

DOI:10.13476/j.cnki.nsbddqk.2022.0082

栾清华,何帅,何立新,等.冬小麦全生育期区域蒸散量时空变化[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(4):814-824.
LUAN Q H, HE S, HE L X, et al. Temporal-spatial analysis on evapotranspiration of winter wheat in whole growth stage[J].
South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(4): 814-824. (in Chinese)

冬小麦全生育期区域蒸散量时空变化

栾清华^{1,2},何帅²,何立新²,周炜²,王利书²,马静²

(1.河海大学农业科学与工程学院,南京 210098;2.河北工程大学河北省智慧水利重点实验室,河北 邯郸 056038)

摘要:为探究冬小麦不同生育期内区域蒸散发的变化规律,以邯郸永年冬小麦种植区为研究区,基于 Penman-Monteith 公式计算结果验证后的 SEBAL(surface energy balance algorithm for land)模型,模拟计算 2019 年 10 月至 2020 年 6 月全生育期冬小麦不同生长期的区域蒸散量,结果表明:整个冬小麦生育期内区域日最大蒸散量为 0.97~13.66 mm/d,均值为 0.52~8.06 mm/d;空间分布总体上呈现出西低东高的变化趋势,与研究区地形和人文地质特征造成的耕作方式的差异性较为一致;时间分布呈现出苗期至返青期在 0.52~1.49 mm/d 波动变化、起身期至孕穗期在 3.18~4.47 mm/d 波动变化、拔节期至成熟期呈现快速增加到 4.47~8.06 mm/d 的趋势,且与 LAI(leaf area index)变化密切相关;区域蒸散发的峰值在出苗期和返青期之间存在空间转移现象。研究成果对优化区域农田灌溉制度、提高农田水分管理具有借鉴意义。

关键词:蒸散发;SEBAL 模型;Penman-Monteith 公式;遥感反演;时空特征

中图分类号:TV211;S271

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



蒸散发(evapotranspiration, ET)是流域水文循环和水量平衡的主要环节,作为区域能量平衡的重要组成部分,它反映了在大气、土壤和植被变化的条件下水和能量通量之间的相互作用^[1-3]。准确的蒸散发估算对于模拟水文通量和水资源精细化管理十分重要。ET 的时空信息不仅可以量化蒸发造成的水分流失,还可以反映土地利用、水资源分配和利用之间的关系信息,同时也是农业水土资源平衡计算、灌溉工程规划设计与运行管理中不可缺少的基础数据。随着水资源供需矛盾的日益突出和现代灌溉农业用水管理的精细化要求,分析不同时空尺度 ET 变化规律成为农田水利研究的必要内容。

在上述背景下,遥感技术因其在对区域尺度作物监测的高效性和获取数据的相对可靠性而逐渐进入蒸散发研究领域^[4]。早在 1973 年, Brown 等^[5]利用热红外光谱影像,结合微气象和蒸渗仪测定数据,

开展农田蒸散发计算^[6],从此采用遥感数据计算蒸散发的研究迅速发展,并经过众多学者的不断改善,构建了各种类型蒸散发模型,如经验半经验模型、植被指数模型、能量平衡模型等,实现了区域蒸散发研究质的飞跃^[7]。其中,以能量平衡方程计算的模型发展最为成熟^[8],此模型可分为单层模型和双层模型^[9]。单层模型(又称“大叶模型”),即不区分植被蒸腾和土壤蒸发^[10],将土壤和植被视为一个均一的整体来考虑潜热通量,常见的单层模型包括 SEBAL(surface energy balance algorithm for land)模型^[11]和 SEBS(surface energy balance system)模型^[12]等。与单层模型不同,双层模型分别计算土壤和冠层^[10]两个组分的净辐射、显热和潜热,进而能够区分土壤蒸发和植被蒸腾, Norman 等^[13]开发的 TSEB(two-source energy balance)模型是双层模型的代表。也有一些学者综合考虑上述两种模式,在

收稿日期:2021-11-19 修回日期:2022-03-11 网络出版时间:2022-03-22

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220321.1430.002.html

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51879066);河北省自然科学基金面上项目(E2019402468)

作者简介:栾清华(1978—),女,河北井陘人,教授,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:carol97011202@163.com

通信作者:何立新(1966—),男,宁夏石嘴山人,教授,博士,主要从事水文水资源、水环境生态及农业水利研究。E-mail:helixin@hebeu.edu.cn

前人研究的基础上提出了混合双源蒸散发 HTEM (hybird dual-source scheme and trapezoid framework based evapotranspiration) 模型^[14-17]。相比之下,单层模型理论简单,并且有稳定的物理理论做支撑,不需要过多的经验参数,能取得较好的反演精度。

其中,又以 SEBAL 模型应用较为广泛,许多研究者在不同地区应用该模型开展蒸散发的分析研究。比如:有些学者^[18-21]以流域或平原为研究对象,使用 SEBAL 模型对其进行遥感蒸散研究,计算获得日蒸散量;还有以高原地区为研究对象开展基于 SEBAL 模型蒸散估算^[22-23],结果较好地模拟出了区域的蒸散量;在干旱半干旱区,王强等^[24]利用 SEBAL 模型反演得到冀蒙接壤区内的日蒸散规律;还有学者^[25-26]以不同灌区为研究对象,使用 SEBAL 模型和不同遥感数据对区域农田蒸散发进行估算。在更大尺度的区域研究方面:Cheng 等^[27]以中国为研究对象利用多源图像运用 SEBAL 在中国进行长时间序列日蒸散发计算,表明 SEBAL 在不同植被类型、不同气候条件、不同地形以及不同季节条件下都表现较为稳定;Laipelt 等^[28]以巴西为研究对象利用 MODIS(moderate resolution imaging spectroradiometer)数据,结合谷歌地球工具改进了 SEBAL 模型,并利用该模型较为精确地模拟了不同生物群落和土地覆盖条件下的蒸散发量。

目前,农田耗水和灌区水资源管理采用的蒸散发数据主要是利用从点到面的插值法获取,区域 ET 的尺度效应不可避免。MODIS 数据每 8 d 一次

的监测频次,为区域农田耗水、用水管理的业务化、常态化提供了关键的数据支撑。随着华北水资源供需矛盾的日益加剧,现代灌溉农业用水管理的精细化需求日益增加,有必要利用不同监测手段开展不同时空尺度 ET 变化规律与尺度效应的研究。基于上述背景,以永年冬小麦种植区为研究对象,应用 SEBAL 模型,分别从时间和空间尺度详细解析区域冬小麦不同生长期的蒸散发演变规律,为科学指导区域灌溉、农业干旱监测与预警提供技术支持。

1 研究区域与数据收集

1.1 研究区概况

永年区位于河北省南部、邯郸市主城区的北部及东北部,地处东经 114°20′~114°52′,北纬 36°35′~36°56′。西部为低山丘陵,东部为平原,东南部为永年洼湿地公园,湿地面积为 598.9 hm²。现辖 17 个乡镇,总面积为 761.72 km²,其中耕地面积 529 km²,占总面积的 70%,冬小麦耕地面积为 333.71 km²,零星分布建筑物。区域属暖温带半湿润大陆性季风气候,多年平均降水量 524.9 mm,降水量年内分配主要集中在 6—9 月份,占全区年平均降水量的 67.7%;年均蒸散发量 1 997.5 mm。研究区作物主要以冬小麦-夏玉米轮作,根据实地调研以及对模型数据的收集、整理等,对区内冬小麦农田进行了识别,见图 1。选择各个时期的某一天遥感数据,作为此生育期的代表,具体选择的日期和冬小麦各个生育期时间变化情况见表 1。

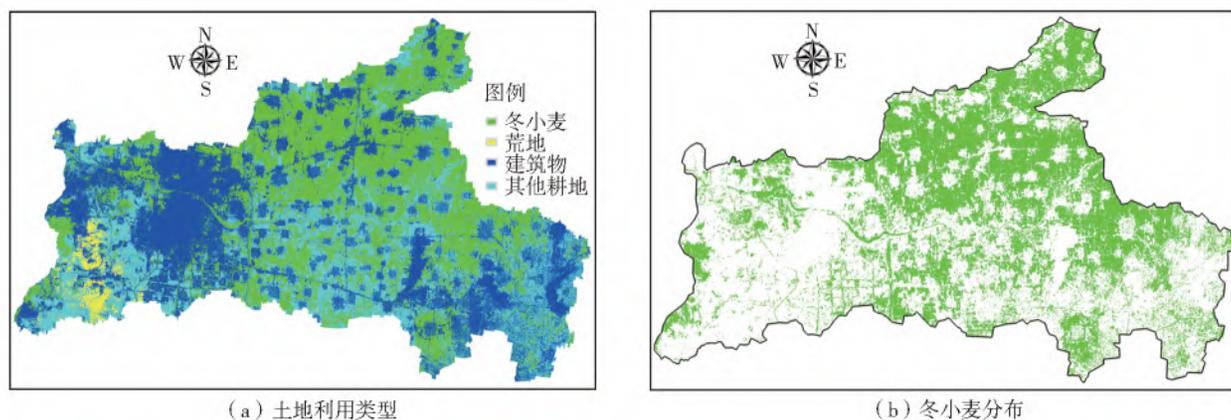


图 1 永年区土地利用类型

Fig. 1 Land use distribution of Yongnian District

1.2 数据来源

1.2.1 遥感数据

利用 MODIS 网站 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>) 下载 MOD09A1、MOD11A2 和 MOD13A1 3 种产品^[29]。其中:MOD09A1 和

MOD11A2 的空间分辨率为 500 m、时间分辨率为 8 d,产品数据是表面反射、地表温度和辐射率;MOD13A1 的空间分辨率为 1 000 m、时间分辨率为 16 d,产品数据是 NDVI(normalized difference vegetation index)植被指数。查阅遥感过境天数,根据

区域冬小麦各生长期(表 1),结合实地调研结果,保证每一个生长期且每一月至少有一景数据的前提下获取了 13 景 MODIS 数据,具体遥感数据时间分布见表 1。

表 1 冬小麦不同生育期统计及 MODIS 影像时间

Tab.1 Different growth stages of winter wheat and MODIS image time

生育期	时期	MODIS 影像时间
出苗期	10 月中上旬	2019 年 10 月 16 日
分蘖期	10 月中下旬	2019 年 10 月 24 日
越冬期	11 月下旬—2 月中上旬	2019 年 11 月 09 日
越冬期	11 月下旬—2 月中上旬	2019 年 12 月 03 日
越冬期	11 月下旬—2 月中上旬	2020 年 01 月 25 日
返青期	2 月下旬—3 月上旬	2020 年 02 月 02 日
起身期	3 月中旬	2020 年 02 月 26 日
拔节期	4 月中上旬	2020 年 03 月 13 日
孕穗期	4 月下旬	2020 年 04 月 06 日
抽穗期	4 月下旬—5 月上旬	2020 年 04 月 22 日
开花期	5 月中旬	2020 年 05 月 08 日
灌浆期	5 月中下旬	2020 年 05 月 24 日
成熟期	6 月上旬	2020 年 06 月 01 日

1.2.2 其他数据

气象数据由邯郸市气象局提供 2019 年 10 月 16 日至 2020 年 6 月 1 日永年区及周边鸡泽县、曲周县、武安市等 4 个气象站点的平均气温、风速、相对湿度、可照时数和日照时数的逐日气象数据,太阳辐射数据由国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>)下载。

DEM(digital elevation model)数据由地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/search>)下载,ASTER GDEM 30M 数据,利用 ArcGIS 进行投影转换^[30],利用永年行政区 shp 图进行掩膜、剪裁,得到永年区的 DEM 空间分布图(图 2),转换成 tif 格式后使用。

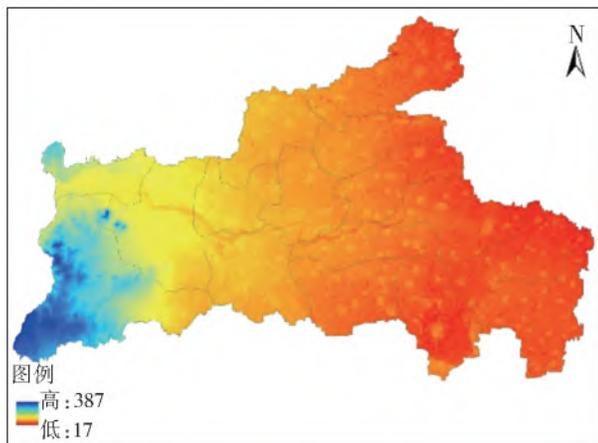


图 2 区域 DEM 数据

Fig.2 Regional DEM data

2 方法介绍

2.1 SEBAL 模型原理

SEBAL 模型名为“陆地地表能量平衡算法”模型,基于最小气象数据需求来估计区域尺度上的能量分配的原理进行计算。使用该模型进行蒸散发的计算,其表达式^[31]为

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

式中: $\lambda \cdot ET$ 为潜热通量, W/m^2 ; λ 为汽化潜热, J/kg ; R_n 为净辐射通量, W/m^2 ; G 为土壤热通量 W/m^2 ; H 为感热通量, W/m^2 。

SEBAL 模型的反演过程见图 3,根据地表能量平衡原理,结合参考文献^[18]中的各个步骤和公式,使用 MODIS 数据得到地表反照率、植被指数和地表温度等关键参数,代入公式计算得出研究区域内的各个热通量;通过地表能量平衡方程,得出遥感卫星过境时的瞬时蒸散发;选取蒸发比不变法,进行日尺度的扩展,推导出区域日蒸散发量。

2.2 Penman-Monteith 公式

Penman-Monteith 公式(以下简称“P-M 公式”)由 Evants^[32]和 Monteith^[33]研究下垫面 ET 时引入表面阻力的概念而导出,为非饱和下垫面的蒸发研究开辟了新途径。1998 年,联合国粮农组织 FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations)改进公式后,已被证实具有较高的精度及可适用性^[34],选择 P-M 公式对 SEBAL 模型进行验证。根据 P-M 公式,蒸腾量^[35]可按下式计算:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

$$ET = K_s K_c \cdot ET_0 \quad (3)$$

$$K_s = \frac{\theta - \theta_{wp}}{\theta_f - \theta_{wp}} \text{ 或 } K_s = \frac{\theta - \theta_{wp}}{\theta_j - \theta_{wp}} \quad (4)$$

式中: K_c 是无水分胁迫条件下作物腾发量和参照腾发量的比值数; K_s 是土壤水分修正系数,而当土壤水分不是作物蒸发蒸腾的限制因素时,土壤水分修正系数 $K_s = 1$; θ 是计算时段内作物根系活动层的平均土壤含水量; θ_{wp} 、 θ_f 是凋萎系数与田间持水量; θ_j 是作物蒸发开始受影响时的临界土壤含水量。

其中, K_c 它反映了区别实际作物与参照作物草的作物高度、冠层阻力、土壤蒸发、作物-土壤表面反射率等主要特性的综合影响^[36],因此 K_c 随作物的各种特性和气候的变化而变化。不仅作物类型不同其系数 K_c 不同,同一作物全生育期中的特性变化也同样影响作物系数 K_c ; 当作物生长发育,地面覆盖程度,作物高度和叶面积都变化时,使得同一作物

不同生长阶段的腾发量亦存在差别,相应地,会导致给定的作物的 K_c 值在整个生长期变化。本文采用分段单值平均作物系数法,依据 FAO-56^[35],冬小麦各生育期 K_c 在 $[0.4, 1.15]$ 区间内变化。

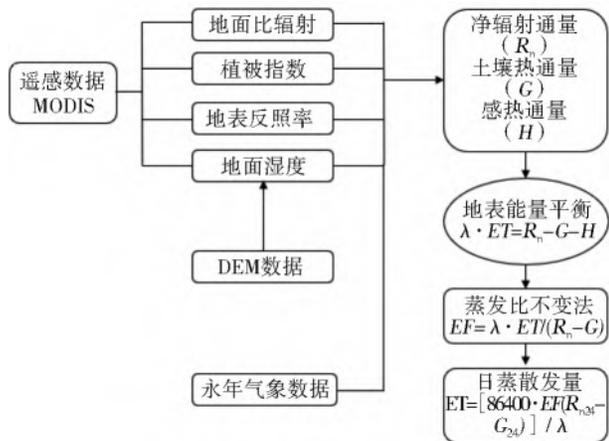


图3 SEBAL 模型反演过程

Fig.3 SEBAL model inversion process

3 SEBAL 模型的验证

依据每个生长期或每个月校验一次的原则,选择与遥感数据相对应的日气象数据按照 P-M 公式

(2)~(4)计算得出日蒸散发量。依据 FAO 给出的参考值,在出苗期至越冬期的 K_c 为 0.4,返青期至起身期的 K_c 为 0.7,拔节期至和灌浆期的 K_c 为 1.15;由于 6 月 1 日尚处于小麦成熟初期, K_c 处于由 K_{cmid} 下降到 K_{cend} 的过程,考虑这一实际并参考他人成果^[37],在此选择 K_c 为 0.7。

经计算后,将 SEBAL 模型的结果与之进行对比,见图 4。总体来看:虽然 SEBAL 模型值与 P-M 公式计算的值会有一些的偏差,但二者的变化趋势基本一致,以 P-M 公式计算结果为基准值计算的均方根误差为 0.65;进一步,将二者进行线性拟合,其方程为 $y=1.0773x+0.1493$,且 R^2 为 0.9412,见图 5,整体相关性良好。因此,判定 SEBAL 模型在永年冬小麦种植区具有一定的适用性,可以用于估算区域冬小麦的实际蒸散量。

4 蒸散发量变化规律

基于 2.1 小节所述地表能量平衡方程,将选取的 13 景 MODIS 数据逐步代入计算,得出区域冬小麦不同生长期内对应的日蒸散发量,并从时间分布和空间分布来分析其变化规律。

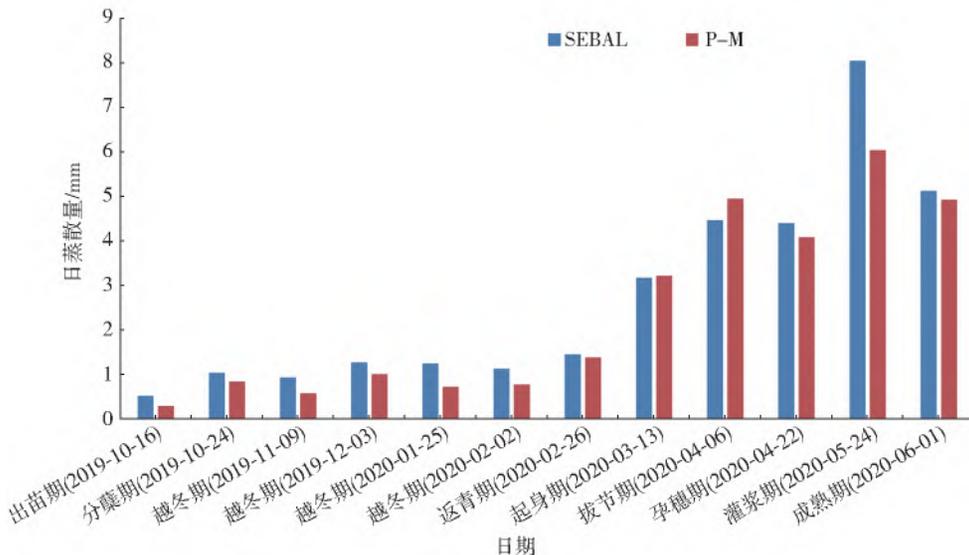


图4 P-M 法与 SEBAL 法结果对比

Fig.4 Comparison of P-M method and SEBAL method

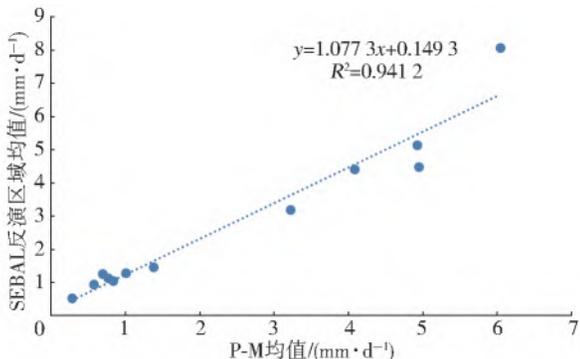


图5 P-M 法和 SEBAL 法拟合分析

Fig.5 Fitting analysis of P-M and SEBAL

4.1 时间分布特征

整个冬小麦生长过程中,永年冬小麦种植区蒸散发的变化趋势呈现出波动式上升趋势(图 6),可根据蒸散发数值的大小分出苗期至返青期、起身期至孕穗期和拔节期至成熟期 3 个阶段,各阶段的具体变化分析如下:

在出苗期至返青期这一阶段,区域的蒸散发在 0.52 mm/d 至 1.49 mm/d 变化。这一时期处于秋冬季,研究区太阳高度角较小,太阳辐射到达研究区地表的能量较少,且接收地表的土壤处于封冻期,小

麦生长也很缓慢,所以在整个作物生长周期中,这一阶段研究区的蒸散发量最低。

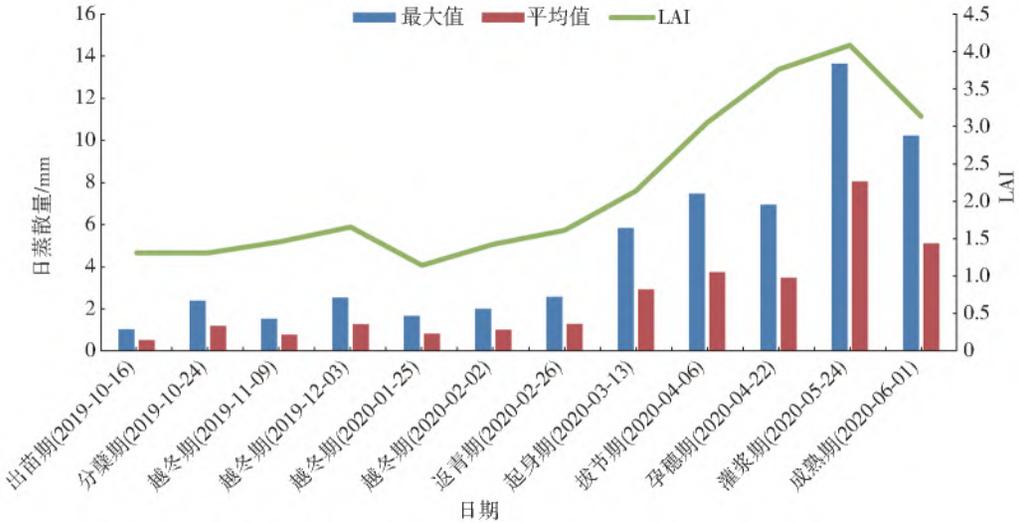


图 6 冬小麦不同生育期日蒸散发及 LAI 变化

Fig. 6 Daily evapotranspiration and LAI of winter wheat in different growth stages

在起身期到孕穗期,这一时期位于春季,随着气温的回升,土地逐渐回暖,小麦逐渐返青并进入生长期,蒸散发逐渐增加,较上一阶段有了较为明显的增幅,研究区蒸散发在 3.18 mm/d 至 4.47 mm/d 变化。

在拔节期至成熟期,蒸散发数值明显增大,在 4.47 mm/d 至 8.06 mm/d 变化。这一阶段主要在 4—5 月,随着太阳的移动,温度上升,植被开始快速生长,同时该时期也是小麦生长最旺盛的关键时期。经过调查可知,若无降雨,当地农户都会及时灌溉,

保证了作物生长必需的水分,植被的快速生长使得植被的蒸腾作用变大,从而使得冬小麦的蒸腾量和土壤水分蒸发量逐渐上升,造成研究区的蒸散发显著增加。

4.2 空间分布特征

利用 Python、ArcGIS 等工具,以 SEBAL 模型计算结果为基础,反演出永年冬小麦种植区冬小麦整个生育期不同阶段的蒸散发空间分布情况大致分 3 类,见图 7。

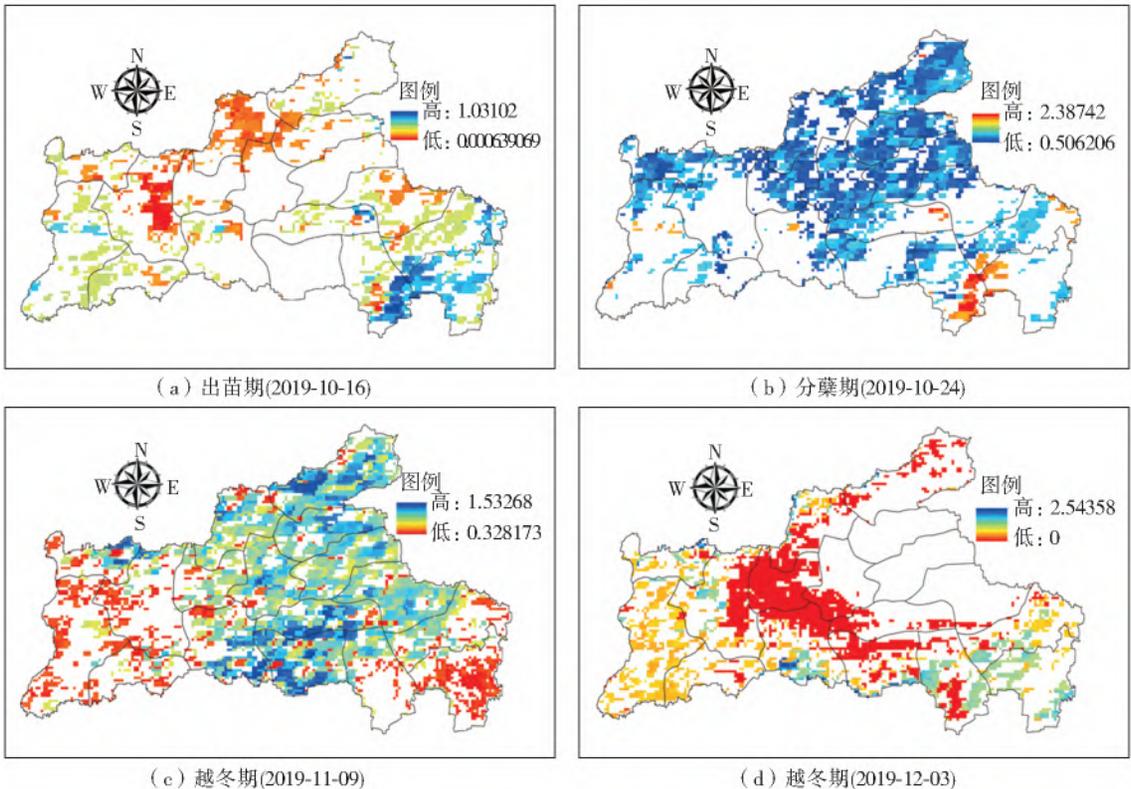


图 7 冬小麦生育期蒸散发量

Fig. 7 Winter wheat evapotranspiration of different growth stages

续图

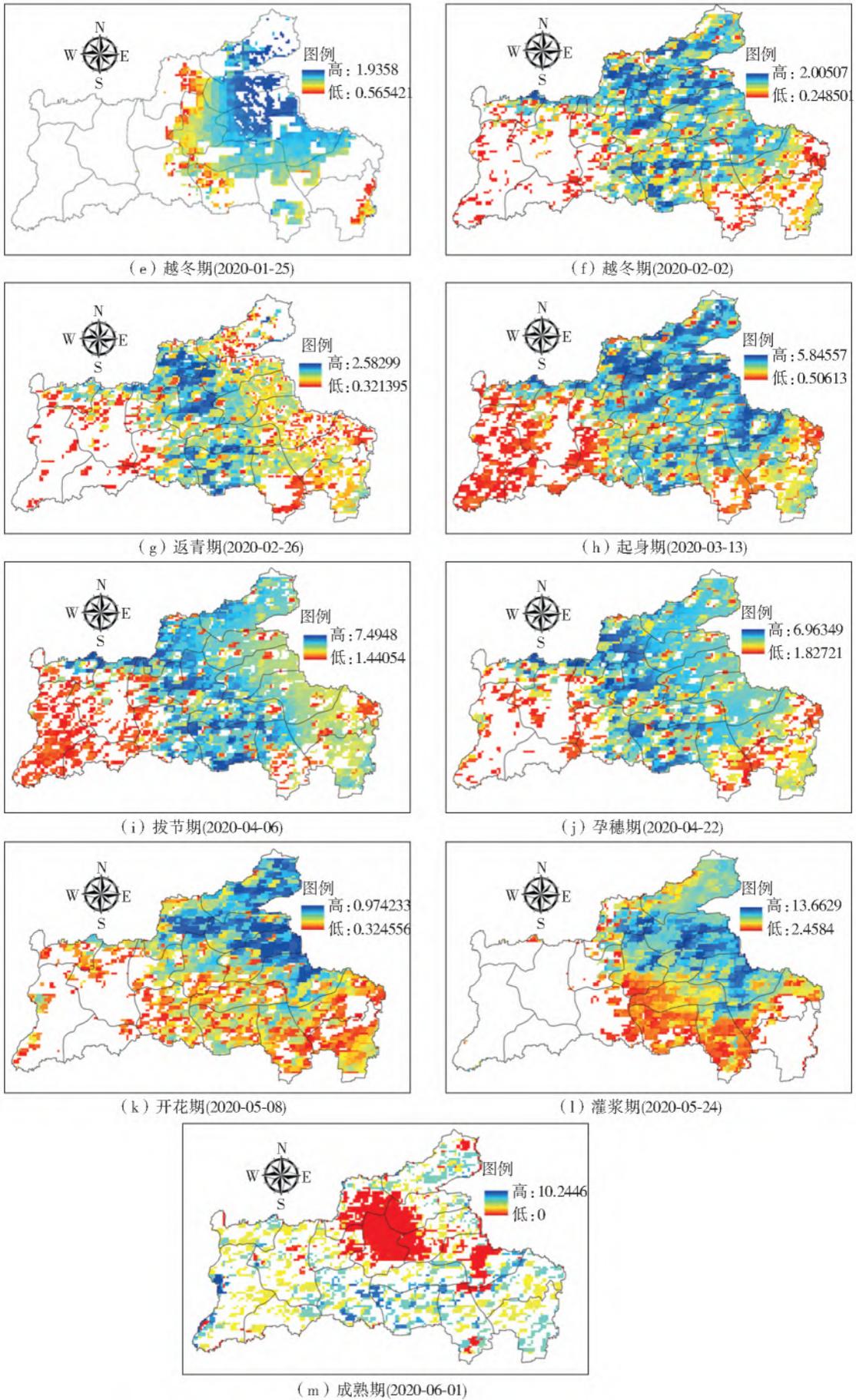


图7 冬小麦生育期蒸散量

Fig. 7 Winter wheat evapotranspiration of different growth stages

蒸散发整体呈现出东南高、西部次之、北部低的变化趋势,见图 7(a)~7(b)和 7(m)。其中:东南部地区广府镇、张西堡镇、西河庄乡的大部分地区蒸散量的变化范围为 0.41~10.24 mm/d;西部乡镇永合会镇、西阳城乡以及界河店乡和临洛关镇大部分地区的蒸散发变化为 0.43~8.69 mm/d;东部地区辛庄堡乡以及东阳庄镇的大部分地区蒸散发变化为 0.19~8.13 mm/d;中部和北部的其他地区讲武镇、曲陌乡、小龙马乡、刘汉乡、正西乡等大部分地区蒸散发变化为 0.01~7.96 mm/d。由于受到云层影响,中部地区出现空值,因此这一分布是东南、西部和北部区域的局部相对特征。

蒸散发整体呈现出中部及北部地区较高、西部及东南低的变化趋势,见图 7(c)~7(f)和 7(h)~7(l)。其中:中部地区刘营镇、西苏镇、讲武镇、曲陌乡和小龙马乡大部分地区蒸散发变化为 0~7.46 mm/d;北部地区刘汉乡、正西乡、大北汪镇的大部分地区蒸散发变化为 0.15~6.98 mm/d;东部地区辛庄堡乡以及东阳庄镇的大部分地区蒸散发变化为 0.15~6.54 mm/d;东南部地区广府镇、张西堡镇、西河庄乡的大部分地区蒸散量的变化范围为 0.12~5.79 mm/d;西部乡镇永合会镇、西阳城乡以及界河店乡和临洛关镇大部分地区的蒸散发变化为 0~5.49 mm/d。

蒸散发呈现中部高、四周低的变化趋势,如图 7(g)所示。其中:中部地区刘营镇、西苏镇、讲武镇、曲陌乡和小龙马乡大部分地区蒸散发变化为 0.25~2.58 mm/d;西部乡镇永合会镇、西阳城乡以及界河店乡和临洛关镇大部分地区的蒸散发变化为 0.20~2.04 mm/d;东部地区辛庄堡乡以及东阳庄镇的大部分地区蒸散发变化为 0.30~1.86 mm/d;北部地区刘汉乡、正西乡、大北汪镇的大部分地区蒸散发变化为 0.37~1.79 mm/d;东南部地区广府镇、张西堡镇、西河庄乡的大部分地区蒸散量的变化范围为 0.83~1.35 mm/d。

综上并考虑云层对数据的反演影响可知,种植区冬小麦的生育期蒸散发的空间分布大致呈现西部低、东部高的趋势。依据永年冬小麦种植分布,并结合地形特征和水文地质情况分布可知:区域多为低山丘陵区,西部冬小麦种植面积有限,使得作物蒸散发贡献小;中部及东部地区,主要以平原为主,土地类型主要为耕地类型,水源丰富,植被长势较好,具备了良好的蒸散发条件,因此东部平原的蒸散发在整个生长期内,相较其他片区而言,量值较高。

综合区域蒸散发时间、蒸散发分布特征(图 6~7、表 2),进一步将研究区日蒸散发空间分布情况随

着冬小麦不同生育期的演变规律分析如下:

在出苗期至返青期这一阶段,随着时间的推移,区域蒸散发的峰值呈现由东南地区的广府镇、张西堡镇、西河庄乡向中部偏北、东部的刘营镇、西苏镇、讲武镇、曲陌乡、小龙马乡、辛庄堡乡以及东阳庄镇、刘汉乡、正西乡、大北汪镇转移的趋势,其峰值大小由 0.11~0.52 mm/d 到 1.93~2.39 mm/d。而东南部湖泊(永年洼)附近的小麦,因土壤含水量较高,呈现生育期初期的 ET 高于周边其他区域的特征。

在起身期到孕穗期这一阶段,整个研究区蒸散发空间分布变化较为一致,随着小麦生长和气温的升高,整个区域的蒸散发呈现均一化的上升趋势,区域蒸散发峰值在空间并未发生转移。

在开花期至成熟期这一阶段,随着作物的逐渐成熟,区域蒸散发呈现升至峰值后又缓慢下降的趋势,峰值由中北部的刘营镇、讲武镇、曲陌乡、辛庄堡乡以及东阳庄镇、刘汉乡、正西乡、大北汪镇向中南部临洛关镇部分地区、西苏镇、小龙马乡、广府镇、张西堡镇等地区转移。由图 7(m)并结合调研可知,因冬小麦种植差异,北部部分地区在成熟期先行收割,作物蒸散发贡献锐减,故其区域蒸散发数值逐渐降低。

表 2 冬小麦不同生育期内区域日蒸散发统计

Tab. 2 Regional daily evapotranspiration of winter wheat in different growth stages

时期	区域最大值/ (mm · d ⁻¹)	区域平均值/ (mm · d ⁻¹)	LAI
出苗期(2019-10-16)	1.03	0.52	1.31
分蘖期(2019-10-24)	2.39	1.49	1.31
越冬期(2019-11-09)	1.53	0.93	1.45
越冬期(2019-12-03)	2.54	1.27	1.65
越冬期(2020-01-25)	1.94	1.25	1.14
越冬期(2020-02-02)	2.00	1.13	1.42
返青期(2020-02-26)	2.58	1.45	1.61
起身期(2020-03-13)	5.85	3.18	2.13
拔节期(2020-04-06)	7.49	4.47	3.05
孕穗期(2020-04-22)	6.96	4.40	3.76
开花期(2020-05-08)	0.97	0.65	4.05
灌浆期(2020-05-24)	13.66	8.06	4.08
成熟期(2020-06-01)	10.24	5.12	3.13

综上可知,在气候条件和土地利用类型等共同影响下,永年冬小麦种植区的蒸散发具有一定的时空差异性,空间上中部和北部地区蒸散发最大、东南地区和西部地区的蒸散发值较低,时间上蒸散发量

值的顺序为:开花期至成熟期前大于起身期至孕穗期大于出苗期至返青期,整体表现为夏季蒸散发最大,春季次之,秋季和冬季最小。

4.3 与 LAI 相关性分析

叶面积指数(LAI)是指太阳光照射时冬小麦的叶片垂直投影面积和占地面积的比值,是反映作物生长状况的重要指标之一,值的大小与产量多少关系十分紧密。正是由于叶面积指数可以很好地反映作物生长状况,因此,其值大小和蒸散发也密切相关。因此将各代表日的 LAI 一并列出(表 2、图 8)并进行分析,其中 LAI 采用 MODIS 数据直接反演得到。

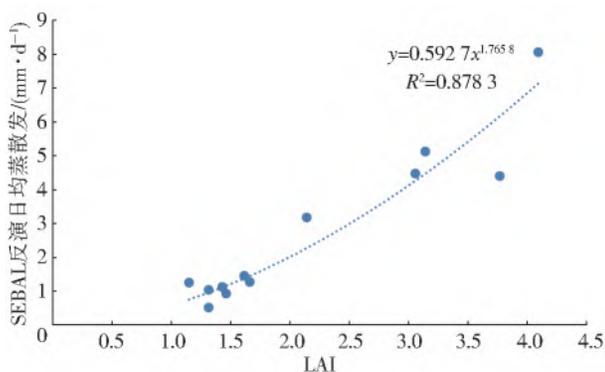


图 8 冬小麦蒸散发和 LAI 拟合分析

Fig. 8 The fitting course between evapotranspiration and LAI of winter wheat

由图 8 可知:LAI 在出苗期至返青期数值较小且波动较小,数值在 1.31~1.61,区域蒸散发数值在 1.14~1.61 mm/d;随着作物的生长进入拔节期至成熟期这一关键阶段,LAI 逐渐变大,蒸散量也逐渐达到最高值,进入成熟期后,LAI 不再变化,蒸散量也随之降低,反映了此次反演的蒸散发与 LAI 变化的密切相关性以及和作物生长变化规律的一致性。

进一步以模型反演的日均蒸散发值为纵坐标、以冬小麦的 LAI 为横坐标将二者进行拟合,结果(图 8)显示,两者呈乘幂关系,其方程为 $y = 0.5927x^{1.7658}$, R^2 高达到 0.88,揭示了永年冬小麦蒸散发随 LAI 变化而正向增加的定量关系。

5 结论

本文采用 P-M 公式校验后的 SEBAL 模型对 2019 年 10 月至 2020 年 6 月河北永年冬小麦种植区全生育期内的蒸散发进行了遥感估算,并就冬小麦不同生育期的日蒸散量的时空变化开展了分析,得到如下结论:

区域日蒸散发量在冬小麦全生育期内波动中呈

上升趋势;在出苗期至返青期蒸散发较低,区域的蒸散发在 0.52~1.49 mm/d;在起身期到孕穗期,蒸散发在 3.18~4.47 mm/d,较上一阶段,有了明显的增幅;在拔节期至成熟期(关键生长期),随着小麦迅速生长,区域蒸散发迅速增加,在 4.47 mm/d 至 8.06 mm/d 变化。整体表现为夏季蒸散发最大,春季次之,秋季、冬季最小的分布规律。

永年冬小麦种植区的蒸散发具有一定的时空差异性。区域冬小麦在出苗期至返青期蒸散发的峰值呈现由东南地区向中部转移的趋势。时间上蒸散发量在不同生长期的演变呈现出开花期至成熟期前大于起身期至孕穗期大于出苗期至返青期的规律。空间上永年中部和北部小麦种植区的蒸散发最大、东南地区次之、西部地区的蒸散发值较低的变化趋势,与研究区地形和水文地质特征造成的耕作方式的差异性较为一致。

在选用的全生育期内,冬小麦日蒸散量与 LAI 的平均值呈较为显著的乘幂关系,且 R^2 高达 0.88,说明 LAI 对区域蒸散发的大小影响较为显著。

本研究基于能量平衡原理对河北永年小麦种植区蒸散发量进行了估算,日尺度计算采用蒸发比不变法,在未来可尝试使用不同蒸散发的时间尺度扩展法相互结合得到作物的蒸散发值。受经费和疫情影响,仅分析了作物 LAI 和区域蒸散发的相关性,未来将开展根系的生物量测定,在开展 ET 与根系、LAI 的定量化关系解析的基础上,充分考虑雨养和不同灌溉制度下的水分胁迫对 ET 的影响,更深入地开展冬小麦区域蒸散发的时空变化分析。

参考文献(References):

- [1] ZHAO L L, XIA J, XU C Y, et al. Evapotranspiration estimation methods in hydrological models[J]. Journal of Geographical Sciences, 2013, 23(2): 359-369. DOI: 10.1007/s11442-013-1015-9.
- [2] ZENG Z, WANG T, ZHOU F, et al. A worldwide analysis of spatiotemporal changes in water balance-based evapotranspiration from 1982 to 2009[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119(3): 1186-1202. DOI:10.1002/2013JD020941.
- [3] 宁亚洲,张福平,冯起,等.基于 SEBAL 模型的疏勒河流域蒸散发估算与灌溉效率评价[J].干旱区地理, 2020, 43(4): 928-938. (NING Y Z, ZHANG F P, FENG Q, et al. Estimation of evapotranspiration in Shule River basin based on SEBAL model and evaluation on irrigation efficiency[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(4): 928-938. (in Chinese)) DOI:10.12118/j.

- issn. 1000-6060. 2020. 04. 08.
- [4] 易永红,杨大文,刘钰,等. 区域蒸散发遥感模型研究的进展[J]. 水利学报, 2008, 39 (9): 1118-1124. (YI Y H, YANG D W, LIU Y, et al. Review of study on regional evapotranspiration modeling based on remote sensing[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39 (9): 1118-1124. (in Chinese)) DOI: 0559-9350(2008)09-1118-07.
- [5] BROWN K W, ROSENBERG N J. A resistance model to evapotranspiration and its application to a sugar beet field[J]. Agronomy Journal, 1973, 65: 341-347. DOI: 10. 2134/agronj1973. 00021962006500030001x.
- [6] 宋璐璐,尹云鹤,吴绍洪. 蒸散发测定方法研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(9): 1186-1195. (SONG L L, YIN Y H, WU S H. Advancements of the metrics of evapotranspiration[J]. Progress in Geography, 2012, 31 (9): 1186-1195. (in Chinese)) DOI: 10. 11820/dlkxjz. 2012. 09. 010.
- [7] 尚松浩,蒋磊,杨雨亭. 基于遥感的农业用水效率评价方法研究进展[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 81-92. (SHANG S H, JIANG L, YANG Y T. Review of remote sensing-based assessment method for irrigation and crop water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46 (10): 81-92. (in Chinese)) DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 10. 013.
- [8] 母艳梅,李俊,同小娟,等. 基于 Penman-Monteith 模型和 Shuttleworth-Wallace 模型对太行山南麓人工林蒸散散的模拟[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(11): 35-44. (MU Y M, LI J, TONG X J, et al. Evapotranspiration simulated by Penman-Monteith and Shuttleworth-Wallace models over a mixed plantation in the southern foot of the Taihang Mountain, northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(11): 35-44. (in Chinese)) DOI: 10. 13332/j. 1000-1522. 20170060.
- [9] 李炜,司建华,苗政. 林分耗水的尺度扩展研究进展[J]. 生态学杂志, 2012, 31(3): 714-723. (LI W, SI J H, MIAO Z. Advance in the application of upscaling methods to stand evapotranspiration[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(3): 714-723. (in Chinese)) DOI: 10. 13292/j. 1000-4890. 2012. 0140.
- [10] 陈吉琴. 近 50 a 来长江流域气象因素分析及蒸发变化原因初探[D]. 南京: 河海大学, 2007. (CHEN J Q. Analysis of meteorological elements and study on the reason of variation of evaporation in Changjing River basin in recent 50 a [D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese)).
- [11] BASTIAANSEN W G M, MENENTI M, FEDDES R A, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Formulation[J]. Journal of Hydrology, 1998, 212: 198-213. DOI: 10. 1016/S0022-1694(98)00253-4.
- [12] SU Z. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2002, 6 (1): 85-99. DOI: 10. 5194/hess-6-85-2002.
- [13] NORMAN J M, KUSTAS W P, HUMES K S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 77 (3-4): 263-293. DOI: 10. 1016/0168-1923(96)02344-1.
- [14] GUAN H, WILSON J L. A hybrid dual-source model for potential evaporation and transpiration partitioning [J]. Journal of Hydrology, 2009, 377(3-4): 405-416. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2009. 08. 037.
- [15] 杨雨亭,尚松浩. 双源蒸散发模型估算潜在蒸散发量的对比[J]. 农业工程学报, 2012, 28 (24): 85-91. (YANG Y T, SHANG S H. Comparison of dual-source evapotranspiration models in estimating potential evaporation and transpiration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(24): 85-91. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-6819. 2012. 24. 013.
- [16] YANG Y T, SHANG S H, GUAN H D. Development of a soil-plant-atmosphere continuum model (HDS-SPAC) based on hybrid dual-source approach and its verification in wheat field[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55 (10): 2671-2685. DOI: 10. 1007/s11431-012-4974-7.
- [17] YANG Y T, SHANG S H. A hybrid dual source scheme and trapezoid frame work based evapotranspiration model (HTEM) using satellite images: Algorithm and model test[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118 (5): 2284-2300. DOI: 10. 1007/978-3-662-46173-0_5.
- [18] 金楷仑,郝璐. 基于遥感数据与 SEBAL 模型的江浙沪地区地表蒸散发反演[J]. 国土资源遥感, 2020, 32 (2): 204-212. (JIN K L, HAO L. Evapotranspiration estimation in the Jiangsu-Zhejiang-Shanghai area based on remote sensing data and SEBAL model[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32 (2): 204-212. (in Chinese)) DOI: 10. 6046/gtzyyg. 2020. 02. 26.
- [19] 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. (CHEN Q, GOU S, YAN D H, et al. The regional ET calculation based on SEBAL model and the sensitivity analysis of meteorological parameters: A case study of Tianjing City[J]. Resources Science, 2009, 31(8): 1303-1308. (in Chinese)) DOI: 1007-7588(2009)08-1303-06.
- [20] 张文发, 苏涛, 雷波, 等. 基于多源数据的内蒙古察汗淖尔流域作物生育期实际蒸散发分析[J]. 节水灌溉: 2021(10): 1-6. (ZHANG W F, SU T, LEI B, et al. Analysis of actual evapotranspiration during crop growth period in Chahanaoer watershed of Inner Mongolia based on multi-source data[J]. Water Saving Irrigation, 2021(10): 1-6. (in Chinese)). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1420.TV.20210729.1344.002.html>. DOI: 1007-4929(2021)10-0001-06.
- [21] 梁文涛, 尹航, 韩振华, 等. 基于遥感的塔布河流域蒸散发时空变化分析[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版): 2022, 43(1): 27-34. (LIANG W T, YIN H, HAN Z H, et al. Temporal and spatial variation analysis of evapotranspiration in Tabu River basin based on remote sensing [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition): 2022, 43(1): 27-34. (in Chinese)). DOI: 10.16853/j.cnki.1009-3575.2022.01.006.
- [22] 张亮, 崔林林, 苑跃. 基于 SEBAL 模型的若尔盖高原蒸散量时空变化[J]. 四川环境, 2021, 40(4): 80-88. (ZHANG L, CUI L L, YUAN Y. Spatial-temporal variation of evapotranspiration in Ruorgai plateau based on SEBAL model [J]. Sichuan Environment, 2021, 40(4): 80-88. (in Chinese)) DOI: 10.14034/j.cnki.schj.2021.04.011.
- [23] 杨建莹, 霍治国, 郭定荣, 等. 基于 MODIS 和 SEBAL 模型的黄淮海平原冬小麦水分生产力研究[J]. 中国农业气象, 2017, 38(7): 435-446. (YANG J Y, HUO Z G, WU D R, et al. Investigation on water productivity of winter wheat based on MODIS and SEBAL in the Huang-Huai-Hai plain [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(7): 435-446. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-6362.2017.07.005.
- [24] 王强, 康慕谊, 邢开雄, 等. 基于 SEBAL 模型的冀蒙接壤区 ET 反演[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2011, 47(1): 91-96. (WANG Q, KANG M Y, XING K X, et al. Retrieval of evapotranspiration in contiguous area of Hebei-Inner Mongolia based on SEBAL model [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2011, 47(1): 91-96. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: BSDZ. 0.2011-01-022.
- [25] 郭二旺, 郭乙霏, 罗蔚然, 等. 基于 Landsat 8 和 Sentinel-1A 数据的焦作广利灌区夏玉米土壤墒情监测方法研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(7): 22-25, 34. (GUO E W, GUO Y F, LUO W R, et al. Soil moisture retrieval of summer maize in the irrigation area based on Sentinel-1A [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(7): 22-25, 34. (in Chinese)) DOI: 1007-2284(2019)07-0022-04.
- [26] 丁杰, 陈鹤, 魏征, 等. 改进 SEBS 模型在大兴地区农田蒸散发反演中的应用[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(S2): 121-126. (DING J, CHEN H, WEI Z, et al. Application of improved SEBS model for evapotranspiration retrievals over crop land in Daxing District [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(S2): 121-126. (in Chinese)) DOI: 10.13522/j.cnki.gggs.20180358.
- [27] CHENG M, JIAO X, LI B, et al. Long time series of daily evapotranspiration in China based on the SEBAL model and multisource images and validation [J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3995-4017. DOI: 10.5194/essd-13-3995-2021.
- [28] LAIPELT L, HENRIQUE R, KAYSER B, et al. Long-term monitoring of evapotranspiration using the SEBAL algorithm and Google Earth Engine cloud computing [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 178: 81-96. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2021.05.018.
- [29] 梁华. 基于 TVDI 的新疆祁漫塔格土壤湿度遥感反演研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2016. (LIANG H. Remote sensing retrieval study of soil moisture in Qmantage, Xinjiang based on TVDI [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016. (in Chinese))
- [30] 宋增芳, 曾建军, 金彦兆, 等. 基于 SWAT 模型和 SUFI-2 算法的石羊河流域月径流分布式模拟[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 172-177. (SONG Z F, ZENG J J, JIN Y Z, et al. Distributed simulation of monthly runoff using SWAT and SUFI-2 algorithm in Shiyang River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(5): 172-177. (in Chinese)) DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.035.
- [31] BASTIAANSEN W G M, MENENTI M, FEDDES R A, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Formulation [J]. Journal of Hydrology, 1998, 212: 198-213.
- [32] EVANTS L T. Environmental control of plant growth [C]//Proceedings of a Symposium Held at Canberra, Australia, August, 1962. University of Oxford, 1963. DOI: 10.1016/S0022-328X(00)00665-3.
- [33] MONTEITH J L. Evaporation and environment [J]. Symposia of the Society for Experimental Biology,

- 1965,19:205-234.
- [34] 汤鹏程. 西藏高海拔地区 ET₀ 计算公式试验率定与青稞作物系数推求[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2019. (TANG P C. Experimental calibration of reference evapotranspiration and determination of crop coefficient in high-elevation areas of Tibet[D]. Beijing,China Institute of Water Resource & Hydro-power Research (IWHR),2019. (in Chinese))
- [35] RICHARD G, LUIS S, PEREIRA D R, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements FAO irrigation and drainage paper 56. <https://www.taodocs.com/p-61704622.html#fileList>.
- [36] 张瑜. 大田玉米作物系数机地协同估算方法研究[D]. 咸阳:中国科学院大学,2019. (ZHANG Y. Crop coefficient estimation method of field maize by UAV remote sensing and ground sensor monitoring[D]. Xianyang: The University of Chinese Academy of Sciences,2019. (in Chinese))
- [37] 刘钰, PEREIRA L S. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证[J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 26-30. (LIU Y, PEREIRA L S. Validation of FAO for methods for estimating crop coefficients[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(5): 26-30. (in Chinese))

Temporal-spatial analysis on evapotranspiration of winter wheat in whole growth stage

LUAN Qinghua^{1,2}, HE Shuai², HE Lixin², ZHOU Wei², WANG Lishu², MA Jing²

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: The spatio-temporal characteristic of evapotranspiration can not only quantify the water loss caused by evaporation, but also reflect the relationship between land use, water resource allocation and utilization. It was also an indispensable basic data for calculating the balance of agricultural water and soil resources, and planning, design and management of irrigation projects. With the increasing contradiction between water resources supply and demand and the refined requirements of modern irrigation and agricultural water management, it was necessary to illustrate evapotranspiration evolution rules on different spatial and temporal scales.

To illuminate the changing laws of evapotranspiration in different growth stages of winter wheat, Yongnian District of Handan city was selected as the study area, and the validated regional SEBAL model through Penman-Monteith model was applied for simulating evapotranspiration. The mean square root of variance was 0.65 which shows that SEBAL model accuracy was higher, and the model can provide relatively accurate ET value for the study area. Based on this, SEBAL model was applied to simulate the evapotranspiration of wheat at different growth stages from October 2019 to June 2020, and the spatio-temporal evolution law of evapotranspiration in different growth periods of regional winter wheat was analyzed respectively.

The maximum daily evapotranspiration during the whole growth stage of winter wheat is from 0.97 mm/d to 13.66 mm/d, and the average one ranges from 0.52 mm/d to 8.06 mm/d; the evapotranspiration was low in the west and high in the east, which was consistent with the irrigation difference caused by terrain and hydrogeological characteristics in the study area.

(1) The regional daily evapotranspiration rose with fluctuations during the whole growth stage of winter wheat; the evapotranspiration was relatively low from seedling stage to regreening stage, with the regional evapotranspiration ranging from 0.52 mm/d to 1.49 mm/d; from double ridge stage to booting stage, the evapotranspiration ranged from 3.18 mm/d to 4.47 mm/d; from jointing stage to mature period (the critical growth stage), regional evapotranspiration increased rapidly, ranging from 4.47 mm/d to 8.06 mm/d. Overall, the evapotranspiration was the largest in summer, followed by spring, and the evapotranspiration was the smallest in autumn and winter. (2) The evapotranspiration in Yongnian District had a certain degree of temporal and spatial differences. The peak of regional evapotranspiration was spatially shifted between the seedling stage and regreening stage. In terms of the different growing stages, regional evapotranspiration from flowering stage to mature period was higher than from double ridge stage to booting stage, and regional evapotranspiration from double ridge stage to booting stage was higher than from seedling stage to regreening stage. The evapotranspiration in the central and northern regions of Yongnian District was the largest, followed by the southeast region, and the evapotranspiration in the western region was lower. (3) In the selected whole growth period, the daily evapotranspiration of winter wheat had a significant power relation with the average value of LAI, and the R^2 was as high as 0.88, which revealed the quantitative relationship that the evapotranspiration increases positively with the change of LAI in Yongnian District. When the root quantity was low, the fluctuation of evapotranspiration was also low; with the rapid growth of crops, the root quantity showed an increasing trend and the evapotranspiration also showed a curved increasing trend in fluctuations.

Key words: evapotranspiration; SEBAL model; Penman-Monteith model; remote sensing inversion; temporal and spatial characteristics