

DOI: 10.5846/stxb202104080914

尉毓姣, 朱琳, 曹鑫宇, 王文科, 龚建师, 余慧琳, 孟丹. 南京地区蒸散发降尺度研究——基于增强型时空自适应反射融合模型. 生态学报, 2022, 42(15): 6287-6297.

Wei Y J, Zhu L, Cao X Y, Wang W K, Gong J S, Yu H L, Meng D. A downscaling study of evapotranspiration in Nanjing based on the ESTARFM model. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(15): 6287-6297.

南京地区蒸散发降尺度研究 ——基于增强型时空自适应反射融合模型

尉毓姣^{1,2,3}, 朱 琳^{1,2,3,*}, 曹鑫宇^{1,2,3}, 王文科⁴, 龚建师^{5,6}, 余慧琳^{1,2,3}, 孟 丹^{1,2,3}

1 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048

2 城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地, 北京 100048

3 首都师范大学 水资源安全北京实验室, 北京 100048

4 长安大学 水利与环境学院, 西安 710054

5 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京 210016

6 自然资源部流域生态地质过程重点实验室, 南京 210016

摘要: 蒸散发是水文循环的重要组成部分, 获取高时空分辨率的数据能够更加精细化蒸散发的时空变化规律, 对于水资源管理、生态水文过程量化具有重要意义。由于单一传感器反演的蒸散发无法同时具有高空间和高时间分辨率, 以南京地区为例, 首先结合 Landsat-8 遥感影像数据和气象数据, 采用基于能量平衡原理的 SEBS 模型估算日蒸散量。在此基础上, 选取典型区域采用基于增强型时空自适应反射融合模型(ESTARFM)将估算的蒸散发结果与低空间分辨率的 MOD16A2 蒸散发产品数据进行时空融合降尺度研究, 并评价模型的融合精度。结果表明: (1) SEBS 模型估算的蒸散发结果与蒸发皿折算后的数据、MOD16A2 产品数据的平均相对误差分别为 0.14 mm/d 和 0.22 mm/d。 (2) 南京地区蒸散量季节差异明显, 表现为夏季>秋季>冬季; 各区在夏季的日平均蒸散量差异也较大, 六合区蒸散量最大, 秦淮区最小; 另外, 蒸散量分布受土地利用类型的影响, 总体上表现为水域>林地>耕地>草地>其他, 且植被覆盖度较高的区域蒸散量较大。 (3) 基于 ESTARFM 模型融合的蒸散发结果与基于 Landsat-8 遥感影像反演的蒸散发数据在空间分布上具有相似性, 二者相关系数为 0.74。在全球气候变化的背景下, 本研究可为蒸散发数据集时空分辨率的提高提供参考, 同时也能够为南京地区水循环过程和水资源管理研究提供数据支撑。

关键词: 蒸散发; 能量平衡原理的模型(SEBS); 增强型时空自适应反射融合模型(ESTARFM); 时空融合; 降尺度

A downscaling study of evapotranspiration in Nanjing based on the ESTARFM model

WEI Yujiao^{1,2,3}, ZHU Lin^{1,2,3,*}, CAO Xinyu^{1,2,3}, WANG Wenke⁴, GONG Jianshi^{5,6}, YU Huilin^{1,2,3}, MENG Dan^{1,2,3}

1 College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China

2 Base of the State Key Laboratory of Urban Environmental Process and Digital Modeling, Beijing 100048, China

3 Beijing Laboratory of Water Resources Security, Capital Normal University, Beijing 100048, China

4 School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China

5 Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China

6 Key Laboratory of Watershed Eco-Geological Processes, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210016, China

Abstract: Evapotranspiration is an important component of hydrological cycle. Obtaining high spatio-temporal resolution data can refine the spatio-temporal variation features of evapotranspiration, which is of great significance for the management

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190354)

收稿日期: 2021-04-08; 网络出版日期: 2022-04-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lin.zhu@cnu.edu.cn

of water resources and quantification of eco-hydrological processes. Considering the evapotranspiration retrieved by single sensor cannot have both high spatial and high temporal resolution, this paper takes Nanjing as a case area for studying the framework on fusing MOD16A2 evapotranspiration product data with high temporal resolution and the estimated evapotranspiration data from Landsat-8 image with high spatial resolution. First, combined with Landsat-8 remote sensing image data and meteorological data, the SEBS model based on energy balance principle is used to estimate the daily evapotranspiration. Then, the ESTARFM model is applied to perform spatio-temporal fusion downscaling between the estimated evapotranspiration data and MOD16A2 evapotranspiration product data in a selected typical area of 144 square kilometers in Nanjing and the fusion accuracy of the model is evaluated. The results show that: (1) the average relative error between the evapotranspiration result estimated by SEBS model and the converted evaporating pan data is 0.14 mm/d, and the average relative error between the evapotranspiration result estimated by SEBS model and the MOD16A2 product data is 0.22 mm/d. (2) The seasonal difference of evapotranspiration in Nanjing is obvious, with the largest evapotranspiration occurring in summer and the second in autumn. The reason is that the vegetation coverage is the highest in summer with the largest area of leaves. And the temperature and precipitation are higher than that in autumn, which is facilitate to evapotranspiration. Evapotranspiration in winter is the smallest due to the lowest temperature. The daily average evapotranspiration of different administrative regions in summer is quite different, the evapotranspiration in Liuhe District is the largest and that in Qinhuai District is the smallest. The reason for this phenomenon is the different types of land use. As a whole, the evapotranspiration of water is the largest, which is greater than that of forestland and cultivated land. Evapotranspiration values of grassland and other land use type are relatively small. Areas with higher vegetation coverage have higher evapotranspiration. (3) The evapotranspiration result based on the fusion of the ESTARFM model and estimated evapotranspiration data based on the Landsat-8 remote sensing image are spatially similar, and the correlation coefficient between them is 0.74. Under the background of global climate change, this study can not only provide a framework of improving the temporal and spatial resolution of evapotranspiration data set, but also provide data support for studying water cycle process and water resources management in Nanjing.

Key Words: evapotranspiration; Surface Energy Balance System model(SEBS); Enhanced Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model(ESTARFM); spatio-temporal fusion; downscaling

蒸散发是水文循环中自降水到达地面后由液态或固态转化为水汽返回大气的过程,包括水面蒸发、土壤蒸发和植被蒸腾,是陆地水分循环和能量交换的重要组成部分,能够调节全球能量和水量平衡。精确估算蒸散发以及获取高时空分辨率的蒸散发数据对区域乃至全球气候变化、水资源评价和陆地碳水循环具有重要意义^[1-2]。

针对大范围、快速变化的地表信息监测,单一传感器无法满足需求,许多学者针对这一问题,提出了切实可行的遥感数据时空融合技术^[3]。2006年,Gao等人^[4]首次提出 STARFM(Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model)融合算法,开创了遥感数据融合的先河。Yi等人^[5]使用 STARFM 模型对 MODIS 和 ASTER 蒸散发结果进行数据融合,用于获取农田尺度上连续的日蒸散发,发现在非均质农业区融合精度低于均质区域。Yang等人^[6]使用 STARFM 模型融合基于 Landsat 和 MODIS 数据估算的蒸散发,发现精度与仅使用 Landsat 估算的蒸散发相似或略低。STARFM 算法进行遥感数据的融合可以较好的捕捉植被的物候变化,适用于地表覆盖同质的像元,而对于复杂、异质性的地表覆盖,预测效果不佳。Zhu等人^[7]提出增强型时空自适应反射融合模型(Enhanced Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model,ESTARFM),该模型考虑了像元之间的光谱和空间相似性,保留了空间细节,适合复杂地物区域的数据预测。程筱茜等人^[8]利用 ESTARFM 模型模拟了内蒙古红碱淖 1987—2018 年间缺失的 Landsat 影像数据,用于反映水体的变化情况,该模型模拟精度达到 0.95,弥补了 Landsat 数据在时间分辨率上的不足。Zhou等人^[9]利用 ESTARFM 模型对归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index,NDVI)和地表温度(Land Surface Temperature,LST)分别进行融合,用于提高干旱监测的精度,发现预测结果与实际数据的相关系数分别为 0.9 和 0.74。Heimhuber 等人^[10]分别利用 STARFM 和 ESTARFM 模型对 Landsat 影像和 MODIS 影像进行了 8 d 间隔、30 m 分辨率的数据

预测,发现 ESTARFM 结果优于 STARFM,在漫滩地区融合精度最佳。邬明权等人^[3]将 STARFM、ESTARFM 以及统计回归等模型进行对比,发现 ESTARFM 模型的融合精度最高。

目前,对于蒸散发的研究以中国北部地区居多,且研究内容以蒸散发估算、时空特征分析为主,而对于南部地区蒸散发降尺度的研究较少。因此,本文选择南京市为案例区,结合 Landsat-8 遥感影像数据和气象数据,采用基于能量平衡原理的 SEBS(Surface Energy Balance System)模型估算南京市的地表日蒸散量。在此基础上,选取南京市部分区域(400 像元×400 像元,面积 144 km²),采用 ESTARFM 模型将高空间分辨率(30 m)的 Landsat 蒸散发估算结果与高时间分辨率(8 d)的 MOD16A2 产品数据进行时空融合,并评价模型的融合精度。研究结果可为南京市水资源的合理规划提供基础数据。

1 研究区概况

南京市(31°14′—32°37′N,118°22′—119°14′E)位于中国东部、长江下游中部地区,是长三角辐射带动中西部地区发展的国家重要门户城市,总面积 6587 km²。区内四季分明,雨水充沛,多年平均温度为 16.6 ℃(2000—2019 年),年平均降雨量为 1150.8 mm,属亚热带季风湿润气候。长江穿城而过,沿江岸线总长近 200 km,境内共有大小河道 120 条,水域面积占总面积的 11%。南京市是中国重要的农业和商品粮基地之一,植物资源丰富、种类繁多。全市森林覆盖率 27%,建成区绿化覆盖率 45%,人均公共绿地面积 13.7 m²。研究区示意图如图 1 所示。

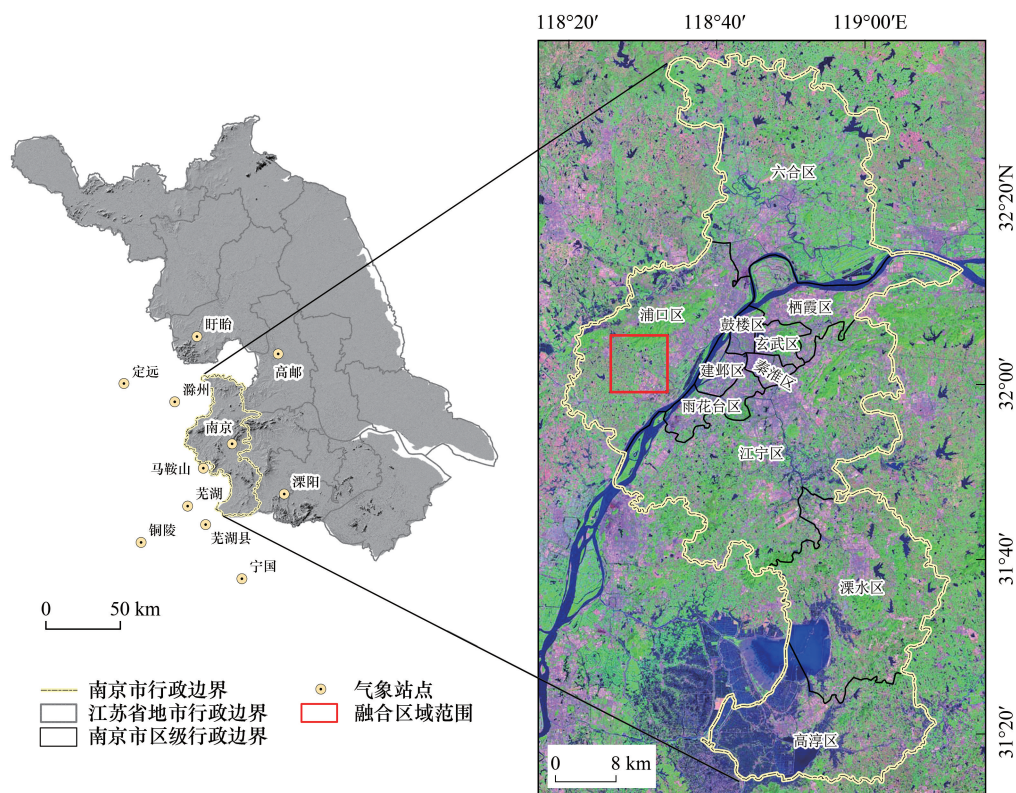


图 1 研究区示意图

Fig.1 Location map of study area

2 数据与研究方法

2.1 数据来源与预处理

本文采用的数据包括遥感影像数据和专题数据,其中专题数据包括:气象数据、土地利用类型数据、数字

高程模型以及 MOD16A2 蒸散发产品数据。

2.1.1 遥感影像数据

由于时空数据融合需要尽量选择日期相同或相近的两种数据源,且融合需要三个时期的数据,本次经过数据筛选后,发现 Landsat-8 遥感影像在 2017 年 7 月 21 日、10 月 9 日和 12 月 12 日数据质量较好(云量小于 2%),且能够与 MOD16A2 蒸散发产品保持日期一致。故选择覆盖南京市的 2017 年 7 月 21 日、10 月 9 日和 12 月 12 日三期 Landsat-8 遥感影像(地理空间数据云: <http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 30 m,时间分辨率为 16 d。在 ENVI 5.3 中对影像数据进行辐射定标、大气校正、图像裁剪等预处理,通过波段运算工具计算归一化植被指数 NDVI、地表比辐射率和反照率参数,采用大气校正法计算地表温度^[11]。

2.1.2 专题数据

(1) 气象数据

气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),选取南京市及周边城市共计 11 个站点的日风速、气温、气压、相对湿度等气象要素,作为 SEBS 模型的输入数据。在 ArcGIS 10.5 中采用反距离加权插值方法将站点数据进行空间插值,得到 30 m 分辨率的栅格数据。

(2) 土地利用类型数据

土地利用类型数据为 2018 年 1 km 空间分辨率的栅格数据,来源于中科院资源环境科学与数据中心网站(<http://www.resdc.cn/Default.aspx>)。原数据包括耕地、林地、草地、水域、居民地和未利用土地 6 个一级类型和 25 个二级类型。在 ArcGIS 10.5 中对二级类型进行合并处理,并将合并结果重分类为耕地、林地、水域、草地和其他五类(表 1),通过裁剪得到南京市土地利用类型图(图 2),其中其他类别主要包括建设用地和未利用土地。

表 1 南京市土地利用类型分类表

Table 1 Classification of land use types in Nanjing

编号 Number	地类 Land use type	一级类型 Primary type	二级编号 Secondary number	二级类型 Secondary type
1	耕地	耕地	11、12	水田、旱地
2	林地	林地	21、22、23、24	有林地、灌木林、疏林地、其他林地
3	草地	草地	31	高覆盖度草地
4	水域	水域	41、42、43、46	河渠、湖泊、水库坑塘、滩地
5	其他	城乡、工矿、居民用地	51、52、53	城镇用地、农村居民点、其他建设用地
		未利用土地	65、66	裸土地、裸岩石质地

(3) 数字高程模型(DEM)

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)为 30 m 空间分辨率的 SRTM 产品,下载于 Google Earth Engine 平台(<https://earthengine.google.com/>),并通过裁剪处理得到南京市 DEM 图。

(4) MOD16A2 蒸散发产品数据

MOD16A2 蒸散发产品数据来源于美国国家航空航天局(NASA)网站(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>),空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 8 d。本次通过 MRT(MODIS Reprojection Tool)工具对 MOD16A2 产品数据进行格式转换、投影转换等预处理,并重采样至 30 m 格网大小,便于后续与基于 Landsat-8 遥感影像反演的蒸散发结果进行融合计算。此外,该产品数据对建设用地、水域、裸地等区域赋值无意义数值,为无效值(<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod16a2v006/>)。为了减少对融合结果的影响,本次采用邻域均值代替无效值,并选取无效值较少的区域(400 像元×400 像元,面积 144 km²)作为后续的融合计算区。

2.2 研究方法

2.2.1 SEBS 模型

2002 年,荷兰学者苏中波^[12]提出基于能量平衡原理的单层模型—SEBS 模型,该模型具有较高的估算精

度和更好的实用价值,目前广泛应用于干旱监测、水资源评价等方面^[13-16]。该模型假设每个像元的显热通量都介于该像元的干限和湿限显热通量之间,一定程度上避免了气象数据空间插值不确定性带来的误差^[17-18]。

SEBS 模型的地表能量平衡方程^[19]为:

$$R_n = G_0 + H + \lambda E \quad (1)$$

式中, R_n 为地表净辐射通量 (W/m^2); G_0 为土壤热通量 (W/m^2); H 为感热通量 (W/m^2); λE 为潜热通量 (W/m^2), 其中 E 为蒸散量 (mm), λ 为水的汽化潜热 ($\text{Wm}^{-2} \text{mm}^{-1}$), 与地表温度 T_s (K) 之间的关系式为^[20]:

$$\lambda = [2.501 - 0.002361 \times (T_s - 273.15)] \times 10^6 \quad (2)$$

(1) 地表净辐射通量 R_n

地表净辐射 (辐射平衡) 指地表向上和向下的总辐射之差, 是地面所获取的净辐射能量^[21]。计算公式为:

$$R_n = (1 - \alpha) R_s + (R_L^\downarrow - R_L^\uparrow) - (1 - \varepsilon) R_L^\downarrow \quad (3)$$

式中, R_n 为地表净辐射通量 (W/m^2); α 为地表反照率, 即地面反射的太阳辐射通量与入射的太阳辐射通量间的比值, 由地表特征和太阳高度角共同决定^[15]; R_s 为入射的短波辐射量 (W/m^2); $R_L^\downarrow$ 为入射的长波辐射量 (W/m^2); $R_L^\uparrow$ 为向外的长波辐射量 (W/m^2); ε 为地表比辐射率, 是指在同一温度下地表发射的辐射量与黑体发射的辐射量比值, 本次使用 Sobrino^[22] 于 2004 年提出的 NDVI 阈值法计算:

$$\varepsilon = 0.004 \times P_v + 0.986 \quad (4)$$

式中, P_v 为植被覆盖度, 公式计算如下:

$$P_v = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{Soil}}}{\text{NDVI}_{\text{Veg}} - \text{NDVI}_{\text{Soil}}} \quad (5)$$

式中, NDVI 为归一化植被指数; $\text{NDVI}_{\text{Soil}}$ 为裸土或无植被覆盖区的 NDVI 值; NDVI_{Veg} 为植被完全覆盖区的 NDVI 值。本次取累计概率为 5% 和 95% 的 NDVI 值作为 $\text{NDVI}_{\text{Soil}}$ 和 NDVI_{Veg} , 对植被覆盖度进行计算^[23]。

(2) 土壤热通量 G_0

土壤热通量是单位面积土壤在单位时间内的热交换量^[24], 是由于传导导致的储存到土壤和植被中的热量的比率^[20], 经验统计公式为:

$$G_0 = \begin{cases} R_n \times \frac{1}{\alpha} \times (T_s - 273.15) \times (0.0032\alpha + 0.0064\alpha^2) (1 - 0.978 \text{NDVI}^4) & \text{植被覆盖} \\ 0.2 \times R_n & \text{裸土} \end{cases} \quad (6)$$

(3) 感热通量 H

感热通量也叫做显热通量, 是指由于温度变化而引起的大气与下垫面之间发生的湍流形式的热交换^[25], 是由地表温度和参考高度的气象参数获取的, 与温度差值成正比^[26], 计算公式为:

$$H = \rho C_p (T_s - T_a) / \gamma_a \quad (7)$$

式中, $\rho = 1.29 (\text{kg}/\text{m}^3)$ 为空气密度; $C_p = 1004 (\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1})$ 为空气定压比热容; T_a 为参考高度的温度 (K); γ_a 为

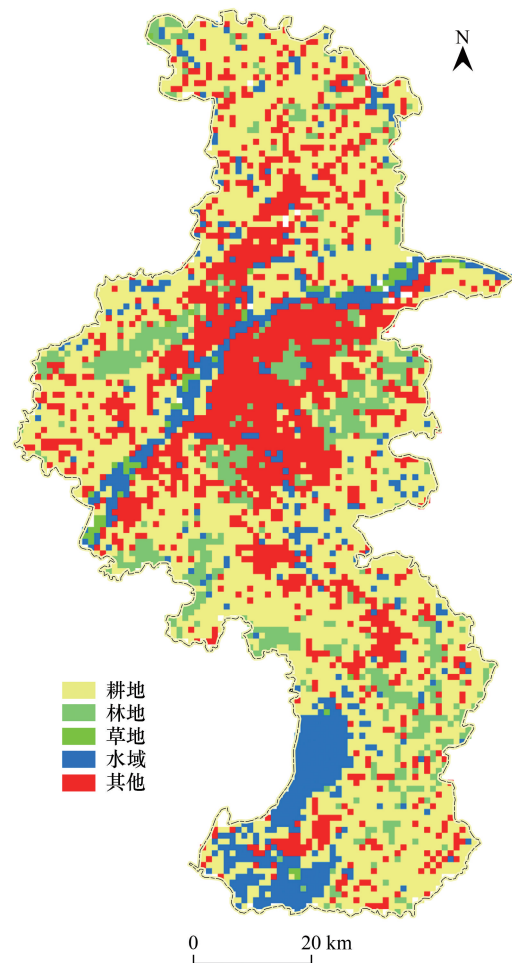


图2 研究区土地利用类型图

Fig.2 Land use type map of the study area

空气动力学阻抗(s/m)。空气动力学阻抗 γ_a 与风速、粗糙度和大气层结构有关,根据大气边界层相似理论,存在以下关系:

$$u = \frac{u_*}{k} \left[\ln \left(\frac{z - d_0}{z_{om}} \right) - \psi_m \left(\frac{z - d_0}{L} \right) + \psi_m \left(\frac{z_{om}}{L} \right) \right] \quad (8)$$

$$T_s - T_a = \frac{H}{k u_* \rho C_p} \left[\ln \left(\frac{z - d_0}{z_{oh}} \right) - \psi_h \left(\frac{z - d_0}{L} \right) + \psi_h \left(\frac{z_{oh}}{L} \right) \right] \quad (9)$$

$$L = \frac{\rho C_p (u_*)^3 T_v}{kgH} \quad (10)$$

式中, u 为风速(m/s); u_* 为磨擦速度(m/s); k 为卡尔曼常数(0.4); z 为参考高度(m); d_0 为平面位移高度(m); ψ_m 和 ψ_h 分别为动力学和热力学传输的稳定度订正函数^[27]; L 为奥布霍夫稳定度长度(m); T_v 为近地表地势虚温(K); g 为重力加速度($9.8m/s^2$); z_{om} 为动力学粗糙长度(m),通过因子 kB^{-1} 确定了陆地表面和大气之间动量交换的高度以及大气相互作用, $kB^{-1} = \ln \frac{z_{om}}{z_{oh}}$ ^[28]; z_{oh} 为地表热传输粗糙长度(m)。

(4) 蒸发比

基于能量平衡公式计算的蒸散发是卫星过境时刻的瞬时值,本文采用恒定蒸发比法将瞬时蒸散发扩展到日蒸散发^[29]。该时间尺度扩展方法简单易用,适用于晴朗或云量保持恒定不变的白天^[30]。计算公式为:

$$EF = \frac{\lambda E}{R_n - G_0} \quad (11)$$

$$ET_{24} = 8.64 \times 10^7 \times EF \times \frac{R_{n24} - G_{024}}{\lambda \rho_w} \quad (12)$$

式中, ET_{24} 为日实际蒸散发量(mm); EF 为蒸发比; R_{n24} 为日净辐射通量(W/m^2); G_{024} 为日土壤热通量(W/m^2); ρ_w 为水的密度。

2.2.2 ESTARFM 时空融合模型

ESTARFM 时空融合模型是对 STARFM 模型的改进,其原理是考虑同一时间同一区域内像元空间和光谱的相似性,依据预测日期前后至少两对高低分辨率影像,以及预测日期当天的一幅低分辨率影像,计算对应像元之间的权重和转换系数,从而模拟出预测日期的高时空分辨率数据^[31]。本次利用待预测时期(2017 年 10 月 9 日)前后两个时期(2017 年 7 月 21 日、12 月 12 日)基于 Landsat-8 遥感影像反演的蒸散发数据和 MOD16A2 产品数据以及待预测时期的 MOD16A2 产品数据,模拟出待预测时期 30 m 的蒸散发数据^[32]。计算公式为^[5]:

$$ET(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p) = T_m ET_m(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p) + T_n ET_n(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p) \quad (13)$$

$$ET_k(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p) = ET_L(x_{w/2}, y_{w/2}, t_k) + \sum_{i=1}^{N'} W_i V_i (ET_M(x_i, y_i, t_p) - ET_M(x_i, y_i, t_k)) \quad (k = m, n) \quad (14)$$

式中, ET 为最终预测时期的蒸散发; t_p 为预测时期; ET_m 为 T_m 时期预测的蒸散发; ET_n 为 T_n 时期预测的蒸散发; ET_L 为基于 Landsat-8 遥感影像反演的蒸散发; ET_M 为 MOD16A2 蒸散发; ET_k 为 T_k 时期预测的蒸散发; $(x_{w/2}, y_{w/2})$ 为中心像元的位置; w 为相似像元搜索窗口; (x_i, y_i) 为第 i 个相似像元的位置; N' 为相似像元的个数; V_i 为转换系数; W_i 为综合权重因子,计算公式如下:

$$W_i = (1/D_i) / \sum_{i=1}^{N'} (1/D_i) \quad (15)$$

$$D_i = (1 - R_i) d_i \quad (16)$$

$$d_i = 1 + \sqrt{(x_{w/2} - x_i)^2 + (y_{w/2} - y_i)^2} / (w/2) \quad (17)$$

式中, d_i 为距离权重; R_i 为光谱相似权重。

T_k 为 T_m 、 T_n 时期的时间权重因子,计算公式为:

$$T_k = \frac{1 / \left| \sum_{j=1}^w \sum_{i=1}^w ET_M(x_i, y_j, t_k) - \sum_{j=1}^w \sum_{i=1}^w ET_M(x_i, y_j, t_p) \right|}{\sum_{k=m,n} (1 / \left| \sum_{j=1}^w \sum_{i=1}^w ET_M(x_i, y_j, t_k) - \sum_{j=1}^w \sum_{i=1}^w ET_M(x_i, y_j, t_p) \right|)} \quad (k = m, n) \quad (18)$$

3 结果与分析

3.1 SEBS 模型结果验证

以往研究利用通量站数据、蒸发皿观测数据或 P-M 公式计算的潜在蒸散发量与蒸散发模型估算的结果进行对比验证,以证明结果的合理性^[33–35]。因未收集到通量站实测数据,本文采用南京市气象站点 (31°55'N, 118°54'E) 在 3 个研究时期的蒸发皿折算数据以及 MOD16A2 产品数据进行 SEBS 模型 30 m Landsat 蒸散发估算结果的验证。由于蒸发皿实测数据为水面蒸发,本次参考相关文献确定该研究区水面蒸发的折算系数^[36–37],将水面蒸发转化为实际蒸发后与 SEBS 模型结果进行对比。统计结果如表 2 所示,模型估算结果与蒸发皿折算数据的平均相对误差为 0.14 mm/d,与 MOD16A2 产品数据的平均相对误差为 0.22 mm/d。三者变化趋势相同,并与已有研究^[38–39]的蒸散发验证结果的表现规律一致,可认为 SEBS 模型的估算结果合理。

表 2 SEBS 模型计算结果与蒸发皿折算数据、MOD16A2 产品数据结果对比

Table 2 Comparison of calculation results of SEBS model with the converted evaporating pan data and MOD16A2 product data

日期 Date	SEBS 模型结果 Results of the surface energy balance system model /mm	蒸发皿折算数据 Converted evaporating pan data /mm	MOD16A2 产品 MOD16A2 product /mm
7 月 21 日 July 21th	5.70	5.02	4.45
10 月 9 日 October 9th	3.29	2.66	2.80
12 月 12 日 December 12th	1.34	1.27	1.10

3.2 SEBS 模型估算的蒸散发时空特征

研究区 3 个不同时期的日蒸散量空间分布如图 3 所示,7 月 21 日平均蒸散量为 7 mm,最大值为 10 mm;

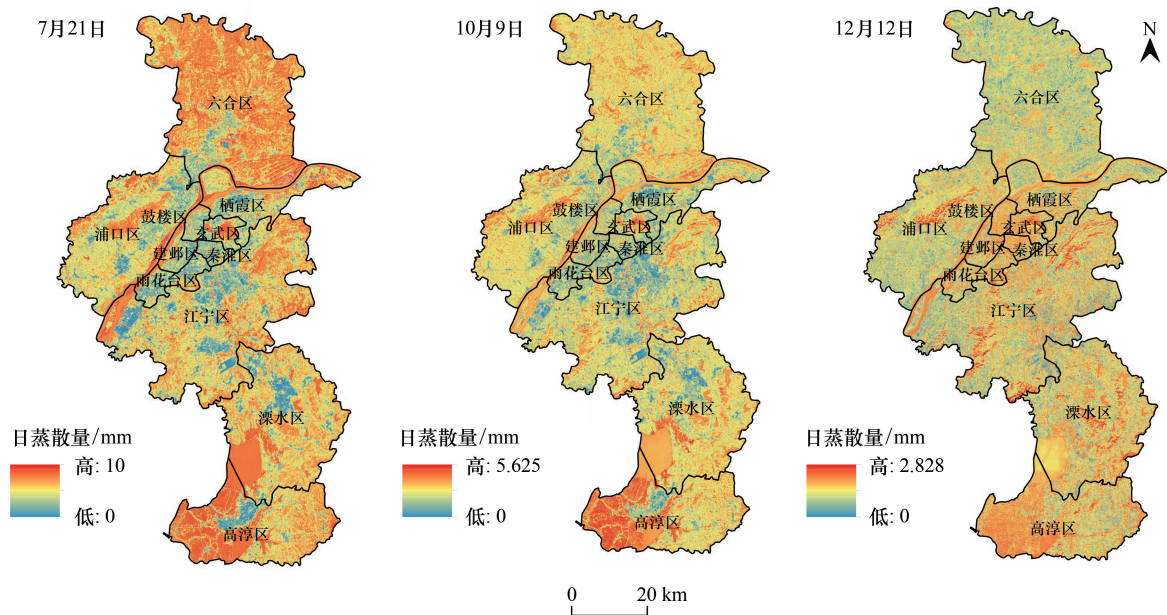


图 3 研究区日蒸散量空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of daily evapotranspiration in the study area

10月9日平均蒸散量为3.9 mm,最大值为5.6 mm;12月12日平均蒸散量为1.1 mm,最大值仅为2.8 mm。由此得出,蒸散量在季节上差异较大,呈现夏季>秋季>冬季的变化规律。7月21日为植被的生长季中期,气温高,降水充沛,日照时间长,植被生长比较旺盛,尤其是农田水分灌溉充足,植被覆盖度高,蒸腾量增加等都是导致该时间蒸散量较高的原因。10月9日为植被的生长季末期,气温降低,降水减少,气候已发生明显变化,并且农田水分灌溉减少,植被覆盖度降低,因而蒸散量有所降低。12月12日正值冬季,气温较低从而导致蒸散量很低。

在空间上,南京市各区在7月21日的平均蒸散量差异较大,最大为六合区的7.7 mm,最小为秦淮区的5.4 mm。六合区耕地面积626km²,水域面积202km²,植被蒸腾量和水面蒸发量在夏季都比较大,所以该地区蒸散量最大。秦淮区属于城市中心区域,只有少部分自然河、人工河错落和极少的城市绿地分布,蒸散量最小。

为了进一步分析研究区不同土地利用类型的蒸散发差异,选取特征最为明显的7月21日的蒸散发结果,将土地利用与Landsat蒸散发数据进行叠加并分区统计,得到研究区不同土地利用类型的蒸散量。由表3可知,南京市不同土地利用类型的蒸散量大小为:水域>林地>耕地>草地>其他。水域是蒸散量最高的地物类型,因其水量充足,水面蒸发量最大;林地具有涵养水源的能力及较高的植被蒸腾,虽然面积占整个南京市面积的比例不大,但蒸散量较高;耕地面积最大,约占南京市总面积的51%,并且南部高淳区分布大量水田,夏季较高的气温、充足的灌溉条件等使得耕地蒸散量较高。

表3 研究区7月21日各土地利用类型平均蒸散量统计

Table 3 Statistics of average evapotranspiration of each land use type in the study area on July 21th

土地利用类型 Land use type	面积 Area /km ²	占总面积的比例 Percentage of total area/%	平均蒸散量 Average evapotranspiration/mm
耕地 Cultivated land	3440.8	50.7	7.5
林地 Forestland	649.7	9.6	8.1
水域 Water	692.4	10.2	8.4
草地 Grassland	55.7	0.8	7.3
其他 Other	1950.5	28.7	6.6

3.3 ESTARFM 模型结果及精度评价

本次输入ESTARFM模型的初始数据为2017年7月21日、12月12日的两组Landsat、MOD16A2数据以及预测时期10月9日的MOD16A2数据,以此融合预测10月9日的Landsat蒸散发数据,融合区域范围见图1。

图4为融合区10月9日基于ESTARFM模型的融合结果与基于Landsat-8遥感影像反演的蒸散发结果,图中亮白色代表蒸散发较高,为植被覆盖度较高的区域;黑灰色代表蒸散发较低,主要为其他类型的地物。经统计,融合结果最大值为5.8 mm,最小值为0 mm,平均值为4 mm;Landsat蒸散发结果最大值为5.5 mm,最小值为0 mm,平均值为3.6 mm。整体上看,融合结果数值偏高,但二者在空间分布上具有一定的相似性。为了进一步度量时空融合模型的预测结果精度,本次选择融合区域内均匀分布的10000个验证点,并计算二者的相关系数。图中(图5)散点分布在1:1线附近,相关系数为0.74,表明基于ESTARFM模型融合的高分辨率蒸散发结果可靠。

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 SEBS 模型的不确定性分析

本文利用Landsat-8遥感影像数据进行地表参数的反演,采用SEBS模型估算地表日蒸散量。研究结果经过多种方法的验证,表明SEBS模型估算的蒸散发具有合理性。但是模型本身会受到输入气象要素与地表

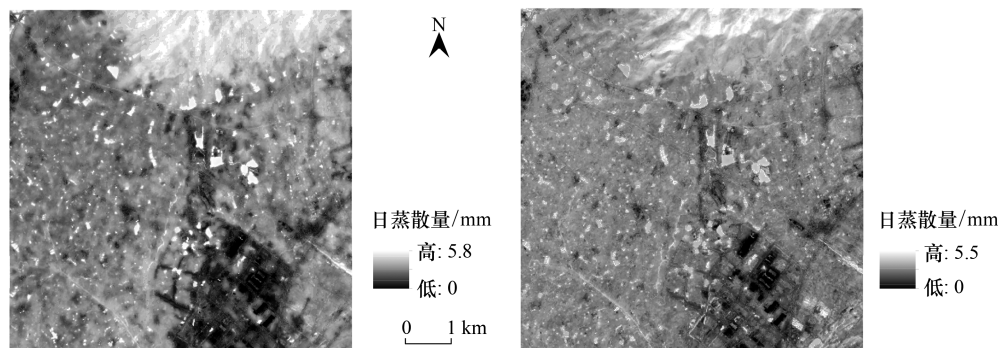


图 4 融合结果与 Landsat 蒸散发对比

Fig.4 Comparison of fusion result and Landsat evapotranspiration

参数精度的影响,带来模型反演结果的不确定性。因此,保证模型输入参数的准确性对于提高模型的精度极其重要。同时,受地面通量站实测数据的限制,精度验证的结果受到了一定的制约,获取充足的蒸散发实测验证数据是需要进一步解决的问题。此外,基于地表能量平衡的蒸散发模型分为单层模型和双层模型,其中单层模型又称为大叶模型,把地表视为一张大叶与外界进行水分和能量的交换,在下垫面均匀的陆面反演蒸散发的精度较高。本文采用的 SEBS 模型是单层模型的典型代表,虽然应用较为广泛,但实际上研究区下垫面并非单一均匀组成,这在一定程度上也会对反演结果造成误差。而双层模型是单层模型的延伸,能够定量描述陆面非均匀性对地表通量的影响,分别获得土壤蒸发和植被蒸腾^[40-41]。故在后续研究中将考虑下垫面异质性问题,采用特征空间的双层蒸散模型进行区域蒸散发反演方面的研究。

4.1.2 ESTARFM 模型的不确定性分析

本文采用 ESTARFM 模型进行蒸散发产品数据的时空融合,研究结果表明,该模型可以有效地进行数据时空降尺度。为了进一步讨论融合结果的质量,将融合区土地利用分别与 ESTARFM 模型融合结果和 Landsat 蒸散发估算结果进行叠加并分区统计,分析二者在土地利用类型上的蒸散发差异。融合区不同土地利用类型在 10 月 9 日的平均蒸散量统计结果如表 4 所示,由于融合区域范围小,没有涉及草地这一地物类型,故没有做相应的统计。由表可以看出,二者均呈现水域>林地>耕地>其他的特点。ESTARFM 模型融合结果与基于 Landsat-8 遥感影像反演的蒸散发结果的土地利用蒸散量差异在 0.2—0.4 mm 之间,其中,差异最大的土地利用类型为其他类型和水域,这可能与 MOD16A2 产品本身在建设用地、水域、裸地等区域存在无效值有关。由此可见,输入 ESTARFM 模型的遥感数据质量对融合结果的质量会产生直接影响。

本次采用的 Landsat-8 遥感影像为 2017 年 7 月 21 日、10 月 9 日和 12 月 12 日三期,长时间间隔对融合结果会产生一定的影响。此外,融合结果会受到模型本身参数的影响,导致相似像元的选取会产生一定的误差,使模型存在一定的不确定性。本次只针对小部分区域进行了时空数据融合降尺度研究,在后续的工作中可以尝试将该模型应用到更大的尺度上,并且尽量选择同一季节、质量更好的产品数据进行融合,为获取长时间序

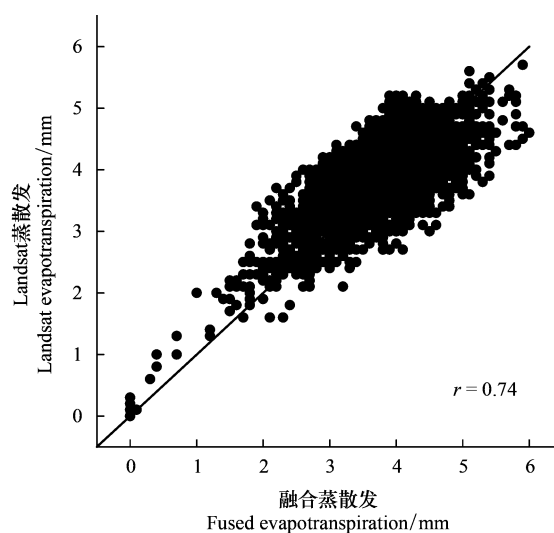


图 5 Landsat 蒸散发与融合结果相关性分析

Fig.5 Correlation analysis between Landsat evapotranspiration and fusion result

列的蒸散发数据集提供数据保证,这也是未来进一步研究的方向。

表 4 融合区 10 月 9 日土地利用类型平均蒸散量统计

Table 4 Statistics of average evapotranspiration of land use types on October 9th in the fusion area

土地利用类型 Land use type	Landsat 蒸散发 Landsat evapotranspiration /mm	融合蒸散发 Fused evapotranspiration /mm
耕地 Cultivated land	3.7	4.0
林地 Forestland	4.1	4.3
水域 Water	4.2	4.6
其他 Other	3.5	3.9

4.2 结论

本文基于 Landsat-8 遥感影像数据和气象数据采用 SEBS 模型进行南京市地表日蒸散发的估算,分析蒸散发的时空分布特征及不同地物类型的差异。在此基础上,采用 ESTARFM 模型融合 Landsat 蒸散发数据与 MOD16A2 蒸散发产品数据,进行时空降尺度研究。主要结论如下:

(1)采用蒸发皿折算后的数据与 MOD16A2 产品数据进行 SEBS 模型估算结果的精度评价,平均相对误差分别为 0.14 mm/d 和 0.22 mm/d,表明使用该模型进行该研究区蒸散发估算的结果合理。

(2)南京市蒸散量季节差异明显,夏季蒸散量最大,冬季最小;各区在夏季的日平均蒸散量差异较大,六合区蒸散量最大,秦淮区最小;从土地利用类型上看,日平均蒸散量差异也较大,呈现水域>林地>耕地>草地>其他的特点。

(3)基于 ESTARFM 模型融合的蒸散发与基于 Landsat-8 遥感影像反演的蒸散发相比,数值偏高,但二者在空间分布上具有相似性,相关系数为 0.74,融合结果可靠。对于不同的土地利用类型,受产品数据本身无效值的影响,融合效果差异最大的为其他类型和水域。

参考文献(References):

- [1] Yang Y, Sun H W, Xue J, Liu Y, Liu L H, Yan D, Gui D W. Estimating evapotranspiration by coupling Bayesian model averaging methods with machine learning algorithms. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 193(3): 156.
- [2] 邓兴耀, 刘洋, 刘志辉, 姚俊强. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征. *生态学报*, 2017, 37(9): 2994-3008.
- [3] 郭明权, 牛铮, 王长耀. 多源遥感数据时空融合模型应用分析. *地球信息科学学报*, 2014, 16(5): 776-783.
- [4] Gao F, Masek J, Schwaller M, Hall F. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance; predicting daily Landsat surface reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(8): 2207-2218.
- [5] Yi Z Y, Zhao H L, Jiang Y Z. Continuous daily evapotranspiration estimation at the field-scale over heterogeneous agricultural areas by fusing ASTER and MODIS data. *Remote Sensing*, 2018, 10(11): 1694.
- [6] Yang Y, Anderson M C, Gao F, Hain C R, Semmens K A, Kustas W P, Noormets A, Wynne R H, Thomas V A, Sun G. Daily Landsat-scale evapotranspiration estimation over a forested landscape in North Carolina, USA, using multi-satellite data fusion. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(2): 1017-1037.
- [7] Zhu X L, Chen J, Gao F, Chen X H, Masek J G. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(11): 2610-2623.
- [8] 程筱茜, 洪友堂, 陈劲松, 叶宝莹. 基于 ESTARFM 的内陆湖泊遥感动态变化监测. *国土资源遥感*, 2020, 32(3): 183-190.
- [9] Zhou X J, Wang P X, Tansey K, Zhang S Y, Li H M, Wang L. Developing a fused vegetation temperature condition index for drought monitoring at field scales using Sentinel-2 and MODIS imagery. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 168: 105144.
- [10] Heimhuber V, Tulbure M G, Broich M. Addressing spatio-temporal resolution constraints in Landsat and MODIS-based mapping of large-scale floodplain inundation dynamics. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 211: 307-320.
- [11] 邓书斌. ENVI 遥感图像处理方法. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [12] Su Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Science*, 2002, 6(1): 85-100.
- [13] 何延波, 王石立. 遥感数据支持下不同地表覆盖的区域蒸散. *应用生态学报*, 2007, 18(2): 288-296.

- [14] 奚歌, 刘绍民, 贾立. 黄河三角洲湿地蒸散量与典型植被的生态需水量. 生态学报, 2008, 28(11): 5356-5369.
- [15] 齐斐斐, 刘永强, 买买提艾力·买买提依明, 杨帆, 霍文, 杨兴华, 何清. SEBS 模型在塔克拉玛干沙漠地区地表能量通量估算中的应用. 干旱区资源与环境, 2019, 33(7): 128-133.
- [16] Yu D Y, Li X Y, Cao Q, Hao R F, Qiao J M. Impacts of climate variability and landscape pattern change on evapotranspiration in a grassland landscape mosaic. Hydrological Processes, 2020, 34(4): 1035-1051.
- [17] 张荣华, 杜君平, 孙睿. 区域蒸散发遥感估算方法及验证综述. 地球科学进展, 2012, 27(12): 1295-1307.
- [18] 冯景泽, 王忠静. 遥感蒸散发模型研究进展综述. 水利学报, 2012, 43(8): 914-925.
- [19] 金学杰, 周剑. 基于 SEBS 模型和 Landsat8 数据的黑河下游蒸散发时空特性分析. 冰川冻土, 2017, 39(3): 572-582.
- [20] 李旭亮, 杨礼箫, 胥学峰, 田伟, 贺缠生. 基于 SEBAL 模型的西北农牧交错带生长季蒸散发估算及变化特征分析. 生态学报, 2020, 40(7): 2175-2185.
- [21] 于贵瑞, 孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [22] Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. Remote Sensing of Environment, 2004, 90(4): 434-440.
- [23] 刘家琰, 谢宗强, 申国珍, 樊大勇, 熊高明, 赵常明, 周友兵, 徐文婷. 基于 SPOT-VEGETATION 数据的神农架林区 1998—2013 年植被覆盖度格局变化. 生态学报, 2018, 38(11): 3961-3969.
- [24] 李庆敏. 基于 SEBS 模型的地表蒸散发估算研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
- [25] Kader B A, Yaglom A M. Mean fields and fluctuation moments in unstably stratified turbulent boundary layers. Journal of Fluid Mechanics, 1990, 212: 637-662.
- [26] 赵丽芳, 沈占锋, 李春明, 邵丽静, 郭明, 孙源, 彭嫚. 地表净辐射通量观测、模拟和同化的研究进展. 遥感学报, 2019, 23(1): 24-36.
- [27] Brutsaert W. Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications. Dordrecht: Reidel, 1982.
- [28] Jia L, Xi G, Liu S, Huang C, Yan Y, Liu G. Regional estimation of daily to annual regional evapotranspiration with MODIS data in the Yellow River Delta wetland. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13(10): 1775-1787.
- [29] 刘素华, 田静, 米素娟. 遥感估算蒸散发量的日尺度扩展方法综述. 国土资源遥感, 2016, 28(4): 10-17.
- [30] Zhang L, Lemeur R. Evaluation of daily evapotranspiration estimates from instantaneous measurements. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 74(1/2): 139-154.
- [31] 陈啟英, 安裕伦, 奚世军. 喀斯特高原区多源遥感数据时空融合模型适用性分析. 科学技术与工程, 2020, 20(16): 6538-6546.
- [32] 白亮亮, 蔡甲冰, 刘钰, 陈鹤, 张宝忠, 黄凌旭. 基于数据融合算法的灌区蒸散发空间降尺度研究. 农业机械学报, 2017, 48(4): 215-223.
- [33] 焦丹丹, 吉喜斌, 金博文, 赵丽雯, 张靖琳, 郭飞. 西北干旱区河西走廊荒漠绿洲土地覆盖类型与蒸散的关系研究——基于 Landsat 8 和 ZY3 数据融合. 生态学报, 2019, 39(19): 7097-7109.
- [34] 刘曼晴, 胡德勇, 于琛, 王莎莎. 辽河三角洲湿地生长季蒸散量时空格局及影响因素. 生态学报, 2020, 40(2): 701-710.
- [35] 席丹, 王文科, 赵明, 马稚桐, 侯昕悦, 张在勇. 玛纳斯河流域山前平原区蒸散发时空异质性分析. 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 25-34.
- [36] 任芝花, 黎明琴, 张纬敏. 小型蒸发器对 E-601B 蒸发器的折算系数. 应用气象学报, 2002, 13(4): 508-514.
- [37] 褚荣浩, 申双和, 李萌, 沙修竹, 陶苏林, 高苹. 小型与 E-601 型蒸发器蒸发量对比分析及其折算系数——以江苏省为例. 气象科学, 2018, 38(2): 247-257.
- [38] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 中国西北地区蒸发散量计算的遥感研究. 地理学报, 2001, 56(3): 261-268.
- [39] 张圆, 郑江华, 刘志辉, 姚俊强. 基于 Landsat8 遥感影像和 SEBS 模型的呼图壁县蒸散量时空格局分析. 生态科学, 2016, 35(2): 26-32.
- [40] 刘钰, 彭致功. 区域蒸散发监测与估算方法研究综述. 中国水利水电科学研究院学报, 2009, 7(2): 96-104.
- [41] 李放, 沈彦俊. 地表遥感蒸散发模型研究进展. 资源科学, 2014, 36(7): 1478-1488.