

DOI: 10.3724/SP.J.1011.2011.01151

基于静止气象卫星的河北平原实际蒸散量遥感估算*

舒云巧 李红军 雷玉平

(中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心 石家庄 050022)

摘 要 本文提出利用中国第 1 颗可操作性静止气象卫星风云 2 号 C 星(FY-2C)数据结合中等分辨率航天成像光谱仪 MODIS 产品估算河北灌溉农田实际蒸散量(ET)的方法, 其中 FY-2C 的第 1、2 波段用于反演区域地表温度, 再结合 16 d MODIS 合成的植被指数产品(MOD13), 得到地表温度与植被指数的三角空间分布图(Ts - $NDVI$)。通过 Ts - $NDVI$ 空间分布的关系, 利用改良三角算法得到区域的蒸发比(EF)。最后结合 MODIS 地表反射率产品 MCD43 估算得到的日净辐射量, 根据能量平衡计算得到该地区的日实际蒸散量。模型结果与地表 Lysimeter 观测数据比较, 显示该模型估算得到的蒸发比和日蒸散量结果较为合理, 误差在可接受范围。此外, FY-2C 用于估算地表 ET , 其时间分辨率具有较强的优势, 从而为获得多幅无云蒸散图提供了有利条件。

关键词 蒸散 风云 2 号 C 星(FY-2C) MODIS 产品 河北平原 $NDVI$ 地表温度 三角法

中图分类号: TP79 **文献标识码**: A **文章编号**: 1671-3990(2011)05-1151-06

Estimation of regional evapotranspiration over the Hebei Plain using geostationary satellite data

SHU Yun-Qiao, LI Hong-Jun, LEI Yu-Ping

(Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China)

Abstract Fengyun-2C (FY-2C) is the first Chinese operational geostationary meteorological satellite with one visible and four infrared channels of optical imaging radiometer. Image acquisition temporal frequencies of FY-2C are 1 h and 30 min for dry and rainy seasons, respectively. This allows for mapping diurnal variations in land surface temperature (T_s) at a relatively high temporal scale. Data from FY-2C satellite were applied in combination with Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) satellite products to assess regional evapotranspiration (ET) over the Hebei Plain. The approach was based on the improved triangle method, where the temperature-vegetation index space included thermal inertia. As the method requires information on temperature change, the emergence of geostationary meteorological satellite data capable of determining land T_s at high temporal scale had made it possible to estimate daily T_s change from optimal observations. Two thermal infrared channels (IR1: 10.3~11.3 μm and IR2: 11.5~12.5 μm) from FY-2C were used to estimate T_s via a split window algorithm originally proposed for the MSG-SEVIRI sensor. As it compared reasonably well with observations of T_s , the FY-2C high temporal resolution data were exploited to determine morning rise in T_s . The chosen time windows were 8:00 and 12:00 local time. Combined with 16-day composite MODIS vegetation indices product (MOD13) at a spatial resolution of 5 km and T_s difference (ΔT_s) from FY-2C, evaporative fraction (EF) was interpolated in ΔT_s - $NDVI$ triangular-shaped scatter space based on the improved triangle method. Using energy balance, regional daily actual ET was eventually derived from the EF and available energy estimated from MODIS surface albedo products MCD43. Spatial variations in the estimated surface variables (T_s , EF and ET) corresponded well to land cover patterns and farmland management practices. Estimates based on this method were validated with field observations from Luancheng Agro-Ecosystem Experimental Station of Chinese Academy of Sciences in Hebei Province (37°53'N, 114°41'E). The estimated ET and EF also compared well with lysimeter data collected for the period from June 2005 to September 2007, with $RMSE$ of 0.92 mm for ET and 0.14 for EF and corresponding R^2 of 0.74 and 0.55. Of particular interest was the high temporal frequency of FY-2C acquired images, increasing the likelihood of acquiring cloud-free images with the potential for plotting estimated daily ET maps. The study demonstrated that FY-2C was highly

* 国家自然科学基金项目(40971025)和中国科学院知识创新工程方向性项目(KZCX2-YW-449, KSCX2-EW-J-5)资助

舒云巧(1981~), 女, 博士, 主要研究方向为定量遥感与水文模型。E-mail: yunqiaoshu1981@gmail.com

收稿日期: 2011-03-25 接受日期: 2011-07-18

valuable in water resources and agricultural management applications in China.

Key words Evapotranspiration, FY-2C satellite, MODIS product, Hebei Plain, *NDVI*, Surface temperature, Triangle method
(Received Mar. 25, 2011; accepted Jul. 18, 2011)

蒸散(evapotranspiration, *ET*)包括地表蒸发和植物蒸腾,作为地表水循环过程的重要环节,一直是水文、气象、农业和环境管理等科学研究中不可或缺的内容。相对于传统方法而言,遥感应用于蒸散研究具有快速、准确、区域性、精度高且经济可行等优势^[1]。从 20 世纪 60 年代以来,遥感蒸散计算研究获得了快速发展:建立的经验及半经验模型利用最少的地面观测数据,结合遥感监测得到的地表参数来估算 *ET*。但这种方法往往需要通过观测建立经验公式,因而会对其在区域上的扩展应用产生限制^[2]。物理模型以能量传输的物理过程为基础,以一系列通过遥感或地面仪器直接或间接测量的数据为输入,再利用余项法通过地表能量平衡来估算 *ET*。比较典型的模型包括 SEBAL^[3]、S-Sebi^[4]以及 SEBS^[5]等。物理模型估算得到的 *ET* 精度较高,但该方法的缺点是关于一些中间参数的推导如大气变量和地表阻抗等往往需要大量的假设,在不同地表类型间差异较大^[6]。过程模型则能够模拟能量通量过程的连续时间变化,并用遥感资料及时更新。van der Keur 等^[7]利用 SVAT 模型和遥感数据从光谱植被指数中提取了光合能力和最小冠层阻抗,对 SVAT 模型进行了改进,提高了利用遥感数据估算蒸散和光合作用的精度。与统计模型和分析模型相比,过程模拟模型有两大优点:一是能揭示土壤-植被-大气系统能量传输的物理过程;二是在一定的初始和边界条件下,可以模拟能量通量的连续变化过程^[8]。但在实际应用中,有关参数的估算需要大量和详尽的植被和土壤信息,很难应用于区域尺度。在 *ET* 计算过程中,有些学者虽然利用了不同类型的遥感数据,但仍需地面观测支持,所以这些方法只能称为“半遥感蒸散发估算模型”。近几年来,区域蒸散遥感研究方法回归到结合 Penman-Monteith 公式和常规气象数据^[9-10]。但在地表数据匮乏的区域,仅用遥感数据来估算区域蒸散的方法更加具有吸引力和实用性。三角算法是应用比较广泛的一种相对比较简单甚至仅用遥感数据本身就能用于蒸散估算的方法。该算法利用遥感地表温度和植被指数的空间关系进行区域蒸散和土壤湿度估算^[11]。

应用于区域蒸散估算的遥感数据往往需要包括热红外、近红外和可见光等波段。比较广泛应用的极轨卫星传感器数据包括 MODIS 的 TERRA 或

AQUA 平台^[12]和 NOAA AVHRR 传感器等^[13]。一般而言,极轨卫星的时间分辨率和空间分辨率比较适中,能够提供一些必要的时间系列数据。但该时间分辨率往往不足以获取更多无云图像从而获取连续性的时间序列蒸散结果,因此静止卫星受到越来越多的关注,用来弥补数据不足。静止卫星具有较高的时间分辨率,能够捕捉到地表各种参数的日变化。Fensholt 等^[14]描述了用静止卫星来替代极轨卫星减少云污染影响,研究植被变化的潜在可能性。与此同时,美国和欧洲静止卫星(如 MSG 和 GOES)的研究也充分展示了该类型卫星数据在地表参数上面的巨大潜力^[15]。我国成功发射了可操作的静止轨道气象卫星风云二号 C 星(FY-2C),该卫星数据接收始于 2006 年。FY-2C 的作用是获取白天可见光云图、昼夜红外云图和水气分布图,进行天气图传真广播,供国内外气象资料利用站接收利用;同时收集气象、水文和海洋等数据收集平台的气象监测数据,监测太阳活动和卫星所处轨道的空间环境,为卫星工程和空间环境科学研究提供监测数据。

FY-2C 的传感器包括 1 个可见光波段和 4 个热红外波段,其时间分辨率是 30 min 或 1 h,完全可以满足地表温度日变化制图研究。该卫星数据的视角较广,覆盖了亚太地区,其中包括整个中国,因此 FY-2C 数据结合其他遥感影像为中国大区域尺度高时间分辨率的地表参数和水文过程(如 *ET*)研究提供了新的机遇。本文以河北平原为研究区域,利用第 1 颗中国可操作性静止气象卫星 FY-2C 数据来获取高时间分辨率的数据并进行区域蒸散量估算。

在华北平原,农业用水约占社会总用水量的 70%,而冬小麦灌溉量又几乎占据农业用水的 70%,换言之大约有 50%水分是被冬小麦生长所消耗,这也是导致该地区地下水位持续快速下降的一个主要因素。准确估算实际蒸散量对实现华北平原地下水可持续利用和定量化管理具有重要的科学指导意义。河北平原作为华北平原的重要部分,虽然该地区的蒸散和土壤湿度遥感相关研究一直不断,但还没有仅利用遥感数据而不辅助其他观测数据进行遥感蒸散相关的研究和验证。本文利用 Stisen 等^[16]提出的改良三角纯遥感算法进行河北平原的区域蒸散量估算。该方法仅仅依靠卫星数据遥感反演 *ET*,而不需要其他辅助数据,这对于大区域尺度地面观测

数据匮乏的地区具有相当技术优势。

1 研究区域概况与数据来源

1.1 研究区域概况

研究区域为河北平原(113.97°E~117.84°E、36.01°N~39.60°N), 位于京津以南, 西依太行山, 东临渤海, 总面积约 $6.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。河北平原地处大陆季风半干旱半湿润气候区, 夏季高温多雨, 冬季干燥寒冷, 月平均气温 $-2.5 \sim 26 \text{ }^\circ\text{C}$ 。土地平整肥沃, 是我国最主要的粮食产区之一, 主要耕作制度为冬小麦-夏玉米一年两季轮作, 但水资源不足已经成为限制该区工农业发展的主要因素。该地区多年平均降雨量约为 500 mm, 而年平均作物生长所需水分将近 800~900 mm, 有 400 多毫米是通过抽取地下水获取, 尤其是冬小麦生育期内, 几乎所需水分的 90% 来自灌溉。

1.2 数据来源

采用的遥感数据包括 FY-2C 数据第 1 和第 2 波段, 用于地表温度估算; 所有风云 2 号 C 星数据来自中国气象局。16 d MODIS 数据合成的植被指数产品 MOD13C1 用于和地表温度构成三角空间, 16 d 合成的地表反射率 MCD43B3 用于估算净辐射; 所有 MODIS 产品通过 the EOS Data Gateways 下载得到。数据的时间跨度为 2006~2008 年。气象数据包括日最高和最低气温($^\circ\text{C}$)、2 m 高处风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、相对湿度(%)及日照时数(h)等, 均来自中国科学院栾城农业生态系统试验站(简称栾城试验站), 用于估算日净辐射量。此外, 位于栾城试验站的大型称重式蒸渗仪(Lysimeter)为本文模型提供验证数据。Lysimeter 面积 $1.5 \text{ m} \times 2 \text{ m}$, 深 2.5 m, 空重 2 t, 填满土后重 14 t, 精度可达 $0.02 \text{ mm}^{[17]}$ 。Lysimeter 内的作物种植、灌溉和施肥都与其周围的农田保持一致。

2 研究方法

2.1 蒸发比估算

改良式三角算法源于 Priestley-Taylor 公式, 其为 Penman-Monteith's 公式的简化版^[18]:

$$ET = \phi \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) (R_n - G) \quad (1)$$

式中, ET 为蒸散量($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$); R_n 为净辐射($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$); G 为土壤热通量($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$); 系数 ϕ 按 Priestley-Taylor^[19] 的研究, 对较湿润下垫面可取常数 1.26, 本文根据遥感地表温度和植被指数的三角形空间分布对每个像元点分别确定 ϕ 值; Δ 为饱和水汽压随温度变化的斜率; γ 为湿度计常数^[19]。蒸发比(EF)为 ET 与有效辐射能量之间的比率:

$$EF = \frac{ET}{R_n - G} \quad (2)$$

根据公式(1)和(2), 可以得到:

$$EF = \phi \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \quad (3)$$

系数 ϕ 反映地表蒸散的有效阻抗, 可根据遥感地表温度 T_s 和植被指数($NDVI$)的三角形空间分布来确定^[11]。遥感得到的地表温度 T_s 和 $NDVI$ 构成的空间关系如图 1 所示, 在干边蒸散阻抗最大, ϕ 值为 0; 而在湿边蒸发阻抗最小, ϕ 达到理论上的最大值, 相当于在较湿润下垫面常数 1.26^[20]。由于受像元大小、植被根区水分吸收及尺度问题等影响, 理想状态的高密度纯植被条件下, 零蒸散量的现象几乎不存在。因此, Stisen 等^[16]在此引入两个概念: “真实干边”和“观测干边”(图 1)来阐述 T_s - $NDVI$ 关系。在本研究中, 每个像元的 ϕ 值通过以下 3 个步骤来确定: 1) 确定 T_s - $NDVI$ 三角空间的边界、干边和湿边; 2) 求算在干边上的 ϕ 值; 3) 线性插值得到每个 $NDVI$ 所对应的 T_s 最高值和最低值。Stisen 等^[16]提出在每个 $NDVI$ 所对应干边上的 ϕ 最小值($\phi_{i,\min}$)为其湿边上 ϕ 最大值(ϕ_{\max})与 $NDVI$ 之间的非线性关系:

$$\phi_{i,\min} = \phi_{\max} \left(\frac{NDVI_i - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right)^2 \quad (4)$$

式中, $\phi_{i,\min}$ 为某个 $NDVI$ 像元所对应干边上的 ϕ 值; ϕ_{\max} 为某个 $NDVI$ 像元所对应湿边上的 ϕ 值, 取 1.26; $NDVI_{\min}$ 和 $NDVI_{\max}$ 分别为观测得到植被指数 $NDVI$ 的最小值和最大值。得到该 $NDVI$ 值所对应的 $\phi_{i,\min}$ 和 ϕ_{\max} 后, 就可以通过线性内插方法得到每个像元的 ϕ 值。

$$\phi_i = \frac{T_{i,\max} - T_i}{T_{i,\max} - T_{i,\min}} (\phi_{\max} - \phi_{i,\min}) + \phi_{i,\min} \quad (5)$$

Stewart 等^[21]和 Komatsu^[22]研究发现, $\Delta/(\Delta + \gamma)$ 在通常状态下对气温的灵敏度非常小, 因此简化并将其作为常数, 从而可以利用公式(3)、(4)和(5)求得蒸发比 EF 。

遥感地表温度是由 FY-2C 数据通过劈窗法求得^[23]:

$$T_s = T_{10.8} + [3.17 - 0.64 \cos \theta] (T_{10.8} - T_{12.0}) + \left[-0.05 + \frac{0.157}{\cos \theta} \right] (T_{10.8} - T_{12.0})^2 + \left[65 - \frac{4}{\cos^2 \theta} \right] (1 - \varepsilon) + \left[-11.8 + \frac{5.1}{\cos \theta} \right] W(1 - \varepsilon) + \left[-180 \frac{24}{\cos \theta} \right] \Delta \varepsilon + (-4 + 34 \cos \theta) W \Delta \varepsilon - 0.6 \quad (6)$$

式中, $T_{10.8}$ 和 $T_{12.0}$ 分别为 FY-2C 第 1、2 波段亮温, ε 为地表有效平均辐射量, $\Delta \varepsilon$ 为第 1、2 波段辐射量差, W 为大气水汽压($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$), θ 为视场天顶角。FY-2C 第 1、2 波段辐射量可以通过 MODIS 第 31、32 波段辐射量产品计算得到^[24]。

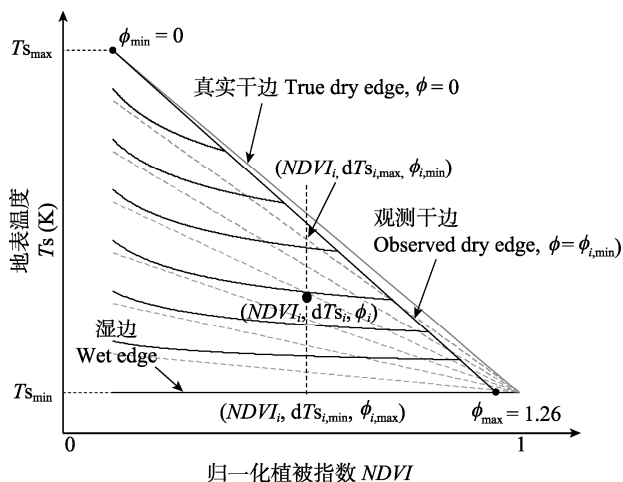


图 1 地表温度和 NDVI 的散点分布图

Fig. 1 Illustration of the conceptual T_s - $NDVI$ scatter plot
真实干边(灰色实线)代表 ET 为 0 ($\phi_{i,min}=0$), 观测干边(黑色斜线)代表受限的 $ET(\phi_{i,min})$, 湿边上 ET 为潜在蒸散(ϕ_{max})。灰色点线和黑色直线的湿度和 ϕ 值相同^[16]。The true dry edge (grey line) represents zero ET ($\phi_{i,min}=0$), the observed dry edge (black line) represents limited ET ($\phi_{i,min}$) and the wet edge represents potential ET (ϕ_{max}). Dashed grey and solid black straight line are isolines of equal moisture availability and ϕ respectively^[16].

2.2 日实际蒸散量估算

大气近地层试验结果表明, EF 在晴天白天的 8~10 h 内大致维持不变, 考虑 ET 的一般日变化规律, 假设一天中 EF 基本不变, 日蒸散量 ET_{24} 可以根据 24 h 的净辐射量(R_{n24})、土壤热通量(G_{24})和瞬时 EF 得到:

$$ET_{24} = EF \times (R_{n24} - G_{24}) \quad (7)$$

式中, 土壤热通量在日变化中 G_{24} 可以忽略不计。日净辐射量($W \cdot m^{-2}$) 在天气晴朗下可以通过下式计算^[25]:

$$R_{n24} = (1 - \alpha) R_{a24} \tau_{sw} - 110 \tau_{sw} \quad (8)$$

式中, R_{a24} 为地球外的辐射量; α 为地表反射率; τ_{sw} 为透射率, 可通过海平面以上的高程(elevation, m)计算:

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times \text{elevation} \quad (9)$$

3 结果与分析

3.1 地表温度验证

将栾城试验站早上 8:00 的地表温度与 FY-2C 估算得到的地表温度进行比较, 如图 2 所示, 两者有较好的一致性, 其回归系数 R^2 达到 0.83, 根方差 $RMSE$ 为 3.89 K。观测值普遍比模拟值稍微偏大, 考虑到尺度和混合像元等差异, 该结果在可接受范围之内。

3.2 EF 和 ET 验证

利用栾城试验站的 Lysimeter 观测到的蒸散值与模型反演得到的 ET 进行对比, 以评估模型计算精度。为减少周围环境不确定因素的干扰, 对栾城试

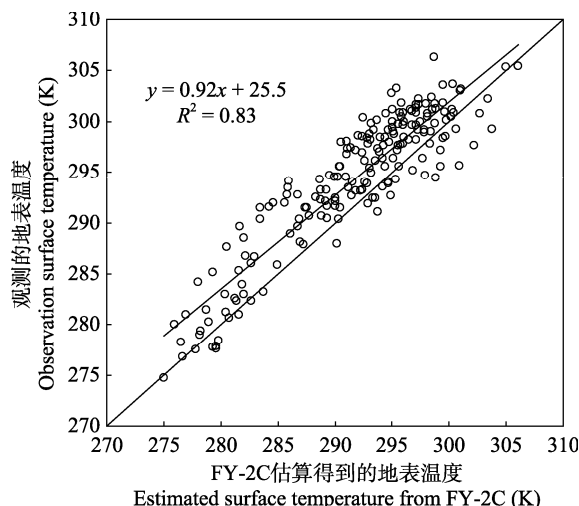


图 2 FY-2C 估算得到的地表温度与当地 8:00 的观测值比较

Fig. 2 Comparison of estimated surface temperature based on FY-2C and ground observations at local time 8:00

验站周围的 3×3 个 1 km 像元 ET 值进行平均后与 Lysimeter 观测数据进行比较。由于广泛存在的空间差异, 地面观测数据通常在尺度和代表性以及数量和质量上受到质疑。然而, 栾城试验站的 Lysimeter 测量数据在以往研究中已被多次成功应用于对遥感数据估算 ET 的验证工作, 因此本文也利用其对模型进行验证。

图 3 显示了估算的 EF 、 ET 和实测值的比较情况。从中可以看出利用模型估算得到的 EF 、 ET 与实测值有较好的一致性。对估算值和观测值进行统计分析表明, ET 比较结果 R^2 为 0.74, $RMSE$ 为 0.92 $mm \cdot d^{-1}$, EF 的 R^2 为 0.55, $RMSE$ 为 0.14。图 4 为 EF 和 ET 的时间序列变化趋势比较, 二者表现一致且相近。 ET 在年内呈现出 2 次明显的高峰期, 1 次在 4~5 月份, 1 次在 7~9 月份(河北平原的雨季)。上半年的 ET 高值与灌溉有关, 甚至可以通过其峰值出现时间反推得到灌溉时间和数量。

3.3 EF 和 ET 空间分布分析

图 5 显示河北平原冬小麦生长期 2006 年 5 月 15 日 EF 和 ET 空间分布情况。从图中可以看出研究区域 ET 均呈现西高东低的分布, 这是由于西部地区是主要的冬小麦产区, 气候土壤较适宜, 且多年形成的发达的灌溉系统保证了冬小麦生长所需水分。东部地区(尤其是东北部)由于靠近渤海, 土地盐碱化严重不适宜冬小麦种植, 冬小麦播种面积小且分布零散, 多数为混合像元, 因此 ET 较低。东南部为棉花主产区且冬小麦种植面积小, 绿度较低, ET 也偏低。

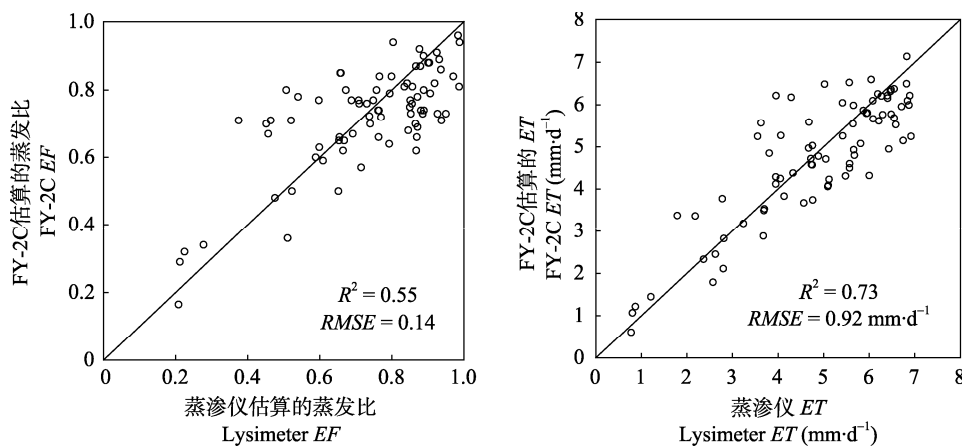


图3 ET 和 EF 的观测值(来源于栾城试验站)和模拟值(基于FY-2C)比较(2005~2007)

Fig. 3 Comparison of observed (data from Luancheng Agro-Ecosystem Experimental Station, Chinese Academy of Sciences) and estimated (based on FY-2C data) daily ET and EF for years 2005 to 2007

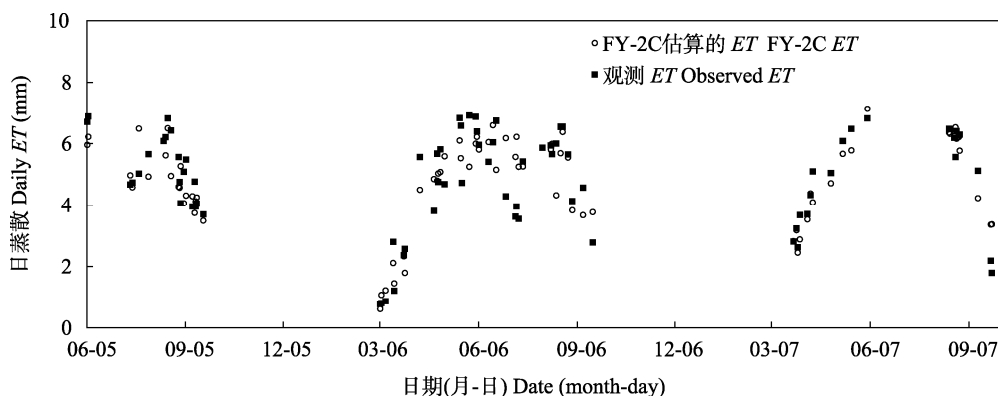


图4 ET 观测值(来源于栾城试验站)和模拟值(基于FY-2C)时间序列变化

Fig. 4 Time series of daily ET from observed data (from Luancheng Agro-Ecosystem Experimental Station, Chinese Academy of Sciences) and estimated data (based on FY-2C data)

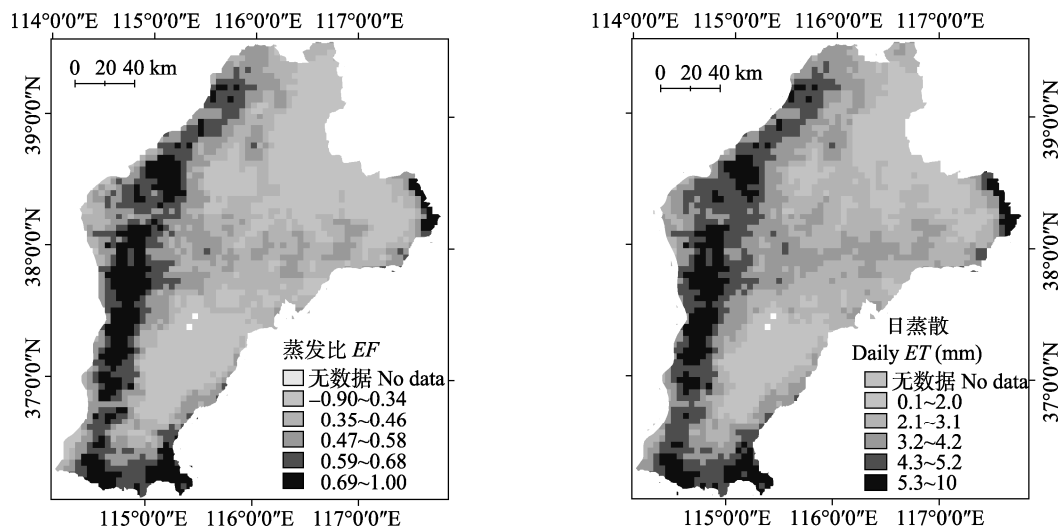


图5 利用三角法和FY-2C数据估算得到的2006年5月15日 EF (a)和 ET (b)的河北平原空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of daily EF (a) and ET (b) in the Hebei Plain for May 15, 2006 estimated by using the triangle method and based on FY-2C data

4 结论与讨论

本研究利用FY-2C地表温度结合MODIS产品

进行了区域蒸散量的估算,挖掘开发静止气象卫星在区域水资源管理和评估中的潜在作用。在地面数据匮乏地区,改良式三角法只利用卫星数据的优势

在估算区域蒸散中得到了充分体现, 结果表明该模型可以很好地估算区域蒸散量。此外, FY-2C 用于估算地表 ET , 其时间分辨率具有较强的优势。

遥感利用热红外直接法估算区域 ET 往往受图像云覆盖限制, 所得到的结果非常有限且不连续, 不能及时反映有价值的空间变化。为克服这一缺点, 高时间分辨率的静止气象卫星影像并结合连续性的陆面模型将是研究水文模拟的一个趋势。

参考文献

- [1] Allen R M, Bastiaanssen W G M. Editorial: Special issue on remote sensing of crop evapotranspiration for large regions[J]. *Irrigation and Drainage Systems*, 2005, 19(3/4): 207–210
- [2] Li Z L, Tang R L, Wan Z M, et al. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data[J]. *Sensors*, 2009, 9(5): 3801–3853
- [3] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 212/213: 198–212
- [4] Roerink G J, Su Z, Menenti M. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology Oceans and Atmosphere*, 2000, 25(2): 147–157
- [5] Su Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2002, 6(1): 85–99
- [6] Venturini V, Bisht G, Islam S, et al. Comparison of evaporative fractions estimated from AVHRR and MODIS sensors over South Florida[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(1/2): 77–86
- [7] van der Keur P, Hansen S, Schelde K, et al. Modification of DAISY SVAT model for potential use of remotely sensed data[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 106(3): 215–231
- [8] 傅国斌, 刘昌明. 遥感技术在水文学中的应用与研究进展[J]. *水科学进展*, 2001, 12(4): 547–559
- [9] Cleugh H A, Leuning R, Mu Q Z, et al. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 106(3): 285–304
- [10] Mu Q Z, Heinsch F A, Zhao M S, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 111(4): 519–536
- [11] Jiang L, Islam S. A methodology for estimation of surface evapotranspiration over large areas using remote sensing observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(17): 2773–2776
- [12] Nishida K, Nemani R R, Glassy J M, et al. Development of an evapotranspiration index from aqua/MODIS for monitoring surface moisture status[J]. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(2): 493–501
- [13] Kite G. Using a basin-scale hydrological model to estimate crop transpiration and soil evaporation[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 229(1/2): 59–69
- [14] Fensholt R, Anyamba A, Stisen S, et al. Comparisons of compositing period length for vegetation index data from polar-orbiting and geostationary satellites for the cloud-prone region of West Africa[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2007, 73(3): 297–309
- [15] Stisen S, Sandholt I, Nørgaard A, et al. Estimation of diurnal air temperature using MSG SEVIRI data in West Africa[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 110(2): 262–274
- [16] Stisen S, Sandholt I, Nørgaard A, et al. Combining the triangle method with thermal inertia to estimate regional evapotranspiration-Applied to MSG-SEVIRI data in the Senegal River basin[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 1242–1255
- [17] Liu C M, Zhang X Y, Zhang Y Q. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111(2): 109–120
- [18] Monteith J L. Evaporation and environment[J]. *Symp Soc Exp Biol*, 1965, 19: 205–224
- [19] 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: 81–92
- [20] Eichinger W E, Parlange M B, Stricker H. On the concept of equilibrium evaporation and the value of the Priestley-Taylor coefficient[J]. *Water Resources Research*, 1996, 32(1): 161–164
- [21] Stewart J B, Watts C J, Rodriguez J C, et al. Use of satellite data to estimate radiation and evaporation for northwest Mexico[J]. *Agricultural Water Management*, 1999, 38(3): 181–193
- [22] Komatsu H. Forest categorization according to dry-canopy evaporation rates in the growing season: Comparison of the Priestley-Taylor coefficient values from various observation sites[J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(19): 3873–3896
- [23] Seguin B, Itier B. Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1983, 4(2): 371–383
- [24] Tang B H, Bi Y Y, Li Z L, et al. Generalized Split-Window algorithm for estimate of land surface temperature from Chinese geostationary FengYun meteorological satellite (FY-2C) data[J]. *Sensors*, 2008, 8(2): 933–951
- [25] Morse A, Tasumi M, Allen R G, et al. Application of the SEBAL methodology for estimating consumptive use of water and streamflow depletion in the Bear River Basin of Idaho through remote sensing: Final report. 2000