

基于SEBAL模型的土默特右旗腾发量研究

苏婷婷, 魏占民*, 白燕英

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要:【目的】评价SEBAL模型在估算内蒙古包头市土默特右旗腾发量时的适用性。【方法】基于2015年作物生育期内的Landsat8遥感影像,建立SEBAL模型,估算腾发量,利用FAO Penman-Monteith公式与水量平衡法估算得到腾发量进行了验证及评价,并采用多元逐步回归方法对其影响因素进行了分析。【结果】日腾发量的分布具有明显的空间差异性,呈现出“山峰型”变化趋势。SEBAL模型腾发量估算值与水量平衡法估算值相比,相对误差的平均值为6.053%;Penman-Monteith公式计算得到的日腾发量与水量平衡法估算值相差7.682%,都在10%以内,达到了精度要求,且SEBAL模型估算腾发量的精度高于Penman-Monteith公式。日腾发量与NDVI和地表温度相关性显著,由二者建立了最优的多元逐步回归方程。【结论】在缺乏数据的情况下,利用SEBAL模型可以较为准确地估算出土右旗的腾发量,且NDVI和地表温度对其的影响较大。

关键词:遥感; SEBAL模型; 腾发量; 空间差异性; 多元逐步回归

中图分类号:S127

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180119

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[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(2): 70-75.

0 引言

腾发量是区域“水循环”过程中的重要因素^[1],准确地估算腾发量对水资源的合理利用有着非常重要的作用^[2]。传统估算蒸散发的方法只是在“点”尺度上的分析,而利用遥感则实现了“面”尺度的扩展^[3],使得区域腾发量的研究更为便利^[4]。农业作为土右旗的第一产业,水资源的合理利用尤为重要,腾发量可以作为评价灌溉水利用效率的指标,因此准确地估算腾发量有利于高效灌水。

传统估算腾发量的方法有水量平衡法、P-T公式法、P-M公式法等^[5-7],工作量大且需要的数据多,为了便捷、高精度地估算区域腾发量,利用遥感来估算腾发量日益兴起。SEBAL模型因其适用性广、精度高的特点,更是受到了国内外研究者的青睐^[8]。周玲等^[9]利用4a的Landsat遥感影像基于SEBAL模型估算了腾发量,发现漓江流域的腾发量具有明显的季节性和空间差异性。郭玉川等^[10]研究发现SEBAL模型估算区域腾发量的结果较为理想,即使有水域和沼泽,反演精度也很高,在今后的研究中值得推广。倪猛等^[11]研究发现,洛河流域腾发量与NDVI、植被覆盖度、地表温度、叶面积指数相关性都很显著。张楠楠等^[12]将利用SEBAL模型反演的腾发量与水量平衡法估算得到腾发量进行了对比,相对误差在10%之内。本研究基于土默特右旗2015年的8幅Landsat8遥感影像估算了日腾发量,以气象数据为基础,利用Penman-Monteith公式计算作物腾发量,分别与水量平衡法估算得到的腾发量进行精度对比,分析日腾发量与NDVI、地表温度、地表反照率的相关性,建立多元逐步回归方程,以期为内蒙古包头市土右旗今后腾发量的研究提供一定理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古包头市土默特右旗(简称土右旗),见图1,地处呼和浩特、包头和准格尔煤田“金三角”腹地,总面积2 368 km²。研究区属典型大陆性半干旱季风气候,年平均气温7.5℃,7月气温最高平均22.9℃,无霜期135 d左右,年平均日照时间3 095 h,年平均降水量346 mm。

收稿日期:2018-02-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51469024, 51769023);内蒙古自治区自然科学基金项目(2015BS0504)

作者简介:苏婷婷(1992-),女,内蒙古包头人。硕士研究生,主要从事遥感技术在农业灌溉中的应用方面的研究。E-mail:1007601001@qq.com

通信作者:魏占民(1960-),男,河北无极人。教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与新技术方面的研究。E-mail:wei_zhanmin@aliyun.com.cn

1.2 数据来源

Landsat8 遥感影像来源于美国地质调查局官网 (<http://glovis.usgs.gov/>)。Landsat8 OLI 遥感影像分辨率 30 m, 每 16 d 有 1 幅, 但是受云、雾等影响较大, 大多数都必须做去云处理, 其结果存在一定的误差, 兹选取了内蒙古包头市土默特右旗 2015 年的 8 期云量较少的影像来估算腾发量。

气象数据来源于中国气象数据网提供的“日值数据集(V3.0)”。选取 2015 年生长季(4—10月初)的内蒙古包头市土默特右旗气象站的平均温度、最高温度、最低温度、相对湿度、日照时间、风速等气候指标。

1.3 SEBAL 模型的建立

将下载好的遥感影像利用 ENVI5.2 软件进行预处理: 数据读取-辐射定标-图像裁剪-FLAASH 大气校正, 利用遥感影像反演地表参数(归一化植被指数、植被覆盖度、地表比辐射率、地表反照率、地表温度)结合气象数据(温度、风速)就能计算出 SEBAL 模型中的各个参数(地表净辐射量 R_n 、土壤热通量 G 、显热通量 H 和潜热通量 λET), 最后利用时间尺度的扩展得到日腾发量(ET_{24}), 计算式^[13]如下:

$$\lambda \times ET = R_n - G - H, \quad (1)$$

$$\lambda = 2.501 - 0.002361 \times (T_s - 273.15), \quad (2)$$

$$\Lambda_{24} = \frac{\lambda ET}{R_n - G}, \quad (3)$$

$$ET_{24} = \frac{R_{n24} \times \Lambda_{24} \times 86400}{\lambda \times 10^6}, \quad (4)$$

式中: R_{n24} 为日地表净辐射量 (W/m^2); Λ_{24} 为蒸发比; T_s 为地表温度 (K)。

1.4 FAO Penman-Monteith 公式的建立

利用下载好的气象数据通过 Penman-Monteith 公式计算参考作物腾发量 ET_0 (mm/d), 根据联合国粮农组织给出的数据, 结合土右旗玉米生长状况对生育期进行划分, 查表可得土右旗玉米作物系数 K_c , ET_c (mm/d) 计算式为:

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c. \quad (5)$$

土右旗作物系数参考值见表 1。

表 1 土右旗作物系数参考值

作物	生长初期	生长中期	生长后期	作物生长周期
日期	0428—0620	0621—0820	0821—1001	155 d
作物系数	0.7	1.2	0.6	

1.5 基于水量平衡法腾发量的估算

以水量平衡为实验原理计算作物腾发量计算式为:

$$ET_i = P_i + I_i - \Delta W_i - D_i - R_i, \quad (6)$$

式中: ET_i 表示第 i 时段的田间腾发量 (mm); P_i 表示第 i 时段的降雨量 (mm); I_i 表示第 i 时段的灌溉水量 (mm); $\Delta W_i = W_{i+1} - W_i$ 表示生育期内第 $i+1$ 和 i 时段的土壤储水量的变化量 (mm); D_i 表示第 i 时段的深层渗漏量 (mm); R_i 表示第 i 时段的径流量 (mm), 一般取 0。

1.6 测试内容及方法

在土右旗研究区 (E110°33'43", N40°35'32.5") 附近分别选择了 4 块试验田, 4 块试验田的面积分别为 0.072、0.081、0.079、0.080 hm^2 , 种植作物为玉米。利用 4 块长方形试验田的 4 个顶点的经纬度在遥感影像上进行查找, 再利用这 16 个像元的数据与田间实测值进行对比。

1) 采用铝盒烘干法测定土壤体积含水率, 每次在灌水前和灌水后, 每块地按照上、下游分别取土, 每层取 3 个重复, 测定深度为 1.0 m, 测点垂向间距 20 cm (20、40、60、80、100 cm 分层测量), 如果遇到有降雨时加测。

2) 播种前按 20、40、60、80、100 cm 分别取土, 做粒径分析试验测土壤质地, 得出试验区深度 0~60 cm 的土壤是粉砂壤土, 60~80 cm 的土壤是砂壤土。

3) 播种前用环刀按 20、40、60、80、100 cm 分别取土, 试验坑的两侧分别取土, 作为重复组, 测得每层土壤的体积质量为 1.616、1.589、1.414、1.443、1.493 g/m^3 。

4) 利用皮尺和游标卡尺测叶面积指数, 土右旗的主要经济作物是玉米, 按作物生育期测玉米的株高、径粗、大中小叶子的长、宽个数, 每个生育期测 1 次, 每块地呈“S”型测量。

5)降雨量通过气象数据来获得。

6)灌溉水量用电量来换算。

2 结果与分析

2.1 SEBAL 模型反演日腾发量的分析

图1、图2分别是2015年土右旗生育期(4—10月初)日腾发量的时空分布和频率分布图。从图1可以看出,日腾发量的取值范围在1.182~13.144 mm/d之间,时空分布图很好地反映了内蒙古包头市土默特右旗各个区域的日蒸散发情况。北部以低山、丘陵、高原等地貌结构为主,南部主要为平原^[14-15],所以土右旗腾发量具有明显的空间差异性,南部和中部的腾发量较北部略多。

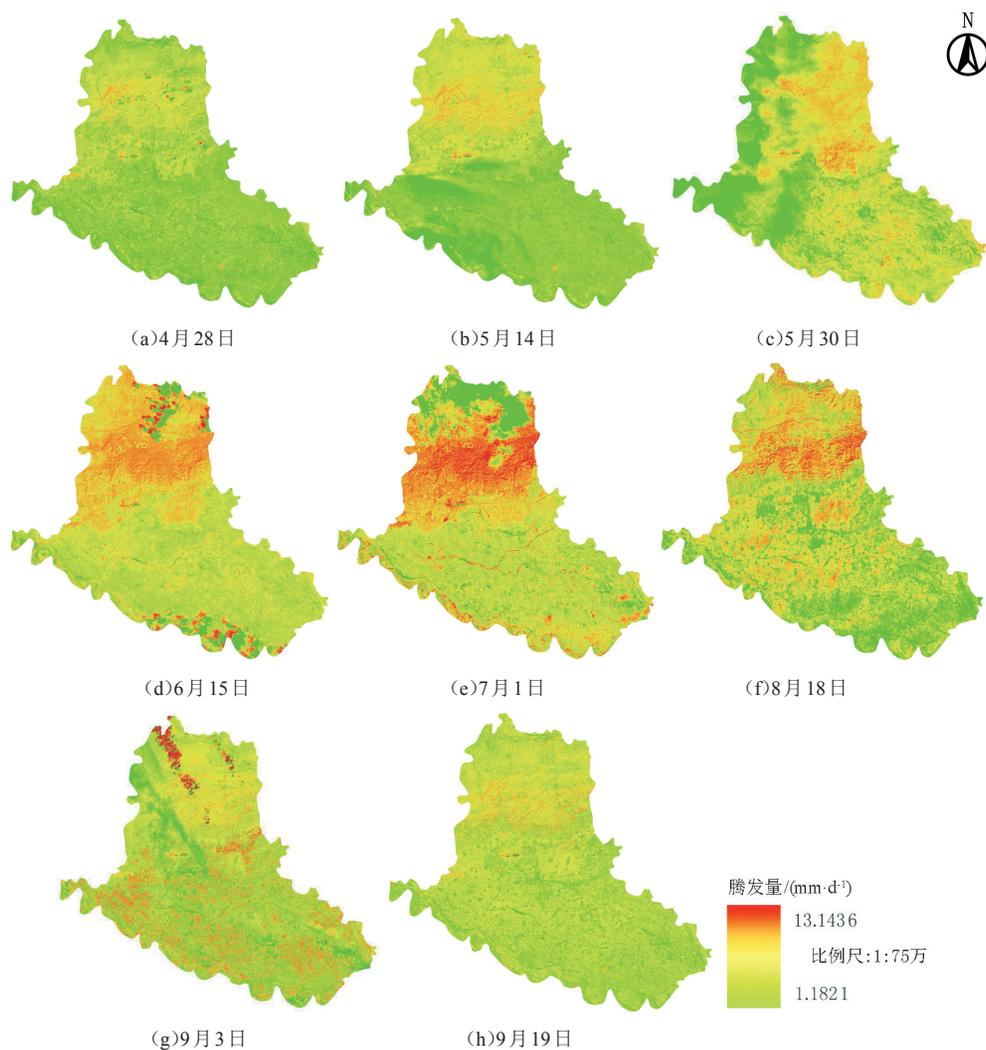


图1 2015年土右旗生育期日腾发量的时空分布

由图2可以看出,2015年4月28日, ET_{24} 在3~7 mm/d之间的像元数最多, ET_{24} 的均值为5.566 mm/d;5月14日, ET_{24} 在4.5~6.5 mm/d之间像元数最多,均值为5.668 mm/d;5月30日, ET_{24} 在5.0~9.0 mm/d之间像元数最多,均值为6.185 mm/d;6月15日 ET_{24} 在6.0~9.0 mm/d之间像元数最多,均值为6.751 mm/d;7月1日 ET_{24} 在5.0~9.0 mm/d之间像元数最多,均值为7.456 mm/d;8月18日 ET_{24} 在6.5~8.0 mm/d之间像元数最多,均值为7.011 mm/d;9月3日 ET_{24} 在5.0~6.5 mm/d之间像元数最多,均值为5.109 mm/d;9月19日 ET_{24} 在4.0~5.5 mm/d之间像元数最多,均值为4.354 mm/d。土右旗2015年生育期内日腾发量总体呈现出“先增加后降低”的趋势。4月气温逐渐回暖,万物复苏,大部分农田开始播种,腾发量开始逐渐增大;7、8月温度较高且降雨量和灌溉水量增多,土壤含水率较其他月份多,植被生长旺盛, $NDVI$ 值较大,因此腾发量增长速率较快,在8月左右达到最大值;9月以后温度逐渐下降,降雨和灌水量减少,土壤含水率降低,植被的生长状况下降,到10月初成熟,腾发量逐渐下降,符合内蒙古土右旗作物生长的规律。

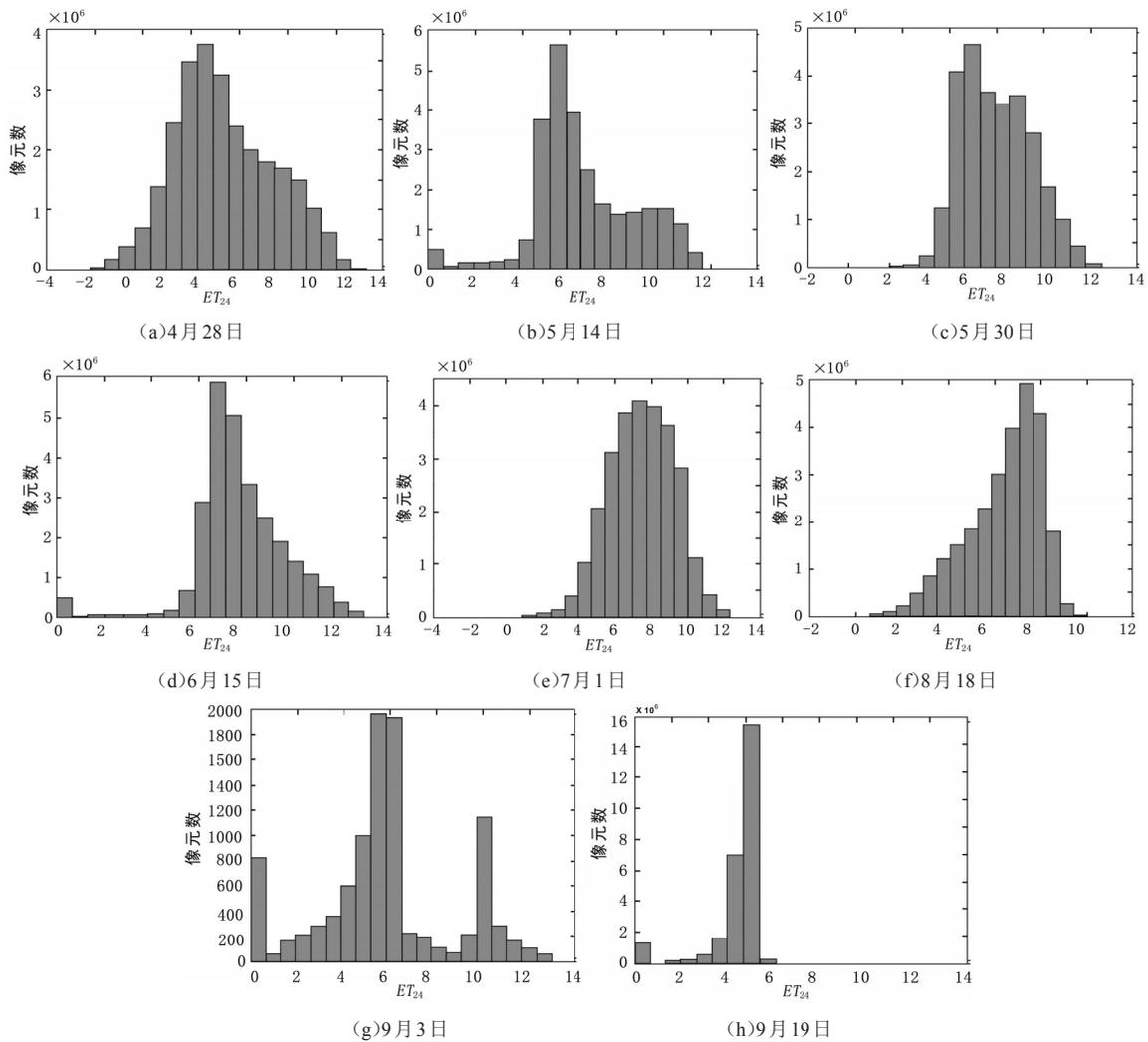


图2 2015年土右旗生育期日腾发量的频率分布

2.2 SEBAL 模型精度分析

腾发量是水循环过程中的重要部分,FAO Penman-Monteith方法是计算腾发量的唯一标准化方法,将水量平衡法估算得到腾发量的平均值分别与SEBAL模型反演出的日腾发量和Penman-Monteith公式计算值进行精度分析,可以更好地验证SEBAL模型在土右旗的适用性,检验结果见表2。

表2 SEBAL模型精度检验结果

日期	田间实测 ET	SEBAL模型		P-M公式	
		ET	相对误差/%	ET_c	相对误差/%
20150428	4.969	5.566	12.026	5.192	4.504
20150514	5.673	5.668	0.092	5.638	0.628
20150530	6.140	6.185	0.720	6.240	1.629
20150615	6.460	6.751	4.500	6.061	6.178
20150701	6.956	7.456	7.193	6.335	8.928
20150818	7.259	7.011	3.416	5.450	24.924
20150903	4.698	5.109	8.746	4.171	11.215
20150919	3.897	4.354	11.733	3.762	3.449
平均值			6.053		7.682

由表2可知, ET 的变化具有明显的季节性,春季和秋季腾发量较小,夏季居多,最大值一般出现在7—8月,呈现出明显的“山峰型”。2015年作物生育期6个月内SEBAL模型反演的腾发量与水量平衡法估算得到腾发量相比,相对误差在0.092%~12.026%之间,均值为6.053%;Penman-Monteith公式计算值与水量平衡法估算得到腾发量相比,相对误差在0.628%~24.924%之间,均值为7.682%。这是因为利用ENVI反演腾发量是基于每个像元的平均值,而且P-M公式也是基于土右旗气象数据的平均值,所以计算结果必然存

在一定的误差。但总体而言,无论是P-M公式还是SEBAL模型,与水量平衡法估算得到腾发量相比,相对误差的均值都在10%之内。除了4月和9月,SEBAL模型的相对误差均比Penman-Monteith公式的小,与水量平衡法估算得到腾发量相比,SEBAL模型的精度更高,说明在内蒙古包头市土右旗作物生育期内利用SEBAL模型来反演腾发量是合理的,在缺乏气象数据或作物系数的情况下,也可以便捷地估算出腾发量。

2.3 日腾发量与地表参数的相关性分析

影响腾发量的因素有很多,而且不同的参数影响程度也不同,将下载好的Landsat8遥感影像进行预处理后,反演了归一化植被指数(*NDVI*)、地表反照率、地表温度等相关地表参数,为了更好地反映其对日腾发量的影响,利用SPSS统计软件,对2015年4—9月的日腾发量进行了Pearson相关性分析,结果见表3。

表3 日腾发量与相关参数的相关性分析结果

参数	<i>ET</i> ₂₄	地表温度	地表反照率	<i>NDVI</i>
<i>ET</i> ₂₄	1	0.761*(0.028)	-0.408(0.315)	0.904**(0.002)

注 *表示在0.05水平(双侧)上显著相关;**表示在0.01水平(双侧)上显著相关;括号中数值代表显著水平;*N*=8。

从表3可以看出,*NDVI*和地表温度与*ET*₂₄均正相关,相关系数分别为0.904、0.761。且*NDVI*与*ET*₂₄的相关性更显著,通过了0.01水平的显著性检验,说明在水分充沛的情况下,植被生长旺盛,*NDVI*值较高,植被的生命体征明显,从而导致腾发量较大;当植被体内的水分不能满足需求时,气孔就会自动关闭以减少水分的散失,腾发量就会减少。地表温度是地表与大气进行热传导的重要因素,地表温度越高,向大气中传递的热量越多,腾发量就会越大,反之亦然。地表反照率与*ET*₂₄的相关性不明显。这一结论与倪猛等^[11]的研究结果一致,日腾发量与*NDVI*和地表温度的相关性最好,为蒸散发的研究提供了理论基础。

2.4 日腾发量与相关参数的逐步回归分析

逐步回归的实质是通过不断的筛选,将显著相关的变量选入回归方程,将影响不大的变量剔除,最终得到最优的方程^[6]。将2015年4—9月的*NDVI*、地表反照率、地表温度与*ET*₂₄进行多元逐步回归分析,得出*NDVI*和地表温度共同构建的回归方程为最优方程,地表反照率是剔除量,其中方差分析和系数分析中的*sig*均小于0.05,说明回归模型显著。最终得到的多元线性回归方程为:

$$\{y = 1.573 + 0.664x_1 + 0.454x_2, R^2 = 0.774, F = 21.535\}, \quad (6)$$

式中:*x*₁为地表温度;*x*₂为*NDVI*;常数项为1.573;回归系数*b*₁为0.664,*b*₂为0.454。经*T*检验,系数*b*₁和*b*₂的概率*p*值分别为0.001和0.010,按照给定的显著性水平0.10的情形下,均有显著性意义。所以说,*NDVI*和地表温度是研究区域腾发量的重要因素。

3 讨论

本研究得出,2015年土默特右旗生育期(4—10月初)内日腾发量总体呈现出“先增加后降低”的变化趋势,具有明显的空间差异性;与Penman-Monteith公式相比,SEBAL模型的精度更高,与郭玉川等^[10]、张楠楠等^[12]、魏强等^[17]研究得出的利用SEBAL模型反演蒸散发精度较高,且相对误差在10%以内的结果相同,说明在土右旗利用SEBAL模型估算腾发量是可行的。*ET*₂₄与*NDVI*和地表温度正相关,地表反照率没有通过显著性检验,与倪猛等^[11]得出蒸散发量与*NDVI*和地表温度相关性较好的结果一致。本研究结果满足精度要求,但是研究过程中仍然存在许多问题。Landsat8遥感影像对分辨率和云量的要求较高,卫星每16 d过境1次,但可以用于研究的影像很少,每月最多有1景。在选取“冷点”和“热点”的过程中,存在较多的人为因素,还要进行时间尺度的扩展,会导致误差增大。因此,在今后的研究中,从数据的选取到处理要更加严谨,逐步减小误差。虽然本研究反演得到的腾发量精度较高,但只选取了2015年的数据对内蒙古包头市土默特右旗进行了腾发量的估算,今后可以进一步将研究在时间和空间尺度上的扩展。

4 结论

1)土默特右旗日腾发量在1.182~13.144 mm/d之间,空间差异性较明显,北部最少,南部和中部较多。在作物生育期(4—10月),腾发量总体呈现出“山峰型”的趋势,最大值出现在8月左右。

2)SEBAL模型、Penman-Monteith公式计算得到的腾发量和水量平衡法估算得到腾发量相比,相对误差的平均值均在10%以内。说明在缺乏实测数据的情况下,利用SEBAL模型反演腾发量是可行的,且精度比

Penman-Monteith公式更高。

3) ET_{24} 与地表参数($NDVI$ 、地表温度)显著正相关,相关系数分别为0.904、0.761;与地表反照率相关性不显著。且由 $NDVI$ 和地表温度共同建立的多元线性回归方程是研究腾发量的最优方程。

参考文献:

- [1] 周彦昭,周剑,李妍,等. 利用SEBAL和改进的SEBAL模型估算黑河中游戈壁、绿洲的蒸散发[J]. 冰川冻土,2014,36(6):1 526-1 537.
- [2] 李宝富,陈亚宁,李卫红,等. 基于遥感和SEBAL模型的塔里木河干流区蒸散发估算[J]. 地理学报,2011,6(9):1 230-1 238.
- [3] 杨肖丽,任立良,袁飞,等. 利用SEBAL模型对沙拉沐沁河流域蒸散发的分析[J]. 干旱区研究,2010,27(4):507-514.
- [4] 杨肖丽,任立良,雍斌. 基于SEBAL模型的老哈河流域蒸散发研究[J]. 水电能源科学,2010,28(1):9-11.
- [5] 于文颖,纪瑞鹏,徐德增,等. 基于SEBAL模型的盘锦湿地日蒸散发估算及其分布特征[J]. 中国水土保持科学,2017,15(5):8-15.
- [6] JOHN D. Simplified versions for the Penman evaporation equation using routine weather data[J]. Journal of Hydrology,2006,331(3): 690-702.
- [7] DI Suchuang, LI Zhaoliang, TANG Ronglin, et al. Integrating two layers of soil moisture parameters into the MOD16 algorithm to improve evapotranspiration estimations[J]. International Journal of Remote Sensing,2015,36(19/20): 4 953-4 971.
- [8] 孙敏章,刘作新,吕谋超,等. 基于陆面能量平衡方程的遥感模型[J]. 灌溉排水学报,2005,24(3):74-76.
- [9] 周玲,张丽,许君一,等. 基于SEBAL模型的漓江流域蒸散量变化分析[J]. 水土保持研究,2015,22(4):332-337.
- [10] 郭玉川,董新光. SEBAL模型在干旱区区域蒸散发估算中的应用[J]. 遥感信息,2007(3):75-78.
- [11] 倪猛,陈波,岳建华,等. 洛河流域蒸散发遥感反演及其与各参数的相关性分析[J]. 地理与地理信息科学,2007,23(6):34-37,53.
- [12] 张楠楠,王文,王胤. 基于HJ-1B数据和SEBAL模型的陆面蒸散发遥感估算[J]. 地理空间信息,2013,11(5):69-73,12.
- [13] 曾丽红,宋开山,张柏,等. 应用Landsat数据和SEBAL模型反演区域蒸散发及其参数估算[J]. 遥感技术与应用,2008,23(3):255-263.
- [14] 柴玲,赵丽红,郑慧. 土默特右旗农村城镇化的土地利用研究[J]. 内蒙古科技与经济,2016(8):6-7.
- [15] 贾琦. 土默特右旗土地利用变化及其驱动力研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版),2009,37(S1):101-102.
- [16] 吕海燕,李海旺,李武林. 基于逐步回归分析的河南粮食产量因素研究[J]. 河南科学,2013,31(12):2 133-2 136.
- [17] 魏强,张吴平,吴亚楠,等. 基于SEBAL模型的小麦水分生产率研究[J]. 灌溉排水学报,2017,36(7):38-46.

Using the SEBAL Model to Calculate Evapotranspiration in Tumoteyouqi

SU Tingting, WEI Zhanmin*, BAI Yanying

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: 【Objective】Evapotranspiration is one of the most important processes in hydrological cycle and this paper evaluates the feasibility and accuracy of the SEBAL model to estimate it in Tumoteyouqi of Baotou, Inner Mongolia. 【Method】Using the Landsat8 remote sensing images taken during the crop growth season in 2015, the SEBAL model was established to estimate the evapotranspiration. The result was validated against that estimated using the FAO-recommended Penman-Monteith formula and water balance method respectively, based on the multivariate stepwise regression of the factors believed to affect evapotranspiration. 【Result】The daily evapotranspiration varied spatially, peaking in the mountainous areas. Compared with that calculated from the water balance, the average relative errors of the estimated evapotranspiration from the SEBAL model and the Penman-Monteith formula was 6.053% and 7.682% respectively. Daily evapotranspiration was significantly correlated to $NDVI$ and surface temperature, and we derived an optimal multivariate stepwise regression model to estimate the evapotranspiration. 【Conclusion】In the absence of ground-truth data, the SEBAL model can provide an accurate estimation of the evapotranspiration which was affected greatly by $NDVI$ and surface temperature.

Key words: remote sensing; SEBAL model; evapotranspiration; spatial variability; multiple stepwise regression

责任编辑:陆红飞