

基于数据融合算法的灌区蒸散发空间降尺度研究

白亮亮¹ 蔡甲冰^{1,2} 刘 钰^{1,2} 陈 鹤^{1,2} 张宝忠^{1,2} 黄凌旭^{1,2}

(1. 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;

2. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100048)

摘要: 采用 Landsat 和 MODIS 数据, 通过增强自适应融合算法 (Enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model, ESTARFM) 对蒸散发进行空间降尺度, 构建田块尺度蒸散发数据集; 利用 2015 年田间水量平衡方法计算的蒸散发数据对融合结果进行评价。在融合蒸散发基础上, 结合解放闸灌域 2000—2015 年间种植结构信息, 提取不同作物各自生育期和非生育期内年际蒸散发量, 并分析了大型灌区节水改造以来, 作物蒸散发占比的年际变化。研究结果表明: 融合蒸散发与水量平衡蒸散发变化过程较吻合, 小麦耗水峰值出现在 6 月中下旬—7 月初, 玉米和向日葵峰值出现在 7 月份。在相关性分析中, 玉米、小麦和向日葵的决定系数 R^2 分别达到了 0.85、0.79 和 0.82; 生育期内玉米 (5—10 月份)、小麦 (4—7 月份) 和向日葵 (6—10 月份) 的均方根误差均不高于 0.70 mm/d; 平均绝对误差均不高于 0.75 mm/d; 相对误差均不高于 16%。在农田蒸散发总量验证中, 融合蒸散发与水量平衡蒸散发相关性较好, 两者决定系数达到了 0.64。基于 ESTARFM 融合算法生成的高分辨率蒸散发 (ET) 结果可靠, 具有较好的融合精度。融合结果与 Landsat 蒸散发的空间分布和差异性一致, 7 月 23 日、8 月 24 日和 9 月 1 日相关系数分别达到 0.85、0.81 和 0.77; 差值均值分别为 0.24 mm、0.19 mm 和 0.22 mm; 标准偏差分别为 0.81 mm、0.72 mm 和 0.61 mm。ESTARFM 融合算法在农田蒸散发空间降尺度得到较好的应用, 可有效区分不同作物蒸散发之间的差异。不同作物在生育期和非生育期内耗水量差别较大; 生育期内套种 (4—10 月份) 耗水量最大, 达到 637 mm, 玉米 (5—10 月份) 和向日葵 (6—10 月份) 次之, 分别为 598 mm 和 502 mm, 小麦 (4—7 月份) 最低为 412 mm; 非生育期内, 小麦 (8—10 月份) 耗水量最大, 年均达到 214 mm, 玉米 (4 月份) 和向日葵 (4—5 月份) 分别为 42 mm 和 128 mm。不同作物多年平均耗水量 (4—10 月份) 差异较小, 其年际耗水总量主要随作物种植面积的变化而变化。

关键词: 遥感; 数据融合; 蒸散发; 地表能量平衡模型; 增强时空自适应融合算法; 河套灌区

中图分类号: S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298 (2017) 04-0215-09

Spatial Downscaling of Evapotranspiration in Large Irrigation Area Based on Data Fusion Algorithm

BAI Liangliang¹ CAI Jiabing^{1,2} LIU Yu^{1,2} CHEN He^{1,2} ZHANG Baozhong^{1,2} HUANG Lingxu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

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

Abstract: In order to construct the high spatial-temporal dataset of evapotranspiration (ET), the Landsat and MODIS data were used to achieve spatial downscaling of ET by using the enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model (ESTARFM). The result of data fusion was evaluated by field ET output from root zone water balance model. According to crop planting structure information from 2000 to 2015 in the study area, the water consumption of different crops was exacted during their growth and non-growth periods. Based on the fusion ET , the interannual variation of total agricultural water consumption was analyzed since the implement of water-saving project in large irrigation district. The result showed that the process of fusion ET was more consistent with ET output from water balance. In the

收稿日期: 2017-01-07 修回日期: 2017-02-06

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目 (2012BAD08B01)、国家自然科学基金项目 (51679254) 和国家重点研发计划项目 (2016YFC0400101)

作者简介: 白亮亮 (1986—), 男, 博士生, 主要从事农业遥感及灌溉管理研究, E-mail: bl306@126.com

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

correlation analysis of water balance and fusion *ET*, the determination coefficients (R^2) of maize, wheat and sunflower reached 0.85, 0.79 and 0.82, respectively. During the growth period, the root mean square errors (RMSE) of maize (May to October), wheat (April to October) and sunflower (June to October) were lower than 0.70 mm/d, the mean absolute error (MAD) was all lower than 0.75 mm/d, and the relative error (RE) was all less than 16%. On the spatial scale, the spatial characteristics of fusion results were consistent with the Landsat *ET*. The correlation coefficients of July 23, August 24 and September 1 reached 0.85, 0.81 and 0.77, the mean values of the differences were 0.24 mm, 0.19 mm and 0.22 mm, and the standard deviations were 0.81 mm, 0.72 mm and 0.61 mm, respectively. The high resolution *ET* based on ESTARFM fusion algorithm was reliable and had good fusion precision. The water consumption of different crops varied greatly both in the growth period and non-growth period. During the growth period, the maximum water consumption was 637 mm for interplanting (April to October), followed by maize and sunflower, which were 598 mm (May to October) and 502 mm (June to October), respectively, the minimum water consumption of wheat was 412 mm (April to July). During the non-growth period, wheat (August to October) had the highest water consumption with an annual average of 214 mm, and those of maize (April) and sunflower (April to May) were 42 mm and 128 mm, respectively. Due to the difference of average annual water consumption of different crops was not significant during April to October, the variation of total water consumption for different crops was varied with the changes of crop acreage.

Key words: remote sensing; data fusion; evapotranspiration; surface energy balance model; enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model; Hetao irrigation district

引言

详细的农田蒸散发时空信息是研究农业水文循环、农业灌溉用水管理的重要依据^[1-2],尤其在种植结构比较复杂和破碎的灌区。遥感技术的发展为区域蒸散发计算提供了一条有效途径,为灌区用水效率定量评价奠定了基础^[3]。由于遥感技术的限制和昂贵的影像费用,同时兼顾高时间、高空间分辨率影像的获取和应用受到限制^[4]。如 IRS、SPOT、CBERS 和 Landsat 系列卫星等,具有较高的空间分辨率,但由于较长的重访周期以及云雨天气等,限制了遥感数据在连续监测地表参数和地表通量方面的应用。高频率重访周期遥感卫星 MODIS 和 AVHRR 可以连续观测地表参数的连续变化,但不能有效分辨复杂下垫面参数的变化。

数据融合可以有效地整合多源遥感数据,构建具有高时空分辨率影像。传统的融合算法包括亮度-色调-饱和度变换^[5]、主成分分析^[6]以及小波变换^[7]等,将全色波段与多光谱波段进行融合以获得高分辨率多光谱图像,但不能有效获取由物候引起的地表反射率变化;GAO 等^[8]提出了时空自适应融合算法(STARFM),该算法综合考虑了距离权重、光谱权重和时间权重,有效融合了 Landsat 和 MODIS 数据。数据融合方法通常用来整合较低级的地表参数,这些参数随时间的变化较缓慢,如归一化差值植被指数(NDVI)等。而地表温度(LST)随时间变化较为剧烈,同时依赖于不同传感器观测角,很大程度上限制了数据融合的应用。因此,CAMMALLERI

等^[9-10]采用时空自适应融合算法(STARFM)直接融合 MODIS 和 Landsat 蒸散发产品,实现了不同数据源高级产品的融合。但 STARFM 算法在缺少关键期影像时,不能有效捕捉物候剧烈变化信息。HIKER 等^[11]提出了一种时空自适应融合变化监测方法,该方法避免了短暂剧烈的地物变化问题;ROY 等^[12]采用一种半物理的数据融合方法,使用 MODIS 二性反射等地表数据产品和 Landsat ETM+ 进行融合并预测对应日期或前后相邻日期的数据。以上融合结果的优劣在一定程度上依赖于下垫面的复杂程度,如破碎下垫面条件。ZHU 等^[4]提出了增强时空自适应融合算法(Enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model, ESTARFM),在相似像元选取和时间权重计算上更加合理,并且可以有效捕捉地物剧烈变化特征,改善了复杂下垫面情况下地表特征参数融合精度。

为应对黄河流域水资源供需矛盾的现状,黄河水利委员会对引黄灌溉水量实行统一调度,将河套灌区年引黄水量由 52 亿 m³逐步压缩到 40 亿 m³,同时实施了大型灌区续建配套与节水改造工程建设。灌区引水量的减少^[13]和节水改造工程的实施,使得作为灌区主要水量消耗的农业耗水以及区域水土环境必然会受到影响。本文采用地表能量平衡模型(Surface energy balance system, SEBS)^[14]生成 Landsat 空间尺度蒸散发数据,并结合 MODIS 日蒸散发数据,利用增强时空自适应融合算法(ESTARFM)实现蒸散发的空间降尺度,进而构建高时空分辨率蒸散发数据集;并通过田块尺度根区水

量平衡模型对蒸散发融合结果进行验证和评价。同时根据研究区域多年种植结构空间信息,提取和分析不同作物生育期和非生育期年际耗水变化,将数据融合结果进行应用,以期为大型灌区节水改造实施效果评价、农业耗水变化以及灌区农田灌溉用水管理提供参考和依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

以内蒙古自治区河套灌区解放闸灌域为对象开展研究(图 1)。解放闸灌域为河套灌区第 2 大灌域(106°43′~107°27′E、40°34′~41°14′N),南邻黄河,北依阴山^[15]。地处干旱半干旱内陆地区,年平均气温 9℃,海拔高度在 1 030~1 046 m 之间;年均降水量 151 mm,蒸发量 2 300 mm。总土地面积约 2 345 km²,土壤类型为潮灌淤土和盐化土,土壤质地为粉壤土;其中 60% 以上为耕地,种植结构较破碎,粮食作物以春玉米和春小麦为主,经济作物以向日葵为主^[16]。

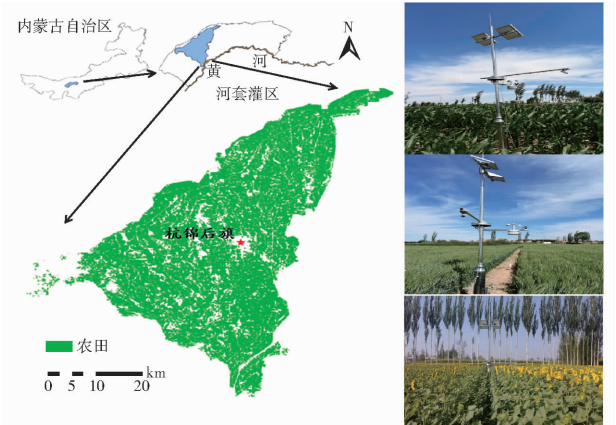


图 1 解放闸灌域及田间试验位置示意图
Fig. 1 Locations of Jiefangzha irrigation district and field experiment

点试验观测区位于内蒙古河套灌区解放闸灌域沙壕渠光明二队,仪器安装和数据监测地如图 1 所示,包括玉米、小麦和向日葵 3 种主栽作物。为保证像元为纯像元,作物田块尺寸均大于 60 m×60 m。地下水水位变化通过田块布设的观测井每日监测;土壤含水率每日监测,详见蔡甲冰等^[17]相关研究;田间灌溉水量和降水量通过人工观测记录。

1.2 融合遥感影像及预处理

融合过程中所用空间分辨率为 30 m 的遥感影像,包括 Landsat5 TM、Landsat7 ETM + 和 Landsat8 OLI/TIRS 系列数据(<http://glovis.usgs.gov>)。根据遥感影像质量(晴空或少量云覆盖),分别选取数据较好的 2000、2002、2005、2008、2010、2014、2015 年影像作为研究时段,其年内跨度为主要作物生育期的

4—10 月份,具体数据见表 1。影像经过辐射、大气校正、条带修复、镶嵌和裁剪,并利用手持 GPS 采集的地面控制点统一进行几何精校正,误差控制在 1/2 个像元以内,处理后影像作为遥感蒸散发模型的输入数据。空间分辨率为 250 m 的 MODIS 日蒸散发数据来自 YANG 等^[18]的计算结果,产品通过 MRT 工具重投影到 WGS84/UTM(北 48 区)坐标系,空间分辨率重采样到与 Landsat 系列蒸散发数据一致。

表 1 融合过程可用 Landsat 系列影像
Tab. 1 Available remote sensing images for data fusion

年份	数量	儒略日		
		Landsat5	Landsat7	Landsat8
2000	7	107,251	83,163,195、 243,291	
2002	6	176,192	72,136,232、 280	
		88,104,120、		
2005	9	152,168,264、 280	208,224	
2008	9	97,145,177、 273,289	153,201,249、 297	
		86,102,118、		
2010	11	134,182,198、 278	174,190,238、 254	
2014	8		137,185,281	97,113,145、 209,289
2015	10		124,156,204、 236,268	84,244,260、 276,292

1.3 SEBS 遥感蒸散发模型

SEBS 模型是 SU^[14]在 2002 年提出的基于能量平衡原理的单层模型。SEBS 模型主要包括以下几部分:反照率和辐射率等地表物理参数反演;热量粗糙长度计算;显热通量计算;潜热通量计算。

能量平衡方程计算式为

$$R_n = H + \lambda ET + G_0 \tag{1}$$

式中 R_n ——净辐射量 G_0 ——土壤热通量
 H ——显热通量 λ ——水的汽化潜热

SEBS 模型结合了 BRUTSAERT^[19]裸地条件下和 CHOUDHURY 等^[20]完全植被覆盖条件下 kB^{-1} 计算公式,提出了基于部分植被覆盖的混合像元条件下 kB^{-1} 计算公式

$$kB^{-1} = \frac{kC_d}{4C_t \frac{u_*}{u(h)}(1 - e^{-n_{ec}/2})} f_c^2 + 2f_c f_s \frac{k \frac{u_*}{u(h)} \frac{z_{om}}{h}}{C_t^*} + kB_s^{-1} f_s^2 \tag{2}$$

式中 k ——冯卡尔曼常数

B^{-1} ——无量纲的热量传输系数
 C_d ——叶片拖曳系数
 u_* ——摩擦阻力 h ——冠层高度
 z_{om} ——动量粗糙长度
 $u(h)$ ——冠层高度风速
 f_c ——植被覆盖度
 f_s ——裸土覆盖度
 C_t ——叶片热量传输系数
 C_t^* ——土壤热量传输系数
 n_{ec} ——冠层风速剖面衰减系数

对于绝大多数冠层和自然条件的情况, C_t 的取值范围是 $[0.005N, 0.075N]$, 其中 N 代表植被叶片参与热量交换的面数, 取值为 1 或 2。具体计算过程和参数详见文献[14]。

1.4 ESTARFM 数据融合

ESTARFM 数据融合算法起初被用来对低级产品的降尺度, 如地表反射率、NDVI 等地表特征参数; 本文将其应用到蒸散发空间降尺度, 以期构建 Landsat 空间尺度蒸散发数据集。算法通过临近相似像元的光谱信息来预测目标像元的特征值, 根据就近原则, 利用与预测时期前后相邻 2 个时期的原有 Landsat 空间尺度和 MODIS 空间尺度蒸散发数据以及预测时期 MODIS 空间尺度蒸散发, 共同生成预测时期的 Landsat 空间尺度蒸散发。最终预测时期蒸散发的计算式为

$$ET(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p) = T_m ET_m(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p) + T_n ET_n(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p) \tag{3}$$

$$ET_k(x_{w/2}, y_{w/2}, t_p) = ET_L(x_{w/2}, y_{w/2}, t_k) + \sum_{i=1}^{N'} W_i V_i (ET_M(x_i, y_i, t_p) - ET_M(x_i, y_i, t_k)) \tag{4}$$

$$(k = m, n)$$

其中
$$W_i = (1/D_i) / \sum_{i=1}^{N'} (1/D_i) \tag{5}$$

$$D_i = (1 - R_i) d_i \tag{6}$$

$$d_i = 1 + \sqrt{(x_{w/2} - x_i)^2 + (y_{w/2} - y_i)^2} / (w/2) \tag{7}$$

式中 ET ——最终预测时期的高分辨率蒸散发
 t_p ——预测影像时期
 ET_m —— T_m 时期预测的高分辨率蒸散发
 ET_n —— T_n 时期预测的高分辨率蒸散发
 ET_L ——Landsat 蒸散发
 ET_M ——MODIS 蒸散发
 ET_k —— T_k 时期预测的高分辨率蒸散发
 $(x_{w/2}, y_{w/2})$ ——中心像元位置
 (x_i, y_i) ——第 i 个相似像元位置
 N' ——相似像元的个数
 W_i ——综合权重因子

V_i ——转换系数 d_i ——距离权重
 R_i ——光谱相似权重
 w ——相似像元搜索窗口, 取 12 个 MODIS 像元 (50 个 Landsat 像元) 大小范围

T_m, T_n 时期的时间权重因子 T_k 表达式为

$$T_k = \frac{1 / \left| \sum_{j=1}^w \sum_{i=1}^w ET_M(x_i, y_j, t_k) - \sum_{j=1}^w \sum_{i=1}^w ET_M(x_i, y_j, t_p) \right|}{\sum_{k=m, n} \left(1 / \left| \sum_{j=1}^w \sum_{i=1}^w ET_M(x_i, y_j, t_k) - \sum_{j=1}^w \sum_{i=1}^w ET_M(x_i, y_j, t_p) \right| \right)} \tag{8}$$

$$(k = m, n)$$

具体计算过程参照文献[4]。

1.5 地面点蒸散发数据

为评价 ESTARFM 融合算法在蒸散发数据中的应用, 地面蒸散发数据采用文献[21]中根区水量平衡模型得出, 该模型同时考虑了地下水渗漏和补给量对蒸散发的影响。根区水量平衡表达式为

$$W_i = W_{i-1} - (P_i - R_{oi}) - I_i - G_{R_i} + ET_i + D_{P_i} \tag{9}$$

式中 W_i ——第 i 天根区土壤储水量
 W_{i-1} ——第 $i-1$ 天根区土壤储水量
 P_i ——第 i 天降水量
 R_{oi} ——第 i 天地表径流量
 I_i ——第 i 天灌溉量
 G_{R_i} ——第 i 天地下水补给量
 ET_i ——第 i 天土壤蒸散发量
 D_{P_i} ——第 i 天根层渗漏量

地下水补给量 G_R 和渗漏量 D_p 计算公式分别为

$$G_R = \begin{cases} G_{R_{\max}}(D_w, ET_p) & (W_a \leq W_s) \\ G_{R_{\max}}(D_w, ET_p) \frac{W_c(D_w) - W_a}{W_c(D_w) - W_s(D_w)} & (W_s < W_a < W_c) \\ 0 & (W_a \geq W_c) \end{cases} \tag{10}$$

$$D_p = W_i - W_{i+1} \quad (W_i > W_{FC}, W_i = at^b) \tag{11}$$

其中
$$W_c = a_1 D_w^{b_1} \tag{12}$$

$$W_s = \begin{cases} a_2 D_w^{b_2} & (D_w \leq 3) \\ 240 & (D_w > 3) \end{cases} \tag{13}$$

$$G_{R_{\max}} = \begin{cases} kET_p & (D_w \leq D_{wc}) \\ a_4 D_w^{b_4} & (D_w > D_{wc}) \end{cases} \tag{14}$$

$$D_{wc} = \begin{cases} a_3 ET_p + b_3 & (ET_p \leq 4) \\ 1.4 & (ET_p > 4) \end{cases} \tag{15}$$

式中 $C_{R_{\max}}$ ——根区底部最大向上通量
 D_w ——地下水埋深, m

D_{wc} ——地下水临界埋深
 ET_p ——作物潜在腾发量
 W_a ——土壤实际储水量 b ——衰减系数
 W_c ——根层临界储水量
 W_s ——根层稳定储水量
 W_{FC} ——根层田间持水量根层实际土壤储水量
 a ——土壤储水分量,介于田间持水量和饱和含水率之间
 t ——灌溉、降水后储水量大于田间储水能力的天数
 $a_1、a_2、a_3、a_4、b_1、b_2、b_3、b_4$ 参数值见表 2。详细计算过程见文献[21]。

表 2 地下水补给计算采用的参数

Tab.2 Parameters of capillary rise parametric equations

参数	a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3	a_4	b_4
数值	385	-0.17	320	-0.27	-1.3	6.6	4.6	-0.65

2 结果与分析

2.1 蒸散发融合结果验证

2.1.1 点尺度验证

图 2 为玉米、小麦和向日葵融合后的蒸散发与水量平衡蒸散发育期内变化过程,两者变化过程较吻合,其中小麦耗水峰值出现在 6 月中下旬—7 月初,玉米和向日葵峰值出现在 7 月份。由图 3 散点图可以看出,不同作物生育期蒸散发与地面点数据散点分布于 1:1 线两侧,玉米、小麦和向日葵的决定系数 R^2 分别达到了 0.85、0.79 和 0.82;生育期内,玉米(5—10 月份)、小麦(4—7 月份)和向日葵(6—10 月份)融合和水量平衡计算的蒸散发的均方根误差 RMSE 均不高于 0.70 mm/d,平均绝对误差 MAD 均不高于 0.75 mm/d,相对误差 RE 均不高于 16%。基于 ESTARFM 融合算法生成的高分辨率 ET 结果可靠,在点尺度上具有较好的融合精度。

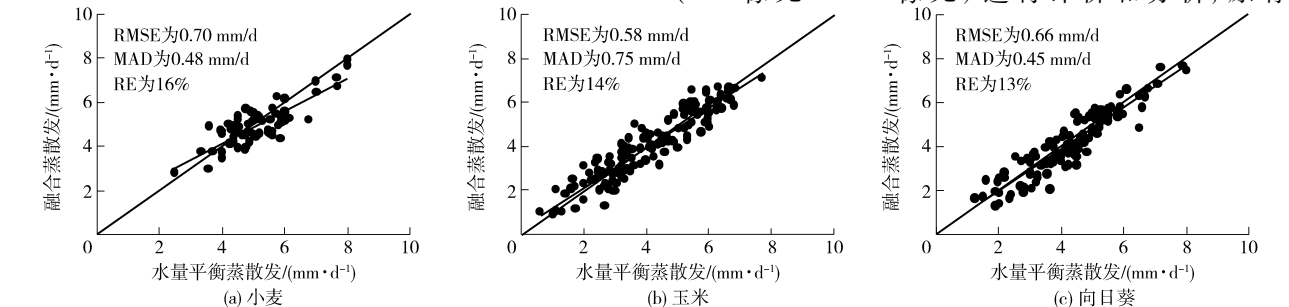


图 3 不同作物水量平衡和融合蒸散发对比

Fig.3 Comparison of evapotranspiration from water balance and data fusion

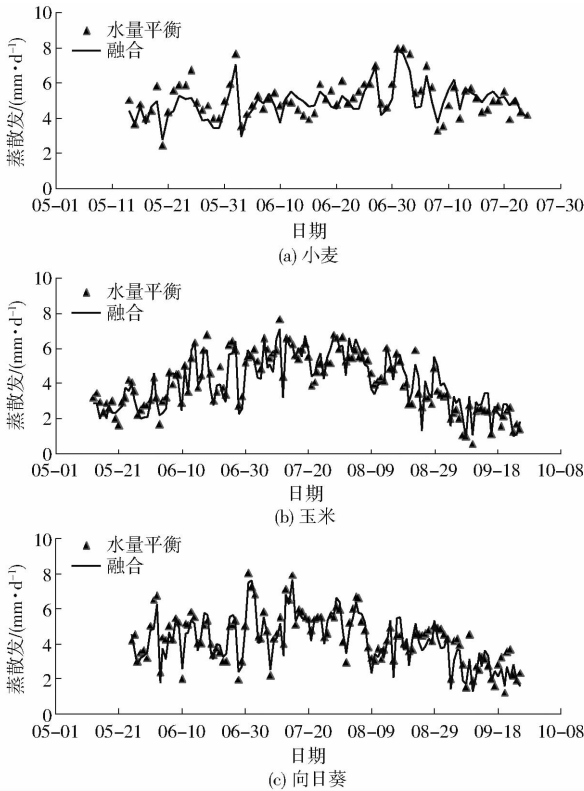


图 2 不同作物蒸散发变化过程的水量平衡和融合结果对比

Fig.2 Comparison of evapotranspiration processes from water balance and data fusion

2.1.2 融合蒸散发总量验证

对区域农田融合蒸散发总量的验证采用 YANG 等^[18]区域水量平衡计算方法,其中灌排数据和地下水数据来源于河套灌区解放闸灌域。图 4 为两者相关性分析结果,其散点均匀分布在 1:1 线两侧,两者决定系数 R^2 达到了 0.64,说明两者一致性较好。

2.1.3 融合结果与 Landsat 蒸散发空间对比

通过 ESTARFM 算法分别对多年 Landsat 和 MODIS 蒸散发(2000、2002、2005、2008、2010、2014、2015 年)进行融合。受篇幅限制,文中选取 2015 年 7 月 23 日、8 月 24 日和 9 月 1 日研究区域融合结果(400 像元 × 400 像元)进行评价和分析,原有

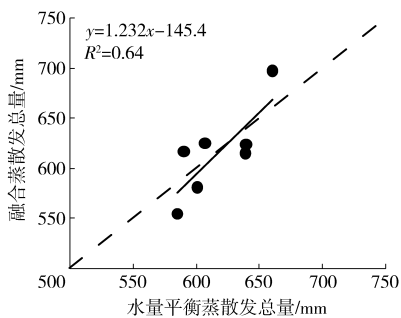


图4 区域水量平衡蒸发与融合蒸发总量对比

Fig. 4 Comparison of total evapotranspiration from water balance and data fusion

Landsat 蒸散发和融合蒸散发影像见图5。融合蒸散发所用影像按照时间就近原则,根据2015年研究区域过境Landsat和MODIS影像质量和有无云覆盖情况,7月23日融合结果由Landsat 6月5日、

8月24日蒸散发和MODIS 6月5日、7月23日、8月24日蒸散发5景影像共同预测生成;8月24日融合结果由Landsat 7月23日、9月1日蒸散发和MODIS 7月23日、8月24日和9月1日蒸散发共同预测生成;9月1日融合结果由Landsat 8月24日、9月25日蒸散发和MODIS 8月24日、9月1日和9月25日蒸散发共同预测生成。

从图5可以看出,融合结果的空间差异性和分布与Landsat蒸散发影像一致,在30 m尺度上能够反映出空间差异,其中高灰度代表高蒸散发值,表明该区域植被覆盖较密;低灰度代表低蒸散发值,表明该区域为裸地或稀疏植被覆盖,如城镇、乡村等区域。同时可以看出,在地物交汇处的预测结果局部出现模糊现象,这是由于地物类型混杂,下垫面破碎程度高,导致融合结果质量下降。

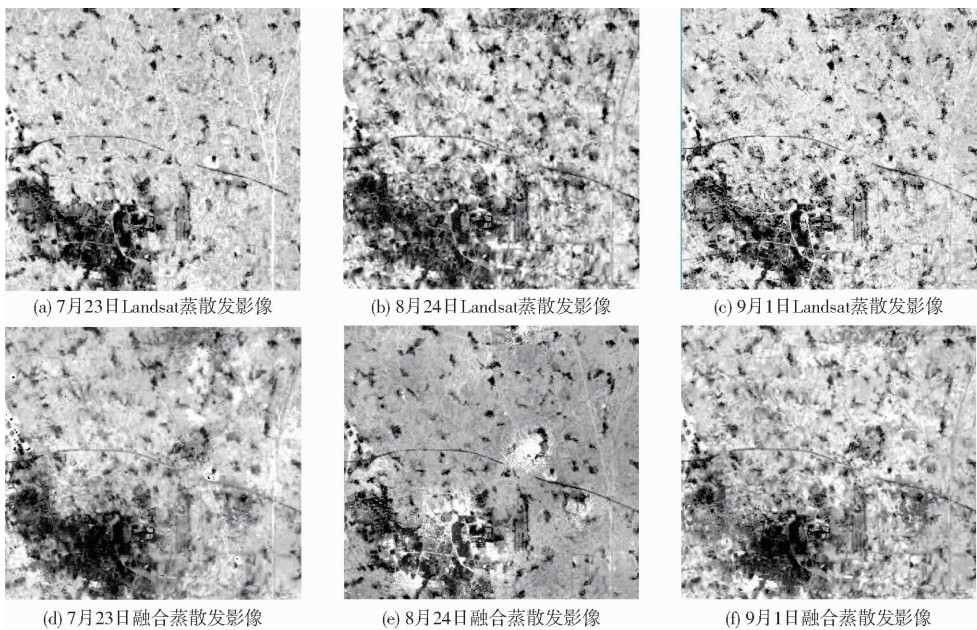


图5 Landsat 蒸散发与融合蒸散发影像

Fig. 5 Images of evapotranspiration from Landsat and fusion

图6为融合结果与Landsat蒸散发相关性,其散点分布在1:1线附近,7月23日、8月24日和9月1日相关系数 r 分别达到0.85、0.81和0.77。由图7知,7月23日蒸散发差值均值 μ 和标准偏差 σ 分别为0.24 mm和0.81 mm;8月24日蒸散发差值均值 μ 和标准偏差 σ 分别为0.19 mm和0.72 mm;9月1日蒸散发差值均值 μ 和标准偏差 σ 分为0.22 mm和0.61 mm。总体上看,融合结果良好。

2.2 融合蒸散发在农田耗水中的应

2.2.1 基于融合的主要作物耗水量差异

研究区域种植结构的提取同样采用融合方法对MODIS归一化植被指数进行降尺度,根据植被参数时间序列的差异,获取田块尺度植被信息^[22]。

在此基础上,对不同作物年际耗水量进行提取。为更好区别不同作物耗水量之间的差异,将整个研究时段按照不同作物生育阶段分为生育期和非生育期。表3为不同作物生育期和非生育期年际耗水量变化,可以看出不同作物生育期和非生育期年均耗水量差别较大。生育期内套种(4—10月份)耗水量最大,达到637 mm,玉米(5—10月份)和向日葵(6—10月份)次之,分别为598 mm和502 mm,小麦(4—7月份)最低为412 mm。非生育期内,小麦(8—10月份)耗水量最大,年均达到214 mm,玉米(4月份)和向日葵(4—5月份)分别为42 mm和128 mm。但4—10月份作物多年平均耗水量差异较小。

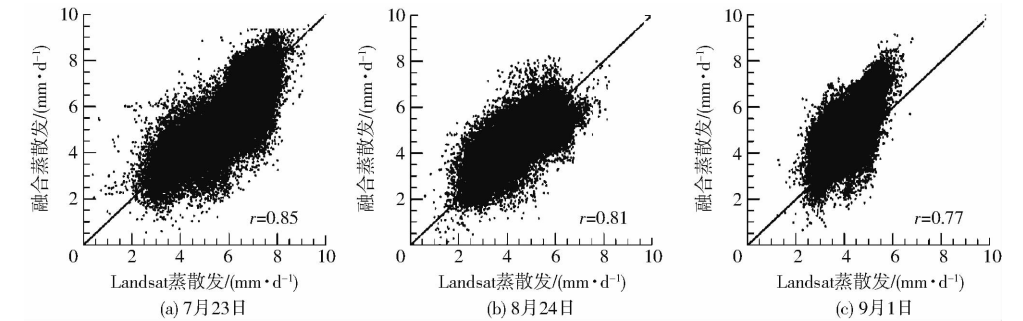


图 6 Landsat 与融合蒸散发相关性

Fig. 6 Correlation of evapotranspiration from Landsat and fusion

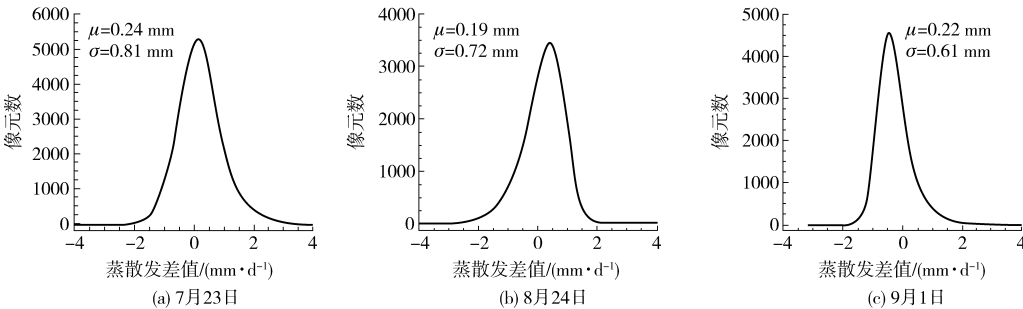


图 7 Landsat 与融合蒸散发差值分布曲线

Fig. 7 Distribution curves of evapotranspiration difference from Landsat and fusion

表 3 生育期和非生育期内不同作物耗水量年际变化

Tab. 3 Interannual variation of water consumption for different crops during growth and non-growth periods										mm			
年份	生育期				非生育期				4—10 月份				
	小麦	玉米	向日葵	套种	小麦	玉米	向日葵	套种	小麦	玉米	向日葵	套种	
2000	427	630	527	647	219	32	129	0	646	662	656	647	
2002	400	608	496	623	221	34	116	0	621	642	612	623	
2005	426	604	505	640	211	40	135	0	637	644	640	640	
2008	377	541	457	576	201	43	119	0	578	584	576	576	
2010	413	621	519	641	197	27	114	0	610	648	633	641	
2014	407	602	495	657	236	61	155	0	643	663	650	657	
2015	431	579	512	675	212	55	125	0	643	634	637	675	
平均值	412	598	502	637	214	42	128	0	625	640	629	637	

2.2.2 基于融合的作物耗水总量变化

表 4 为不同作物 4—10 月份耗水量占比年际变化,其中玉米耗水量逐年上升,由 2000 年的 6% (0.54 亿 m³) 上升到 2015 年的 31% (2.79 亿 m³);向日葵耗水量由下降变为上升趋势,由 2000 年的 17% (1.53 亿 m³) 增至 2015 年的 28% (2.58 亿 m³);近年来,套种模式耗水量急剧减少,由 2000 年的 31% (2.86 亿 m³) 减少到 2015 年的 3% (0.31 亿 m³);小麦耗水量占比较小,维持在 10% 以内;其他作物总耗水量有所减少,由 2000 年的 41% (3.78 亿 m³) 减少到 2015 年的 28% (2.59 亿 m³)。根据多年作物种植面积^[20]可知,作物耗水量年际变化主要由作物种植面积的改变引起。

2.3 讨论

ESTARFM 算法可有效对空间地表参数进行降尺度,但由于云雨天气的影响,使得遥感影像序列并

非等间隔 (Landsat 系列) 或每日间隔 (MODIS),融合结果的质量不可避免地受到就近影像选择的影响。在时间间隔较长时段内地物发生剧烈变化,如果影像并不能有效捕捉到地物变化特征,则融合结果将会偏离实际情况。

融合算法在窗口内搜索与中心像元相似的像元时,复杂下垫面情况和混合像元的存在使得在选取相似像元时不可避免出现误判现象。如将地表类型进行分类后再融合,均匀下垫面条件下融合结果将会得到改善。

融合结果的优劣除依赖于算法本身参数外,与所融合的数据质量也有很大关系。相对于较低级别的地表特征数据,高级别的地表产品往往需要较多的参数,加大了数据本身质量控制的难易程度。高级产品数据的质量对融合的精度将产生直接的影响。

表 4 不同作物耗水量年际变化

Tab.4 Interannual variation of water consumption for different crops

年份	小麦		玉米		向日葵		套种		其他	
	蒸散发量/亿 m ³	占比/%	蒸散发量/亿 m ³	占比/%	蒸散发量/亿 m ³	占比/%	蒸散发量/亿 m ³	占比/%	蒸散发量/亿 m ³	占比/%
2000	0.46	5	0.54	6	1.53	17	2.86	31	3.78	41
2002	0.35	4	1.10	13	0.89	10	2.82	33	3.56	41
2005	0.53	6	0.96	11	0.34	4	2.38	26	4.82	53
2008	0.59	7	1.63	20	0.32	4	1.60	20	4.15	51
2010	0.96	10	2.42	25	1.77	18	2.34	24	2.28	23
2014	0.37	4	2.87	34	1.75	20	0.99	12	3.07	36
2015	0.51	6	2.79	31	2.58	28	0.31	3	2.59	28

3 结 论

(1)不同作物融合蒸散发与水量平衡蒸散发变化过程较吻合,玉米、小麦和向日葵决定系数 R^2 分别达到了 0.85、0.79 和 0.82;均方根误差均不高于 0.70 mm/d;相对误差均不高于 16%。在区域农田耗水总量验证中,融合蒸散发与水量平衡蒸散发相一致,两者决定系数达到了 0.64。

(2)融合结果与 Landsat 蒸散发在空间纹理信息和空间差异性上一致。7 月 23 日、8 月 24 日和

9 月 1 日相关系数分别达到 0.85、0.81 和 0.77。差值均值分别为 0.24 mm、0.19 mm 和 0.22 mm;标准偏差分别为 0.81 mm、0.72 mm 和 0.61 mm,融合结果良好。

(3)ESTARFM 融合算法在农田耗水空间降尺度得到较好的应用,可有效区分不同作物耗水量之间的差异。在各作物不同生育期和非生育期内,作物耗水量差异明显,但由于 4—10 月份不同作物平均耗水量差异不大,其年际耗水总量主要随不同作物种植面积的改变而变化。

参 考 文 献

1 GOWDA P H, CHAVEZ J L, COLAIZZI P D, et al. ET mapping for agricultural water management: present status and challenges [J]. Irrigation Science, 2008, 26(3): 223 – 237.

2 LEI H M, YAND 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 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. 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.

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. (in Chinese)

4 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(11):2610 – 2623.

5 CARPER W J, LILLES T M, KIEFER R W. The use of intensity-hue-saturation transformations for merging SPOT panchromatic and multispectral image data [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1990, 56(4):459 – 467.

6 SHETTIGARA V K. A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multispectral images using a higher resolution data set [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1992, 58(5):561 – 567.

7 YOCKY D A. Multiresolution wavelet decomposition image merger of Landsat Thematic Mapper and SPOT panchromatic data [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1996, 62(9):1067 – 1074.

8 GAO F, MASEK J, SCHWALLER M, et al. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: predicting daily Landsat surface reflectance [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(8):2207 – 2218.

9 CAMMALLERI C, ANDERSON M C, GAO F, et al. A data fusion approach for mapping daily evapotranspiration at field scale [J]. Water Resource Research, 2013, 49(1): 1 – 15.

10 CAMMALLERI C, ANDERSON M C, GAO F, et al. Mapping daily evapotranspiration at field scales over rainfed and irrigated agricultural areas using remote sensing data fusion [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 186: 1 – 11.

11 HIKER T, WULDER M A, COOPS N C, et al. A new data fusion model for high spatial- and temporal-resolution mapping of forest based on Landsat and MODIS [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(8):1613 – 1627.

12 ROY D P, JU J, LEWIS P, et al. Muti-temporal MODIS-Landsat data fusion for relative radiometric normalization, gap filling, and prediction of Landsat data [J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(6):3112 – 3130.

13 屈忠义,杨晓,黄永江. 内蒙古河套灌区节水工程改造效果分析与评估[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(4):70 – 76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150412&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.012.

- QU Zhongyi, YANG Xiao, HUANG Yongjiang. Analysis and assessment of water-saving project of Hetao irrigation district in Inner Mongolia [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 70–76. (in Chinese)
- 14 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.
- 15 张娜, 屈忠义, 杨晓, 等. 贝叶斯模型在土壤转换函数中的应用与适应性评价[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 149–155. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140225&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.025.
- ZHANG Na, QU Zhongyi, YANG Xiao, et al. Application and adaptability evaluation of Bayesian model in soil transfer functions [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 149–155. (in Chinese)
- 16 茆伟伟. 基于分布式水温模型的灌区用水效率评价[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.
- CHI Weiwei. Water use performance for irrigation area based on distributed hydrological model [D]. Beijing: China Institute of Water Resource and Hydropower Research, 2013. (in Chinese)
- 17 蔡甲冰, 刘钰, 白亮亮, 等. 低功耗经济型区域墒情实时监测系[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 88–94.
- CAI Jiabing, LIU Yu, BAI Liangliang, et al. Low-cost and low-power dissipation system to monitor soil water status in real time for areal irrigation management [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 88–94. (in Chinese)
- 18 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: 112–122.
- 19 BRUTSAERT W. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies [J]. Water Resources Research, 1975, 11(5): 742–744.
- 20 CHOUDHURY B J, MONTEITH J L. A four-layers model for the heat budget of homogeneous land surfaces [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1988, 114(480): 373–398.
- 21 LIU Y, PEREIRA L S, FEMANDO R M. Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation [J]. Agricultural Water Management, 2006, 84(1–2): 27–40.
- 22 白亮亮, 蔡甲冰, 刘钰, 等. 灌区种植结构时空变化及其与地下水相关性分析[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 47(9): 202–211. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160929&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.029.
- BAI Liangliang, CAI Jiabing, LIU Yu, et al. Temporal and spatial variation of crop planting structure and its correlation analysis with groundwater in large irrigation area [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 202–211. (in Chinese)

(上接第 275 页)

- 21 左武, 金保昇, 黄亚继, 等. 分级冷凝回收城市污泥热解油[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2013, 43(1): 125–129.
- ZUO Wu, JIN Baosheng, HUANG Yaji, et al. Pyrolysis oil retrieving from sewage sludge by fractional condensation [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2013, 43(1): 125–129. (in Chinese)
- 22 张志强, 姜翠玉, 宋林花, 等. 苯乙烯-顺酐共聚物的合成优化及其降黏效果[J]. 化学工业与工程, 2012, 29(2): 9–14.
- ZHANG Zhiqiang, JIANG Cuiyu, SONG Linhua, et al. Synthesis of styrene maleic anhydride copolymer and its effect on viscosity reduction [J]. Chemical Industry and Engineering, 2012, 29(2): 9–14. (in Chinese)
- 23 龙潭. 生物质热解气冷凝及生物油燃烧的实验研究与数学模拟[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- LONG Tan. Experimental research and mathematical simulation of biomass pyrolysis condensation and bio-oil combustion [D]. Hefei: University of Science & Technology China, 2014. (in Chinese)
- 24 王明峰, 蒋恩臣, 李伯松, 等. 稻壳连续热解特性研究[J]. 太阳能学报, 2012, 33(1): 168–172.
- WANG Mingfeng, JIANG Enchen, LI Bosong, et al. Study on continuous pyrolysis of rice husk [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2012, 33(1): 168–172. (in Chinese)
- 25 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 370–420.
- 26 蒋恩臣, 郭信辉, 王明峰, 等. 木屑热解挥发物冷凝特性及实验研究[J]. 可再生能源, 2015, 33(11): 1712–1716.
- JIANG Enchen, GUO Xinhui, WANG Mingfeng, et al. Condensation characteristics and experimental research of sawdust pyrolysis volatiles [J]. Renewable Energy, 2015, 33(11): 1712–1716. (in Chinese)
- 27 蒋恩臣, 郭信辉, 王明峰, 等. 油茶壳连续热解挥发物冷凝特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 206–210. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150929&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.029.
- JIANG Enchen, GUO Xinhui, WANG Mingfeng, et al. Condensation characteristic of continuous pyrolysis volatiles of oil-tea camellia shell [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 206–210. (in Chinese)
- 28 钟理, 伍钦, 马四朋. 化工原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 135–212.
- 29 程文龙, 陈静, 陶应东, 等. 基于连续热力学修正算法的生物油热物性研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(2): 312–317.
- CHENG Wenlong, CHEN Jing, TAO Yingdong, et al. Research of bio-oil thermal properties based on the modified method of continuous thermodynamics [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2013, 34(2): 312–317. (in Chinese)