

Sentinel-3 卫星双角度热红外数据的流域尺度地表蒸散发估算与验证

薛可嘉¹, 何苗¹, 卞尊健², 宋立生¹, 徐艳豪¹, 蒋浩¹

1. 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715;

2. 中国科学院空天信息创新研究院 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101

摘要: 双层能量平衡模型 TSEB (Two Source Energy Balance) 常用于地表蒸散发的估算研究, 对于干旱半干旱流域的水资源调控以及利用有着十分重要的意义。本文在流域尺度上分别利用 Sentinel-3 双角度观测热红外和近红外数据反演的地表温度 LST (Land Surface Temperature) 和地表组分温度 LSCT (Land Surface Component Temperatures) 分别驱动 TSEB 模型, 估算了黑河流域不同土地覆盖类型下的瞬时地表通量, 并利用流域内上、中、下游通量塔地面观测数据验证了两种模型估算的地表通量。结果表明: 两种模型都在一定程度上高估了净辐射和潜热通量, 在植被稀疏的高寒草甸以及河岸林土地覆被类型下, TSEB-PT 模型表现更好, 随着植被覆盖度的上升, TSEB-2T 模型的优势更加明显。研究结果为黑河流域水资源合理利用提供一定的保障以及为水资源管理者提供流域尺度上更加准确的植被水分利用的估计值, 并且为后期模型的优化提供了理论基础。

关键词: 陆表温度 (TSEB-PT), 组分温度 (TSEB-2T), 地表通量, 真实性检验

引用格式: 薛可嘉, 何苗, 卞尊健, 宋立生, 徐艳豪, 蒋浩. 2021. Sentinel-3 卫星双角度热红外数据的流域尺度地表蒸散发估算与验证. 遥感学报, 25(8): 1683-1699

Xue K J, Bian Z J, He M, Song L S, Xu Y H and Jiang H. 2021. Estimating instantaneous evapotranspiration based on dual-angle thermal infrared observations from Sentinel-3 satellite. National Remote Sensing Bulletin, 25(8): 1683-1699[DOI:10.11834/jrs.20211237]

1 引言

地表蒸散发 ET (Evapotranspiration) 是土壤-植被-大气之间能量交换、物质运输的一种重要途径, 是植被及陆地表面向大气输送水汽的总通量 (宋立生等, 2017)。蒸散发主要包括了土壤和冠层截流蒸发 E (Evaporation) 以及植被蒸腾 T (Transpiration), 能够将大量的水以及能量从土壤和植被转移到大气中 (Anderson等, 2012), 蒸散发不仅是地表能量平衡的重要组成部分, 还是流域尺度水量平衡的重要组成部分 (Xu等, 2019; 刘萌等, 2021)。

黑河流域是我国典型的内陆河流, 位于西北部的干旱半干旱区, 流域面积约为 1432000 km² (Li等, 2013)。长期以来黑河流域中下游灌溉用

水量达黑河径流量的 80% 以上, 如此的过度用水对黑河流域生态系统的正常运行以及能量收支平衡有着很大的影响。在过去几十年中, 由于水资源过度开发导致流域下游河岸林地面积迅速缩减, 部分地区地下水位明显下降, 水中污染物增多, 甚至导致部分河流完全干涸 (Qi 和 Luo, 2007; Song等, 2018)。因此, 对于以黑河流域为典型的干旱半干旱区, 缓解流域内水资源以及能源冲突, 准确的估算长时间序列的地表蒸散发时空分布, 合理的水资源管理措施尤为重要 (Zhou等, 2018)。地表蒸散发作为地球水循环的重要过程, 准确估算地表蒸散发可以为流域水资源管理提供重要的数据和技术支持。

当前, 双层能量平衡模型 TSEB (Two-Source Energy Balance) 是最常用的获取地表蒸散发的途径

收稿日期: 2021-04-25; 预印本: 2021-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42071298); 国家级大学生创新创业训练计划(编号:202110635053)

第一作者简介: 薛可嘉, 1997年生, 男, 硕士研究生, 研究方向为水文气象遥感。E-mail: xkj971121@email.swu.edu.cn

通信作者简介: 宋立生, 1987年生, 男, 教授, 研究方向为水文气象遥感。E-mail: songls@swu.edu.cn

之一。TSEB 模型最先由 Norman 等 (1995) 在 Shuttleworth 和 Wallace (1985) 提出的经典地表蒸散发双层估算系列模型 (S-W) 基础上, 克服了依赖于辐射计视角的经验阻力等问题所开发的优化模型, 并且易于同遥感技术相结合。基于 Priestley-Taylor 方法的 TSEB 模型 (Norman 等, 1995) 是最常见的 (以下称为 TSEB-PT), TSEB-PT 模型以地表温度 LST (Land surface temperature) 为关键要素, 基于 Stefan-Boltzmann 理论中黑体辐射与温度间的线性关系将复合地表温度分离成植被组分温度以及土壤组分温度 (朱金顺等, 2021), 从而计算白天可靠的地表通量 (Song 等, 2016a); 同时, 利用组分温度数据也可驱动 TSEB 模型 (Chehbouni 等, 2001; François, 2002), 因此本研究采用基于 Sentinel-3 数据反演的地表组分温度 LSCT (Land Surface Component Temperatures) 来驱动 TSEB 模型 (以下称为 TSEB-2T)。

本文利用 Sentinel-3 卫星获得的双角度近红外和热红外数据反演得到地表温度以及组分温度数据, 其中地表温度作为关键输入参数来驱动 TSEB-PT 模型, 组分温度数据作为关键输入参数驱动 TSEB-2T 模型, 其他模型输入参数相同, 获取黑河流域生长季地表蒸散发及其组分时空分布格局。然后, 利用黑河流域上游高寒草地阿柔, 中游灌区大满, 下游河岸林地四道桥的 3 个观测站实测数据对两个模型估算结果进行表现评估, 其中在像元尺度上, 利用大孔径闪烁仪 LAS (Large Aperture Scintillometer) 观测的感热通量验证模型, 然后利用通量塔观测的地表通量数据对模型估算的地表能量平衡 4 个分量: 地表净辐射 Rn (Net radiation)、土壤热通量 G_0 (surface soil heat fluxes)、感热通量 H (Sensible heat fluxes) 以及潜热通量 LE (Latent heat fluxes) 进行评估。并结合模型重要的输入参数叶面积指数 LAI (Leaf Area Index) 分析两个模型估算地表蒸散发和组分空间分布的合理性, 同时结合输入组分温度数据分析组分温度差异对模型估算土壤蒸发和植被蒸腾的影响。

2 研究方法 with 原理

2.1 TSEB 模型

TSEB-PT 模型使用 Sentinel-3 卫星垂直观测热红外数据反演得到地表温度数据作为输入数据,

并使用 Priestley-Taylor 公式计算土壤和植被组分温度 (Song 等, 2016b), TSEB-2T 模型则使用 Sentinel-3 卫星双角度近红外和热红外数据反演得到植被组分温度与土壤组分温度数据作为输入数据, 随后两个模型可计算各自的地表通量 (Song 等, 2020)。TSEB 模型中方向性辐射温度 $T_{rad}(\theta)$ 是由土壤温度与植被温度共同决定的 (Norman 等, 1995; Kustas 和 Anderson, 2009), 可以结合植被覆盖度表示为:

$$T_{rad}(\theta) \approx (f(\theta)T_c^n + (1-f(\theta))T_s^n)^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

式中, $f(\theta)$ 是通过辐射传感器在天顶角 (θ) 观察到的植被覆盖度; T_c 与 T_s 分别代表植被温度与土壤温度 (K); 通常, 对于 8—14 μm 波长的波段, n 的合理取值为 4。植被组分温度 T_c 与土壤组分温度 T_s 与系统中其他能量通量数据相结合, 可以分别计算出植被净辐射 Rn_c 和土壤净辐射 Rn_s (Norman 等, 1995; Kustas 和 Anderson, 2009; Colaizzi 等, 2012; Song 等, 2016b)。

$$Rn_c = (1 - \tau_{\text{longwave}})(L_{\downarrow} + \varepsilon_s T_s^4 - 2\varepsilon_c T_c^4) + (1 - \tau_{\text{solar}})(1 - \alpha_c)S_{\downarrow} \quad (2)$$

$$Rn_s = \tau_{\text{longwave}}L_{\downarrow} + (1 - \tau_{\text{longwave}})\varepsilon_c T_c^4 - \varepsilon_s T_s^4 + \tau_{\text{solar}}(1 - \alpha_s)S_{\downarrow} \quad (3)$$

式中, 下标 s、c 分别代表土壤和植被部分; τ 、 ε 、 α 分别为辐射透过率、发射率、反照率; S_{\downarrow} 与 L_{\downarrow} 分别为下行短波辐射和下行长波辐射; 下标 longwave、solar 分别代表长波和短波。 G_0 是土壤热通量; G_0/Rn 是一个经验常数, 对于不同的植被覆盖类型, 其实际值也有所不同 (Kustas WP and Daughtry CST, 1990)。土壤热通量 G_0 计算如下:

$$G_0 = \left(a \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{b}(t+c)\right) \right) Rn_s \quad (4)$$

式中, a 、 b 、 c 可根据大量实际计算数据得出, 分别为定义的最大比率 ($a=0.30$), 正弦曲线形状 ($b=80000$ s) 以及正弦曲线的位移 ($c=3600$ s) (Colaizzi 等, 2012)。

感热通量 H 可使用下式计算 (Norman 等, 1995):

$$H_c = \rho C_p \frac{T_c - T_{Ac}}{R_x} \quad (5)$$

$$H_s = \rho C_p \frac{T_s - T_{Ac}}{R_s} \quad (6)$$

式中, ρ 空气密度; C_p 为空气的体积热容量; T_{ac} 为植被空气层中空气的温度; $R_x (s m^{-1})$ 为完整冠层的总边界层抗阻; $R_s (s m^{-1})$ 为土壤表面正上方的边界层对热流的阻力。

根据式 (2) 计算所得 Rn_c , 将 Priestley-Taylor 与平行电阻公式结合起来可以计算植被初始温度 T_{ci} , 以便计算土壤和植被成分表面通量 (Norman 等, 1995; Song 等, 2018)。

$$T_{ci} = T_a + \frac{Rn_c R_{ah}}{\rho C_p} \left(1 - \alpha_{PT} f_c \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \quad (7)$$

式中, T_a 是在参考高度下的空气温度; R_{ah} 是参考高度与植被观测实测高度之间的湍流热传递的空气动力学抗阻 (W/m^2); α_{PT} 为针对植被的 Priestley-Taylor 系数; α_{PT} 的取值约为 1.26, 但在平流影响下, 植被土壤水分饱和的条件下, α_{PT} 的取值接近 2 (Agam 等, 2010); f_c 为绿色植被所占比例; Δ 为饱和蒸汽压与温度曲线的斜率; γ 为干湿度常数。

根据式 (7), 可以输入基于 Sentinel-3 卫星地表温度数据, 运行 TSEB-PT 模型。同时, 可利用 Sentinel-3 卫星双角度观测数据反演的植被和土壤组分温度数据直接计算土壤和植被的感热通量 (TSEB-2T)。最后都可以依据植被和土壤表面的能量平衡公式计算土壤和植被表面的潜热通量。

$$LE_s = Rn_s - H_s - G_o \quad (8)$$

$$LE_c = Rn_c - H_c \quad (9)$$

2.2 温度数据反演

在地表温度反演过程中, 包含了大气校正部分, 并且结合了 Wan (2014) 提出的改进 Split-Window 算法反演了垂直和倾斜角度的地表温度。根据 Zhan 等 (2011) 提出的多像元算法, 将 5×5 窗口内的不同组分的辐射的空间分布假设为两个变量 (行和列) 的二次函数, 利用式 (10) 可计算像元的平均热辐射 ($L_{i,j}$):

$$L_{i,j} = \sum_{k=1}^N f_{j,k} \varepsilon_{ij,k} (a_{k,0} + a_{k,1} \xi_j + a_{k,2} \eta_j + a_{k,3} \xi_j^2 + a_k \eta_j^2 + a_{k,5} \xi_j \eta_j) \quad (10)$$

式中, ξ_j 和 η_j 分别为像素 j 的行数和列数; N 是分量数; $a_{k,i}$ ($i = 1-5$) 是算法中分量 k 的未知系数。并结合 Sentinel-3 双角度观测热红外数据, 通过多像元窗口移动的方法分离出两个角度观测下土壤和植被组分温度。并以此组分温度为背景值, 即

先验知识, 再结合双角度观测下建立的土壤和植被组分温度分离方程, 如下:

$$\overline{L}_a = \mathbf{W} \cdot \overline{\mathbf{m}}_a \quad (11)$$

式中, \overline{L}_a 是以矩阵形式表示的不同观测角度下, 传感器接收到的热辐射; \mathbf{W} 是以矩阵形式表达的有效比辐射率; $\overline{\mathbf{m}}_a$ 是以矩阵形式表达的不同组分的同温条件下黑体的热辐射。通过两个角度热红外观测建立的组分温度反演方程, 结合最小二乘法可以求解出土壤和植被组分温度, 并利用多元法分解的土壤和植被组分温度对双角度方法的分解结果进行约束, 有效降低了模型分解组分温度的不确定性。该算法更多细节请参考 Bian 等 (2020) 相关研究。

3 研究区域概况及数据处理

黑河流域位于 $37.7^\circ N-42.7^\circ N$, $97.1^\circ E-102.0^\circ E$, 为中国西北干旱区第 2 大内陆河流, 流经青海省、甘肃省和内蒙古自治区 (Liu 等, 2018)。流域内下垫面类型丰富 (图 1), 以高寒和干旱半干旱景观为主要特征, 上游主要下垫面类型为草地和常绿针叶林; 中游地区下垫面类型较为丰富, 主要有玉米、小麦等农作物; 下游地区主要以河岸混交林为主 (Li 等, 2013; Liu 等, 2018)。黑河流域从人类进行社会活动至今, 已经发展成中国西北部重要的商品粮基地, 但因其人类社会活动日益加剧, 对流域内的生态水文环境也带来了极大的影响 (Li 等, 2001)。流域内干旱区与寒区并存, 有着极其鲜明的气候特征, 这些特性使黑河流域成为开展流域综合研究一个理想的试验流域 (Liu 等, 2018)。

在本研究中, 叶面积指数作为模型输入的重要参数来划分土壤和冠层之间的地表温度以及表面通量 (Song 等, 2018)。叶面积指数栅格数据是 MODIS 8 天全球 500m 的 MODIS LAI 产品 (MODIS/Terra Leaf Area Index/FPAR 8-Day L4 Global 500 m SIN Grid V006)。本研究所使用的站点对比数据为长时间序列每日瞬时数据, 由于气象数据与组分温度数据为每日 1000 m 分辨率, 所以需要进行降尺度处理以及使用 Jönsson 和 Eklundh (2004) 所提出的 TIMESAT 算法对 LAI 数据进行时间平滑处理。

气象数据使用了黑河流域大气驱动数据集, 该数据是采用WRF (Weather Research and Forecasting) 模式制备的黑河流域24 h逐时 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 数据 ([http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/\[2021-04-25\]](http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/[2021-04-25]))。相对于全球气候模式GCM (General Circulation Models) 的低分辨率而言, WRF弥补了

GCM在模拟流域尺度陆面过程的不足 (Pan 和 Li, 2011; Pan等, 2012; Xiaoduo和Hanqing, 2019)。本研究使用了该数据集2 m地表气压、气温、入射短波辐射, 10 m风速数据。以往的验证结果表明大气驱动数据集模拟值与观测数据具有良好的一致性 (Pan等, 2012)。

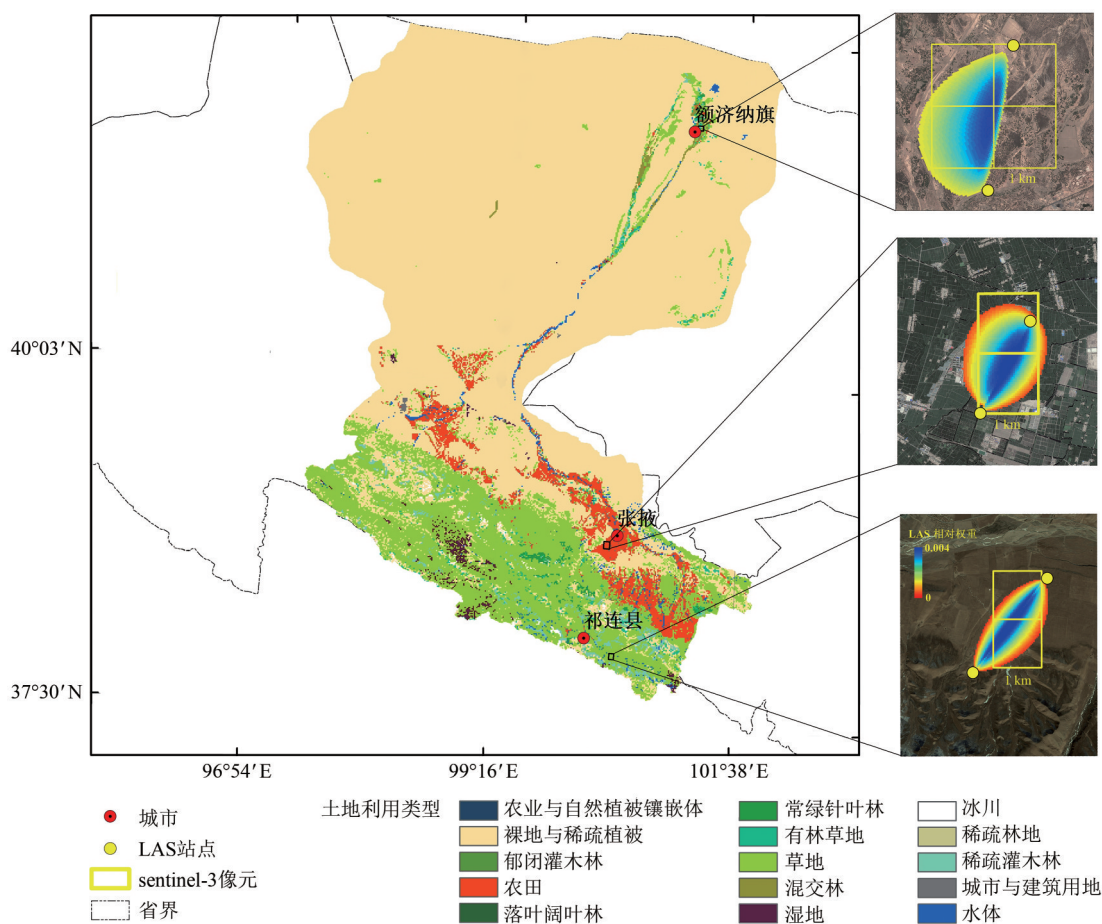


图1 黑河流域土地利用图,以及上游、中游、下游各站点大孔径闪烁仪观测位置,图右侧为大孔径闪烁仪(LAS)足迹覆盖范围
Fig. 1 The land use map of the Heihe River Basin and the locations of the large-aperture scintillometer (LAS) at the upstream, middle and downstream (The right side of the figure shows the footprint coverage of the LAS)

地表温度和地表组分温度为水循环模拟以及能量通量估计的关键输入参数 (Hu等, 2020)。本研究所采用的地表温度和组分温度数据为Sentinel-3卫星的海陆温度辐射仪 (SLSTR) 采集的近红外与热红外数据根据Bian等 (2020) 所提供的多角度多像素算法进行反演所得。

本研究采用的地表验证数据来源于黑河流域上游阿柔站, 中游大满站以及下游四道桥站。数据的时间序列为2017-05-01—2017-10-31。这3个站点代表了黑河流域不同的气候类型以及下垫面类型 (Liu等, 2011; Liu等, 2018; Che等,

2019) (表1)。其中, 阿柔站位于青海省祁连县阿柔乡草达坂村, 主要的下垫面类型为高寒草地 (Liu等, 2018)。大满站位于甘肃省张掖市大满灌区, 下垫面主要以玉米和小麦为主, 还包括果园和大棚, 是典型的水浇地 (Bingfang等, 2015)。四道桥站位于内蒙古额济纳旗达来呼布镇四道桥, 下垫面类型有裸土、灌丛、胡杨、耕地、草地等 (Liu等, 2018)。阿柔站分别架设了两台型号为BLS450和ZZLAS的大孔径闪烁仪, 大满站分别架设了BLS450和BLS900型号的大孔径闪烁仪, 四道桥站架设了一台BLS900型号的大孔径闪烁仪, 来

测量通量源区内的感热通量。涡动相关仪 EC (Eddy Covariance) 分别在上、中、下游架设于 3.5 m、4.5 m 和 8 m 的高度, 其采样频率为 10 HZ, 主要测量感热通量和潜热通量等数据, 利用四分量辐射仪观测上下行长短波辐射, 并在土壤内埋设 3 块热流板, 埋设深度为 6 cm。空气温度、相对湿度、风速传感器分六层和七层架设在观测塔上, 气压计、翻斗式雨量计等观测仪器根据地形特征布设在相应高度。

表 1 研究区域站点基本信息
Table 1 Basic information of study area sites

| 站点 | 地理位置 | 观测时间/ 年月 | 主要下垫面 类型 | 海拔/m |
|------|----------------------|-------------|-------------|---------|
| 四道桥站 | 101.14°E, 42.00°N | 2017-05— | 怪柳 | 873 |
| | | 2017-10 | | |
| 大满站 | 100.37°E, 38.86°N | 2017-05— | 玉米, 小麦 | 1556.06 |
| | | 2017-10 | | |
| 阿柔站 | 100.46°E, 38.05°N | 2017-05— | 亚高山 山地草甸 | 3033 |
| | | 2017-10 | | |

能量的不平衡往往会影响研究结果的精确程度, 以往研究成果表明, 涡动相关仪测量的感热与潜热总和总是低于净辐射与土壤热通量的差值, 所以观测仪器经常低估感热与潜热通量 (Wohlfahrt 等, 2009; Song 等, 2016b)。为了使站点观测得到的净辐射、土壤热通量、感热通量、潜热通量实现闭合, 本研究采用 Bowen-ratio 进行通量塔观测数据的强制闭合 (Twine 等, 2000)。

4 结果及分析

4.1 基于 TSEB 模型估算地表通量的比较

为了分析比较在不同下垫面下 TSEB-PT 与 TSEB-2T 模型模拟的瞬时地表通量与实测地表通量之间的一致性, 本文选取了 2017-05-01—2017-10-31 的黑河流域上、中、下游 Sentinel-3 卫星过境时间的站点实测数据与两个模型所估算数据进行对比 (表 2、表 3)。由于涡动相关仪足迹范围比较小, 所以模拟值和涡动相关仪对比过程中有空间局限性, 但大孔径闪烁仪系统观测范围为公里级尺度, 能有效解决空间尺度不匹配问题 (张圆 等, 2020)。本研究取大孔径闪烁仪系统足迹覆盖的像

元平均值和涡动相关仪所在像元的像元值, 分别将两种模型估算的感热通量与大孔径闪烁仪观测数据进行对比。

表 2 黑河流域上、中、下游 TSEB-PT 模型模拟瞬时地表通量与实测值比较

Table 2 Comparison of instantaneous surface fluxes simulated by the TSEB-PT model in the upper, middle, and lower reaches of the Heihe River Basin and measured values

| 站点 | 通量 | 标准偏差 | 平均绝对 百分比误差/% | 均方根误差/ (W/m ²) |
|-----|----------|--------|-----------------|-------------------------------|
| 阿柔 | R_n | 143.06 | 28.60 | 150.38 |
| | G_0 | 16.63 | 81.97 | 32.41 |
| | $H(EC)$ | 0.02 | 34.89 | 56.43 |
| | $H(LAS)$ | -12.22 | 30.74 | 43.07 |
| | LE | 126.41 | 42.12 | 135.33 |
| 大满 | R_n | 135.53 | 24.18 | 142.65 |
| | G_0 | 40.61 | 119.80 | 48.43 |
| | $H(EC)$ | -33.52 | 23.71 | 52.72 |
| | $H(LAS)$ | -51.80 | 29.41 | 60.21 |
| | LE | 135.76 | 53.02 | 152.13 |
| 四道桥 | R_n | 58.84 | 10.05 | 67.85 |
| | G_0 | -2.71 | 45.97 | 35.75 |
| | $H(EC)$ | -4.07 | 79.36 | 88.88 |
| | $H(LAS)$ | -14.29 | 46.70 | 66.39 |
| | LE | 61.94 | 54.86 | 99.54 |

表 3 黑河流域上、中、下游 TSEB-2T 模型模拟瞬时地表通量与实测值比较

Table 3 Comparison of instantaneous surface fluxes simulated by the TSEB-2T model in the upper, middle, and lower reaches of the Heihe River Basin and measured values

| 站点 | 通量 | 标准偏差 | 平均绝对 百分比误差/% | 均方根误差/ (W/m ²) |
|-----|----------|--------|-----------------|-------------------------------|
| 阿柔 | R_n | 143.38 | 28.56 | 153.02 |
| | G_0 | 17.35 | 86.46 | 33.36 |
| | $H(EC)$ | 3.32 | 37.69 | 56.76 |
| | $H(LAS)$ | 0.50 | 31.67 | 58.87 |
| | LE | 122.70 | 44.59 | 147.92 |
| 大满 | R_n | 134.41 | 24.00 | 142.52 |
| | G_0 | 40.39 | 117.02 | 47.97 |
| | $H(EC)$ | -2.03 | 29.08 | 58.33 |
| | $H(LAS)$ | -25.67 | 27.71 | 53.62 |
| | LE | 100.41 | 46.82 | 134.46 |
| 四道桥 | R_n | 57.89 | 10.05 | 68.36 |
| | G_0 | 1.39 | 47.73 | 34.89 |
| | $H(EC)$ | 37.62 | 119.83 | 117.98 |
| | $H(LAS)$ | 9.77 | 70.19 | 107.59 |
| | LE | 13.91 | 52.11 | 112.69 |

由表2可知, TSEB-PT模型估算净辐射和潜热通量与站点观测数据差异较大, 这与Song等(2016a)研究相一致。但是, TSEB-2T模型估算的净辐射与潜热通量同样与站点观测数据差异较大, TSEB-2T模型在植被覆盖度较低的上游阿柔站和下游四道桥站估算的潜热通量离散程度都大于TSEB-PT模型。但是在植被覆盖度高的中游大满站TSEB-2T模型表现更好, 这与Song等(2016b)的研究一致。两个模型估算的地表通量与地面观测值之间的差异都较大, 其误差的主要来源包括了模型本身机理上的缺陷, 遥感反演的地表参数存在不确定性, 特别是地表温度、土壤和植被组分温度。

通过对比分析发现, 在下垫面为高寒山地草甸的阿柔站, TSEB-PT模型与TSEB-2T模型估算结果差异并不显著(图2), 在低植被覆盖度下, 两种模型的估算结果大致相同, 与站点实测通量值之间吻合较好。由于涡动相关仪的观测源区受到架高、风速和风向等的影响, 其足迹源区一般只有几百米, 与Sentinel-3的像元之间在空间不匹配。图3表示的是模型估算感热通量与大孔径闪烁仪测量值之间的对比散点图, TSEB-PT模型低估了感热通量, 其标准偏差为 -12.22 W/m^2 , TSEB-2T模型估算值与观测值的平均偏差较小, 其标准偏差为 0.5 W/m^2 , 通过对比均方根误差统计项发现, 两个模型估算的感热通量与大孔径闪烁仪观测值吻合较好, 其中TSEB-PT模型的均方根误差数值较小, 为 43.07 W/m^2 。通过分析图2统计结果发现, TSEB-PT模型与TSEB-2T模型都高估了净辐射通量(图2(a), (e)), 其标准偏差均约为 143 W/m^2 , 百分比误差与均方根误差未见明显差异, 说明TSEB-PT模型所估算的净辐射通量结果与TSEB-2T模型相近。在较高的植被覆盖度下($1.5 \leq \text{LAI} < 2$), TSEB-PT模型与TSEB-2T模型均低估了土壤热通量(图2(b), (f)), 并且在植被覆盖度较低的情况下($0.5 \leq \text{LAI} < 1$)两个模型均高估了土壤热通量, TSEB-PT与TSEB-2T模型估算结果的标准偏差分别为 16.63 W/m^2 与 17.35 W/m^2 , 整体而言均高估了土壤热通量, 估算值未见明显差异, 其百分比误差与均方根误差两个模型的差异不明显, 说明两种模型估算结果类似。对于感热通量, 图2(c)、(g)表示的是模型估算值与涡动相关仪测量值之间的差异, 统计结果表明, 两个模型都高估了感热通量, 且两个模型估算值的均方根误差也基本一致,

约为 56 W/m^2 ; 对比图2(d)、(h)中两个模型所估算的潜热通量发现, 两个模型都较大的高估了潜热通量, 并且随着植被覆盖度变高, 两个模型的估计值都呈现逐渐变大的趋势。通过对比误差统计发现, TSEB-PT模型估算结果的百分比误差为42.12%, 均方根误差为 135.33 W/m^2 , 均低于TSEB-2T模型估算结果, 说明TSEB-PT模型与观测结果有着更好的一致性。综上所述, 在高寒草地下垫面下, TSEB-PT模型的估算结果优于TSEB-2T模型。

在以玉米为主要下垫面类型的大满灌区, TSEB-PT与TSEB-2T模型对于净辐射通量与潜热通量的估算均呈现出随着植被覆盖度增加, 估算结果也随之增加的趋势(图4(a), (e)和(d), (h)), 而土壤热通量与感热通量的估算值相反(图4(b), (f))。对比两种模型估算感热通量与大孔径闪烁仪观测数据(图5)发现, TSEB-2T模型估算结果优于TSEB-PT估算结果, TSEB-PT模型估算结果的标准偏差为 -51.80 W/m^2 , 而TSEB-2T估算结果为 -25.67 W/m^2 , 并且TSEB-2T模型估计值的百分比误差(27.71%)与均方根误差(53.62 W/m^2)均低于TSEB-PT模型估算结果。对比表2与表3可以发现, TSEB-PT与TSEB-2T模型均高估了净辐射通量与土壤热通量。TSEB-2T模型估算净辐射的百分比误差(24%)与均方根误差(142.52 W/m^2)与TSEB-PT估算的结果(百分比误差: 24.18%, 均方根误差: 142.65 W/m^2)基本一致, 两个模型估算结果存在较好的一致性。对于土壤热通量, 随着植被覆盖度变小, 其两个模型的估计值偏离实测值越大, 同净辐射的估算类似, 两种模型的估算结果吻合度较高。对比TSEB-PT与TSEB-2T模型估算的感热通量与涡动相关仪观测数据发现, TSEB-PT模型低估了感热通量(图4(c), (g)), 而TSEB-2T模型略微高估了感热通量, 并且由图4(c)、(g)可知, 在植被覆盖度较高的情况下($1.5 \leq \text{LAI}$), 两种模型所估算的感热通量均与涡动相关仪观测数据存在较好的一致性。根据图4可知, 随着植被覆盖度变大, 两种模型估算的潜热通量与涡动相关仪观测值吻合程度越高, 但均高估了潜热通量, 同时TSEB-2T模型估算结果百分比误差(46.82%)与均方根误差(134.46 W/m^2)也均小于TSEB-PT模型估算结果。综上所述, 在干旱半干旱区灌溉玉米等植被覆盖度高的下垫面下, TSEB-2T模型模拟结果要优于TSEB-PT模型。

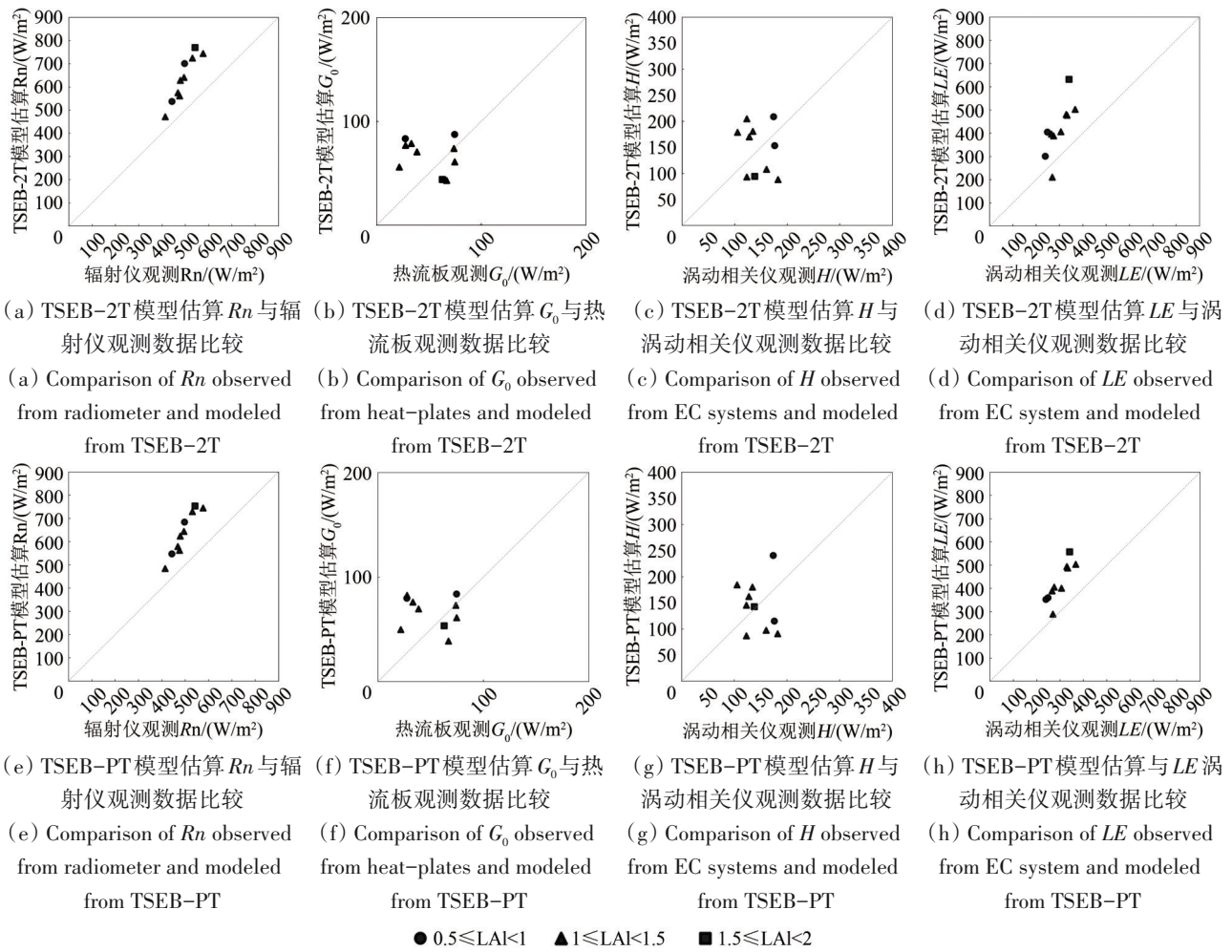


图2 阿柔站 TSEB-2T 模型和 TSEB-PT 模型估算瞬时地表通量分量与站点实测数据比较

Fig.2 Comparison of the estimated instantaneous surface flux components using the TSEB-2T model and TSEB-PT model with the measurements from Eddy Covariance system (EC) at Arou place

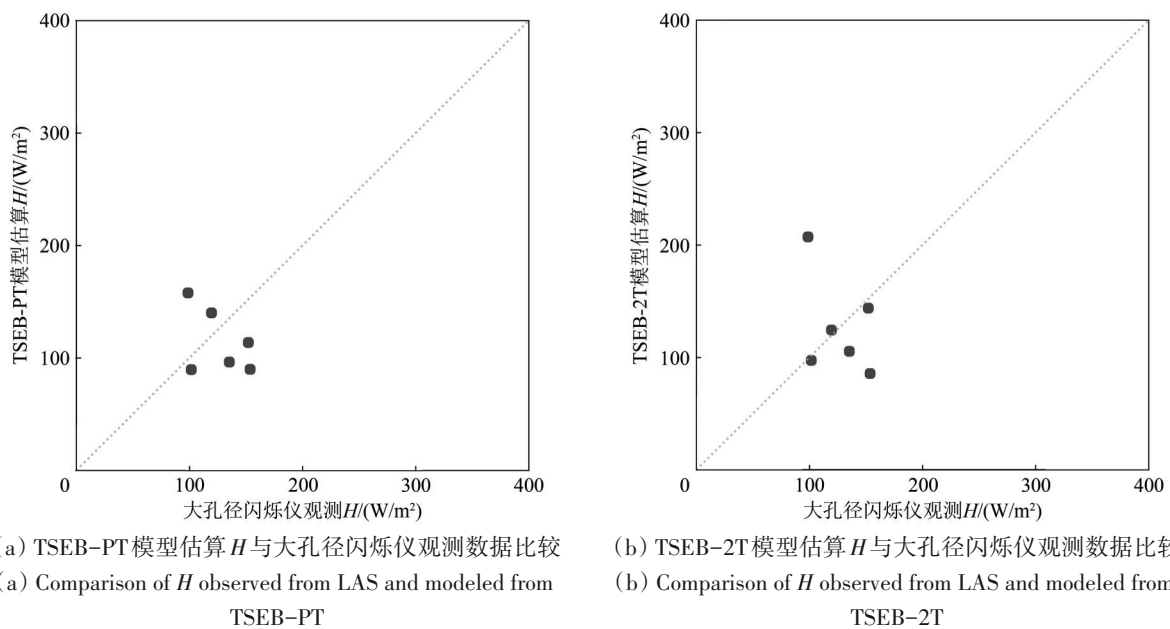


图3 阿柔站 TSEB-PT 模型和 TSEB-2T 模型估算感热通量(H)与 LAS 实测数据比较

Fig.3 Comparison of the sensible heat flux (H) estimated by the TSEB-PT model and TSEB-2T with the observations from the LAS at Arou site

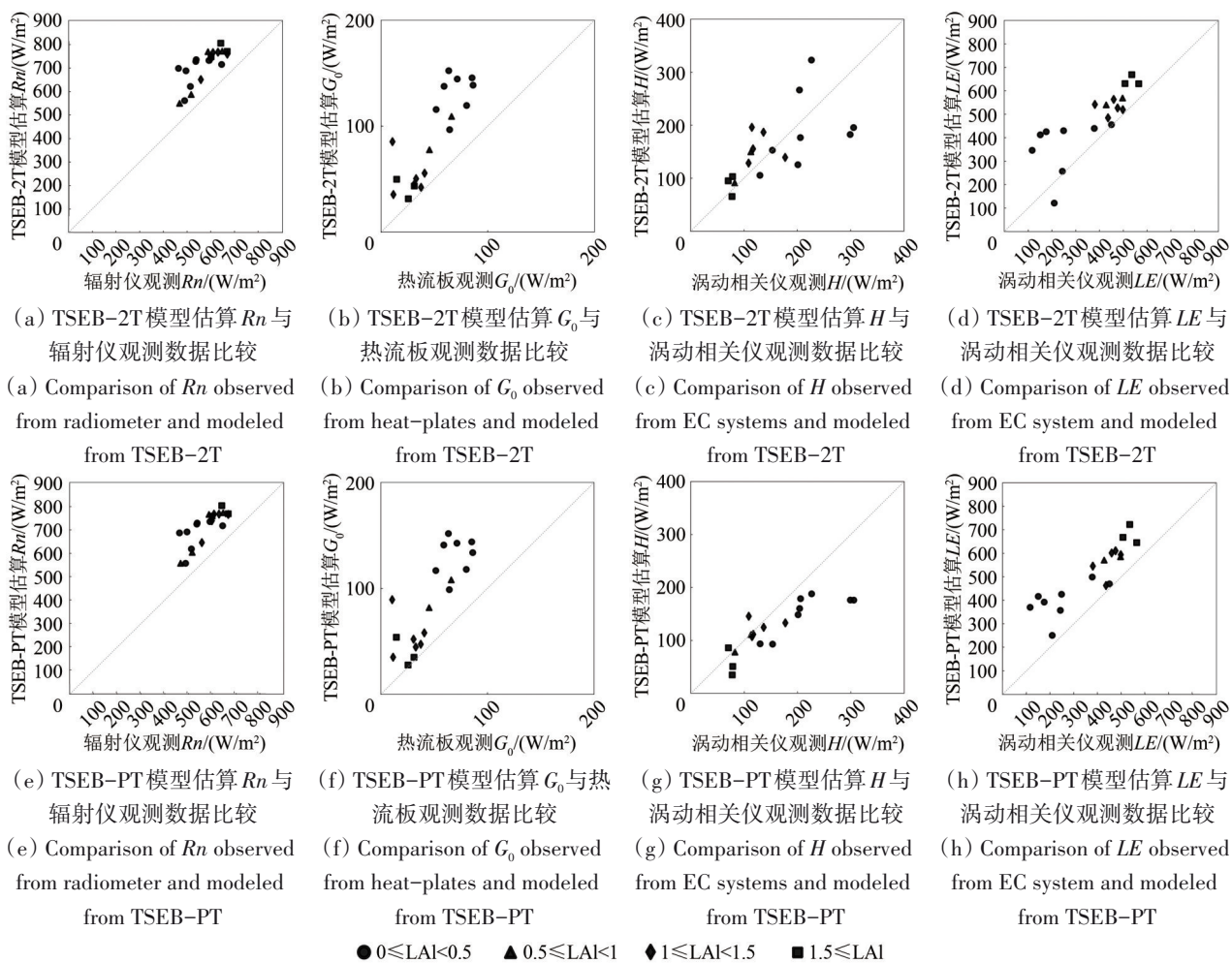


图4 大满站TSEB-2T模型和TSEB-PT模型估算瞬时地表通量分量与站点实测数据比较

Fig.4 Comparison of the estimated instantaneous surface flux components with the TSEB-2T model and TSEB-PT model with the measurements from EC at Daman site

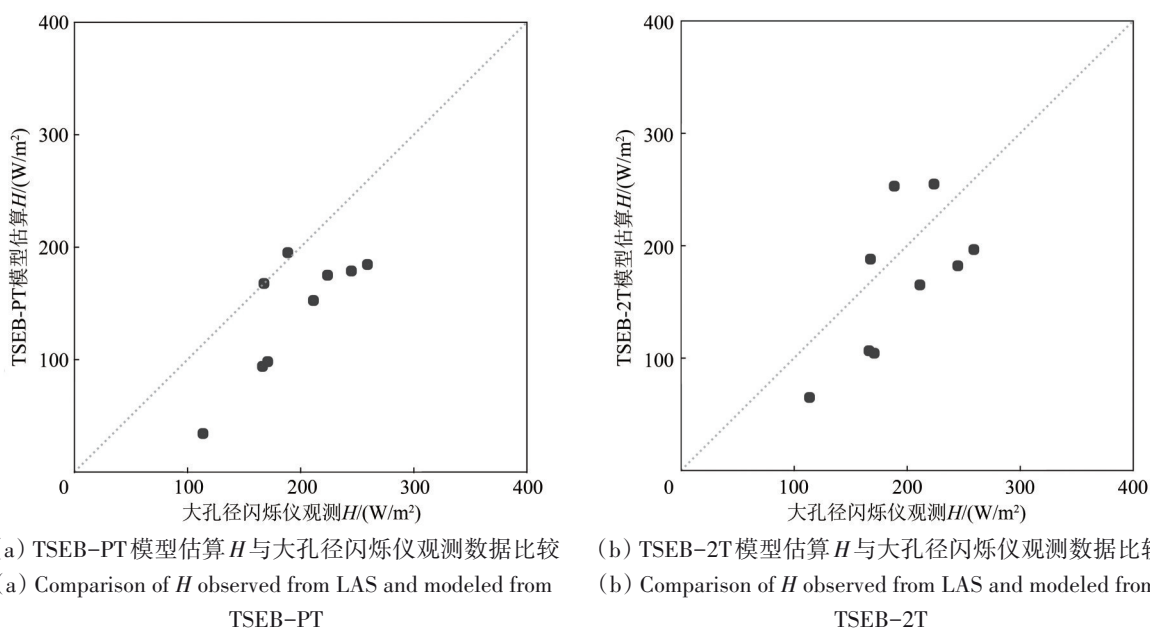


图5 大满站TSEB-PT模型和TSEB-2T模型估算感热通量与LAS实测数据比较

Fig.5 Comparison of the sensible heat flux estimated by the TSEB-PT model and TSEB-2T with the observations from the LAS at Daman site

在以河岸林为主要下垫面类型的四道桥站, 图 6 (a), (e), (b), (f) 表明, 两种模型对于净辐射与土壤热通量的估算相对一致。对比大孔径闪烁仪观测感热通量图 7 可以发现, TSEB-PT 模型有着更好的观测结果, 其估算结果的百分比误差为 46.70%, 均方根误差为 66.39 W/m^2 , 均优于 TSEB-2T 估算结果。同时, TSEB-PT 与 TSEB-2T 模型均高估了净辐射通量, 随着植被覆盖度升高, 其净辐射估算值越高, 且两种模型的百分比误差 ($\sim 10\%$) 与均方根误差 ($\sim 68 \text{ W/m}^2$) 基本一致。同样, 对于土壤热通量, 两种模型估算结果也基本一致。将两种模型估算的感热通量与涡动相关

仪观测值对比发现 (图 6 (c), (g)), 当植被覆盖度较低时 ($0 < \text{LAI} \leq 0.5$) 两种模型的估算感热通量均高于观测值, 反之均低于观测值, 并且 TSEB-PT 模型的百分比误差为 79.36%, 明显优于 TSEB-2T 模型 (119.83%)。对于潜热通量 (图 6 (d), (h)), 两种模型都存在一定程度的高估现象, 尤其是在植被覆盖度低的情况下, 两个模型的高估都尤为明显, 但随着植被覆盖度增加, TSEB-PT 模型的估计值更加接近观测值。综上所述, 在河岸林地植被覆盖度低的下垫面类型下, TSEB-PT 模型模拟结果要优于 TSEB-2T 模型。

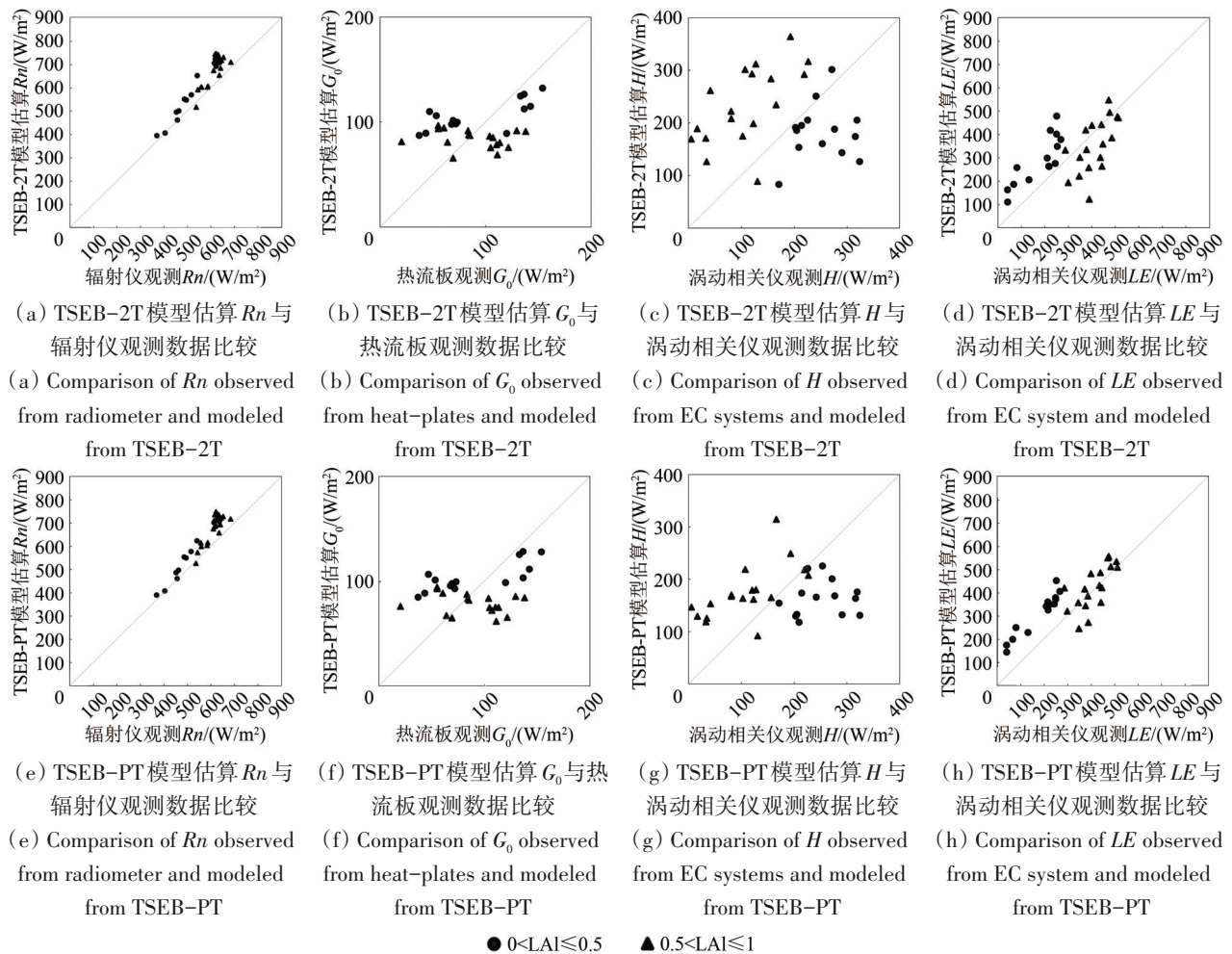


图 6 四道桥站 TSEB-2T 模型和 TSEB-PT 模型估算瞬时地表通量分量与站点实测数据比较

Fig.6 Comparison of the estimated instantaneous surface flux components with the TSEB-2T model and TSEB-PT model with the measurements from EC at Sidiaoqiao site

不同下垫面的 MODIS LAI 在数值上存在较大差异。在以亚高山山地草甸为主要下垫面类型的阿柔站, 植被覆盖度较低, 生长季 MODIS LAI 数值范围主要集中在 0.8—2.8; 在大满站, 主要以玉

米、小麦等农田农作物为主, 植被覆盖度高, MODIS LAI 数值范围集中在 1.4—4.1; 在以河岸林为主要下垫面类型的四道桥站, 地处黑河流域下游, 植被覆盖度低, MODIS LAI 数值范围主要集

中在 0.2—1。在阿柔站, 当在植被覆盖度较低时 ($LAI < 2$), 涡动相关仪系统在 Sentinel-3 卫星过境时刻下观测的感热通量数值为 93—124 W/m^2 , 潜热通量为 182—362 W/m^2 , TSEB-PT 模型估算感热通量范围集中在 162—241 W/m^2 , 潜热通量集中在 465—501 W/m^2 , 而 TSEB-2T 模型估算感热通量集中在 168—301 W/m^2 , 潜热通量集中在 491—517 W/m^2 , 与 TSEB-2T 模型相比, TSEB-PT 估算结果与观测值有着更好的一致性。并且, 在植被覆盖度高的大满站, 当 MODIS 像元 LAI 值处于较低的范围时

($LAI < 1.5$), TSEB-PT 模型的估算值也与站点观测值更为一致。但是随着 LAI 值的升高 ($LAI \geq 1.5$), 植被覆盖度变高, 在大满站, 涡动相关仪在 Sentinel-3 卫星过境时刻下观测感热通量集中在 35—75 W/m^2 , 潜热通量集中在 293—653 W/m^2 , TSEB-PT 估算感热通量为 7—28 W/m^2 , 潜热通量为 722—770 W/m^2 , TSEB-2T 模型估算感热通量在 44—103 W/m^2 , 潜热通量集中在 66—715 W/m^2 。所以在大满灌区, TSEB-2T 模型的感热和潜热通量与涡动相关系统观测值更接近。

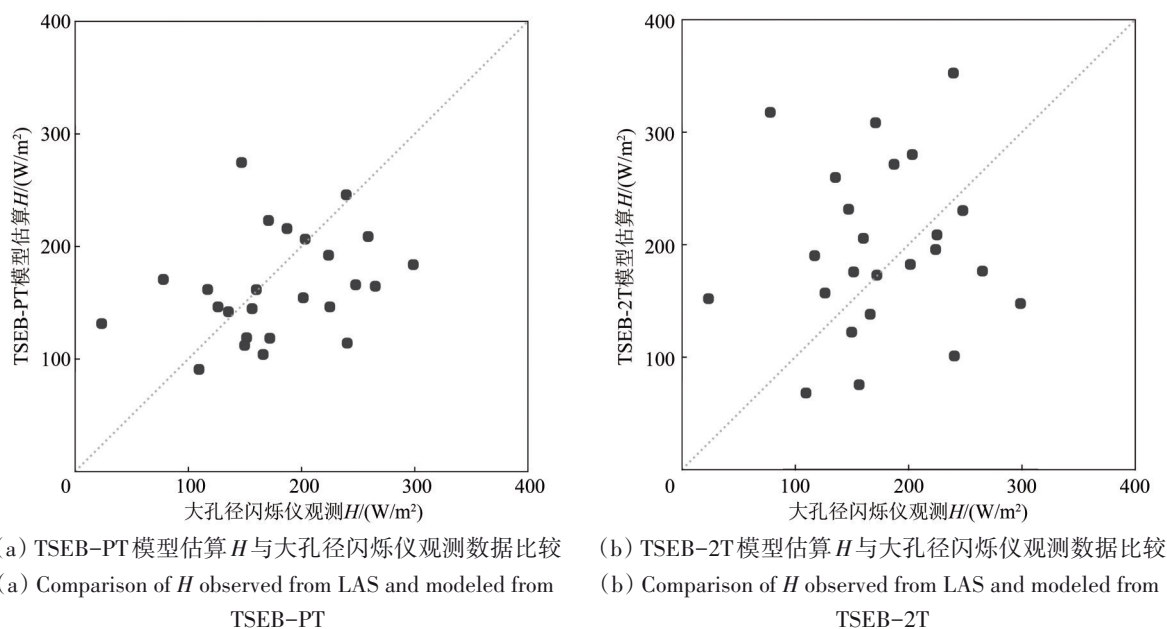


图7 四道桥站 TSEB-PT 模型和 TSEB-2T 模型估算感热通量与 LAS 实测数据比较

Fig.7 Comparison of the sensible heat flux estimated by the TSEB-PT model and TSEB-2T with the observations from the LAS at Sidaoqiao site

4.2 土壤蒸发和植被蒸腾空间格局分析

在黑河流域, 植被的生长季主要在 6—9 月, 在此期间, 每月的植被蒸腾和土壤蒸发在不同下垫面以及不同气候条件下复杂多变, 而地面观测站点的观测值仅能代表百米或公里尺度小范围的地表通量, 并不能完全观测整个流域。此外, 由于本次研究采用的遥感卫星影像分辨率为 1 km, 所以地面观测站所测得的观测值和两种模型估算值之间存在着像元不匹配问题, 即涡动相关仪所测得的该站点小范围区域的潜热通量并不能完全代表一个 Sentinel-3 像元。所以将模型估算结果与地面观测值进行对比验证后, 两种不同模型在流域尺度输出结果的对比变得非常重要。

立夏 (5 月初) 到夏至 (6 月中下旬), 随着气

温的不断升高, 黑河流域不同下垫面的潜热通量的空间分布模式是复杂多变的。图 8 展示了整个黑河流域 2017-05-26 (DOY 146) 和 2017-06-30 (DOY 181) Sentinel-3 卫星过境时刻下的瞬时潜热通量以及叶面积指数的空间变化。从图 8 可以看出, 两种模型具有相似的空间格局, 即在植被覆盖的下垫面类型下潜热通量都较高, 在居民地潜热通量都较低。

在五月份 (DOY 146) 植被生长初期, 黑河流域 LAI 较低, 在祁连县的阿柔站、张掖的大满站、额济纳旗的四道桥站分别分布着亚高山高寒草甸、农田、怪柳等植被, 且植被覆盖度较低, MODIS LAI 范围为 0—2。在阿柔站, 两种模型的估算结果吻合度较高, 主要集中在 200—530 W/m^2 。在植被覆盖

度高的大满站, 两种模型的估算结果出现了较大偏差, TSEB-PT 估算结果主要集中在 420—530 W/m², 但是 TSEB-2T 主要集中在 300—450 W/m²。在植被

稀疏的四道桥站, 两种模型估算结果也较为吻合, 主要集中在 350—500 W/m²。

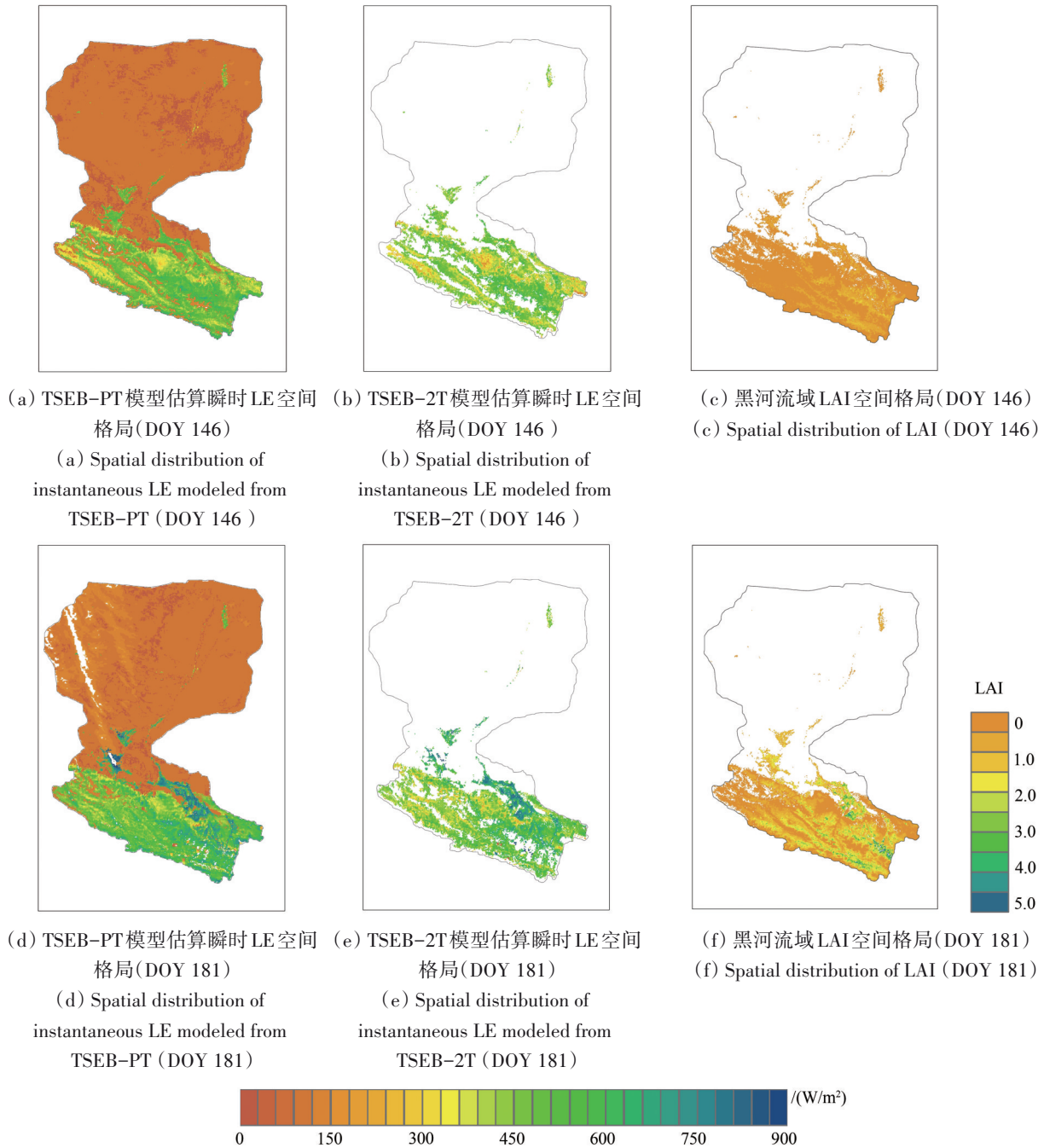


图8 黑河流域05-26(DOY 146)与06-30(DOY 181)的叶面积指数(LAI)与模型估算潜热通量(LE)空间分布图
Fig.8 The spatial distribution of leaf area index (LAI) and latent heat flux (LE) estimated from the TSEB-PT and TSEB-2T models in Heihe River Basin on May 26 (DOY 146) and June 30 (DOY 181), respectively.

到了6月末 (DOY 181), 气温变高, 植被处于加速生长期, 需水量变大, LAI变高 (1—5), 在3个站点两种模型估算的潜热通量也随之升高 (200—750 W/m²)。在阿柔站, 由于植被的生长,

LAI较五月份增长至3—5, TSEB-2T估算值随之提升到400—680 W/m², TSEB-PT估算值提升到了300—900 W/m²。在大满站, MODIS LAI为2—4, TSEB-PT和TSEB-2T模型估算值的空间分布分别

是 700—800 W/m² 和 660—750 W/m²。值得注意的是，从整体潜热通量空间分布上来看，TSEB-PT 的潜热通量估算值大多数都高于 TSEB-2T 模型的估算值，尤其是在上游阿柔站和中游大满站周围植被覆盖度相对较高的地方，TSEB-PT 的高估更为明显，根据 4.1 节分析可知，随着植被覆盖度的增加 TSEB-2T 模型产生了更可靠的地表通量估算值，从而使 TSEB-PT 模型产生了相对的高估。在植被稀疏的四道桥站，LAI 较低（0.5—0.8），TSEB-PT 模型估算值主要分布为 480—530 W/m²，TSEB-2T 为 340—500 W/m²。

在植被生长阶段，由于植被需水量不断增多，在不同下垫面下每天不同时刻的植被蒸腾和土壤蒸发是不同的。图 9 展示了两种模型模拟整个黑河流域 2017-05-26 (DOY 146) 和 2017-06-30 (DOY 181) Sentinel-3 卫星过境时刻下的瞬时植被蒸腾和土壤蒸发。显然，对比五月末和六月末两种模型估算结果可知，随着植被不断生长，黑河流域内植被蒸腾从 100—500 W/m² (DOY 146) 增长到 100—650 W/m² (DOY 181)，土壤蒸发也随着有着较为明显的下降。

在 5 月末 (DOY 146)，整个黑河流域的植被蒸腾比较小，土壤蒸发较大。植被蒸腾较高的区域主要分布在中游的农田、灌丛和林地上，较高的植被蒸腾与五月中下旬的玉米播种和灌溉以及林地树木新长出的枝叶有关。到了 6 月末 (DOY 181)，玉米等农作物开始生长，气温变高，林地、灌丛、农田植被用水量开始增加，从图 9 中可以看出中游大满灌区植被蒸腾明显增加且明显高于上游和下游，并且随着植被蒸腾的升高，土壤中的水分不断输送到植被，导致土壤蒸发逐渐减少。

4.3 组分温度空间分布差异比较

温度数据作为 TSEB-PT 模型与 TSEB-2T 模型的关键输入参数，作为模型的控制边界条件，模型输入组分温度的差异必然会影响着模型估算结果。为了使对比分析更加直观，选择 2017-05-26 (DOY 146) 与 2017-06-30 (DOY 181) 两天 TSEB-PT 模型与 TSEB-2T 模型的输入组分温度空间分布进行比较分析 (图 10)。

由于黑河流域下游广泛分布着荒漠和稀疏植被，MODIS LAI 数据在该下游荒漠部分被设置为背景值，所以 TSEB-PT 模型将该区域认为是裸土，同时为了更好的验证 Sentinel-3 双角度观测热红外数据在组分温度分解方面的能力，TSEB-2T 模型

输入的组分温度数据在该区域没有数值。

在植被生长初期 (DOY 146)，大满站周围 5×5 像元 TSEB-PT 模型输入植被温度为 302—308 K，TSEB-2T 模型输入植被温度为 308—309 K；在下游地区，四道桥站周围 5×5 像元 TSEB-PT 模型输入植被温度集中在 304—307 K，而 TSEB-2T 模型输入植被温度集中在 308—315 K。TSEB-PT 模型更低的温度输入使其估算潜热通量高于 TSEB-2T 模型估算值 (图 8)。

在流域尺度上，植被生长旺季 (DOY 181)，TSEB-PT 模型输入的植被组分温度相对较低 (图 10)，导致了 TSEB-PT 模型在流域尺度低估了感热通量，从而高估了植被蒸腾 (图 9)。

图 9—图 11 从空间格局和散点分布上展示了两个模型估算的土壤蒸发和植被蒸腾以及土壤和植被温度在空间上的差异以及随着温度的变化两个模型估算植被蒸腾的差别。在植被生长旺季 (DOY 181)，流域尺度上 TSEB-PT 模型输入的植被组分温度相对较低 (图 10)，导致了 TSEB-PT 模型在流域尺度低估了感热通量，从而高估了植被蒸腾。

图 11 中两种模型估算的植被蒸腾随温度变化差异明显。图中的色彩条表示 Sentinel-3 卫星过境时两个模型使用的植被温度 (K)。由图可知，在低植被温度下，TSEB-2T 模型估算的植被蒸腾高于 TSEB-PT 模型的结果；当植被温度低于 290 K 时，TSEB-2T 模型估算的植被蒸腾集中在 200—400 W/m²，而 TSEB-PT 模型估算的植被蒸腾集中在 100—200 W/m²。这部分像元主要位于高寒草甸草原，植被覆盖度较低，植被温度低，植被蒸腾量也较小，TSEB-PT 模型估算结果更为合理。但是在高植被温度部分，如植被温度大于 300 K，TSEB-PT 模型估算植被蒸腾数值分布分为较大，0—700 W/m²，此时 TSEB-PT 模型估算的植被蒸腾一般高于 TSEB-2T 的结果。并且在 06-30，植被覆盖度相对较高，TSEB-PT 模型估算的植被蒸腾高值更多，且部分数值分布不合理。综上所述，TSEB-PT 模型在低植被覆盖度下的表现更加出色，而 TSEB-2T 模型在高植被覆盖度下表现更加出色。

总体来看，TSEB-PT 模拟的植被蒸腾数值在较高植被覆盖度下要高于 TSEB-2T 模型模拟结果，尤其在中游与上游之间的阔叶林、针叶林、农田中；并且在低植被覆盖度下，如 DOY 181 上游的稀疏植被、草地和下游的稀疏林地中，TSEB-PT 模型也有着更高的模拟值，这与以往的研究结果相一致。基于上述分析，造成两种模型植被蒸腾

和土壤蒸发差异的主要原因是 TSEB-PT 模型与 TSEB-2T 模型输入组分温度的差异。同时, TSEB 模型的 P-T 系数为 1.26 也导致 TSEB-PT 模型容易高估植被蒸腾, 从而低估土壤蒸发, 这与 Song 等 (2020) 结论一致。当然, 造成 TSEB-PT 模型估算值与 TSEB-2T 模型估算值的差异也受到了输入数据精度的影响, TSEB-PT 与 TSEB-2T 模型输入温

度数据是 Sentinel-3 卫星产品, 在生产地表温度产品以及组分温度产品时, 天空中的云、雾、雨等自然因素对产品精度的影响是不可忽略的, 并且不同的模型算法对于温度的敏感性也是不同的 (Kalma 等, 2008; Cammalleri 等, 2012), French 等 (2015) 研究结果表明, TSEB-PT 模型对地表温度较为敏感。

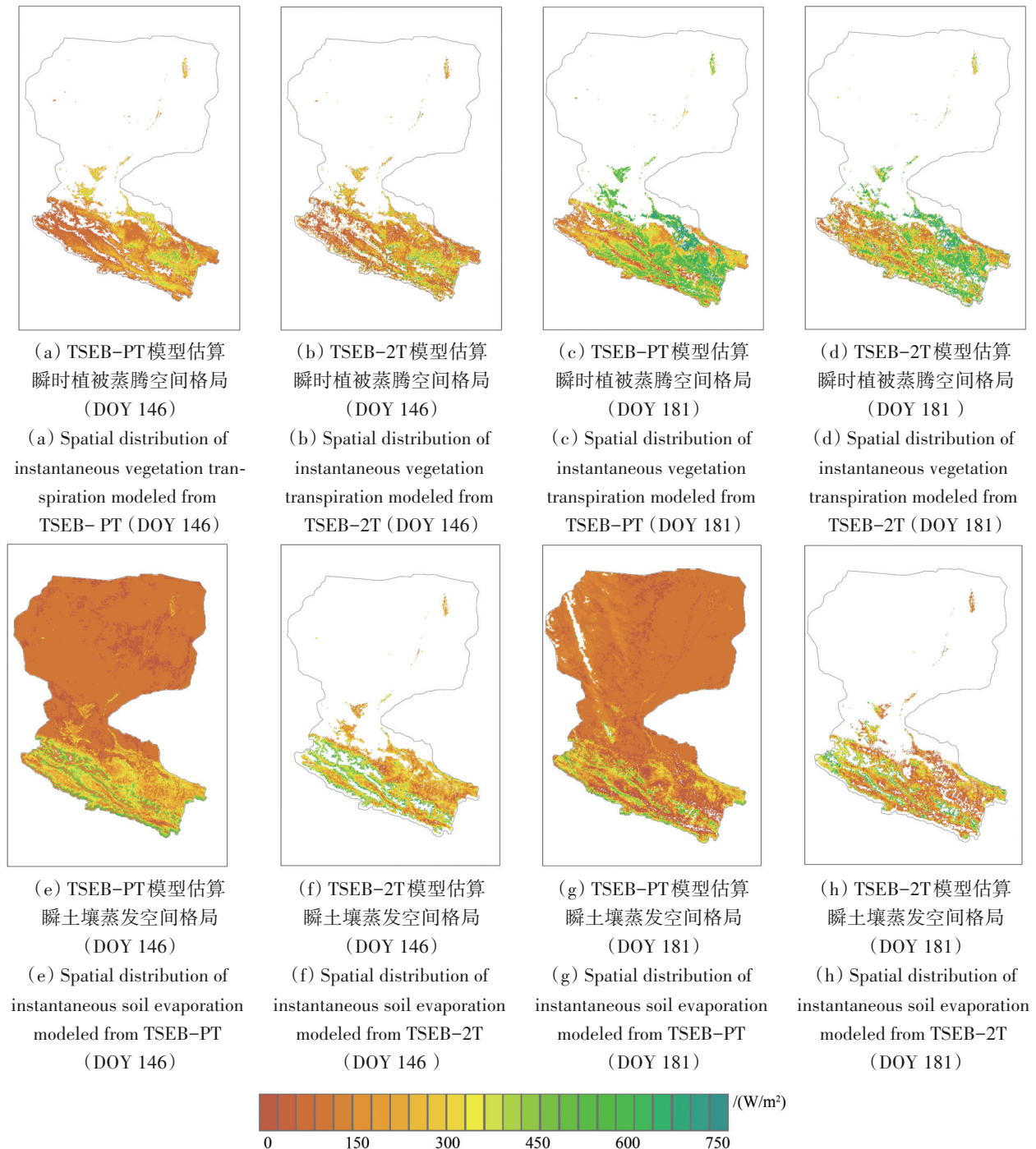


图9 2017-05-26(DOY 146)与2017-06-30(DOY 181)黑河流域不同下垫面类型的土壤蒸发和植被蒸腾空间格局
Fig.9 Spatial distribution of soil evaporation and vegetation transpiration estimated from TSEB-PT and TSEB-2T models over different landcover types in the Heihe River Basin on May 26 (DOY 146) and June 30 (DOY 181)

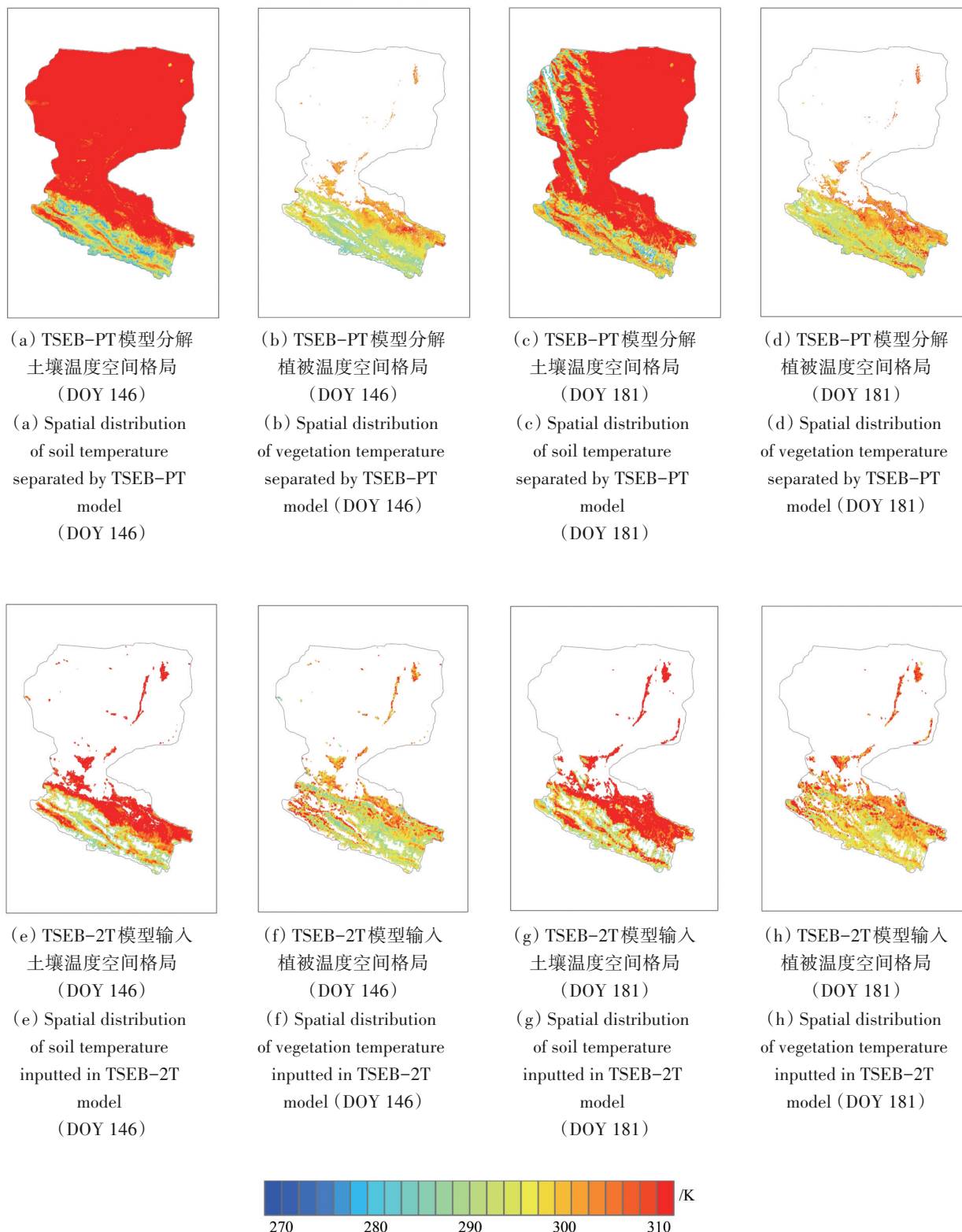
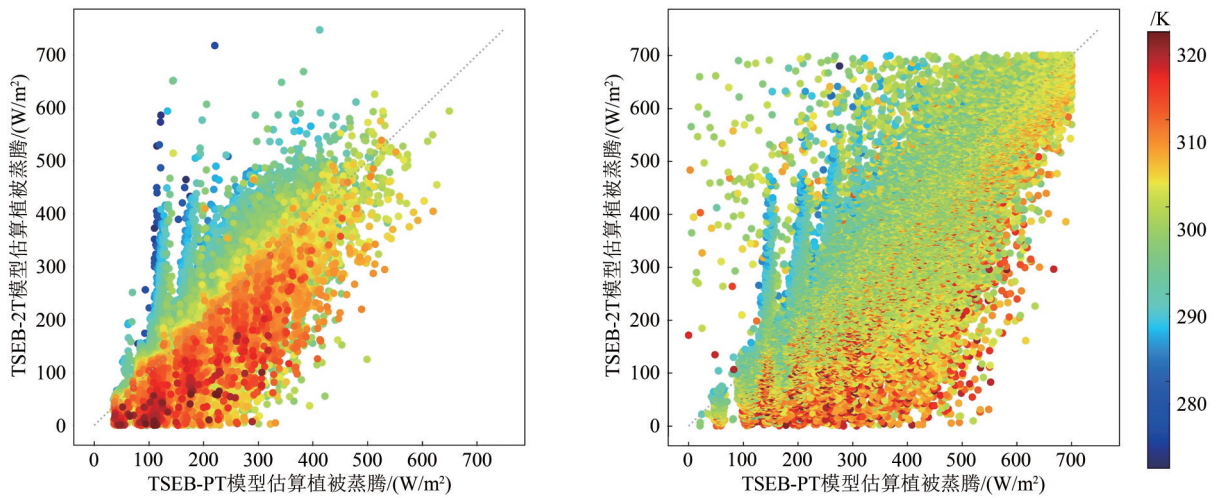


图10 05-26(DOY 146)与06-30(DOY 181)黑河流域不同下垫面类型的土壤温度与植被温度空间格局
 Fig.10 Spatial distribution of soil temperature and vegetation temperature over different landcover types in Heihe River Basin on May 26 (DOY 146) and June 30 (DOY 181)



(a) 05-26 TSEB-PT模型与TSEB-2T模型估算植被蒸腾对比
(a) Comparison of vegetation transpiration estimated by TSEB-PT model and TSEB-2T model on May 26

(b) 06-30 TSEB-PT模型与TSEB-2T模型估算植被蒸腾对比
(b) Comparison of vegetation transpiration estimated by TSEB-PT model and TSEB-2T model on June 30

图 11 黑河流域不同植被温度下 TSEB-PT 模型与 TSEB-2T 模型估算植被蒸腾散点图

Fig. 11 Transpiration separated by TSEB-PT model and TSEB-2T model under different vegetation temperatures conditions in Heihe River Basin

5 结 论

本文利用基于 Sentinel-3 垂直角度观测数据反演的地表温度和基于 Sentinel-3 双角度观测数据分解的土壤和植被组分温度分别驱动 TSEB-PT 和 TSEB-2T 模型, 估算了黑河流域干旱半干旱地区的瞬时地表通量, 并利用通量塔实测数据对不同模型进行了对比验证。结果表明, 在不同下垫面类型下, 两种模型的估算结果存在一定差异, 在植被稀疏的上游高寒草甸以及下游河岸林地中, TSEB-PT 模型表现更好; 但对于中游大满灌区玉米田, TSEB-2T 模型优势更加明显。主要结论归纳如下:

(1) 对于净辐射、土壤热通量、感热通量以及潜热通量, 从总体上讲两种模型的表现是相似的, 但在不同的下垫面类型以及植被覆盖度下, 两种模型会出现一定范围的偏差, 且两种模型的优势与劣势较为鲜明。在 LAI 低时 ($0.5 \leq \text{LAI} < 1$), TSEB-PT 模型的表现更加好, 相反在植被类型丰富以及高植被覆盖度下 TSEB-2T 的估算结果要明显优于 TSEB-PT。在不同下垫面下 TSEB-PT 和 TSEB-2T 模型会出现一定的差异, 这主要取决于所采用的能量闭合方法 (Song 等, 2016b)。

(2) 本次研究不仅将两种模型的估算数据与站点观测数据进行了对比验证, 还对比了两个模型潜热通量及其分量的空间分布。尽管估算结果

存在一定程度的局限性, 但结果表明两种模型估算结果较为相似, TSEB-2T 模型更加适合植被覆盖度较高的下垫面类型, 而 TSEB-PT 模型更加适合植被覆盖度低的下垫面类型。

(3) 为了分析造成两种模型估算植被蒸腾与土壤蒸发差异的原因, 分别对比了 5 月末 (DOY 146) 和 6 月末 (DOY 181) 两种模型输入的植被温度和土壤温度以及对流域内两种模型估算植被蒸腾的影响。在低植被温度下 (小于 290 K), TSEB-2T 模型估算植被蒸腾高于 TSEB-PT 的结果, 而在高植被温度下 (大于 300 K), TSEB-PT 模型估算植被蒸腾明显高于 TSEB-2T 的估算值。

参考文献 (References)

- Anderson M C, Allen R G, Morse A and Kustas W P. 2012. Use of landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. *Remote Sensing of Environment*, 122: 50-65 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.08.025]
- Bian Z J, Li H, Göttsche F M, Li R B, Du Y M, Ren H Z, Cao B, Xiao Q and Liu Q H. 2020. Retrieving soil and vegetation temperatures from dual-angle and multipixel satellite observations. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13: 5536-5549 [DOI: 10.1109/jstars.2020.3024190]
- Cammalleri C, Anderson M C, Ciraolo G, D'Urso G, Kustas W P, Loggia L and Minacapilli M. 2012. Applications of a remote sensing-based two-source energy balance algorithm for mapping surface fluxes without in situ air temperature observations. *Remote Sensing of Environment*, 124: 502-515 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.06.009]
- Che T, Li X, Liu S M, Li H Y, Xu Z W, Tan J L, Zhang Y, Ren Z G, Xiao L, Deng J, Jin R, Ma M G, Wang J and Yang X F. 2019. Inte-

- grated hydrometeorological, snow and frozen-ground observations in the alpine region of the Heihe River Basin, China. *Earth System Science Data*, 11(3): 1483-1499 [DOI: 10.5194/essd-11-1483-2019]
- Chehbouni A, Nouvellon Y, Lhomme J P, Watts C, Boulet G, Kerr Y H, Moran M S and Goodrich D C. 2001. Estimation of surface sensible heat flux using dual angle observations of radiative surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108(1): 55-65 [DOI: 10.1016/S0168-1923(01)00221-0]
- Colaizzi P D, Kustas W P, Anderson M C, Agam N, Tolck J A, Evett S R, Howell T A, Gowda P H and O'Shaughnessy S A. 2012. Two-source energy balance model estimates of evapotranspiration using component and composite surface temperatures. *Advances in Water Resources*, 50: 134-151 [DOI: 10.1016/j.advwatres.2012.06.004]
- François C. 2002. The potential of directional radiometric temperatures for monitoring soil and leaf temperature and soil moisture status. *Remote Sensing of Environment*, 80(1): 122-133 [DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00293-0]
- French A N, Hunsaker D J and Thorp K R. 2015. Remote sensing of evapotranspiration over cotton using the TSEB and METRIC energy balance models. *Remote Sensing of Environment*, 158: 281-294 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.11.003]
- Hu T, Renzullo L J, Van Dijk A I J M, He J, Tian S Y, Xu Z H, Zhou J, Liu T J and Liu Q H. 2020. Monitoring agricultural drought in Australia using MTSAT-2 land surface temperature retrievals. *Remote Sensing of Environment*, 236: 111419 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111419]
- Jönsson P and Eklundh L. 2004. TIMESAT—a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers and Geosciences*, 30(8): 833-845 [DOI: 10.1016/j.cageo.2004.05.006]
- Kalma J D, McVicar T R and McCabe M F. 2008. Estimating land surface evaporation: a review of methods using remotely sensed surface temperature data. *Surveys in Geophysics*, 29(4): 421-469 [DOI: 10.1007/s10712-008-9037-z]
- Kustas W and Anderson M. 2009. Advances in thermal infrared remote sensing for land surface modeling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(12): 2071-2081 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2009.05.016]
- Kustas W P and Daughtry C S T. 1990. Estimation of the soil heat flux/net radiation ratio from spectral data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 49(3): 205-223 [DOI: 10.1016/0168-1923(90)90033-3]
- Kustas W P and Norman J M. 1999. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94(1): 13-29 [DOI: 10.1016/S0168-1923(99)00005-2]
- Li X, Cheng G D, Liu S M, Xiao Q, Ma M G, Jin R, Che T, Liu H H, Wang W Z, Qi Y, Wen J G, Li H Y, Zhu G F, Guo J W, Ran Y H, Wang S G, Zhu Z L, Zhou J, Hu X L and Xu Z W. 2013. Heihe watershed allied telemetry experimental research (HiWATER): scientific objectives and experimental design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(8): 1145-1160 [DOI: 10.1175/bams-d12-00154.1]
- Li X, Lu L, Cheng G D and Xiao X L. 2001. Quantifying landscape structure of the Heihe River Basin, north-west China using FRAGSTATS. *Journal of Arid Environments*, 48(4): 521-535 [DOI: 10.1006/jare.2000.0715]
- Liu M, Tang R L, Li Z L, Gao M F and Yao Y J. 2021. Progress of data-driven remotely sensed retrieval methods? and products on land surface evapotranspiration. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(8): 1517-1537 (刘萌, 唐荣林, 李召良, 高懋芳, 姚云军. 2021. 数据驱动的蒸散发遥感反演方法及产品研究进展. *遥感学报*, 25(8): 1517-1537) [DOI: 10.11834/jrs.20211310]
- Liu S M, Li X, Xu Z W, Che T, Xiao Q, Ma M G, Liu Q H, Jin R, Guo J W, Wang L X, Wang W Z, Qi Y, Li H Y, Xu T R, Ran Y H, Hu X L, Shi S J, Zhu Z L, Tan J L, Zhang Y and Ren Z G. 2018. The heihe integrated observatory network: a basin-scale land surface processes observatory in China. *Vadose Zone Journal*, 17(1): 1-21 [DOI: 10.2136/vzj2018.04.0072]
- Liu S M, Xu Z W, Wang W Z, Jia Z Z, Zhu M J, Bai J and Wang J M. 2011. A comparison of eddy-covariance and large aperture scintillometer measurements with respect to the energy balance closure problem. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(4): 1291-1306 [DOI: 10.5194/hess-15-1291-2011]
- Norman J M, Kustas W P and Humes K S. 1995. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 77(3/4): 263-293 [DOI: 10.1016/0168-1923(95)02265-Y]
- Pan X D and Li X. 2011. Validation of WRF model on simulating forcing data for Heihe River Basin. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 3(4): 344-357 [DOI: 10.3724/SP.J.1226.2011.00344]
- Pan X D and Ma H Q. 2019. Near-surface hourly atmospheric driving data at $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ based on WRF model simulation over 2000-2016 years for the Heihe River Basin. *Plateau Meteorology*, 38(1): 206-216 (潘小多, 马瀚青. 2019. 2000-2016年基于WRF模式的 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 黑河流域近地表大气驱动数据. *高原气象*, 38(1): 206-216) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00062]
- Pan X D, Li X, Shi X K, Han X J, Luo L H and Wang L X. 2012. Dynamic downscaling of near-surface air temperature at the basin scale using WRF—a case study in the Heihe River Basin, China. *Frontiers of Earth Science*, 6(3): 314-323 [DOI: 10.1007/s11707-012-0306-2]
- Qi S Z and Luo F. 2007. Environmental degradation problems in the Heihe River Basin, northwest China. *Water and Environment Journal*, 21(2): 142-148 [DOI: 10.1111/j.1747-6593.2006.00059.x]
- Song L S, Bian Z J, Kustas W P, Liu S M, Xiao Q, Nieto H, Xu Z W, Yang Y, Xu T R and Han X J. 2020. Estimation of surface heat fluxes using multi-angular observations of radiative surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 239: 111674 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111674]
- Song L S, Kustas W P, Liu S M, Colaizzi P D, Nieto H, Xu Z W, Ma Y F, Li M S, Xu T R, Agam N, Tolck J A and Evett S R. 2016a. Applications of a thermal-based two-source energy balance model using Priestley-Taylor approach for surface temperature partitioning under advective conditions. *Journal of Hydrology*, 540: 574-587 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.06.034]
- Song L S, Liu S M, Kustas W P, Nieto H, Sun L, Xu Z W, Skaggs T H, Yang Y, Ma M G, Xu T R, Tang X G and Li Q P. 2018. Monitoring and validating spatially and temporally continuous daily evaporation and transpiration at river basin scale. *Remote Sensing of Environment*, 219: 72-88 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.10.002]
- Song L S, Liu S M, Kustas W P, Zhou J, Xu Z W, Xia T and Li M S. 2016b. Application of remote sensing-based two-source energy balance model for mapping field surface fluxes with composite and component surface temperatures. *Agricultural and Forest Meteorology*, 230-231: 8-19 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.01.005]
- Song L S, Liu S M, Xu T R, Xu Z W and Ma Y F. 2017. Soil evaporation and vegetation transpiration: Remotely sensed estimation and validation. *Journal of Remote Sensing*, 21(6): 966-981 (宋立生, 刘绍民, 徐同仁, 徐自为, 马燕飞. 2017. 土壤蒸发和植被蒸腾遥感估算与验证. *遥感学报*, 21(6): 966-981)
- Twine T E, Kustas W P, Norman J M, Cook D R, Houser P R, Meyers T P, Prueger J H, Starks P J and Wesely M L. 2000. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103(3): 279-300 [DOI: 10.1016/S0168-1923(00)00123-4]
- Wan Z M. 2014. New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product. *Remote Sensing of Environment*, 140: 36-45 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.027]
- Wohlfahrt G, Haslwanter A, Hörtnagl L, Jazoni R L, Fenstermaker L F, Arnone III J A and Hammerle A. 2009. On the consequences of the energy imbalance for calculating surface conductance to water vapour. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(9): 1556-1559 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2009.03.015]

- Wu B F, Xing Q, Yan N N, Zhu W W and Zhuang Q F. 2015. A linear relationship between temporal multiband MODIS BRDF and aerodynamic roughness in HiWATER wind gradient data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(3): 507-511 [DOI: 10.1109/lgrs.2014.2348074]
- Xu F N, Wang W Z, Wang J M, Huang C L, Qi Y, Li Y and Ren Z G. 2019. Aggregation of area-averaged evapotranspiration over the Ejina Oasis based on a flux matrix and footprint analysis. *Journal of Hydrology*, 575: 17-30 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.05.011]
- Zhan W F, Chen Y H, Zhou J and Li J. 2011. An algorithm for separating soil and vegetation temperatures with sensors featuring a single thermal channel. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(5): 1796-1809 [DOI: 10.1109/tgrs.2010.2082555]
- Zhang Y, Jia Z Z, Liu S M, Xu Z W, Xu T R, Yao Y J, Ma Y F, Song L S, Li X, Hu X, Wang Z Y, Guo Z X and Zhou J. 2020. Advances in validation of remotely sensed land surface evapotranspiration. *Journal of Remote Sensing(Chinese)*, 24(8): 975-999 (张圆, 贾贞贞, 刘绍民, 徐自为, 徐同仁, 姚云军, 马燕飞, 宋立生, 李相, 胡晓, 王泽宇, 郭枝虾, 周纪. 2020. 遥感估算地表蒸散发真实性检验研究进展. *遥感学报*, 24(8): 975-999) [DOI: 10.11834/jrs.202009099]
- Zhou S, Yu B F, Zhang Y, Huang Y F and Wang G Q. 2018. Water use efficiency and evapotranspiration partitioning for three typical ecosystems in the Heihe River Basin, northwestern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 253-254: 261-273 [DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.02.002]
- Zhu J S, Ren H Z, Ye X, Zeng H, Nie J, Jiang C C and Guo J X. 2021. Ground validation of land surface temperature and surface emissivity from thermal infrared remote sensing data: A review. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(8): 1538-1566 (朱金顺, 任华忠, 叶昕, 曾晖, 聂婧, 蒋晨琛, 郭金鑫. 2021. 热红外遥感地表温度与发射率地面验证进展. *遥感学报*, 25(8): 1538-1566) [DOI: 10.11834/jrs.20211299]

Estimating instantaneous evapotranspiration based on dual-angle thermal infrared observations from Sentinel-3 satellite

XUE Kejia¹, HE Miao¹, BIAN Zunjian², SONG Lisheng¹, XU Yanhao¹, JIANG Hao¹

1. School of Geography Science, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: The Two-Source Energy Balance (TSEB) model is often used in the estimation of surface evapotranspiration which is important for the water resources regulation and utilization especially in arid and semi-arid areas. Using the different model inputs, such as land surface temperature and surface component temperatures (soil and vegetation) which are the key boundary of the TSEB model can vary the model performance in the prediction of evapotranspiration. In this paper, the Land Surface Temperature (LST) at nadir angle and Land Surface Component Temperatures (LSCT) retrieved from dual-angle observations of Sentinel-3 were used to drive the TSEB model in Heihe River Basin. At each site, the ground measurements data including net radiation, soil heat flux, sensible and latent heat fluxes were measured by radiometer, heat-plates, eddy covariance, respectively, and with the representativeness ranges from meters to hundreds of meters. The energy balance closure was enforced in the EC system observations using the Bowen ratio approach. What's more, the large aperture scintillometers were used to measure the sensible heat flux over several kilometers areas to partly solve the mismatch between the model's output and ground measurement.

Then, the outputs including net radiation, soil heat flux, sensible and latent heat fluxes are evaluated using the ground measurements from EC and LAS which have larger source areas over the grassland, cropland and riparian forest landcover types in the Heihe River Basin, respectively. The results showed that both models overestimate the net radiation and latent heat flux with values of mean bias range from 50 to 150 W/m² and from 60 to 130 W/m² when compared with the ground measurements. However, the model performances of the TSEB-PT and TSEB-2T varied over different landcover types. In order to further explore the overestimation in latent heat flux from the two models, we intercompared the spatial pattern of plant transpiration estimated by the two models along with the moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) leaf area index data and the canopy temperature separated by the two models. It informed that the difference of model separated component temperatures mainly lead to the difference outputs of latent heat fluxes between TSEB-PT model and TSEB-2T model. Additionally, the TSEB-PT model mainly overestimated the canopy transpiration especially over the areas with high vegetation fraction coverage in the upstream of Heihe River Basin. This may due to the canopy temperature separated by the TSEB-PT model have lower values when compared with the inputs of canopy temperature in the TSEB-2T model. The lower canopy temperature could lead to lower sensible heat flux values and result in higher latent heat flux which is calculated as a residual in the land surface energy balance equation.

The results showed that the TSEB-PT model has a better performance in the areas with low vegetation fraction coverage such as alpine meadows and riparian forest land cover types. However, the TSEB-2T model performed better in the areas with high vegetation fraction coverage, such as farmland, forest and so on. What's more, as the fraction of vegetation coverage increase, the advantages of the TSEB-2T model are more obvious. The research results can provide water resources managers with more accurate estimates of land surface water consume over difference ecosystem.

Key words: land surface temperature (TSEB-PT), component temperature (TSEB-2T), surface flux, validation

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.42071298); National Undergraduate Training Programs for Innovation and Entrepreneurship (No.202110635053)