文章编号:1000-7601(2019)02-0202-07

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.02.29

塔里木河干流上游区 WaSSI-C 生态水文模型的适用性评价

侯晓臣2,孙 伟1,2,李建贵3,李全胜2

(1.中国农业科学院农业信息研究所,北京 100081; 2.新疆农业大学计算机与信息工程学院,新疆 乌鲁木齐 830052; 3.新疆农业大学林业研究所,新疆 乌鲁木齐 830052)

摘 要: 水碳耦合模型能够为干旱区水碳资源综合管理提供重要的工具支持。以塔里木河干流上游区为研究对象,在深入分析 WaSSI-C 模型(Water Supply Stress Index-Carbon model)理论方法和运行机理的基础上,结合研究区自然地理环境特征,补充冰川融化计算模块,以增强模型在研究区的适用性。在此基础上,将研究时段划分为率定期(2000-2009年)和验证期(2010-2015年),利用实测的径流数据和 MODIS 数据产品的蒸散(ET)和总生态系统生产力(GEP)数据,以相关系数(R^2)和效率系数(NS)为主要统计指标,探讨了不同时期 WaSSI-C 模型在研究区的适用性。流域总径流在率定期和验证期对比验证的 R^2 分别为 0.72 和 0.68, NS 为 0.71 和 0.67; ET 在率定期和验证期对比验证的 R^2 分别为 0.60 和 0.64, 0.60 和 0.66; GEP 率定期和验证期对比验证的 0.66 和 0.66; 除 ET 在验证期的 0.66 以为,模拟结果的 0.66 个评价指标均保持在 0.66 及以上,可见模型能够很好地模拟塔里木河干流上游区水碳资源的动态变化。

关键词:WaSSI-C模型;水碳耦合;径流;蒸散;总生态系统生产力;塔里木河干流上游区

中图分类号:S181; P334+.92 文献标志码:A

Applicability evaluation of WaSSI-C model in the upstream region of the mainstream of Tarim River

HOU Xiao-chen², SUN Wei^{1,2}, LI Jian-gui³, LI Quan-sheng²

- (1. Agricultural Information Institute of CAAS, Beijing 100081, China;
- 2. College of Computer and Information Engineering , Xinjiang Agricultural University , Urumchi , Xinjiang 830052 , China ;
 - 3. Institute of Forestry at Xinjiang Agricultural University, Urumchi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: Water-carbon coupling model can provide important implemental support for the integrated management of water and carbon resources in arid areas. The upstream region of the mainstream of Tarim River was selected as the research area. Based on the study of the theoretical methods and operating mechanism of the WaSSI-C model (Water Supply Stress Index-Carbon model) and according to the characteristics of natural geography and the environment in the study area, the calculation module for the glacier melting had been added to improve the applicability of the model. On this basis, the study period was divided into calibration period (2000–2009) and the validation period (2010–2015), and then we used the measured runoff data and MODIS evapotranspiration (ET) and gross ecosystem productivity (GEP) products to explore the applicability of WaSSI-C model in different locations of the study area. The R^2 values of calibration and verification periods for the total runoff of the river basin were 0.72 and 0.68, respectively, and NS was 0.71 and 0.67, respectively; The R^2 for ET were 0.60 and 0.64 for the two periods, respectively, NS was 0.60 and 0.56, respectively; The R^2 for GEP were 0.68 and 0.61 and NS were 0.66 and 0.69 for the two periods, respectively. The two evaluation indexes of the simulation results were all maintained

收稿日期:2018-03-18

修回日期:2019-01-18

基金项目:国家林业局引进国际先进林业科学技术项目(948 项目 2015-4-24-02);新疆维吾尔自治区教育厅高校科研计划科学研究重点项目(XJEDU20161025)

作者简介: 侯晓臣(1993-), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 研究方向为林业 3S 技术与森林水文模型。 E-mail: 1016244182@ qq.com

通信作者:孙伟(1978-),男,山东海阳人,副教授,博士,硕士生导师,研究方向为林业 3S 技术、海量空间数据存储与智能分析研究。 Email:maplesunw@163.com

at 0.6 and above, except for the NS of verification period for ET. Therefore, the model can well simulate the dynamic changes of water and carbon resources in the upstream area of the mainstream of Tarim River.

Keywords: WaSSI-C model; the coupling of water and carbon; runoff; evapotranspiration; gross ecosystem productivity; the upstream area of the mainstream of Tarim River

塔里木河位于西北干旱区,是我国最大的内陆 河,被誉为"生命河"和"母亲河"[1],在新疆发展战 略中占据着重要地位。塔里木河干流自身不产流, 径流补给全部来自源流,为纯耗散型河流,上游区 的水碳资源状况对于中下游地区乃至整个干流区 生态系统的可持续发展有重要影响。近几年随着 经济的快速发展, 塔里木河干流上游区的资源开发 强度不断加大,致使塔里木河干流流域的生态环境 正逐步恶化,表现为干流径流量逐年递减,越往下 游递减趋势越明显[2];植被衰退,土地荒漠化趋势 加剧,下游绿色走廊濒临消失[3]。水资源短缺和土 地荒漠化成为阻碍区域发展的两大主要因素,如何 有效协调二者的可持续性发展已成为研究区当前 亟需解决的问题之一。水碳资源的科学统筹与优 化管理是解决这一问题的有效途径,其基本前提是 对水碳耦合机制的深入研究与应用[4]。张永强和 朱治林等[5-6]发现水分利用效率在一天内呈现由高 到低的趋势,且最高值并不是出现在正午时分。郭 维华和苏培玺等[7-8]发现植物的水碳通量变化具有 较高的一致性。冠层尺度上,生态系统的水碳通量 与太阳辐射具有较强的一致性^[8]。Baldocchi 等^[9] 认为陆地生态系统的年总生态系统生产力和蒸散 发之间保持着很好的一致性。Beer 等[10] 发现,世界 范围内 40%以上林地的总初级生产力与降水量密 切相关。Zhao 等[11] 发现,陆地净初级生产力的变 化趋势与区域干旱程度的变化特征具有很强的相 关性。目前,在塔里木河流域干流区关于水、碳资 源的动态变化研究很多[12-13],关于水碳耦合关系的 研究仍然相对较少,没有形成比较科学成熟的体系。

现阶段,涡度相关技术可提供大量的、长期的、连续的水碳通量相关数据,水碳耦合模型已逐步成为研究热点。现有的水碳耦合模型可以划分为 2种:(1)基于光合-气孔-蒸腾机理构建的水碳耦合模型,主要有 CEVSA 模型^[14]、BEPS 模型^[15]、IBIS模型^[16]等;(2)集成现有水文模型和生态模型构建的集成模型,主要有 RHESSys 模型^[17]、DLEM 模型^[18]、WaSSI-C 模型^[19]等。其中,WaSSI-C 模型(Water Supply Stress Index,WASSI)和水碳循环模块的月尺度生态系统水碳耦合集

成模型,主要融合了 Hamon 的潜在蒸散(PET)模型^[20]、Mccabe G J 等^[21]的融雪模型以及萨克拉门托模型,且如地形起伏、土壤湿度、植被状况和水分划分等关键水碳要素都得到了充分的考虑,已被应用于我国和美国的部分地区,并且取得了很好的应用效果^[22-23]。

本文的研究对象是典型干旱区塔里木河干流上游区,由于该区域降水稀少,水资源主要来源于高山冰川消融。因此,冰川消融模拟对于 WaSSI-C 模型在研究区的应用具有关键性的作用,而原 WaSSI-C 模型的融雪模块忽视了高山冰川消融对区域的水分补充作用,严重影响了研究区的模拟精度,因此在原模型融雪模块的基础上补充冰川消融计算过程,提高了模型在研究区的适用性。本研究探讨 WaSSI-C 模型在塔里木河干流上游区的适用性,以期为研究区的水碳资源统筹管理提供有效的分析工具。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

塔里木河干流流经塔克拉玛干沙漠北部边缘, 总长 1 321 km, 分上、中、下游 3 个区段, 其中肖夹克 至英巴扎为上游段,河长 495 km;英巴扎至恰拉为 中游段,河长398 km;恰拉至台特玛湖为下游段,河 长 428 km, 其水量补充主要来源于阿克苏河、和田 河、叶尔羌河和开都-孔雀河,形成了塔里木河"四 源一干"的基本格局。基于已获取的 DEM 数据,利 用 ArcGIS 的流域分析工具提取出塔里木河干流上 游流域范围(80°45′~85°10′E,40°25′~41°30′N), 并将其作为本研究的研究区域。该区总面积约为 1.5万 km², 地势平坦, 海拔 908~1 045 m, 属于典型 的暖温带内陆干旱荒漠性气候,干旱少雨,昼夜温 差大,年降水量在20~50 mm之间,年均潜在蒸散量 在1800~2900 mm之间。近几年,随着人类活动强 度的不断加大,大片的林、灌、草地被开发为农田, 耕地面积迅速增长,引发了农业用水与生态用水的 矛盾[24],进而使得水碳资源矛盾日益突出。因此, 探讨 WaSSI-C 模型在该地区的适用性,对掌握研究 区的水、碳资源动态变化及内在关系,进而有效平 衡二者的协调发展具有重要的现实意义。

1.2 模型数据与处理

WaSSI-C模型运行需要基础数据包括输入数据和验证数据。输入数据包括数字高程模型(DEM)、气象数据、叶面积指数(LAI)数据和土地利用类型数据等;验证数据包含径流数据、蒸散(ET)数据和总初级生产力(GEP)数据等。数据获取和处理过程如下:

- (1) DEM 数据来源于美国国家航空航天局(NASA)的 ASTER-GDEM V2 产品(http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/),空间分辨率为 30 m,应用 ArcGIS 对原始数据进行拼接、投影变换、提取等处理后,可得模型所需的 DEM 数据。
- (2)基于研究区的 Landsat 5 遥感影像,利用 ENVI 软件进行监督分类和人工目视解译等预处理,得到 2005 年塔里木河干流上游区的土地利用类型数据。
- (3)流域气象数据包含降水和气温数据,基于国家气象局 2000-2015 年的月降水和气温站点数据,使用 ArcGIS 的协同克里金插值,以经纬度和高程作为协变量,可得连续分布的 30 m×30 m 的降水和气温数据。
- (4)基于英巴扎水文站 2000-2015 年的月径流量数据,利用 AreGIS 计算研究区面积,可将径流量数据转化为径流深数据。
- (5)叶面积指数(LAI)数据、蒸散(ET)数据和总初级生产力(GEP)数据使用 MODIS 数据,经拼接、投影变换等预处理操作后可得研究区 1 km×1 km的相应数据。

1.3 WaSSI-C 模型适用性评价

本研究采用相关系数(R^2) 和效率系数(NS) 对模型在塔里木河干流上游区的适用性进行分析和评价。其中,相关系数(R^2) 的计算公式为:

$$R^{2} = \left(\frac{n\left(\sum (O \times S)\right) - \left(\sum O\right)\left(\sum S\right)}{\sqrt{\left(n\sum O^{2} - \left(\sum O\right)^{2}\right)\left(n\sum S^{2} - \left(\sum S\right)^{2}\right)}}\right)$$

式中,O 为观测值,S 为模拟值,n 为观测数据的个数, R^2 可在 EXCEL 中利用线性回归法自动求得, $0 \le R^2 \le 1$,其值越小表示数据吻合程度越差,当 $R^2 = 1$ 时证明模拟效果达到最优,数据完全吻合。效率系数(NS) 的计算公式如下:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (O_i - \overline{O})^2}$$
 (2)

式中,O 为观测值, \overline{O} 为观测平均值,S 为模拟值,n 为

观测数据的个数。 $-\infty < NS \le 1$,当 NS = 1 时,说明模拟数据和观测数据完全匹配,模拟效果最好;如果 NS < 0,说明模拟结果不可靠。

2 WaSSI-C 模型简介及适应性改进

2.1 WaSSI-C 模型简介

WaSSI-C模型是以月为时间尺度,以水文响应单元为空间尺度的,旨在模拟水碳资源动态变化过程的生态系统水碳耦合模型,其核心模块是水量平衡模块和生态系统生产力模块[19]。水量平衡模块是生态系统生产力模块的计算基础,主要用来模拟流域生态系统的降水、蒸发、渗透、积雪和径流过程,包含了蒸散量计算过程、冰雪累积与融化过程、土壤水分及渗透计算过程、径流计算过程等;生态系统生产力模块又称为碳循环模块,它的计算反映了水碳的耦合过程,该模块利用经验回归模型进行关系构建,旨在模拟流域内碳的收益和损失过程,见图1。

2.2 水量平衡模块

2.2.1 蒸散过程

 $PET_{hamon} = 0.1651 \times n \times k \times \rho_w$ (3) 式中, PET_{hamon} 为 Hamon 潜在蒸散(mm);n 为月时 长(d);k 为日昼长(12 h); ρ_w 为月均饱和蒸汽密度 (g·m⁻³)。

$$PAET = a \times PET_{hamon} + b \times LAI + c \times P \times PET_{hamon}$$
(4)

式中,PAET 为不考虑土壤水分状况条件下的植被蒸散潜力(mm);LAI 为月均叶面积指数;P 为降水量(mm);a,b,c 为经验参数。

2.2.2 融雪过程

$$P_{in} = P_{rain} + SnowM \tag{5}$$

式中, P_{in} 为总来水量(mm); P_{rain} 为降雨量(mm);SnowM 为地表积雪融化量(mm)。

2.2.3 水循环过程

萨克拉门托土壤湿度计算模型和 McCabe 的融 雪模型是 WaSSI - C模型水循环计算过程的思想来 源,基于土壤水分含量在垂直方向上的差异性,将 其划分为上下两层,进而模拟土壤水分的循环过 程。水循环过程旨在模拟研究区产流过程和实际 蒸散过程,在其计算过程中充分考虑了自然地形和 植被状况对土壤水分循环的影响,提高了模型模拟 结果的准确性。地表径流产生后直接汇入河网;经 线型水库的调节后,地下径流和壤中流依次汇入河 网;地表地下产流和壤中流相加并扣除一定时段内 的蒸散发后,得到总入流量,经河网调节后,得到最

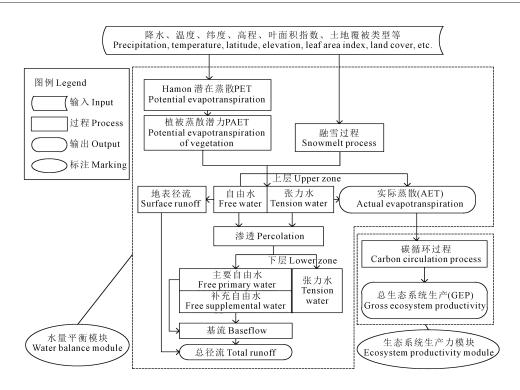


图 1 WaSSI - C 模型的理论框架和逻辑结构

Fig.1 The theoretical framework and logical structure of the WaSSI - C model

(8)

终径流量。实际蒸散水分主要来源于土壤上层张 力水和自由水及下层张力水,具体计算过程如下:

当 PAET < UZTWC 时,

$$ET = PAET \times \frac{UZTWC}{UZTWM} \tag{6}$$

当
$$UZTWC < PAET < UZTWC + UZFWC$$
 时,
$$ET = PAET$$
 (7)

当 PAET > UZTWC + UZFWC 时,

$$ET = UZTWC + UZFWC +$$

$$\min \left\{ \frac{(PAET-UZTWC-UZFWC)\times LZTWC}{UZTWM+LZTWM}, LZTWC \right\}$$

式中,ET为实际蒸散(mm);PAET为不考虑土壤水分状况条件下的植被蒸散潜力(mm);UZTWC为土壤上层张力水含量(mm);UZTWM为土壤上层张力水最大容量(mm);UZFWC为土壤上层自由水含量(mm);LZTWC为土壤下层张力水含量(mm);LZTWM为土壤下层张力水最大容量(mm)。

2.3 生态系统生产力模块

生态系统生产力模型旨在模拟生态系统的碳循环动态过程,其构建思路主要是基于全球通量网络中的 GEP 和 ET 数据,利用线性回归模型建立回归方程。因此回归方程斜率代表了基于 GEP 的水分利用效率,基于此可评价和分析研究区的水碳特征。

$$GEP = k \times ET \tag{9}$$

式中,GEP 为总生态系统生产力 $(g \cdot m^{-2})$;ET 为实际蒸散(mm);k 为经验参数。

2.4 WaSSI - C 模型的适应性改进

研究区地处中国西部内陆干旱区,远离海洋,降水稀少,其水资源主要来源于高山冰雪融化。然而在WaSSI-C模型的融雪过程中,区域总来水量主要由降雨量和地表积雪融化量组成,这显然与研究区实际情况不符。因此,在融雪过程中加入冰川融化量计算模块^[25-26],以提高模型在研究区的适用性。

$$SnowI = f \times (T+9)^{t} \tag{10}$$

$$P_{in} = P_{rain} + SnowM + SnowI \tag{11}$$

式中,SnowI 为冰川融化量(mm);T 为气温($^{\circ}$);f,t 为经验参数; P_{in} 为总来水量(mm); P_{rain} 为降雨量(mm);SnowM 为地表积雪融化量(mm)。

3 结果与分析

基于已获取的实测径流数据和 MODIS 的蒸散 (ET)数据和总生态系统生产力(GEP)数据,将 2000-2009 年作为 WaSSI-C 模型的率定期,2010-2015 年作为验证期,利用决定系数(R²)和效率系数 (NS)分别对 2 个时期的总径流模拟效果、蒸散模拟效果和总生态系统生产力模拟效果进行定量评价,进而分析 WaSSI-C 模型在研究区的适用性。

3.1 总径流模拟结果评价与分析

模型在塔里木河干流上游区的总径流模拟结

果在2个时期均呈现出良好的模拟效果。在率定 期,总径流模拟值与实测值的 R^2 为 0.72,NS 为0.71, 总体上吻合效果较为理想,仅在径流峰值处存在差 异略大的情况(图2)。在验证期,总径流模拟值与 实测值的 R^2 为 0.68, NS 为 0.67, 与率定期相似; 在 径流量较小时,模拟径流与实测径流基本完全吻 合,当径流量较大时,模拟效果较差(图3)。综合模 型在率定期和验证期的径流模拟评价结果可以发 现,模型总体上可以很好地反映研究区的径流动态 变化,但除个别年份(2009年)外,不同时期的总径 流模型均存在着径流峰值低估的问题。造成这样 问题的原因可能是:(1)研究区产流主要以超渗产 流为主,而模型的水循环模拟中兼有超渗产流和蓄 满产流,这在一定程度上使得模拟结果在径流峰值 处被低估[27];(2)补充的冰川融化量计算模块受温 度限制过大,忽略了其他因素对冰川融化的影响。 另外,赵锐锋等[2]研究了1957-2005年塔里木河干 流年径流量的变化趋势,计算出英巴扎水文站的年 均径流量为28.47×108 m3,将其转化为径流深为185 mm,并指出塔里木河干流径流量表现出递减的变化 趋势。杨鹏等[28] 指出塔里木河径流量在 2006 年后 持续减少,2009 年是塔里木河在过去 50 a 里水量最 少的一年,而2010年为丰水年。本研究模拟所得 2000-2015 年的年均径流深为 150 mm, 与赵锐峰等 的研究略有差异,这可能是由于研究时间尺度不同 所造成的,在年际变化上与杨鹏等的研究具有一致 性,进而从侧面验证了径流模拟结果的可靠性。

3.2 蒸散模拟结果评价与分析

模型在率定期(2000-2009年)和验证期(2010-2015年)的蒸散模拟在不同时期都取得了良好的模拟效果。在率定期,模型模拟蒸散值与 MODIS 蒸

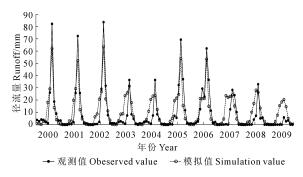
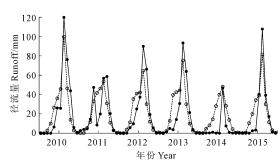


图 2 率定期月总径流的 WaSSI-C 模拟值 与观测值的对比

Fig.2 Comparison between the simulated values by WaSSI-C and the observed values of themonthly total runoff during calibration period

散值对比的 R^2 和 NS 均为 0.60,不同月份平均蒸散 模拟值与 MODIS 值整体保持较好的一致性。但也 存在差异较大的情况,在5月和11月模拟值略高于 MODIS 值,而在 7 月模拟值要明显低于 MODIS 值 (图 4)。在验证期,模型模拟蒸散值与 MODIS 蒸散 值对比的 R^2 为 0.64, NS 为 0.56, 与率定期相似, 不 同月份模拟蒸散与 MODIS 蒸散整体上具有一定的 一致性,但在部分月份差异略大,即4月、5月和11 月模拟值高于 MODIS 值,7 月模拟值要明显低于 MODIS 值(图 5)。综合模型在 2 个时期的蒸散模拟 评价结果可以发现,模型总体上可以很好地反映研 究区的蒸散变化特征,但也存在部分地区和月份模 拟蒸散与 MODIS 蒸散差异略大的问题,其原因可能 是:(1) MODIS 蒸散在无植被区域为无效值,本研究 在处理时将其设置为0,进而导致其计算蒸散有所 下降;(2) MODIS 的蒸散是基于饱和水汽压差计算 的,忽略了土壤水分对实际蒸散的影响,可能会造 成对实际蒸散值的高估。目前,有关塔里木河干流 上游区的实际蒸散估算研究多为塔里木河干流区 乃至新疆范围内的实际蒸散研究。因此,利用前人 研究成果对塔里木河干流上游区实际蒸散难以进 行准确验证,只能基于区域自然地理特征对其进行 比较验证。代超[29]基于区域水量平衡计算出塔里 木河干流区年平均陆地蒸发深为 162.3 mm; 阿迪来 ·乌甫等[30]在研究新疆地表蒸散时空分布与变化 趋势时指出塔里木盆地边缘地区年实际蒸散在48~ 248 mm 之间。本研究模拟所得塔里木河干流上游 区年均实际蒸散为 217 mm;各水文响应单元的年均 实际蒸散值在110~360 mm 之间:考虑到塔里木河 干流上中下游的差异性及研究区的地理位置,可以 认为模型模拟所得实际蒸散值是较为可靠的。



→ 观测值 Obeserved value -- 模拟值 Simulation value

图 3 验证期月总径流的 WaSSI-C 模拟值 与观测值的对比

Fig.3 Comparison between the simulated values by WaSSI-C and the observed values of the monthly total runoff during validation period

3.3 碳生产力模拟结果评价与分析

模型的 GEP 模拟效果能够较好地再现研究区 的 GEP 动态变化过程。在率定期,模型模拟 GEP 值与 MODIS 的 GEP 值对比的 R² 为 0.68, NS 为 0.66,不同月份 GEP 模拟值与 MODIS 值整体保持较 好的一致性,仅在个别月份(4-7月)有较大的差异 (图 6)。在验证期,模型模拟蒸散值与 MODIS 蒸散 值对比的 R²为 0.61, NS 为 0.69, 不同月份模拟 GEP 与 MODIS 的 GEP 计算结果整体比较一致,仅在部分 月份(4-5月、7月)差异略大(图7)。综合模型在2 个时期的 GEP 模拟评价结果可以发现,在率定期和 验证期的两个评价指标均大于 0.6,处于可接受范围, 但在部分月份 GEP 模拟值与 MODIS 的 GEP 值存在 较大差异,这可能是由于:(1) MODIS 的 GEP 计算时 利用了辐射数,而本文使用了温度,二者间尽管有较 强的相关性, 但并不完全等价[31];(2) MODIS 基于全 球气象数据来计算 GEP,而本文利用基于观测点的插 值气象数据,二者间的差异增加了模型的不确定性。 陈福军等[32]利用陆地生态系统碳循环模型(CASA 模型)对中国陆地生态系统近30 a的NPP时空变化

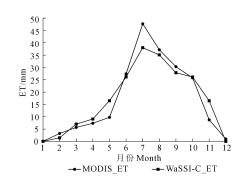


图 4 率定期不同月份平均蒸散的 WaSSI-C 模拟值与 MODIS 值的对比 Fig.4 Comparison of WaSSI-C and MODIS value

Fig.4 Comparison of WaSSI-C and MODIS values of average monthly evapotranspiration during calibration period

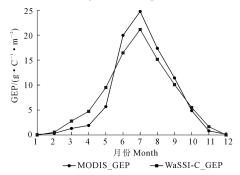


图 6 率定期不同月份平均总生态系统生产力(GEP) 的 WaSSI-C 模拟值与 MODIS 值的对比

Fig.6 Comparison of WaSSI-C and MODIS values of average monthly gross ecosystem productivity during calibration period

特征进行了研究,指出中国西部荒漠生态系统 NPP 年均值在 $100 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 以下。卢玲等 $[^{33}]$ 指出新疆南部 年均 NPP 累积量在 $0 \sim 100 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间。本研究在 2000-2015 年的年均 GEP 模拟值为 $88 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,与陈福军和卢玲等 $[^{32-33}]$ 的研究基本一致。

4 结论与讨论

本研究在充分研究 WaSSI-C 模型理论框架和运行机理的基础上,针对塔里木河干流上游区自然地理和资源环境特征,通过增加冰川融化计算过程对模型进行了适用性改进,进而探讨了修正后的WaSSI-C 模型在塔里木河干流上游区的适用性,并得到了如下结论:

1)修正后的 WaSSI-C 模型能够很好地应用于研究区。统计评价指标 R²和 NS 均显示出 WaSSI-C 模型对研究区的水、碳模拟效果良好。虽然模拟结果和验证数据间有着一定的不一致性,但这可能是由于输入数据和验证数据本身可能具有的误差以及模型的不确定性对模拟效果评价的影响导致的,而且,模型计算结果在径流、蒸散和生产力方面的数

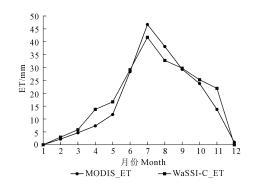


图 5 验证期不同月份平均蒸散的 WaSSI-C 模拟值与 MODIS 值的对比 Fig.5 Comparison of WaSSI-C and MODIS va

Fig.5 Comparison of WaSSI-C and MODIS values of average monthly evapotranspiration during validation period

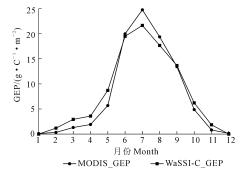


图 7 验证期不同月份平均总生态系统生产力(GEP) 的 WaSSI-C 模拟值与 MODIS 值的对比

Fig.7 Comparison of WaSSI-C and MODIS values of average monthly gross ecosystem productivity during validation period

据范围与相关研究大体一致^[2,28-30,32-33]。因此可以 认为 WaSSI-C 模型经适用性改进后能够很好地应 用于研究区。

2)根据 WaSSI-C 模型在研究区的 3 个模拟结果变量验证可以发现:模型对于径流的模拟效果最优,对于 ET 和 GEP 的模拟效果略差。具体表现为率定期和验证期的 ET 和 GEP 对比验证的 R^2 和 NS 均低于径流对比验证的 R^2 和 NS 值;在模拟结果与验证数据的对比曲线上,模拟径流与实测径流呈现出更好的一致性。这可能是由于缺乏实测的 ET 和 GEP 数据用于模型的率定和验证,进而增加了模型在 ET 和 GEP 模拟中的不确定性。因此,在未来除继续对模型进行适用性改进外,寻求更高质量的 ET 和 GEP 数据将成为提升 WaSSI-C 模型在研究区适用性的关键因素之一。

参考文献:

- [1] 陈忠升,陈亚宁,徐长春.近 50a 来塔里木河干流年径流量变化趋势及预测[J].干旱区地理,2011,34(1):43-51.
- [2] 赵锐锋,陈亚宁,李卫红,等.1957年至2005年塔里木河干流径流变 化趋势分析[J].资源科学,2010,32(6):1196-1203.
- [3] 潘存军,杨健,牛树奎,塔里木河流域土地荒漠化现状分析[J].干旱区研究,2007,24(5):637-640.
- [4] 于贵瑞,王秋凤,于振良.陆地生态系统水-碳耦合循环与过程管理研究[J].地球科学进展,2004,19(5):831-839.
- [5] 张永强,沈彦俊,刘昌明,等.华北平原典型农田水热与 CO_2 通量的测定[J].地理学报,2002,57(3):333-342.
- [6] 朱治林,孙晓敏,张仁华,等.作物群体 CO₂通量和水分利用效率的 快速测定[J].应用生态学报,2004,15(9):1684-1686.
- [7] 郭维华,李思恩.西北旱区葡萄园水碳通量耦合的初步研究[J].灌溉排水学报,2010,29(5):61-63.
- [8] 苏培玺,赵爱芬,张立新,等.荒漠植物梭梭和沙拐枣光合作用、蒸腾作用及水分利用效率特征[J].西北植物学报,2003,23(1):11-17.
- [9] Baldocchi D, Falge E, Gu L, et al. FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(82):2415-2434.
- [10] Beer C, Reichstein M, Tomelleri E, et al. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate [J]. Science, 2010, 329 (5993):834-838.
- [11] Zhao M, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009 [J]. Science, 2010, 329 (5994):940-943.
- [12] 陈忠升,陈亚宁,李卫红,等.塔里木河干流径流损耗及其人类活动 影响强度变化[J].地理学报,2011,66(1);89-98.
- [13] 白玉锋,徐海量,王希义,等.塔里木河下游荒漠草地植被净初级生产力模型初探[J].干旱区资源与环境,2015,29(9):92-96.
- [14] Cao M, Woodward F I. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate

- change [J]. Global Change Biology, 1998, 4(2):185-198.
- [15] Liu J, Chen J M, Cihlar J, et al. A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs [J]. Remote Sensing of Environment, 1997,62(2):158-175.
- [16] Foley J A, Prentice I C, Ramankutty N, et al. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10 (4):603-628.
- [17] Tague C L, Band L E. RHESSys: regional hydro-ecologic simulation system—an object-oriented approach to spatially distributed modeling of carbon, water, and nutrient cycling[J]. Earth Interactions, 2004,8 (19):1-42.
- [18] Tian H, Liu M, Zhang C, et al. The Dynamic Land Ecosystem Model (DLEM) for simulating terrestrial processes and interactions in the context of multifactor global change [J]. Acta Geographica Sinica, 2010,65(9):1027-1047.
- [19] Sun G, Caldwell P, Noormets A, et al. Upscaling key ecosystem functions across the conterminous United States by a water-centric ecosystem model [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2011, 116(G3); G00J05.
- [20] 张晓琳,熊立华,林琳,等.五种潜在蒸散发公式在汉江流域的应用 [J].干旱区地理,2012,35(2):229-237.
- [21] Mccabe G J, Wolock D M. General-circulation-model simulations of future snowpack in the Western United States[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 1999, 35(6):1473-1484.
- [22] 刘宁,孙鹏森,刘世荣,等.流域水碳过程耦合模拟-WaSSI-C 模型的率定与检验[J].植物生态学报,2013,37(6):492-502.
- [23] Sun G, Mcnulty S G, Myers J A M, et al. Impacts of multiple stresses on water demand and supply across the Southeastern United States[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2008, 44(6):1441-1457.
- [24] 赵虎,晏磊,季方.塔里木河干流上游土地利用动态变化研究[J]. 干旱区资源与环境,2001,15(4):40-43.
- [25] 卿文武,陈仁升,刘时银.冰川水文模型研究进展[J].水科学进展, 2008,19(6);893-902.
- [26] 张小咏,刘耕年,鞠远江,等.冰川径流模型研究进展[J].水土保持研究,2005,12(4);58-62.
- [27] 崔泰昌,陆建华.试论蓄满产流模型与超渗产流模型[J].山西水利 科技,2000,(3):13-15.
- [28] 杨鹏,陈亚宁,李卫红,等.2003-2012 年新疆塔里木河径流量变化与断流分析[J].资源科学,2015,37(3):485-493.
- [29] 代超.气候变化和人类活动对塔里木河流域蒸散发影响分析[D]. 北京:清华大学,2015.
- [30] 阿迪来·乌甫,玉素甫江·如素力,热伊莱·卡得尔,等.基于 MODIS 数据的新疆地表蒸散量时空分布及变化趋势分析[J].地 理研究,2017,36(7);1245-1256.
- [31] Zhao M, Heinsch F A, Nemani R R, et al. Improvements of the MO-DIS terrestrial gross and net primary production global data set [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(2):164-176.
- [32] 陈福军,沈彦俊,李倩,等.中国陆地生态系统近 30 年 NPP 时空变 化研究[J].地理科学,2011,31(11):1409-1414.
- [33] 卢玲,李新,VeroustraeteF.中国西部地区植被净初级生产力的时空格局[J].生态学报,2005,(5):1026-1032,1237.