DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2018.06.12

基于相似流域法的 SWAT 模型模拟 黄河中游无资料地区径流

汪银龙,冯民权,张杰

(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,陕西西安710048)

摘 要:选用黄河中游两个小流域,基于相似流域法探求分布式水文模型 SWAT 在黄河中游小流域无资料地区径 流模拟的适用性。通过距离、流域面积相近及属性相似的方法,用已知流域率定参数移植到无资料流域进行径流 模拟。选取 2009 – 2013 年的日径流与月径流进行模型率定,以效率系数(*NS*)和决定系数(*R²*)为评价指标,率 定出 4 个模型敏感系数,并用 2014 – 2016 年的日径流与月径流进行模型验证。结果显示:率定期月径流模拟的 *R²* 为 0. 76, *NS* 为 0. 70;日径流模拟的 *R²* 为 0. 70, *NS* 为 0. 64;验证期月径流模拟的 *R²* 为 0. 82, NS 为 0. 74;日径流模 拟的 *R²* 为 0. 78, *NS* 为 0. 68。说明基于相似流域法的 SWAT 模型对于无资料的小流域月径流量模拟具有很好的适 用性。

SWAT model based on similar watershed method to simulate runoff in the middle Yellow River with no data area

WANG Yinlong, FENG Minquan, ZHANG Jie

(State Key Laboratory of Eco - hydraulic in Northwest Arid Region of China, Xian University of Technology, Xian 710048, China)

Abstract: This paper selects two small watersheds in the middle reaches of the Yellow River and uses the similar watershed method to explore the applicability of the distributed hydrological model SWAT to simulate runoff in a small watershed with no data in the middle Yellow River. Using the methods of similar distance, similar watershed area and similar properties, the known watershed rate parameters were transplanted to the no data watershed for runoff simulation. The model was determined by the daily runoff and the monthly runoff from 2009 to 2013. The efficiency coefficient (*NS*) and the decision coefficient (R^2) were used as the evaluation indicators. The sensitivity coefficients of the four models were determined, and the daily runoff from 2014 to 2016 was used to validate the model. The results show that the regular monthly runoff simulation R^2 is 0.76 and *NS* is 0.70. For the daily runoff simulation, R^2 is 0.70, *NS* is 0.64. For the validation period, R^2 is 0.82, *NS* is 0.74 for the monthly runoff simulation, and R^2 is 0.78, *NS* is 0.68 for the daily runoff simulation. The SWAT model based on the similar watershed method has a good applicability to the monthly runoff simulation of small watersheds with no data.

Key words: SWAT; similar watershed; runoff simulation; small watershed; middle Yellow River

1 研究背景

目前,流域最佳管理措施的有效量化通常会通 过水文模型对流域影响的评估来完成^[1]。各种模 型可以通过水文数据和土地数据的输入进行相应的 率定和验证就能满足其适应性^[2]。但是我国很多 小流域没有实测径流资料,这样对于模型的应用就 有一定的地域限制^[3]。因此解决无资料地区水文 模型的建立问题就越来越重要^[4]。

在对无资料地区的径流进行模拟时,首先应该对

基金项目:山西省水利科学技术研究与推广项目(201625)

作者简介:汪银龙(1992-),男,陕西榆林人,硕士研究生,主要从事研究污染源解析。

通讯作者:冯民权(1964-),男,山西永济人,博士,教授,博士生导师,主要研究环境模拟与污染物防治。

收稿日期:2018-05-25; 修回日期:2018-07-21

水文模型的关键参数进行分析^[5]。对于解决无资料 地区的水文研究的问题大部分学者通过使用区域化 参数来提高水文模型的预测精度[6-7],目前在解决建 立缺资料地区水文模型问题的主要方法有参数回归 法、参数移植法^[8-10]。在法国, Oudin 等^[11]利用 GR4J和TOPMODEL模型对913个流域进行了径流 模拟研究,结果表明参数移植法优于参数回归法。 Kokkonen 等^[12]利用参数移植法和参数回归法分别对 无资料流域做了水文模拟预测,研究表明这两种方法 在无资料地区的水文研究具有很好的适用性。在英 国,Kay 等^[13]利用 PDM 和 TATE 模型对 119 个流域 做了水文模拟研究,结果表明参数移植法比参数回归 法更适用于 PDM 模型和 TATE 模型。赵文举等^[14]以 石羊河流域为研究对象,通过参数移植法对其进行了 径流模拟,结果表明其实用性较好。程艳等^[15]利用 参数移植法对嘉陵江中游9个无资料中小流域进行 了径流模拟。罗吉中等[16]以赣江袁河流域为研究对 象,通过在上游建立 SWAT 分布式水文模型来分析下 游无资料流域的径流资料,结果表明这是一种无资料 流域进行径流模拟比较好的方法。

综上所述,目前大部分学者利用参数移植法及参数回归法对无资料流域地区进行了径流模拟,但是这些方法所需要流域的条件要求较高,在实际研究中找到符合条件的流域难度较大。为寻求解决无资料地区径流模拟研究问题的简单方法,本文通过面积、距离、水文特征等3个方面寻求黄河中游无资料地区的相似流域,并利用流域面积比例法,将相似流域的实测径流移植到无资料流域径流来研究分布式水文模

型 SWAT 在黄河中游无资料地区的适应性,为解决无 资料的小流域水文研究提供科学的参考基础。

2 研究区概况与模型构建

2.1 研究区概况

板涧河流域和毫清河流域地处山西省南部垣曲 县西部,均为黄河的一级支流,而且两条河流相邻, 如图1所示。板涧河发源于闻喜县石门乡上阴里, 人垣曲县境经朱家庄、毛家湾、解峪人黄河,河道全 长 69 km,流域面积为 370 km²,垣曲县境内河道长 43 km,垣曲县境内流域面积 228 km²,其年平均降 水量为 685.6 mm,多年平均蒸发量 2 045.2 mm,多 年平均气候 12.9℃,多年平均径流量 3 707.56 × 10⁴ m³。毫清河全长 72 km,流域面积为 500 km²,其年 平均降水量为 688.3 mm,多年平均蒸发量 3 000.6 mm,多年平均气候 13.2℃。

两个流域土地类型多为林地、旱地和低覆盖度 草地三大类。土壤类型包括不饱和雏形土、黑色石 灰土、简育黑土等。降水不均且土质松软,基本上覆 盖了整个流域。

2.2 基础数据处理

在建立 SWAT 模型时需要很多矢量数据,其中 包括 DEM 数字高程图、土地利用分布数据、土壤类 型等,另外也需要该流域的气象及实测径流数据。

使用 SWAT 模型需要将原土地利用数据和土 壤数据进行分类转化,采用已有研究的方法^[17-18], 对板涧河流域及毫清河流域的相关矢量图进行转化 及分类,具体结果如图 2、3。

表 1	详细数据及其来源

数据名称	数据描述	来源	
高程 DEM	30m×30m 分辨率	地理空间数据云	
土地利用图	1:10万	山西省土地局	
土壤图	1:100万	世界和谐土壤数据库(HWSD)	
温度、风速、湿度、太原辐射	逐日数据	寒区旱区科学数据中心逐日资料	
降雨	逐日数据	寒区旱区科学数据中心逐日资料	
实测径流	逐日及逐月数据	相似流域毫清河	

板涧河内虽有石门水文站,但由于此站位于流 域上游,只能获取降水和温度资料,却不能得到整个 流域的径流资料。所以在相似流域的基础上,利用 流域面积的比例,将毫清河的实测径流进行等比例 处理,并将处理后的径流资料移植到板涧河流域进 行水文模拟。首先通过距离、流域面积、土地属性相 近找到相似的流域^[19-20]。本文从2个方面探讨相 似流域的选取。

(1)距离相近法:距离相近法是寻求研究范围 内与无资料流域在空间距离上最接近的相似流域。

(2)属性相似法:属性相似法是选取流域的某些属性(气象、土壤、地形等)计算2个流域的相似

度。本文选取了4个产汇流中主要涉及的流域属性:多年平均降雨量(P)(气候特征)、平均坡度(S)(地形特征)、林地覆盖率(F)(植被特征)以及土壤有效含水率(AWC)(土壤特征)来计算流域水文过程相似性,见表2。

由图 2、3 知,板涧河与毫清河的土地利用及土 壤类型很相似,其中土地利用率分别为 67%、72%, 两个流域都具有 9 种土壤类型,且完全相同,各种土 壤类型占比接近。由表 2 知,4 种影响产汇流的主 要流域属性十分接近。由此可见,板涧河与毫清河 具有很高的相似度。





图 2 土地利用分布





表 2 相似流域(毫清河)与研究流域(板涧河)水文特征参数

河流	面积/	多年平均	平均坡	年平均	林地覆	平均	土壤有效
名称	km^2	雨量/mm	度/(°)	温度/℃	盖率/%	高程/m	含水量
板涧河	370	685.6	55.3	12.9	67	878	100
毫清河	500	688.3	52.8	13.2	72	825	100

2.3 SWAT 模型构建

构建 SWAT 模型首先要对毫清河流域进行子 流域划分,并设定河道阈值和子流域出口,毫清河流 域河道阈值为 500,子流域出口为人黄口。然后对 研究流域进行 HRU 分析,根据不同的土地利用和土 壤类型将毫清河流域各个子流域划分为若干个水文 响应单元。

本文采用"Burn in"凹陷化算法对 DEM 高程图 进行处理并提取流域及河网,生成的流域集水面积 约为498.4 km²,采用土地利用/土壤类型方法生成 HRU,设置值分别为10和20。根据参数的设置以 及软件的运行将毫清河流域划分为21个子流域和 102个 HRU(图4)。



图 4 毫清河子流域划分

3 结果与分析

3.1 相似流域的参数敏感性分析与率定

敏感性反映了相关参数对模型稳定性的影响程 度或敏感性程度^[21]。其结果 S 有 3 种表达方式:绝 对值、相对值、离差^[22]。为分析对比各关键参数对模 型的敏感性程度,一般方法是采用相对敏感性值,对 参数敏感性进行归一化,其敏感性指数 I 的公式为:

$$I = \frac{\Delta O}{\Delta F_i} \cdot \frac{F_i}{O} \tag{1}$$

式中:指数1不受0和F_i的单位大小的影响,使模型 关键参数之间具有很好的可比性,将敏感性指数分 为4个等级如表3,1值的大小反映了参数敏感性的 强弱^[23]。

~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
-----------------------------------------

分类	指数	敏感性
Ι	$0.00 \le  I  < 0.05$	不敏感
П	$0.05 \le  I  < 0.20$	一般敏感
Ш	$0.20 \leqslant \mid I \mid < 1.00$	敏感
IV	$\mid I \mid \geq 1.00$	极敏感

对毫清河所建立的 SWAT 模型进行率定,共选 取 18 个模型参数进行参数敏感性分析,经过 200 次 循环分析,获得模型前 4 位敏感参数如表 4。并通 过 SWAT - CUP 对其中 4 个关键敏感参数进行自动 率定,然后根据率定结果采用手动率定对率定结果 进行针对性调整,以提高模型的模拟精度。参数手 动率定结果如表 5。

表4 参数敏感性分析结果

序号	参数	敏感指数	参数意义
1	r_CN2. mgt	0.72	SCS 径流曲线数
2	v_ALPHA_BF. gw	0.56	基流 α 系数
3	v_GW_DELAY. gw	0.28	地下水延迟天数
4	v_GWQMN. gw	0.16	浅层地下水产生 基流的阈值深度

表5 SWAT 模型参数值域及率定最终值

参数名称	值域	最终值
r_CN2. mgt	[-0.20,0.20]	0.00
v_ALPHA_BF. gw	[0,1]	0.50
v_GW_DELAY. gw	[30,450]	240.0
v_GWQMN. gw	[0,2]	1.00

#### 3.2 板涧河流域径流模拟结果评价

以构建 SWAT 模型为基础,利用流域面积的比例,将毫清河的实测径流进行等比例处理,并将处理 后的径流资料移植到板涧河流域,利用 SWAT – CUP 对模型进行率定,以效率系数(NS)和决定系数( $R^2$ )两个模型系数来评价模型在研究区的适用 性^[24]。根据这两类评价指标的综合效果,一般认为  $R^2 > 0.7$ 、NS > 0.6时模型的拟合精度令人满意。

基于 SUFI - 2 算法对 SWAT 模型进行率定、验证和评价,选取 2008 - 2009 为模型预热期,2009 - 2013 为模型的率定期,2013 - 2016 为模型的验证期,对板涧河流域的日、月径流进行模拟,其径流模拟的最终结果如图 5 和 6,径流模拟结果综合评价如表 6。

由图 5 中可知:板涧河流域属于夏雨型,径流具 有明显的单峰特征。该流域冬季气候低且无降水, 冰雪消融停顿,径流极小,一般无径流,随着春季的 到来,气温升高,冰雪开始融化,径流稍有增加,在3 月份时会出现一个小小的峰值即春汛。6 月进入夏 季,降雨明显增多,径流量随之变大,在8 月到9 月 之间达到高峰,说明了夏季径流的主要来源是降雨。 整体观察模型模拟的径流数据与相似河流(毫清 河)的实测流量拟合程度较好,且在降雨较多的夏 季时期模拟效果更理想,这说明 SWAT 模型更适合 在降雨充沛,径流大的地区。



图 6 板涧河日径流量模拟结果

由图 6 中可以看出,板涧河流域属于夏雨型降雨,1-4 月降雨几乎为零,而到了夏季的时候,降雨明显增多,径流也是在 8-9 月间形成了高峰。虽然日径流模拟流量与实测流量的走势基本相似,但是在每年 7-9 月的峰值处,模拟径流明显高于实际径流,在每年 1-3 月的枯水期,由于属于冬季时期,冰雪也未开始融化,因而实测径流几乎为零,而模拟径流却大于实测径流。这是由于 SWAT 模型通过处理多种土壤参数、土地利用下,预测复杂流域中水体、土地利用、土壤类型等对径流长期的影响,而对于短期洪峰的模拟效果不是很理想。

表6 板涧河径流模拟结果评价

模拟期	评价目标	决定系数 R ²	效率系数 NS
索宁期	月流量	0.76	0.70
平足为	日流量	0.70	0.64
於正期	月流量	0.82	0.74
迎证为	日流量	0.78	0.68

由表6可以看出,在整个率定期间月径流模拟 量的决定系数 R² 为0.76 大于0.7,效率系数 NS 为 0.70 大于0.6,表明在率定期月径流量模拟效果要 较好,但是整体实测流量的峰值要小于模拟流量峰

值:验证期的模拟月经流决定系数 R² 为 0.82 大于 0.7、效率系数NS为0.74大于0.6,表明验证期的模 拟效果较优,整体模拟效果好于率定期。然而2010 年和2011年7-9月的模拟月经流值较实测值偏高, 这是由于在该时间段降雨量较大且较集中,排水会 变得很快,但SWAT模型计算地表径流时,加入了低 洼地区的排水量,使得模拟径流量偏大。日流量率定 期的 R² 为 0.70 等于 0.7, NS 为 0.64 大于 0.6, 表明 率定期日流量模拟效果较好;在验证期,决定系数 R² 为 0.78 大于 0.7, 效率系数 NS 为 0.68 大于 0.6, 较率定期好些,相对于月径流的模拟结果,日径流模 拟结果相对不理想。综上所述,在实测径流由相似河 流毫清河代替下,板涧河流域 SWAT 月径流模拟效 果较好,其决定系数 R²、效率系数 NS 均高于模型评 价标准,其中验证期的模拟效果好于率定期,表明利 用相似河流法的SWAT模型模拟无实测资料的板涧 河流域的月径流是可行的,其模拟结果理想。

#### 3.3 相似流域参数移植效果验证

本文采用参数移植法将毫清河的率定参数移植 到板涧河流域,进行水文模拟。为了验证参数的移 植效果,运用上游的石门水文站资料对模型进行率 定验证,以月径流为例,如图7。



图 7 石门水文站月经流模拟

在整个验证期间月径流模拟量的 R² 为0.74 大 于0.7,效率系数 NS 为0.72 大于0.6,表明在验证 期月径流量模拟效果要较好。由图 7 可知,整体模 型模拟的径流数据与石门站的实测流量拟合程度较 好,说明将毫清河的模型参数移植到板涧河进行水 文模拟具有很好效果,进一步验证了采用相似流域 法在无资料地区建立 SWAT 水文模型具有很好的 适用性。

## 4 结 论

本文针对板涧河及毫清河的小流域特征,在对 SWAT模型构建的过程中,结合流域 DEM 高程图、 已测水系、土地类型图、土壤类型图、水文气象等数 据,对域进行合理的流域提取,采用 SUFI-2 算法对 模型进行参数率定,并将毫清河流域的率定参数移 植到板涧河流域,得出以下主要结论:

(1)以分析板涧河及毫清河流域河网结构及其 水文特征为前提,根据相似流域之间的面积比例对 径流资料进行等比例处理,处理后的径流资料可以 在相似流域的水文模拟验证时得到很好的运用。

(2)对 SWAT 模型的参数敏感性分析可知,影 响毫清河流域径流的前两个参数分别为径流曲线 数、基流α系数,其余如地下水延迟天数和浅层地下 水产生基流的阈值深度对径流的形成也有不同程度 的影响。

(3) 在参数移植的情况下,经过多次模型参数 率定验证后,得到月、日模拟流量与实测流量的决定 系数 R² 和效率系数 NS,可以看出月径流量模拟效 果优于日径流模拟效果,而且两个模型评价指标均 满足模型评价要求。总体而言,虽然短时间尺度径 流模拟效果不是很理想,但 SWAT 模型对板涧河流 域月径流模拟效果较好,说明利用相似流域法的 SWAT 模型模拟在无实测资料小流域地区的月径流 模拟具有一定的适用性。

#### 参考文献:

- GITAU M W, CHAUBEY I. Regionalization of SWAT model parameters for use in ungauged watersheds. [J].
   Water, 2010,2(4):849-871.
- [2] 陈晓丽, 黄国如. 基于 SWAT 模型的北江飞来峡流域径 流模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5):1-7.
- [3] HOLVOET K, GRIENSVEN A V, SEUNTJENS P, et al. Sensitivity analysis for hydrology and pesticide supply towards the river in SWAT[J]. Physics & Chemistry of the Earth, 2005,30(8):518-526.
- [4] 王中根,夏军,刘昌明,等.分布式水文模型的参数率 定及敏感性分析探讨[J].自然资源学报,2007,22
  (4):649-655.
- [5] 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):14-18+24.
- [6] TANG F F, XU H S, XU Z X. Model calibration and uncertainty analysis for runoff in the Chao River Basin using sequential uncertainty fitting [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012,13:1760 – 1770.
- [7] SAXTON, K. E, RAWLS, W. J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(5):1569-1578.

87

- [8] 李红霞,张新华,张永强,等.缺资料流域水文模型参数区域化研究进展[J].水文,2011,31(3):13-17.
- [9] 潘杰,胡尊乐,谷洪彪,等.基于 SWAT 模型的辽西走 廊海岸带无观测资料流域地表径流模拟[J].水文, 2009,29(6):62-64+80.
- [10] 李红霞, 张永强, 敖天其,等. 无资料地区径流预报方法 比较与改进[J]. 长江科学院院报, 2010,27(2):11-15.
- [11] OUDIN L, ANDRÉASSIAN V, PERRIN C, et al. Spatial proximity, physical similarity, regression and ungaged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments [J]. Water Resources Research, 2008,44(3):893-897.
- [12] KOKKONEN T S, JAKEMAN A J, YOUNG P C, et al. Predicting daily flows in ungauged catchments: model regionalization from catchment descriptors at the Coweeta Hydrologic Laboratory, North Carolina [J]. Hydrological Processes, 2003,17(11):2219 - 2238.
- [13] KAY A L, JONES D A, CROOKS S M, et al. A comparison of three approaches to spatial generalization of rainfall - runoff models [J]. Hydrological Processes, 2010, 20 (18):3953 - 3973.
- [14] 赵文举,孙伟,李宗礼,等. 石羊河流域无观测资料地
   区径流模拟[J]. 兰州理工大学学报, 2014,40(3):70-75.
- [15] 程 艳, 敖天其, 黎小东,等. 基于参数移植法的 SWAT 模型模拟嘉陵江无资料地区径流[J]. 农业工程学报, 2016,32(13):81-86.
- [16] 罗吉忠, 张新华, 肖玉成,等. 基于 SWAT 模型的缺资

料流域径流模拟研究[J]. 西南民族大学学报(自然科 学版), 2013,39(1):80-86.

- [17]姚苏红,朱仲元,张圣微,等.基于SWAT模型的内蒙 古闪电河流域径流模拟研究[J].干旱区资源与环境, 2013,27(1):175-180.
- [18] 程 磊, 徐宗学, 罗 睿,等. SWAT 在干旱半干旱地区 的应用——以窟野河流域为例[J]. 地理研究, 2009, 28(1):65-73+275.
- [19] HAN Longxi, HUO Fei, SUN Juan. Method for calculating non – point source pollution distribution in plain rivers [J].
   Water Science and Engineering, 2011,4(1):83 –91.
- [20] KAY A L , JONES D A , CROOKS S M , et al. A comparison of three approaches to spatial generalisation of rainfall – runoff models [J]. Hydrological Processes, 2010,20(18):3953 – 3973.
- [21] 黄清华,张万昌. SWAT 模型参数敏感性分析及应用 [J]. 干旱区地理, 2010, 33(1):8-15.
- [20] 白淑英,王 莉,史建桥,等.基于 SWAT 模型的开都河流域径流模拟[J].干旱区资源与环境,2013,27(9):79-84.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 陈晓丽, 黄国如. 基于 SWAT 模型的北江飞来峡流域径 流模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5):1-7.

(上接第80页)

- [15] 王丽君,黄维东,施作林,等.大通河流域径流时空分布特征分析[J].甘肃水利水电技术,2012,48(8):1-2+14.
- [16] 刘赛艳,黄强,解阳阳,等.大通河流域上游径流变化 特征与突变分析[J].西北农林科技大学学报:自然 科学版,2016,44(3):219-226.
- [17] 冯国章,李瑛,李佩成. 河川径流年内分配不均匀性的量 化研究[J]. 西北农业大学学报,2000,28(2):50-53.
- [18] 李海川,王国庆,郝振纯,等. 澜沧江流域水文气象要素变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报,2017,28
   (4):21-27+34.
- [19] 高彦春,王金凤,封志明. 白洋淀流域气温,降水和径 流变化特征及其相互响应关系[J]. 中国生态农业学 报,2017,25(4):467-477.
- [20] 涂新军,陈晓宏,张强,等. 东江径流年内分配特征及

影响因素贡献分解[J]. 水科学进展,2012,23(4): 493-501.

- [21] 黄生志,黄强,王义民,等. 渭河径流年内分配变化特 征及其影响因子贡献率分解[J]. 地理科学进展, 2014,33(8):1101-1108.
- [22] 韩翠华,郝志新,郑景云. 1951-2010 年中国气温变化 分区及其区域特征[J]. 地理科学进展,2013,32(6): 887-896.
- [23] 刘春蓁,占车生,夏 军,等.关于气候变化与人类活动 对径流影响研究的评述[J].水利学报,2014,45(4): 379-385+393.
- [24] 王彦君, 王随继, 苏腾. 降水和人类活动对松花江径流 量变化的贡献率[J]. 自然资源学报, 2015, 30(2): 304-314.