

何磊, 别强, 王瑶, 等. SEBS 模型在黑河流域中游的应用及参数敏感性分析[J]. 中国沙漠, 2013, 33(6): 1866—1873, doi: 10.7522/j.issn.1000-694X.2013.00270.

# SEBS 模型在黑河流域中游的应用及参数敏感性分析

何磊<sup>1</sup>, 别强<sup>1</sup>, 王瑶<sup>2</sup>, 赵传燕<sup>2</sup>

(1. 兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学 生命科学院/干旱农业研究所, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 干旱区的蒸散发(ET)研究对干旱区的水资源管理和生态系统恢复具有重要意义。本文基于 SEBS 模型和参考作物蒸散量估算 2009 年 3—9 月黑河流域中游地区蒸散发。使用涡度相关蒸散数据验证表明, SEBS 模型能够有效估算黑河流域中游的蒸散发。从各月的 ET 分布状况来看, 区域平均 ET 有着明显的月变化; 植被生长季内 ET 总量空间分布差异大, 在 23.4~752.6 mm 之间, 区域平均值为 428.7 mm。通过对 SEBS 模型参数敏感性分析发现, SEBS 模型对地面温度最为敏感, 其次是空气温度, 再者是风速和反照率, 对 NDVI 和空气湿度的敏感性最小。

**关键词:** SEBS; 参考作物蒸散量; 参数敏感性分析; 黑河中游; 蒸散发

文章编号: 1000-694X(2013)06-1866-08

doi: 10.7522/j.issn.1000-694X.2013.00270

中图分类号: S162.4

文献标志码: A

## 1 引言

水资源是制约干旱区经济发展和生态恢复的决定性因素, 是干旱区资源环境和生态系统研究的核心问题<sup>[1-3]</sup>。蒸散发(ET)是干旱内陆水循环中最重要的组成部分, 它在干旱区的水文循环研究、农业节水、水资源的规划管理和干旱监测等方面举足轻重, 有效估算干旱区 ET 具有重要的理论和现实意义<sup>[3-5]</sup>。

传统计算 ET 的方法有能量平衡法(BREB 法)<sup>[6]</sup>、水量平衡方法<sup>[7]</sup>、参考作物蒸散法<sup>[8-9]</sup>等, 但这些方法存在着由点向面的尺度转换问题。近些年, 遥感技术在蒸散发研究中的应用, 弥补了传统方法的不足, 成为估算区域 ET 状况的一种有效手段<sup>[9-12]</sup>, 常见的方法有地表温度-植被指数法、地表温度-通量法、空气动力学阻力-地表能量平衡余项法、PM(Penman-Monteith)公式法和双源-PT(Priestley-Taylor)模型法等<sup>[13]</sup>。目前多数方法局限于较短时间尺度上的 ET 估算, 在长时间尺度上对 ET 的估算也在探讨之中, 如通过“蒸发比”的概率结合参考作物蒸散量在日和月尺度的蒸散计算, 这类模型有 SEBAL 模型<sup>[14-15]</sup>、SEBS(The Surface Energy Balance System)模型<sup>[16-17]</sup>和 P-T 模型<sup>[13]</sup>。SEBS 模型是比较典型且简单的单层模型, 模型所

假设的两种极端状况(热和冷, 干和湿)能较好地反映出干旱区的水分和能量分布不均的特点, 提高了 ET 估算的精度<sup>[12]</sup>。SEBS 模型在国内外区域蒸散研究中应用较多<sup>[16-19]</sup>, 但对模型输入参数的敏感性报道不多<sup>[20]</sup>, 而参数的敏感性分析对于评价模型或算法的精度有着重要意义, 是模型或算法实用性的间接判断依据<sup>[21]</sup>。

干旱区植被的生长季主要在 3—9 月, 3—9 月又是干旱区全年蒸散发的最多时段, 故本文选取黑河流域中游 2009 年 3—9 月的 MODIS 遥感数据和地面气象观测数据, 基于 SEBS 模型和参考作物蒸散量对黑河流域中游地区生长季内 ET 进行反演, 以期对黑河流域中游地区水资源的规划管理和农业节水等提供理论支撑。SEBS 模型所需地表物理参数和气象参数较多, 本文将使用单参数分析方法对主要的输入参数进行敏感性分析, 以确定各个参数的相对重要程度, 为识别主要影响因素提供判断依据。

## 2 研究区概况

黑河流域位于中国西北干旱区, 是中国第二大内陆河流域, 地理位置介于 37°41'—42°42'N、93°42'—102°00'E 之间, 流域内景观分异鲜明, 从景观类型上可划分为南部祁连山地、中部河西走廊和北

收稿日期: 2012-10-17; 改回日期: 2012-11-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(91025015)资助

作者简介: 何磊(1989—), 男, 安徽枞阳人, 硕士研究生, 主要从事干旱区蒸散发与荒漠化研究。Email: lhe11@lzu.edu.cn

通讯作者: 赵传燕>Email: nanzhr@lzb.ac.cn

部阿拉善高平原<sup>[22]</sup>。黑河流域中游地区(图 1)位于莺落峡至正义峡之间,主要由张掖盆地和酒泉盆地构成,是由冲洪积砾石、冲洪积细土及风积物组成的走廊平原。研究区属于典型的温带大陆性气候,气候干燥,年降水量小而蒸发能力大,多年平均降水量

由南部的 250 mm 向北减少至不足 100 mm,年蒸发能力由西南的 1 200 mm 向东北增至 2 200 mm<sup>[23]</sup>。土地覆盖类型有山前荒漠草地、农业用地(耕地、人工林地和园地)、平原区沼泽草甸草地(包括林灌草地)以及戈壁与沙地等<sup>[24]</sup>。

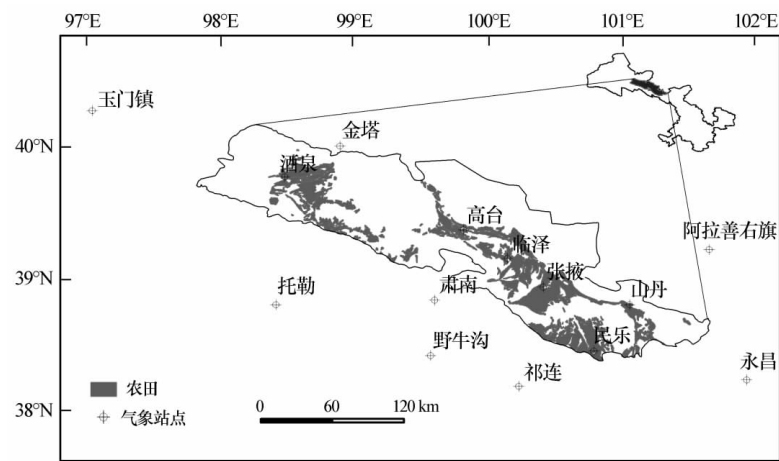


图 1 黑河中游及附近气象站点地理位置

Fig. 1 Location of the middle reaches of the Heihe River basin and the distribution of meteorological stations

3 材料与方法

3.1 数据来源及处理

本研究主要采用以下数据:1)遥感数据,来自美国航空航天局(NASA)数据中心(<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>),主要有 MOD021KM, MOD03 和 MOD09GA 产品,卫星数据获取时间为 2009 年 3—9 月黑河流域中游地区无云覆盖的晴天(共 20 d,表 1)。SEBS 模型所需地表物理参数如反照率、植被覆盖度、比辐射率和地表温度等由 MODIS 系列产品计算得到。2)气象数据,使用黑河中

游地区及附近 14 个气象站点(图 1)的气象数据,包括相对湿度(转换成比湿)、气压、气温、风速、日照时数等,它们的空间分布由反距离权重插值得到。本文所用地表物理参数和气象参数分辨率统一至 1 000 m,数据采用 Universal Transverse Mercator 投影、WGS-1984 地理坐标系。

3.2 SEBS 模型

由 Su<sup>[16]</sup>提出的 SEBS 模型,应用卫星对地观测的可见光、近红外和热红外信息,结合地面同步观测气象数据或大气模式输出数据,根据地表能量平衡原理估算不同尺度的地表大气湍流通量,从而估算地表相对蒸散的方法。

SEBS 模型主要依据能量平衡原理估算  $ET$ ,其计算框架包括:①从遥感影像上提取一系列地表物理参数,如反照率、比辐射率、地表温度和植被覆盖度等;②建立热传导粗糙度模型;③利用总体相似理论(Bulk Atmospheric Similarity, BAS)确定摩擦速度、奥布霍夫稳定性和感热通量;④计算蒸发比。

SEBS 模型的能量平衡公式如下:

$$\lambda E = R_n - H - G_0 \tag{1}$$

式中: $\lambda E$  为潜热通量, $\lambda$  为水的汽化热; $R_n$  为地表净辐射通量; $H$  为感热通量; $G_0$  为土壤热通量。

地表净辐射通量  $R_n$  可由下式计算得到:

$$R_n = (1 - \alpha)R_{swd} + \epsilon(\epsilon' \sigma T_a^4 - \sigma T_o^4) \tag{2}$$

表 1 遥感数据获取日期

Table 1 Date of remote sensing data

儒略日	月份	日	儒略日	月份	日
76	3	17	165	6	14
78	3	19	168	6	17
84	3	25	204	7	23
96	4	6	224	8	12
103	4	13	228	8	16
112	4	22	243	8	31
123	5	3	245	9	2
124	5	4	263	9	20
149	5	29	265	9	22
154	6	3	270	9	27

式中:  $R_{\text{swd}}$  为向下太阳辐射通量;  $\alpha$  为地表反照率;  $\epsilon$  为地表比辐射率, 可通过 NDVI 间接计算得到;  $\epsilon'$  为大气比辐射率;  $\epsilon$  为斯蒂芬-波尔兹曼常数;  $T_a$  为气温;  $T_o$  为地表温度。

土壤热通量  $G_0$  取决于地面植被覆盖率和土壤含水量等因素, 一般可通过与地表净辐射  $R_n$  的关系确定, 其计算公式如下:

$$G_0 = R_n[\Gamma_c + (1 - f_c)(\Gamma_s - \Gamma_c)] \quad (3)$$

式中:  $\Gamma_c$  为植被覆盖区域参数;  $\Gamma_s$  为裸土覆盖区域参数<sup>[25]</sup>;  $f_c$  为植被覆盖比率。

在 SEBS 模型中, 假设土壤水分的干和湿两种极端情况, 在干燥地表环境下, 由于没有土壤水分供给蒸发, 潜热通量约为零, 此时感热通量达到最大值。

$$H_{\text{dry}} = R_n - G_0 \quad (4)$$

式中:  $H_{\text{dry}}$  为干燥地表环境下的感热通量。

在土壤水分充分供应的湿润地表环境下, 蒸发达到最大值, 感热通量达到最小值。

$$\lambda E_{\text{wet}} = R_n - G_0 - H_{\text{wet}} \quad (5)$$

式中:  $\lambda E_{\text{wet}}$  为湿润地表环境下的潜热通量;  $H_{\text{wet}}$  为湿润地表环境下的感热通量, 其计算公式如下:

$$H_{\text{wet}} = ((R_n - G_0) - \frac{C_p}{r_{\text{ew}}} \cdot \frac{e_s - e_a}{\gamma} / (1 + \frac{\Delta}{\gamma})) \quad (6)$$

式中:  $\rho$  为空气密度;  $C_p$  为空气定压比热;  $r_{\text{ew}}$  为湿润地表环境下的空气动力学阻力, 由风速、摩擦风速、参考高度、零平面位移高度和动力学粗糙长度等计算得到;  $e_s$  为饱和水汽压;  $e_a$  为实际水汽压, 由相对湿度等计算得到;  $\gamma$  为干湿常数;  $\Delta$  为饱和水汽压—温度曲线的斜率。

SEBS 模型中定义相对蒸发比 ( $\Lambda_r$ ) 为蒸散发速率与潜在蒸散发速率的比值,

$$\Lambda_r = \frac{\lambda E}{\lambda E_{\text{wet}}} = 1 - \frac{H - H_{\text{dry}}}{H_{\text{dry}} - H_{\text{wet}}} \quad (7)$$

式中:  $H_{\text{dry}}$  由 (4) 式计算得到;  $H_{\text{wet}}$  可由 (6) 式计算得到;  $H$  可通过估算地面和大气间的能量和物质的传输过程, 利用总体相似理论参数化求得。

蒸发比定义为实际蒸散发与可用通量 ( $R_n - G_0$ ) 的比值, 公式如下:

$$\Lambda = \frac{\lambda E}{R_n - G_0} = \frac{\Lambda_r \lambda E_{\text{wet}}}{R_n - G_0} \quad (8)$$

日蒸散发  $ET_{\text{dry}}$  可由下式转换求得:

$$ET_{\text{dry}} = 8.64 \times 10^7 \times \bar{\Lambda} \times \frac{\bar{R}_n - \bar{G}_0}{\lambda \rho_w} \quad (9)$$

式中:  $\bar{R}_n$  为日平均净辐射;  $\bar{G}_0$  为日平均土壤通量 (在

日尺度上近乎为零)<sup>[26]</sup>;  $\bar{\Lambda}$  为日平均蒸发比, 由于其一天内值相对稳定, 由遥感卫星过境时刻蒸发比  $\Lambda$  代替<sup>[16]</sup>;  $\rho_w$  为水的密度, 为  $1\,000\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $\lambda$  为水的汽化热。

### 3.3 参考作物蒸散量 ( $ET_r$ )

参考作物蒸散量采用 FAO-56 Penman-Monteith 公式计算:

$$ET_r = \frac{0.409\Delta(R_n - G_0) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (10)$$

式中:  $u_2$  为离地面 2 m 处风速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 其他符号同式 (1) 和 (6)。

### 3.4 月蒸散量

本文结合 SEBS 模型和参考作物蒸散量计算方法, 使用卫星过境天数的  $ET_c$  和 3 月至 9 月每天的参考作物蒸散量  $ET_r$  计算生长季每天的  $ET_c$ :

$$ET_c = C_{\text{rad}}(ET_r F) ET_r \quad (11)$$

式中:  $ET_c$  为实际蒸散量 (mm);  $C_{\text{rad}}$  为地形纠正系数, 在水平地区为 1, 本文设置为 1;  $ET_r F$  为参考蒸散比, 由卫星过境天数 SEBS 模型计算实际蒸散量除以参考作物蒸散量得到, 非卫星过境天数的  $ET_r F$  可由时间序列插值方法得到;  $ET_r$  为参考作物蒸散量 (mm)。

月蒸散量  $ET_{\text{month}}$  由以下公式计算得到:

$$ET_{\text{month}} = \sum_{i=1}^n ET_{ci} \quad (12)$$

式中:  $n$  为月天数 (d);  $ET_{ci}$  为任何月第  $i$  天蒸散量 (mm), 由公式 (11) 计算。

### 3.5 参数敏感性分析

参数敏感性分析是确定模型关键参数以及发现目标变量对某参数变化的响应敏感程度的重要方法<sup>[4,27]</sup>。SEBS 模型的气象参数和地表物理参数较多, 本文将选取风速、空气温度、空气湿度 (比湿)、NDVI、地面温度和反照率参数, 使用单参数分析方法对 SEBS 模型进行参数敏感性分析。分别单独改变各所选参数的取值, 改变量为  $\pm 10\%$ , 然后对每个像元  $i$  计算参数改变后的  $ET$  相对误差  $Sr_{j,i}$ , 计算公式如下:

$$Sr_{j,i} = \frac{|ET(v_j + \Delta_j)_i - ET(v_j)_i|}{ET(v_j)_i} \times 100\% \quad (13)$$

式中:  $v_j$  表示所选参数;  $\Delta_j$  表示参数改变量;  $ET(v_j)_i$  和  $ET(v_j + \Delta_j)_i$  分别表示参数  $v_j$  改变  $\Delta_j$  前后的像元点  $i$  的  $ET$  值(mm)。

在得到各参数的相对误差  $Sr_{j,i}$  后, 将各参数的  $Sr_{j,i}$  按小于 5%、5%~10%、10%~20%、20%~40% 和大于 40% 划分成 5 个相对误差区间, 分别计算各相对误差区间的像元数目占全研究区像元总数的比例。在较大相对误差区间的像元数量比例越大, 则 SEBS 模型对该参数越敏感。

为比较  $ET$  对所选各参数的敏感程度, 可计算各参数的相对独立敏感度  $\Delta_j$ , 计算公式如下:

$$S_j = \frac{\sum_{i=1}^N Sr_{j,i}}{\sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^N Sr_{j,i}} \times 100\% \quad (14)$$

式中:  $N$  为研究区域的像元总数;  $Sr_{j,i}$  由公式(13)计算<sup>[28]</sup>; 本研究选择了 6 个影响因子( $j=6$ )。

## 4 结果与分析

### 4.1 蒸散估算精度验证

本文使用 SEBS 模型估算了 2009 年 3—9 月黑河流域中游的蒸散发, 需要野外实际观测数据的验证, 但对蒸散观测的野外台站较少, 因而不能做系统的比较。本文只获取了 2009 年部分天数(6 月 15 日—9 月 20 日, 共 98 d)的临泽观测站农田通量综合观测场的涡度相关蒸散数据, 将涡度相关蒸散数据与 SEBS 模型估算的蒸散量对比如图 2, 其中相对误差在 5% 以下的占 36.73%, 5%~10% 的占

16.33%, 10%~20% 的占 25.51%, 20%~40% 的占 14.29%, 相对误差大于 40% 的仅有 7.14%。从涡度相关蒸散数据的验证结果来看, 本文使用 SEBS 模型能够很好的估算黑河流域中游蒸散发。

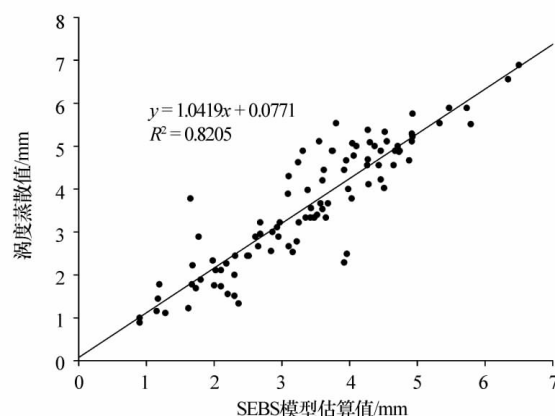


图2 SEBS 模型估算值与涡度蒸散值的比较

Fig. 2  $ET$  by SEBS model and results of eddy correlation data

### 4.2 蒸发比的空间分布

以儒略日第 76 天(3 月 17 日)和第 270 天(9 月 27 日)为例, 图 3 展示了黑河中游蒸发比空间分布状况, 在农田和河谷地区由于上游来水的充足供给, 水分充足, 用于蒸散的能量会较大, 所以蒸发比较大; 水分短缺的地区如酒泉与高台间的荒漠戈壁区域, 大部分能量转换为地气之间的显热, 蒸发比较小。由于地表特性有着空间差异, 各地蒸散消耗的能量占有效能量的比值不同, 所以在一定程度上, 蒸发比能够反映区域干旱状况。

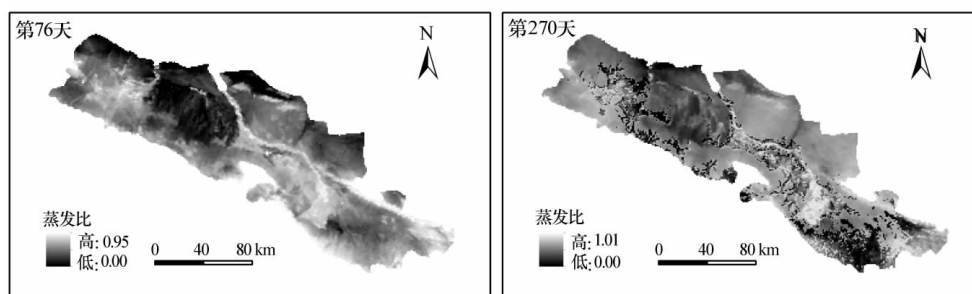


图3 儒略日为第 76 天与第 270 天的黑河中游蒸发比空间分布

Fig. 3 The spatial distribution of the evaporative fraction in the middle reaches of Heihe River basin in the 76<sup>th</sup> and 270<sup>th</sup> Julian day

### 4.3 日蒸散量的空间分布

根据 SEBS 模型和日蒸散发扩展方法得到卫星过境天数的黑河中游区域日蒸散发, 选择儒略日第 76(3 月 17 日)、113(4 月 23 日)、182(7 月 1 日)天

和第 270 天(9 月 27 日)的日蒸散发结果(图 4)进行分析。第 76 天, 黑河中游气温低, 辐射低, 区域蒸散量普遍低, 最大蒸散量为 2.06 mm, 出现在河道, 区域平均蒸散量为 1.02 mm。农田和河谷附近的蒸散量较大, 农田区域的平均蒸散发量在 1.4 mm 左

右,荒漠戈壁区域的蒸散量较低,一般低于 0.9 mm。第 113 天,黑河中游辐射增加,气温升高,区域蒸散量普遍增加,最大蒸散量为 4.58 mm,区域平均蒸散量为 2.27 mm。农田和河谷附近的蒸散量较大,农田区域的平均蒸散发量在 2.18 mm 左右,荒漠戈壁区域的蒸散量较低。第 182 天,黑河中

游辐射较大,气温较高,植物生长需水量较大,区域蒸散量最大值为 6.92 mm,区域平均蒸散量为 4.4 mm。农田和河谷附近的蒸散量很大,平均在 5.16 mm 左右,荒漠戈壁区域的蒸散量较低。第 270 天,研究区气温逐渐降低,区域蒸散量较低,最大蒸散量为 1.99 mm,区域平均蒸散为 0.94 mm,接近第 76 天

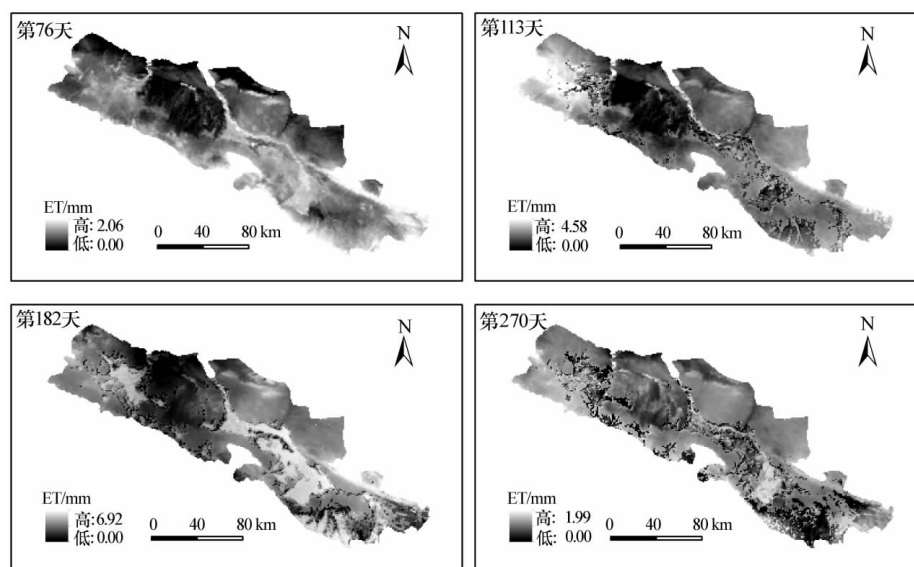


图 4 儒略日为第 76、113、182 天和第 270 天的黑河流域中游蒸散发分布

Fig. 4 Distribution of evapotranspiration in the middle reaches of Heihe River basin in the 76<sup>th</sup>, 113<sup>th</sup>, 182<sup>nd</sup> and 270<sup>th</sup> Julian day

的蒸散,荒漠地区的蒸散量仍然较低。

#### 4.4 长时间尺度的蒸散量空间分布

##### 4.4.1 月蒸散量变化分析

通过蒸发比的概率结合参考作物蒸散量的方法拓展得到 3—9 月每个月黑河流域中游地区蒸散发量。从表 2 中发现,3 月蒸散发较小,区域的最大值为 43.5 mm,区域平均 0.6 mm · d<sup>-1</sup>,河道和农田的蒸散量较大,高海拔地区如民乐的蒸散较小,酒泉与高台之间的荒漠地区蒸散最小。4 月,由于气温

升高、辐射增强及植被开始生长,蒸散发逐渐增强,区域最大值达到 87.6 mm,区域平均 1.3 mm · d<sup>-1</sup>,空间分布规律与 3 月一致。5 月,蒸散发增长迅速,区域最大值达到 139.2 mm,区域平均 2.5 mm · d<sup>-1</sup>。6 月,农作物达到需水高峰期,农田的蒸散发较大,区域最大值达到 178 mm,区域平均 3.5 mm · d<sup>-1</sup>。7 月,蒸散发仍然较高,区域最大值为 156 mm,区域平均 2.8 mm · d<sup>-1</sup>。8 月,黑河中游套种玉米地区的蒸散仍然较大,区域最大值为 123 mm,区域平均 2.3 mm · d<sup>-1</sup>。9 月,蒸散迅速

表 2 黑河中游各月蒸散量特征值

Table 2 Characteristic values of monthly ET in the middle reach of Heihe River basin

月份	$ET_{\max}/\text{mm}$	$\overline{ET_{\max}}/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$	$ET_{\text{avg}}/\text{mm}$	$\overline{ET_{\text{avg}}}/(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})$
3 月	43.5	1.4	18.6	0.6
4 月	87.6	2.9	39.2	1.3
5 月	139.2	4.5	77.4	2.5
6 月	178.0	6.0	105.3	3.5
7 月	156.0	5.0	86.9	2.8
8 月	123.0	4.0	71.3	2.3
9 月	62.4	2.1	30.0	1.0

降低,区域最大值为 62.4 mm,区域平均 1 mm·d<sup>-1</sup>。

4.4.2 生长季蒸散总量

将 3—9 月的月蒸散量累加得到植物生长季内

的蒸散总量。从图 5 看出,植物生长季内的黑河中游蒸散总量空间分布差异较大,范围在 23.4 ~ 752.6 mm 之间,区域平均蒸散量为 428.7 mm,农

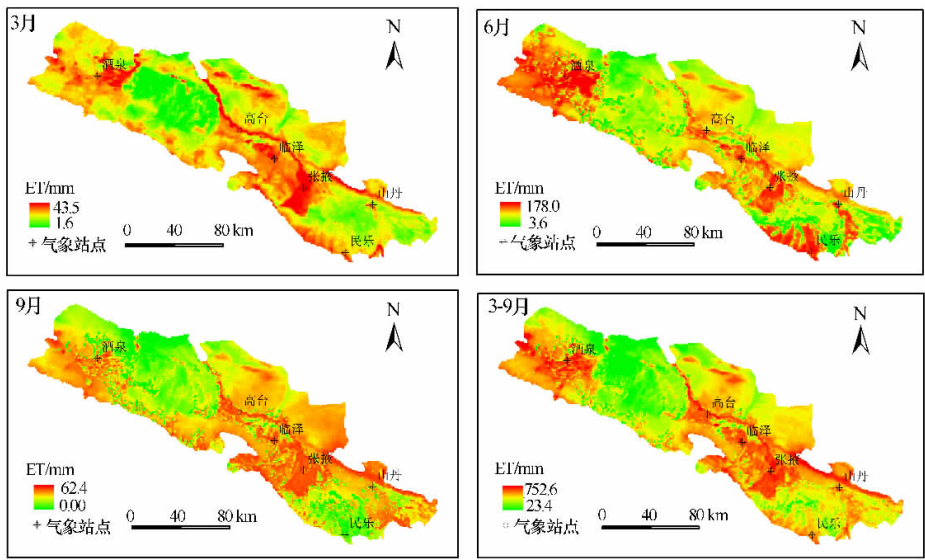


图 5 3、6、9 月及植被生长季内的黑河中游蒸散分布

Fig. 5 Distribution of *ET* in March, June, September and during the whole growing season in the studied area

田和河道附近的蒸散最大,最低的是荒漠地区。

4.5 模型敏感性分析

以儒略日第 76 天的数据为例进行单参数敏感

性分析,结果如表 3、表 4 所示。表 3、表 4 表示各参数增加或减少  $\Delta_j$  产生的 *ET* 相对误差在各误差区间的比例以及各参数的相对独立敏感

度。如表 3 和表 4 显示,地面温度的相对独立敏感

表 3 各参数增加  $\Delta_j$  产生的 *ET* 相对误差在各误差区间的比例(单位: %)

Table 3 Ratio of the pixels with errors caused by increasing  $\Delta_j$  of parameter values within five error classifications to total pixels in the studied area (Unit: %)

	参数相对误差区间/%					$S_j$
	0~5	5~10	10~20	20~40	>40	
风速	53.85	26.08	12.88	5.04	2.15	9.94
空气温度	5.82	32.93	38.57	16.38	6.30	20.34
空气湿度(比湿)	99.94	0.03	0.02	0.01	0.00	0.05
NDVI	99.88	0.05	0.03	0.02	0.02	0.17
地面温度	0.25	0.21	5.44	35.51	58.59	64.67
反照率	81.72	10.97	4.58	1.63	1.10	4.83

表 4 各参数减少  $\Delta_j$  产生的 *ET* 相对误差在各误差区间的比例(单位: %)

Table 4 Ratio of the pixels with errors caused by decreasing  $\Delta_j$  of parameter values within five error classifications to total pixels in the study area (Unit: %)

	参数相对误差区间/%					$S_j$
	0~5	5~10	10~20	20~40	>40	
风速	53.24	26.34	13.05	5.17	2.20	11.00
空气温度	4.18	30.28	40.12	18.09	7.33	23.62
空气湿度(比湿)	99.94	0.02	0.02	0.02	0.00	0.06
NDVI	99.88	0.05	0.03	0.03	0.01	0.18
地面温度	2.65	2.25	7.68	41.27	46.15	60.10
反照率	82.59	10.73	4.17	1.47	1.04	5.04

度  $S_j$  最高,为 60.1%~64.67%。地面温度改变后,95%以上像元的相对误差在 10%以上,SEBS 模型对地面温度最为敏感。空气温度的相对独立敏感度  $S_j$  为 20.34%~23.62%,空气温度改变后,60%以上像元的相对误差在 10%以上,说明 SEBS 模型对空气温度较为敏感。风速的相对独立敏感度  $S_j$  为 9.94%~11%,风速改变后,75%以上像元的相对误差在 10%以下,SEBS 模型对风速的敏感一般。反照率的相对独立敏感度  $S_j$  为 4.83%~5.04%,反照率改变后,90%以上像元的相对误差在 10%以下,SEBS 模型对反照率的敏感性较小。NDVI 和空气湿度的相对独立敏感度  $S_j$  分别为 0.17%~0.18% 和 0.05%~0.06%,当 NDVI 和空气湿度改变时,99%的像元的相对误差在 5%以下,说明 SEBS 模型对 NDVI 和空气湿度不敏感。

## 5 结论

由 SEBS 模型得到的蒸发比空间分布可知,蒸发比在一定程度上能够反应区域干旱状况,农田和河道附近有着充足的水分,用于蒸散的能量会较大,蒸发比较大;酒泉与高台间的荒漠戈壁区域,蒸发比较小,该区域较干旱。

根据 SEBS 模型估算结果,农田和河道附近的蒸散最大,最低的是荒漠地区,区域平均  $ET$  有着明显的月份变化。植被生长季内  $ET$  总量空间分布差异大,在 23.4~752.6 mm 之间,区域平均值为 428.7 mm。

使用涡度相关蒸散数据验证表明,SEBS 模型能有效估算黑河流域中游的蒸散发,其中相对误差在 5%以下的占 36.73%,5%~10%的占 16.33%,10%~20%的占 25.51%,20%~40%的占 14.29%,相对误差大于 40%的仅有 7.14%。

通过对 SEBS 模型进行参数敏感性分析发现,SEBS 模型对地面温度最为敏感,其次是空气温度,对风速和反照率一般敏感,对 NDVI 和空气湿度的敏感性最小。

## 参考文献:

- [1] 赵文智,吉喜斌,刘鹤. 蒸散发观测研究进展及绿洲蒸散研究进展[J]. 干旱区研究,2011,28(3):463-470.
- [2] 肖生春,肖洪浪,蓝永超,等. 近 50 a 来黑河流域水资源问题与流域集成管理[J]. 中国沙漠,2011,31(2):529-535.
- [3] 金晓媚,梁继运. 黑河中游地区区域蒸散量的时间变化规律及其影响因素[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(3):88-92.
- [4] 周剑,程国栋,李新,等. 应用遥感技术反演流域尺度的蒸散发[J]. 水利学报,2009,39(6):679-687.
- [5] 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.
- [6] 吴锦奎,丁永建,王根绪,等. 干旱区人工绿洲间作农田蒸散研究[J]. 农业工程学报,2006,22(9):16-20.
- [7] 胡志桥,田霄鸿,张久东,等. 石羊河流域主要作物的需水量及需水规律的研究[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(3):1-6.
- [8] 李玲玲,黄高宝. 绿洲灌区参考作物蒸散量的测算[J]. 中国沙漠,2011,31(1):142-148.
- [9] 侯兰功,肖洪浪,邹松兵,等. 额济纳绿洲生长季参考作物蒸散发敏感性分析[J]. 中国沙漠,2011,31(5):1255-1259.
- [10] 宋小宁,赵英时,李新辉. 半干旱地区遥感双层蒸散模型研究[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(9):64-67.
- [11] 杨红娟,丛振涛,赵岩,等. 叶尔羌河流域绿洲蒸散量的遥感估算[J]. 干旱区研究,2012,29(3):479-486.
- [12] 王国华,赵文智. 遥感技术估算干旱区蒸散发研究进展[J]. 地球科学进展,2011,26(8):848-858.
- [13] 莫兴国,刘苏峡,林忠辉,等. 华北平原蒸散和 GPP 格局及其对气候波动的响应[J]. 地理学报,2011,66(5):589-598.
- [14] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation[J]. Journal of Hydrology, 1998, 212/213: 198-212.
- [15] 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.
- [16] Su Z. The Surface Energy Balance System(SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2002, 6:86-100.
- [17] Alkhaier F, Su Z, Flerchinger G N. Reconnoitering the effect of shallow groundwater on land surface temperature and surface energy balance using MODIS and SEBS[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2011, 8:8671-8700.
- [18] 杨永民,冯兆东,周剑. 基于 SEBS 模型的黑河流域蒸散发[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2008,44(5):1-6.
- [19] 赵军,刘春雨,潘竟虎,等. 基于 MODIS 数据的甘南草原区域蒸散发量时空格局分析[J]. 资源科学,2011,33(2):341-346.
- [20] Gibson L. A, Münch Z, Engelbrecht J. Particular uncertainties encountered in using a pre-packaged SEBS model to derive evapotranspiration in a heterogeneous study area in south Africa[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15:295-310.
- [21] 高懋芳,覃志豪,刘三超. MODIS 数据反演地表温度的参数敏感性分析[J]. 遥感信息,2005,6:3-6.
- [22] 侯玉婷,王书功,南卓铜. 基于知识规则的土地利用/土地覆盖分类方法——以黑河流域为例[J]. 地理学报,2011,66(4):549-561.
- [23] 王瑶,赵传燕,田风霞,等. 黑河中游春小麦需水量空间分布[J]. 生态学报,2011,31(9):2374-2382.
- [24] 陈隆亨,李福兴. 河西地区土壤[M]. 北京:中国环境科学出版

- 社, 2000: 24—92.
- [25] 何延波, Su Z B, Jia L, 等. SEBS 模型在黄淮海地区地表能量通量估算中得应用[J]. 高原气象, 2006, 25(6): 1092—1100.
- [26] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements—FAO Irrigation and drainage paper 56[M]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998.
- [27] 梁友嘉, 徐中民. 基于系统动力学的黑河中游地区 FAO Penman-Monteith 模型评价研究[J]. 草业科学, 2011, 28(1): 18—26.
- [28] 陈强, 苟思, 严登华, 等. 基于 SEBAL 模型的区域 ET 计算及气象参数敏感性分析——以天津市为例[J]. 资源科学, 2009, 31(8): 1303—1308.

## Simulating Evapotranspiration Based on SEBS Model and Sensitivity Analysis of the Parameters in the Middle Reaches of Heihe River Basin

HE Lei<sup>1</sup>, BIE Qiang<sup>1</sup>, WANG Yao<sup>2</sup>, ZHAO Chuan-yan<sup>2</sup>

(1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Institute of Arid Agro-ecology/School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The research of evapotranspiration (*ET*) has great significance for water resource management and ecosystem restoration in arid areas. In this study, from March to September in 2009, the regional *ET* in the middle reaches of Heihe River basin was estimated based on SEBS (The Surface Energy Balance System) model and reference crop evapotranspiration. Compared with the result of eddy correlation data, the *ET* estimated by SEBS model was proved to be valid. Due to regional *ET* of each month, we can find that the regional average *ET* obviously varied month to month. The result also showed a large difference of *ET* amount in crop growth season of research area which distributed from 23.4 mm to 752.6 mm and the regional average was 428.7 mm. And the parameters sensitivity analysis showed that the *ET* had different response to variation of parameters concerned with SEBS model. The sensitivity of land surface temperature was the biggest, followed by air temperature, wind, and surface albedo in order. SEBS model was the most insensitive to NDVI and air humidity.

**Key words:** SEBS; reference crop evapotranspiration; parameters sensitivity analysis; the middle reaches of Heihe River basin; evapotranspiration