DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2020.03.06

# 遥感蒸散发数据应用对 SWAT 模型径流和 蒸散发模拟精度的影响

张清<sup>1,2</sup>,岳青华<sup>3</sup>,董晓华<sup>1,2</sup>,杨百银<sup>4</sup>,魏冲<sup>1,2</sup>,喻丹<sup>1,2</sup>,张特<sup>1,2</sup>
(1. 三峡大学 水利与环境学院,湖北 宜昌 443002; 2. 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430072; 3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,浙江 杭州,310014;
4. 水电水利规划设计总院,北京 100120)

**摘 要:**为探讨遥感蒸散发数据补充研究区水文资料的能力,及其在 SWAT 模型应用中对径流和蒸散发模拟精度 的影响。以淮河上游息县控制流域为研究区建模,并利用实测径流资料与遥感蒸散发数据(MOD16A2)设置 3 种 参数率定情景:仅实测径流率定参数(S1)、仅遥感蒸散发率定参数(S2)、径流与蒸散发同时率定参数(S3),分析不 同情景下径流与蒸散发过程的模拟效果。结果表明:从径流模拟而言,S2、S3 较 S1 的模拟精度(*NS* 系数)均有不 同程度的降低,但 S3 在 S2 的基础上有较明显的改善;从子流域尺度上的蒸散发模拟而言,S1 至 S3 模拟精度呈现 出逐渐上升的趋势,在采用径流与蒸散发同时率定时,S3 比 S2 情景 *NS* 系数上升的子流域个数占总数的 46%。通 过逐步深入探究遥感蒸散发数据在 SWAT 模型中的应用,以及对参数率定的影响,从而分析其对径流与蒸散发的 模拟精度产生的变化,此方法也可推广到其他水文模型,在区域尺度水资源管理与利用上具有较好的参考价值。 关键词: SWAT 模型; MOD16A2; 蒸散发;径流;模拟精度;子流域尺度 中图分类号: P426.2 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2020)03-0037-08

## The application of remote sensing data to the SWAT model enhances its accuracy of evapotranspiration and runoff simulations

ZHANG Qing<sup>1,2</sup>, YUE Qinghua<sup>3</sup>, DONG Xiaohua<sup>1,2</sup>, YANG Baiyin<sup>4</sup>, WEI Chong<sup>1,2</sup>, YU Dan<sup>1,2</sup>, ZHANG Te<sup>1,2</sup>

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan 430072, China;

3. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China;

4. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China)

Abstract: Remote sensing evapotranspiration (ET) data was employed to investigate its ability of compensating for hydrological data in the study area, and its impact on the simulation performance of ET and runoff in the SWAT model. Xixian Basin in the upstream of Huaihe River was chosen as the study area. The data of monitored runoff and remote sensing ET (MOD16A2) were used in establishing three scenarios of parameter calibration, namely, S1 – only use the monitored runoff data to calibrate parameters, S2 – only use the remote sensing ET data to calibrate parameters, S3 – use both data to calibrate parameters simultaneously. Then the simulation performance of each scenario was analyzed accordingly. The results indicated that compared with S1, the runoff simulation accuracy (NS coefficient) decreased both for S2 and S3, but with a significant improvement seen in S3. As for the ET simulation on the subbasin scale, the NS coefficient showed an increasing tendency from S1 to S3. Upon application of both data, the number of subbasins with increased NS coefficient in S3 accounted for 46% of the total subbasins compared to

收稿日期:2019-11-20; 修回日期:2020-04-07

基金项目:中国电力建设股份有限公司项目(DJ-ZDZX-2016-02);欧洲空间局、中国国家遥感中心项目(4000121168/ 17/I-NB)

作者简介:张清(1994-),女,湖北宜昌人,硕士研究生,研究方向为水文学及水资源。

通讯作者:董晓华(1972-),男,湖北秭归人,博士,教授,博士生导师,研究方向为水文学及水资源。

S2. This paper employed remote sensing ET data in a step-wise way to explore its application to the SWAT modeling and the impact on parameter calibration, and then analyzed the changes it brought into runoff and ET simulation performances. This method can be applied to other hydrological models, and provide valuable information for water resources management and utilization.

**Key words**: SWAT(soil and water assessment tool) model; MOD16A2; evapotranspiration(ET); runoff; simulation accuracy; subbasin scale

#### 1 研究背景

蒸散发是水文循环中一个重要的过程,大约占降雨量的60%~70%,在干旱地区甚至能达到年平均降雨量的90%<sup>[1]</sup>,在区域乃至全球尺度的气候、水文和能量过程上都是主要的调控要素<sup>[2]</sup>。蒸散发也是流域水分散失的主要途径<sup>[3]</sup>,控制着地表和地气交互作用中可利用的水资源量<sup>[4]</sup>,影响着农业用水效率、区域生态功能及其干湿状态<sup>[5]</sup>。降雨量与蒸散发量之间的差额是可以供人们利用和管理的水资源量,因此准确地估算蒸散发量,对于气候及土地利用变化对水资源的影响研究至关重要<sup>[6]</sup>。

同降雨、径流等相比,通过测量得到实际蒸散发数 据的过程是非常困难的<sup>[7]</sup>。目前,农田尺度的蒸散发 测量方法主要有基于能量平衡原理的波文比能量平衡 法<sup>[8]</sup>及涡度协方差法<sup>[9]</sup>等;区域尺度主要分为地面观 测和遥感观测两种,地面观测应用最为广泛的为激光 闪烁仪及蒸发皿测量,但由于成本较高不能做到大面 积推广,只能通过数量较少的站点观测甚至无观测数 据。以此取得的数据缺乏空间代表性,不能有效地考 虑到气候、土壤、土地利用以及坡度等因子的时空差异 性对蒸散发的影响,因此需要在区域尺度上建立相应 的蒸散发估算方法与模型。遥感技术的发展丰富了水 文模型的数据源,可以实现在水文模型中利用气象、土 壤、土地利用等数据与径流数据建立多目标率定以模 拟所需的水文过程,并且已有较大程度的改进<sup>[10]</sup>。

近年来有较多的学者利用 SWAT 模型中几种潜在 素散发估算方法(Penman – Monteith、Hargreaves、Priestley – Taylor 等公式)以及增加不同的水文变量进行流 域的蒸散发模拟<sup>[11]</sup>,也有对不同区域尺度蒸散发估算 方法差异的对比研究<sup>[12]</sup>。研究者在考虑其他过程时, 可以采用多变量、多站点率定的方式,以此增加模型模 拟的多样性及可靠性<sup>[11]</sup>。Bai 等<sup>[13]</sup>通过 GRACE(gravity recovery and climate experiment)反演陆地水储量变 化与观测径流多目标率定模型,提高了干旱地区水储 量变化与蒸散发的模拟精度。Parajka 等<sup>[14]</sup>在 SWAT 模型中利用 MODIS(moderate-resolution imaging spectroradiometer)降雪数据与观测径流数据建立多目标率 定,与仅使用径流率定参数的情景相比,径流模拟精度 略有降低,但降雪的模拟精度得到了较大提高。Rajib 等[15]采用遥感蒸散发数据与观测径流数据建立多目标 参数率定情景,径流模拟精度无较大变化,蒸散发的模 拟精度有较大的提升。在密西西比河流域,通过遥感 数据进行径流以及蒸散发的多目标率定,得到 NS 系数 分别在0.8 左右和0.4 左右,整体趋势模拟地较好,证 明遥感数据能改善模型对缺乏资料地区水文过程的模 拟<sup>16</sup>。而蒸散发是一个历时较长的循环过程,需要在 陆面进行长期的监测,故而连续一致的时间序列数据 是蒸散发研究的基础和前提,作为时空分辨率较高数 据的典型代表, MOD16A2 数据为较多研究者所采用。 其算法在生成全球 ET 数据产品方面具有良好的性能, 可在充分考虑植被生长变化下,提供有关全球陆地水 和能源循环以及环境变化的关键信息。贺添等[17]在站 点尺度以及流域尺度验证了 MOD16A2 数据的精度,该 数据对我国森林、农田生态系统类型以及辽河、海河、 黄河和淮河流域的蒸散发模拟精度较高。杨秀芹等<sup>[18]</sup> 通过收集 2001-2010 年实测径流和降水统计数据,基 于水量平衡方程,得出 MOD16 蒸散发产品在淮河流域 有较好的适用性与一致性的结论。

本研究在 SWAT 模型中利用径流观测数据与 遥感蒸散发数据建立不同参数率定情景,填补 SWAT 模型仅采用径流为变量率定参数从而模拟区 域内水文过程的缺陷,模拟蒸散发和径流等水文过 程,并对各情景模拟结果在时间与空间尺度上进行 分析。本研究所用方法可推广到其他水文模型和具 有不同下垫面特征的地区。

#### 2 研究区域概况

淮河流域地处我国东部,介于长江与黄河之间, 位于东经115°55′~121°25′,北纬30°55′~36°36′。 本研究区为淮河流域上游息县以上控制流域,位于 我国河南省南部,面积约为10200 km<sup>2</sup>,西部、西南 部及东北部分布着山区和丘陵,约占总面积的 30%,其他区域大多为平原,耕地为本研究区主要的 土地利用方式。研究区域概况见图1。

该流域多年年平均降雨量为920 mm,根据杨秀

芹等<sup>[18]</sup>利用彭曼公式估算研究区 2000 - 2014 年潜 在蒸散发量,得出该时段的平均实际蒸散发量约为 623.4 mm,空间上由东部、西南向西北递增,但逐年 平均值呈下降趋势。本研究区属于半干旱气候与湿 润气候的过渡带,冬春季节干旱少雨,夏秋季节闷热 多雨,冷暖旱涝转变急剧。



### 3 数据来源与研究方法

#### 3.1 数据来源

本研究的主要数据有 DEM、土地利用、土壤、水 文气象以及 2000 - 2010 年 MODIS 数据集中的遥感蒸 散发 MOD16A2 逐月数据(https://terra.nasa.gov/data/modis-data)。其中,DEM 为于中国科学院计算机 网络信息中心地理空间数据云平台(http://www. gscloud. cn/)下载的 GRID 数据,分辨率为 90 m;土地 利用数据为于中科院资源环境数据云平台(http:// www.resdc.cn/)下载的 GRID 数据,分辨率为1 km; 土壤数据采用 FAO 组织构建的 Harmonized World Soil Database (http://external - world - soil - database/)下载的 GRID 数据;驱动因子为来自中国科学 院资源科学数据中心(http://www.resdc.cn/)的 GRID 数据;气象数据为下载自 SWAT 官网(https:// swat. tamu. edu/software/arcswat/)的1980-2015年日 降水量、气温、太阳辐射、风速和相对湿度等 DBF 格 式气象数据:由淮河水利委员会提供的 2000-2013 年径流数据以及2000-2010年蒸散发站点(息县、南 湾、石山口)蒸发皿实测水面蒸发数据;本研究利用 MRT 工具对 MOD16A2 遥感蒸发数据进行投影转换, 对数据图像进行裁剪,并统计分析蒸散发数据。

#### 3.2 研究方法

SWAT(soil and water assessment tool)模型是一 个被广泛使用且最具代表性的分布式水文模 型<sup>[19-20]</sup>,20世纪90年代由美国农业部农业研究中 心研发。SWAT 模型主要基于 SWRRB 模型,并吸 收了 CREAMS、GLEAMS、EPIC、ROTO 等模型的优 点,通过进一步整合,形成区域尺度乃至子流域尺度 的流域水文模型,可用干预测不同十壤类型、十地利 用方式、农业管理措施对流域内水文、泥沙、水质运 移过程的影响。该模型的核心思想在于合理地表征 流域的空间变异性,通过将流域内具有相同土地利 用、土壤以及坡度等性质的网格离散为不同的水文 相应单元(hydrological response units, HRUs), 使其 能够模拟气候因素和下垫面因素的时空变化以及农 业耕作措施对流域水文循环过程的影响<sup>[21]</sup>。目前 有较多使用 SWAT 模型的研究主要通过径流率定 模型参数,探究不同未来气候变化情景下的水文响 应<sup>[22]</sup>,模拟调整农田灌溉量以期维持可持续生产与 水资源的保护<sup>[23]</sup>,模拟重金属、营养物质、泥沙的运 移过程以评估减轻水资源污染的措施。

本研究应用 SWAT 模型对研究区数字高程模型(digital elevation model, DEM)图像划分子流域(见图 1),并提取各子流域遥感素散发数据MOD16A2,对比研究区内3个蒸散发观测站点(南湾、石山口、息县)的实测蒸散发值与遥感蒸散发值,验证遥感蒸散发数据在本研究区的适用性。然后建立不同的情景探究多目标率定对 SWAT 模型径流与蒸散发时空尺度模拟精度的影响。设置情景方式如下:

(1) 情景1(S1):仅使用实测径流数据率定模型参数;

(2) 情景 2(S2): 仅使用遥感蒸散发月数据率定模型参数;

(3) 情景 3(S3):使用径流与遥感蒸散发月数 据同时率定模型参数。

基于各情景输出的模拟结果,对研究区多年径 流、面平均蒸散发与子流域尺度上的蒸散发过程进 行模拟精度的判断,定性及定量分析多目标率定对 水文过程模拟的影响。

#### 3.3 模型参数选择

在 SWAT 模型中,使用到 DEM 以及息县的经纬 度位置来提取研究区流域以及研究区河网,并使用淮 河水利委员会提供的河网 shp 图进行校正。导入研 究区内雨量站点的坐标,设定合适的面积阈值(约 360 km<sup>2</sup>),划分得到 39 个子流域(见图 1,研究中未涉 及子流域编号,故不加以叙述表明)、542 个水文响应 单元(HRUs)。在建立研究区的 SWAT 模型后,选择 的研究时段为 2000 - 2010 年,其中 2000 年为预热期, 2001 - 2005 年作为率定期,2006 - 2010 年作为验证 期,S3 在 S1、S2 用观测径流数据率定模型的基础上, 增加多年的遥感蒸散发数据作为额外变量。

各情景中均采用径流曲线数(CN2)、基流系数 (ALPHA\_BF)等水文模型径流率定参数并加上最大 潜在叶面积指数(BLAI)、辐射利用效率(BIO\_E)等 生物物理相关参数<sup>[15]</sup>。其中径流情景(SI)仅率定 径流;蒸发情景(S2)仅率定蒸散发;径流-蒸发情 景(S3)同时率定径流与蒸散发。保持模型其他设 定不变,各情景对相同时间段进行水文过程的模拟。 对3种情景率定与验证期的模拟结果采用纳什效率 系数(NS)、确定性系数(R<sup>2</sup>)以及标准化均方根 误差(RSR)等目标方程进行精度的判断。本研究 中,各情景的初始参数范围一致,率定方法为SWAT - CUP 所提供 SUFI - 2 算法<sup>[24]</sup>,对 SWAT - CUP 中 的参数采用 LH - OAT 法进行敏感性分析,以降低 模型的异参同效性。

#### 4 结果与分析

#### 4.1 MOD16A2 数据的验证

研究区内仅有3个蒸发站点(见图1),分布于研究区的中部(南湾),所在子流域多为水域与森林、中部偏下(石山口),所在子流域多为水域与耕地、东部出口区域(息县),所在子流域多为耕地。图2为2001-2010年3个蒸发站的实测蒸散发数据与相应站点所在子流域的遥感 MOD16A2 蒸散发

数据的对比。此时蒸发站观测实际蒸散发折算系数 取自《淮河流域淮河水系实用水文预报方案》<sup>[25]</sup>中 息县断面以上控制流域部分的*K*值,4、5、10月为 0.93,6-9月为0.85,其中未给出的11-3月的*K* 值因冬季蒸散发能力较小取为0.80。

经计算,息县多年月平均 ET 值为58.41 mm,较 MOD16A2 值偏高 14%;南湾多年月平均 ET 值为 58.48 mm,相应偏高 3.36%;石山口多年月平均 ET 值为 49.08 mm,相应偏低 13.1%。3 个站点实测值 与遥感 MOD16A2 蒸散发值线性拟合 R<sup>2</sup> 均在 0.83 以上,说明遥感蒸散发值与蒸发皿实测值显著相关, 验证了 MOD16A2 数据在本研究区的适用性。



由图 2 可知,2001 年的测量值偏高,可能是由 于 2001 年全国气象表现出大面积降水偏少,四季均 出现了不同程度的干旱,土壤湿度降低而蒸发皿却 为充分供水条件,且根据实测降水量数据显示,该年 降水量 仅为 461 mm,较多年平均降水量减少近 50%。其他年份的实测蒸散发数据与 MOD16A2 数 据的趋势一致,图 3 为蒸散发站实测数据与遥感蒸 散发数据之间的相对误差。





由图 3 可知, 蒸散发站实测数据与遥感蒸散发数据的相对误差范围基本在 - 50% ~ 150%, 个别点出现了异常偏高的情况, 如息县的 2001 年 2 月、石山口的 2006 年 1 月、息县的 2008 年 1 月, 实际观测值均远小于 MOD16 观测值。南湾的相对误差较其

他两个站点小,多表现为实测蒸散发值较遥感值偏 大,这与类似研究结果一致<sup>[26]</sup>。息县与石山口两个 站点的相对误差较大,可能与该站点土地利用类型 多为水域(水库)相关。整体来说,MOD16A2数据 与蒸散发站点实测数据存在着较好的相关性,可以 用于在空间上弥补研究区内的蒸散发数据。

#### 4.2 敏感性分析

对设定的不同情景,分别采用息县水文站 2000 - 2010 年的月径流数据以及对应年份的 MOD16A2 遥感蒸散发数据对 SWAT 模型进行率定和验证。 采用 SWAT 模型全局敏感性分析 LH - OAT 法<sup>[27]</sup>,选择对模型较为敏感的参数并增加遥感蒸散发数据 参与率定<sup>[28]</sup>。

在大部分研究中,生物物理参数会采用默认的 参数范围参与模型水文过程的模拟,这些参数能反 映能量平衡机制、地气交换以及生物生长等过程,也 在很大程度上影响着植被对土壤水分的作用<sup>[29]</sup>。 SWAT 模型率定过程中进行全局参数敏感性分析, 表1为模型参数敏感性排序。

衣	表1	模型参数敏感性排序	F
---	----	-----------	---

敏感性排序	名 称	含义
1	CN2. mgt	水分条件2时的初始 SCS 径流曲线数
2	SOL_AWC. sol	土层的有效含水量
3	SOL_Z. sol	土壤深度
4	CANMX. hru	最大冠层蓄水量
5	BIO_E. dat	辐射利用率
6	DLAI. dat	叶面积减少时的植物生 长时间比例
7	LAIMX2. dat	叶面积指数增长曲线的 第2个点
8	RDMX. dat	最大根系深度
9	SMFMX. bsn	6月21日最大融雪因子
10	ALPHA_BNK. rte	河岸基流因子
11	SOL_BD. sol	土壤容重
12	SMFMN. bsn	12 月 21 日最小融雪因子
13	LAIMX1. dat	叶面积指数增长曲线的 第1个点
14	REVAPMN. gw	浅层地下水再蒸发系数
15	RCHRG_DP. gw	深蓄水层渗透系数

由表1可知,径流参数如CN2等依旧为模型最 敏感的参数,SOL\_Z、ALPHA\_BNK、CANMX、DLAI、 BIO\_E等土壤及植物冠层、叶面积类相关参数较为 敏感,相较径流模拟情景而言,在蒸散发的模拟过程 中的贡献尤为突出,证明在模型水文过程的模拟中, 植被等生物物理参数是不可忽视的。较为突出的叶 面积指数类的参数主要与植物的生长状态有关,如 植物的气孔开闭状态、叶面积大小以及根系水分等<sup>[30]</sup>。其次,在参数的敏感性分析过程中,气温、降雨降雪等相关参数也表现得较为突出,这与 Yan 等<sup>[31]</sup>在淮河流域针对大网格季尺度蒸散发影响因素的研究一致。

#### 4.3 模拟结果与分析

本研究区中,水文站观测多年月平均径流量为 118.05 m<sup>3</sup>/s。在设定的不同情景下,对水文站实测 径流量与模型模拟值使用纳什效率系数(*NS*)、确 定性系数(*R*<sup>2</sup>)与标准化均方根误差(*RSR*)指标判 断模型对径流量的模拟精度,结果见表 2。

由表 2 可知, S1 情景模拟多年月平均径流量为 123.08 m<sup>3</sup>/s,略高于观测值 6.99%。S2、S3 情景较 前两个情景对径流的模拟略差,分别比观测值高 13.60% 与 11.10%;各模拟情景在月尺度模拟径流 时,各情景率定期 NS 系数达到了 0.71~0.86, RSR 达到了 0.38~0.54,验证期 NS 系数达到了 0.70~ 0.80, RSR 达到了 0.29~0.52。可见 S1 的模拟精 度要高于其他两个情景,且有径流参与率定的情景 精度高于仅用蒸散发率定的情景(S2)。

根据指标综合判断,模型在模拟径流时,仅使用 蒸散发对径流过程进行率定(S2)的效果不佳,但蒸 散发与径流共同率定(S3)的结果虽较仅率定径流 (S1)较差,但较S2略有提升,率定期NS系数从 0.71上升到0.80,验证从0.70上升到0.73。根据 NS、RSR等指标判断,模型均达到了良好的模拟状 态,证明了SWAT模型在本研究区的适用性。3种 情景的径流过程的模拟结果如图4所示,在径流过 程的模拟上,S2模拟的径流峰值较S1、S3都有所增 加,但也在某些时段存在着较大的偏差,如2004、 2005年夏季峰值模拟偏差较大,但经过径流数据的 补充后,峰值模拟较好;2006、2009年夏季径流峰值 较低,可能的原因是该年份较2001-2010年10年 平均降水量分别降低17%、14%。

在本次研究中选择了分幅号为h27v05的 MOD16A2数据资料,采用ArcGIS工具箱从SWAT 模型划分的子流域中提取逐月蒸散发值,作为蒸散 发观测数据参与SWAT模型参数率定,与各情景模 型模拟值对比。图5为研究区MOD16A2与模型模 拟的逐月面平均蒸散发值对比,从图5中可以看出, 在各情景下,模型模拟值与遥感观测值都是较符合 的。在研究区总流域尺度上,将SWAT模型各情景 月蒸散发模拟结果与MOD16A2蒸散发数据进行线 性拟合,结果如图6所示,3个情景模型模拟蒸散发 值与遥感观测值的相关系数逐渐升高,从0.86 增加 至0.90;在增加了遥感蒸散发数据率定模型参数 后,率定期对峰值的修正效果较为明显,如2002、 2003年夏季,但在部分年份仍出现了峰值模拟较差的情况,如2001、2009年夏季,可能为该年份降水减少,故而蒸散发量降低,但遥感观测值则始终偏高。

模拟径流量 情景 月均值/(m <sup>3</sup> ・s <sup>-1</sup> )	模拟径流量	模拟径流量率定期			验证期				
	í 「「「「「」」 「」」	NS	$R^2$	RSR	PBIAS	NS	$R^2$	RSR	PBIAS
S1	123.08	0.86	0.86	0.38	0.88	0.80	0.93	0.29	- 1.54
S2	134.11	0.71	0.83	0.54	-4.80	0.70	0.87	0.52	-8.18
S3	131.18	0.80	0.84	0.45	-2.17	0.73	0.89	0.36	-2.71

表 2 各情景模型率定和验证期径流量精度







就子流域而言,增加蒸散发变量率定参数后,S2 与 S1 情景对比,在研究区的北部和东部的 NS 系数

有明显的提高,图 7 为各情景在子流域尺度上蒸散 发的模拟精度(NS系数)对比。



图7 各情景子流域蒸散发模拟精度 NS 系数对比

由图 7 可知,S3 与 S2 情景对比,蒸散发与径流 共同率定模型参数的情况下,研究区的东部与中部 的模拟精度明显上升,NS 系数上升的子流域个数 占总个数的46%,证明增加蒸散发率定参数对模型 在空间上模拟蒸散发过程有明显的改善作用。S3 与 S1 情景对比,NS 系数上升的子流域个数占总个 数的64%,表明与仅用径流单目标率定模型参数的 情景相比,利用径流与蒸散发多目标率定模型参数 能有效地改善模型对径流与子流域尺度上蒸散发的 模拟精度。

#### 5 结 论

本研究通过设置3种不同的情景并对其模拟的 径流与蒸散发对比,证明在模型模拟水文过程中,植 被等生物物理参数是不可忽视的,增加蒸散发变量 也能有效提高 SWAT 模型对蒸散发过程的模拟精 度,具体结论如下。

(1)通过与研究区内3个蒸散发站点观测数据 的验证,MOD16A2遥感蒸散发数据能有效补充本研 究区缺乏的蒸散发资料,且能反演到子流域尺度上, 对于研究蒸散发在空间上的变化有较大的帮助。

(2)通过 SWAT 模型敏感性分析,径流参数如 CN2 等为最敏感的参数, SOL\_Z、ALPHA\_BNK、 CANMX、DLAI、BIO\_E 等土壤及植物冠层、叶面积类 相关参数也较为敏感,相较径流模拟情景而言,在蒸 散发模拟过程中的贡献尤为突出。

(3)根据径流与蒸散发变量设置3种参数率定 情景,与径流率定参数相比,蒸散发率定模型参数模 拟径流的精度虽有所下降,但大部分子流域蒸散发 的模拟精度均呈上升趋势;同时采用径流与蒸散发 率定参数,模拟径流的NS系数有明显上升,空间尺 度蒸散发模拟精度有进一步提高。

#### 参考文献:

- [1]颜红,马龙生,韦小茶,等. 基于 MOD16 产品的涟江流 域蒸散量时空变化特征[J].人民珠江,2019,40(9): 62-67.
- [2] 王忠富,张兰慧,王一博,等.黑河上游排露沟流域不同时期草地蒸散发的日变化[J].应用生态学报,2016,27 (11):3495-3504.
- [3] JIANG Xuelian, KANG Shaozhong, TONG Ling, et al. Modeling evapotranspiration and its components of maize for seed production in an arid region of northwest China using a dual crop coefficient and multisource models[J]. Agricultural Water Management, 2019, 222:105 - 117.
- [4] 曹永强,刘明阳,李元菲,等. 不同潜在蒸散发估算方法 在辽宁省的适用性分析[J]. 资源科学,2019,41(10): 1780-1790.
- [5] 宋立生,刘绍民,徐同仁,等. 土壤蒸发和植被蒸腾遥感 估算与验证[J]. 遥感学报, 2017,21(6):966-981.
- [6] 张圣微,张 鹏,张 睿,等. 科尔沁沙地典型区生长季蒸 散发估算及其变化特征[J]. 水科学进展, 2018, 29 (6):768-778.
- [7] 闫俊杰,付秀东,赵玉,等. 2001-2015年伊犁河谷草 地蒸散发时空变化分析[J].水土保持研究, 2019,26 (6):184-190+197.
- [8] BOWEN I S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface [J]. Physical Review, 1926, 27(6):779-787.
- [9] SWINBANK W C. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere
   [J]. American Meteorological Society, 1951, 8(3):135

   145.
- [10] ABIODUN O O, GUAN Huade, POST V E A, et al. Comparison of MODIS and SWAT evapotranspiration over a complex terrain at different spatial scales [J]. Hydrology & Earth System Sciences Discussions, 2018, 22(5):1-36.
- [11] AOUISSI J, BENABDALLAH S, LILI C Z, et al. Evaluation of potential evapotranspiration assessment methods

for hydrological modelling with SWAT – Application in data-scarce rural Tunisia [J]. Agricultural Water Management, 2016, 174:39-51.

- [12] CHUN J A, BAIK J, KIM D, et al. A comparative assessment of SWAT-model-based evapotranspiration against regional-scale estimates [J]. Ecological Engineering, 2018, 122:1-9.
- [13] BAI Peng, LIU Xiaomang, LIU Changming. Improving hydrological simulations by incorporating GRACE data for model calibration[J]. Journal of Hydrology, 2018, 557: 291-304.
- [14] PARAJKA J, BLOSCHL G. . The value of MODIS snow cover data in validating and calibrating conceptual hydrologic models [J]. Journal of Hydrology, 2008, 358(3): 240-258.
- [15] RAJIB A, EVENSON G R, GOLDEN H E, et al. Hydrologic model predictability improves with spatially explicit calibration using remotely sensed evapotranspiration and biophysical parameters [J]. Journal of Hydrology, 2018, 567:668-683.
- [16] PARAJULI P B, JAYAKODY P, YING Ouyang. Evaluation of using remote sensing evapotranspiration data in SWAT [J]. Water Resources Management, 2018, 32 (3):1-12.
- [17] 贺 添,邵全琴. 基于 MOD16 产品的我国 2001 2010 年蒸散发时空格局变化分析[J]. 地球信息科学学报, 2014,16(6):979 - 988.
- [18] 杨秀芹, 王 磊, 王 凯. 基于 MOD16 产品的淮河流域 实际蒸散发时空分布[J].冰川冻土, 2015, 37(5): 1343-1352.
- [19] ARNOLD J G, ALLEN P M. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds [J]. Journal of Hydrology, 1996, 176(1-4):57-77.
- [20] ARNOLD J G, SRINIVASAN R, MUTTIAH R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part 1: Model development [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1):73-89.
- [21] NEITSCH S L, ARNOLD J G, JINIRY J R,等. SWAT
   2009 理论基础[M]. 龙爱华,邹松兵,许宝荣,等译.
   郑州:黄河水利出版社,2012.
- [22] CAI Huaqiang, YU Ting, YANG Chuanguo, et al. Analysis of reference evapotranspiration change in the Huaihe

River Basin [C] // EGU General Assembly Conference, April 22 – 27, 2012, Vienna, Austria Geophysical Research Abstracts, 2012,14:332.

- [23] CHEN Yong, MAREK G W, MAREK T H, et al. Multisite evaluation of an improved SWAT irrigation scheduling algorithm for corn (Zea mays L.) production in the U.S. Southern Great Plains [J]. Environmental Modelling and Software, 2019, 118:23 – 34.
- [24] 郭敏,方海燕,李致颖. 基于 SWAT 东北黑土区乌裕尔 河流域径流模型模拟[J].水土保持研究, 2016, 23
   (4):43-47+54.
- [25] 水利部淮河水利委员会. 淮河流域淮河水系实用水文 预报方案[M]. 山东:黄河出版社. 2002.
- [26] RUHOFF A L, PAZ A R, ARAGAO L E O C, et al. Assessment of the MODIS global evapotranspiration algorithm using eddy covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande Basin [J]. International Association of Scientific Hydrology Bulletin, 2013, 58(8): 1658 1676.
- [27] CHEN Qiang, GOU Si, QIN Dayong, et al. Analysis of SWAT 2005 parameter sensitivity with LH - OAT method
   [J]. HKIE Transactions, 2010, 17(3):1-7.
- [28] RAJIB M A, MERWADE V, YU Zhiqiang. Multi-objective calibration of a hydrologic model using spatially distributed remotely sensed/in-situ soil moisture [J]. Journal of Hydrology, 2016, 536:192 - 207.
- [29] WEN Jun, XIN Lai, SHI Xiaokang, et al. Numerical simulations of fractional vegetation coverage influences on the convective environment over the source region of the Yellow River [J]. Meteorology & Atmospheric Physics, 2013, 120(1-2):1-10.
- [30] HU Zhongmin, YU Guirui, ZHOU Yanlian, et al. Partitioning of evapotranspiration and its controls in four grassland ecosystems; Application of a two-source model [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(9):1410 1420.
- [31] YAN Kun, YANG Minzhi, YAO Shuiping. et al. Study on evolutionary law of pan evaporation in Huaihe River Basin under the background of climate change [C] // 7th International Conderence on Clean and Green Energy, Februray 7 -9, 2018, Paris, France, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 189(5):44-52.