

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.04.013

区域遥感双源蒸散发模型研究进展

李 晗, 陈 晗, 黄津辉, 张珈玮, 高俊杰, 蓝至清

(南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350)

摘要:系统回顾了基于热红外地表温度和基于阻抗过程的两类遥感双源蒸散发模型研究进展, 综述了能量平衡模型、特征空间模型和基于阻抗过程模型的优缺点, 提出在未来遥感蒸散发模型的开发过程中, 应注重上述两类双源模型物理机制的结合, 强化机器学习方法的应用, 在基于阻抗过程的蒸散发模型中加强与碳循环的耦合, 进一步开发适用于城市区域的遥感蒸散发模型。

关键词:遥感; 双源蒸散发模型; 能量平衡模型; 特征空间模型; 阻抗过程模型

中图分类号:P426.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)04-0087-08

Research progress on dual-source evapotranspiration models based on regional remote sensing // LI Han, CHEN Han, HUANG Jinhui, ZHANG Jiawei, GAO Junjie, LAN Zhiqing (College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The progress on thermal infrared surface temperature- and impedance process-based remote sensing dual-source evapotranspiration models was systematically reviewed, and advantages and disadvantages of energy balance models, feature space models, and impedance process-based models were mainly introduced. It is proposed that in the future research of remote sensing evapotranspiration models, we should focus on the combination of physical mechanisms of the two types of dual-source models, strengthen the application of machine learning methods, and enhance the coupling with carbon cycle in impedance process-based evapotranspiration models, so as to further develop remote sensing evapotranspiration models applicable to urban areas.

Key words: remote sensing; dual-source evapotranspiration model; energy balance model; feature space model; impedance process model

地表蒸散发过程关联着水、碳及能量交换, 是地表水循环和能量循环的重要组成部分^[1-2]。估算地表蒸散发及其组成(土壤蒸发、植被蒸腾)对于区域水资源调配、农业精准灌溉、植被耗需水量的计算以及研究气候变化对水文和生态的影响具有重要的理论和现实意义^[3-6]。土壤蒸发和植被蒸腾涉及的物理和生物过程相对复杂, 不同地表类型的植被覆盖度和土壤特性的高度异质化导致蒸散量的实测和估算相对困难^[7-10]。近年来, 研究人员结合卫星遥感数据, 开发了用于估算区域乃至全球尺度的蒸散发模型, 这些模型可分为单源模型和双源模型^[11-15]。双源模型相对于单源模型物理机制更为先进, 能够区分土壤蒸发和植被蒸腾, 尤其在植被稀疏地区运算结果精度更高^[16-17]。本文将区域遥感双源模型

归纳为两大类: 一类是通过提取热红外遥感影像中地表温度的热红外遥感蒸散发模型; 另一类是基于冠层阻抗过程反演植被结构参数信息的蒸散发模型。通过综述各类模型的优缺点, 以期蒸散发模型的选择和后续开发提供参考。

1 基于热红外遥感的蒸散发模型

基于热红外遥感的蒸散发模型主要利用热红外传感器观测到的地表温度来估算显热通量, 并将蒸散发量估算为能量平衡的余项, 或者估算蒸发比, 结合可利用总能量得出实际蒸散量。对于双源蒸散发模型, 土壤层和植被层均遵循能量守恒定律, 到达土壤层的净辐射通量由土壤表面潜热通量、土壤显热通量及土壤热通量组成; 到达植被层的净辐射通量由

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0400709); 国家自然科学基金青年基金(42101033); 中国博士后科学基金(2021M691672)

作者简介: 李晗(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事城市蒸散发研究。E-mail: lihan0220@mail.nankai.edu.cn

通信作者: 黄津辉(1969—), 女, 教授, 博士, 主要从事城市水文、生态水文及生态修复研究。E-mail: huangj@nankai.edu.cn

植被冠层潜热通量、植被显热通量组成;土壤蒸发水汽和植被蒸腾水汽在植被冠层处充分混合后扩散到参考高度。

1.1 双源能量平衡模型

双源能量平衡 (two-source energy balance, TSEB) 模型主要包含以下几类:

a. 基于 Priestley-Taylor 公式的双源能量平衡 (two-source energy balance-Priestley-Taylor, TSEB-PT) 模型。Norman 等^[18]对应用在单点尺度的 Shuttleworth-Wallace (S-W) 模型进行改进,提出了第一个基于能量平衡理论的 TSEB-PT 蒸散发模型。该模型将 S-W 模型中 5 个复杂阻抗的计算简化为植被冠层空气动力学阻抗和土壤表面空气动力学阻抗,其主要优势在于:①TSEB-PT 模型框架中充分利用了遥感反演热红外地表温度数据;②将混合像元地表温度分解为土壤表面温度和植被冠层温度提升了土壤蒸发和植被蒸腾计算的可靠性;③仅使用一个热红外数据信息源就可以对组分温度进行分解。通过上述改进后,模型具有较为完整的物理机制,更适合于区域尺度模拟。TSEB-PT 模型使用 Priestley-Taylor 方程估算植被蒸腾量,实现组分温度的准确分解:

$$L_v = \alpha_{PT} f_c \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_{nv} \quad (1)$$

式中: L_v 为植被蒸腾量, W/m^2 ; α_{PT} 为 Priestley-Taylor 系数,当表面完全湿润时, $\alpha_{PT} = 1.26$ ^[19],其他工况取值可参考 Kustas 等^[20-21]的研究; f_c 为植被覆盖率; Δ 为饱和水汽压相对于温度的变化率, Pa/K ; γ 为湿度计算常数, $\gamma = 0.667$ hPa/K ; R_{nv} 为植被冠层净辐射通量, W/m^2 。

b. 地气交换 (atmosphere-land exchange inverse, ALEXI) 模型。Anderson 等^[22]基于 TSEB-PT 模型提出了 ALEXI 模型。该模型添加了新的计算模块,估算了基于时间积分的行星边界层 (planetary boundary layer, PBL) 热能约束区域显热通量,建立了太阳升起 1 ~ 5 h 地表升温速率和辐射温度的关系,并结合地球静止轨道环境业务卫星 (geostationary operational environmental satellites, GOES) 反演的地表温度信息,实现卫星过境时刻地面蒸散量的准确估算。ALEXI 模型存在的问题有:①GOES 卫星仅能观测低纬度地区的高频气象信息;②用时间差分法处理遥感数据导致潜热通量计算误差,影响蒸散量估值;③模型没有确定冠层上方温度边界条件。

c. 分类地气交换 (disaggregated ALEXI, DisALEXI) 模型。在 ALEXI 模型的基础上,

Anderson 等^[23-24]提出了 DisALEXI 模型。该模型有效地考虑了 PBL 对区域热通量估算以及高分辨率和低分辨率遥感图像的影响,获取了高分辨率的感热通量和潜热通量分布,充分利用遥感数据源绘制蒸散量的区域分布。DisALEXI 模型的应用已扩展到碳通量和光合作用效率的估算,是目前唯一的同时基于热红外遥感和阻抗过程的蒸散发模型^[25],模型的弊端在于地表温度、反照率和叶面积指数等数据的不确定性影响蒸散量估值。

d. 内部校准双源能量平衡 (TSEB-a scene-based internal calibration, TSEB-IC) 模型。为了避免 TSEB 模型中地面观测空气温度的输入, Cammalleri 等^[26]提出了 TSEB-IC 模型。模型选择区域完全湿润或者完全由植被覆盖的像元,并使用 Priestley-Taylor 方程估算研究区域的空气温度和蒸散量。但模型无法在非植被生长季使用,并且利用单个像元的空气温度代表整个研究区域的空气温度不可避免产生误差。

e. 斑块模型 (patch model)。在非均匀下垫面情况下,土壤和植被呈现斑块状分布,两者具有相互独立的水汽源,彼此之间没有水汽、能量交换和混合作用。斑块模型的优势在于:①分别计算裸土区域和植被覆盖区域的蒸发量,并根据其面积比例估算空间尺度的蒸散量^[18,27];②模型的土壤层和植被层净辐射通量的计算与上述模型采用相同的方法,在干旱和半干旱地区的植被稀疏区域和农田区域往往具有较高的精度,但不适用于植被覆盖率较高的区域。

其他 TSEB 模型还包括基于地气温差的双源能量平衡模型^[28-29]、简化的双源能量平衡模型^[30]等。目前 TSEB 模型已被广泛应用于流域、区域甚至全球尺度的土壤蒸发量及植被蒸腾量估算,但该模型往往会高估植被蒸腾量和总蒸散量,低估土壤蒸发量。不同遥感图像的分辨率会显著影响模型的估算精度,对于较高分辨率 (30 m、90 m、120 m 等) 的遥感影像, TSEB 模型的预测结果与地面涡动相关的观测更为吻合,模型精度往往较高,而对于较低分辨率 (1 ~ 10 km) 的遥感影像, TSEB 模型的精度会显著下降。

1.2 特征空间模型

在 TSEB 模型中,显热通量的计算需要风速、植被高度、空气温度和湿度、降水量等参数,为了避免双源模型对于观测数据的依赖,尝试在不同植被覆盖率情况下利用热红外地表温度的融合信息获取一些关键的地面参数,如地表湿润情况、植被覆盖及地表温度等,将热红外遥感信息和可见光遥感信息投

影到二维坐标系,从两者构成的散点图中获取地表湿润状况,用于估算区域蒸散量及其组分,这类模型被称为特征空间模型。

特征空间模型的关键在于蒸发比的确定,将蒸发比与净辐射通量、植被冠层净辐射通量和土壤表面净辐射通量相结合,可有效估算区域蒸散量、土壤蒸发量以及植被蒸腾量^[31-34]。在这类模型中,短波遥感数据用于获取植被指数,如归一化植被指数,并确定植被覆盖率,而热红外遥感数据则可以提供地表温度。包含各类植被覆盖率和土壤水分含量的特定研究区域的二维散点图通常呈梯形形状,梯形上边界(干边界)由该区域中地表温度最高的干燥像元构成,理论上定义为完全干燥时的表面温度,对应最小蒸发和蒸腾量;下边界(湿边界)由该区域中地表温度最低的湿润像元构成,理论上定义为完全湿润时的表面温度,对应最大蒸发和蒸腾量。从干边界变化到湿边界表面温度逐渐降低,土壤水分逐渐升高,蒸发和蒸腾量逐渐升高,因此理论上在梯形内部存在逐渐过渡的等值土壤湿度线,位于该线上的点具有相同的地表湿润状况和土壤含水量,且植被冠层温度 T_v 和地表温度 T_s 相同。土壤蒸发比 E_{fs} 的表达式为

$$E_{fs} = \frac{T_{s,max} - T_s}{T_{s,max} - T_a} \cdot \frac{R_{ns} - G}{R_n - G} \quad (2)$$

式中: $T_{s,max}$ 为地表最高温度, K; T_a 为空气温度, K; R_n 为净辐射通量, W/m^2 ; R_{ns} 为土壤表面净辐射通量, W/m^2 ; G 为土壤热通量, W/m^2 。

总蒸发比 E_t 在绝对干边界和绝对湿边界之间线性变换^[14,31],由下式计算:

$$E_t = f_c \frac{R_{nv}}{R_n - G} \cdot \frac{T_{v,max} - T_v}{T_{v,max} - T_a} + (1 - f_c) \frac{R_{ns} - G}{R_n - G} \cdot \frac{T_{s,max} - T_s}{T_{s,max} - T_a} \quad (3)$$

式中: $T_{v,max}$ 为植被冠层最高温度, K。

特征空间模型主要包含以下几类:

a. 混合像元组分排序对比算法(pixel component arranging and comparing algorithm, PCACA) 模型。PCACA 模型^[35]假设植被和附近的土壤具有相同的水分源,但具有不同的能量驱动,因此模型首先对混合像元地表温度和混合像元反照率进行分解,利用组分温度和反照率估算土壤层和植被层的可利用能量,然后基于波文比法构造土壤表面温度-植被覆盖率的梯形特征空间和植被冠层温度-植被覆盖率梯形特征空间,分别计算土壤和植被的波文比,得出土壤和植被潜热通量。PCACA 模型提高了干、湿边界定位的可靠性,但由梯形边界确定理论边界时,像元

数据获取的准确性将直接影响模型精度;利用波文比法分割土壤、植被净辐射通量会导致模型计算的不确定性^[36]。

b. 双源梯形蒸散发模型(two-source trapezoid model for evapotranspiration, TTME)。TTME 基于 TSEB 理论定位了地表温度归一化植被指数 (temperature normalized difference vegetation index, T_m -NDVI) 梯形特征空间的 4 个理论极端像元^[37]。在 TTME 中,假设梯形特征空间的绝对干边界不存在潜热通量,只存在显热通量^[16]。 T_m -NDVI 梯形特征空间干边界可利用能量和空气动力阻抗并耦合地表能量平衡方程确定,因此梯形 4 个顶点被确定为植被覆盖率的两个极端值 (0 和 100%)。Tang 等^[38-39]对 TTME 进行了改进并提出了基于极端像元的土壤和植被能量划分模型,该模型考虑根区和土壤水分随深度和时间的变化,对目标像元的地表总净辐射通量进行分解,再利用土壤净辐射通量和植被净辐射通量分别计算梯形特征空间土壤和植被组分的温度。

c. 基于混合双源模式和梯形状态空间的蒸散发模型(hybrid dual-source scheme and trapezoid framework-based evapotranspiration model, HTEM)。HTEM 使用分层方法定义植被和土壤的可利用能量,并使用斑块模型理论计算土壤层和植被层的潜热通量^[40]。HTEM 中土壤和植被蒸发比的确定也基于 T_m -NDVI 特征空间,并使用与 TTME 相同的理论干湿边界定位方法,类似的模型还有改进的双源蒸散发模型^[41]等。

d. 像元排序对比和分层能量划分(pixel component arranging comparing and layered energy partition, PCALEP) 模型。Chen 等^[42]对 PCACA 模型进行了改进,开发了 PCALEP 模型用于区分大尺度的土壤蒸发量和植被蒸腾量,该模型提出了一种新的梯形上下边界定位算法,实现了对梯形上下边界的自动识别与定位,降低了传统梯形特征空间模型中极端像元选择可能导致的模型不确定性。此外,该模型从机理上规避了复杂的阻抗网络计算,将所有遥感像元的阻抗计算压缩到了 4 个极端像元,克服了阻抗计算对模型结果带来的误差。

上述模型均存在以下共性不足:①极端干湿边界定位不确定性将影响蒸散量反演精度;②没有考虑平流作用,导致蒸散量计算结果被低估;③依赖地面气象要素观测数据。TSEB 模型和特性空间模型原理相对简单,可用于区域和全球尺度的遥感蒸散量模拟。然而,遥感热红外波段经常受到云层遮挡,使得模型很难获得时空连续的蒸散量分布,而基于

阻抗过程的遥感蒸散发模型为区域蒸散量的模拟提供了有效的方案。

2 基于阻抗过程的遥感蒸散发模型

基于阻抗过程的遥感蒸散发模型主要依赖短波遥感获得的植被结构信息来量化叶片气孔导度或利用冠层阻抗估算植被蒸腾量,而叶片气孔导度同时影响植被的光合作用和蒸腾作用。植被冠层结构参数的季节性变化可以从卫星数据中获取,因此该类蒸散发模型通常是地球系统模型的主要选择^[43-44]。与基于地表温度的模型相比,基于阻抗过程的模型优势在于这类模型可以将区域碳循环信息用于蒸散量的辅助计算^[45-46]。基于阻抗过程的遥感蒸散发模型主要有以下几类:

a. Penman-Monteith-MU (PM-MU) 模型。PM-MU 模型^[6,47]改进了 Penman-Monteith (PM) 模型,用水汽压差和温度来约束冠层阻抗计算,根据昼夜地表温度分别计算白天和黑夜的地表蒸散量,两者求和为日蒸散量,并使用互补相关理论估算土壤蒸发量。目前该模型已经被用于估算全球尺度的植被蒸腾量 L_v 和土壤蒸发量 L_s :

$$L_v = \frac{\Delta R_n f_c + \rho C_p D_a / r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_s / r_a)} \quad (4)$$

$$L_s = \left(\frac{R_H}{100} \right)^{\beta} \frac{\Delta [R_n (1 - f_c) - G] + \rho C_p D_a / r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_{tot} / r_a)} \quad (5)$$

式中: C_p 为空气定压比热, $C_p = 1005 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; D_a 为饱和水汽压差,由 T_a 与气压 P 确定, hPa; r_s 为冠层阻抗, s/m; r_a 为空气动力学阻抗, s/m; R_H 为相对湿度, %; β 为经验参数, $\beta = 1000$ ^[21]; ρ 为空气密度,在 20°C 时为 $1.204 \text{ kg}/\text{m}^3$; r_{tot} 为空气动力学和水汽扩散的总阻抗, s/m。PM-MU 模型的不足之处在于土壤蒸发参数化方案里存在大量经验参数计算,并且由相对湿度得到土壤含水率将产生一定的误差。

b. 大叶 PM 蒸散发 (big-leaf PM ET, B-PM-ET) 模型。PM 模型中的关键参数之一是冠层阻抗, B-PM-ET 模型假设冠层为一张大叶,可通过叶片的气孔导度乘以叶面积指数估算冠层阻抗。常见的计算叶片气孔导度的模型有两种,分别是 Jarvis 模型^[48]和 Ball-Woodrow-Barry (BWB) 模型,其中 BWB 模型计算过程中需要联立 Farquhar 方程求解,因此 BWB 模型能将叶片的蒸腾速率与光合作用速率相耦合。B-PM-ET 模型的局限性是将冠层视为大叶时,降低了辐射对光合作用的影响。

c. 双大叶 PM 蒸散发 (two-big-leaf PM ET, TB-

PM-ET) 模型。TB-PM-ET 模型将冠层的叶片分为受阳光照射部分 (阳叶) 和阴影遮盖部分 (阴叶) 两类,阴、阳叶的冠层阻抗计算方法可由对应叶面积指数与叶片气孔导度乘积估算,然后根据 PM 模型依次估算出阴、阳叶的植被蒸腾量,取两者之和为总蒸腾量:

$$r_{\text{sun}} = g_{\text{sun}} I_{A-\text{sun}} \quad (6)$$

$$r_{\text{sh}} = g_{\text{sh}} I_{A-\text{sh}} \quad (7)$$

$$L_v = L_{\text{sun}} + L_{\text{sh}} \quad (8)$$

式中: r_{sun} 为阳叶的冠层阻抗, s/m; g_{sun} 为阳叶气孔导度; $I_{A-\text{sun}}$ 为阳叶的叶面积指数,叶面积计算方法可参考 Chen 等^[49-51]研究; r_{sh} 为阴叶的冠层阻抗, s/m; g_{sh} 为阴叶气孔导度; $I_{A-\text{sh}}$ 为阴叶的叶面积指数; L_{sh} 、 L_{sun} 分别为阴、阳叶的植被蒸腾量, W/m^2 。

d. 双叶 PM 蒸散发 (two-leaf PM ET, T-PM-ET) 模型。该模型认为蒸散量与叶片气孔阻抗或者冠层阻抗呈非线性关系,先根据 PM 模型计算叶片尺度蒸腾量后,再乘以叶面积指数得到冠层尺度总蒸腾量^[52-53]。研究表明 B-PM-ET 模型估算的蒸散量偏差最大, T-PM-ET 模型估算结果偏差最小^[46]。

理论上,基于阻抗过程的模型可应用于各种气候和植被条件,但这些模型对区域和全球尺度的蒸散量计算精度很大程度上取决于从卫星图像中获取的降水和土壤湿度数据的准确性,尽管目前土壤湿度的反演算法得到了显著的改进,但在植被覆盖率较高的区域,土壤湿度的反演精度还不够理想^[54]。对于土壤表面蒸发比相对较大的稀疏植被区域,基于阻抗过程的遥感蒸散发模型会产生较大的误差。

3 研究展望

区域遥感双源蒸散发模型充分利用了从短波遥感到热红外遥感的整个光谱范围内的遥感信息,未来生态系统和城市区域遥感多源蒸散发模型的开发和应用,应关注以下方向:

a. 耦合基于热红外地表温度和基于阻抗过程的遥感蒸散发模型。基于热红外地表温度的蒸散发模型相对简单且容易操作,但是易受到云层遮挡的影响,不能获取时空连续的区域蒸散量分布;基于阻抗过程的遥感蒸散发模型在区域和全球尺度下的蒸散量计算精度受卫星图像获取的降水和土壤湿度数据准确性的影响,因此耦合两类模型将成为区域蒸散发模型的新方向。可从以下 3 个方面开展具体工作:①基于地表能量平衡理论量化冠层表面温度;②在基于阻抗过程的遥感蒸散发模型中进一步完善地表能量平衡的机制;③在不同气候和气象条件下生成时空连续的区域蒸散量分布。

b. 蒸散发模拟中强化机器学习的应用。随着人工智能技术的发展,其已经成功应用于包括生态水文在内的多个领域。研究蒸散发过程需要大量气象参数和土壤、植被参数校准模型,复杂的模型操作过程和大量的输入参数使模型结果产生了较大误差。机器学习模型对输入参数的依赖性较低,模型操作相对简单^[55-56],适合模拟时空连续区域土壤蒸发量和植被蒸腾量。

c. 在基于阻抗过程的遥感蒸散发模型中加强与碳循环的耦合。PM 模型中气孔导度的估算可优先选择 Farquhar 模型,使用 T-PM-ET 模型能够实现水碳循环模型的耦合,更准确地估算区域和全球范围内蒸散量。通过获取高精度的叶面积指数和植被聚集指数,能够提高 T-PM-ET 模型精度。

d. 城市区域遥感蒸散发模型需要进一步开发和优化。目前对于自然生态系统遥感蒸散发模型的研究已经非常完善,而城市作为人类居住生活的主要场所,了解城市区域蒸散量的变化,开发城市区域遥感蒸散发模型有利于为城市景观布局规划、缓解城市热岛效应、改善人居环境舒适度等提供指导^[57-58]。由于城市区域下垫面异质性程度较高,且存在较大面积的不透水区域,同时城市生态系统观测站点数量较少,目前对城市蒸散发模型的研究尚处于起步阶段,未来应关注城市区域的遥感多源模型开发^[59-60]。

4 结 语

基于热红外遥感的蒸散发双源模型可用于区域和全球尺度的遥感蒸散量模拟,其中 TSEB 模型将地表温度分解为土壤表面温度和植被冠层温度,提升了估算蒸散组分的可靠性,但模型存在高估植被蒸腾量和总蒸散量、低估土壤蒸发量的问题,同时遥感分辨率会影响模型估算精度;特征空间模型通过计算蒸发比和净辐射通量估算区域蒸散量,但干湿边界定位不确定性以及没有考虑平流作用会低估蒸散量。基于阻抗过程的遥感蒸散发模型避免了遥感热红外波段易受到云层遮挡的问题,植被冠层阻抗能够表征叶片的蒸腾作用与光合作用,考虑到叶片气孔导度估算的不确定性,模型的预测结果会有偏差。建议未来遥感多源蒸散发模型开发中,加强不同类型模型间的耦合,强化机器学习的应用,在基于阻抗过程的遥感蒸散发模型中加强与碳循环的耦合以及进一步开发城市区域的蒸散发模型。

参考文献:

[1] 刘元波,邱国玉,张宏昇,等. 陆域蒸散的测算理论方

法:回顾与展望[J]. 中国科学:地球科学,2022,52(3):381-399. (LIU Yuanbo, QIU Guoyu, ZHANG Hongsheng, et al. Shifting from homogeneous to heterogeneous surfaces in estimating terrestrial evapotranspiration: review and perspectives[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 52(3):381-399. (in Chinese))

[2] XU L, PIAO S L, HUNTINGFORD C, et al. Partitioning global land evapotranspiration using CMIP5 models constrained by observations[J]. Nature Climate Change, 2018,8(7):640-646.

[3] 王卫光,黄茵,邢万秋,等. 基于 SPEI 的海河流域干旱时空演变特征及环流成因分析[J]. 水资源保护,2020,36(3):8-13. (WANG Weiguang, HUANG Yin, XING Wanqiu, et al. Analysis of spatial and temporal evolution characteristics and circulation causes of drought in Haihe River Basin based on SPEI [J]. Water Resources Protection,2020,36(3):8-13. (in Chinese))

[4] 粟晓玲,梁笋. 关中地区气象水文综合干旱指数及干旱时空特征[J]. 水资源保护,2019,35(4):17-23. (SU Xiaoling, LIANG Zheng. Meteorology-hydrology drought index and spatial and temporal characteristics of drought in Guanzhong area[J]. Water Resources Protection,2019,35(4):17-23. (in Chinese))

[5] 安彬,肖薇薇. 汉江上游流域潜在蒸散量敏感性分析[J]. 水资源保护,2019,35(5):59-65. (AN Bin, XIAO Weiwei. Sensitivity analysis of potential evapotranspiration in upper Hanjiang River Basin [J]. Water Resources Protection,2019,35(5):59-65. (in Chinese))

[6] 陈晗,黄津辉. 中国南方农田蒸散量实测及其影响因素分析[J]. 水资源保护,2017,33(6):79-86. (CHEN Han, HUANG Jinhui. Study on in-situ evapotranspiration measurement and its influential factors in farmland in Southern China[J]. Water Resources Protection,2017,33(6):79-86. (in Chinese))

[7] KOPPA A, DOMINIK R, PETRA H, et al. A deep learning-based hybrid model of global terrestrial evaporation[J]. Nature Communication, 2022, 13(1):1-11.

[8] LI J, PEI Y, ZHAO S, et al. A review of remote sensing for environmental monitoring in China[J]. Remote Sensing, 2020,12(7):1-25.

[9] JUNG M, REICHSTEIN M, CIAISP, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply[J]. Nature,2010,467(7318):951-954.

[10] 陶然,张珂. 基于 PDSI 的 1982—2015 年我国气象干旱特征及时空变化分析[J]. 水资源保护,2020,36(5):50-56. (TAO Ran, ZHANG Ke. PDSI-based analysis of characteristics and spatiotemporal changes of meteorological drought in China from 1982 to 2015 [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5):50-56. (in Chinese))

- Chinese))
- [11] MU Q, ZHAO M, RUNNING S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115 (8): 1781-1800.
 - [12] 温馨,周纪,刘绍民,等. 基于多源产品的西南河流源区地表蒸散发时空特征[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 32-42. (WEN Xin, ZHOU Ji, LIU Shaomin, et al. Spatio-temporal characteristics of surface evapotranspiration in source region of rivers in Southwest China based on multi-source products[J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (3): 32-42. (in Chinese))
 - [13] XIANG K, LI Y, HORTON R, et al. Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration: a review[J]. Agricultural Water Management, 2020, 232: 106043.
 - [14] 高彦春,龙笛. 遥感蒸散发模型研究进展[J]. 遥感学报, 2008, 12(3): 515-528. (GAO Yanchun, LONG Di. Progress in models for estimation using evapotranspiration remotely sensed data [J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(3): 515-528. (in Chinese))
 - [15] 李放,沈彦俊. 地表遥感蒸散发模型研究进展[J]. 资源科学, 2014, 36(7): 1478-1488. (LI Fang, SHEN Yanjun. Progress in remote sensing-based models for surface heat and water fluxes [J]. Resources Science, 2014, 36(7): 1478-1488. (in Chinese))
 - [16] TIMMERMAN W J, KUSTAS W P, ANDERSON M C, et al. An intercomparison of the surface energy balance algorithm for land (SEBAL) and the two-source energy balance (TSEB) modeling schemes[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 108(4): 369-384.
 - [17] CHEN H, HUANG J J, MCBEAN E, et al. Evaluation of alternative two-source remote sensing models in partitioning of land evapotranspiration [J]. Journal of Hydrology, 2021, 597: 126029.
 - [18] NORMAN J M, KUSTAS W P, HUMES K S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 77 (3/4): 263-293.
 - [19] PRIESTLEY C, 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.
 - [20] KUSTAS W P, NORMAN J M. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 94 (1): 13-29.
 - [21] FISHER J B, TU K P, BALDOCCHI D D. Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(3): 901-919.
 - [22] ANDERSON M C, NORMAN J M, MECIKALSKI J R, et al. A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental United States based on thermal remote sensing: 2. surface moisture climatology [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2007, 112(D11): 1-13.
 - [23] ANDERSON M C, NORMAN J M, KUSTAS W P, et al. A thermal-based remote sensing technique for routine mapping of land-surface carbon, water and energy fluxes from field to regional scales [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(12): 4227-4241.
 - [24] RASMUS H, MARTHA C A, JOHN M N, et al. Intercomparison of a ‘bottom-up’ and ‘top-down’ modeling paradigm for estimating carbon and energy fluxes over a variety of vegetative regimes across the U. S. [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149 (12): 1875-1895.
 - [25] CAWSE N K, BRAVERMAN A, KANG E L, et al. Sensitivity and uncertainty quantification for the ECOSTRESS evapotranspiration algorithm-DisALEXI[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2020, 89: 102088.
 - [26] CAMMALLERI M C, ANDERSON M C, CIRAOLO G, et al. Applications of a remote sensing-based two-source energy balance algorithm for mapping surface fluxes without in situ air temperature observation [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 124: 502-515.
 - [27] LHOMME J P, CHEHBOUNI A. Comments on dual-source vegetation-atmosphere transfer models [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1999, 94(3/4): 269-273.
 - [28] NORMAN J M, ANDERSON M C, KUSTAS W P, et al. Remote sensing of surface energy fluxes at 10¹-m pixel resolutions[J]. Water Resources Research, 2003, 39(8): 1-18.
 - [29] NORMAN J M, KUSTAS W P, PRUEGER J H, et al. Surface flux estimation using radiometric temperature: a dual-temperature-difference method to minimize measurement errors[J]. Water Resources Research, 2000, 36(8): 2263-2274.
 - [30] SÁNCHEZ J M, KUSTAS W P, CASELLES V, et al. Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(3): 1130-1143.
 - [31] CARLSON T N, CAPEHART W J, GILLIES R R. A new look at the simplified method for remote sensing of daily evapotranspiration[J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 54(2): 161-167.

- [32] GILLIES R R, KUSTAS W P, HUMES K S. A verification of the 'triangle' method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the normalized difference vegetation index (NDVI) and surface [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(15): 3145-3166.
- [33] SANDHOLT I, RASMUSSEN K, ANDERSEN J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79 (2/3): 213-224.
- [34] NISHIDA K, NEMANI R R, RUNNING S W, et al. An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2003, 108(9): 1-14.
- [35] 张仁华, 孙晓敏, 王伟民, 等. 一种可操作的区域尺度地表通量定量遥感二层模型的物理基础[J]. *中国科学: 地球科学*, 2004(增刊2): 200-216. (ZHANG Renhua, SUN Xiaomin, WANG Weimin, et al. An operational two-layer remote sensing model to estimate surface flux in regional scale: physical background [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2004, 48 (Sup 2): 200-216. (in Chinese))
- [36] 宋立生, 刘绍民, 徐同仁, 等. 土壤蒸发和植被蒸腾遥感估算与验证 [J]. *遥感学报*, 2017, 21(6): 966-981. (SONG Lisheng, LIU Shaomin, XU Tongren, et al. Soil evaporation and vegetation transpiration: remotely sensed estimation and validation [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(6): 966-981. (in Chinese))
- [37] LONG D, SINGH V P. A two-source trapezoid model for evapotranspiration (TME) from satellite imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 121: 370-388.
- [38] TANG R, LI Z. An end-member-based two-source approach for estimating land surface evapotranspiration from remote sensing data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55 (10): 5818-5832.
- [39] 唐荣林, 王晟力, 姜亚珍, 等. 基于地表温度: 植被指数三角/梯形特征空间的地表蒸散发遥感反演综述[J]. *遥感学报*, 2021, 25(1): 65-82. (TANG Ronglin, WANG Shengli, JIANG Yazhen, et al. A review of retrieval of land surface evapotranspiration based on remotely sensed surface temperature versus vegetation index triangular/trapezoidal characteristic space [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2021, 25(1): 65-82. (in Chinese))
- [40] YANG Y, SHANG S. A hybrid dual-source scheme and trapezoid framework-based evapotranspiration model (HTEM) using satellite images: algorithm and model test [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(5): 2284-2300.
- [41] YANG Y M, SU H B, ZHANG R H, et al. An enhanced two-source evapotranspiration model for land (ETEML): algorithm and evaluation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 168: 54-65.
- [42] CHEN H, HUANG J J, BERG A, et al. Development of a trapezoidal framework-based model (PCALEP) for partition of land evapotranspiration [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 589: 124994.
- [43] JIANG C Y, RYU Y, FANG H L, et al. Inconsistencies of interannual variability and trends in long-term satellite leaf area index products [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(10): 4133-4146.
- [44] CHEN J M, JU W M, CIAIS P, et al. Vegetation structural change since 1981 significantly enhanced the terrestrial carbon sink [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1-7.
- [45] ZHANG Y, KONG D, GAN R, et al. Coupled estimation of 500 m and 8-day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002-2017 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 222: 165-182.
- [46] 陈镜明, 柳竞先, 罗翔中. 基于碳水通量耦合原理改进 Penman-Monteith 蒸散发模型 [J]. *大气科学学报*, 2020, 43(1): 59-75. (CHEN Jingming, LIU Jingxian, LUO Xiangzhong. Improving the Penman-Monteith evapotranspiration model based on the coupling principle of carbon and water flux [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2020, 43(1): 59-75. (in Chinese))
- [47] MU Q, HEINSCH F A, ZHAO M, 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.
- [48] RYU Y, BALDOCCHI D D, KOBAYASHI H, et al. Integration of MODIS land and atmosphere products with a coupled-process model to estimate gross primary productivity and evapotranspiration from 1 km to global scales [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2011, 25(4): 1-24.
- [49] CHEN J M, LIU J, CIHLAR J, et al. Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications [J]. *Ecological Modelling*, 1999, 124(2/3): 99-119.
- [50] MYNENI R B, HOFFMAN S, KNYAZIKHIN Y, et al. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1/2): 139-155.
- [51] CHEN J M, MENGES C H, LEBLANC S G. Global mapping of foliage clumping index using multi-angular satellite data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(4): 447-457.
- [52] LUO X, CHEN J M, LIU J, et al. Compare big-leaf, two-big-leaf and two-leaf upscaling schemes for evapotranspiration estimation using coupled carbon water modeling [J]. *Journal of Geophysical Research*

- Biogeosciences,2018,123(1):207-225.
- [53] CHEN J M, LIU J. Evolution of evapotranspiration models using thermal and shortwave remote sensing data [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 237: 111594.
- [54] MIERNECKI M, WIGNERON J P, LOPEZ-BAEZA E, et al. Comparison of SMOS and SMAP soil moisture retrieval approaches using tower-based radiometer data over a vineyard field [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 154: 89-101.
- [55] 刘堃, 何祺胜, 荆琛琳, 等. 基于机器学习的蒸散量插补方法 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2020, 48 (2): 109-115. (LIU Kun, HE Qisheng, JING Chenlin, et al. Gap filling method for evapotranspiration based on machine learning [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (2): 109-115. (in Chinese))
- [56] CHEN H, HUANG J J, MCBEAN E. Partitioning of daily evapotranspiration using a modified Shuttleworth-Wallace model, random forest and support vector regression, for a cabbage farmland [J]. Agricultural Water Management, 2019, 228: 105923.
- [57] MAZROOEI A, REITZ M, WANG D B, et al. Urbanization impacts on evapotranspiration across various spatio-temporal scales [J]. Earth's Future, 2021, 9(8): 1-15.
- [58] SV A, FM B, ADRA, et al. Modeling urban evapotranspiration using remote sensing, flux footprints, and artificial intelligence [J]. Science of the Total Environment, 2021, 786: 147293.
- [59] CHEN H, HUANG J J, SONAM S D, et al. Development of a three-source remote sensing model for estimation of urban evapotranspiration [J]. Advances in Water Resources, 2022, 161: 104126.
- [60] CHEN H, HUANG J J, SONAM S D, et al. Assessing the impact of urbanization on urban evapotranspiration and its components using a novel four-source energy balance model [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 316: 108853.

(收稿日期: 2021-01-04 编辑: 施业)

(上接第 86 页)

- [18] 左其亭, 张志卓, 吴滨滨. 基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价 [J]. 水资源保护, 2020, 36 (2): 1-7. (ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, WU Binbin. Evaluation of water resources carrying capacity of nine provinces in the Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 1-7. (in Chinese))
- [19] 余华茂. 基于 Windows DEA 模型的我国自然灾害应急公共投入绩效研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(7): 39-45. (YU Huamao. Research on my country's natural disaster emergency public investment performance based on Windows DEA model [J]. China Work Safety Science and Technology, 2019, 15 (7): 39-45. (in Chinese))
- [20] 马赛, 封学军, 蒋柳鹏, 等. 基于 DEA-Malmquist 的沿海港口转型升级测度及趋势研究 [J]. 水利经济, 2021, 39 (1): 20-24. (MA Sai, FENG Xuejun, JIANG Liupeng, et al. Measurement and trend of transformation and upgradation of coastal ports based on DEA-Malmquist productivity index [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2021, 39(1): 20-24. (in Chinese))
- [21] 戴晓峰, 王然, 陈方, 等. 中国城市物流蔓延的时空演化特征: 基于 329 个城市的物流用地面板数据 [J]. 地理科学, 2021, 41 (2): 215-222. (JI Xiaofeng, WANG Ran, CHEN Fang, et al. Spatial-temporal evolution characteristics of urban logistics spread based on the logistics land of panel data of 329 cities in China [J]. Geographical Science, 2021, 41 (2): 215-222. (in Chinese))
- [22] FARE R, GROSSKOPF S. A nonparametric cost approach to scale efficiency [J]. Scandinavian Journal of Economics, 1994, 87(4): 594-604.
- [23] 胡妍, 李巍. 区域用水环境经济综合效率及其影响因素: 基于 DEA 和 Malmquist 指数模型 [J]. 中国环境科学, 2016, 36 (4): 1275-1280. (HU Yan, LI Wei. Comprehensive economic efficiency of regional water environment and its influencing factors based on DEA and Malmquist index model [J]. China Environmental Science, 2016, 36(4): 1275-1280. (in Chinese))
- [24] 田泽, 潘晶晶, 任芳容. 基于 DEA 的长江经济带省际水电能源效率评价及提升方向 [J]. 水利经济, 2020, 38 (4): 1-7. (TIAN Ze, PAN Jingjing, REN Fangrong. Evaluation and improvement direction of inter-provincial hydropower energy efficiency in Yangtze River Economic Belt based on DEA [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38(4): 1-7. (in Chinese))
- [25] 陈威, 杜娟, 常建军. 武汉城市群水资源利用效率测度研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27 (6): 1251-1258. (CHEN Wei, DU Juan, CHANG Jianjun. Research on water resources utilization efficiency measurement of Wuhan urban agglomeration [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27 (6): 1251-1258. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-05-25 编辑: 施业)