

赵海根, 杨胜天, 周旭. 基于数据同化技术的延河流域绿水模拟研究[J]. 地理科学, 2017, 37(7): 1112-1119. [Zhao Haigen, Yang Shengtian, Zhou Xu. The Simulation of Green Water in the Yanhe River Basin Based on Data Assimilation. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(7): 1112-1119.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2017.07.017

基于数据同化技术的延河流域绿水模拟研究

赵海根^{1,2}, 杨胜天², 周旭²

(1.北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 2.北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

摘要: 分别利用分布式时变增益水文模型(DTVGM)和分布式耗水过程模型(DEPM)对延河流域延安水文站以上区域进行水文过程模拟, 并应用拓展卡尔曼滤波(EKF)算法对2个模型的绿水(实际蒸散发)模拟结果进行同化处理, 从而优化了研究区的绿水量并得出绿水的空间分布规律。结果表明: 在整个模拟期, DTVGM的月尺度效率系数(NSCE)达到了0.83, 水量平衡相对误差为-1.97%, 模型能够较好地模拟研究区的水文过程; DEPM的水量平衡相对误差为-1.81%, 能较好地模拟流域的水量平衡; DTVGM和DEPM模拟的流域2010年平均绿水量分别为378.52 mm和375.55 mm, 空间分布格局相似。与站点观测值比较, DTVGM和DEPM模拟绿水的NSCE分别是0.76和0.59, DEPM的结果具有更多的空间变化信息。同化结果表明EKF算法能综合优化2个模型的模拟结果, 同化后DTVGM模拟研究区的平均绿水量为376.34 mm, NSCE为0.78; 同化后研究区绿水标准差为40.37 mm, 比同化前增加了7.79 mm, 绿水空间分布体现了更多的空间变化信息, 同时, 空间分布时格局也更加合理。

关键词: 遥感; 数据同化; 生态水文模型; 绿水; 延河流域

中图分类号: P339 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2017)07-1112-08

绿水是区域降水下渗到非饱和土壤层中进而垂向进入大气的不可见水^[1,2], 是区域水文循环的重要环节之一。绿水的准确获得对于区域的农作物的生长、农业旱情监测、粮食安全和水资源合理配置都有重要意义^[3,4]。

目前, 绿水量可以利用实验观测、遥感估算和水文模型模拟等途径得到。实验观测都是基于样地或者景观尺度, 而对于大空间尺度区域, 由于复杂的时空异质性的存在, 实验观测很难准确反映出绿水的空间变化^[3]。遥感数据能够提供大空间尺度的地表观测数据, 且能够与地面观测数据相互配合, 在区域蒸散发估算中具有其他手段不可比拟的优势^[5,6]。但是, 基于遥感数据估算绿水受到卫星过境时间的限制只能计算瞬时绿水, 对要获取不同时间步长的绿水量具有一定的困难^[7]。集成遥感数据的分布式水文模型能够较为细致地反映区域的时空异质性, 获取较长时间步长的绿水, 能较好地模拟区域绿水的时空格局变化^[8,9]。

然而, 不同水文模型具有不同的结构和参数, 往往对相同驱动数据的绿水计算产生不同的结果^[10,11], 而数据同化为综合利用不同模型结果提供了一条新的途径^[12]。数据同化可以将精度较高的结果集成到水文模型当中, 从而不断对模型的状态和参数进行更新, 继而提高物理模型模拟或预报的精度^[13]。近年来, 同化技术逐渐应用于水文模型建模的研究中^[14,15], 但同化流域尺度上不同模型绿水模拟结果的研究比较少。

本研究以延河流域延安水文站控制的集水区为例, 应用2个耦合遥感数据的分布式水文模型模拟流域的水文过程, 然后对2个模型绿水模拟结果进行同化, 进而优化流域绿水量。研究结果可为流域水资源的管理、合理配置及其生态规划提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于黄河中游的多沙粗沙区(图1), 是

收稿日期: 2016-08-30; 修订日期: 2016-12-14

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402403)、北京市博士后工作经费资助项目(2016-ZZ-118)、中国博士后工作项目(2016M591093)资助。[Foundation: National Key Project for R&D(2016YFC0402403), Beijing Postdoctoral Research Foundation(2016-ZZ-118), China Postdoctoral Science(2016M591093).]

作者简介: 赵海根(1983-), 男, 河北邯郸人, 工程师, 主要从事生态水文研究。E-mail: zhaohaigen1983@163.com

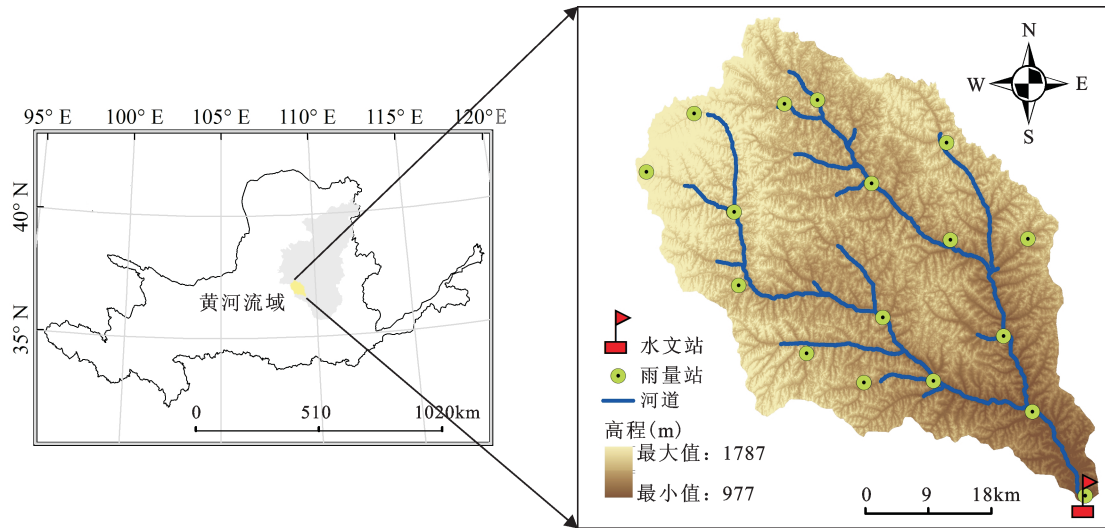


图1 研究区地理位置及雨量站、水文站分布

Fig.1 Location of study area and distributions of rainfall station and hydrological station

延安水文站控制的集水区,面积 $3\,197.32\text{ km}^2$ 。研究区多年观测的平均径流量为 $0.71\times 10^8\text{ m}^3$,多年观测的平均输沙量为 $0.72\times 10^7\text{ m}^3$ 。研究区的土壤类型以黄绵土为主,其次为黑垆土、红胶土和淤土。研究区内植被类型包括森林、灌丛和草原,植物种类丰富,草地和农作物的面积占研究区总面积的80%以上。

2 研究方法

本研究分别利用分布式时变增益模型(DTVGM)和分布式耗水过程模型(DEPM)模拟验证研究区2010年的绿水,然后对2个模型的模拟结果进行同化处理。以下简单介绍涉及到的模型和方法。

2.1 分布式时变增益模型

DTVGM采用水文循环机理与水文非线性系统理论相结合的方法进行水文过程模拟,时变增益是模型的核心^[16]。DTVGM既有分布式水文概念性模拟的特征,同时具有水文系统分析适应能力强的优点,在中国的干旱、半干旱以及湿润地区多个流域的应用,证明模型能够在水文资料信息不完全或者有不稳定性干扰条件的情况下获得比较好的分布式水文模拟效率^[16-18]。DTVGM模型通过流域出口观测值对流域的产汇流水文过程进行校正和模拟。

2.2 分布式耗水过程模型

以土壤-植被-大气之间的水分运动过程为建模基础,DEPM包括降水植被截留模块、土壤水运动模块和蒸散发模块^[19]。模型既具有明确的物理

学机制,又能耦合遥感数据,并将土壤水运动过程和降水、截留、蒸发等边界条件联动,实现耗水过程空间模拟。本模型应用具有物理机制的Richards方程模拟土壤水的一维垂向运动。通过土壤水运动模拟,计算时间节点末的土壤含水量。DEPM侧重流域计算单元垂直方向水文变化过程,而对流域水平汇流考虑不足。

2.3 模型评价方法

对于DTVGM的径流模拟结果,为了同时考虑丰水、平水、枯水月份的模拟效果,本研究选取2010年偶数位月份的模拟径流进行参数率定,奇数位月份模拟径流用于参数验证^[20]。纳什系数(NSCE)和水量平衡相对误差(WE)^[18]被用来对模型的模拟结果进行评价。而DEPM模型缺少汇流过程,所以采用水量平衡的方法对径流模拟结果进行分析评价。

本研究将中国气象数据共享网上的蒸散发大器皿观测潜在蒸散发乘以大水面蒸发折算系数、高程校正系数和陆面蒸散发量折算系数后得到近似的绿水“真值”,进而生成泰森多边形计算研究区面月尺度绿水“真值”来验证模拟实际蒸散发总量^[21]。具体转换方程如下:

$$AET = PET \times K_1 \times K_H \times K_2 \quad (1)$$

$$K_H = 1.2694 - 5 \times 10^{-4} \times H \quad (2)$$

式中, AET 为用观测值转换后的实际蒸散量,mm。 PET 为观测潜在蒸散量,mm。 K_1 为将观测值转换成大水面自然条件下蒸发量的转换系数, K_2 为将大

水面自然条件下蒸发量转换成陆面蒸散发量的转换系数, K_1 和 K_2 在黄河流域一般取值分别为0.81和0.75^[21], K_H 为将观测值转换成大水面自然条件下蒸发量的高程修正系数,由观测点高程结合方程(2)计算得到。 H 为观测站点的高程,m。

2.4 数据同化

本研究采用拓展性卡尔曼滤波(EntendedKalman Filter, EKF)^[12,22]对DTVGM和DEPM模拟结果进行同化处理。EKF是以线性最小方差估计理论为依据,以前一个时刻的估计值和当前时刻的观测值来更新对变量的估计,求出当前时刻的状态值。状态方程、量测方程、白噪声激励的统计特性和量测误差的统计特性是EKF运算过程中涉及到的4类信息^[23]。EKF将非线性观测方程在滤波预测值时刻的滤波值展开成泰勒级数,略去二次以上项后得到的非线性系统的线性化模型,并取低次项逼近它们,得到扩展卡尔曼滤波的方程组^[24]。

EKF运算所涉及到的方程如下:

状态方程:

$$X_{(k)} = \Phi_{(k,k-1)} X_{(k-1)} + W_{(k-1)} \quad (3)$$

测量方程:

$$Z_{(k)} = H_{(k)} X_{(k)} + V_{(k)} \quad (4)$$

状态预测方程:

$$X_{(k|k-1)} = \Phi_{(k,k-1)} X_{(k-1|k-1)} \quad (5)$$

$X_{(k|k-1)}$ 的协方差:

$$P_{(k|k-1)} = \Phi_{(k,k-1)} P_{(k-1|k-1)} \Phi_{(k,k-1)}^T + \Phi_{(k-1)} \quad (6)$$

状态卡尔曼增益矩阵:

$$K_{(k)} = P_{(k|k-1)} H_{(k)}^T [H_{(k)} P_{(k|k-1)} H_{(k)}^T + R_{(k)}]^{-1} \quad (7)$$

状态估计值:

$$X_{(k|k)} = X_{(k|k-1)} + K_{(k)} \{Z_{(k)} - H_{(k)} X_{(k|k-1)}\} \quad (8)$$

更新 K 状态下 $X_{(k|k)}$ 的协方差:

$$P_{(k|k)} = [1 - K_{(k)} H_{(k)}] P_{(k|k-1)} \quad (9)$$

式中, $X_{(k)}$ 是目标 k 时刻的状态向量, $\Phi_{(k,k-1)}$ 是系统的状态转移矩阵, $W_{(k)}$ 是系统随机干扰向量, $Z_{(k)}$ 是系统的观测向量, $V_{(k)}$ 是系统的观测噪声向量, $H_{(k)}$ 是观测矩阵。 $P_{(k,k-1)}$ 和 $P_{(k|k)}$ 分别是 $X_{(k,k-1)}$ 和 $X_{(k|k)}$ 对应的协方差矩阵, K 为卡尔曼增益。

3 数据准备

DTVGM和DEPM各个子模块中涉及的参数及其获取方法见表1,模型参数包括气象参数和下垫面地表参数,其中下垫面地表参数可基于公用数据平台的遥感和GIS数据产品确定。

5~9月份的绿水验证的大器皿观测潜在蒸散发站点(53738,53740,53754和53845)数据是从中国气象数据共享网上下载。

4 结果与讨论

4.1 DTVGM和DEPM模拟结果验证与分析

1)DTVGM模拟径流结果验证。DTVGM在校正期和验证期的纳什系数分别为0.84和0.41。根据Beskow等^[25]的研究,当 $0.36 < NSCE < 0.75$ 时,模型模拟的效果是可以接受的。图2显示了DTVGM模型在率定期和验证期模拟的延安站月径流线与实测径流线吻合较好,整个模拟期的效率系数为0.83,水量平衡相对误差分别为-1.97%,模拟精度达到要求。

图3虽然显示DTVGM对于峰值的模拟不是非常理想,但这种现象普遍存在于大量的研究之中^[25-27]。Viola等^[26]特别强调了准确获取能代表模拟时段的空间降雨数据是模型能否成功模拟峰值

表1 水文模型的地表参量及其获取方法

Table 1 Surface parameters and acquisition method of hydrological models

名称	单位	获取方法	数据源
降水量	mm	反距离加权插值	气象站点
日均气温	℃	反距离加权插值	气象站点
日均水汽压	hPa	反距离加权插值	气象站点
日照时数上	h	反距离加权插值	气象站点
高程	m	遥感产品	Shuttle Radar Topography Mission
叶面积指数	无量纲	遥感产品	Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer
地表反照率	%	遥感产品	Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer
土地覆被类型	无量纲	遥感解译	Landsat TM
土壤类型	无量纲	遥感产品	Harmonized World Soil Database version

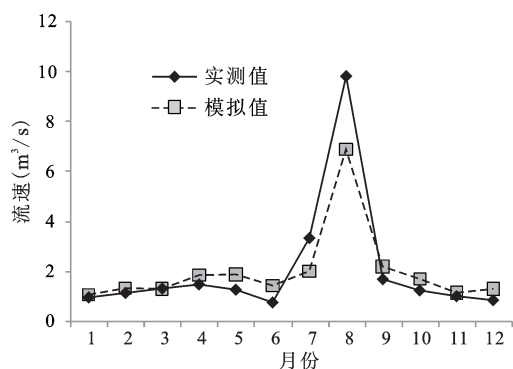


图2 DTVGM模型2010年延安水文站模拟径流与实测径流对比

Fig.2 Comparison of monthly simulated and observed runoff for DTVGM at Yan'an hydrological station in 2010

的关键。Notter 等^[27]认为以下几个理由可以解释模型模拟峰值不理想:①研究区降雨的空间分布不能被降雨观测网络及时准确地获取;②研究区一天中雨强处于不断变化之中甚至一天之内有多场降雨发生,而这些因素水文模型模拟都没有考

虑。除此之外,研究区内降雨多以强降雨为主也加大了模型对于峰值模拟的难度。

2) DEPM模拟径流结果分析。DEPM首先进行植被截留的计算,植被截留量以蒸散发的形式返回大气。模型的核心是Richards土壤水的运动方程,通过节点土壤水的计算连接经验公式Ritchie分别计算土壤蒸发和植被蒸腾。由于模型不进行汇流,所以只对其水量平衡相对误差进行分析,水量平衡相对误差值为-1.81%,能较好地对流域水量平衡进行模拟。

4.2 模型绿水模拟结果比较

由图3可以看出,DTVGM模拟的绿水量效率系数比DEPM模拟的结果高0.17,相关系数也比DEPM结果要好,这是由于DTVGM模拟结果是通过径流进行率定的结果。

2个模型对研究区2010年的绿水进行了模拟,DEPM计算的流域平均绿水量为375.55 mm,比DTVGM计算的结果量小2.97 mm。图4显示2个模型绿水模拟的空间分布,可以看出2个模型模拟

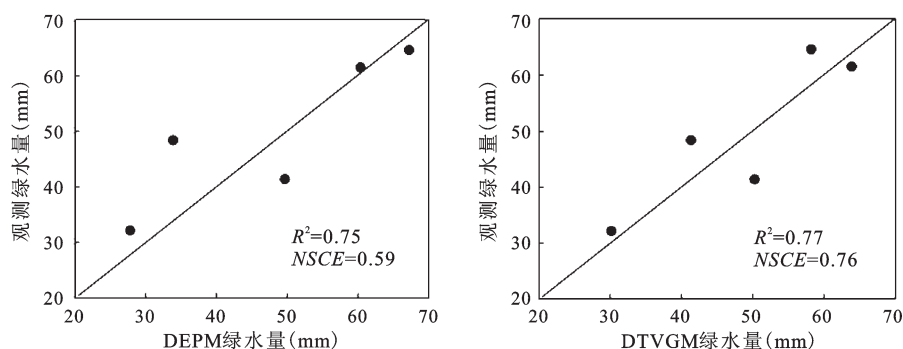
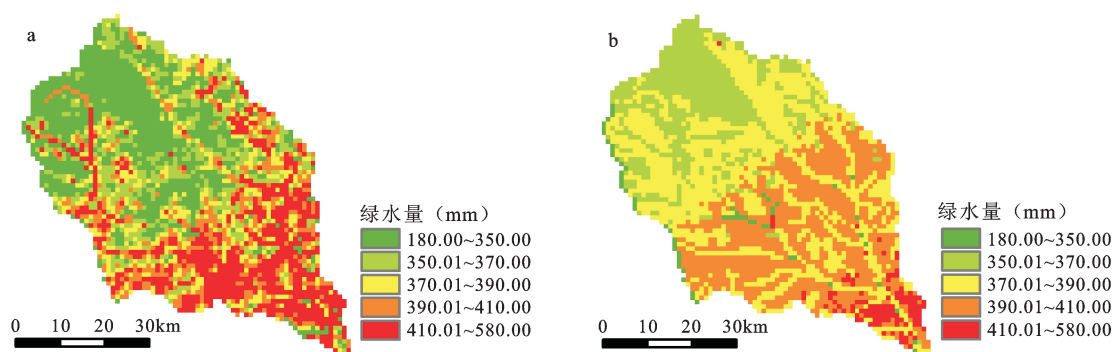


图3 同化前DEPM和DTVGM模型5~9月份月绿水量评价

Fig.3 Monthly green water evaluation simulated by DEPM and DTVGM between May and September in 2010 before data assimilation



a.DEPM模拟结果; b. DTVGM模拟结果

图4 水文模型模拟研究区绿水空间分布

Fig.4 Distribution of green water simulated by distributed hydrological model

的空间趋势一致,绿水量从研究区西北部向东南部递增。

从图4a和4b的比较结果来看,DEPM模拟的绿水结果包含更多的空间变化信息,DTVGM的模拟值空间变化信息较少。这是因为流域水文模型汇流过程中易受到水库调节和水资源开采的影响^[12],绿水的计算和水资源利用信息高度相关,而延河流域最近几年水资源开采非常严重,由于很难获得这些水利用信息,所以DTVGM在准确获取流域整体水文过程值的同时很难准确反映流域内绿水的空间分布特征,而DEPM只是进行一维的垂向计算不需要进行水平的汇流,所以流域内空间分布特征较好。因此,我们利用DEPM模拟的绿水结果作为“观测值”去同化DTVGM模拟的结果以期达到优化绿水计算结果的目的。

4.3 绿水同化结果

表2总结了2个模型的模拟结果和同化前后绿水在流域尺度上平均值和标准差(Standard Deviation, SD)的对比。通过表2可以看出,DTVGM模型同化前2个指标平均值和标准差分别为378.52 mm和32.58 mm,同化后这2个指标的对应值分别为376.34 mm和40.37 mm。与同化前相比较,DTVGM同化后的平均值变化幅度不大,减少了2.18 mm,说明同化并没有对研究区绿水总量进行过大影响,SD同化后增大了7.79 mm,表明同化后的结果具有更多的差异性。图5显示同化后DTVGM模拟的绿水量和观测值的NSCE为0.78,比同化前DTVGM模拟的绿水量有少量提高。图6显示了DTVGM同化前后绿水的空间分布格局变化图。

对比图6a和6b可以看出,同化后的结果比同

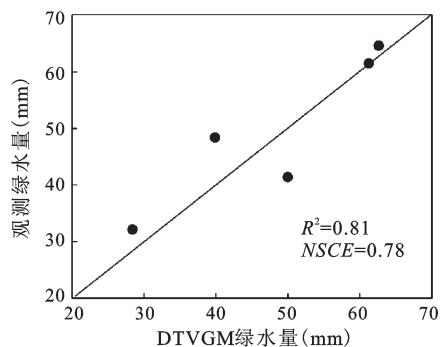


图5 同化后DTVGM模型5~9月绿水量评价

Fig.5 Monthly green water evaluation simulated by DTVGM between May and September in 2010 after data assimilation

表2 DEPM和DTVGM模拟绿水同化前后平均值、标准差和均方根误差的对比(mm)

Table 2 Comparisons of average value, SD and RMSE for green water simulated by DEPM and before and after assimilating green water simulated by DTVGM (mm)

时间	DEPM		DTVGM同化前		DTVGM同化后	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
2010年	375.55	47.20	378.52	32.58	376.34	40.37

化前包含了更多的空间变化信息,研究区上游部分区域绿水量有所减小,从349.10~382.00 mm区间变化到283.01~349.00 mm区间;而研究区下游部分区域的绿水量有所增加,主要从382.01~415.00 mm区间增加到448.01~547.00 mm区间。

DTVGM和DEPM对研究区2010年绿水的模拟值分别是378.52 mm和375.55 mm。赵静等^[28]运用流域估算模型对黄河中游区域1970~2000年之间进行了实际蒸散发的模拟。除了极少数的极值

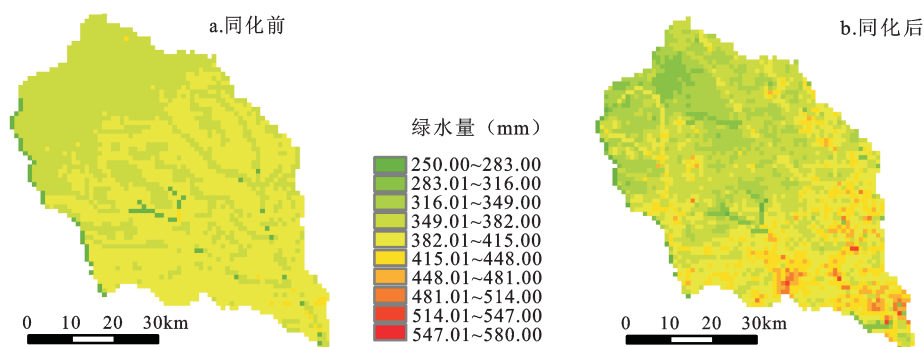


图6 DTVGM同化前后绿水空间分布

Fig.6 Distribution of green water simulated by DTVGM before and after assimilation

外,文献中延河流域的多年平均实际蒸散发与本文的研究结果相符。可见,DTVGM和DEPM可以进行大空间尺度的绿水模拟估算,结果精度可靠。

5 结论

本研究运用耦合遥感数据的DTVGM和DEPM对延河流域延安水文站控制区域绿水进行模拟,并对2个模型模拟结果进行了同化处理,得到结论如下:

1) DTVGM能较好地模拟研究区的水文过程,月尺度径流模拟和实测值的NSCE为0.83,WE为1.93%;对于DEPM来说,水量平衡相对误差为-1.81%,模型能较好地模拟流域的水量平衡过程;

2) 同化前DTVGM和DEPM模拟的研究区2010年平均绿水量分别为378.52 mm和375.55 mm,空间分布趋势相似。与绿水站点观测值相比较,DTVGM和DEPM模拟的绿水NSCE值分别为0.76和0.59,但是DEPM模拟的结果具有更多的空间变化信息;

3) EFK方法的同化处理提高了DTVGM的绿水空间格局模拟效果,同化后标准差比同化前增加了7.79 mm,体现了更多的空间变化信息;

4) 同化结果较好地反映了研究区2010年的绿水时空变化。同化后研究区的绿水量平均值为376.34 mm,范围在256.07~531.05 mm之间,与站点观测值相比较,NSCE值有略微的提高。

参考文献(References):

- [1] 李小雁. 流域绿水研究的关键科学问题[J]. 地球科学进展, 2008, 23(7): 707-712. [Li Xiaoyan. Key scientific issues for green water research in the watershed. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(7): 707-712.]
- [2] 赵安周, 赵玉玲, 刘宪锋, 等. 气候变化和人类活动对渭河流域蓝水绿水影响研究[J]. 地理科学, 2016, 36(4): 571-579. [Zhao Anzhou, Zhao Yuling, Liu Xianfeng et al. Impact of human activities and climate variability on green and blue water resources in the weihe river basin of northwest China. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(4): 571-579.]
- [3] 张淑兰, 于澎涛, 王彦辉, 等. 泾河上游流域实际蒸散量及其各组分的估算[J]. 地理学报, 2011, 66(3): 385-395. [Zhang Shulan, Yu Pengtao, Wang Yanhui et al. Estimation of actual evapotranspiration and its component in the upstream of Jinghe Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(3): 385-395.]
- [4] 荣琨, 陈兴伟. 用SWAT模拟土地利用对绿水蓝水的影响:以晋江西溪流域为例[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(1): 199-204. [Rong Kun, Chen Xingwei. Simulation of the effect of land use/cover change on green and blue water resource in Xixi watershed of the Jinjiang Basin with SWAT model. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(1): 199-204.]
- [5] Song L S, Liu S M, Kustas W P et al. Application of remote sensing-based two-source energy balance model for mapping field surface fluxes with composite and component surface temperatures[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 230-231: 8-19.
- [6] 冯景泽, 王忠静. 遥感蒸散发模型研究进展综述[J]. 水利学报, 2012, 43(8): 914-924. [Feng Jingze, Wang Zhongjing. A review on evapotranspiration estimation models using remotely sensed data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(8): 914-924.]
- [7] 刘三超, 张万昌, 高懋芳, 等. 分布式水文模型结合遥感研究地表蒸散发[J]. 地理科学, 2007, 27(3): 354-358. [Liu Sanchao, Zhang Wanchang, Gao Maofang et al. Simulation of land surface evapotranspiration using distributed hydrological model, remote sensing and GIS technology. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(3): 354-358.]
- [8] Zhao Anzhou, Zhu Xiufang, Liu Xianfeng et al. Impacts of land use change and climate variability on green and blue water resources in the Weihe River Basin of northwest China[J]. *Catena*, 2016, 137: 318-327.
- [9] Hartanto I M, Van Der Kwast J, Alexandridis T et al. Data assimilation of satellite-based actual evapotranspiration in a distributed hydrological model of a controlled water system[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 57: 123-135.
- [10] 金晓媚, 万力, 梁继运. 水均衡法验证蒸散量计算的可靠性——以张掖盆地为例[J]. 现代地质, 2008, 22(2): 299-303. [Jin Xiaomei, Wan Li, Liang Jiyun. Accuracy verification of evapotranspiration result using hydrological budget Method-A case study of the zhangye basin. *Geoscience*, 2008, 22(2): 299-303.]
- [11] Vinukollu R K. Quantifying global evapotranspiration from remote sensing: Estimates, trends and uncertainties for terrestrial hydrology[D]. Princeton University, 2011.
- [12] Qin Changbo, Jia Yangwen, Su Z et al. Integrating remote sensing information into a distributed hydrological model for improving water budget predictions in large-scale basins through data assimilation[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2008, 8(7): 4441-4465.
- [13] Xie X, Zhang D. Data assimilation for distributed hydrological catchment modeling via ensemble Kalmanfilter[J]. *Advances in Water Resources*, 2010, 33(6): 678-690.
- [14] 尹剑, 占车生, 顾洪亮, 等. 基于水文模型的蒸散发数据同化实验研究[J]. 地球科学进展, 2014, 29(9): 1075-1084. [Yin Jian, Zhan Chesheng, Gu Hongliang et al. A case study of evapotranspiration data assimilation based on hydrological model. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(9): 1075-1084.]
- [15] Chen He, Yang Dawen, Hong Yang et al. Hydrological data as-

- simulation with the Ensemble Square-Root-Filter: Use of streamflow observations to update model states for real-time flash flood forecasting[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 59: 209-220.
- [16] Xia Jun, Wang Gangsheng, Tan Ge et al. Development of distributed time-variant gain model for nonlinear hydrological systems[J]. *Science in China: Series D-earth Sciences*, 2005, 48 (6): 713-723.
- [17] Cai Mingyong, Yang Shengtian, Zeng Hongjuan et al. A distributed hydrological model driven by Multi-Source spatial data and its application in the Ili river basin of central Asia[J]. *Water Resources Management*, 2014, 28(10): 2851-2866.
- [18] Zhao Haigen, Yang Shengtian, Wang Zhiwei et al. Evaluating the suitability of TRMM satellite rainfall data for hydrological simulation using a distributed hydrological model in the Weihe River catchment in China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(2): 177-195.
- [19] 宋文龙. 黄河中游典型流域植被耗水过程定量模拟研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2013. [Song Wenlong. Simulation of vegetation evapotranspiration process in typical watersheds in the middle reach of the Yellow River. Beijing: Beijing Normal University, 2013.]
- [20] 罗琳. 黄河流域黄土高原典型支流径流锐减成因定量研究[D]. 北京: 清华大学, 2013. [Luo Lin. Quantitative diagnose on sharp reduction of discharge in typical tributaries of the Yellow River in the Loess Plateau. Beijing: Tsinghua University, 2013.]
- [21] 周旭. 黄河中游植被恢复对蒸散变化的影响分析[D]. 北京: 北京师范大学, 2015. [Zhou Xu. A distributed modeling approach to analysis the impact of revegetation on the evapotranspiration change in the middle reaches of the Yellow River Basin. Beijing: Beijing Normal University, 2015.]
- [22] 张建帆, 丁胜, 陈军, 等. 拓展卡尔曼滤波算法在目标跟踪中的改进及应用[J]. *现代计算机*, 2012, (11): 11-14. [Zhang Jianfan, Ding Sheng, Chen Jun et al. Improvement and application of extended kalman filter algorithm in target tracking. *Modern Computer*, 2012, (11): 11-14.]
- [23] 王涛, 徐德民, 冀伟, 等. 一种抑制拓展卡尔曼滤波的发散方法[J]. *弹箭与制导学报*, 2005, S1(5): 484-486. [Wang Tao, Xu Demin, Ji wei et al. A method of preventing divergence of EKF. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, S1 (5): 484-486.]
- [24] 张爱民. 扩展卡尔曼滤波在目标跟踪中的应用研究[J]. *信息技术*, 2013, (10): 95-97, 102. [Zhang Aimin. Research on target tracking of extended Kalman filter and its application. *Information Technology*, 2013(10): 95-97, 102.]
- [25] Beskow S, Mello C R, Norton L D et al. Performance of a distributed semi-conceptual hydrological model under tropical watershed conditions[J]. *Catena*, 2011, 86: 160-171.
- [26] Viola M R, Mello C R, Acerbijunior F W et al. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG[J]. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2009, 13(5): 581-590.
- [27] Notter B, Macmillan L, Viviroli D et al. Impacts of environmental change on water resources in the Mt. Kenya region[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 343(3/4): 266-278.
- [28] 赵静, 张晓萍, 段建军, 等. 黄河中游河口-龙门区间陆面年蒸散量估[J]. *自然资源学报*, 2009, 24(8): 1450-1457. [Zhao Jing, Zhang Xiaoping, Duan Jianjun et al. Regional evapotranspiration estimation in Hekou-Longmen section of the Middle Reaches of the Yellow River. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(8): 1450-1457.]

The Simulation of Green Water in the Yanhe River Basin Based on Data Assimilation

Zhao Haigen^{1,2}, Yang Shengtian², Zhou Xu²

(1. *Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China*; 2. *School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

Abstract: The accurate green water simulation is very important for the crop growth, agricultural drought monitoring, food security and rational allocation of water resources. Now, there are three methods which can be used to get greenwater: field observation, remote sensing calculation and hydrological model simulation. The field observation can not get the accurate simulation result of catchment green water at large scale because of complicated spatial heterogeneity; the remote sensing calculation method can only get the instantaneous simulation result at a large scale region. Compared to the two methods above, the hydrological model can get the

continuous green water simulation results in large scale catchment. But, because hydrological models have different structures and characteristics, different simulation results can be got when inputting the same simulation data in the same region. In order to comprehensively utilize the simulation results of different hydrological models, the data assimilation method is a good choice. In this study, the Distributed Time Variant Gain Model (DTVGM) and Distributed Evapotranspiration Process Model(DEPM) were used to simulate the hydrological process in the catchment controlled by the Yan' an station in the Yanhe River Basin based on their structures and characteristics, and the Extended Kalman Filter(EKF) data assimilation algorithm was used to assimilate the green water (actual evapotranspiration) simulated by the two models to optimize the green water in the study area. The statistical indexes show that the simulation result of DTVGM is applicable to simulate the hydrological processes in this study area, the Nash-Sutcliffe coefficient(NSCE) is 0.83 and the relative water balance is -1.97% in the whole simulation period. The water balance relative index of DEPM is -1.81% in the whole simulation period, which shows that DEPM can model the water balance well at the study area. Besides, the simulation results show that the green water in 2010 simulated by the two models is 378.52 mm and 375.55 mm, respectively. There are not obvious difference for the mean simulation results of two models and the spatial distribution pattern are also similar, but there is more spatial variable information for result simulated by DEPM model than that of DTVGM. Compared to the observed green water, the NSCE of green water simulated by DTVGM and DEPM is respectively 0.76 and 0.59, but the spatial distribution of green water simulated by DEPM has more change information. Then, the green water simulation result of DEPM was used as "observed value" to assimilate the green water simulated by DTVGM based on the EKF data assimilation method in order to optimize the green water simulation result. The average green water simulated by DTVGM after data assimilation is 376.42 mm and the NSCE is 0.78 when comparing to the observed green water. The Standard Deviation(SD) for the green water simulation becomes 40.37 mm after assimilation, which is significantly increased by 7.79 mm than the original modeling results. The green water in spatial distribution shows more spatial change information and is more reasonable in this study area.

Key words: remote sensing; data assimilation; ecological hydrological model; green water; the Yanhe River Basin