·作物水肥高效利用·

文章编号: 1672 - 3317 (2024) 04 - 0001 - 08

基于 SEBAL 模型的陆浑灌区生育期内实际蒸散发研究

张金萍^{1,2},李杜白¹,李学淳¹,崔云斐¹
(1.郑州大学水利与交通学院,郑州 450001;
2.黄河生态保护与区域协调发展研究院,郑州 450001)

摘 要:【目的】探索基于遥感技术和能量平衡模型建立准确快捷评估灌区高空间分辨率蒸散发值的方法。【方法】 基于 SEBAL模型,利用 Landsat-8 遥感影像和气象数据估算了作物生育期内陆浑灌区的实际蒸散发值,验证了能量 平衡模型在陆浑灌区的适用性,进而分析了陆浑灌区实际蒸散发的时空演变特征。【结果】SEBAL 模型模拟值与蒸 散发产品 (v1.5)的相关系数在 0.8 以上,SEBAL 模型模拟值与站点实测值的相关系数在 0.96 以上。生育期内, 2—5 月实际蒸散发值逐月增加,作物种植区实际蒸散发值大于林区,实际蒸散发高-高聚类点主要分布在作物种植 区;6—7 月实际蒸散发出现年内最高值 106.52 mm,林区实际蒸散发值大于作物种植区,实际蒸散发高-高聚类点 主要分布在林区;8—9 月实际蒸散发值整体开始降低,实际蒸散发高-高聚类点数量减少,并向东北地区收缩。 【结论】SEBAL 模型利用遥感卫星影像等数据可以得到准确的高空间分辨率地表实际蒸散发估算结果,在灌区尺 度具有强适用性。

关键词:实际蒸散发; SEBAL模型; 作物生育期; 空间自相关性 中图分类号: S271 文献志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023383

张金萍, 李杜白, 李学淳, 等. 基于SEBAL模型的陆浑灌区生育期内实际蒸散发分析[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(4): 1-8. ZHANG Jinping, LI Dubai, LI Xuechun, et al. Using the surface energy balance algorithm model to calculate evapotranspiration in Luhun irrigation area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(4): 1-8.

0引言

【研究意义】蒸散发是陆地水汽循环中的重要 一环,全球约 70%的地表水以蒸散发方式进入大气。 对于灌区而言,灌溉用水占区域水资源量较大,所 以灌区蒸散发估算和模拟对于维系灌区水量循环和 能量循环、调节气候和生态环境均具有重要作用^[1]。 而太阳辐射是蒸散发的重要驱动因素,辐射到达地 面以后,一部分被陆地表层水面和浅层土壤水吸收 形成蒸发,一部分由植物吸收并通过生物化学反应 形成蒸腾^[2],蒸发与蒸腾共同组成了蒸散发。可见, 蒸散发不仅是水量循环的核心,也是能量循环的重 要组成部分^[3]。【研究进展】随着地球遥感技术的发 展,国内外开展了利用卫星遥感影像数据计算陆面 蒸散发的研究。郑超磊等^[4]利用国产高分一号卫星 遥感数据,反演出了中国区域逐旬实际蒸散发值; French 等^[5]利用 Sentinel-2 卫星遥感数据反演出美国

收稿日期: 2023-08-23 修回日期: 2023-12-29

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200205);国家自然科学基金面上项目(52379028);河南省基金面上项目(212300410404) 作者简介:张金萍(1979-),女。教授,博导,主要从事节水与水资源高效利用、水资源规划与管理、水资源不确定性分析研究。 E-mail:jinping2000_zh@163.com

©《灌溉排水学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

亚利桑那州灌溉作物蒸散发值。将遥感技术和能量 平衡模型结合,可以快速准确估算区域蒸散发值。 其中, Bastiaanssen 等^[6]基于能量平衡原理提出了 SEBAL 模型。Grosso 等^[7]证明了 SEBAL 在顺境和 逆境条件下具有提供准确预测蒸散发值的能力。模 型模拟值为卫星过境时刻的瞬时蒸散发值,在时间 尺度提升方面的研究中,很多学者利用蒸发比不变 法将 SEBAL 模型模拟的瞬时蒸散发值提升到了日蒸 散发值^[8-9]。【切入点】大多数 SEBAL 模型研究的时 间尺度却也局限于瞬时尺度或者日尺度, 仅模拟出 了卫星过境日的蒸散发情况,卫星过境日在作物生 育期内是否具有代表性有待考证。【拟解决的关键问 题】为此,引入参考蒸散比不变理论,使用 Landsat-8 遥感影像数据,经过时间尺度扩展,进一 步得到高空间分辨率的灌区月尺度蒸散发值。以河南 省大型灌区一陆浑灌区为研究地区,利用 SEBAL 模 型求解灌区 2013—2020 年作物生育期内逐月实际蒸 散发值,并与蒸散发产品、国家气象站点实测数据进 行对比,验证模型在陆浑灌区的适用性,进而分析灌 区实际蒸散发的时空演变特征以及空间自相关性。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陆 浑 灌 区 位 于 河 南 省 西 部 , 介 于 东 经 112°5′06″—112°5′24″,北纬 34°10′28″—34°45′34″, 设计灌溉面积 134.24 hm²,跨黄河、淮河两大流域, 受益范围为洛阳、平顶山和郑州市的 7 个县(市)。 灌区多年平均降水量 600.0 mm,60%降水量集中在 6—9 月,多年平均蒸发量 550 mm。灌区地处伏牛 山北麓、嵩山和熊耳山谷地的浅山丘陵区,地势西北 高东南低。

陆浑灌区主要种植小麦、大麦、油菜等,春夏 以小麦为主,种植面积占灌区面积的 85%;早秋以 棉花为代表,种植面积占灌区面积的 15%;晚秋主 要种植玉米、高粱、大豆等,以玉米为代表,种植 面积占灌区面积的 85%。本文选择小麦、棉花及玉 米为主要粮食作物,3种作物生育期的灌溉时间分别 为2-5月、4-8月以及 8-9月。

1.2 数据来源与处理

研究所涉及的数据包括气象数据、土壤参数、 遥感影像数据以及 DEM 数据。其中,气象数据来自 灌区周边 12 个县级气象站点,利用反距离权重插值 法插值到整个陆浑灌区;土壤参数来自第二次全国 土壤调查数据集;遥感影像选择云量<5%的 Landsat-8 遥感图像,2013—2020 年选择的所有遥感图像见表 1; DEM 数据选择中国 ASTER GDEM V 2 的 30 m 分辨 率 DEM 数据(图 1)。

研究区域 *DEM*(Digital Elevation Model)及周 边 12 个县级气象站点分布见图 1。

表 1	蒸散发反演所用	Landsat-8 遥感影像信息
-----	---------	------------------

Tab.1 Landsat-8 remote sensing image information used for evapotranspiration inve	rsion
---	-------

					-	-	
时间	采集日期	过境时间(GMT)	日序数(DOY)	时间	采集日期	过境时间(GMT)	日序数(DOY)
2月	20160205	3:01	36	6月	20130604	3:03	155
	20200216	3:01	47		20140617	3:00	168
3月	20200319	3:00	79		20190707	3:00	188
	20170327	3:00	86	7月	20140725	3:00	206
	20200404	3:00	95		20150728	3:00	209
	20170412	3:00	102	o 日	20150813	3:00	225
4 月	20190418	3:00	108	8月	20200826	3:01	239
	20170428	3:00	118		20150914	3:00	257
	20140506	3:00	126	9月	20160916	3:01	260
5 月	20160511	3:00	132		20180922	3:00	265
	20140522	3:00	144				





Fig.1 *DEM* and meteorological stations in Luhun irrigation district 1.3 研究方法

SEBAL 模型利用遥感影像的可见光、近红外与 热红外波段及少量气象数据计算研究区域的蒸散量。 其中,涉及的能量平衡方程为:

$$R_{\rm n}-G+A_{\rm d}-S_{\rm f}-P=\lambda E+H, \qquad (1)$$

式中: R_n 是净辐射 ($MJ/(m^2 d)$); G 是土壤热通量 ($MJ/(m^2 d)$); A_d 是水平方向能量交换 ($MJ/(m^2 d)$); S_t 是物理储能 ($MJ/(m^2 d)$); P 是生物化学储能 ($MJ/(m^2 d)$); E 是潜热通量 ($MJ/(m^2 d)$); H 是显 热通量 ($MJ/(m^2 d)$)。

在大尺度上,
$$A_d$$
、 S_t 、 P 为0,得到:
 $\lambda E=R_n-G-H_{\circ}$ (2)

1.3.1 净辐射 Rn 计算

地面净辐射是地表的主要能量来源,可根据地 表辐射平衡方程由入射能量减去出射能量求得^[10]。

 $R_n = (1-\alpha) \cdot K_{in} + (L_{in} - L_{out}) - (1-\varepsilon) \cdot L_{in}$, (3) 式中: α 为地表反照率; K_{in} 为入射的短波辐射 (MJ/(m² d)); L_{in} 为入射的长波辐射 (MJ/(m² d)); L_{out} 为反射的地表长波辐射 (MJ/(m² d)); ε 为地表 比辐射率。

1.3.2 土壤热通量 G 计算

采用经验公式估算土壤热通量[11]。

$$G = \frac{T_{\rm s} \cdot 273.16}{\alpha} \cdot (0.003 \ 8 \cdot \alpha + 0.007 \ 4 \cdot \alpha^2) \cdot (1 - 0.98 \cdot NDVI^4) \cdot R_{\rm n},$$

式中: *T*_s为地表温度 (K); *NDVI* 为归一化植被指数。 1.3.3 感热通量 *H* 计算

$$H = \rho \cdot c_{\mathbf{P}} \cdot \frac{dT}{\gamma_{ah}} = \rho \cdot c_{\mathbf{P}} \cdot \frac{a \cdot T_{s} + b}{\gamma_{ah}}, \qquad (5)$$

式中: ρ 为空气密度(kg/m³); $c_{\rm P}$ 为空气定压比热容 (1.004×10³ J/(kg K));dT为空气动力学温度与空气 温度的差值(K);a、b为该线性关系的系数; $\gamma_{\rm ah}$ 为 空气动力学阻力(s/m); $T_{\rm s}$ 为地表辐射温度(K)。 引入 Monin-Obukhov 理论求解 $\gamma_{ah}^{[12]}$, 引入地表 辐射温度-植被指数 (T_s-f_c) 特征空间求解参数 a、 $b^{[13]}$ 。

1.3.4 迭代校正

为了考虑地表热量对大气浮力效应的影响,在 SEBAL模型中运用了莫宁-奥布霍夫(M-O)提出的 相似性理论,进行多次迭代运算显热通量,不断校 正大气浮力效应^[14]。M-O长度*L*计算式为:

$$L = \frac{\rho \cdot c_{\rm P} \cdot u_*^3 \cdot T_{\rm s}}{k \cdot g \cdot H} \, {}_{\circ} \tag{6}$$

1) L<0时,

$$\Psi_{m(200m)} = 2 \cdot \ln\left(\frac{1 + x_{(200m)}}{2}\right) + \ln\left(\frac{1 + x_{(200m)}^2}{2}\right)$$

 $-2 \cdot \arctan\left(x_{(200\text{m})}\right) + 0.5 \cdot \pi, x_{(200\text{m})} = \left(1 - 16 \cdot \frac{200}{L}\right)^{0.25}, \quad (7)$

$$\Psi_{h(2m)} = 2 \cdot \ln\left(\frac{1 + x_{(2m)}^2}{2}\right), x_{(2m)} = (1 - 16 \cdot \frac{2}{L})^{0.25}, \quad (8)$$

$$\Psi_{h(0.1m)} = 2 \cdot \ln\left(\frac{1 + x_{(0.1m)}^2}{2}\right), \ x_{(2m)} = (1 - 16 \cdot \frac{0.1}{L})^{0.25}.$$
(9)

2) L>0时,

$$\Psi_{\rm m(200m)} = -5 \cdot \left(\frac{200}{L}\right), \ \Psi_{\rm h(2m)} = -5 \cdot \left(\frac{2}{L}\right), \ \Psi_{\rm h(0.1m)} = -5 \cdot \left(\frac{0.1}{L}\right), \ (10)$$

$$u_{*} = \frac{k \cdot u_{200}}{\ln\left(\frac{200}{Z_{\text{om}}}\right) \cdot \Psi_{\text{m}(200\text{m})}} \,. \tag{11}$$

修正后的空气动力学阻抗计算式为:

$$\gamma_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right) \cdot \Psi_{h(Z_2)} \cdot \Psi_{h(Z_1)}}{u \cdot k} \circ$$
(12)

1.3.5 尺度提升

1)瞬时尺度提升至日尺度

采用蒸发比不变法将瞬时蒸散发扩展到日尺度 蒸散发。蒸发比在白天当中基本保持稳定^[15]。假设 在时间尺度上,实际蒸散发与地表可利用能量(地 表净辐射通量 *R*_n与土壤热通量 *G*之差)的比值保持 不变,即:

$$\frac{ET_{\rm i}}{ET_{\rm d}} = \frac{(R_{\rm n}-G)_{\rm i}}{(R_{\rm n}-G)_{\rm i}},\tag{13}$$

式中: *ET* 代表实际蒸散发 (mm), 下标 "i"和 "d" 分别代表瞬时尺度与日尺度。

2) 日尺度提升至月尺度

某一天的实际蒸散发 *ET* 与参考作物蒸散发 *ET*₀ 之间的比值是不变的^[16],所以通过计算各月过境时 间遥感影像的日均*ET*与日均*ET*₀之间的比值 *EF*_{month}, 以此作为该月的特征值来计算该月的实际蒸散量,即:

$$EF_{\text{month}} = \frac{\overline{ET}}{\overline{ET_0}} \circ \tag{14}$$

其中, *ET*₀使用 P-M 公式计算得到, 即:

$$ET_{0} = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot \left(R_{n_{d}} \cdot G_{d}\right) + \gamma \frac{900}{T_{a} + 273.15} \cdot U_{2} \cdot \left(e_{s} \cdot e_{a}\right)}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + 0.34 \cdot U_{2}\right)}, \quad (15)$$

式中: R_{n_d} 为日净辐射通量 (MJ/(m² d)); G_d 为日土 壤热通量 (MJ/(m² d)); T_a 为空气温度 (\mathbb{C}); U_2 是 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); Δ 为饱和水汽压与温度的曲线斜 率 (kPa/ \mathbb{C}); γ 为温度计常数 (kPa/ \mathbb{C})。

月尺度实际蒸散发 ET month 为:

 $ET_{\text{month}} = EF_{\text{month}} \times ET_{0_{\text{month}}}$, (16) 式中: $ET_{0_{\text{month}}}$ 表示当月参考作物蒸散发值 (mm)。

2 结果与分析

2.1 SEBAL 模型计算结果验证

为了验证 SEBAL 模型模拟值在陆浑灌区的适应 性,选择以下 2 类数据集对 SEBAL 模型模拟值进行 精度验证:一是基于蒸散发互补方法建立的中国地 表蒸散发产品(v 1.5)^[17];二是汝州和登封站点实 测蒸散发数据。

2.1.1 蒸散发产品对比

基于蒸散发互补方法建立的中国地表蒸散发产品 (v1.5),输入数据包括 CMFD 向下短波辐射、向下 长波辐射、气温、气压,以及 GLASS 地表发射率和 反照率、ERA 5-land 地表温度和空气湿度、NCEP 散 射辐射率等。时间分辨率为逐月,空间分辨率为 0.1°。

在陆浑灌区随机取 6 个样本点(图 2),分别提 取模型模拟值与中国地表蒸散发产品(v 1.5)在样 本点的实际蒸散发值,计算 2—9 月实际蒸散发逐月 均值,比较模型模拟值和蒸散发产品值之间的误差。



Fig.2 Random sample points and country site distribution

图 3 为 2—9 月模型模拟值与蒸散发产品值逐月 蒸散发对比结果。由图 3 可知,模型模拟值与蒸散 发产品值整体呈线性关系,不同月份模型模拟值与 蒸散发产品值的相关性有一定差异。冬季(2月)采 样点实际蒸散发值普遍较小;春季(3—5月)采样 点实际蒸散发值逐月增加,3月实际蒸散发值增幅小 于4月实际蒸散发值增幅,3月、5月模型模拟值与 蒸散发产品值的相关性大于4月;夏季(6-8月) 实际蒸散发值普遍较大,7月出现年内实际蒸散发值 的极大值,夏季模型模拟值略大于蒸散发产品值, 这与 SEBAL 模型本身在水热胁迫较大的环境下会一 定程度高估蒸散发的特点有关;秋季(9月)实际蒸 散发值逐渐降低,模型模拟值与蒸散发产品值表现 出良好的相关性。





Fig.3 Comparison of the simulated value of SEBAL model with evapotranspiration product

表 2 为 SEBAL 模型模拟值与蒸散发产品值的相 关系数、均方根误差和平均绝对百分比误差。由表 2 可知,模型模拟值与蒸散发产品值的相关系数在 0.8 以上,相关性良好;9月模型模拟值与蒸散发产品值 的相关系数最高,为 0.935;8 月模型模拟值与蒸散 发产品值的相关系数最低,为 0.841。模型模拟值与 蒸散发产品值的均方根误差均在 3 以下,符合精度 验证要求。其中,8月模型模拟值与蒸散发产品值的 均方根误差最小,为 0.094;6 月模型模拟值与蒸散 发产品值的均方根误差最大,为 2.581。模型模拟值 与蒸散发产品值的平均绝对百分比误差均<25%。其 中,5月模型模拟值与蒸散发产品值的平均绝对百分 比误差最小,为 3%;2 月模型模拟值与蒸散发产品 值的平均绝对百分比误差最大,为 21.8%。

2.1.2 站点实测数据对比

100

70

40

10

2

3

4

5

(a) 登封

7

6 月份 8

实际蒸散发值/mm

图 4 为 2—9 月登封、汝州站蒸散发站点实测值 与 SEBAL 模型模拟值对比结果。由图 4 可知,2 个 蒸散发站点实测值与 SEBAL 模型模拟值均具有良好

站点实测值

模型模拟值



表 2 SEBAL 模型模拟值与蒸散发产品值的误差

Tab.2 Error between the simulated value of SEBAL model and

evapotranspiration product							
时间	相关系数	均方根误差	平均绝对百分比误差				
2 月	0.915	0.416	0.218				
3月	0.934	0.480	0.102				
4 月	0.904	2.287	0.124				
5 月	0.922	0.597	0.030				
6月	0.882	2.581	0.068				
7月	0.876	2.272	0.096				
8月	0.841	0.094	0.039				
9月	0.935	1.996	0.082				



图 4 登封、汝州站蒸散发实测值与 SEBAL 模型模拟值对比

Fig.4 Comparison of the evapotranspiration measured values and the simulated value of SEBAL model at Dengfeng and Ruzhou stations

表 3 站点实测值与 SEBAL 模型模拟值误差

Tab.3 Errors between the measured values of the site and the simulated values of SEDAL model

the simulated values of SEBAL model						
站点	时间	绝对误差/	相对	相关	均方根	平均绝对
		mm	误差	系数	误差/mm	百分比误差
登封	2月	0.688	0.044		0.243	0.135
	3月	1.146	0.065			
	4月	15.046	0.268	0.963		
	5月	3.163	0.059			
	6月	0.298	0.005			
	7月	23.870	0.247			
	8月	17.361	0.243			
	9月	7.942	0.149			
汝州	2月	0.722	0.073		0.255	0.126
	3月	1.366	0.096			
	4月	8.490	0.221			
	5月	10.838	0.215	0.974		
	6月	7.925	0.110			
	7月	17.056	0.178			
	8月	2.333	0.031			
	9月	3.753	0.086			

2.2 生育期内灌区蒸散发变化分析

主要作物生育期内陆浑灌区实际蒸散发值见表 4 和图 5。由表 4 和图 5 可知,陆浑灌区 2-7 月实 际蒸散发值逐月增加,7月实际蒸散发出现年内最高 值,7-9月实际蒸散发值逐月降低。3-4月实际蒸 散发值变化率最高,春季实际蒸散发值平均变化率

(103.60%) 高于夏季实际蒸散发值平均变化率 (28.76%)。作物生育期内灌区实际蒸散发值空间变 化如图6所示。

表4 作物生育期陆浑灌区实际蒸散发值 Tab.4 Actual evapotranspiration in Luhun irrigation area during crop growth period







图6 生育期灌区实际蒸散发值空间变化

Fig.6 Spatial variation of actual evapotranspiration in irrigation area during growth period 由图 6 可知, 2 月东南地区实际蒸散发值较高, 西部地区和东北部林区实际蒸散发值较低。3-5月 种植小麦的西部地区、东南地区和东北地区实际蒸 散发值逐月增加,5月灌区实际蒸散发值达到春季最 高值 60.881 mm。6 月种植小麦的西部地区和东南地 区实际蒸散发值较低,沿南部的北汝河呈条带状分 布。灌区实际蒸散发高值向东北地区偏移,东北部 林区灌区实际蒸散发最高。7-8月灌区实际蒸散发

最高值仍在东北地区,中西部地区实际蒸散发高值 呈块状均匀分布。此时,灌区主要种植作物为棉花 和玉米,7月为棉花开花阶段,灌区实际蒸散发值达 到年内最高值 106.522 mm; 8 月棉花进入吐絮阶段, 玉米先后进入抽穗、吐丝及灌浆阶段,灌区实际蒸 散发值降低至 87.596 mm。9月玉米进入成熟阶段, 灌区实际蒸散发值整体降低,均值为 39.903 mm, 东南地区出现实际蒸散发最低值,东北地区仍然是

实际蒸散发高值的主要贡献地区。

2.3 蒸散发空间自相关性

在陆浑灌区内均匀选取 433 个分析点,计算每个 分析点不同月对应的实际蒸散发值,通过空间自相关 性分析判断灌区实际蒸散发在空间上的聚合程度。

表 5 为空间自相关性分析得出的 Moran's 指数、 Z 得分以及 P 值。由表 5 可知,作物生育期内陆浑 灌区实际蒸散发在空间分布上是聚类模式具有 99% 以上的置信水平^[18]。同时,根据 Z 值可知,春夏季 实际蒸散发具有更强的聚合性。

通过高/低聚类分析陆浑灌区实际蒸散发高值和 低值的聚类程度,将 433 个分析点分为 5 种局部聚 类类型:无影响、高-高聚类、高-低异常值、低-高 异常值、低-低聚类^[19]。

图 7 为陆浑灌区实际蒸散发值局部聚类类型。 由图 7 可知,2—9 月灌区内实际蒸散发高-高聚类点 位置和实际蒸散发低-低聚类点位置发生了空间上的 移动。2 月实际蒸散发高-高聚类点分布在东南小麦 种植区和东北小麦种植区,实际蒸散发低-低聚类点 分布在西南部分山区和东北部山区;3—5 月灌区气



温整体开始回升,实际蒸散发高-高聚类点由东南地 区向中部地区延伸,实际蒸散发低-低聚类点出现在 西南部山区和中部山区;6月小麦开始收获,林区实 际蒸散发值占比变大,实际蒸散发高-高聚类点出现 在东北部山区,实际蒸散发低-低聚类点主要分布在 东南地区和西部地区;7月实际蒸散发高-高聚类点 分布在东北部地区,聚类密度有所降低,实际蒸散 发低-低聚类点分布在东南地区和中部地区;8月实 际蒸散发高-高聚类点向东北角压缩,聚类密度继续 降低;9月玉米开始收获,东北部地区出现异常值, 实际蒸散发低-低聚类点主要分布在东南地区。

表 5 陆浑灌区实际蒸散发空间自相关性分析表 Tab.5 Spatial autocorrelation analysis table of

actual evapotranspiration in Luhun irrigation district						
时间	Moran's 指数	期望指数	Z得分	<i>P</i> 值		
2月	0.138 049	-0.002 315	5.248 011	0		
3月	0.387 205	-0.002 315	14.546 887	0		
4月	0.368 539	-0.002 315	13.853 733	0		
5月	0.374 532	-0.002 315	14.067 529	0		
6月	0.409 445	-0.002 315	15.387 017	0		
7月	0.370 128	-0.002 315	13.936 588	0		
8月	0.289 719	-0.002 315	10.938 860	0		
9月	0.163 199	-0.002 315	6.216 266	0		





3 讨论

真实性检验是判定遥感估算地表蒸散发准确度 的重要途径。乔成龙等^[20]耦合了遥感技术和能量平 衡模型,估算出了区域实际蒸散发值,基于此方法, 本研究表明,SEBAL 模型可用于估算区域实际蒸散 发值。本研究发现,陆浑灌区 2—7 月实际蒸散发值 逐月增加,7 月实际蒸散最高,7—9 月实际蒸散发 值逐月减小,这与邹磊等^[21]关于河南中西部地区实 际蒸散发时间演变趋势的研究结论相一致。2—6 月 灌区主要种植作物为小麦,2、3 月是小麦返青、拔 节生育期,4 月是小麦孕穗期,5 月小麦依次经历杨 花、灌浆、黄熟期,6月小麦收割。小麦生长耗水周 期与温度增加共同作用,使得2—6 月灌区实际蒸散 发逐月增加,这与胡倩等^[22]研究北方冬小麦蒸散发 时空变化趋势得出的结论一致。7 月灌区净辐射年内 最强,相应的气温和地表辐射温度达到年内最高值。 此时主要受温度影响,灌区实际蒸散发最高,这与 张志胤等^[23]研究得出与蒸散发分密切相关的驱动因 子为气温的结论一致。8—9 月灌区主要种植作物为 玉米,8月玉米先后进入抽穗、吐丝及灌浆阶段,9 月玉米进入成熟阶段。与此同时,8—9月实际蒸散 发值逐月降低,这与林馨贝等^[24]研究结论一致。本 研究使用开源高空间分辨率的 Landsat-8 遥感影像数 据,模拟得到 30 m分辨率的陆浑灌区实际蒸散发值 空间图,较马亚丽等^[25]利用克里金插值方法得出的 区域实际蒸散发值空间图分辨率更高,可以更好反应 出不同地物类型之间蒸散发的差异。参考孙小芳^[26] 自相关性分析的思想,对灌区实际蒸散发值进行了 局部聚类分析,更直接客观的认识了灌区实际蒸散 发的空间变异性。

本研究经历了瞬时尺度提升至日尺度、日尺度 提升至月尺度 2 个阶段。其中,本研究实际蒸散发 瞬时尺度提升至日尺度采用蒸发比法,朱明承等^[27] 也是通过蒸发比不变法估算出了中国北方典型农田 的日蒸散发量。对于日尺度提升至月尺度的方法, 大量研究[28-29]简单将某一特定日期的实际蒸散发值 与该月实际天数相乘,得到该月实际蒸散发量。而 本文引入参考蒸散比不变法进行尺度提升,考虑到 了不同日期之间气象和地表因子的差异,较传统方 法得到了更合理、精度更高的月实际蒸散发值。本 研究通过遥感反演可以得到灌区高空间分辨率的实 际蒸散发值结果,但 2013-2020 年部分月份的 Landsat-8 遥感影像产品无法使用,所以计算可用月 份的实际蒸散发平均值作为作物生育期内的月实际 蒸散发均值。未来可以考虑将已有的时间分辨率高、 空间分辨率低的蒸散发模型产品与基于 Landsat-8 遥 感影像计算得到的时间分辨率低、空间分辨率高的 实际蒸散发结果进行时空融合,以期得到时空分辨 率高的灌区实际蒸散发结果。

4 结 论

1) SEBAL 模型模拟值与蒸散发产品值、站点 实测值的相关系数在 0.8、0.96 以上,平均绝对百分 比误差均<25%。因此 SEBAL 模型可用于计算陆浑 灌区实际蒸散发。

2)作物生育期内,2-7月实际蒸散发值逐月增加,7-9月实际蒸散发值逐月降低。实际蒸散发最低值出现在2月,为8.467mm;实际蒸散发最高值出现在7月,为106.522mm。

3)2-5月陆浑灌区实际蒸散发高-高聚类点出现在中部种植区,6-8月实际蒸散发高-高聚类点向东北地区偏移,9月实际蒸散发高-高聚类点出现在东北地区,实际蒸散发低-低聚类点出现在东南地区。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

- 参考文献:
- [1] 刘馨井雨,韩旭东,张晓春,等.基于 SEBAL 模型和环境卫星的区域
 蒸散发量及灌溉水利用系数估算研究[J].灌溉排水学报,2021,40(8):
 136-144.

LIU Xinjingyu, HAN Xudong, ZHANG Xiaochun, et al. Using SEBAL model and HJ satellite data to calculate regional evapotranspiration and irrigation water use efficiency[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(8): 136-144.

- [2] 郑健, 鲍婷婷, 杨赟, 等. 参考作物蒸发蒸腾量计算方法在甘肃省不同 区域的适用性分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(10): 1-9. ZHENG Jian, BAO Tingting, YANG Yun, et al. Reference evapotranspiration in Gansu Province calculated using different methods[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(10): 1-9.
- [3] 苗林, 张成福, 王雨晴, 等. 科尔沁沙地不同土地利用类型对区域水分 平衡的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(8): 106-113.
 MIAO Lin, ZHANG Chengfu, WANG Yuqing, et al. The effects of land usage on water balance in the sandy areas in Horqin of Inner Mongolia[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(8): 106-113.
- [4] 郑超磊, 贾立, 胡光成. 高分一号卫星遥感数据驱动 ETMonitor 模型 估算 16 m 分辨率蒸散发及验证[J]. 遥感学报, 2023, 27(3): 758-768. ZHENG Chaolei, JIA Li, HU Guangcheng. Evapotranspiration estimation and validation at 16 m resolution based on ETMonitor model driven by GF-1 satellite remote sensing datasets[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023, 27(3): 758-768.
- [5] FRENCH A N, SANCHEZ C A, WIRTH T, et al. Remote sensing of evapotranspiration for irrigated crops at Yuma, Arizona, USA[J]. Agricultural Water Management, 2023, 290: 108 582.
- [6] 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.
- [7] GROSSO C, MANOLI G, MARTELLO M, et al. Mapping maize evapotranspiration at field scale using SEBAL: A comparison with the FAO method and soil-plant model simulations[J]. Remote Sensing, 2018, 10(9): 1 452.
- [8] 马启民,龙银平,汤世宇,等.库布齐沙漠典型沙地人工林蒸散对比分析[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(4): 854-864.
 MA Qimin, LONG Yinping, TANG Shiyu, et al. Comparative analysis of evapotranspiration of typical sandy plantations in the Hobq desert[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(4): 854-864.
- [9] 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. SU Tingting, WEI Zhanmin, BAI Yanying. Using the SEBAL model to calculate evapotranspiration in Tumoteyouqi[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(2): 70-75.
- [10] 郭二旺, 郭乙霏, 张凌杰, 等. 基于 SEBAL 模型和 Landsat-8 遥感数 据的农田蒸散发估算[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(1): 83-89.
 GUO Erwang, GUO Yifei, ZHANG Lingjie, et al. Estimating evapotranspiration using the SEBAL model and Landset-8 RS data[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(1): 83-89.
- [11] SUN M Y, SHI B, CUI Y J, et al. Determination of dry soil layer and its soil heat flux distribution using actively heated distributed temperature sensing[J]. Engineering Geology, 2023, 317: 107 093.
- [12] STIPERSKI I, CALAF M. Generalizing Monin-Obukhov similarity theory (1954) for complex atmospheric turbulence[J]. Physical Review Letters, 2023, 130(12): 124 001.
- [13] 唐荣林,王晟力,姜亚珍,等. 基于地表温度一植被指数三角/梯形特 征空间的地表蒸散发遥感反演综述[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 65-82. TANG Ronglin, WANG Shengli, JIANG Yazhen, et al. A review of retrieval of land surface evapotranspiration based on remotely sensed surface temperature versus vegetation index triangular/trapezoidal characteristic space[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 65-82.
- [14] 张鑫宇,陈敏,范水勇. 基于莫宁-奥布霍夫相似理论的地面站点风速 预报偏差订正[J]. 气象, 2023, 49(5): 624-632.
 ZHANG Xinyu, CHEN Min, FAN Shuiyong. Correction of wind speed forecast deviations at ground stations based on Monin-Obukhov similarity theory[J]. Meteorological Monthly, 2023, 49(5): 624-632.

- [15] BRUTSAERT W, SUGITA M. Application of self-preservation in the diurnal evolution of the surface energy budget to determine daily evaporation[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, 97(D17): 18 377-18 382.
- [16] 吴桂平, 刘元波, 赵晓松, 等. 基于 MOD16 产品的鄱阳湖流域地表蒸 散量时空分布特征[J]. 地理研究, 2013, 32(4): 617-627.
 WU Guiping, LIU Yuanbo, ZHAO Xiaosong, et al. Spatio-temporal variations of evapotranspiration in Poyang Lake basin using MOD16 products[J]. Geographical Research, 2013, 32(4): 617-627.
- [17] MA N, SZILAGYI J, ZHANG Y S, et al. Complementary-relationshipbased modeling of terrestrial evapotranspiration across China during 1982—2012: Validations and spatiotemporal analyses[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(8): 4 326-4 351.
- [18] 陈彦光. 基于 Moran 统计量的空间自相关理论发展和方法改进[J]. 地理研究, 2009, 28(6): 1 449-1 463.
 CHEN Yanguang. Reconstructing the mathematical process of spatial autocorrelation based on Moran's statistics[J]. Geographical Research, 2009, 28(6): 1 449-1 463.
- [19] 翁佳烽,梁晓媛,谭浩波,等. 基于 K-means 聚类分析法的肇庆市干季 PM2.5 污染天气分型研究[J]. 环境科学学报, 2020, 40(2): 373-387. WENG Jiafeng, LIANG Xiaoyuan, TAN Haobo, et al. Objective synoptic classification on PM2.5 pollution during dry season based on K-means in Zhaoqing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(2): 373-387.
- [20] 乔成龙, 杜灵通, 潘海珠, 等. 基于 SEBAL 模型评估干旱半干旱区人工 灌丛植被对陆表蒸散的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 110-117. QIAO Chenglong, DU Lingtong, PAN Haizhu, et al. Evaluating the effects of revegetated shrub on land surface ET in arid and semiarid areas using SEBAL model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(10): 110-117.
- [21] 邹磊, 夏军, 马细霞, 等. 潜在蒸散发量估算方法在河南省的适用性分析[J]. 水文, 2014, 34(3): 17-23.
 ZOU Lei, XIA Jun, MA Xixia, et al. Applicability of potential evapotranspiration methods in Henan Province[J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(3): 17-23.
- [22] 胡倩,谢丁兴,潘岩,等. 区域作物蒸散发时空变化及水分利用效率分析[J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(9): 26-34.

HU Qian, XIE Dingxing, PAN Yan, et al. Spatio-temporal variation and

water use efficiency of regional crop evapotranspiration[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2022, 53(9): 26-34.

- [23] 张志胤,李瑞平,王秀青,等. 河套灌区蒸散发时空变化特征及驱动力 分析[J]. 生态科学, 2023, 42(4): 9-17. ZHANG Zhiyin, LI Ruiping, WANG Xiuqing, et al. Spatio-temporal variation of evapotranspiration in Hetao Irrigated area and its driving force analysis[J]. Ecological Science, 2023, 42(4): 9-17.
- [24] 林馨贝,周岗,郑泽涛,等.不同冠层阻力模型在夏玉米蒸散发计算中的优化应用[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(6): 28-35.
 LIN Xinbei, ZHOU Gang, ZHENG Zetao, et al. Optimizing the canopy resistance models to calculate evapotranspiration from summer maize fields[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(6): 28-35.
- [25] 马亚丽,牛最荣,孙栋元.河西走廊潜在蒸散发时空格局变化与气象 因素的关系[J].干旱区地理, 2024, 47(2): 192-202.
 MA Yali, NIU Zuirong, SUN Dongyuan. Relationship between changes in spatial and temporal patterns of potential evapotranspiration and meteorological factors in Hexi corridor[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(2): 192-202.
 [26] 孙小芳,夜光遥感支持下的城市人口核密度空间化及自相关分析[J].
- [26] 孙小芳. 仪元遥感文持下的城市人口核密度全间化及目相关分析[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(11): 2 256-2 266. SUN Xiaofang. Spatialization and autocorrelation analysis of urban population kernel density supported by nighttime light remote sensing[J]. Journal of Geo-Information Science, 2020, 22(11): 2 256-2 266.
- [27] 朱明承,占车生,王会肖,等.基于遥感双层模型的宝鸡峡灌区日蒸散 发估算[J].北京师范大学学报(自然科学版),2017,53(2):194-200. ZHU Mingcheng, ZHAN Chesheng, WANG Huixiao, et al. Regional evapotranspiration estimation by a two layer model based on remote sensing in Baojixia irrigation area[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2017, 53(2): 194-200.
- [28] DE OLIVEIRA COSTA J, COELHO R D, WOLFF W, et al. Spatial variability of coffee plant water consumption based on the SEBAL algorithm[J]. Scientia Agricola, 2019, 76(2): 93-101.
- [29] 周妍妍, 郭晓娟, 郭建军, 等. 基于 SEBAL 模型的疏勒河流域蒸散量 时空动态[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 168-177. ZHOU Yanyan, GUO Xiaojuan, GUO Jianjun, et al. Spatiotemporal dynamics of evapotranspiration in Shule River basin based on SEBAL model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(1): 168-177.

Using the surface energy balance algorithm model to calculate evapotranspiration in Luhun irrigation area

ZHANG Jinping^{1,2}, LI Dubai¹, LI Xuechun¹, CUI Yunfei¹

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Yellow River Ecological Protection and Regional Coordinated Development Institute, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: 【Objective】 Evapotranspiration in terrestrial ecosystems is not only a component of hydrological cycle but also controls plant productivity. Understanding its spatiotemporal variation in a region is hence important for improving its water and agronomic management. This paper is to present a method for accurately and rapidly evaluating evapotranspiration at high spatial resolution in irrigation areas using remote sensing technology and energy balance model. 【Method】 The model is based on the surface energy balance algorithm (SEBAL) model by using Landsat-8 remote sensing imageries and meteorological data. Using this model, we calculate the evapotranspiration in the Luhun Irrigation area and analyzed its variation. 【Result】 The simulated SEBAL values are strongly correlated with both evapotranspiration products (v 1.5) and ground-true data, with the associated correlation coefficients exceeding 0.8 and 0.96, respectively. As plants grow, their evapotranspiration increases progressively from February to May, with the evapotranspiration in cropped regions higher than that in forested regions. Peak evapotranspiration is 106.52 mm, occurring from June to July primarily in cropped regions. The evapotranspiration decreases from August to September, with the region having higher evapotranspiration shifting toward the northeast of the region. 【Conclusion】 Using remote sensing satellite imagery and other complementary data, the SEBAL model is accurate for estimating evapotranspiration at high spatial resolution in a region. It has important implication for improving irrigation management in irrigation districts.

Key words: actual evapotranspiration; SEBAL model; crop growth period; spatial autocorrelation