzio M D, Arnold J G, Srinivasan R. Effect of GIS data quality on small watershed stream flow and sediment simulations [J]. *Hydrological Processes*,2005,19(3):629-650.
- [34] Mengistu G, John E M. Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions [J]. *Journal of Environmental Management*, 2008,88:393-406.
- [35] Chaplot V. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment and NO₃-N loads predictions [J]. *Journal of Hydrology*, 2005,312:205-222.
- [36] Badas M G, Sulis M, Deidda R, et al. Evaluation of SWAT streamflow components for the Araxisi catchment (Sardinia, Italy) [EB/OL]. http://www.brc.tamus.edu/swat/conf_2nd.html, 2003-7-1.
- [37] 朱利,张万昌. 基于径流模拟的汉江上游区水资源对气候变化响应的研究 [J]. *资源科学*,2005,27 (2):16-22.(ZHU Li, ZHANG Wan-chang. Responses of water resources to climatic changes in the upper stream of the Hanjiang River Basin based on rainfall-runoff simulations [J]. *Resources Science*,2005,27 (2):16-22.(in Chinese))
- [38] Stone M C, Hotchkiss R H, Hubbard C M, et al. Impacts of climate change on Missouri river basin water yield [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2001,37 (5):1119-1129.
- [39] Stonefelt M D, Fontaine T A, Hotchkiss R H. Impacts of climate change on water yield in the upper Wind River basin [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2000,36 (2):321-336.
- [40] Fontaine T A, Klassen J F, Cruickshank T S, et al. Hydrological response to climate change in the Black Hills of South Dakota, USA [J]. *Journal of Hydrological Sciences*, 2001,46(1):27-40.
- [41] Chaplot V. Water and soil resources response to rising levels of atmospheric CO₂ concentration and to changes in precipitation and air temperature[J]. *Journal of Hydrology*, 2007,337:159-171.
- [42] 于磊,顾灏,李建新,等. 基于 SWAT 模型的中尺度流域气候变化水文响应研究[J]. *水土保持通报*,2008,28(4):152-154.(YU Lei, GU Liu, LI Jian-xin, et al. A study of hydrologic responses to climate change in medium scale basin based on SWAT [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(4):152-154.(in Chinese))
- [43] 车骞,王根绪,孔福广,等. 气候波动和土地覆盖变化下的黄河源区水资源预测[J]. *水文*,2007,27(2):11-15.(CHE Qian,WANG Gen-xu,KONG Fu-guang,et al. Runoff estimation under climate and land cover change in Yellow River Source Region [J]. *Journal of China Hydrology*,2007,27(2):11-15.(in Chinese))
- [44] 李道峰,田英,刘昌明. 黄河源区变化环境下分布式水文模拟[J]. *地理学报*,2004,59(4):565-573.(LI Dao-feng, TIAN Ying, LIU Chang-ming. Distributed hydrological simulation of the source regions of the Yellow River under environmental changes [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004,59(4):565-573.(in Chinese))
- [45] Fohrer N, Haverkamp S, Frede H G. Assessment of the effects of land use patterns on hydrologic landscape functions: Development of sustainable land use concepts for low mountain range areas[J]. *Hydrological Processes*, 2005,19(3):659-672.
- [46] Weber A, Fohrer N, Moller D. Long-term land use changes in a mesoscale watershed due to socio-economic factors effects on landscape structures and functions[J]. *Ecological Modeling*, 2001, 140:125-140.
- [47] 陈军锋,李秀斌. 土地覆被变化的水文响应模拟研究[J]. *应用生态学报*,2004,15(5):833-836.(CHEN Jun-feng, LI Xiu-bin. Simulation of hydrological response to land cover changes [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2004,15(5):833-836.(in Chinese))
- [48] Miller S N, Kepner W G, Mehaffey M H, et al. Integrating landscape assessment and hydrologic modeling for land cover change analysis[J]. *Journal of American Water Resources Association*,2002,38(4):915-929.
- [49] He Hong-ming, Zhou Jie, Zhang Wan-chang. Modelling the impacts of environmental changes on hydrological regimes in the Hei

- System Simulation, 2007:2765-2767. (in Chinese))
- [7] 郑日荣, 毛宗源, 罗欣贤. 改进人工免疫算法的分析研究[J]. 计算机工程与应用, 2003, (34):35-37. (ZHENG Ri-rong, MAO Zong-yuan, LUO Xin-xian. A study on modified artificial immune algorithms [J]. Computer Engineer and Applications, 2003, (34):35-37. (in Chinese))
- [8] 翟国静. 马斯京根流量演进系数的直接优选法[J]. 河北工程技术高等专科学校学报, 1996, (2):6-11. (ZHAI Guo-jing. A direct optimum seeking method of the discharge coefficient in the Muskingum flood routing model [J]. Journal of Hebei Engineering and Technical College, 1996, (2):6-11. (in Chinese))
- [9] 杨晓华, 金菊良, 陈肇升, 等. 马斯京根模型参数估计的新方法[J]. 灾害学, 1998, 13 (3):1-6. (YANG Xiao-hua, JIN Ju-liang, CHEN Zhao-sheng, et al. A new approach for parameter estimation of Muskingum routing model [J]. Journal of Catastrophology, 1998, 13(3):1-6. (in Chinese))

Muskingum Model Parameters Recognition Based on Immune Particle Swarm Algorithm

GAN Li-yun¹, FU Qiang¹, SUN Ying-na^{1,2}, GUO Wei¹

(1. College of Water Conservancy & Architecture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150086, China)

Abstract: Muskingum model is widely used in the calculation of channel flow concentration, in which the parameters are important in simulating the observed hydrologic process. The traditional methods of optimizing model parameters are mostly trial and error and moment methods which involve complex calculation process and inaccuracy results that affect the precision of model simulating. In order to solve this problem, this paper used an improved immune particle swarm algorithm which can solve the disadvantage of low precision of traditional methods effectively, and was applied in optimizing Muskingum model parameters. The results show that the precision of this method wins great satisfaction and provides a new way in the field of channel flood routing

Key words: Muskingum model; parameters; immune particle swarm algorithm

(上接第 32 页)

- River Watershed, China [J]. Global and Planetary Change, 2008, 61:175-193.
- [50] 邱国玉, 尹婧, 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. (QIU Guo-yu, YIN Jing, XIONG Yu-jiu, et al. Studies on the effects of climatic warming-drying trend and land use change on the runoff in the Jinghe River Basin [J]. Journal of natural resources, 2008, 23(2):211-218. (in Chinese))
- [51] 郝芳华, 陈利群, 刘昌明, 等. 土地利用变化对产流和产沙的影响分析 [J]. 水土保持学报, 2004, 18 (3):5-8. (HAO Fang-hua, CHEN Li-qun, LIU Chang-ming, et al. Impact of land use change on runoff and sediment yield [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(3):5-8. (in Chinese))
- [52] 宋艳华, 马金辉. SWAT 模型辅助下的生态恢复水文响应—以陇西黄土高原华家岭南河流域为例 [J]. 生态学报, 2008, 28 (2):636-644. (SONG Yan-hua, MA Jin-hui. SWAT-aided research on hydrological responses to ecological restoration: a case study of the Nanhe River Basin in Huajialing of Longxi Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2):636-644. (in Chinese))

Progress in Application of Watershed Runoff Simulation Based on SWAT

SUN Rui^{1,2}, ZHANG Xue-qin¹

(1. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530005, China)

Abstract: Progress in the application of watershed runoff simulation based on soil and water assessment tool model (SWAT) is comprehensively reviewed. Firstly, SWAT and its development and the function of runoff simulation were briefly introduced. Secondly, the applicability of runoff simulation based on SWAT in different regions and time scales were addressed. Considering the limitation of runoff simulation in specific underlying surface, the improvement and development of the model were outlined in concrete application. Then, the impact of input parameters and the environmental changes on runoff simulation was summarized, namely, how climate and land use/cover change will influence the runoff. At last, the existing problems of SWAT-based runoff simulation were summed up, on which the perspectives of research on runoff simulation based on SWAT were highlighted.

Key words: SWAT model; runoff simulation; climate change; land use/cover change