

# 基于 SEBAL 模型的疏勒河流域蒸散量时空动态

周妍妍<sup>1</sup>, 郭晓娟<sup>1</sup>, 郭建军<sup>2</sup>, 曾建军<sup>1</sup>, 陈冠光<sup>1</sup>, 邹明亮<sup>1</sup>, 岳东霞<sup>1</sup>

(1. 兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000;

2. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000)

**摘要:** 蒸散发(Evapotranspiration, ET)是重要的生态水文过程,尤其是在干旱和半干旱地区,对环境变化起着至关重要的作用。以疏勒河流域为例,利用 DEM, MODIS 和气象数据,基于能量平衡原理的 SEBAL(Surface Energy Balance Algorithms for Land)模型,运用 ArcGIS 软件在栅格尺度上反演出该流域的地表蒸散量,并探究其时空变化特征。结果显示:(1) 疏勒河流域 2000—2015 年 8 月基于栅格的地表多年平均日蒸散量变化范围为 0~8.52 mm,空间差异十分显著,从东南向西北呈现逐渐减少趋势,上游蒸散量大于中下游区域;(2) 2000—2015 年疏勒河流域大部分地区的 8 月份地表月蒸散量呈减小趋势;(3) 疏勒河流域 2000—2015 年 8 月份地表月蒸散量时空变异显著,中、上游地区蒸散量较大且时间稳定性差;(4) 2015 年 4 个月份地表月蒸散量变化显著(7 月>4 月>10 月>1 月),但其空间分布格局相似。研究蒸散量的时空动态定量评价结果对于疏勒河流域的环境模拟、气候变化研究、灌溉和水资源管理,以及深入了解我国干旱半干旱气候区水循环机理具有重要意义。

**关键词:** 蒸散量; SEBAL 模型; 时空变化; 疏勒河流域

中图分类号: P237

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)01-0168-10

## Spatiotemporal Dynamics of Evapotranspiration in Shule River Basin Based on SEBAL Model

ZHOU Yanyan<sup>1</sup>, GUO Xiaojuan<sup>1</sup>, GUO Jianjun<sup>2</sup>, ZENG Jianjun<sup>1</sup>,  
CHEN Guanguang<sup>1</sup>, ZOU Mingliang<sup>1</sup>, YUE Dongxia<sup>1</sup>

(1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000,  
China; 2. Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of  
Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Evapotranspiration (ET) is an important ecological hydrological process, especially in arid and semi-arid areas, which plays a vital role in environmental change studies. Based on the energy balance principle SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) model in Shule River Basin with DEM, MODIS and meteorological data, we applied ArcGIS software to estimate the ET value of the basin based on the grid scale, and explored characteristics of temporal and spatial variation of ET. The results showed that: (1) the spatial variation range of mean daily ET values in August was 0~8.52 mm on the grid of over Shule River Basin during the period from 2000 to 2015, which had a significant difference in spatial patterns; SEBAL model also showed that spatial patterns of mean daily ET gradually decreased from the southeast to the northwest of Shule River Basin, and that the mean daily ET in the upper reaches of Shule River was greater than ET in the middle and lower reaches of Shule River; (2) the monthly ET of August in 2000—2015 showed the decreasing tendency in most areas over Shule River Basin; (3) the monthly ET and the time stability of value of August in the middle and upper reaches in 2000—2015 were higher than those in the lower reaches, and the spatial difference was significant; (4) the monthly ETs of the four months in 2015 changed significantly, the value

收稿日期: 2018-01-16

修回日期: 2018-03-20

资助项目: 甘肃省国际科技合作专项(1604WKCA002); 国家自然科学基金(41671516; 41701623); 甘肃省软科学专项(1504ZKCA090-1); 中科院西北生态环境资源研究院青年人才成长基金

第一作者: 周妍妍(1992—), 女, 河北邯郸人, 在读硕士研究生, 主要从事生态安全评价研究。E-mail: yzzhou16@lzu.edu.cn

通信作者: 岳东霞(1969—), 女, 陕西宝鸡人, 博士, 教授, 主要从事生态安全评价研究。E-mail: dxyue@lzu.edu.cn

decreased in the order: July>April>October>January, and ETs had similar spatial pattern. The quantitative evaluation on temporal and spatial dynamic of ET has an important significance for the environmental simulation, climate change research, irrigation and water resources management in Shule River Basin in order to gain a better understanding of the mechanism of water cycle in arid and semiarid climate zone.

**Keywords:** evapotranspiration; SEBAL model; spatial and temporal variation; Shule River Basin

蒸散发(ET)是地表水分和能量平衡的重要组成部分,也是地球水文循环及气候调节的主要环节。地表蒸散量的估算不仅是流域水资源评价、管理和调控,以及农业的管理的重要依据,而且它的变化还影响区域和全球的水文循环。

蒸散量的估算方法有土壤水量平衡法、蒸渗仪法、波文比法—能量平衡法、空气动力学法、涡度相关仪法和闪烁通量仪法等<sup>[1]</sup>,但普遍存在计算的尺度范围小,工作量大等缺点。20世纪60年代以来,随着遥感技术的发展,定量估算大尺度区域的地表蒸散量成为可能,例如基于地表温度和植被指数二维关系的三角形/四边形模型、SEBAL(Surface Energy Balance Algorithms for Land)、SEBS(Surface Energy Balance System)、SSEB(Simplified Surface Energy Balance)、METRIC(Mapping Evapotranspiration at high resolution with internalized calibration)等<sup>[2]</sup>。其中,1998年由 Bastiaanssen 等<sup>[3]</sup>提出的 SEBAL 模型是当前应用较广的模型之一,其具有坚实的物理基础,所需参数较少,能较好的应用于不同的植被类型和气候条件下的优点,可进行区域长时间大尺度的地表蒸散量计算。该模型是利用多光谱遥感影像、气象数据和地表参数,建立在地表能量平衡公式基础上,基于栅格尺度对研究区域进行蒸散量估算的模型<sup>[4]</sup>。近年来,国内外学者已开始利用 SEBAL 模型在干旱区开展内陆河流域的地表蒸散量反演研究,如:Almhab<sup>[5]</sup>和 Kiptala<sup>[6]</sup>等应用 SEBAL 模型分别计算阿拉伯半岛和东非地区干旱区的地表蒸散量,研究表明 SEBAL 模型可以高精度的模拟干旱区的蒸散发。Ma<sup>[7]</sup>、乔平林<sup>[8]</sup>、马宏伟<sup>[9]</sup>、刘春雨<sup>[10]</sup>等利用该模型对石羊河流域的蒸散量遥感反演进行了研究;Li<sup>[12]</sup>、周彦昭<sup>[12]</sup>、曾成强<sup>[13]</sup>、张万昌<sup>[14]</sup>、邓志民<sup>[15]</sup>等人应用该模型对黑河流域蒸散量进行反演。Chang<sup>[16]</sup>等对疏勒河上游2010年三天蒸散量的时空差异进行了分析,程锦奎等<sup>[17]</sup>对疏勒河上游山区的蒸散量的3种研究方法进行比较。吕晓东等<sup>[18]</sup>研究1961—2008年河西内陆流域参考作物蒸散量,取得了初步的研究成果。然而,目前国内外对我国干旱区内陆流域蒸散发的研究,多集中于不同月份、季节空间的分布格局方面,尚缺乏对流域的长时间尺度的地表蒸散量的

反演及时空格局的研究,尤其是对地处我国干旱区腹地的甘肃河西走廊三大内陆河之一的疏勒河流域研究较少,急需开展深入的研究。

本文针对疏勒河流域长时间尺度的蒸散量时空变化研究的不足,以遥感为主要技术手段,基于该流域2000—2015年八月份和2015年1月、4月、7月、10月4个月份(分别代表春夏秋冬四季)遥感数据产品和地面气象观测数据,利用 SEBAL 模型反演该流域地表实际蒸散量,并深入分析其年际和年内的时空变化特征,以期揭示该流域水文循环和能量转换规律,为流域基于地表蒸散量的水资源利用管理、农作物旱情监测和预警等提供科学依据。

## 1 研究概况区

疏勒河流域地处我国西北干旱区腹地,位于 $93^{\circ}22'—98^{\circ}59'E, 38^{\circ}1'—42^{\circ}47'N$ ,流域面积约 $1.25 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,是甘肃河西走廊三大主要内陆河流域之一。疏勒河是干流,长约670 km,主要有党河、白杨河、石油河、榆林河及阿尔金山北麓的长草沟、鄂博沟、洪水沟等诸支流。该流域是典型的以高山冰雪融水与山区降水补给为主的内陆河流域。上游祁连山区山势陡峭,水丰流急,分布有典型的大陆性冰川,同时也发育大面积多年冻土,是整个流域的水源涵养区和产流区。中、下游地势平坦,绿洲与荒漠并存,生态环境极为脆弱。该流域属于大陆性荒漠型气候,风沙大,气候干旱,年降水量呈现由上游向下游、东南向西北明显的降低趋势,上游山区最大降雨量可达410 mm以上,而大范围的中、下游荒漠区降水则小于30 mm,全流域多年平均降水量仅为47~63 mm,而年蒸发量高达3 000 mm,成为甘肃省干旱程度最严重的地区之一<sup>[19]</sup>。但该流域水资源利用量大,效率低下,具体表现为疏勒河各灌区农业灌溉及工业用水利用率已超过90%。而且流域农业用水浪费严重,地下水开采过度,土地次生盐渍化加剧。流域农业产业结构不合理,从而导致水资源经济效益也非常低,农业水资源GDP不足15元/ $\text{m}^3$ ,低于全国平均水平<sup>[20]</sup>。流域内有享誉国际的敦煌莫高窟、月牙泉、阳关和玉门关遗址等世界文化遗产,是我国“一带一路”发展战略实施的重要节点区域。因此,开展该流域地表蒸散量时空格局研究对于该流域

经济可持续发展具有重要意义。

2 研究方法 with 数据处理

2.1 SEBAL 模型计算原理及参数确定

2.1.1 基本原理 太阳辐射是地表能量交换的基础，当辐射能量经大气削弱之后到达地表，其能量主要作用是加热空气与土壤以及促进水分蒸发，其表达式如下：

表 1 SEBAL 模型参数计算公式

参数	计算公式	参数说明
地表净辐射通量 $R_n$ <sup>[21]</sup>	$R_n = (1 - \alpha)R_{s\downarrow} + (R_{L\uparrow} - R_{L\downarrow}) - (1 - \epsilon)R_{L\uparrow}$	$R_n$ 为地表净辐射通量 ( $W/m^2$ ); $R_{L\uparrow}$ 为向上的长波辐射 ( $W/m^2$ ); $R_{L\downarrow}$ 为向下的长波辐射 ( $W/m^2$ ); $R_{s\downarrow}$ 为向下的短波辐射 ( $W/m^2$ ); $\alpha$ 为地表反照率; $\epsilon$ 为地表比辐射率
地表比辐射率	$\epsilon = 1.009 + 0.047 \ln(NDVI)$	植被指数 NDVI; 遥感数据 MOD13A2, 式中 $NDVI > 0$ , 否则 $\epsilon = 0$
向上的长波辐射 $R_{L\uparrow}$	$R_{L\uparrow} = \epsilon \sigma T_s^4$	$\sigma$ 是斯蒂芬—玻尔兹曼常数, 取值为 $5.67 \times 10^{-8} W/m^2$ ; 地表温度 $T_s$ ; MOD11A2
向下的长波辐射 $R_{L\downarrow}$	$R_{L\downarrow} = \epsilon_a \sigma T_a^4$	$\sigma$ 是斯蒂芬—玻尔兹曼常数, 取值为 $5.67 \times 10^{-8} W/m^2$ ; 下垫面空气温度; 气象数据
大气比辐射率 $\epsilon_a$	$\epsilon_a = 1.08 (-\ln \tau_w)^{0.265}$	$\tau_w = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times Z$ , $Z$ 为海拔高度, 可从 DEM 数据总获得; $\tau_w$ 为大气透射率
向下的短波辐射 $R_{s\downarrow}$	$R_{s\downarrow} = G_{sc} \cos \theta \tau_w$	$\cos \theta$ 为太阳天顶角的余弦
太阳天顶角余弦 $\cos \theta$	$\cos \theta = \cos \left( \frac{\pi}{2} - \varphi \right)$	此公式用于地表平坦的区域, $\varphi$ 为太阳高度角 (弧度)
太阳天顶角余弦 $\cos \theta$	$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi \cos s - \sin \delta \cos \varphi \sin s \cos \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos s \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin s \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \varphi \sin s \sin \omega$	此公式用于非均匀地表的区域, $\delta$ 为太阳赤纬; $\varphi$ 为纬度; $s$ 为坡度; $\gamma$ 为坡向; $\omega$ 为太阳时角
日地距离因子 $d_r$	$d_r = 1 + 0.033 \cos \left( DOY \frac{2\pi}{365} \right)$	DOY 为一年中的日期天数; 角 $DOY \frac{2\pi}{365}$ 为弧度
土壤热通量 $G$	$G = 0.538 R_n \exp(-2.03 NDVI)$ <sup>[22]</sup> (2) $G = R_n - 90$ <sup>[23-24]</sup> (3)	NDVI 为归一化植被指数; $R_n$ 为地表净辐射通量 ( $W/m^2$ )。式 (2) 用于植被覆盖地区和非植被覆盖地区; 式 (3) 用于地表大面积水域
感热通量 $H$ <sup>[25]</sup>	$H = (\rho C_p d_T) / r_a$	$\rho$ 为空气密度 ( $kg/m^3$ ); $C_p$ 空气定压比热 [ $J/(kg \cdot K)$ ], 通常取常数 1004 $J/(kg \cdot K)$ ; $\rho C_p$ 为空气的体积热容量; $d_T$ 为距离地面高度 $Z_1$ 和 $Z_2$ 处的温度差, 通常取 0.01 m 和 2 m, 即遥感影像地表温度和 2 m 处的空气温度的差值 ( $K$ ); $\gamma_a$ 为热量传输的空气动力学阻抗 ( $s/m$ )
空气动力学阻抗 $\gamma_a$	$r_a = 4.72 [\ln(Z/Z_0)]^2 / (1 + 0.54 U_2)$	$Z$ 为参考高度, 取值 2 m; $U_2$ 为 2 m 高度处的风速; $Z_0$ 为粗糙长度
粗糙长度 $Z_0$	$Z_0 = \exp(a NDVI + b)$	$Z_0 = 0.123 h$ , $h$ 为植被高度, 建立样本变量, 求出式中的常数 $a, b$ 拟合出地表粗糙度和 NDVI 关系, 得到基于像元 $Z_0$
2 m 风速 $U_2$	$U_2 = \frac{4.78 U_z}{\ln(67.8 Z_m - 5.12)}$	$U_z$ 为气象数据 10 m 高度风速, $U_2$ 为 2 m 高度处的风速, $Z_m$ 为实测风速高度 (10 m)
全天的日蒸散量 $ET_{24}$ <sup>[26]</sup>	$ET_{24} = 86400 \Delta (R_{n24} - G_{24}) / \lambda$	$ET_{24}$ 为日蒸散量 ( $mm/d$ ); $G_{24}$ 为全天土壤热通量 ( $W/m^2$ ); $R_{n24}$ 为全天地表净辐射通量 ( $W/m^2$ ); $\Delta$ 为日蒸发比
全天总净辐射量 $R_{n24}$	$R_{n24} = (1 - \alpha) R_{a24} \tau_w - 110 \tau_w$	$R_{n24}$ 为全天总辐射
全天总辐射 $R_{a24}$	$R_{a24} = \frac{G_{sc}}{\pi d_r} [\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s]$	$d_r$ 为日地距离; $\varphi$ 为纬度; $\delta$ 为太阳赤纬; $\omega_s = \arccos[-\tan \varphi \tan \delta]$
全天总土壤热通量 $G_{24}$		由于土壤白天吸收的能量基本上等于晚上释放的能量, 故对于植被和土壤表面 $G_{24} \approx 0$ ; 但由于水体的储热能力强, 所以水体的 $G_{24} \neq 0$

遥感蒸散量反演结果需进行验证和精度检验，一般采用一些定量的指标来验证遥感估算成果。根据前人经验<sup>[27]</sup>，本研究采用基于气象观测数据的 Penman-Monteith 模型估算的日蒸散量对遥感反演结果

$$\lambda ET = R_n - G - H \tag{1}$$

式中:其中  $\lambda$  为潜热蒸发系数 [ $W/(m^2 \cdot mm)$ ];  $\lambda ET$  为潜热通量 ( $W/m^2$ );  $ET$  蒸散量 ( $mm$ );  $R_n$  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 ( $W/m^2$ )。

2.1.2 模型参数确定及其公式 (具体参数计算公式见表 1) SEBAL 模型中需要输入地表净辐射通量  $R_n$ , 土壤热通量  $G$ , 感热通量  $H$  重要参数。

进行对比检验。

2.2 Penman-Monteith 模型

1998 年,联合国粮食及农业组织提出并推荐使用 Penman-Monteith(简称 PM)模型计算蒸散量,其

计算模型为<sup>[28]</sup>:

$$ET_0 = K_c \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \quad (4)$$

式中:  $ET_0$  为日蒸散量(mm/d);  $K_c$  为作物系数, 本文取值 0.4;  $R_n$  为作物表层净辐射[MJ/(m<sup>2</sup>·d)];  $G$  为土壤热通量[MJ/(m<sup>2</sup>·d)];  $\gamma$  为干湿表常数(kPa/°C);  $T$  为日平均气温(°C);  $u_2$  为 2 m 高度处风速(m/s), 可由 10 m 高度风速计算得到(表 1);  $\Delta$  为饱和水汽压曲线斜率(kPa/°C);  $e_s$  为饱和水汽压(kPa);  $e_a$  为实际水汽压(kPa)。

### 2.3 地表蒸散量年际变化分析方法

利用最小二乘法, 计算流域每个栅格 2000—2015 年八月份地表月蒸散量的变化速率, 计算公式为:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n i \times ET_i - (\sum_{i=1}^n i)(\sum_{i=1}^n ET_i)/n}{\sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2/n} \quad (5)$$

式中:  $K$  为每个栅格八月份地表月蒸散量的变化速率(mm/a);  $n$  为研究时段, 总年数为 16;  $ET_i$  为第  $i$  年的 8 月份地表月蒸散量。  $K$  值为正表示近 16 a 来 8 月份流域月蒸散量增加趋势, 值越大增加的趋势越明显。  $K$  为负表示地表蒸散量呈减少趋势, 值越小减少趋势越明显。利用 ArcGIS 软件输出疏勒河流域年变化速率空间分布结果。

### 2.4 地表蒸散量时空变异性分析方法

平均相对偏差法(mean relative difference plot) 由 Vachaud 等<sup>[29]</sup>于 1985 年首先提出, 是空间差异性分析应用最为广泛的一种方法。

平均相对偏差定义如下:

$$\bar{\delta}_i = \frac{1}{t} \sum_{j=1}^t \frac{S_{i,j} - \bar{S}_j}{\bar{S}_j} \quad (6)$$

式中:  $\bar{\delta}_i$  表示  $i$  栅格的平均相对偏差;  $j$  表示时间;  $i$  表示栅格点, 则  $S_{i,j}$  表示整个区内第  $i$  个栅格  $j$  日期的蒸散量反演值。  $\bar{S}_j$  表示  $j$  日期研究区内所有栅格月蒸散量的平均值。  $t$  表示计算的时间年数。平均相对偏差的标准差定义如下:

$$\sigma(\delta_i) = \sqrt{\frac{1}{t-1} \sum_{j=1}^t \left( \frac{S_{i,j} - \bar{S}_j}{\bar{S}_j} - \bar{\delta}_i \right)^2} \quad (7)$$

其中,  $\sigma(\delta_i)$  是平均相对偏差的标准差, 在公式(6)的基础上计算。该值越小, 则数据的波动越小, 表示该栅格蒸散量的时间稳定性越高; 反之, 时间稳定性就越低。

### 2.5 数据来源与处理

利用 SEBAL 模型开展流域地表蒸散量反演, 需

要的基础数据包括: 数字高程数据、遥感数据和气象数据。其中, 数字高程数据(DEM)来自于中国地理空间数据云的数字高程数据产品, 其空间分辨率是 30 m。地表温度、地表反照率和植被指数等遥感数据选用 Terra, Aqua 卫星数据, 包括 1 km 分辨率的地表温度 L3 产品(MOD11A2), 1 km 分辨率的 16 d 合成地表反照率 L3 产品(MCD43B3)和 1 km 分辨率的 16 d 合成植被指数(NDVI)产品(MOD13A2)。由于研究区遥感影像的质量限制, 尤其是一月和四月有大面积的无效值, 无法下载连续 12 个月份完整的影像数据。且已有研究表明, 夏季蒸散发变化趋势的空间分布与年蒸散发变化趋势的空间分布较一致, 且年蒸散发的变化趋势主要由夏季蒸散发变化趋势主导<sup>[30]</sup>。经综合分析 16 a 来该地区遥感影像的质量, 本文最终选择该流域反演遥感质量整体较好的 8 月份的蒸散量作为夏季的代表, 分析年际蒸散量的时空变化。因此, 选择下载了 2000—2015 年每年的 8 月和 2015 年 1 月、4 月、7 月、10 月云层覆盖度低、质量好的影像数据。相应时段的温度、风速、日照时数、压强等气象数据来自位于研究区的国家气象局国家气象站点(马鬃山, 敦煌, 安西, 玉门镇国家气象站点); 近地面气温、地表气压、近地面 10 m 风速等数据来自中国科学院寒区旱区科学数据中心, 其空间分辨率为 10 km, 时间分辨率为日。所有的输入参数需统一为相同的投影坐标和 1 km 空间分辨率。本文利用 ArcGIS 软件通过 SEBAL 模型计算出流域净辐射通量、土壤热通量和感热通量, 从而计算出 2000—2015 年八月和 2015 年 4 个月份的日蒸散量, 累积计算得到月蒸散量<sup>[31]</sup>(由于运算误差, 小于 0 的值忽略)。2015 年土地利用类型数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>), 其空间分辨率为 30 m。

## 3 结果与分析

### 3.1 SEBAL 模型精度评价

本文选取位于疏勒河流域的 4 个国家气象站(马鬃山站, 敦煌站, 安西站, 玉门镇站)的气象观测数据, 利用 PM 模型(公式 4)计算得到 2000—2015 年 8 月 4 个站点的地表日蒸散量, 并与基于 SEBAL 模型的遥感反演结果进行精度检验<sup>[32]</sup>(表 2)。结果显示, SEBAL 模型反演结果与 PM 模型计算结果的平均相对误差为 4.18%。PM 模型较适用于地表植被结构单一且天气条件稳定的区域, 然而由于地理位置、气候条件和植被类型的差异, 不同站点 SEBAL 模型反演结果与 PM 模型计算结果的相对误差相差较大。其中玉门镇和敦煌站的相对误差最小, 而安西站的农

田周围分布有城乡建筑用地,且距离较近,造成遥感影像的混合像元问题,影响遥感反演的精度。马鬃山站位于流域北部的干旱地区,多大风沙尘天气,且昼夜温差大,天气状况不稳定,导致误差较大。总体来说,本文结果与其他研究者用此模型计算结果精度相近且误差在可接受范围之内,表明该模型在本研究区的适用性较好,结果可信,可以用于后续流域蒸散量的时空格局分析。

表 2 SEBAL 模型估算日蒸散量与 FAO(PM)方法对比

站点	经度	纬度	SEBAL 模型/ (mm·d <sup>-1</sup> )	PM 模型/ (mm·d <sup>-1</sup> )	模型平均 相对误差/%
马鬃山	41.80°	97.03°	2.00	1.88	2.26
敦煌	40.15°	94.68°	3.46	3.50	0.78
安西	40.53°	95.77°	3.81	3.31	13.24
玉门镇	40.27°	97.03°	3.19	3.13	0.44

3.2 疏勒河流域 2000—2015 年八月地表平均日蒸散量空间分布特征

由图 1 可知,疏勒河流域每一个栅格 2000—2015 年 16 a 间 8 月地表的平均日蒸散量取值在 0~8.52 mm,全流域多年平均日蒸散量为 1.96 mm。流域上游地区蒸散量为本流域最大,中游城乡地区由于农业用地灌溉,蒸散量也较大。中下游地区整体蒸散量小于上游地区,尤其是荒漠戈壁地区蒸散量为本区最小,接近于 0 mm,主要分布于敦煌的西部,瓜州的北部和北部肃北等地区。地表植被空间格局决定了地表蒸散量的空间分布特征,而气温和降水是影响地表生态系统物质和能量循环的关键气象因子,其中降水是水汽传输的主要物质来源,气温则深刻地影响着植物冠层气孔导度和土壤表面水分蒸发等过程。由

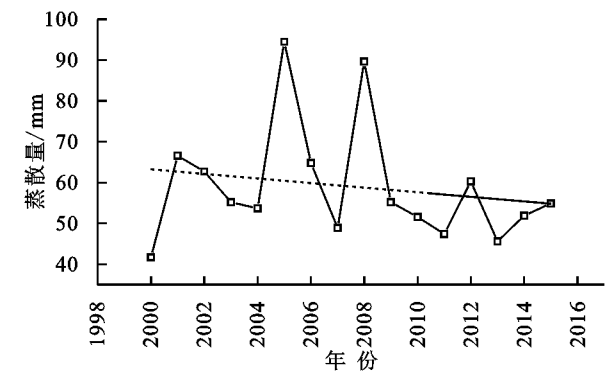


图 2 疏勒河流域的 2000—2015 年八月份地表月蒸散量、月均温和总降水量的变化趋势

本文进一步计算了近 16 a 来 8 月份基于栅格的地表月蒸散量的变化速率(记为  $K$ , mm/a)。结果如图 3 所示,疏勒河流域各栅格  $K$  值范围大致为  $-7\sim 7$  mm/a,空间差异明显,其中,  $K>0$  的区域占流域总面积的 15.72%,  $K<0$  的区域占总流域的 84.28%。本文根据  $K$  值范围定义了变化速率的不同等级,包

于疏勒河流域由上游东南部山区过渡到中部的农业再到北部山区,地表植被类型存在明显差异,降水量逐渐降低,干旱化的程度逐渐增强,因此在植被类型及其分布格局、气候条件、土壤供水状态等因素的综合影响下<sup>[33]</sup>,疏勒河流域地表蒸散量的估算结果表现出明显的空间分异特性。

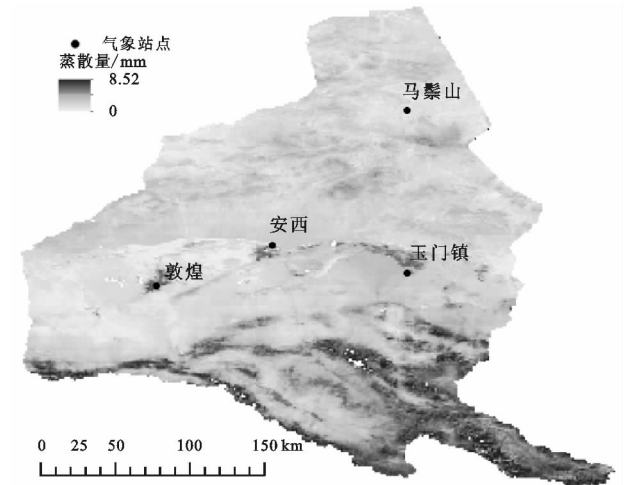
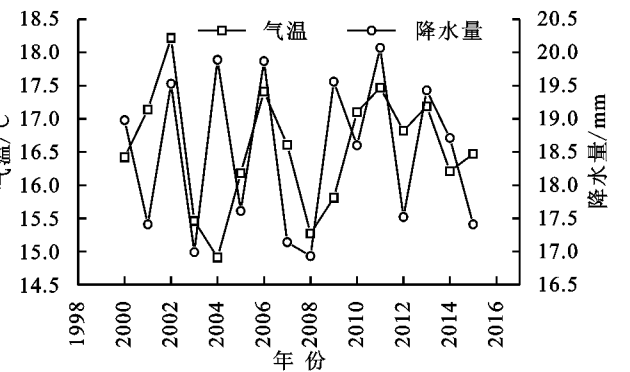


图 1 疏勒河流域 2000—2015 年 8 月地表平均日蒸散量空间分布

3.3 疏勒河流域 2000—2015 年 8 月份地表月蒸散量时间变化特征

由图 2 可知疏勒河流域 8 月份地表月蒸散量、月均温和月降水总量的 16 a 间的变化过程。其中,疏勒河流域 16 a 来,8 月份的地表月蒸散量变化呈波动下降趋势,平均下降为 0.56 mm/a。而在此期间全流域月均温呈上升趋势,月总降水量呈下降趋势,说明该流域同期气候呈干旱化趋势,而导致该流域土壤水分整体减少,蒸散量也呈减少趋势<sup>[34]</sup>。



括显著增加 ( $K>2$  mm/a)、轻微增加 ( $0.2<K\leq 2$  mm/a)、基本不变 ( $-0.2\leq K\leq 0.2$  mm/a)、轻微减少 ( $-2\leq K<-0.2$  mm/a)、显著减少 ( $K<-2$  mm/a)。结果显示,显著增加的区域占流域总面积的 0.52%,主要分布于下游地区的昌马、双塔、花海、党河四大灌区,该区为疏勒河流域农田最为集中的区域。16 a 来

该区域随着耕地的扩张<sup>[35]</sup>,灌溉量的增加,导致地表蒸散量整体呈显著的增加趋势。轻微增加的区域占流域总面积的 9.33%,主要分布于疏勒河中上游山区。究其原因,其一由于全球变暖,气温升高,高山冰川融化量增大,使该区地表直接受益,可用于蒸散发的水量增多<sup>[36]</sup>;其二,从 2003 年开始,位于本区的南部肃北为国家实施的生态保护项目“退牧还草”工程项目的试点县,植被覆盖度增加<sup>[37]</sup>,导致了该区域蒸散量呈轻微增加的态势。多年基本不变的区域占流域总面积的 11.83%,其主要分布在上游各条现代冰川上、山区高寒草地与荒漠过渡区、以及北部肃北部分地区,这些区域是受人类工农业生产影响较小且植被盖度稳定的区域。轻微减少的区域占 77.97%,其分布最为广泛,主要为中、下游大面积的荒漠戈壁区,主要是由于全球变暖的影响,局地气温波动上升,该流域已呈现明显的干旱化趋势,戈壁荒漠植被稀疏,对气候变化非常敏感,而导致蒸散量有所下降。显著减少的区域占流域总面积的 0.35%,其分布最少,零星分布于绿洲外围,敦煌绿洲及其周边区域最为明显,这是由于上游灌溉面积扩大且灌溉方式以漫灌为主,直接导致下游地下水补给量减少,使得分布于敦煌绿洲周边的植被不断萎缩和退化;下游西湖保护区生态系统的严重萎缩与退化加快了敦煌人工绿洲边

缘的沙漠化进程<sup>[38]</sup>。上游山区德令哈市和天峻县也有极小部分区域蒸散量显著减少,这是由于人类的放牧、开矿、修建道路等活动对草地造成破坏,植被覆盖度降低<sup>[39]</sup>,蒸散量显著减少。

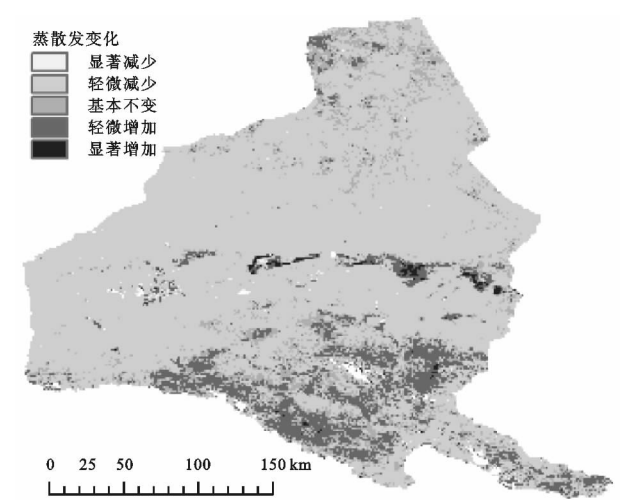


图 3 疏勒河流域 2000—2015 年 8 月份地表月蒸散量年际变化

3.4 疏勒河流域 2000—2015 年 8 月地表月蒸散量时空变异特征分析

根据式(6—7)利用 ArcGIS 软件对蒸散量的栅格数据计算,分别制成 2000—2015 年 8 月份地表月蒸散量相对偏差和相对偏差标准差图。

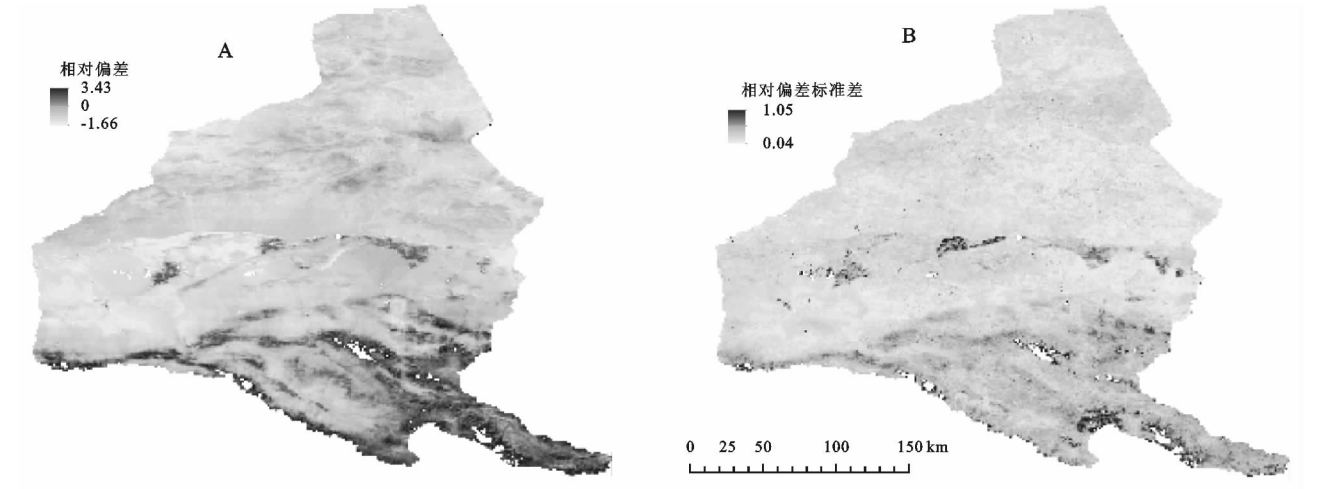


图 4 疏勒河流域 2000—2015 年八月基于栅格的月蒸散量平均相对偏差及其标准差

由图 4A 可得疏勒河流域 16 a 间 8 月基于栅格的月蒸散量平均相对偏差值空间分布范围为-1.66~3.43。全流域的月蒸散量平均相对偏差空间分布差异非常明显,说明该流域 8 月份月蒸散量空间差异较大。其中,正值占全流域总面积的 32.20%,较大值地区主要集中在疏勒河上游山地和中下游的绿洲灌溉区,说明该区 8 月份地表月蒸散量值相对较大,且高于全流域月蒸散量平均值。相对偏差为负值区域占全流域总面积的 67.80%,主要分布于中下游荒漠戈壁区,说明该区域

8 月份地表月蒸散量相对较小,且低于全流域月蒸散量平均值。总体来讲,蒸散量低于平均值区域的面积明显要大于蒸散量高于平均值区域的面积,然而蒸散量高出平均值的范围大于低于平均值的范围,说明全流域蒸散量较小且不同区域差别较大。

如图 4B 显示,疏勒河流域 16 a 来 8 月份地表月蒸散量平均相对偏差标准差呈现明显的空间异质性,说明 16 a 间该流域地表蒸散量的时间稳定性存在明显的空间差异,且与平均相对偏差的空间分布特征相

似。高波动区域主要为上游山区和中下游绿洲灌区。上游地区植被类型主要是草地,植被生长受气候变化的影响较大,时间稳定性差<sup>[40]</sup>。中下游绿洲区灌区受农田种植结构和种植品种的调整的影响<sup>[41]</sup>,地表水热状况时常发生变化,会导致蒸散量波动较大,时间稳定性也较差。而低波动区域则连片分布于流域的荒漠戈壁地区,该区域植被稀疏或无植被生长<sup>[42]</sup>,地表可蒸散发的水分较少,时间稳定性强。

### 3.5 疏勒河流域 2015 年地表月蒸散量年内时空变化特征

受太阳辐射量、温度、降水、风速、土壤水分等环境因子以及农耕活动的影响,疏勒河流域不同季节间基于栅格尺度的地表蒸散量值差异十分明显,但其空间分布格局较为相似(图 5),整体上从流域的东南部向西北部逐渐减小,上游地表蒸散量均大于疏勒河下游地表蒸散量。但每个季节的蒸散量空间分布都存在明显异质性,其中全流域 7 月份的蒸散量的空间异质性最为显著,4 月和 10 月次之,1 月流域蒸散量的空间异质性最小,上游山区和农业用地的蒸散量稍高。主要是由于全流域的气温都较低,降水少,地表

覆被条件差,蒸散量较为均一。然而上游山区和农业用地属于原植被覆盖区,土壤较湿润,有利于蒸发。四月流域蒸散量的空间异质性较为明显,上游高海拔山区的蒸散量远远大于中、下游地区。其原因可能是春季天气转暖,随着气温的逐渐升高,上游高海拔山区的积雪开始融化,该地区水分比较充足<sup>[43]</sup>。同时由于这一时期绿洲区植被覆盖度增加,中、下游绿洲地区和沙漠地区的蒸散量差别较明显。7 月流域蒸散量的空间异质性最为显著,植被覆盖区的蒸散量明显高于裸地及荒漠,高山冰雪区蒸散量为本区最大。这是由于夏季气温为全年最高,高山冰雪加速融化,且是植被生长的旺季,植被覆盖区的蒸散量大大增加,远高于非植被覆盖区的裸地和荒漠,蒸散量达到最大值。10 月流域蒸散量的空间异质性较小,上、中、下游区域的蒸散量差距缩小,上游高海拔山区蒸散量依旧是该时期全流域蒸散量最大的地区。由于此时日照时间缩短导致净辐射通量减小,植被覆盖地区的面积大大减少,下垫面条件比较一致,原来中下游植被覆盖程度较好的区域与裸地和沙漠覆盖区域蒸散量的差异降低,然而上游山区土壤湿度大,地表蒸散量仍较大。

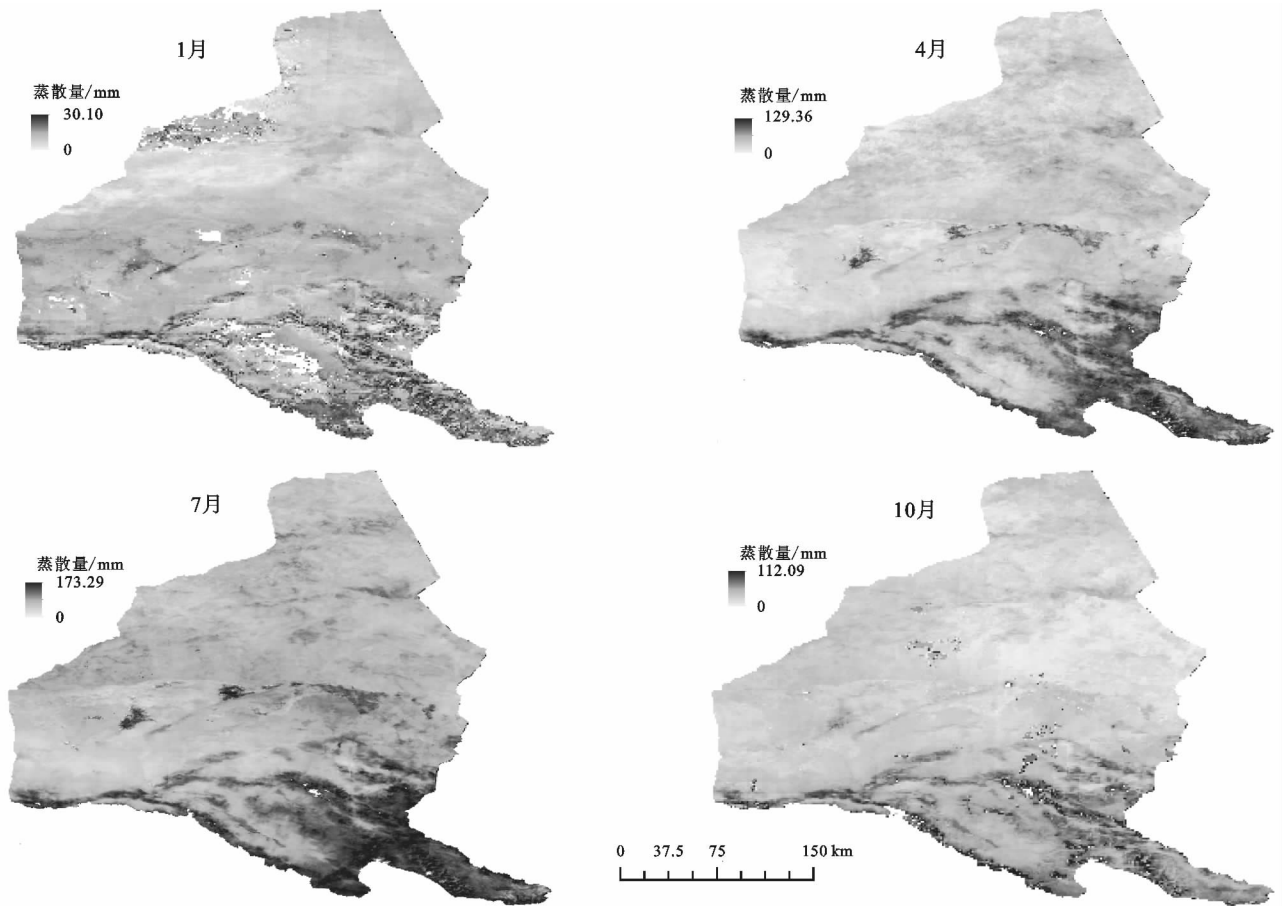


图 5 疏勒河流域 2015 年 4 个月份月蒸散量空间分布

箱线图(图 6)进一步给出了疏勒河流域地表月

蒸散量的年内数值变化。从图 6 整体来看,疏勒河流

域 2015 年 4 个月份地表月蒸散量差异明显,由各箱体长短来看,7 月份的箱体最长,说明其蒸散量的空间分布较分散;一月份的箱体最短,蒸散量的分布较为集中。由箱体所在区间可知,7 月份的主体分布区间为 75~105 mm,明显高于其他月份,然后是 4 月份和 10 月份,1 月份最低,说明地表月蒸散量的大小关系是 7 月>4 月>10 月>1 月。这主要是由于一月气候寒冷,平均空气温度都在 0℃ 以下,且太阳高度角小,日照时数短,太阳辐射弱,而且植物凋零、土壤冻结,使得全流域地表蒸散量很低。4 月气温快速回升,降水增多,有利于植物的蒸腾和水分的蒸发。7 月份为蒸散量最大的时期,究其原因:(1) 随着气温和降水逐渐增加,水分充足,再加上日照时数长,地表净辐射通量大,提供了有利于地表蒸散发的充分条件;(2) 中、上游地区与下游绿洲区人工植被被逐渐繁茂,且由于农田灌溉,土壤水分较为充足等因素,致使夏季成为年内全流域蒸散量最大的时期<sup>[44]</sup>。10 月流域内大部分农作物收割和自然植被枯萎,大量土地裸露,农田灌溉量减少,可供蒸散量的水分明显减少,且 10 月份气温已明显下降,用于水分蒸散量的能量也减少,与上一时期相比,此时蒸散量明显减少<sup>[45]</sup>,全流域蒸散量的平均值较低。

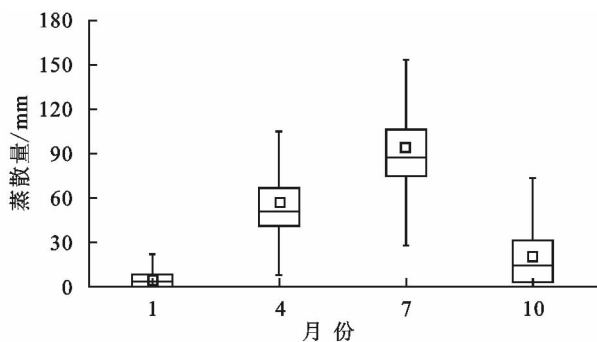


图6 疏勒河流域 2015 年 4 个月份月蒸散量的箱线图

## 4 结论与讨论

遥感反演的蒸散量能很好地反映研究区地表蒸散发的实际情况。SEBAL 蒸散量模型对于疏勒河流域地表蒸散量的模拟精度较高。2000—2015 年疏勒河流域 8 月栅格尺度的地表平均日蒸散量变化范围为 0~8.52 mm,且其空间分布异质性十分明显,整体上从东南向西北呈逐渐减小趋势,上游地表蒸散量大于中下游;流域内大部分区域 2000—2015 年 8 月份地表月蒸散量呈减少趋势,与该区气候干旱化密切相关;2000—2015 年八月份地表月蒸散量时空差异显著,上游山地和中下游绿洲区蒸散量大且时间稳定

性差,而下游荒漠戈壁地区与之相反。2015 年 1 月,4 月,7 月,10 月 4 个月份流域月蒸散量空间分布格局相似,但不同月份间蒸散量变化显著,相对大小为 7 月>4 月>10 月>1 月。

西北内陆河流域蒸散量的遥感估算一直是蒸散发区域遥感估算的热点问题之一<sup>[46]</sup>,本文对疏勒河流域蒸散量时空格局进行了研究,初步认识了该流域蒸散量的时空变化特征,研究结论对该流域应对气候变化和保护生态环境提供了基础依据,然而 SEBAL 模型的验证精度和文章不足还需要进一步的讨论。首先,本研究与其他研究结果对比。近年来,国内外学者广泛应用 SEBAL 模型反演蒸散量及对其精度进行验证,算法也已比较成熟。Allen<sup>[47]</sup>将该模型应用于美国爱达荷州的盆地,用蒸渗仪(lysimeter)实测的蒸散量对反演结果进行验证,其平均相对误差为 16%。Chen<sup>[48]</sup>等对中国西北的蒸散量研究表明,夏季疏勒河上游祁连山区的日蒸散量主要分布范围为 2~4 mm,疏勒河流域的北部蒸散量分布在 0~2 mm;Chang 等应用 SEBAL 模型反演疏勒河上游祁连山区的蒸散量,结果表明疏勒河上游夏季日蒸散量平均值为 2.48 mm,与本研究疏勒河流域日蒸散的结果相符,证明该模型适用于疏勒河流域。其次,对 SEBAL 模型反演结果进行分析验证。由于缺少不同地类蒸散实测资料,因此本文只能对 SEBAL 反演的结果进行部分定量分析。疏勒河流域戈壁沙漠地区地表十分干燥,降水极少,且地下水埋深大,蒸散量几乎为 0,计算结果合理;农田的蒸散量用 PM 模型的计算结果验证。8 月份研究区作物主要是正处于生长后期的玉米,其作物系数取为 0.4,将 PM 计算值折算成实际蒸散量。由于 PM 模型算出来的结果以各气象站点提供的“点”数据为主,遥感反演的结果以栅格处理的“面”数据为主反映蒸散量且其空间分辨率小,造成混合像元现象,因此必然存在一定的误差,但是对于空间分辨率为 1 km 的数据而言,误差在允许的范围之内,说明模型的反演结果具有可靠性,适宜干旱区实际蒸散量的计算。研究区中下游地区自然植被覆盖度较低,供水主要依靠地下水,没有人工灌溉,故蒸散量略低于农田;研究区的河流湖泊及水库区,下垫面水分充足,水面蒸发量较大;裸地的情况比较复杂,有的地面干燥,蒸散量很小,有的地面湿润,但盐碱化程度高,虽无植被生长,蒸散量仍较大。最后,本研究仍存在一些不足,有待于在以后的研究中深化和拓展。由于 SEBAL 模型中要求的参



数比较多而研究区的实测数据较少,因此某些参数估算只能借鉴一些经验公式,然而经验公式的普适性受到研究的区域、时间、大气和下垫面条件、影像质量等不同的影响。由于研究区的实测蒸散量数据的缺乏,本文参考已有文献的经验,选用 PM 法进行模型对模型的验证,此验证方法也存在误差,是本文的不足之处,也是以后的研究中改进的地方。

随着当代科学技术的发展,高时空分辨率影像的出现和反演蒸散量模型不断完善与发展,必将提升反演的精度。针对本研究应提高地面实测资料的数量和精度,利用仪器测量蒸散量进行模型结果验证,以便提高验证的准确性。该流域空间范围较大,下垫面和天气条件差异显著,这对蒸散量的反演影响比较大,所以应根据下垫面等条件划分不同区域进行反演,以提高各个区域反演的精度,从而全流域的蒸散量的反演精度进一步提升。区域地表蒸散量的年际变化与驱动因子的关系非常复杂,定量化的度量相关因子对疏勒河流域地表蒸散量变化的影响也有待于在进一步的研究中加以完善。

#### 参考文献:

- [1] Yassin M A, Alazba A A, Mattar M A. Artificial neural networks versus gene expression programming for estimating reference evapotranspiration in arid climate[J]. *Agricultural Water Management*, 2016,163(1):110-124.
- [2] Zhuang Q, Wu B. Estimating evapotranspiration from an improved two-source energy balance model using ASTER satellite imagery[J]. *Water*, 2015,7(12):6673-6688.
- [3] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, et al. The surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 1 formulation[J]. *Journal of Hydrology*, 1998,212(98):198-212.
- [4] Allen R G, Little D N, Bhasin A. Structural characterization of micromechanical properties in asphalt using atomic force microscopy[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012,24(10):1317-1327.
- [5] Almhah A, Busu I, Cracknell A. Comparison of regional scale evapotranspiration using NOAA-AVHRR and LANDSAT-TM images: A case study in an arid area in the Sana'a Basin[C]. Republic of Yemen, 2007:3101-3106.
- [6] Kiptala J K, Mohamed Y, Mul M L, et al. Mapping evapotranspiration trends using MODIS and SEBAL model in a data scarce and heterogeneous landscape in Eastern Africa[J]. *Water Resources Research*, 2013,49(12):8495-8510.
- [7] Ma H W, Wang N A, Zhu J F, et al. Analysis of evapotranspiration using satellite remote and its sensitivity in Shiyang River Basin[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2010,21(6):76-80.
- [8] 乔平林,张继贤,王翠华. 石羊河流域蒸散发遥感反演方法[J]. *干旱区资源与环境*, 2007,21(4):107-110.
- [9] 马宏伟. 石羊河流域蒸散发遥感反演及生态需水研究[D]. 兰州:兰州大学, 2011.
- [10] 刘春雨,赵军,刘英英,等. 石羊河流域蒸散发量遥感估算及时空格局分析[J]. *国土资源遥感*, 2011,23(3):117-122.
- [11] Li S B, Zhao W Z. Satellite-based actual evapotranspiration estimation in the middle reach of the Heihe River Basin using the SEBAL method. [J]. *Hydrological Processes*, 2010,24(23):3337-3344.
- [12] 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):1526-1537.
- [13] 曾成强. 黑河流域地表蒸散量研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2014.
- [14] 张万昌,刘三超,蒋建军,等. 基于 GIS 技术的黑河流域地表通量及蒸散发遥感反演[J]. *海洋科学进展*, 2004,22(10):138-145.
- [15] 邓志民,张翔,罗蔚. 基于 MODIS 的 SEBAL 模型在流域蒸散发反演中的应用[J]. *水电能源科学*, 2012,30(12):6-9.
- [16] Chang Y, Ding Y, Zhao Q, et al. Remote estimation of terrestrial evapotranspiration by Landsat 5 TM and the SEBAL model in cold and high - altitude regions: A case study of the upper reach of the Shule River Basin, China [J]. *Hydrological Processes*, 2016,31(3):514-524.
- [17] 吴锦奎,陈军武,吴灏,等. 疏勒河上游高寒草甸蒸散对比研究[J]. *地理科学*, 2013,33(1):97-103.
- [18] 吕晓东,王鹤龄,马忠明. 河西内陆河流域参考作物蒸散量的时空特征[J]. *应用生态学报*, 2010,21(12):3161-3167.
- [19] 代慧慧. 疏勒河流域气候变化对径流的影响分析[D]. 北京:清华大学, 2015.
- [20] 刘建军. 疏勒河流域水资源利用中存在的问题及对策分析[J]. *甘肃农业*, 2010,285(4):18-20.
- [21] 鲍平勇. 半干旱区域日蒸散发估算的遥感研究[D]. 南京:河海大学, 2007.
- [22] 詹志明. 区域遥感蒸散发模型方法研究[J]. *遥感技术与应用*, 2002,17(6):364-368.
- [23] Tasumi M. Application of the SEBAL methodology for estimating consumptive use of water and stream flow depletion in the Bear River Basin of Idaho through remote sensing[R]. Appendix C: A Step-by-Step Guide

- to Running Sebal, 2000.
- [24] 刘志武,雷志栋,党安荣,等. 遥感技术和 SEBAL 模型在干旱区腾发量估算中的应用[J]. 清华大学学报:自然科学版,2004,44(3):421-424.
- [25] Thom A S, Oliver H R. On Penman's equation for estimating regional evaporation[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1997,103(436):345-357.
- [26] Wu C D, Cheng C C, Lo H C, et al. Application of SEBAL and Markov models for future stream flow simulation through remote sensing [J]. Water Resources Management, 2010,24(14):3773-3797.
- [27] 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,2011,66(9):1230-1238.
- [28] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements[R]. Fao, 1998.
- [29] Vachaud G, Passerat D S A, Balabanis P, et al. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function1 [J]. Soil Science Society of America Journal, 1985,49(4):822-828.
- [30] 杨秀芹,王国杰,叶金印,等. 基于 GLEAM 模型的淮河流域地表蒸散量时空变化特征[J]. 农业工程学报, 2015,31(9):133-139.
- [31] 热孜宛古丽·麦麦提依明. 艾比湖流域蒸散时空变化及遥感估算[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2016.
- [32] Li F, Lyons T J. Remote estimation of regional evapotranspiration[J]. Environmental Modelling & Software, 2002,17(1):61-75.
- [33] 曾丽红,宋开山,张柏,等. 2000—2008 年松嫩平原生长季蒸散量时空格局及影响因素分析[J]. 资源科学, 2010,32(12):2305-2315.
- [34] 齐敬辉,牛叔文,马利邦,等. 2000—2014 年疏勒河流域植被覆盖时空变化[J]. 生态与农村环境学报,2016,32(5):757-766.
- [35] 钱大文. 近 37 年疏勒河中下游土地利用时空变化及其综合生态效应[D]. 兰州:兰州大学,2015.
- [36] 于国斌,李忠勤,王璞玉. 近 50 a 祁连山西段大雪山和党河南山的冰川变化[J]. 干旱区地理:汉文版,2014, 37(2):299-309.
- [37] 李文卿,胡自治,龙瑞军,等. 甘肃省退牧还草工程实施绩效、存在问题和对策[J]. 草业科学,2007,24(1):1-6.
- [38] 曾国雄. 敦煌生态环境问题与保护对策研究[J]. 中国水利,2013(17):50-52.
- [39] Guo J, Yue D, Li K, et al. Biocapacity optimization in regional planning [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 41150.
- [40] 夏虹,武建军,范锦龙. 阴山北麓地区近 20 年来植被生长状况及其年际变化研究[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2007,43(6):678-683.
- [41] 岳东霞,杜军,巩杰,等. 民勤绿洲农田生态系统服务价值变化及其影响因子的回归分析[J]. 生态学报,2011, 31(9):2567-2575.
- [42] Yue D X, Hui C. Value flow, livestock structure, optimal-control management and sustainable development of ecological economic system in alpine meadow[J]. Acta botanica boreali-Occidentalia Sinica, 2004,24(3):437-442.
- [43] 吴鹏亮. 基于改进型 SEBAL 模型的区域蒸散研究[D]. 安徽淮南:安徽理工大学,2016.
- [44] 曾丽红,宋开山,张柏,等. 2000—2008 年松嫩平原生长季蒸散量时空格局及影响因素分析[J]. 资源科学, 2010,32(12):2305-2315.
- [45] 达日玛. 基于 MODIS 数据的区域蒸散发量遥感估算及其应用:以巴彦淖尔市为例[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学,2010.
- [46] 潘竞虎,刘春雨. 基于 TSEB 平行模型的黄土丘陵沟壑区蒸散发遥感估算[J]. 遥感技术与应用,2010,25(2): 183-188.
- [47] Allen R G, Bastiaanssen W, Tasumi M, et al. Evapotranspiration on the watershed scale using the SEBAL model and Landsat images[C]// 2001 ASAE Annual Meeting, 1998.
- [48] Chen Y H, Xiao B L, Shi P J. Regional evapotranspiration estimation over northwest China using remote sensing[J]. Acta Geographica Sinica-Chinese Edition, 2001,56(3):268-276.