

文章编号: 0455-2059(2013)04-0504-07

基于 SEBS-METRIC 方法的黑河流域中游地区 农田蒸散

何磊¹, 王瑶², 别强¹, 方镜尧², 赵传燕²

1. 兰州大学 资源环境学院, 兰州 730000

2. 兰州大学 生命科学学院, 兰州 730000

摘要: 使用涡度相关蒸散数据验证表明 SEBS-METRIC 方法可以用来估算黑河流域中游地区作物农田蒸散. 结果显示: 黑河流域中游地区作物生长季内 ET 总量空间差异大(398~709 mm, 平均 567 mm). 在作物不同生长阶段, ET 在时间和空间上变化剧烈. 在区域平均水平上, 生长初期、生长中期1、生长中期2 和生长后期的 ET 占全生长季 ET 总量的比例分别为 10.24%, 29.44%, 47.11%, 13.21%, 各生长阶段区域平均日 ET 依次为 1.45, 3.28, 3.52, 2.08 mm/d. ET 月份变化明显, 3 月最小, 4, 5 月迅速增大, 6 月达到生长季的蒸散高峰, 7, 8 月有所降低, 维持在一定水平, 9 月作物进入生长末期, 迅速降低.

关键词: SEBS; METRIC; 农田蒸散; 黑河流域中游地区**中图分类号:** S161.4**文献标识码:** A

Estimation of field evapotranspiration in the middle reaches of Heihe River basin based on SEBS-METRIC method

HE Lei¹, WANG Yao², BIE Qiang¹, FANG Jing-yao², ZHAO Chuan-yan²

1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2. School of Life Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: It was shown that the field evapotranspiration (ET) of crops in the middle reaches of Heihe River basin estimated by the SEBS-METRIC method was valid. According to resulted analysis, a large difference in ET in crop growth season of the research area existed, which was distributed from 398 mm to 709 mm, with the average being 567 mm. ET changed greatly in different crop growth stages. The average ET of the initial growth, medium growth 1, medium growth 2 and later stage of growth were 1.45, 3.28, 3.52, 2.08 mm/d respectively. The percentages of total ET at different growing stages were 10.24%, 29.44%, 47.11% and 13.21% respectively. ET also showed obvious monthly changes. The value was the lowest in March, then increased rapidly in April and May. The greatest amount of water required of the growth stage was reached in June, with ET decreasing a little and being maintained at a certain level in July and August, and then decreasing rapidly in September.

Key words: surface energy balance system; mapping evapotranspiration with internalized calibration; field evapotranspiration; middle reaches of Heihe River basin

干旱区内陆河流域中游的水量转化和平衡问题是流域水资源合理开发利用的基础^[1-2]. 黑河流域中游地区用水占全流域用水的 82%~85%, 其中以灌溉为主的农业是中游用水大户, 用水量约占中游总用水量的 95% 左右^[3-5]. 高额度的农业

用水量导致诸多矛盾的发生, 如中游与下游用水的矛盾、生态需水与人类需水的矛盾. 量化黑河流域中游地区的农田蒸散量可为灌溉管理和水资源规划提供依据^[6].

作物的农田蒸散是农业用水的主要组成部分,

收稿日期: 2012-11-12; **修回日期:** 2013-03-25**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(91025015)

作者简介: 赵传燕(1963—), 女, 山东曹县人, 教授, 博士, e-mail: nanzhr@lzb.ac.cn, 研究方向为干旱半干旱区流域生态水文, 通信联系人.

是作物在全生育期自身蒸腾量与土壤蒸发量的总和^[7]。量化区域尺度上的农田蒸散量是实施节水农业、灌溉管理和水资源规划的基础,对水分利用效率的提高和作物产量的模拟具有重要意义^[4,6,8-9],而黑河流域中游地区不同区域由于海拔、土壤和气候等因素不同,农田蒸散亦不一样,需要在区域尺度上估算农田蒸散。

量化农田蒸散的传统方法主要有:田间试验方法^[2,9]、统计分析法^[10]、基于参考作物蒸散量方法,其中基于参考作物蒸发量的计算方法应用最为广泛^[2,11-12]。在众多作物蒸散量估算模型中,Penman-Monteith模型在不同的气候条件下适用性最好^[13-14],被联合国粮农组织(United Nations Food and Agriculture Organization, FAO)推荐为作物需水量估算的唯一模型^[15]。该方法能够较准确地估算单点的蒸散量,由于涉及的参数较多,存在由点到面的尺度转换问题^[16],不适用于大面积区域蒸散研究。近年来,基于遥感技术监测大范围地区的蒸散状况成为区域估算的一种有效手段,如Priestley-Talor模型^[17-18]、SEBAL模型^[19-21]、SEBS模型^[22-24]和双层蒸发模型^[16]等。SEBS模型考虑了湿温的两种极端状况(干和湿,热和冷),较好地反映出干旱区的水分和能量分布不均的特点,提高了蒸散量估算的精度^[18]。METRIC模型^[25]提供了蒸散量在时间尺度上的拓展方法,蒸散量可以从日尺度拓展到月、年尺度上。本文将基于SEBS-METRIC方法,估算2009年黑河流域中游地区作物生长季内农田蒸散量及时空变化规律,为中游地区农业节水实施、灌溉管理和流域的水资源规划提供重要依据。

1 材料与方法

1.1 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,地理位置为37°41'N~42°42'N, 93°42'E~102°00'E。流域内景观分异明显,从景观类型上可划分出南部祁连山地、中部河西走廊和北部阿拉善高原^[26]。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,年降水量小而蒸发量大,多年平均降水量由南部的250 mm向北减少至不足100 mm,年蒸发量由西南的1200 mm向东北增至2200 mm。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^[27-28]。

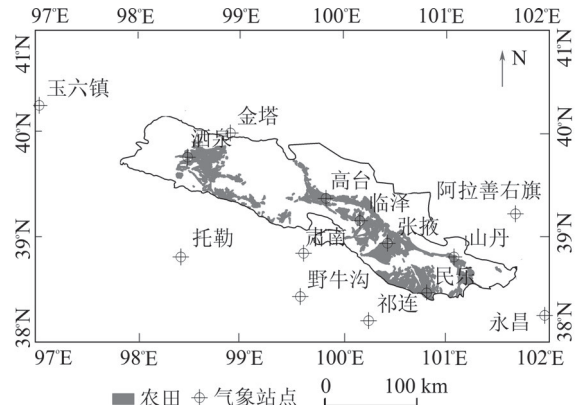


图1 黑河流域中游地区及附近气象站点地理位置
Figure 1 Location of the middle reaches in Heihe River basin and the distribution of meteorological stations in/around the study area

1.2 数据来源与模型

1.2.1 数据来源及处理

采用的遥感数据是美国航空航天局(NASA)数据中心(<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>)提供的2009年3-9月黑河流域中游地区无云覆盖天数的MODIS产品: MOD021KM, MOD03和MOD09GA。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。

气象参数使用黑河流域中游地区及附近14个气象站点(图1)的气象数据,包括相对湿度、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。所用地表物理参数和气象参数分辨率统一至1000 m,数据采用Universal Transverse Mercator投影、WGS-1984地理坐标系。

1.2.2 SEBS模型

SEBS(Surface energy balance system)模型是由Su^[22]提出,它是应用遥感数据处理所获得一系列地表物理参数(如反照率、比辐射率、LAI、地表温度和植被覆盖度等),结合地面同步观测的气象数据或大气模式输出的数据,根据地表能量平衡方程,从而估算大气湍流通量和地表蒸散通量的遥感模型。SEBS模型是依据能量平衡原理,计算地表蒸散量,能量平衡公式如下:

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

其中, λE 为潜热通量,表示一定体积的水从液态转为气态过程中蒸散发所需的能量, λ 为水的汽化热, R_n 为地表净辐射通量, H 为显热通量, 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,

$$R_n = (1 - \alpha)R + \sigma(\varepsilon' T_\alpha^4 - \varepsilon T_o^4). \quad (2)$$

其中, R 为太阳总辐射通量, α 为地表反照率, ε' 为大气比辐射率, ε 为地表比辐射率, σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数, T_α 为气温, T_o 为地表温度, 由分裂窗算法求得^[29].

$$R = I(a + b \frac{n}{N}). \quad (3)$$

其中, I 为太阳常数(1368 W/m^2), a, b 为常数, 分别为 0.25 和 0.50, n 为日照时数, N 为可照时数.

地表反照率 α 可由 MODIS 窄波段反照率计算得到^[30],

$$\alpha = 0.160\alpha_1 + 0.291\alpha_2 + 0.243\alpha_3 + 0.116\alpha_4 + 0.112\alpha_5 + 0.081\alpha_7 - 0.0015. \quad (4)$$

其中, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_7$ 为 MODIS 窄波段反照率.

$$\varepsilon' = 1.24 \times ((0.6108 \times \exp \frac{17.27(T_\alpha - 273)}{237.3 + T_\alpha - 273} \times H_r) / T_\alpha). \quad (5)$$

其中, H_r 为相对湿度^[31], T_α 为气温.

本文将根据 Sobrino 等^[32]的研究计算地表比辐射率 ε 和植被覆盖度 f_c . 当 $NDVI$ 大于 0.5 时, $\varepsilon = 0.990$; 当 $NDVI$ 小于 0.2 时,

$$\varepsilon = 0.9825 - 0.051 \times \alpha_{\text{red}}, \quad (6)$$

其中, α_{red} 为 MODIS 影像红波段反照率; 当 $NDVI$ 介于 0.2 与 0.5 之间时,

$$\varepsilon = 0.971 + 0.018 \times f_c, \quad (7)$$

$$f_c = \frac{(NDVI - NDVI_{\min})^2}{(NDVI_{\max} - NDVI_{\min})^2}, \quad (8)$$

其中, $NDVI_{\max} = 0.5, NDVI_{\min} = 0.2$.

土壤热通量 G_0 取决于地面植被覆盖度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:

$$G_0 = R_n \times (\Gamma_c + (1 - f_c)(\Gamma_s - \Gamma_c)). \quad (9)$$

其中, Γ_c 为植被覆盖区域参数, Γ_s 为裸土覆盖区域参数^[33].

在 SEBS 模型中, 假设土壤水分的两种极端情况. 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, 此时显热通量达到最大值,

$$H_{\text{dry}} = R_n - G_0. \quad (10)$$

其中, H_{dry} 为干燥地表环境下的显热通量.

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

$$\lambda E_{\text{wet}} = R_n - G_0 - H_{\text{wet}}. \quad (11)$$

其中, λE_{wet} 为湿润地表环境下的潜热通量, H_{wet} 为湿润地表环境下的显热通量, 其计算公式如下:

$$H_{\text{wet}} = \frac{(R_n - G_0) - \frac{\rho C_p}{r_{\text{ew}}} \cdot \frac{e_s - e_a}{\gamma}}{1 + \frac{\Delta}{\gamma}}. \quad (12)$$

其中, ρ 为空气密度, C_p 为空气定压比热, r_{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, γ 为干湿计常数, Δ 为饱和水汽压—温度曲线的斜率.

1.3 日蒸散量

SEBS 模型中定义相对蒸发比(Λ_r)为蒸散发速率与潜热通量的比值,

$$\Lambda_r = \frac{\lambda E}{\lambda E_{\text{wet}}} = 1 - \frac{H - H_{\text{dry}}}{H_{\text{dry}} - H_{\text{wet}}}. \quad (13)$$

其中, 显热通量 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(Bulk atmospheric similarity, BAS)参数化求得.

蒸发比 Λ 定义为实际蒸散发与可用通量($R_n - G_0$)的比值,

$$\Lambda = \frac{\lambda E}{R_n - G_0} = \frac{\Lambda_r \lambda E_{\text{wet}}}{R_n - G_0}. \quad (14)$$

日蒸散发 ET_{day} 可由下式转换求得,

$$ET_{\text{day}} = 8.64 \times 10^7 \times \bar{\Lambda} \times \frac{\bar{R}_n - \bar{G}_0}{\lambda \rho_w}. \quad (15)$$

其中, $\bar{\Lambda}$ 为日平均蒸发比, 假定一天内 $\bar{\Lambda}$ 值相对稳定, 由遥感卫星过境时刻蒸发比 Λ 代替, \bar{R}_n 为日平均净辐射, \bar{G}_0 为日平均土壤通量, 近乎为零, λ 为水的汽化热, ρ_w 为水的密度(1000 kg/m^3).

1.4 参考作物蒸散量

采用 FAO56 Penman-Monteith 公式^[15]计算参考作物蒸散量 ET_0 ,

$$ET_0 = \frac{0.409\Delta(R_n - G_0) + \gamma \frac{900}{T + 273} \nu_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34\nu_2)}. \quad (16)$$

其中, T 为 2 m 处风速(m/s), e_s 为饱和水汽压(kPa), e_a 为实际水汽压(kPa).

1.5 作物生长季蒸散估算

使用 METRIC(Mapping evapotranspiration with internalized calibration) 方法^[25]拓展长时间尺度(作物生长季)上的作物农田蒸散. METRIC 方法考虑了辐射变异的日变化, 借助参考蒸散量来进行蒸散的长时间尺度的拓展, 较好地考虑植被生长过程中的生理特性变化对蒸散量的影响. 拓展

方法如下:

$$ET_c = C_{rad}(ET_r F)ET_0. \quad (17)$$

其中, ET_c 为实际蒸散量(mm), C_{rad} 为地形纠正系数, 在水平地区为1, $ET_r F$ 为参考蒸散比, 由卫星过境天数SEBS模型计算的蒸散量除以参考作物蒸散量得到, $ET_r F$ 在一周或者两周内变化很小, 可以计算这一时间内的平均 $ET_r F$ 作为长时间拓展的重要参数, 非卫星过境天数的 $ET_r F$ 可通过时间序列插值得到, ET_0 为参考作物蒸散量(mm).

作物生长季内蒸散总量 ET_{total} 由以下公式计算得到,

$$ET_{total} = \sum_{i=m}^n ET_r F_i ET_{0i}. \quad (18)$$

其中, ET_{total} 为作物生长季总的蒸散量(mm), 生长季开始天数为第 m 天, 结束天数为第 n 天, $ET_r F_i$ 为第 i 天的 $ET_r F$, ET_{0i} 为第 i 天的参考作物蒸散量(mm).

1.6 划分作物生长阶段

黑河流域中游地区的主要农作物是春小麦和玉米, 大部分区域的种植方式为玉米和春小麦的间作, 且两种作物生长季时间交错, 主要集中在3—9月. 由于研究区玉米和春小麦间作, 在区域尺度上不易区分春小麦和玉米的空间分布, 故本文参考吴锦奎等^[2]的干旱区人工绿洲间作农田蒸散研究和程玉菲^[34]在黑河流域中游地区做的作物蒸发蒸腾量时空分布研究来分析作物不同生长阶段的农田蒸散量. 生长季作物农田蒸散量及农田蒸散时空变化规律的确定, 需要划分作物的生长季的开始和结束日期及各个生长阶段. 根据中国气象数据共享网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)提供的研究区农作物物候资料, 并结合FAO56将本研究作物生长季划分为生长初期、生长中期和生长后期. 生长初期为2009-03-12—2009-4-20, 共40天, 春小麦从播种至完全覆盖地面. 生长中期为2009-04-21—2009-8-25, 共127天, 包括春小麦进入生长中期至收割及玉米播种至生长中期. 考虑到春小麦和玉米的生长中期时间不一致, 将生长中期划分为以春小麦为主(中期1)和以玉米为主(中期2)两个阶段, 分别为2009-04-21—2009-06-10和2009-06-11—2009-08-25. 生长后期为2009-08-26—2009-09-30, 共36天, 主要包括玉米的生长末期.

2 结果与分析

2.1 蒸散估算结果的验证及其误差

使用SEBS-METRIC方法估算了2009年黑河流域中游地区作物的农田蒸散量, 需要实际观测

数据的验证. 但黑河流域中游地区各类野外台站对农田蒸散量的实际观测较少, 因而不能做系统的比较. 本文获取了2009年部分天数(6月15日—9月20日, 共98天)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-METRIC方法估算的蒸散量对比, 如图2所示, SEBS-METRIC方法能够较好地模拟黑河流域中游地区作物的农田蒸散量.

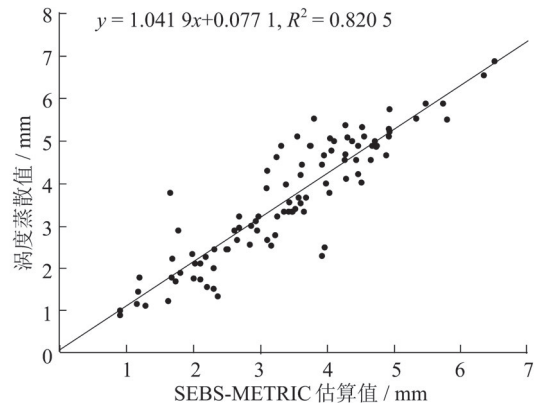


图2 SEBS-METRIC方法估算值与涡度相关蒸散值的比较

Figure 2 ET used SEBS-METRIC model and results of eddy correlation in farmland

2.2 作物农田蒸散变化规律

2.2.1 作物不同生长阶段的农田蒸散

根据作物生长季的划分、土地利用类型图和生长季内每日蒸散, 得到黑河流域中游地区作物不同生长阶段的农田蒸散的空间分布(图3). 从图3中提取研究区内气象站点附近农田的 ET 并计算作物不同生长阶段区域 ET 的平均值, 得到表1. 在作物不同生长阶段, ET 变化明显, 不同生长阶段区域平均 ET 大小排序为: 生长中期2 > 生长中期1 > 生长后期 > 生长初期. 在作物生长初期, 黑河流域中游地区气温低、太阳辐射小, 春小麦已播种, 玉米还未播种, 农田内有大面积的裸地, 所以 ET 较小. 作物进入生长中期后, 由于气温升高, 辐射增强, 春小麦和玉米的生长速度加快, 作物蒸腾能力增强, ET 随之增加, 所以生长中期的 ET 最大, 其中, 以春小麦为主的生长中期1的 ET 要小于以玉米为主的生长中期2的. 作物生长后期, 春小麦已收割, 玉米逐渐成熟, 作物的蒸腾作用减弱, 且此时黑河流域中游地区气温和辐射也逐渐降低, ET 呈明显的减小趋势.

在作物不同生长阶段, ET 的空间分布差异较大. 这主要是不同区域海拔、气温、净辐射、降水和区域种植情况等的差异造成的. 在生长初期, 研究

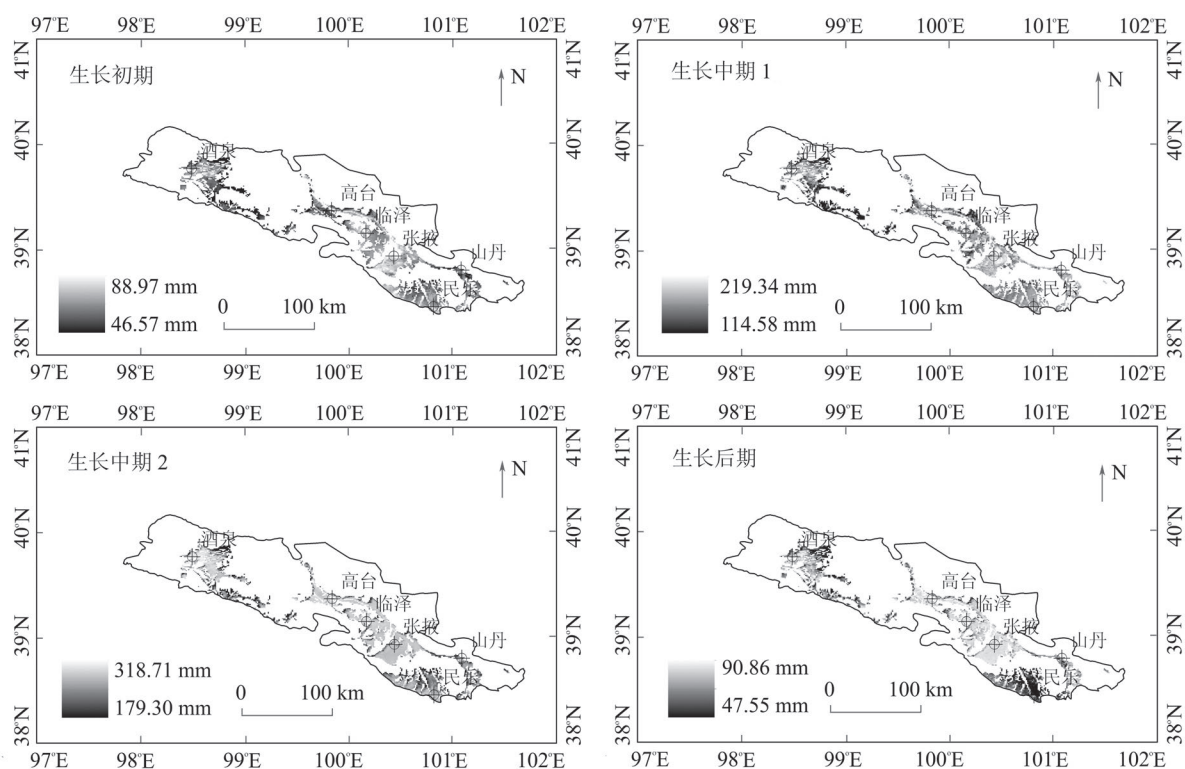


图 3 黑河流域中游地区不同作物生长阶段的农田蒸散空间分布

Figure 3 Spatial distribution of field evapotranspiration at different growing stages in the middle reaches of Heihe River basin

表 1 研究区内气象站点附近及区域平均的农田蒸散量

Table 1 *ET* at meteorological stations and regional average *ET* in the study area

生长期	<i>ET</i> /mm							日均 <i>ET</i> /(mm/d)						
	酒泉	高台	临泽	张掖	山丹	民乐	区域平均	酒泉	高台	临泽	张掖	山丹	民乐	区域平均
生长初期	62.40	65.50	68.75	69.67	59.28	48.59	58.10	1.56	1.64	1.72	1.74	1.48	1.21	1.45
生长中期 1	174.02	167.50	190.60	195.19	175.36	186.38	167.11	3.41	3.28	3.74	3.83	3.44	3.65	3.28
生长中期 2	327.92	304.81	295.80	301.30	295.14	296.65	267.39	4.31	4.01	3.89	3.96	3.88	3.90	3.52
生长后期	82.90	73.08	84.35	85.10	81.42	63.98	75.00	2.30	2.03	2.34	2.36	2.26	1.78	2.08
生长季	647.24	610.89	639.50	651.26	611.20	595.60	567.60	3.19	3.01	3.15	3.21	3.01	2.93	2.80

区 *ET* 为 46.57~88.97 mm, 在研究区内气象站点中, 仅民乐站点附近 *ET* 小于区域水平. 生长中期 1, *ET* 为 114.58~219.34 mm, 研究区气象站点附近的 *ET* 都能达到研究区的平均水平, 其中张掖的最大, 高台的最小; 生长中期 2, *ET* 为 179.30~318.71 mm, 区域平均值达到生长季的最高值, 酒泉的最大, 山丹的最小. 作物生长后期, 整个研究区的 *ET* 迅速降低, 为 47.55~90.86 mm, 其中张掖的最大, 民乐的最小.

2.2.2 农田蒸散的月份变化

3 月春小麦已播种, 农田基本无作物覆盖, 以土壤蒸散为主, *ET* 较低, 日均 *ET* 为 0.95~1.71 mm/d (表 2). 4 月气温升高, 辐射增强, 春小麦逐渐覆盖地表, 玉米开始播种, 随着蒸发和蒸腾作用的加强, *ET* 随之增加, 日均 *ET* 为 1.32~2.80 mm/d (表 2).

5 月春小麦处于生长中期, 蒸腾作用迅速增强, 研究区日均 *ET* 为 1.98~4.04 mm/d (表 2). 6 月春小

表 2 研究区作物生长季各月份的农田蒸散特征

Table 2 Characteristic values of monthly field evapotranspiration in the study area

月份	<i>ET</i> _{min} / mm	\overline{ET}_{min} / (mm/d)	<i>ET</i> _{max} / mm	\overline{ET}_{max} / (mm/d)	<i>ET</i> _{avg} / mm	\overline{ET}_{avg} / (mm/d)
3	18.98	0.95	34.17	1.71	24.49	1.22
4	39.48	1.32	84.03	2.80	56.61	1.89
5	61.32	1.98	125.27	4.04	92.60	3.00
6	92.03	3.07	168.25	5.61	131.90	4.40
7	79.87	2.58	150.97	4.87	119.70	3.86
8	61.87	1.99	123.68	3.98	93.84	3.03
9	26.19	0.87	60.79	2.03	43.78	1.46

*ET*_{min} 为区域月最小农田蒸散, \overline{ET}_{min} 为区域最小农田蒸散日均值, *ET*_{max} 为区域最大农田蒸散, \overline{ET}_{max} 为区域最大农田蒸散日均值, *ET*_{avg} 为区域月平均农田蒸散, \overline{ET}_{avg} 为区域平均农田蒸散日均值.

麦进入抽穗—开花—灌浆期,需水量显著升高,同时玉米进入拔节期,研究区日均 ET 为3.07~5.61 mm/d,达到生长季的蒸散高峰期(表2)。7月春小麦逐渐成熟,进入生长末期,玉米生长速度加快,日均 ET 有所降低,为2.58~4.87 mm/d(表2)。8月春小麦已收割,玉米进入抽穗—灌浆期,日均 ET 为1.99~3.98 mm/d(表2)。9月玉米进入生长末期,蒸腾作用变弱,日均 ET 为0.87~2.03 mm/d(表2)。

2.3 生长季农田蒸散总量的空间分布

由图4可知,黑河流域中游地区作物在全生长季的农田蒸散总量的空间差异较大。 ET 空间分布差异较大主要有两个原因:一是部分地区种植春小麦但不套种玉米,故生长中期和后期 ET 较小;二是自然地理环境的差异,海拔较高地区(如民乐

全生长季 ET 总量的比例分别为10.24%, 29.44%, 47.11%, 13.21%。

黑河流域中游地区农作物农田蒸散总量空间分布差异较大,为398~709 mm,平均值为567 mm。

黑河流域中游地区作物农田蒸散月份变化明显。3月农田基本无作物覆盖,以土壤蒸散为主, ET 较低。4月气温升高,辐射增强,春小麦逐渐覆盖地表,玉米开始播种,蒸发和作物蒸腾作用的加强, ET 随之增加。5月春小麦进入生长中期, ET 迅速增大。6月春小麦和玉米需水量最大,达到生长季的需水高峰, ET 达到最大。7月春小麦逐渐成熟,进入生长末期,玉米生长速度加快, ET 有所降低。8月春小麦已收割,玉米进入抽穗—灌浆期, ET 维持在一定水平。9月玉米进入生长末期,蒸腾作用变弱, ET 迅速降低。

在黑河流域中游地区,吴锦奎等^[2],吉喜斌等^[35]是在单点上进行的农田蒸散研究,程玉菲^[34]在研究中使用各县气象站附近的蒸散代表各县整体蒸散情况,两种方法都不能代表整个黑河流域中游地区的区域农田蒸散情况。相对于传统估算方法,本文使用遥感技术实现了黑河流域中游地区的区域农田蒸散的估算。

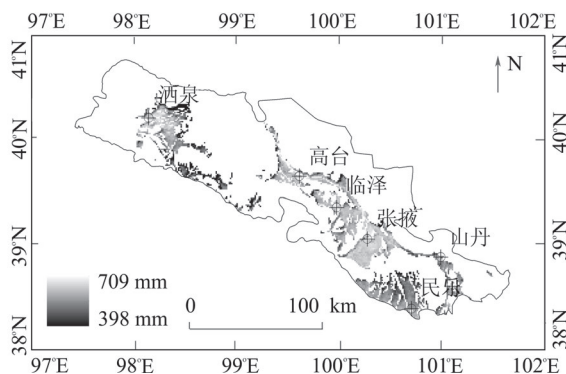


图4 2009年黑河流域中游地区作物农田蒸散总量空间分布

Figure 4 Spatial distribution of total field evapotranspiration in 2009 in the middle reaches of Heihe River basin

县等) ET 较小。全生长季 ET 总量最大值为709 mm,最小值为398 mm,平均值为567 mm。其中,研究区内气象站点中张掖、酒泉和临泽附近 ET 总量较高,超过639mm;其次是高台和山丹的,为611, 610 mm;民乐的最小,为595 mm。

3 结论与讨论

使用临泽观测站涡度相关蒸散数据与SEBS-METRIC方法估算结果在时间序列上对比分析表明SEBS-METRIC方法能够有效估算黑河流域中游地区作物生长季的农田蒸散。由于客观上蒸散观测站点的缺少,使得验证具有局限性。

在作物不同生长阶段,黑河流域中游地区农作物农田蒸散在时间和空间上变化明显。生长初期、生长中期1、生长中期2和生长后期的 ET 分别为1.45, 3.28, 3.52, 2.08 mm/d,各生长阶段 ET 占

参考文献

- [1] WU Jing-kui, DING Yong-jian. The variation and utilization of water resource in Heihe River basin[C]//BREBBIA C. Water Resources Management. Sounthampton: WIT Press, 2005: 331-340.
- [2] 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.
- [3] 宁宝英,何元庆,和献中,等.黑河流域水资源研究进展[J].中国沙漠,2008,28(6): 1180-1185.
- [4] 尹海霞,张勃,王亚敏,等.黑河流域中游地区近43年来农作物需水量的变化趋势分析[J].资源科学,2012,34(3): 409-417.
- [5] 张光辉,聂振龙,刘少玉,等.甘肃西北部黑河流域水资源对下游生态环境变化的影响[J].地质通报,2006,25(1/2): 244-250.
- [6] 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.
- [7] 刘晓英,李玉中,郝卫平.华北主要作物需水量近50年变化趋势及原因[J].农业工程学报,2005,21(10): 155-159.
- [8] GUNTER W, VAN DER MARIJN V, ALBERTO A, et al. Estimating irrigation water requirements in

- Europe[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 373(3): 527–544.
- [9] 胡志桥, 田霄鸿, 张久东. 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.
- [10] 马海燕, 缴锡云. 作物需水量计算研究进展[J]. *水科学与工程学报*, 2006(5): 5–7.
- [11] 吴文玉, 马晓群, 陈晓艺, 等. GIS支持下安徽省近35 a 参考作物蒸散量的时空变化[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 251–256.
- [12] ESPADAFOR M, LORITE I J, GAVILÁN P, et al. An analysis of the tendency of reference evapotranspiration estimates and other climate variables during the last 45 years in Southern Spain[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(6): 1045–1061.
- [13] IRMAK S, ALLEN R G, WHITTY E B. Daily grass and alfalfa-reference evapotranspiration estimates and alfalfa-to-grass evapotranspiration ratios in Florida[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2003, 129(5): 360–370.
- [14] ITENFISU D, ELLIOTT R L, ALLEN R G, et al. Comparison of reference evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2003, 129(6): 440–448.
- [15] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United, 1998.
- [16] 刘振华, 赵英时, 李笑宇, 等. 基于蒸散发模型的定量遥感缺水指数[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(2): 114–120.
- [17] JIANG Le, ISLAM S. A methodology for estimation of surface evapotranspiration over large areas using remote sensing observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(17): 2773–2776.
- [18] 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.
- [19] BASTIAANSEN 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: 198–212.
- [20] WU Chih-da, CHENG Chi-Chuan, LO Huann-chung, 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.
- [21] 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.
- [22] SU Zhong-bo. The surface energy balance system(SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2002, 6(1): 86–100.
- [23] ALKHAIER F, SU Zhong-bo, 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*, 2012, 16(7): 1833–1844.
- [24] 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.
- [25] ALLEN R G, TASUMI M, TREZZA R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (metric): model[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2007, 133(4): 380–394.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 赵铭石, 勾晓华, 周非飞, 等. 黑河中上游地区NDVI对气象因子的响应分析[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2012, 47(6): 33–38.
- [29] SOBRINO J A, RAISSOUNI N. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: application to Morocco[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(1): 353–366.
- [30] LIANG S. Narrow band to broadband conversions of land surface albedo I: algorithms[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(2): 213–238.
- [31] 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.
- [32] SOBRINO J A, KHARRAZ J EL, LI Z L. Surface temperature and water vapour from MODIS data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(24): 5161–5182.
- [33] 何延波, SU Zhong-bo, JIA Li, 等. SEBS模型在黄淮海地区地表能量通量估算中的应用[J]. *高原气象*, 2006, 25(6): 1092–1100.
- [34] 程玉菲. 黑河干流中游平原作物蒸发蒸腾量时空分布研究[D]. 兰州: 兰州大学资源环境学院, 2007.
- [35] 吉喜斌, 康尔泗, 赵文智, 等. 黑河流域山前绿洲灌溉农田蒸散发模拟研究[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(6): 713–719.

(责任编辑: 王春燕)