

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.033

基于地面观测和 Sentinel-2 数据的玉米实际蒸散发估算

蒋磊^{1,2} 蔡甲冰^{2,3} 张宝忠^{2,3} 许迪^{2,3} 魏征^{2,3}

(1. 天津农学院水利工程学院, 天津 300392; 2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 3. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100048)

摘要: 基于遥感技术估算作物蒸散发 (Evapotranspiration, ET) 对农业用水效率评价和精量灌溉决策具有重要意义。结合 Sentinel-2 数据和农田连续地面观测资料, 利用混合双源蒸散发模型 (Hybrid dual-source scheme and trapezoid framework-based evapotranspiration model, HTEM) 对宁夏回族自治区中卫市 2019 年两个试验田玉米主要生育期 (5—8 月) 的蒸散发量进行估算, 并用水量平衡法对遥感估算结果进行验证和评价。结果表明: Sentinel-2 数据具有高时空分辨率, 能够与研究区复杂的种植地块相匹配, 减少了混合像元的数量; 遥感反演参数与地面观测数据拟合度较高, 研究区 2019 年遥感反演的玉米田净辐射量均方根误差为 36.256 W/m²。利用 HTEM 模型估算可得, 主要生育期内研究区两个玉米试验田的日均实际蒸散发量分别为 4.269 mm/d 和 4.339 mm/d, 实际蒸散发总量分别为 525.114 mm 和 533.690 mm, 其中植被蒸腾量分别为 363.483 mm 和 358.196 mm, 生育初期主要以土壤蒸发形式消耗水分, 随着作物的生长, 在生育中后期主要以植被蒸腾的形式消耗水分。ET 遥感反演结果与水量平衡结果之间差别不显著, 两个观测点绝对误差分别为 13.533 mm 和 7.774 mm。因此, 结合地面连续观测系统和 Sentinel-2 数据估算研究区玉米生育阶段蒸散发量具有较高的精度, 可为作物耗水规律研究及区域农业水管理提供技术支撑。

关键词: 玉米; 蒸散发; 冠层温度; Sentinel-2 数据; 双源蒸散发模型

中图分类号: S152.7⁺3; S271 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)03-0296-09

OSID:



Estimation of Maize Evapotranspiration Based on Field Continuous Monitoring System in Site and Sentinel-2 Data

JIANG Lei^{1,2} CAI Jiabing^{2,3} ZHANG Baozhong^{2,3} XU Di^{2,3} WEI Zheng^{2,3}

(1. College of Water Conservancy Engineering, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China

2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

3. National Center for Efficient Irrigation Engineering and Technology Research-Beijing, Beijing 100048, China)

Abstract: It is a useful and powerful tool to estimate crop evapotranspiration (ET) based on remote sensing technology for evaluation of water use efficiency and precision agriculture. To improve the accuracy of estimation, field continuous monitoring system and remote sensing data of Sentinel-2 were employed here to figure up the maize evapotranspiration. The hybrid dual-source scheme and trapezoid framework-based evapotranspiration model (HTEM), was selected as ET estimating model. The experimental fields located in Zhongwei City, Ningxia Hui Autonomous Region, and the main observations of the study area were during maize growing season (from May to Aug.) in 2019. Sentinel-2 data and observed canopy temperature data were the key input data of the HTEM model. Water balance method was also used for comparisons and evaluation of remote sensed ET. Results showed that Sentinel-2 data had high spatial and temporal resolution, which can match the complex planting plots in the study area, reducing the presence of mixed pixels. Remote sensing inversion parameters fit well with ground observation data. The root mean square error (RMSE) of net radiation over study area during study

收稿日期: 2020-12-13 修回日期: 2021-01-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51679254, 51979286)

作者简介: 蒋磊 (1988—), 女, 博士后, 中国水利水电科学研究院教授级高级工程师, 主要从事遥感农业水分利用效率评价研究, E-mail: jianglei0709080411@yeah.net

通信作者: 蔡甲冰 (1976—), 女, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: caijb@iwhr.com

period was 36.256 W/m^2 . Daily evapotranspiration of two maize experimental fields based on HTEM model were 4.269 mm/d and 4.339 mm/d , respectively. And total ET of study area were 525.114 mm and 533.690 mm during main growing period, respectively. The absolute error between remote sensed ET and calculated ET based on water balance method were 13.533 mm and 7.774 mm , respectively. Evaporation and transpiration can be also obtained based on HTEM model. According to the results, total transpiration of maize during study period were 363.483 mm and 358.196 mm , respectively. Water was mainly consumed by soil evaporation during the early growth phase. In the middle and late growth phase, transpiration became the main water consumption way. Thus it can be seen that Sentinel-2 data associated with site canopy temperature system would be more available in regional maize evapotranspiration estimation with high precision. These results could also provide technical support for regional crop evapotranspiration research and agricultural water management.

Key words: maize; evapotranspiration; canopy temperature; Sentinel-2 data; HTEM model

0 引言

作物蒸散发 (Evapotranspiration, ET) 是农业水管理的重要组成部分,合理估算区域作物蒸散发对作物用水效率评价和精量灌溉决策具有重要的意义^[1-2]。随着遥感技术的发展,基于遥感数据和地面观测数据建立的蒸散发模型为科学、准确获取区域作物 ET 信息提供了一种有效的途径和方法^[3-4]。

在区域作物遥感蒸散发估算方法中,发展较为成熟的是基于地表垂直方向能量平衡的思路,即将蒸散发(潜热)作为能量平衡中的余项求出^[5-6]。根据不同的辐射通量和湍流交换方式,能量平衡余项法可分为单源模型和双源模型。单源模型又称“大叶模型”,即不区分土壤蒸发和植被蒸腾,将土壤和植被视为一个均一的整体来考虑潜热通量,常见的单源模型包括 SEBAL (Surface energy balance algorithm for land) 模型^[7]和 SEBS (Surface energy balance system) 模型^[8]等。与单源模型不同,双源模型分别计算土壤和冠层两个组分的净辐射、显热和潜热,进而能够区分土壤蒸发和植被蒸腾。NORMAN 等^[9]开发的 TSEB (Two-source energy balance) 模型是双源模型的代表。YANG 等^[10]在前人研究的基础上提出了混合双源蒸散发模型 (Hybrid dual-source scheme and trapezoid framework-based evapotranspiration model, HTEM), 该模型已在国内外多个地区进行验证,并取得较高的精度^[3,11],与 TSEB、MOD16-ET 产品的对比表明,其计算精度高于其他两类模型^[12]。

作为遥感蒸散发模型的主要输入信息,遥感数据对模型的估算精度有重要影响。目前,常用于估算区域作物蒸散发的遥感数据主要有 MODIS (Moderate resolution imaging spectroradiometer) 数据^[13-14]、Landsat ETM+ 数据^[15]、Sentinel-2 数据^[16]等。国内灌区常见地形、田块和种植结构复

杂,往往需要高时间分辨率和高空间分辨率的遥感数据,以实现农田作物蒸散发的精准、连续监测和反演^[17]。尽管可以利用一些数据融合算法调和 MODIS 数据和 Landsat ETM+ 数据在空间分辨率和时间分辨率上的矛盾^[18],但复杂的算法和步骤限制了其大范围实际应用和推广。Sentinel-2 数据具备高时间分辨率(5 d)和高空间分辨率(10~60 m),弥补了 MODIS 数据和 Landsat ETM+ 数据在“时、空”分辨率上的缺陷。近年来, Sentinel-2 数据在作物识别、植被指数反演等方面得到了广泛应用^[19-22]。但是基于 Sentinel-2 数据对作物蒸散发量进行估算的研究还较为鲜见。

地表温度 (Land surface temperature, LST) 作为双源模型中区分植被温度和土壤温度的关键因子,是作物需水状况和土壤水分信息的综合反映。目前,对于遥感地面温度数据同样存在着“时、空”分辨率矛盾的问题,因此,高时空分辨率的 LST 数据对提高遥感作物蒸散发量估算精度具有重要价值。基于上述问题,本研究利用混合双源蒸散发模型 (HTEM),结合 Sentinel-2 数据和地面农田实际观测数据,对宁夏回族自治区中卫市玉米主要生育期(5—8月)的实际蒸散发量进行计算,以探究利用 Sentinel-2 数据和地表作物冠层温度实测值进行区域作物实际蒸散发量估算的可行性,为区域玉米精量灌溉决策提供理论基础。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验区位于宁夏回族自治区中卫市沙坡头区常乐镇农业示范区 ($105^{\circ}7'6.76''\text{E}$, $37^{\circ}28'5.7''\text{N}$) (图1)。研究区属于温带大陆性季风气候,海拔 1225 m 。受沙漠影响,日照充足,昼夜温差大,年内平均气温为 $7.3 \sim 9.5^{\circ}\text{C}$,年均降水量 $180 \sim 367 \text{ mm}$,年蒸发量为 1829 mm ,夏季降水量占全年降水量的 61% ,全年日照时长 2800 h 左右^[23]。当地土壤主

要为灌溉土。研究区种植的农作物以玉米为主,土地面积约为 566.95 hm²。于 2019 年在玉米的主要生育期(5—8 月)进行试验观测,2019 年 5 月初播种,9 月中旬收青贮玉米。研究区内自然降雨时段与玉米整个生育期吻合;玉米田块共灌溉 5 次,总灌溉量为 380.81 mm,灌溉日期及灌溉水量如图 2 所示。

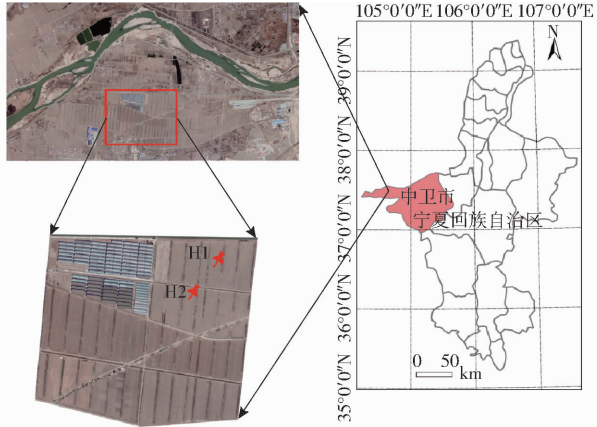


图 1 研究区位置及试验仪器布置

Fig. 1 Location of study area and field monitoring systems in experimental site

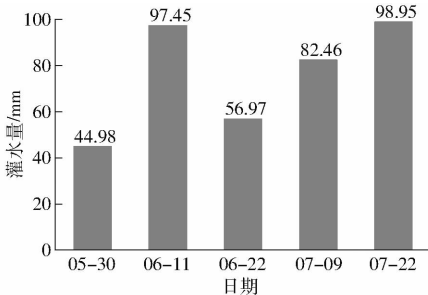


图 2 试验区玉米生育期内灌水日期及灌水量

Fig. 2 Irrigation data and irrigation amount of maize experimental field during growth period

1.2 地面数据监测与采集

根据研究区 2019 年玉米分布情况,选取 2 个代表性地块,在每个地块中间布置 1 套 CTMS-On line 型作物冠层温度及环境因子测量系统(分别为 H1 和 H2,图 1)。观测系统田间实物如图 3 所示,数据采集时间间隔均为 30 min。本系统同步连续监测的农田信息包括:空气温度/湿度、风速、太阳辐射、光合有效辐射、大气压强、作物冠层红外温度、根区土壤墒情等^[24]。每 7~10 d 人工进行观测和采集玉米株高、干物质量、叶面积等作物信息。地下水位观测值通过宁夏水利科学研究院在示范区安装的观测井获得。其他气象数据(如降水量等)从国家气象科学数据中心下载得到。

1.3 Sentinel-2 数据下载及处理

Sentinel-2 数据来源包括 Sentinel-2A 和



图 3 试验区安装的 CTMS-On line 型作物冠层温度及环境因子测量系统

Fig. 3 CTMS-On line real-time monitoring system of crop canopy temperature and environmental factor in field

Sentinel-2B 卫星,各波段信息如表 1 所示。空间分辨率为 10~60 m,时间分辨率为 5 d。Sentinel-2 数据下载及处理流程主要包括原始数据下载(<https://scihub.copernicus.eu>)和校正、辐射定标和裁剪、反演相关参数等 3 个关键步骤。数据下载完成后利用 SNAP 平台对原始数据进行处理,包括几何校正、辐射定标、重采样和裁剪等处理。并进一步反演获得遥感蒸散发模型所需的反照率、归一化植被指数(NDVI)、植被覆盖度(f_c)等关键参数。通过去除生育期云遮盖等的影响,共选取 10 景数据进行研究,如表 2 所示。

表 1 Sentinel-2 数据各波段信息

Tab. 1 Statistical band information of Sentinel-2 data

| 波段 | 中心波长/ | 空间分辨 | 波段宽度/ |
|------------------------------|---------------|------|-------|
| | μm | 率/m | nm |
| Band 1 (Coastal aerosol) | 0.443 | 60 | 20 |
| Band 2 (Blue) | 0.490 | 10 | 65 |
| Band 3 (Green) | 0.560 | 10 | 35 |
| Band 4 (Red) | 0.665 | 10 | 30 |
| Band 5 (Vegetation Red Edge) | 0.705 | 20 | 15 |
| Band 6 (Vegetation Red Edge) | 0.740 | 20 | 15 |
| Band 7 (Vegetation Red Edge) | 0.783 | 20 | 20 |
| Band 8 (NIR) | 0.842 | 10 | 115 |
| Band 8A (Narrow NIR) | 0.865 | 20 | 20 |
| Band 9 (Water vapour) | 0.945 | 60 | 20 |
| Band 10 (SWIR - Cirrus) | 1.375 | 60 | 20 |
| Band 11 (SWIR) | 1.610 | 20 | 90 |
| Band 12 (SWIR) | 2.190 | 20 | 180 |

表 2 选用的 Sentinel-2 数据

Tab. 2 Selections of Sentinel-2 remote sensed data

| 日期 | 卫星 | 日期 | 卫星 |
|-----------------|-------------|-----------------|-------------|
| 2019 年 4 月 30 日 | Sentinel-2A | 2019 年 6 月 29 日 | Sentinel-2A |
| 2019 年 5 月 20 日 | Sentinel-2A | 2019 年 7 月 4 日 | Sentinel-2B |
| 2019 年 5 月 30 日 | Sentinel-2A | 2019 年 7 月 29 日 | Sentinel-2A |
| 2019 年 6 月 9 日 | Sentinel-2A | 2019 年 8 月 18 日 | Sentinel-2A |
| 2019 年 6 月 24 日 | Sentinel-2B | 2019 年 8 月 28 日 | Sentinel-2A |

1.4 混合双源蒸散发模型 (HTEM)

基于双源模型的原理,忽略光合作用耗能和水平方向能量交换的地表能量平衡方程为

$$R_n = H + LE + G \quad (1)$$

式中 R_n ——净辐射通量, W/m^2

H ——感热通量, W/m^2

LE ——潜热通量, W/m^2

G ——土壤热通量, W/m^2

潜热通量 (LE) 作为能量余项,可通过求得地表能量平衡方程中的 R_n 、 H 和 G 求得。

净辐射通量采用 ALLEN 等^[25]提出的基于遥感信息的地表净辐射计算方法获得。土壤热通量采用 BASTIAANSEN^[26]提出的半经验模型进行估算,其表达式为

$$G = R_n (L_{st} - 273.16) (0.0038 + 0.0074\alpha) \cdot (1 - 0.98NDVI^4) \quad (2)$$

其中 $\alpha = 0.356\rho_2 + 0.130\rho_4 + 0.373\rho_8 + 0.085\rho_{11} + 0.072\rho_{12} - 0.0018$ (3)

$$NDVI = \frac{\rho_8 - \rho_4}{\rho_8 + \rho_4} \quad (4)$$

式中 L_{st} ——地表温度, K

α ——地表宽波段反照率^[27]

$NDVI$ ——归一化植被指数

其中, ρ_i 为各窄波段反射率。地表宽波段反照率需用 Band 2、Band 4、Band 8、Band 11 和 Band 12 波段的反射率;归一化植被指数需用 Band 4 和 Band 8 波段的反射率。

HTEM 模型采用层状模型对净辐射在植被和土壤组分间进行分配,采用块状模型计算地表的显热通量、潜热通量及土壤热通量。植被和土壤潜热通量计算式为

$$LE_c = R_{nc} - f_c \rho_{air} C_p \frac{T_c - T_a}{r_a^h} \quad (5)$$

$$LE_s = R_{ns} - G - (1 - f_c) \rho_{air} C_p \frac{T_s - T_a}{r_a^a + r_a^s} \quad (6)$$

式中 LE_c 、 LE_s ——植被、土壤潜热通量, W/m^2

R_{nc} 、 R_{ns} ——植被、土壤净辐射, W/m^2 , 可通过消光系数计算得到

ρ_{air} ——空气密度, kg/m^3

C_p ——空气比热容, $J/(kg \cdot K)$

T_c 、 T_s ——植被、土壤表面温度, K, 可由植被指数-地表温度梯形特征空间来确定

T_a ——空气温度, K

r_a^h ——水热通量在冠层与参考高度间传输的空气动力学阻力, m/s

r_a^a ——水热通量在高度 $z_{om} + d$ (z_{om} 为动量传输的表面粗糙度, d 为零平面位移高度) 与参考高度间传输的空气动力学阻力, m/s

r_a^s ——水热通量在土壤表面边界层内部传输的空气动力学阻力, m/s

参数具体计算方法和步骤见文献[10]。

1.5 蒸散发时间尺度扩展

由遥感蒸散发模型计算得到的是卫星过境瞬时的潜热通量,需要通过一定的方法将瞬时潜热通量进行时间尺度扩展来获得日蒸散发量及更长时段内的蒸散发量。采用修正蒸发比法对瞬时潜热通量进行时间尺度扩展得到卫星过境日的蒸散发量,计算公式为

$$EF = \lambda ET_i / (R_n - G)_i \quad (7)$$

$$\lambda ET_d = m EF (R_n - G)_d \quad (8)$$

式中 EF ——蒸发比

m ——修正系数,取 1.1

λ ——水的汽化潜热,取 2.45 MJ/kg

下标 i 、 d 表示瞬时值和日值。

对于缺乏遥感数据的时段,蒸散发量采用日参考蒸发比三次样条插值法得到。

1.6 精度评价

采用水量平衡方法对遥感反演作物蒸散发量进行验证和评价,水量平衡公式为

$$ET = P_r + U + I - D - R - \Delta W \quad (9)$$

式中 ET ——作物蒸散发量, mm

P_r ——有效降雨量, mm

U ——地下水补给量, mm

I ——灌水量, mm

D ——深层渗漏量, mm

R ——径流量, mm

ΔW ——试验初期和试验末期土壤储水量的变化量, mm

因试验区属于干旱半干旱地区且地势平坦, R 和 D 可忽略不计,则水量平衡公式可简化为

$$ET = P_r + U + I - \Delta W \quad (10)$$

有效降雨量采用有效降水系数和实际降水量的乘积得到,试验区 5—8 月有效降水系数分别为 69.87%、78.17%、81.15%、88.16%^[26]。地下水补给量采用地下水给水度和研究时段内地下水位变化量乘积得到,本研究中地下水给水度取 0.045^[28]。土壤储水量的变化量采用试验末期和试验初期土壤储水量差值求得,其中土壤储水量计算公式为

$$W = \sum_{i=1}^n 10\theta_i h_i \quad (11)$$

式中 W ——土壤储水量, mm

θ_i ——第 i 层土壤体积含水率, %

h_i ——第 i 层土壤厚度, cm

n ——土层的层数, 本试验设 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 共计 3 个土层

选用相对误差 (Relative error, RE)、绝对误差 (Absolute error, AE) 和均方根误差 (Root mean square error, RMSE) 作为精度评价指标, 其中相对误差、绝对误差和均方根误差越小, 说明估算的精度越高。采用 OriginPro 9.1 软件制图, 统计参数分析在 Excel 2017 中进行。

2 结果与分析

遥感蒸散发计算的关键输入数据包括宽波段反照率 (α)、归一化植被指数 (NDVI)、株高、地表冠层温度、气象数据等。其中 α 和 NDVI 通过遥感数据反演得到, 株高通过 NDVI 进行估算; 地表温度 (玉米冠层温度) 和气象数据通过田间实测获得。

2.1 遥感参数反演结果对比

2.1.1 反照率和 NDVI 反演结果

Sentinel-2 数据反演研究区反照率和 NDVI 结果如图 4 所示。以 2019 年 6 月 24 日遥感数据为例, 研究区农田宽波段反照率主要集中在 0.1 ~ 0.2 之间, 农田 NDVI 主要集中在 0.5 ~ 0.8 之间, 其中玉米观测站点南部有部分田块 NDVI 明显低于周围田块, 主要是由于 2019 年该部分田块种植作物为枸杞。枸杞属灌木, NDVI 小于玉米等农作物, 反演结果空间分布与实际种植情况相吻合。另外, 从反照率和 NDVI 反演结果可以看出, Sentinel-2 数据具有较高的空间分辨率 (反照率空间分辨率 20 m, NDVI 空间分辨率 10 m), 适合用于研究区农田地块复杂、种植规模小的情况, 降低了混合像元的存在, 提高了反演精度。

2.1.2 玉米 NDVI 时间序列拟合

研究区玉米试验田块 NDVI 时间序列拟合曲线选取 DoseResp“S”形曲线, 迭代算法采用 Levenberg-Marquardt 优化算法。DoseResp 曲线表达式为

$$NDVI = a + \frac{b-a}{1 + 10^{\frac{(c-Z)}{e}}} \quad (12)$$

式中 Z ——儒略日 (DOY)

a 、 b 、 c 、 e ——待拟合参数, 其中 a 为曲线下渐近线, b 为曲线上渐近线

对研究区玉米 NDVI 时间序列进行拟合, 结果如图 5 和表 3 所示。可以看出, “S”形曲线能够很

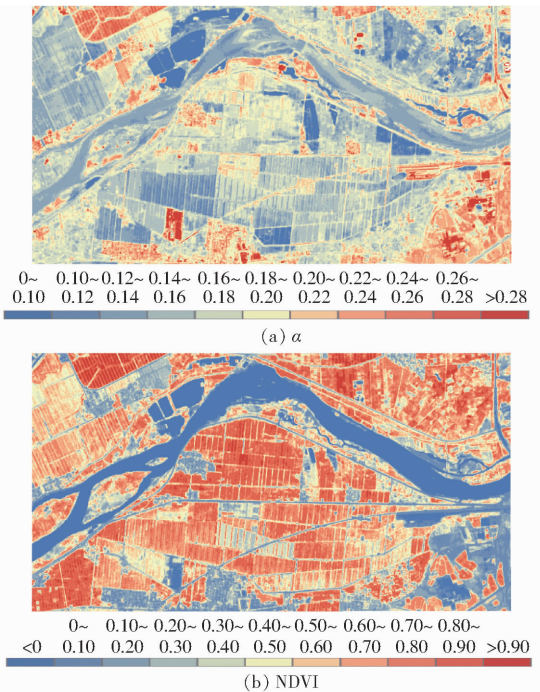


图 4 2019 年 6 月 24 日研究区反照率和 NDVI 反演结果

Fig. 4 Spatial mapping of remote sensed albedo and NDVI of study area in June 24, 2019

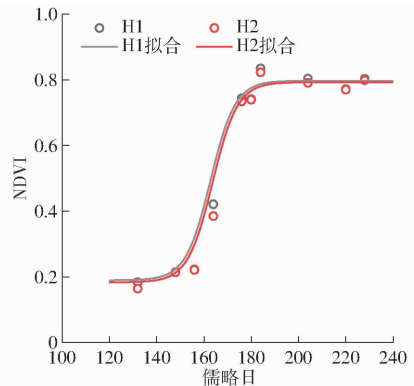


图 5 2019 年研究区玉米 NDVI 时间序列拟合曲线

Fig. 5 Maize NDVI series of remote sensed data and logistic curve fitting results in 2019

表 3 2019 年研究区玉米 NDVI 时间序列曲线拟合结果
Tab. 3 Maize NDVI series of study area and logistic curve fitting results in 2019

| 观测站点 | 拟合参数 | | | | R^2 |
|------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | a | b | c | d | |
| H1 | 0.190 | 0.797 | 162.783 | 0.083 | 0.993 |
| H2 | 0.183 | 0.792 | 163.697 | 0.083 | 0.992 |

好地描述研究区玉米 NDVI 时间序列, 决定系数 R^2 达到 0.99 以上。从玉米 NDVI 时间序列变化曲线来看, 玉米播种后至出苗前期, NDVI 约为 0.2, 表现为与裸土 NDVI 接近。随着玉米生育期的增加, 在第 160 天到第 180 天, NDVI 由 0.2 迅速增至 0.8, 这一阶段为玉米快速生长阶段。此后至收获青贮玉米之前, NDVI 一直保持在 0.8 左右。由拟合参数可以

看出, a 和 b 表示拟合曲线理论上的最大值和最小值, 玉米 NDVI 时间序列理论最大值和最小值分别为 0.797 和 0.183。

2.1.3 玉米株高与 NDVI 关系

遥感蒸散发模型中, 空气动力学阻抗的计算需要冠层高度作为输入数据, 2019 年共进行 10 次玉米株高观测, 分别为 5 月 19 日、6 月 4 日、6 月 14 日、6 月 24 日、7 月 4 日、7 月 18 日、7 月 30 日、8 月 9 日、8 月 19 日和 8 月 29 日。玉米株高与 NDVI 关系如图 6 所示, 并利用指数曲线对株高与 NDVI 关系进行拟合。由拟合结果可以看出, 玉米株高与 NDVI 呈指数关系, 决定系数为 0.94。

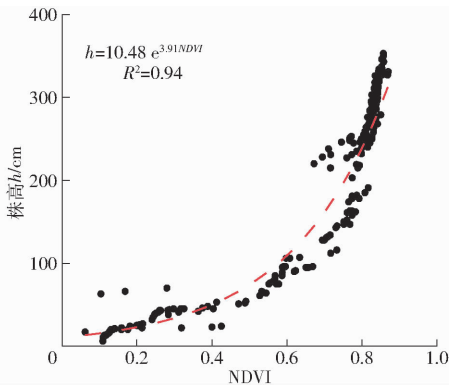


图 6 2019 年研究区玉米株高与 NDVI 关系及指数曲线拟合结果

Fig. 6 Relationship between height and NDVI of maize and exponential curve fitting results in 2019

2.2 计算结果与验证

2.2.1 遥感净辐射和蒸散发计算结果

2019 年研究区玉米站点 (H1 和 H2) 的净辐射观测值和卫星过境瞬时净辐射计算结果如图 7 所示。可见, 研究时段内卫星过境瞬时净辐射变化范围为 590 ~ 710 W/m², 利用遥感信息获取地表净辐射具有较高的精度, 计算值与观测值决定系数为 0.786, 均方根误差 (RMSE) 为 36.256 W/m²。

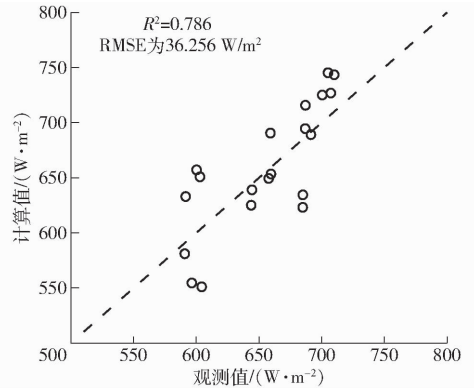


图 7 研究区玉米观测站点净辐射计算值与观测值对比结果

Fig. 7 Comparison between calculated R_n and observed R_n in maize experimental sites

利用 HTEM 模型计算得到的研究区内 2 个玉米试验田块瞬时潜热通量和采用修正的蒸发比法得到的日蒸散发量结果如表 4 (E 为土壤蒸发量, T 为

表 4 2019 年研究区玉米观测站点日蒸散发计算结果

Tab. 4 Results of calculated maize daily evapotranspiration of study area in 2019

| DOY | 观测站点 | $R_n/(W \cdot m^{-2})$ | $LE/(W \cdot m^{-2})$ | $LE_c/(W \cdot m^{-2})$ | $LE_s/(W \cdot m^{-2})$ | $ET/(mm \cdot d^{-1})$ | $E/(mm \cdot d^{-1})$ | $T/(mm \cdot d^{-1})$ |
|-----|------|------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 120 | H1 | 590.816 | 355.914 | 22.970 | 332.432 | 3.914 | 3.661 | 0.253 |
| | H2 | 591.506 | 352.738 | 10.529 | 342.209 | 3.742 | 3.630 | 0.112 |
| 140 | H1 | 602.994 | 362.763 | 29.375 | 333.388 | 3.776 | 3.470 | 0.306 |
| | H2 | 600.251 | 365.997 | 23.983 | 342.014 | 3.829 | 3.578 | 0.251 |
| 150 | H1 | 596.412 | 381.240 | 28.857 | 352.383 | 4.292 | 3.967 | 0.325 |
| | H2 | 604.320 | 404.052 | 32.238 | 371.814 | 4.676 | 4.303 | 0.373 |
| 160 | H1 | 691.402 | 541.368 | 242.585 | 298.783 | 5.597 | 3.089 | 2.508 |
| | H2 | 659.083 | 495.481 | 194.326 | 301.155 | 5.573 | 3.388 | 2.186 |
| 175 | H1 | 707.296 | 557.384 | 553.719 | 3.666 | 5.775 | 0.038 | 5.737 |
| | H2 | 709.982 | 573.076 | 570.377 | 2.699 | 5.896 | 0.028 | 5.868 |
| 180 | H1 | 684.874 | 613.609 | 593.834 | 19.775 | 5.765 | 0.186 | 5.579 |
| | H2 | 685.000 | 613.873 | 579.864 | 34.009 | 5.999 | 0.332 | 5.667 |
| 185 | H1 | 700.478 | 663.804 | 632.041 | 31.763 | 6.311 | 0.302 | 6.009 |
| | H2 | 705.053 | 675.188 | 628.801 | 46.387 | 6.547 | 0.450 | 6.097 |
| 210 | H1 | 686.903 | 623.666 | 609.407 | 14.260 | 5.759 | 0.132 | 5.628 |
| | H2 | 687.101 | 609.965 | 567.478 | 42.486 | 5.847 | 0.407 | 5.439 |
| 230 | H1 | 659.615 | 532.272 | 509.440 | 22.832 | 4.478 | 0.192 | 4.286 |
| | H2 | 657.717 | 525.441 | 491.610 | 33.831 | 4.548 | 0.293 | 4.255 |
| 240 | H1 | 643.776 | 532.574 | 520.815 | 11.760 | 4.106 | 0.091 | 4.015 |
| | H2 | 644.447 | 554.912 | 524.495 | 30.417 | 4.617 | 0.253 | 4.364 |
| 平均值 | | 656.457 | 516.459 | 374.304 | 142.155 | 4.977 | 1.513 | 3.465 |

植被蒸腾量)和图8所示。可见,2个观测站点(H1和H2)在玉米生育期内潜热通量和日蒸散发量变化趋势相似,生育初期净辐射量约为 600 W/m^2 ,潜热通量约为 350 W/m^2 ,潜热通量主要为土壤潜热,占总潜热通量的95%以上。时间尺度扩展得到的日蒸散发量变化范围为 $3.742\sim 4.676\text{ mm/d}$,水分消耗主要以土壤蒸发为主,范围为 $3.470\sim 4.303\text{ mm/d}$,植被蒸腾很小,变化范围为 $0.112\sim 0.373\text{ mm/d}$ 。在玉米快速生长阶段,净辐射逐渐增加,约为 700 W/m^2 ,潜热通量也随之增加,变化范围为 $495.481\sim 613.873\text{ W/m}^2$ 。日实际蒸散发量在这一阶段也有明显增加,变化范围为 $5.573\sim 5.999\text{ mm/d}$,主要的水分消耗形式从土壤蒸发逐渐变为植被蒸腾,在第175天时,植被蒸腾量占日蒸散发量的95%以上,并且这一比例一直保持到青贮玉米收获。玉米日实际蒸散发量在第185天达到峰值,2个玉米观测站点的日实际蒸散发量分别为 6.311 mm/d 和 6.547 mm/d 。随后日实际蒸散发量逐渐减小至 4.106 mm/d 和 4.617 mm/d 。

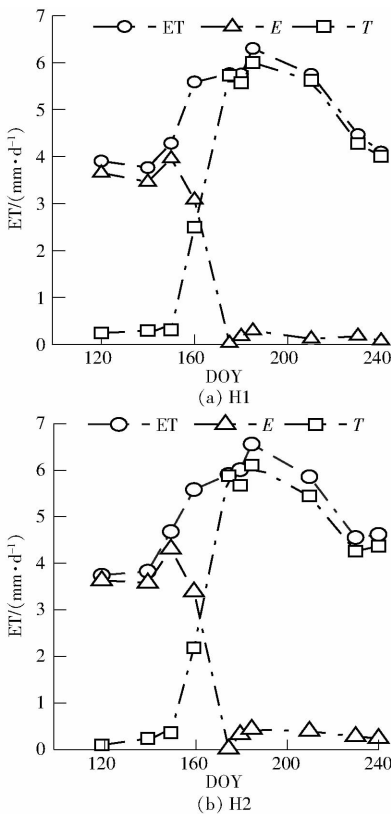


图8 2019年研究区玉米观测站点日实际蒸散发(土壤蒸发量、植被蒸腾量)变化曲线

Fig. 8 Variation of daily ET (E and T) of maize experimental sites in 2019

采用日参考蒸发比插值的方法获取无卫星过境日的蒸散发量,进而得到生育期内连续的玉米日实际蒸散发量,采用三次样条插值,并对插值后的参考蒸发比异常值进行修正,得到玉米生育期内连续的日实

际蒸散发量(图9)。结果表明,逐日实际蒸散发量同样呈现出单峰的变化趋势,即生育初期日实际蒸散发量在 4 mm/d 左右浮动。随着生育期的增加,日实际蒸散发量逐渐增大,在第180天到第220天达到峰值,期间个别时段日实际蒸散发量超过 8 mm/d ,这是由于这一阶段降水较为集中,其中年内两次较大的降水均发生在该时段,并且进行了两次灌溉,土壤含水率较高,水分胁迫较小,加之这一时段作物潜在蒸散发量较大,导致这一阶段实际蒸散发量达到了峰值。至生育期末,日实际蒸散发量逐渐减小为 $2\sim 4\text{ mm}$ 。从统计结果可以看出(表5),研究区2个玉米试验田块5—8月实际蒸散发总量分别为 525.114 mm 和 533.690 mm ,日均实际蒸散发量为 4.269 mm/d 和 4.339 mm/d ,其中植被蒸腾总量分别为 363.483 mm 和 358.196 mm ,从整个生育期来看,植被蒸腾是作物水分消耗的主要形式。

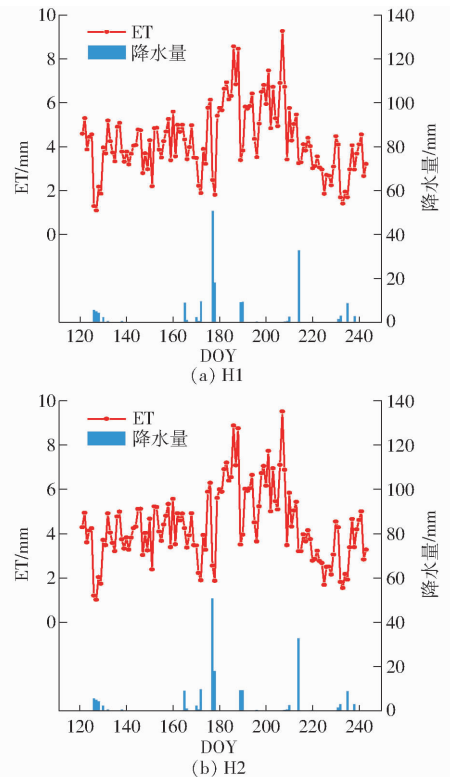


图9 2019年研究区玉米观测站5—8月逐日实际蒸散发变化情况

Fig. 9 Daily evapotranspiration variation of maize experimental sites from May to August in 2019

表5 2019年研究区玉米实际蒸散发量

Tab. 5 Statistical results of maize evapotranspiration of study area in 2019

| 观测站点 | 总蒸散发量/ mm | 日均蒸散发量/ ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$) | 土壤蒸发 总量/mm | 植被蒸腾 总量/mm |
|------|--------------|--|---------------|---------------|
| H1 | 525.114 | 4.269 | 161.631 | 363.483 |
| H2 | 533.690 | 4.339 | 175.494 | 358.196 |
| 平均值 | 529.402 | 4.304 | 168.563 | 360.840 |

2.2.2 ET 计算结果验证

采用水量平衡法对计算得到的玉米生育期内蒸散发总量进行验证和评价(表6)。结果表明,基于冠层温度观测系统和 Sentinel-2 数据反演的研究区玉米蒸散发总量与水量平衡法计算得到的蒸散发

总量相比,精度较高,2个观测站点的相对误差分别为 -2.512% 和 -1.469%,绝对误差分别为 13.533、7.774 mm。可见,利用当地田间多参数观测系统和 Sentinel-2 数据并结合混合双源蒸散发模型获取作物蒸散发量比较可靠。

表6 2019年研究区玉米蒸散发量验证结果

Tab.6 Verification of maize evapotranspiration in study area in 2019

| 观测站点 | P_r/mm | U/mm | I/mm | $\Delta W/mm$ | ET/mm | | 相对误差/ % | 绝对误差/ mm |
|------|----------|--------|---------|---------------|---------|---------|------------|-------------|
| | | | | | 水量平衡 | 遥感反演 | | |
| H1 | 145.545 | 8.100 | 380.810 | -4.192 | 538.647 | 525.114 | -2.512 | 13.533 |
| H2 | | | | -7.009 | 541.464 | 533.690 | -1.469 | 7.774 |

2.3 讨论

Sentinel-2 数据在可见光、近红外和短波红外工作波段范围内具有高时空分辨率,能够很好地描述下垫面的高异质性,大大降低了混合像元的存在。但是地表温度作为遥感蒸散发模型的关键输入数据,目前仍存在着“时、空”上的矛盾,在很大程度上增加了蒸散发估算的不确定性。随着遥感技术的发展以及地表温度解译方法的成熟,建立高时空分辨率的地表温度算法和产品是提高区域蒸散发估算精度的重要课题。

在瞬时蒸散发到日蒸散发量的时间尺度扩展方面,不同方法均有其适用条件,如何根据不同的环境因素、卫星过境时刻、下垫面类型等选取适宜的时间尺度扩展方法仍值得深入研究。此外,利用扩展得到的日蒸散发量获取连续时段的蒸散发量的插值方法仍需进一步研究,特别是针对有降水前后由于云遮蔽的影响缺乏遥感数据,同时又由于降水导致的土壤含水率突变的情况下,如何提高插值的精度也是下一步需继续开展和完善的工作。

3 结论

(1) Sentinel-2 数据具有高时空分辨率,能够与研究区复杂的种植地块相匹配,降低了混合像元的存在,提高了玉米蒸散发量估算的精度。利用“S”形曲线拟合研究区玉米 NDVI 时间序列具有较

高精度,决定系数达到 0.99 以上。同时,研究区玉米株高与 NDVI 的关系可以用指数曲线拟合,决定系数达到 0.94。

(2) 基于 Sentinel-2 数据反演得到的卫星过境瞬时净辐射具有较高精度,其变化范围为 590 ~ 710 W/m^2 ,与地面观测值间的决定系数为 0.786,均方根误差为 36.256 W/m^2 。

(3) 卫星过境日实际蒸散发量呈单峰变化,在第 185 天左右达到峰值,日蒸散发量达到 6 mm/d 以上。生育初期水分主要以土壤蒸发形式消耗,从第 150 天之后逐渐过渡到以植被蒸腾为主,到第 175 天时,植被蒸腾量占日实际蒸散发量的 95% 以上,并且一直保持到青贮玉米收获。由参考蒸发比三次样条插值得到的逐日实际蒸散发量结果表明,研究区玉米 5—8 月实际蒸散发总量为 529.402 mm,日均实际蒸散发量为 4.304 mm/d,其中植被蒸腾总量为 360.840 mm,从整个生育期来看,植被蒸腾是作物水分消耗的主要形式。采用水量平衡法对玉米生育期蒸散发总量进行验证,两个观测站点的平均相对误差和绝对误差分别为 -1.9905% 和 10.6535 mm。

(4) 将地面冠层温度观测数据和高时空分辨率遥感数据相结合,采用混合双源遥感蒸散发模型(HTEM)获取研究区玉米生育期蒸散发量(蒸发量、蒸腾量)具有较高的精度,对精量灌溉决策的制定和区域农业水管理具有重要的科学意义和应用价值。

参 考 文 献

- [1] ANAPALLI S S, AHUJA L R, GOWDA P H, et al. Simulation of crop evapotranspiration and crop coefficients with data in weighing lysimeters[J]. Agricultural Water Management, 2016, 177(2): 274 - 283.
- [2] LEI H M, YANG D W. Interannual and seasonal variability in evapotranspiration and energy partitioning over an irrigated cropland in the North China Plain[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(4): 581 - 589.
- [3] YANG Y T, SHANG S H, JIANG L. Remote sensing temporal and spatial patterns of evapotranspiration and the responses to water management in a large irrigation district of North China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 164(8): 112 - 122.
- [4] YEBRA M, DIJK A V, LEUNING R, et al. Evaluation of optical remote sensing of estimate actual evapotranspiration and canopy conductance[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 129(2): 250 - 261.
- [5] 高彦春, 龙笛. 遥感蒸散发模型研究进展[J]. 遥感学报, 2008, 12(3): 515 - 528.
GAO Yanchun, LONG Di. Progress in models for evapotranspiration estimation using remotely sensed data[J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(3): 515 - 528. (in Chinese)

- [6] 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/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 81-92. SHANG Songhao, JIANG Lei, YANG Yuting. Review of remote sensing-based assessment method for irrigation and crop water use efficiency[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 81-92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151013&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.013. (in Chinese)
- [7] 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, 213(1-4): 198-212.
- [8] SU Z B. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2002, 6(1): 85-100.
- [9] 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.
- [10] YANG Y T, SHANG S H. A hybrid dual source scheme and trapezoid framework based evapotranspiration model (HTEM) using satellite images: algorithm and model test[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(5): 2284-2300.
- [11] YANG Y T, SCOTT R L, SHANG S H. Modeling evapotranspiration and its partitioning over a semiarid shrub ecosystem from satellite imagery: a multiple validation[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2013, 7(1): 073495.
- [12] YANG Y T, LONG D, GUAN H D, et al. Comparison of three dual-source remote sensing evapotranspiration models during the MUSOEXE-12 campaign: revisit of model physics[J]. Water Resources Research, 2015, 51(5): 3145-3165.
- [13] MU Q Z, HEINSCH F A, ZHAO M S, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 111(4): 519-536.
- [14] TIAN F, QIU G Y, YANG Y H, et al. Estimation of evapotranspiration and its partition based on an extended three-temperature model and MODIS products[J]. Journal of Hydrology, 2013, 498(11): 210-220.
- [15] ANDERSON M C, ALLEN R G, MORSE A, et al. Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 122: 50-65.
- [16] GUZINSKI R, NIETO H. Evaluating the feasibility of using Sentinel-2 and Sentinel-3 satellites for high-resolution evapotranspiration estimations[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 221: 157-172.
- [17] JU J, ROY D P. The availability of cloud-free Landsat ETM+ data over the conterminous united states and globally[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(3): 1196-1211.
- [18] ZHU X L, CHEN J, GAO F, et al. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114: 2610-2623.
- [19] SHABANOV N V, WANG Y, BUERMANN W, et al. Effect of foliage spatial heterogeneity in the MODIS LAI and FPAR algorithm over broadleaf forests[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 85(4): 410-423.
- [20] 苏伟, 侯宁, 李琪, 等. 基于 Sentinel-2 遥感影像的玉米冠层叶面积指数反演[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 151-156. SU Wei, HOU Ning, LI Qi, et al. Retrieving leaf area index of corn canopy based on Sentinel-2 remote sensing image[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 151-156. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180119&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.019. (in Chinese)
- [21] 吴静, 吕玉娜, 李纯斌, 等. 基于多时相 Sentinel-2A 的县域农作物分类[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 194-200. WU Jing, LÜ Yu'na, LI Chunbin, et al. Fine classification of county crops based on multi-temporal images of Sentinel-2A[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 194-200. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190922&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.022. (in Chinese)
- [22] 陈安旭, 李月臣. 基于 Sentinel-2 影像的西南山区不同生长期水稻识别[J]. 农业工程学报, 2020, 36(7): 192-199. CHEN Anxu, LI Yuechen. Rice recognition of different growth stages based on Sentinel-2 images in mountainous areas of Southwest China[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(7): 192-199. (in Chinese)
- [23] 胡现振. 卫宁平原包气带水分运移试验研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2014. HU Xianzhen. Study on evaporation by field test in the Weining Plain[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese)
- [24] 蔡甲冰, 许迪, 司南, 等. 基于冠层温度和土壤墒情的实时监测与灌溉决策系统[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 133-139. CAI Jiabing, XU Di, SI Nan, et al. Real-time monitoring system of crop canopy temperature and soil moisture for irrigation decision-making[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 133-139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151219&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.019. (in Chinese)
- [25] ALLEN R G, TASUMI M, MORSE A, et al. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-applications[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2007, 133(4): 395-406.
- [26] BASTIAANSEN W G M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey [J]. Journal of Hydrology, 2000, 229(1-2): 87-100.
- [27] LIANG S L. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo [J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 76(2): 213-238.
- [28] 余美, 芮孝芳. 宁夏银北灌区水盐均衡模型及其应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(4): 367-372. YU Mei, RUI Xiaofang. Application of water and salt balance model in Yinbei irrigation district of Ningxia [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2009, 37(4): 367-372. (in Chinese)