

DOI: 10.5846/stxb201901100089

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.

Li X L, Yang L X, Xu X F, Tian W, He C S. Analysis of evapotranspiration pattern by SEBAL model during the growing season in the agro-pastoral ecotone in Northwest China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(7): 2175-2185.

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

李旭亮¹, 杨礼箫¹, 胥学峰¹, 田伟¹, 贺缠生^{1,2,*}

¹ 兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室, 旱区流域科学与水资源研究中心, 兰州 730000

² 美国西密歇根大学地理系, 美国密歇根卡拉马祖 49008

摘要: 蒸散发是土壤-植被-大气系统中水循环和能量交换的主要组成部分, 准确估算区域蒸散发对农业用水调度与水资源的管理至关重要。利用 MODIS 数据产品结合地面气象站的观测资料, 基于能量平衡原理建立的 SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) 模型对西北农牧交错带 2015 年生长季 (4—10 月) 的地表蒸散发量进行反演研究, 并用 Penman-Monteith (P-M) 公式结合作物系数对模型的估算结果进行对比, 结果表明: SEBAL 模型估算结果与 P-M 公式之间的平均绝对误差为 0.79mm/d, 均方根误差为 0.94mm/d, $R^2 = 0.76$, 整体反演值偏高, 但基本能满足本地区的研究需求。生长季区域日均蒸散发的变化范围为 0.12—10.66mm/d, 日蒸散量均值为 4.31mm/d, 呈东北、西南部较高, 西部偏低的空间分布特征。将蒸散发估算值与地表特征参数统计分析发现蒸散发与 NDVI 和地表净辐射之间呈正相关, 与地表温度和地表反照率之间呈负相关; 不同土地利用/覆被类型的日蒸散发量由大到小依次为: 耕地、林地、未利用地与草地。

关键词: 西北农牧交错带; 蒸散发; SEBAL 模型; MODIS 数据; 时空格局

Analysis of evapotranspiration pattern by SEBAL model during the growing season in the agro-pastoral ecotone in Northwest China

LI Xuliang¹, YANG Lixiao¹, XU Xuefeng¹, TIAN Wei¹, HE Chansheng^{1,2,*}

¹ Center for Dryland Water Resources Research and Watershed Science, Ministry of Education Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

² Department of Geography, Western Michigan University, Kalamazoo, MI 49008, USA

Abstract: Evapotranspiration (*ET*) is the major component of water cycle and energy balance in the soil-vegetation-atmosphere system. Accurate estimation of regional *ET* is crucial to agricultural water allocation and water resources management. Combining the MODIS data and the meteorological observations from national weather stations, this paper used the SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) model of energy balance theory to estimate the *ET* pattern of agro-pastoral ecotone in Northwest China during the growing season in 2015 (April to October). The Penman-Monteith formula (P-M), together with the crop coefficients, was used to compare the *ET* results by the SEBAL model. The results show that the average absolute error between the SEBAL and the P-M *ET* values is 0.79mm/d, the root mean square error (RMSE) is 0.94mm/d, and $R^2 = 0.76$. While slightly higher than the actual *ET* values, the SEBAL estimated *ET* values reasonably represent *ET* pattern in the study region. The range of daily average *ET* is 0.12—10.66mm/d, and the average daily *ET* is 4.31mm/d during the growing season. Spatially, the *ET* is higher in the southeastern and northeastern areas and

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41530752, 91125010)

收稿日期: 2019-01-10; 网络出版日期: 2019-12-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cshe@lzu.edu.cn

lower in the western area of the study region. Statistical analysis of the *ET* and land surface parameters shows a significant positive correlation between the *ET* and NDVI and net radiation, and a negative correlation with the surface temperature and surface albedo. The daily *ET* values display a decreasing order with the following land use/cover types: cultivated land>forest land>unutilized land >grassland.

Key Words: agro-pastoral ecotone in Northwest China; evapotranspiration; SEBAL model; MODIS data; spatial-temporal pattern

蒸散发 (Evapotranspiration, *ET*) 包括土壤、水面蒸发和植被蒸腾, 是土壤-植被-大气系统中水循环和能量交换的重要组成部分, 全球约有 60% 以上的降水通过陆地蒸散发重返大气^[1], 农田系统中大约有 99% 的水用于蒸发和蒸腾, 农田和牧场的蒸散发量占陆地总蒸散发量的三分之一左右^[2]。在全球水资源日益匮乏的情况下, 准确估算蒸散发不仅对全球气候演变、环境问题以及水资源的评价等理论研究具有重要意义, 而且对于指导农业的排水与灌溉、监测农业旱情、提高农业水资源的利用率等方面的现实意义也十分重大^[3]。传统的蒸散发观测手段, 如蒸渗仪法、涡度相关仪法、大孔径闪烁通量仪法等可较准确的获得特定地点的蒸散发量, 但这些方法不仅需要复杂而精密的仪器, 且成本高, 耗时长, 仅能提供特定位置蒸散发的“点”值信息^[4], 其区域尺度的应用受到了限制, 而遥感影像真实的记录了蒸散过程发生时的地表状况, 同时可将点测资料延拓到区域, 克服了传统站点观测手段不能反映蒸散发空间变异性的缺点, 解决了很多因地域原因而缺乏实测气象水文资料带来的估算问题^[5]。过去几十年里, 基于遥感数据建立了一系列的蒸散发遥感估算模型, 如: TSEB (Two Source Energy Balance) 模型^[6]、SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) 模型^[7]、S-SEBI (Simplified Surface Energy Balance Index) 模型^[8]、SEBS (Surface Energy Balance System) 模型^[9]、METRIC (Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration) 模型^[10]、Ts-VI 三角 (surface temperature-vegetation index triangle method) 模型^[11]、基于 Penman-Monteith 公式改进的 MODIS-ET 模型^[12] 及将能量余项法与 P-M 公式相结合的 ETwatch 模型^[13] 等, 其中 SEBAL 模型物理概念较为清楚、所需气象数据较少、数据获取比较容易、反演精度高而且普遍适用于各种气候条件等优点, 成为目前最常用的反演蒸散发的遥感方法之一^[7], 现已在多个国家各种农业气候条件下的蒸散发估测均取得了良好的模拟效果。近年来, 利用 SEBAL 模型已在我国的干旱流域如: 萨拉沁河流域^[14]、塔里木河干流^[15]、疏勒河流域^[16] 和生态脆弱地区如: 湿地^[17]、绿洲^[18]、黄土丘陵沟壑区^[19]、典型草原^[20] 等各种下垫面条件下开展了区域蒸散发的估算与分析。

西北农牧交错带作为中国北方农牧交错带的典型区域, 境内生态环境十分脆弱, 气候干旱, 降水量少, 蒸发能力强, 水资源匮乏, 干旱和水资源短缺是制约该地区社会经济发展的主要因素, 是我国生态环境亟待治理的重点地区, 由于地理位置的独特性和气候环境敏感性的特征, 许多学者对此处蒸散发做了专门研究, 目前对该区域蒸散发的研究一方面是采用 Penman-Monteith (P-M) 公式计算区域潜在蒸散发并利用空间插值手段对其时空变化进行分析^[21-23], 另一方面也有在流域尺度上利用 SEBAL 模型对蒸散发空间分布特征的探讨^[19, 24]。大部分学者基于气象站点利用经验公式来研究西北农牧交错带潜在蒸散发的时空变化特征, 运用空间插值的手段进行空间分析存在外延精度低、下垫面特征考虑不足等问题, 而采用物理机制模型对异质性较高, 下垫面特征复杂的西北农牧交错带实际蒸散发的研究相对较少。

本研究从区域尺度入手, 利用遥感获得的地表温度、归一化植被指数 (NDVI)、地表反照率等参数结合气象站点数据, 基于能量平衡原理建立的 SEBAL 物理机制模型估算西北农牧交错带生长季 (4—10 月) 的日蒸散量, 并采用 RS、GIS 技术与数理统计分析等手段分析生长季蒸散发的时空变化特征, 探讨蒸散发与地表特征参数之间的关系, 研究结果有助于了解本地区的蒸散发时空变化规律及下垫面特征与蒸散发之间的关系, 为本地区水资源的合理配置与生态可持续发展提供有意义的借鉴。

1 研究区概况

西北农牧交错带 (36°49'—40°11'N, 105°35'—110°54'E) 位于鄂尔多斯高原向陕北黄土高原的过渡地

区,总面积达 8 万多平方公里,行政区划上包括内蒙古自治区的乌审旗、鄂托克旗、鄂托克前旗,陕西省的定边县、榆阳区、神木县、靖边县、横山县及宁夏回族自治区的盐池县、灵武市,具有以草地-农田-裸地大面积相互镶嵌的独特下垫面,是我国典型的农牧交错地区。该地区位于我国季风区的西陲,年平均气温为 6.0—8.5℃,多年平均降水量由东南部的 440 mm,向西递减至 250 mm,降水变率大且主要集中于 7—9 月,约占全年降水的 2/3 以上^[25];地势自西北向东南倾斜,境内分布着为毛乌素沙地,北部为库布齐沙漠,西临乌兰布和沙漠,土地退化严重,生态环境极其脆弱;地下水位在空间分布上的变化很大,可从几厘米到几十米,沙地的水分供应来自大气降水、河川与湖泊、地下水。本区的三大植被类群是梁地上的草原与灌丛植被,半固定、固定沙丘与沙地上的沙生灌丛,以及滩地上的草甸,盐生与沼泽植被^[25]。

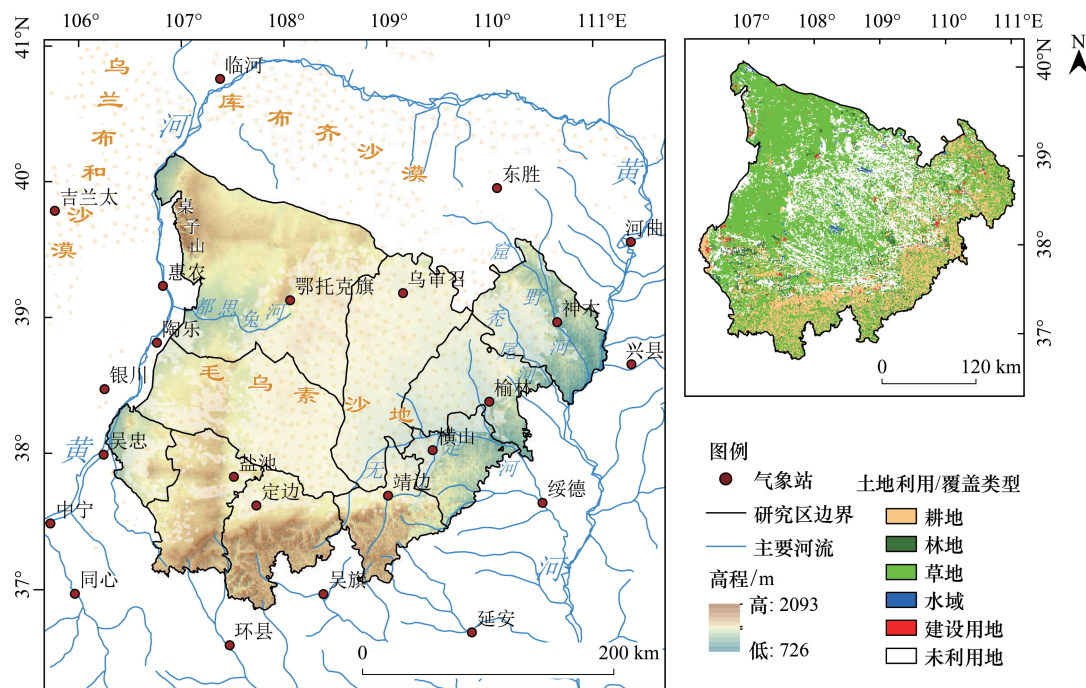


图 1 西北农牧交错带位置示意图及土地利用空间分布

Fig.1 Location map of the agro-pastoral ecotone in Northwest China and its spatial distribution of land use

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

本文从美国国家航空和宇航局的土地处理分布式活动档案中心(LP DAAC)网站(https://lpdaac.usgs.gov/data_access)下载获得的 MODIS 产品作为数据源,选取地表温度、NDVI 与地表反照率作为 SEBAL 模型的主要输入数据(详见表 1),覆盖西北农牧交错带的 MODIS 产品轨道号为(h24v04、h24v05),原始的 MODIS 产品为 HDF-EOS 格式、ISIN(Integerized Sinusoidal)投影,利用 MODIS 的处理工具 MRT(MODIS Reprojection Tools)进行轨道镶嵌、格式转换、投影变换等将其转换为 WGS-1984 坐标系统下 Geo Tiff 格式的文件,统一投影为 Albers Conical Equal Area,之后在 ArcGIS 10.2 软件中经过裁剪、重采样等得到模型的输入数据。DEM 数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://www.gscloud.cn>),重采样生成与 MODIS 数据相同的空间分辨率(1km)。

气象数据源自中国气象数据共享服务网(<http://data.cma.cn/>)所提供的日值数据,共计 23 个站点(见图 1),主要气象要素包括逐日的平均气温、最高气温、最低气温、平均风速、平均相对湿度、最小相对湿度和日照时数,主要用于 SEBAL 模型的数据输入与 P-M 模型的估算,采用 IDW 插值方法将站点观测资料扩展至区域。

土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心提供的 2015 年 1km 空间分辨率的土地利用数据 (<http://www.resdc.cn/>), 依据中国科学院资源环境数据中心的土地利用分类系统并结合研究区内的实际情况, 将其划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地与未利用地六类(图 1)。

蒸散发在冬季整体值较低且空间变异性较小, 而生长季随时间的推移水热条件发生显著变化, 是蒸散发年内空间变化的主要时段。根据王静璞等^[26]的研究结果, 本地区生长季开始于第 90—156 天, 结束于第 245—323 天, 由于遥感影像数据质量的限制及为了与土地利用数据获得的年份统一, 故而选取 2015 生长季 4—10 各月中云量覆盖小, 数据质量较好且为各月中旬具有代表性的一天探究研究区生长季日蒸散发的变化特征, 日序分别为 97(4 月 7 日)、129(5 月 9 日)、161(6 月 10 日)、193(7 月 12 日)、225(8 月 13 日)、257(9 月 14 日)、289(10 月 15 日)。

表 1 MODIS 产品的详细信息

Table 1 Detailed information of MODIS data

产品名称 Product name	提供的地表特征参数 Land surface parameters	时间分辨率/d Temporal resolution	空间分辨率/m Spatial resolution
MOD11A2	地表温度	8	1000
MOD13A2	归一化植被指数	16	1000
MOD09A1	地表反照率	8	500

2.2 SEBAL 模型简述

1998 年 Basitaanssen 等基于能量平衡原理建立的地表能量平衡算法(SEBAL)模型, 它是一种单源能量平衡模型, 它可以不需要土壤、作物和管理实践的相关信息而估算潜热通量和其他能量平衡组分^[7,27]。主要是利用能量平衡原理来获得蒸散发, 即:

$$R_n = G + H + LE + PH \quad (1)$$

式中, R_n 为地表净辐射通量, W/m^2 ; G 为土壤热通量, W/m^2 ; H 为感热通量, W/m^2 ; LE 为潜热通量, W/m^2 ; PH 是用于植物光合作用和生物量增加的能量, W/m^2 (其值很小可以忽略)。

2.2.1 地表净辐射通量 R_n

地表净辐射通量代表地面可用的实际辐射能量, 通过从所有进入的辐射通量中减去所有输出辐射通量计算获得^[7,27], 主要公式如下:

$$R_n = (1 - \alpha) R_s \downarrow + R_l \downarrow - R_l \uparrow - (1 - \varepsilon_g) R_l \downarrow \quad (2)$$

$$R_s \downarrow = G_{sc} \times \cos \theta \times d_r \times \tau_{sw} \quad (3)$$

$$R_l \downarrow = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (4)$$

$$R_l \uparrow = \varepsilon_g \sigma T_s^4 \quad (5)$$

式中, $R_s \downarrow$ 为到达地表短波辐射, W/m^2 ; α 为反照率; $R_l \downarrow$ 为入射的长波辐射, W/m^2 ; $R_l \uparrow$ 为向外发射的长波辐射, W/m^2 ; τ_{sw} 为大气单向透射率; ε_a 为大气比辐射率, $\varepsilon_a = 1.08 \times (-\ln \tau_{sw})$; ε_g 为地表比辐射率, 又称发射率, 可由与 NDVI 之间的经验公式进行推算, $\varepsilon_g = 1.009 + 0.047 \times \ln(\text{NDVI})$, 当为水体时取 0.995; G_{sc} 为太阳常数, 取 $1367 \text{ W}/\text{m}^2$; θ 为太阳天顶角; d_r 为日地距离 (天文单位); σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 取值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$; T_a 为参考高度处的温度, K ; T_s 为地表温度, K 。

2.2.2 土壤热通量 G

土壤热通量是由于传导导致的储存到土壤和植被中的热量的比率, 可由 R_n 、 T_s 、NDVI 与 α 之间的经验统计公式计算:

$$G = R_n \times \frac{1}{\alpha} \times (T_s - 273.15) \times (0.0032\alpha + 0.0064\alpha^2) (1 - 0.978\text{NDVI}^4) \quad (\text{植被覆盖}) \quad (6)$$

$$G = 0.2 \times R_n \quad (\text{裸露土壤})$$

式中,NDVI 为归一化植被指数。

2.2.3 感热通量 H

感热通量是由于温差造成的对流和传导对空气的热损失速率^[7],可由下式计算:

$$H = \rho C_p dT / r_{ah} \quad (7)$$

$$r_{ah} = \frac{1}{ku^*} \ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) \quad (8)$$

式中, ρ 为空气密度, kg/m^3 ; C_p 是空气热量常数(取值为 $1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$); dT 为高度 z_1 、 z_2 处的温度差,其中 z_1 和 z_2 是植被冠层零平面位移以上的高度,取值分别是 0.01m 和 2m ; r_{ah} 为空气动力学阻抗; u^* 是摩擦速度; k 是卡尔曼常数(一般取 0.41);具体计算过程详见文献[7,27]。

地表温度梯度(dT)的获得是假定地表温度与温度梯度之间存在线性关系,即 $dT = a \times T_a + b$,计算系数 a 与 b 需要通过选取冷热象元并引入 Monin-Obukhov 理论通过循环递归运算反复迭代获得,热象元代表极端干旱地区,假定湿度为 0 ,即潜热为 0 , $H \approx R_n - G$,一般选择在非常干燥的缺少植被覆盖的沙漠、戈壁等地区;冷象元代表极端湿润地区,假定地表温度为 0 ,即感热为 0 , $\lambda ET \approx R_n - G$,一般选择在植物比较茂密,水分供应充足的地区。系数 a 、 b 确定后即可获得 dT ,以此求得感热通量。

2.2.4 潜热通量 LE

潜热通量是由蒸散发引起的表面潜热损失率。当各个通量确定后即可根据公式(1)计算获得。

2.2.5 蒸发比 EF

基于能量平衡公式结合遥感影像所获得的蒸散量是瞬时的蒸散发,实际的应用价值较小,需要进行尺度的拓展至日蒸散发。研究表明,蒸发比在白天当中基本保持稳定^[28],因而结合蒸发比不变定律可以扩展至日蒸散发。蒸发比的计算公式为:

$$EF = \frac{LE}{R_n - G} = \frac{LE}{H + LE} \quad (9)$$

式中, EF 为蒸发比。

2.2.6 日蒸散量 ET_{24}

当蒸发比已知时,日蒸散发 ET_{24} 可以由下式进行计算:

$$ET_{24} = \frac{86400 \times EF \times (R_{n24} - G_{24})}{\lambda} \quad (10)$$

式中, R_{n24} 是一整天的净辐射通量; G_{24} 是一整天的土壤热通量; 86400 是一天对应的秒数; λ 为水的汽化潜热 (J/kg),可以由与温度的关系式得到:

$$\lambda = [2.501 - 0.002361 \times (T_s - 273.15)] \times 10^6 \quad (11)$$

3 日蒸散量精度的验证

为了验证 SEBAL 模型所获得的地表日蒸散量的可信度,需要对估算结果进行检验,因在该时段内缺少实测数据对模型的估算结果进行直接精度验证,结合前人的研究经验^[15-16],采用联合国粮农组织 (FAO) 推荐的 P-M 公式与作物系数结合进行间接对比分析,参考 FAO 推荐的作物系数^[29]及张娜等得到的各时期作物系数[30],确定 4—5 月取 0.77 , 6 月取 0.99 , 7—8 月取 1.02 , 9—10 月分别取 0.86 与 0.68 ,以此对各时期估算的区域蒸散发均值与 P-M 模型的计算均值进行对比,由图 2 结果得出:除 6 月 10 日可能存在低估外,其他各个时段均存在一定程度的高估,虽个别时期误差较大,但整体变化特征基本吻合,整体平均绝对误差 (MAE) 为 0.79mm/d ,均方根误差 (RMSE) 为 0.94mm/d ,确定性系数 (R^2) 为 0.76 。本研究中的误差范围与其他学者在区域尺度的检验结果相近^[15,17,31],因而估算误差处于合理范围内,说明 SEBAL 模型在西北农牧交错带蒸散发的估算精度基本上可以满足本地区的研究。

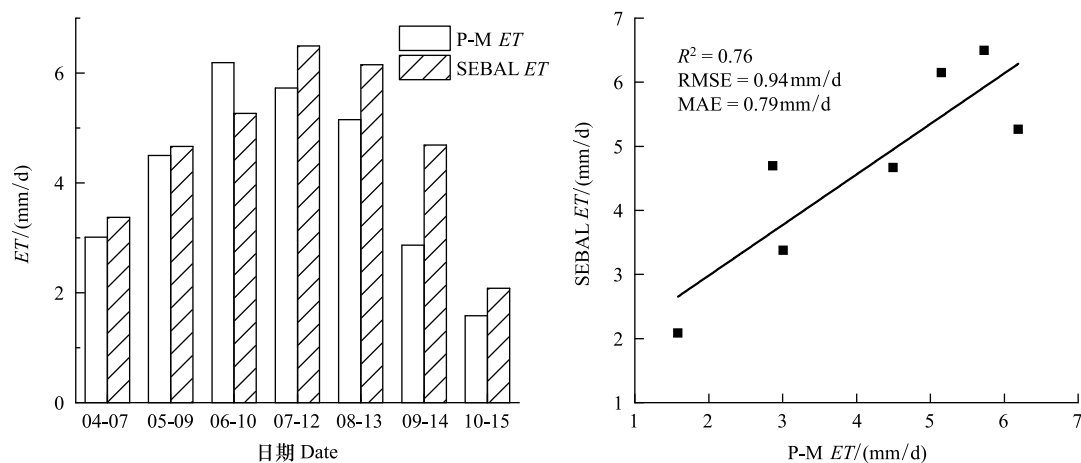


图2 精度检验结果 SEBAL ET 与 P-M ET 对比图 SEBAL ET 与 P-M ET 散点图

Fig.2 The results of precision test The comparison of SEBAL ET and P-M ET, The scatter plot of SEBAL ET and P-M ET

P-M ET: 基于 Penman-Monteith 公式结合作物系数计算的蒸散发值 The ET calculated based on FAO Penman-Monteith formula and crop coefficient; SEBAL ET: 基于陆面能量平衡算法 (SEBAL) 模型计算的蒸散发值 The ET calculated based on Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL) model

4 结果与分析

4.1 西北农牧交错带生长季蒸散发时空变化规律

蒸散发受天气参数、作物特征、地形特征、管理方式和环境因素等各方面的影响随时间推移呈现明显的空间变化规律, 基于 SEBAL 模型得到 2015 年西北农牧交错带生长季蒸散发的空间变化 (如图 3 所示), 4、5 月份为本地区生长季初期, 日蒸散发变化范围分别为 0—12.18、0—11.92 mm/d, 区域日均蒸散量分别为

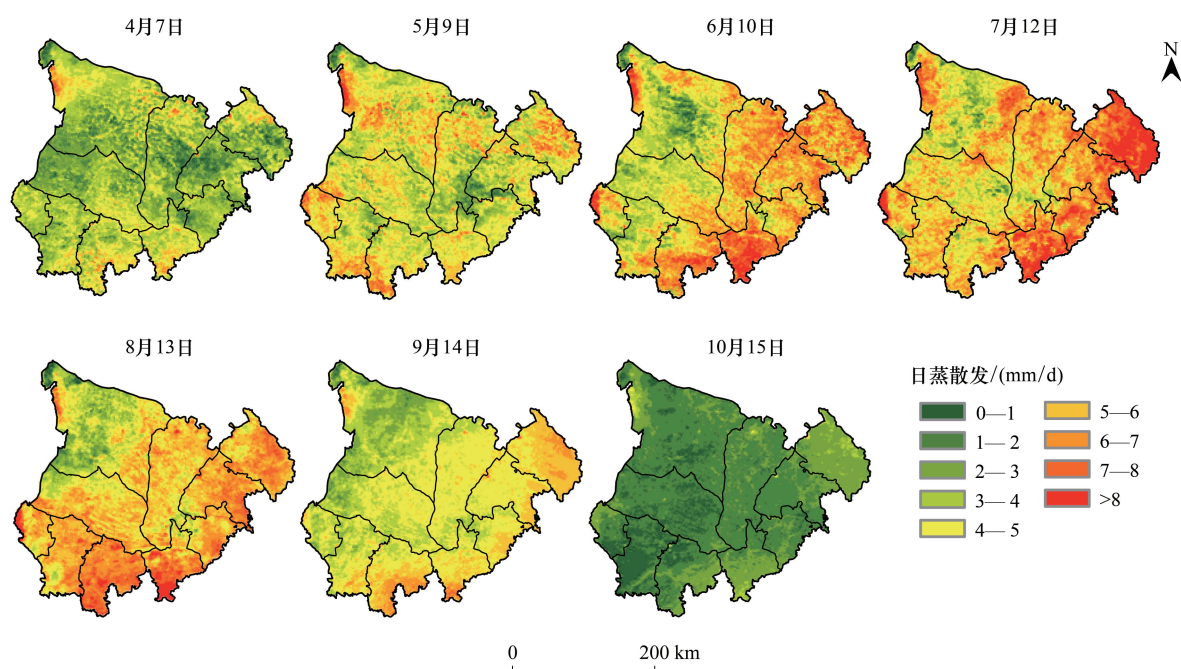


图3 西北农牧交错带生长季各天的蒸散发反演值分布

Fig.3 Spatial distribution of ET during the growing season in the agro-pastoral ecotone in Northwest China

3.34mm/d 与 4.47mm/d。此时气温开始回升,植被逐渐变绿,农作物也刚开始耕种萌芽生长,故而蒸散发量逐渐升高。

6—8 月份是本地区的生长季中期,日蒸散发变化范围分别为 0—12.52、0—16.71、0—15.08mm/d,区域日均蒸散发量分别为 5.22、5.73、5.46mm/d,7 月份是一年当中蒸散发量最高的时段,其空间异质性也达到最大。究其因,此时气温明显上升,日照时间变长,降水也进入了全年当中较为丰沛的时段,植被生长比较茂盛,尤其农田由于灌溉,土壤水分供应充足且作物达到完全冠层覆盖,具有全年当中最大的叶面积指数,蒸腾旺盛,使得蒸散发量较高,植被覆盖度的增加等均为蒸散发提供了有利的条件,使蒸散发高值区分布面积明显增加,蒸散发高值区主要分布在耕地与植被覆盖度较高草地。

9、10 月份为本地区生长季末期,日蒸散发变化范围分别为 0—8.94、0—5.61mm/d,区域日均蒸散发量分别为 4.31、1.69mm/d,为一年生长季当中的较低值,区域内大部分蒸散发量小于 5mm/d,其空间分布的异质性也降到了最低。此时气候条件发生了明显的变化,气温下降、降水量减少,且农业灌溉水量减少,土壤含水量较低,而旱生植物受水分影响大,一旦水分不足,便处于休眠或假死状态,大部分植物的代谢活动已经下降,甚至枯萎,促进光合作用和蒸腾作用的气孔数量显着减少,植被参与蒸散发的作用大大降低,因而蒸散发量相对较低。

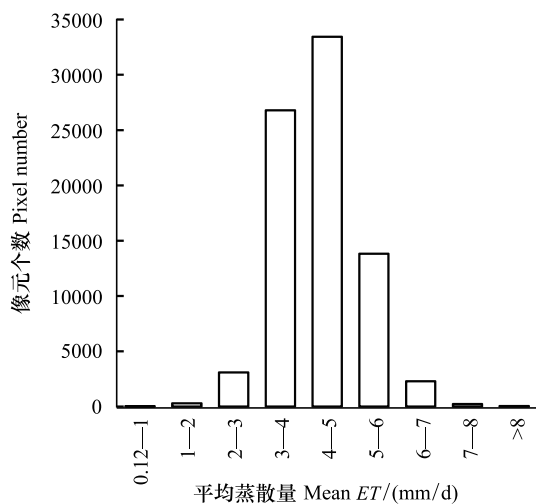


图 4 生长季日均蒸散发频率分布图

Fig.4 Daily average evapotranspiration frequency distribution map

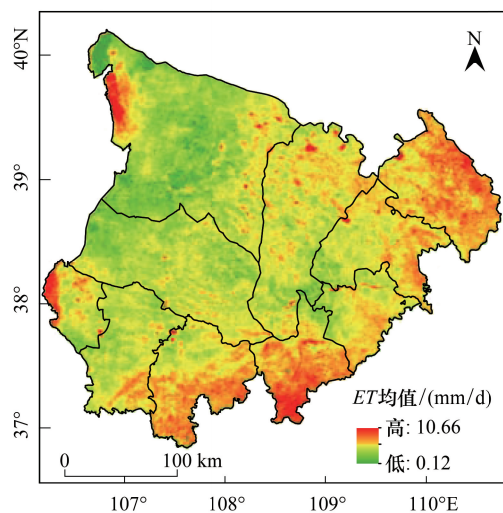


图 5 2015 年研究区生长季日均蒸散发空间分布

Fig.5 The distribution of average daily ET in 2015

为了探究研究区生长季蒸散发的整体空间分布特征,将各时段的蒸散发进行栅格平均并统计了其值域像元的频数分布,如图 4 所示,研究区生长季蒸散发均值的变化范围处于 0.12—10.66mm/d,呈单峰的分布特征,峰值主要集中于 4—5mm/d,均值为 4.31mm/d。从空间分布特征来说(如图 5 所示),研究区生长季的区域蒸散发空间分布整体呈现东北、西南部较高,西部偏低特征,蒸散发的高值区大部分出现在东部,其值范围介于 4—6mm/d,主要分布在神木、榆林、横山、靖边等部分地区,呈离散的条带状或块状的分布格局,因该地区主要的植被类型为草地与耕地,植被长势较好,降水较多,具备了良好的蒸散条件;西南部的高值区(6—7mm/d)主要为分布在黄河冲积平原的农耕地区,与当地具有较好的供水条件密切相关;低值区出现在研究区西部,其值范围处于 1—3mm/d,呈片状的分布格局,西部主要以沙地与稀疏草地为主且降水较少,地表温度虽高但提供蒸散发的水分不足,因而蒸散发量小于东部。

4.2 蒸散发与地表特征参数关系探究

下垫面特征是影响地表能量和物质交换的重要因素,NDVI、地表温度、地表反照率与地表净辐射是描述

下垫面性质的几个重要参数,它们之间相互作用并共同影响着蒸散发的空间分布格局。如图 6 各地表参数均值的空间分布所示:NDVI 的高值区(0.24—0.54)主要集中于研究区的东部山区,除西南部呈条块状高值区(0.35—0.54)外,自东向西其值逐渐变小,植被覆盖条件逐渐变差;地表反照率的高值区主要集中分布于西部,东部为低值区,因东部主要以高覆盖的林地、草地与农田为主,地表较为湿润且粗糙度较高,反照率相对较低,而西部主要以裸地与沙地为主,地表粗糙度较低,地面对太阳辐射的反射能力较高,地表反照率较高;地表温度受地表覆被与海拔等因素的共同影响除西北部高海拔地区的地表温度较低外,整体与 NDVI 的空间分布相反,但规律相似,植被覆盖条件较好的地区地表温度越低;受下垫面的影响,地表净辐射与 NDVI 之间的空间分布格局相似。

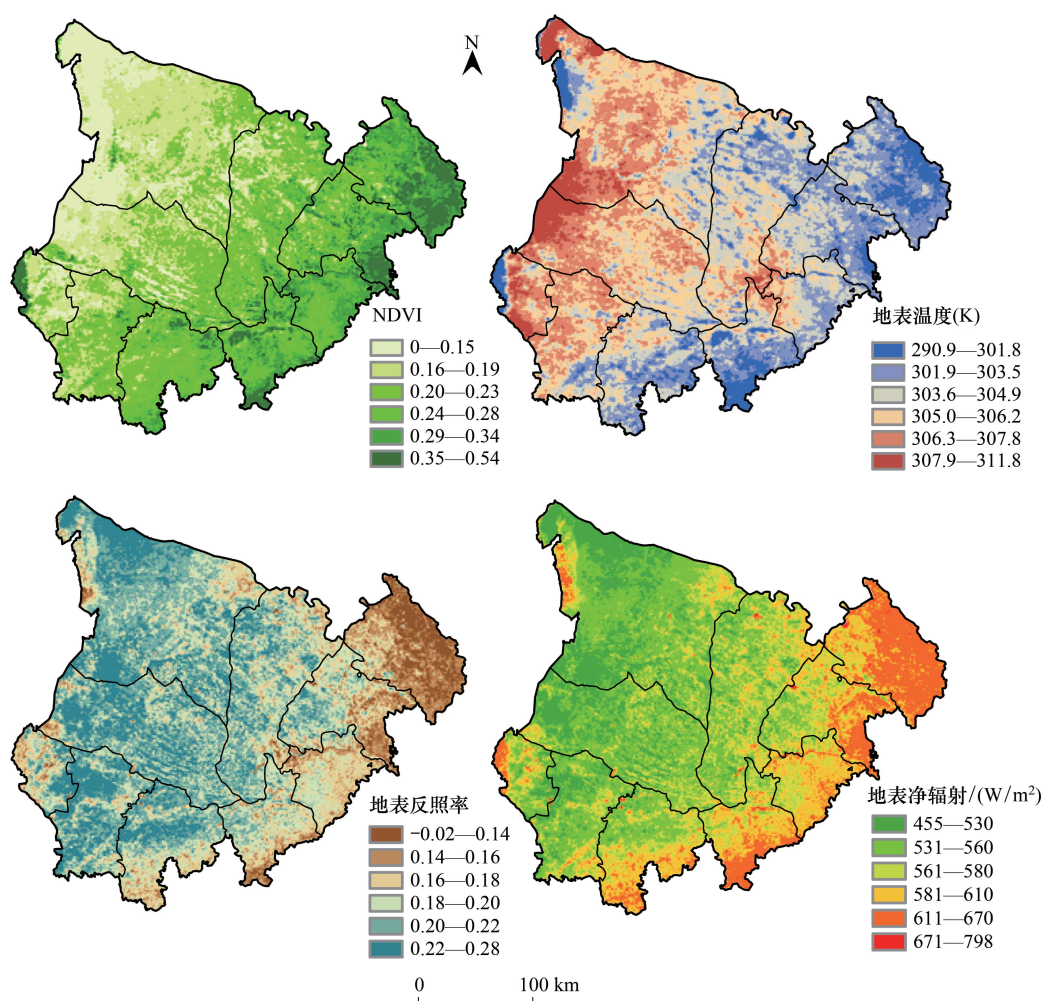


图 6 2015 年生长季地表特征参数的均值空间分布

Fig.6 Spatial distribution of land surface parameters during growing season in the 2015

为了进一步量化各地表特征参数与蒸散发之间的关系,本文利用 ArcGIS 10.2 中的 Create Fishnet 命令以 1km 为间距进行取样统计分析,如图 7 所示,在植被覆盖区,NDVI 与蒸散发之间呈现出正相关关系, $R^2 = 0.28$,即植被覆盖度越高,植被长势越好,植物散发在整个蒸散发过程中所占的比例越大,则蒸散发量越高;蒸散发与地表温度二者之间呈显著的线性负相关关系, $R^2 = 0.74$,不同下垫面的物理属性具有显著的差异性,植被覆盖度较高的地区因吸收和反射了大量的太阳辐射,因而地表温度相对较低,加之由于植物散发,故而蒸散发量较高,而地表温度的高值区主要分布于沙地、戈壁,感热在整个能量分配占较大比例且由于水分因素的限

制,蒸散发反而较低。反照率与蒸散发之间呈负相关关系, $R^2 = 0.33$,反照率越高,到达地表的有效辐射越小,用于蒸散发的能量越少,所以蒸散发则越小。蒸散发与净辐射通量之间呈显著的正相关关系, $R^2 = 0.68$,地表净辐射是供给蒸散发的有效能量,它控制着蒸散发的物理与生物过程,如水分输送与运移能量的多少、植被光合作用的大小等,因而能量越高,蒸散发越大。由以上分析可以得出,蒸散发与地表特征参数之间相关性由强到弱依次为地表温度>地表净辐射>地表反照率>NDVI。

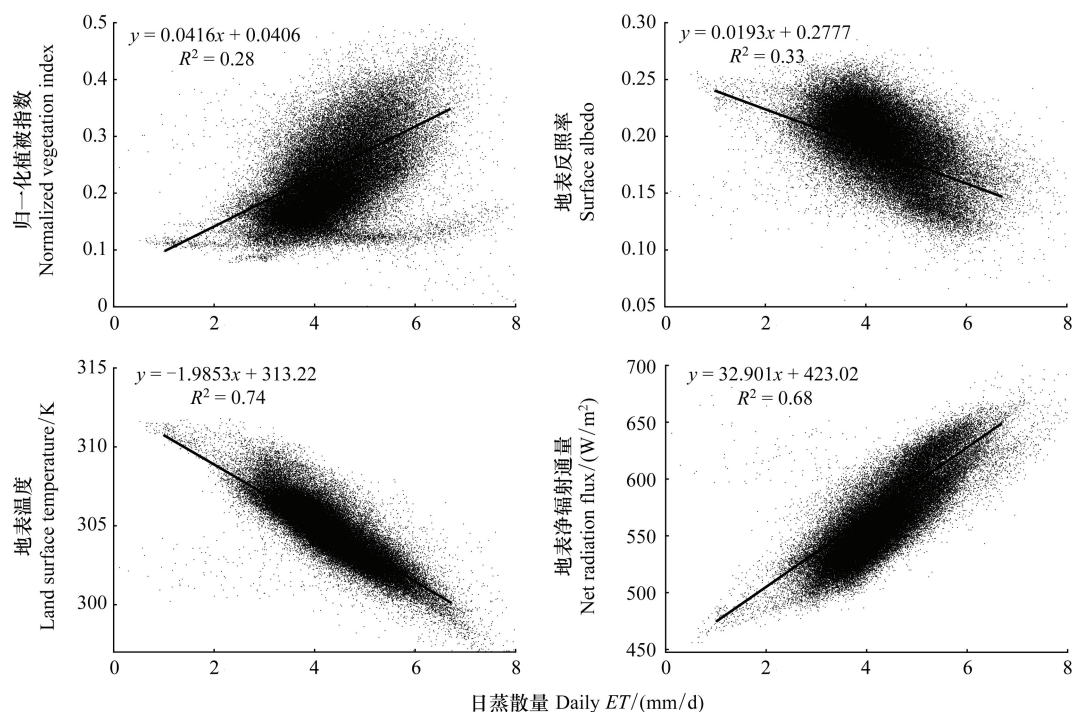


图7 蒸散发与各地表特征参数相关性图

Fig.7 Correlation diagram between evapotranspiration and characteristic factors of land surface

4.3 不同土地利用/覆被类型的蒸散发量分析

不同下垫面因理化性质的差异,因而蒸散发量各不相同。利用 ArcGIS 10.2 中的区域统计功能,统计了不同土地利用类型下的日均蒸散量,由于面积较小的土地利用类型包含的混合相元较多,误差较大,故而不做统计,选取了该地区典型的耕地、林地、草地与未利用地统计结果如表 2 所示;耕地日均蒸散量为 4.89mm/d,相对来说是蒸散发量较高的地类,因研究区内的耕地以旱地为主,农作物需要灌溉水源,当作物处于生长季中期时,气温较高且灌溉水源充足,植物散发与土壤、水面蒸发的双重作用使得蒸散量较高;林地的日均蒸散量为 4.44mm/d,林地具有水源涵养与蒸腾的双重作用,能够为蒸散发提供良好的水分条件,蒸发量理应相对较高,但研究区内林地的占比不足 3%,且以人工林为主,树龄小,林间密度低,树种低矮,故而蒸散量相对较低;未利用地与草地蒸散量最小,日均值分别为 4.21、4.18mm/d,草地与未利用地约占研究区总面积的 80%,草地主要以草原植被、荒漠植被与沙地植被为主,分布稀疏,由于本地区独特的镶嵌性下垫面特征,草地与未利用地呈相间分布,蒸腾作用较低,且研究区西北部的高山荒漠地区可能存在一定程度高估,致使未利用地蒸散量的统计结果整体比草地较高。

综上分析,耕地因灌溉等人为综合管理措施使得蒸散量较高,其次为低矮的人工林地,未利用地与草地相差不大,日蒸散发量较小。

表 2 不同土地利用/覆被类型下的平均日蒸散发量

Table 2 Average evapotranspiration for different land use/cover types

土地利用/覆被类型 Land use/cover type	面积/km ² Area	占总面积比例/% Percentage of total area	日均蒸散发量/(mm/d) The average of daily ET
耕地 Cultivated land	12779	15.35	4.89
林地 Forest land	2330	2.80	4.44
未利用地 Unutilized land	19044	22.88	4.21
草地 Grassland	47200	56.71	4.18

5 结论与讨论

本文利用 SEBAL 模型获得研究区生长季日均蒸散发的变化范围为 0.12—10.66mm/d,这与苏婷婷等^[32]基于 Landsat8 遥感影像在半干旱区的土默特右旗利用 SEBAL 模型在作物生育期内的蒸散发估算结果基本一致(1.182—13.144mm/d),说明利用 MODIS 数据结合 SEBAL 模型对区域尺度蒸散发的估算具有一定的适用性,但由于较低的空间分辨率对于西北农牧交错带复杂的农-草-裸镶嵌分布的复杂下垫面的刻画并不显著,仅能反映出整体蒸散发的空间分布随时间的变化特征,因而日后研究中选用高空间分辨率的遥感影像来刻画复杂下垫面的信息是准确获得蒸散发的前提。通过检验结果发现 SEBAL 模型计算的结果可能存在一定程度的高估,由于下垫面的异质性,采用单点验证的方式并不一定能够说明 1km×1km 空间分辨率的象元特征,不可避免的存在一定的验证误差,曾丽红等^[33]在松嫩平原与宇文颖等^[17]在盘锦湿地利用涡度相关检验结果也得到类似的结论,为进一步明晰具体的影响因素,避免因各个参数的不确定性而致使误差传递,需要利用实测数据对每一步的反演结果进行订正以此来消除计算过程中产生的累积误差。此外,通过取点回归发现地表温度与蒸散发之间的相关性最高且呈负相关关系,与 NDVI 呈正相关关系,此结果与杨肖丽等^[14]在半干旱地区和王军等^[20]在典型草原得到的研究结果一致,说明了在干旱半干旱区地表蒸散发受下垫面特征的影响较为显著,能量与水分是影响本地区蒸散发量的重要因素,但因蒸散发受地表温度的影响显著,在西北部高海拔地区出现了低值高估的现象,使得未利用地的蒸散发结果统计值偏高,可能因为模型对于地形考虑不足所致。

本文基于地表能量平衡的 SEBAL 模型利用 MODIS 数据对西北农牧交错带 2015 年生长季的蒸散发进行反演,并利用 FAO 推荐的 P-M 公式结合作物系数对反演结果进行对比,得到平均绝对误差为 0.79mm/d,均方根误差为 0.94mm/d,确定性系数 R^2 为 0.76,结果在可信范围之内,说明所需参数较少、物理机制较为明确的 SEBAL 模型在下垫面复杂的西北农牧交错带的蒸散发反演研究中也具有一定的适用性。并以此为基础对蒸散发进行了分析,得到以下结论:

(1) 西北农牧交错带生长季蒸散发随时间变化呈现出明显的空间变异性,生长季日均蒸散发为 4.31mm/d,呈现出东北、西南部较高,西部偏低的空间分布格局,蒸散发的高值区呈小斑块状、离散的条带状或块状的分布格局;低值区呈片状的空间分布格局,农区蒸散量高于牧区。

(2) 基于 SEBAL 模型得到的日蒸散发与 MODIS 地表特征参数之间的统计分析结果表明,蒸散发与地表温度和反照率之间呈负相关关系,与 NDVI 和地表净辐射之间呈正相关关系,其中蒸散发与地表温度之间的相关性最高, $R^2=0.74$,因而对地表温度的准确反演是获得精确蒸散发的前提。

(3) 不同土地利用/覆被下蒸散量大致呈现以下的特征:耕地具有较高的蒸散量,林地次之,未利用地与草地蒸散量较低。

参考文献 (References):

- [1] Rivas R, Caselles V. A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing-based surface temperature and local meteorological data. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(1-2): 68-76.
- [2] Oki T, Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 2006, 313(5790): 1068-1072.

- [3] 刘绍民, 孙中平, 李小文, 刘昌明. 蒸散量测定与估算方法的对比研究. 自然资源学报, 2003, 18(2): 161-167.
- [4] Oberg J W, Melesse A M. Evapotranspiration dynamics at an ecohydrological restoration site: an energy balance and remote sensing approach. Journal of the American Water Resources Association, 2006, 42(3): 565-582.
- [5] Sun Z P, Wei B, Su W, Shen W M, Wang C Z, You D A, Liu Z. Evapotranspiration estimation based on the SEBAL model in the Nansi Lake Wetland of China. Mathematical & Computer Modelling, 2011, 54(3): 1086-1092.
- [6] 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. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 77(3-4): 263-293.
- [7] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, Holtslag A A M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. Journal of Hydrology, 1998, 212-213: 198-212.
- [8] Roerink G J, Su Z, Menenti M. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. Physics and Chemistry of the Earth Part B Hydrology Oceans and Atmosphere, 2000, 25(2): 147-157.
- [9] Su Z B. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. Hydrology and Earth System Sciences, 2002, 6(1): 85-100.
- [10] Allen R G, Tasumi M, Trezza R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2007, 133(4): 380-394.
- [11] Tang R L, Li Z L, Tang B H. An application of the Ts-VI triangle method with enhanced edges determination for evapotranspiration estimation from MODIS data in arid and semi-arid regions: Implementation and validation. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(3): 540-551.
- [12] Mu Q Z, Zhao M S, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8): 1781-1800.
- [13] 吴炳方, 熊隽, 闫娜娜, 杨雷东, 杜鑫. 基于遥感的区域蒸散量监测方法——ETWatch. 水科学进展, 2008, 19(5): 671-678.
- [14] 杨肖丽, 任立良, 袁飞, 雍斌, 江善虎. 利用 SEBAL 模型对沙拉沁河流域蒸散发的分析. 干旱区研究, 2010, 27(4): 507-514.
- [15] 李宝富, 陈亚宁, 李卫红, 曹志超. 基于遥感和 SEBAL 模型的塔里木河干流区蒸散发估算. 地理学报, 2011, 66(9): 1230-1238.
- [16] 周妍妍, 郭晓娟, 郭建军, 曾建军, 陈冠光, 邹明亮, 岳东霞. 基于 SEBAL 模型的疏勒河流域蒸散量时空动态. 水土保持研究, 2019, 26(1): 168-177.
- [17] 于文颖, 纪瑞鹏, 徐德增, 贾庆宇, 冯锐, 孙龙或, 武晋雯, 张玉书. 基于 SEBAL 模型的盘锦湿地日蒸散发估算及其分布特征. 中国水土保持科学, 2017, 15(5): 8-15.
- [18] 阿布都沙拉木·吐鲁甫, 买买提·沙吾提, 马春玥, 张淑霞. 基于 SEBAL 模型的渭-库绿洲蒸散量特征及影响因子研究. 地球信息科学学报, 2018, 20(9): 1361-1372.
- [19] 张殿君, 张学霞, 武鹏飞. 黄土高原典型流域土地利用变化对蒸散发影响研究. 干旱区地理, 2011, 34(3): 400-408.
- [20] 王军, 李和平, 鹿海员, 贾金良. 典型草原地区蒸散发研究与分析. 水土保持研究, 2013, 20(2): 69-72+315.
- [21] 李敏敏, 延军平. “蒸发悖论”在北方农牧交错带的探讨. 资源科学, 2013, 35(11): 2298-2307.
- [22] 李英杰, 延军平, 王鹏涛. 北方农牧交错带参考作物蒸散量时空变化与成因分析. 中国农业气象, 2016, 37(2): 166-173.
- [23] 钱多, 查天山, 吴斌, 贾昕, 秦树高. 毛乌素沙地参考作物蒸散量变化特征与成因分析. 生态学报, 2017, 37(6): 1966-1974.
- [24] 韩惠, 闫浩文, 马世英. 基于遥感技术的祖厉河流域 LUCC 与蒸散发研究. 测绘科学, 2009, 34(6): 65-67.
- [25] 张新时. 毛乌素沙地的生态背景及其草地建设的原则与优化模式. 植物生态学报, 1994, 18(1): 1-16.
- [26] 王静璞, 刘连友, 贾凯, 田丽慧. 毛乌素沙地植被物候时空变化特征及其影响因素. 中国沙漠, 2015, 35(3): 624-631.
- [27] Bastiaanssen W G M, Ahmad M U D, Chemin Y. Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin. Water Resources Research, 2002, 38(12): 91-99.
- [28] Crago R D. Conservation and variability of the evaporative fraction during the daytime. Journal of Hydrology, 1996, 180(1-4): 173-194.
- [29] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop ET guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome: FAO, 1998.
- [30] 张娜, 屈忠义, 郭克贞, 邹佳宾, 徐冰, 姜梦琪. 毛乌素沙地青贮玉米和紫花苜蓿作物系数研究. 土壤, 2016, 48(2): 286-290.
- [31] 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.
- [32] 苏婷婷, 魏占民, 白燕英. 基于 SEBAL 模型的土默特右旗腾发量研究. 灌溉排水学报, 2019, 38(2): 70-75.
- [33] 曾丽红, 宋开山, 张柏, 王宗明, 杜嘉. 基于 SEBAL 模型与 MODIS 产品的松嫩平原蒸散量研究. 干旱区资源与环境, 2011, 25(1): 140-147.