

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0150

张戈, 夏建新, 王树东, 等. 基于多源数据的黑河流域日尺度蒸散发量模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 33-38.
ZHANG G, XIA J X, WANG S D, et al. Simulating the daily evapotranspiration in Heihe river basin with multi-sensor remote sensing data[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(6): 33-38. (in Chinese)

基于多源数据的黑河流域日尺度蒸散发量模拟

张戈^{1,2}, 夏建新¹, 王树东²

(1. 中央民族大学, 北京 100081; 2. 中国科学院 遥感与数字地球研究所, 北京 100101)

摘要: 植被蒸散发是地表水量平衡和热量平衡的重要参量, 也是衡量植被生长状况和作物产量的重要指标, 同时也是进行流域水资源优化配置的依据。遥感技术的快速发展使其成为区域尺度蒸散发模拟的重要手段。以黑河流域为例, 构建遥感驱动的蒸散发模拟模型, 结合多源遥感数据(MODIS, TRMM 等)以及GLDAS全球陆面数据同化系统数据, 对黑河流域2005、2010、2015年三个时期的潜在蒸散发和实际蒸散发进行了时间尺度为每日、空间尺度为1 km的模拟。研究表明: 潜在蒸散发月际变化明显, 从5月开始增长, 于7月达到峰值, 然后逐渐减少; 实际蒸散发在月份之间变化趋势明显, 在2015年均达到了最高值; 精度检验结果表明本研究采用的两个模型均达到了很好的效果, Kristensen Jensen模型更适合用于黑河流域。本研究为黑河流域地表特征数据集提供了重要的日尺度蒸散发数据。

关键词: 黑河流域; 蒸散发; 地表特征; 遥感数据; GLDAS数据

中图分类号: P426 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Simulating the daily evapotranspiration in Heihe river basin with multi-sensor remote sensing data

ZHANG Ge^{1,2}, XIA Jianxin¹, WANG Shudong²

(1. Minzu University of China, Beijing 100081, China;

2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Vegetation evapotranspiration is an important parameter involving ground surface water and heat balance. It is also an important index to measure vegetation growth and crop yield and the basis for optimized allocation of watershed water resources. The remote sensing technology has become an important method for simulation of regional scale evapotranspiration. With the Heihe River Basin as a case study, we constructed a remote sensing driven evapotranspiration simulation model, combining multi-source remote sensing data (MODIS, TRMM, etc.) and GLDAS data, we simulated the potential evapotranspiration and actual evapotranspiration of Heihe River basin in 2005, 2010 and 2015 on daily scale at a 1 km spatial resolution. The results showed that: the potential evapotranspiration varied significantly between different months, starting to grow in May, peaking in July, and then gradually decreasing. The actual evapotranspiration varied significantly between the months and reached the highest value in 2015. The results of precision test showed that the two models used in this study both had good effects. The Kristensen Jensen model was more suitable for the Heihe river basin. This research can provide important diurnal evapotranspiration data for the Heihe river basin surface feature dataset.

Key words: Heihe river basin; evapotranspiration; surface feature; remote sensing data; GLDAS data

收稿日期: 2018-04-05 修回日期: 2018-07-02 网络出版时间: 2018-07-11

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180710.1054.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(41671362; 41371359; 41571175)

Funds: National Natural Science Foundation of China(41671362; 41371359; 41571175)

作者简介: 张戈(1979-), 女, 辽宁人, 高级工程师, 博士, 主要从事民族生态学研究。E-mail: 285149242@qq.com

通讯作者: 王树东(1973-), 男(满族), 辽宁人, 副研究员, 博士, 主要从事遥感技术在生态环境过程与生态环境质量评价中的应用研究。

E-mail: wangsd@radi.ac.cn

遥感数据具有很高的时间和空间连续性,为连续地监测地表植被特征提供了重要的手段。遥感技术的快速发展,提供了更高时间分辨率和更高空间分辨率的高光谱、多波段遥感数据,使准确、实时、定量地模拟区域尺度的地物特征成为可能。相对于传统站点监测,遥感技术在区域尺度动态模拟监测领域具有很大的优势。目前遥感技术已用于区域尺度的农作物、城市范围、植被覆盖、水质、土壤水分、蒸散发监测,均取得了较好的效果^[1-6]。

蒸散发是地表水量平衡和热量平衡的重要参量,也是衡量植被生长状况和作物产量的重要指标,对流域水资源配置具有参考价值^[7]。目前已有众多基于遥感数据的区域尺度蒸散发模拟研究,采用不同的模型对于同一区域结果也可能出现差别^[8-11]。研究及比较模型在不同地区的适用性,对于区域尺度蒸散发的准确模拟具有重要意义。

黑河流域是我国西北地区第二大内陆流域,远离海洋,高山环绕。该流域气候具有明显的东西差异和南北差异,其地形及气候复杂性使得蒸散发模拟具有较大的挑战性。目前已有众多该流域的遥感蒸散发模拟研究^[12-14],然而不同模型在该流域的适用性的研究仍然较为缺乏。本研究以黑河流域为例,采用多源遥感数据并结合实测站点数据进行精度验证,探讨基于不同遥感蒸散发模拟模型的适用性,为该流域的水文过程及植被生长模型研究提供重要的参考数据集。

1 研究区简介

黑河流域位于我国河西走廊中部,面积约 13 万 km²,全长约 810 km,流经青海、内蒙、甘肃三省,跨越高山湿冷及半干旱区、温带及暖温带干旱区三种不同的自然地理带。黑河流域位于欧亚大陆中部,远离海洋,周围高山环绕,流域气候主要受中高纬度的西风带环流控制和极地冷气团影响,气候干燥,降水稀少而集中,多大风,日照充足,太阳辐射强烈,昼夜温差大。土壤类型有寒漠土、草甸土、灰钙土、栗钙土等。上游地区经济以牧业为主,中游地区为主要的绿洲农业经营区,下游是以蒙古族为主体的荒漠牧业区^[15]。

2 数据及方法

2.1 潜在蒸散发估算

本文选择 Priestley-Taylor 公式^[16],结合能量平衡原理,基于 MODIS 数据产品计算潜在蒸散发,作为蒸散发模型的输入参数。该模型的主要特点是

所需的参数较少,并且基本可以通过遥感数据反演得到。本文采用 Priestley-Taylor 模型主要是考虑到黑河流域的站点观测资料(例如太阳辐射、湿度、风速等)有限,尤其是在 2005 年和 2010 年。要模拟黑河流域潜在蒸散发, Priestley-Taylor 模型很好地解决了资料缺乏的问题。

Priestley-Taylor 公式的表达式如下:

$$ET_p = \alpha \left[\frac{R_n - G}{\lambda} \right] \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] \quad (1)$$

式中: ET_p 为潜在蒸散发 (mm); α 为 Priestley-Taylor 系数,取值为 1.26; R_n 为地表净辐射量 (W/m^2); G 为土壤热通量 (W/m^2); λ 为汽化潜热 (MJ/kg); Δ 为饱和水汽压-温度曲线斜率 ($kPa/^\circ C$); γ 为干湿表常数 ($kPa/^\circ C$)。模型的主要参数及数据来源见表 1。

表 1 潜在蒸散发模型主要参数

Tab. 1 Main parameters of potential evapotranspiration model		
模型参数	数据来源	计算公式
饱和水汽压曲率	GLDAS_NOAH	$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.2 T_a}{T_a + 237.3} \right) \right]}{(T_a + 237.3)^2}$
干湿表常数	SRT M4.1	$\gamma = \frac{C_p P_a}{\epsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} P_a$
地表净辐射	GLDAS_NOAH025、M OD11A1、M CD43B3 数据	具体方法参考文献[6]
土壤热通量	M OD13A2	$G = R_n [\Gamma_c + (1 - VF)(\Gamma_s - \Gamma_c)]$

通过遥感能获取卫星过境时刻的净辐射量以及大气温度可由 Priestley-Taylor 公式估算卫星过境时刻的潜在蒸散发,结合余弦曲线法即可估算日最大潜在蒸散发量^[17],计算公式如下:

$$ET_{p,max} = \frac{E_{INEF,p}}{\sin \left[\left[\frac{t_{pass} - (t_{rise} + 1)}{t_{set} - t_{rise} - 2} \right] \pi \right]} \quad (2)$$

式中: $E_{INEF,p}$ 为卫星过境时刻的潜在蒸散发量; t_{pass} 为卫星过境时刻的当地时间; t_{rise} 为当地日出时间; t_{set} 为当地日落时间。由日最大潜在蒸散发推出日潜在蒸散发总量计算公式为

$$ET_p = \int_{t_{rise}}^{t_{set}} ET_{p,max} \sin \left[\left[\frac{t - (t_{rise} + 1)}{t_{set} - t_{rise} - 2} \right] \pi \right] dt \quad (3)$$

2.2 基于 Kristensen Jensen 模型的实际蒸散发模拟

本文采用以遥感叶面积指数(LAI)为主要参数的 Kristensen Jensen^[18]模型,模型包括了蒸散发的

3个方面。

2.2.1 植被截留蒸发

模型将冠层截留过程模拟为截留贮水过程,并认为植被截留的水分最终均以蒸发的形式返回到大气中。因此,植被截留蒸发公式如下:

$$E_{can} = \min(S_v ET_p, P) \quad (4)$$

式中: E_{can} 为植被截留层蒸发量(mm); S_v 为植被截留量(mm),由植被截留模型输出; ET_p 为潜在蒸散发量(mm),由潜在蒸散发模型估算; P 为降水量(mm),由经过站点数据校正后的 TRMM 数据集获取。

2.2.2 植被蒸腾

植物蒸腾模型表达式如下:

$$E_a = f_1(I_{LA}) \cdot f_2(\theta) \cdot R_{DF} \cdot (ET_p - E_{can}) \quad (5)$$

式中: E_a 为实际植被蒸腾(mm); R_{DF} 为根系分布系数; f_1 和 R_{DF} 反映植被覆盖对植被蒸腾的影响,分别表示蒸腾对植被叶面积和根系密度的依赖度; f_2 为根系层土壤水分函数,反映土壤水分状况对蒸腾的影响; $ET_p - E_{can}$ 为扣除林冠截留量后的最大蒸发能力。

f_1 、 f_2 和 R_{DF} 的表达式如下:

$$f_1(I_{LA}) = \max(0, \min(1, (C_2 + C_1 \cdot I_{LA}))) \quad (6)$$

$$f_2(\theta) = \begin{cases} 0 & \theta \leq \theta_w \\ 1 - \left(\frac{\theta_f - \theta}{\theta_f - \theta_w}\right)^{\frac{C_3}{ET_p}} & \theta_w \leq \theta \leq \theta_f \\ 1 & \theta \geq \theta_f \end{cases} \quad (7)$$

$$R_{DF} = \frac{\int_{z_1}^{z_2} R(z) dz}{\int_0^{L_R} R(z) dz} \quad (8)$$

且:

$$\log R(z) = \log R_0 - A_{ROOT} \times z \quad (9)$$

R_{DF} 的计算形式可转化为与植被根系深度有关的形式

$$R_{DF} = \frac{e^{-A_{ROOT} \times z_2} - e^{-A_{ROOT} \times z_1}}{e^{-A_{ROOT} \times L_R} - 1} \quad (10)$$

式中: I_{LA} 为叶面积指数,由 MODIS 数据集获取; θ 为土壤含水量(%); θ_f 为田间持水量(%); θ_w 为萎蔫含水量(%); C_1, C_2, C_3 为参数,在本模型中取值分别为 0.5、0.4 和 5.0; A_{ROOT} 为描述根主要分布的参数; z_1, z_2 分别为所求土壤层垂直方向上的两端坐标(m); L_R 为根系深度(m)。

2.2.3 土壤蒸发

土壤蒸发计算公式如下:

$$E_s = ET_p \cdot f_3(\theta) \cdot f_4(\theta) \cdot (1 - f_1(I_{LA})) \quad (11)$$

$$f_3(\theta) = \begin{cases} 0 & \theta \leq \theta_w \\ C_2(\theta/\theta_w) & \theta_w \leq \theta \leq \theta_f \\ C_2 & \theta \geq \theta_f \end{cases} \quad (12)$$

$$f_4(\theta) = \begin{cases} \frac{\theta - 0.5(\theta_w + \theta_f)}{\theta_f - 0.5(\theta_w + \theta_f)} & \theta \geq 0.5(\theta_w + \theta_f) \\ 0 & \theta < 0.5(\theta_w + \theta_f) \end{cases} \quad (13)$$

式中: Q_r 为土壤剩余含水量。

非水面单元上的蒸散发为植被截留蒸发、植被蒸腾、土壤蒸发之和。模型的输入参数主要包括决定蒸发能力的潜在蒸散发、影响植被截留和植被蒸腾的 LAI、影响植被蒸腾的根系深度、影响植被蒸腾和土壤蒸发的土壤水分特征参数。

模型使用的公共平台数据包括 GLDAS 土壤湿度、潜在蒸散发、TRMM 降雨观测数据、植被截留、叶面积指数、土壤属性数据。各数据集详细信息见表 2。

表 2 Kristensen Jensen 蒸散发模型所用数据产品信息
Tab. 2 Information table of data products used in the Kristensen Jensen evapotranspiration model

数据集	数据内容	产品代码
GLDAS	土壤水分	GLDAS_NOAH
TRMM	降雨	3B42
MODIS	叶面积指数	MOD13A2
HWSO	萎蔫含水量	SWW
	田间持水量	SWF
	剩余含水量	SWR

2.3 基于 Penman Monteith 公式的实际蒸散发模拟

Penman Monteith 计算方法^[19]中,实际蒸散量和潜在蒸散量表示为:

$$EP_p = K_c \cdot ET_0 \quad (14)$$

$$EP_a = K_s \cdot ET_p \quad (15)$$

式中: ET_0 为参考作物蒸散量(mm/d); ET_p 为潜在蒸散量(mm/d); ET_a 为实际蒸散量(mm/d); K_s 为土壤水分胁迫系数; K_c 为作物系数。

K_s 通过下式计算:

$$K_s = \begin{cases} 0 & W < W_p \\ \frac{W - W_p}{W_j - W_p} & W_p < W < W_j \\ 1 & W \geq W_j \end{cases} \quad (16)$$

$$W_j = W_f \times 0.75$$

式中: W_p 为凋萎含水量; W_f 为田间持水量; W_j 为毛管断裂含水量; W 为土壤实际含水量,由 GLDAS 土壤水数据集获得。

3 结果与讨论

3.1 潜在蒸散发模拟结果

基于已构建的遥感驱动的潜在蒸散发动态模拟模型以及研究区潜在蒸散发模型参数空间数据库,对研究区 2005、2010、2015 年三个年份 3 月-10 月潜在蒸散发空间分布进行日尺度上的数值模拟,得到研究区空间分辨率 1 km、时间分辨率 1 d 的潜在蒸散发空间分布。本文选取 3 月-10 月进行模拟的主要原因是作物生长季主要集中在在这段时间,而其它月份降雨量和蒸发量都非常少,研究这些月份意义不大。如图 1 所示,潜在蒸散发月际变化明显,从 5 月开始增长,于 7 月达到峰值,然后逐渐减少。潜在蒸散发月份之间的差异可能是由于月平均气温的差异引起,加上 5 月、6 月、7 月降雨量大,因此这

几个月份的潜在蒸散发量相对其它月份较高,本文中的 GLDAS 气温数据以及 TRMM 降雨数据也验证了这一区域温度和降雨量确实在这几个月达到峰值。

而潜在蒸散发的年际变化结果(图 2)表明,黑河流域 2015 年平均潜在蒸散发最高,全流域平均值达到了 3.23 mm,2005 年和 2010 年流域潜在蒸散发量相差不大,平均值均为 2.68 mm。说明在 2015 年,整个流域的潜在蒸散发量骤升。一方面,是由流域平均气温升高造成,另一方面,该年份降雨量的增加也是造成潜在蒸散发增加的主要因素。该流域 TRMM 降雨数据以及 GLDAS 气温数据均支持这一结论。而在空间分布上来看,流域南部海拔较高的山区潜在蒸散发量比其它区域更高,山区的高降雨量可能是形成这一分布格局的重要因素。

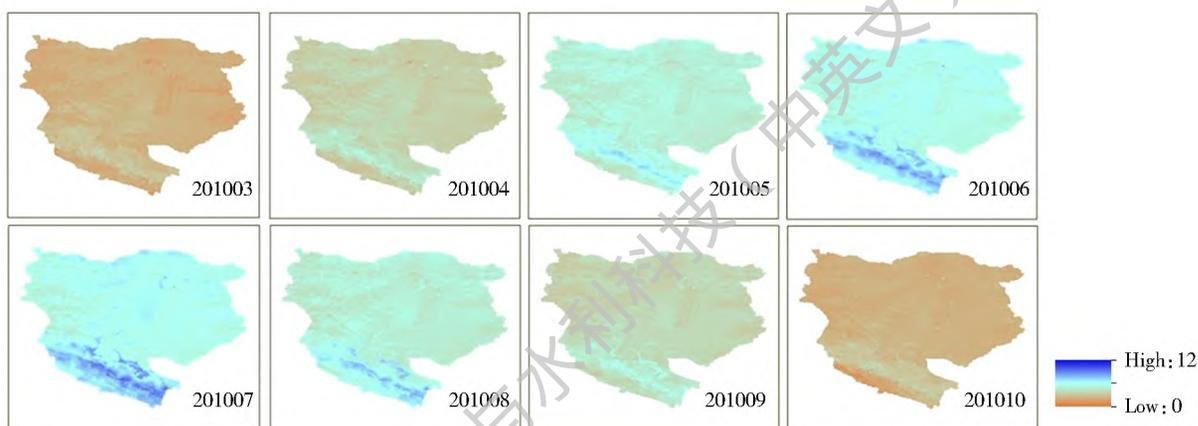


图 1 2010 年研究区平均潜在蒸散发空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of mean potential evapotranspiration of the study area in 2010

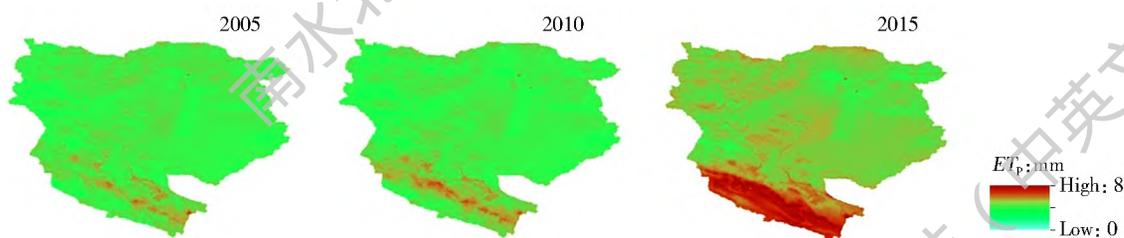


图 2 2005 年、2010 年、2015 年日平均潜在蒸散发分布

Fig. 2 The daily mean evapotranspiration of the study area in 2005, 2010 and 2015

3.2 实际蒸散发模拟结果

基于已构建的 Kristenser Jensen 蒸散发模型以及 Penman Monteith 模型,对研究区 2005 年、2010 年、2015 年三个年份 3 月-10 月实际蒸散发空间分布分别进行日尺度上的数值模拟,得到研究区空间分辨率 1 km、时间分辨率 1 d 的实际蒸散发空间分布(图 3)。并利用黑河流域生态过程模拟验证数据集对结果进行验证。

在月份之间,两个模型模拟的实际蒸散发与潜

在蒸散发具有相似的变化趋势,即在 5、6、7 月达到最高值,而从 8 月开始下降。分析实际蒸散发年际之间的变化趋势可以得知,由两个模型模拟的 2015 年实际蒸散发值均比 2005 和 2010 年的实际蒸散发高。由 Kristenser Jensen 模型模拟出的 2015 年平均实际蒸散发为 3.75 mm,高于 2005 年的 1.70 mm 以及 2010 年的 1.27 mm。而 penman 模型模拟的结果在年际变化趋势上较相似,同样也是 2015 年最高,但整体来看 penman 模型模拟的实际蒸散发值

比 Kristenser Jensen 模型更低。

整体来看 penman 模型更依赖于土壤水分数据, 并且该模型输入参数较少, 受输入数据集的影响

较大, 尤其受 GLDAS 土壤水数据集的影响, 整体模拟数值偏低。相对而言 kristenser-Jensen 模型输入参数多, 模拟结果受单个数据集的影响较小。

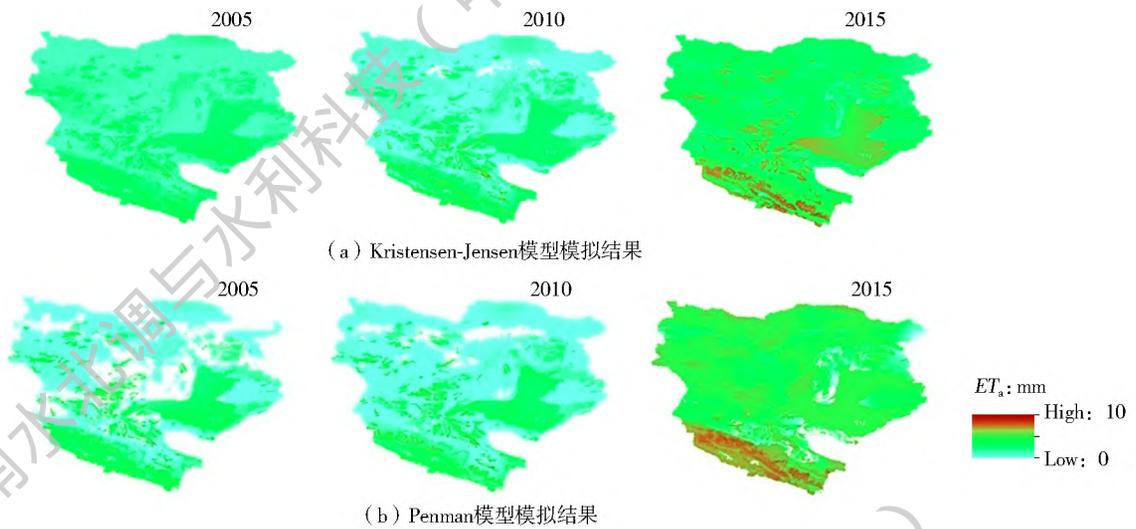


图 3 2005 年, 2010 年和 2015 年研究区实际年均蒸散发

Fig. 3 The annual mean evapotranspiration of the study area in 2005, 2010 and 2015

3.3 模型精度检验结果

由于阿柔站只有 2010 和 2011 年的观测数据, 因此选取研究区内阿柔(100 452°E, 38 0633°N) 以及关滩(100 25°E, 38 533°N) 两个观测站 2010 年月尺度的实测蒸散发数据对本文的 Kristenser Jensen 实际蒸散发模型进行精度验证, 结果见图 4。

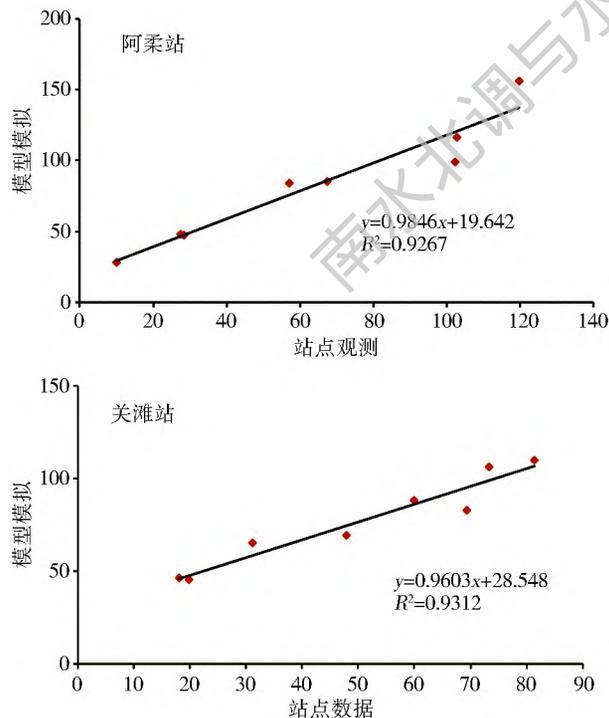


图 4 Kristenser Jensen 模型精度检验结果

Fig. 4 The precision test result of Kristenser Jensen model

Kristenser Jensen 模型模拟值与实测值的相关系数达到了 0.9 以上, 表明本文的模拟取得了很好

的效果, 可为黑河流域地表特征数据集提供准确的蒸散发数据。Kristenser Jensen 模型模拟结果覆盖了黑河流域几乎全部的区域, 而 Penman 模型模拟的数据则存在大面积的缺失, 表明 Kristenser Jensen 模型更适合用于黑河流域实际蒸散发的模拟。在本文采用的 GLDAS 土壤水数据中, 2005 年及 2010 年的土壤水分普遍较低, 部分地区低于萎蔫含水量, 这可能是造成 Penman 模型大面积缺失的原因, 而 Kristenser Jensen 模型输入参数较多, 可抵消较大部分 GLDAS 土壤水分数据的影响。利用 Penman 模型数据, 在非缺失区域选取 100 个随机点, 对 Kristenser Jensen 模型模拟结果进行验证, 二者也具有很好的相关性 ($R^2 = 0.888$), 进一步验证了 Kristenser Jensen 模型的可靠性。

4 结论

本文采用遥感驱动的蒸散发模拟模型, 对三个不同年份的黑河流域蒸散发进行区域尺度的模拟, 模拟结果表明潜在蒸散发和实际蒸散发的变化趋势较为一致, 二者均在 5 月-7 月达到最大值, 而在模拟的三个年份中, 2015 年黑河流域的蒸散量明显高于其它两个年份。精度检验结果表明本文采用的 Kristenser Jensen 模型方法准确可靠, 模型模拟结果可为黑河流域的地表过程及水文循环提供重要的数据支撑。遥感技术的快速发展以及更多高精度数据集的出现, 使得更高空间及空间分辨率的区域尺度蒸散发模拟成为可能, 本研究也为后续的遥感蒸

散发模拟研究奠定了基础。然而,基于多源数据模拟遇到的数据不一致性问题以及模型结构之间的差异,有待在今后的研究中重点研究和解决。

参考文献(References):

- [1] LILLESAND T, KIEFER R W, CHIPMAN J. Remote sensing and image interpretation[M]. New York: John Wiley & Sons, 2014.
- [2] 王碧辉, 吴运超, 黄晓春. 基于高分辨率遥感影像的城市用地分类研究[J]. 遥感信息, 2012(4): 111-115. (WANG B H, WU Y C, HUANG X C. Urban land use classification using high resolution remote sensing data[J]. Remote Sensing Information, 2012(4): 111-115. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1009-3177.2012.04.020.
- [3] 孙睿, 刘昌明, 朱启疆. 黄河流域植被覆盖度动态变化与降水的关系[J]. 地理学报, 2010, 56(6): 667-672. (SUN R, LIU C M, ZHU Q J. Relationship between the fractional vegetation cover change and rainfall in the yellow river basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 56(6): 667-672. (in Chinese))
- [4] 王彦飞, 李云梅, 吕恒, 等. 环境一号卫星高光谱遥感数据的内陆水质监测适宜性——以巢湖为例[J]. 湖泊科学, 2011, 23(5): 789-795. (WANG Y F, LI Y M, LV H, et al. Suitability assessment of lake water quality monitoring on water body images acquired by HJ1A hyperspectral imager: a case study of Lake Chaohu[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(5): 789-795. (in Chinese))
- [5] 王鸣程, 杨胜天, 董国涛, 等. 基于条件温度植被指数(VTCI)的中国北方地区土壤水分估算[J]. 干旱区地理, 2012, 35(3): 446-455. (WANG M C H, YANG S H T, DONG G T, et al. Estimating soil water in northern China based on vegetation temperature condition index(VTCI)[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(3): 446-455. (in Chinese) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2012.03.017.
- [6] 白娟, 杨胜天, 董国涛, 等. 基于多源遥感数据的三江平原日蒸散量估算[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3): 190-195. (BAI J, YANG S H T, DONG G T, et al. Estimation of Daily Evapotranspiration Based on the Multi-Source Remote Sensing Data in the Sanjiang Plain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(3): 190-195. (in Chinese))
- [7] 张荣华, 杜君平, 孙睿. 区域蒸散发遥感估算方法及验证综述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(12): 1295-1307. (ZHANG R H, DU J P, SU N R. Review of estimation and validation of regional evapotranspiration based on remote sensing[J]. Advances in Earth Sciences, 2012, 27(12): 1295-1307. (in Chinese))
- [8] 周剑, 程国栋, 李新, 等. 应用遥感技术反演流域尺度的蒸散发[J]. 水利学报, 2009, 40(6): 679-687. (ZHOU J, CHENG G D, LI X, et al. Application of remote sensing technology to estimate river basin evapotranspiration[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(6): 679-687. (in Chinese) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2009.06.003.
- [9] 李守波, 赵传燕. 基于能量平衡的关川河流域蒸散发的遥感反演[J]. 遥感技术与应用, 2006(6): 521-526. (LI S H B, ZHAO C H Y. Estimating evapotranspiration based on energy balance in Guanchuan River Basin using remote sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2006(6): 521-526. (in Chinese))
- [10] 李宝富, 陈亚宁, 李卫红, 等. 基于遥感和 SEBAL 模型的塔里木河干流区蒸散发估算[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1230-1238. (LI B F, CHEN Y N, LI W H, et al. Remote sensing and the SEBAL model for estimating evapotranspiration in the Tarim River[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(9): 1230-1238. (in Chinese))
- [11] 董国涛, 王鸣程, 白娟, 等. 基于遥感的泾河流域日蒸散量估算[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2): 101-106. (DONG G T, WANG M C, BAI J, et al. Estimation of Daily Evapotranspiration Based on Remote Sensing Data in Jinghe Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(2): 101-106. (in Chinese))
- [12] KANG Y X, LU J H, WU Z Y, et al. Comparison and analysis of bare soil evaporation models combined with ASTER data in Heihe River Basin[J]. Water Science and Engineering, 2009, 2(4): 16-27. DOI: 10.3882/j.issn.1674-2370.2009.04.002.
- [13] TIAN F, QIU G Y, YAN Y H, et al. Estimation of evapotranspiration and its partition based on an extended three temperature model and MODIS products[J]. Journal of Hydrology, 2013(498): 210-220.
- [14] WANG Y Q, XIONG Y J, QIU G Y, et al. A multi-scale study in the Heihe oasis using thermal remote sensing and the three temperature model[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016(230): 128-141.
- [15] 潘竞虎, 董晓峰. 基于 GIS 的黑河流域生态环境敏感性评价与分区[J]. 自然资源学报, 2006, 21(2): 267-273. (PAN J H, DONG X F. GIS-based assessment and division on environmental sensitivity in the Heihe River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(2): 267-273. (in Chinese))
- [16] PRIESTLEY C H B, TAYLOR R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters[J]. Monthly weather review, 1972, 100(2): 81-92.
- [17] 谢贤群. 遥感瞬时作物表面温度估算农田全日蒸散总量[J]. 环境遥感, 1991, 6(4): 253-260. (XIE X Q. Estimation of daily evapotranspiration(ET) from one time of day remotely sensed canopy temperature[J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 6(4): 253-260. (in Chinese))
- [18] KRISTENSEN K J, JENSEN S E. A model for estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration. Nordic Hydr., 1975(6): 170-188
- [19] ALLEN R G, PEREIRA L S, DIRK R, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements[M]. FAO Irrigation and Drainage Paper, Rome, 998(56): 17-64.