



## MODIS 蒸散模型在攀西烟区的适用性验证

徐同庆<sup>1,2</sup>, 徐宜民<sup>1</sup>, 王程栋<sup>1</sup>, 周立新<sup>3</sup>, 王松峰<sup>1</sup>, 王树声<sup>1</sup>, 陶健<sup>1</sup>

1 中国农业科学院烟草研究所, 青岛 266101;

2 中国农业科学院研究生院, 北京 100081;

3 湖南中烟工业有限责任公司, 长沙 410014

**摘要:** 准确估算区域生态系统蒸散量 (ET), 对研究区域水资源利用时空变化特征、评估气候变化的影响具有重要意义。基于 2016 年 1~10 月 MODIS 遥感数据, 利用 MODIS 蒸散量估算模型, 结合气象数据对攀西烟区典型烟田生态系统 ET 进行模拟, 并根据田间通量观测数据对模型模拟结果进行精度检验和参数化调整, 以验证和提高 MODIS 蒸散量模型在攀西烟区的适用性。结果表明: 采用默认参数的 MODIS 蒸散量模型模拟值比实测值偏小 12.8%, 效率系数为 0.767, 且在烤烟生育期前期 (DOY 105~161) 平均相对误差较大。依据田间通量观测数据, 对模型中叶片边界层阻抗和叶面积指数 (LAI) 进行参数化后, ET 模拟值与实测值动态曲线非常一致, 一元线性回归斜率为 0.997, 决定系数  $R^2$  为 0.835, 效率系数为 0.808。经独立性验证, 参数校正后的 MODIS 蒸散量模型在研究区具有较好的适用性, 为进一步利用该模型对攀西及西南烟区烟田水热收支平衡研究提供理论依据与数据支持。

**关键词:** MODIS-ET 模型; 蒸散; 通量观测; 攀西烟区

**引用本文:** 徐同庆, 徐宜民, 王程栋, 等. MODIS 蒸散模型在攀西烟区的适用性验证 [J]. 中国烟草学报, 2017, 23 (6)

生态系统蒸散量 (evapotranspiration, ET) 包括叶片蒸腾、冠层蒸发和土壤蒸发三部分<sup>[1]</sup>, 是陆地生态系统水文交换的重要过程, 也是维系地表能量平衡的关键环节<sup>[2-3]</sup>。在气候变化背景下, 准确估算区域生态系统 ET, 对于生态系统需水和耗水规律的把握、干旱灾害的监测、合理灌水措施的制定具有重要意义<sup>[4-5]</sup>。传统的 ET 研究手段 (如蒸发皿蒸发法、涡度相关技术、蒸渗仪) 多适用于小尺度的研究<sup>[6-7]</sup>, 而对于区域生态系统 ET 的估算目前较多的采用遥感技术<sup>[8]</sup>。基于遥感技术研究区域 ET 的模型较多, 代表性的模型有 VITT 模型<sup>[9]</sup>、SEBAL 模型<sup>[10]</sup>、三角形模型<sup>[11]</sup>、MODIS-ET 模型<sup>[4]</sup>等。其中, MODIS-ET 模型由于具有更好的适应性, 而在大尺度生态系统 ET 的研究中得到更多的应用<sup>[8]</sup>。Zhang 等基于 MODIS-ET 数据产品对农田 ET 的季节和年际变化特征进行了研究<sup>[12]</sup>; 位贺杰等利用 MODIS-ET 数据分析了渭河流域 ET 的时空变化特征<sup>[8]</sup>; 莫兴国等通过

MODIS-ET 模型对华北平原 ET 的格局及其对气候变化的响应进行了分析<sup>[13]</sup>。

虽然 MODIS-ET 模型在不同的地区具有很好的适应性, 但生态系统 ET 受气温、降水、地形、辐射、植被类型等诸多非生物和生物因素的影响而存在显著的空间分布差异, 从而增加了不同生态区尤其是生态环境复杂区准确模拟生态系统 ET 的难度<sup>[13-14]</sup>。因此, 受 MODIS-ET 模型输入参数多源性和环境因素的干扰, ET 模拟值与实测值往往存在一定的差异<sup>[15]</sup>。涡度相关通量观测系统 (eddy correlation system) 作为生态系统水热收支平衡长期观测研究的重要手段, 一方面为从生态系统尺度上把握植被水热循环规律及蒸腾、蒸发水平研究提供了可靠的数据, 另一方面为遥感模型在区域生态系统上的适用性验证提供了参照依据<sup>[16]</sup>。

因此本研究基于遥感数据和气象数据, 通过 MODIS-ET 模型对攀枝花和西昌烟区 (简称“攀西烟

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41501054); 中国农业科学院烟草研究所青年科学基金项目 (2015A02); 中国农业科学院科技创新工程 (ASTIP-TRIC03)

**作者简介:** 徐同庆 (1993—), 在读研究生, 主要研究方向: 生态系统生产力与水分利用效率, Tel: 0532-66715598, Email: xutongqing2015@163.com

**通讯作者:** 陶健 (1983—), Tel: 0532-66715598, Email: taojian\_ecology@163.com

**收稿日期:** 2017-03-06; **网络出版日期:** 2017-10-19

区”)典型烟田生态系统 ET 进行模拟,并依据田间涡度相关通量观测数据对模型模拟值进行初步验证,最后经过参数化过程提高该模型在研究区的适用性,从而为攀西烟区以及整个西南地区烟田水热收支平衡及水分利用效率研究提供数据基础。

## 1 材料与计算方法

### 1.1 研究站点概况

攀西烟区地处南亚热带季风气候区,干湿季明显,是中国典型的烤烟适宜生态区之一,烟叶风格以“清甜香”而独具区域特色<sup>[17]</sup>。中国农业科学院烟草研究所西南基地位于四川省凉山州西昌市(27°49'N, 102°22'E, 海拔 1700m),地处安宁河平原腹地,该地区受印度洋西南季风和东南内陆干旱季风的影响,具有干湿季分明的气候特点,其生态条件在整个攀西地区具有典型代表性。区域内多年平均气温 17.0℃,年均降水量为 1013.1mm,属于半湿润气候区。但降水的季节分布不均,5~10 月降水相对集中,占区域年降水量的 92.8%,11~4 月份降水量极少,易发生春旱。此外,由于海拔较高、风速大,土壤水分蒸发严重,且以 3~5 月蒸发量所占比例较高。区域内土壤多为酸性红壤和紫色土,农田以水田为主,农作物种植结构较复杂,试验站周围主要以烤烟/大蒜轮作一年两熟制为主。

研究时间段内,试验站周围烤烟于 4 月中旬移栽(DOY105),7 月上旬打顶(DOY 193),9 月下旬采收结束(DOY 267)。烤烟大田生育期内气温、降水、光照等气象因素均达到区域内多年平均水平,无极端天气的发生;烤烟长势及土壤肥力状况在区域内也具有典型性;栽培管理措施按照区域内烟田常规技术进行。

### 1.2 数据的选取

本研究所使用的数据包括遥感数据和地面观测数据两部分,其中,遥感数据为 MODIS 每 8d 光合有效辐射吸收比率(FPAR)数据和叶面积指数(LAI)数据,地面观测数据通过试验站安装的微气象、通量观测系统及 AccuPAR LP-80 手持式植物冠层分析仪获得。微气象站可以实时对试验站附近气温、降水、净辐射、饱和水汽压差(VPD)等气象数据进行观测,通量观测系统可以获得研究区水汽通量数据,并在线计算获得 ET。AccuPAR LP-80 手持式植物冠层分析仪可以对烟田光合有效辐射(PAR)和 LAI 进行测量。

本研究以 2016 年 1 月~10 月(DOY 1~289)遥感数据和地面观测数据作为 MODIS-ET 模型的

输入项,以相应时间通量观测 ET 数据为参照,对 MODIS-ET 模型<sup>[18]</sup>进行参数化和初步验证,以 2015 年 8 月~10 月(DOY223~289)气象和遥感数据对参数化后的 MODIS-ET 模型在研究区的适应性与精度进行进一步检验,为应用该模型对攀西地区烟田水热收支平衡研究提供理论与数据支持。

### 1.3 MODIS-ET 模型简介

MODIS-ET<sup>[17]</sup>模型将陆地生态系统 ET 分为土壤蒸发、植物冠层拦截水分的蒸发及叶片气孔蒸腾三部分。研究区日均空气湿度(RH)小于 70%,根据 Fisher 等<sup>[19,20]</sup>提出的 ET 模型,在实际计算中可以忽略冠层拦截水分蒸发,因此文中所估算的 ET 由植物蒸腾和土壤蒸发两部分构成。

$$ET = ET_{trans} + ET_{soil} \quad (1)$$

式中,  $ET_{trans}$  表示植物蒸腾,  $ET_{soil}$  表示土壤蒸发。

#### 1.3.1 植物蒸腾

植物蒸腾( $ET_{trans}$ ,  $W/m^2$ )估算方程为:

$$ET_{trans} = \frac{S \times A_c \times F_c + \rho \times C_p \times VPD \times \frac{F_c}{r_a}}{\left[ S + \gamma \times \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right] \times \lambda} \quad (2)$$

式中,  $S$  为饱和水汽压与气温( $T_a$ , °C)拟合曲线在某一温度时的斜率(Pa/K),  $A_c$  ( $W/m^2$ )为光照有效能( $A$ ,  $W/m^2$ ) 在冠层的分配值,  $F_c$  为植被覆盖度(%),  $\rho$  为空气密度( $kg/m^3$ ),  $C_p$  为空气比热容( $J/kg/K$ ),  $VPD$  为饱和水汽压差(Pa),  $r_a$  为空气动力学阻抗( $s/m$ ),  $\gamma$  为干湿表常数(Pa/K),  $r_s$  为冠层阻抗( $s/m$ ),  $\lambda$  表示 1kg 水由液态变为气态所需要的能量(约为 245400J)。饱和水汽压与温度的曲线斜率  $S$  (Pa/°C)计算公式为<sup>[17]</sup>:

$$S = \frac{4098 \times \left[ 610.8 \times \exp\left(\frac{17.27 \times T_a}{T_a + 237.3}\right) \right]}{(T_a + 237.3)^2} \quad (3)$$

光照有效能在冠层的分配值  $A_c$  ( $W/m^2$ ) 计算公式为<sup>[18]</sup>:

$$A_c = F_c \times A \quad (4)$$

式中, 植被覆盖度  $F_c = FPAR$ ; 光照有效能  $A$  为光合净辐射  $R_{net}$  ( $W/m^2$ )。

干湿表常数  $\gamma$  (Pa/K) 计算公式为<sup>[21]</sup>:

$$\gamma = \frac{1005.0 \times P}{622.0 \times (2500.0 - 2.4 \times T_a)} \quad (5)$$

式中,  $P$  为站点气压(Pa)由站点海拔(Elev)计算得到:

$$P = 101325.0 \times \left( 1.0 - \frac{0.0065 \times Elev}{288.15} \right)^{\frac{9.80665}{0.0065 \times \frac{8.3143}{28.9644e-3}}} \quad (6)$$

冠层阻抗  $r_s$  ( $s/m$ ) 计算公式为:

$$r_s = \frac{1}{C_c} \quad (7)$$

式中,  $C_c$  (m/s) 为冠层导度, 其计算公式为:

$$C_c = \frac{gl\_sh \times (0.007 \times m(T_{min}) \times m(VPD) \times r_{corr} + 0.0001 \times r_{corr})}{(0.007 \times m(T_{min}) \times m(VPD) \times r_{corr}) + gl\_sh + 0.0001 \times r_{corr}} \times LAI \quad (8)$$

$$m(VPD) = \begin{cases} \frac{1.0}{3850} & VPD \leq 650Pa \\ \frac{4500 - VPD}{3850} & 650Pa < VPD < 4500Pa \\ 0.1 & VPD \geq 4500Pa \end{cases} \quad (9)$$

$$m(T_{min}) = \begin{cases} 0.1 & T_{min} \leq -8.00^\circ C \\ \frac{T_{min} + 8.00}{20.02} & -8.00^\circ C < T_{min} < 12.02^\circ C \\ 1.0 & T_{min} \geq 12.02^\circ C \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $gl\_sh$  为叶片边界层阻抗;  $T_{min}$  为日最低气温 ( $^\circ C$ ),  $VPD$  为日均  $VPD$  (Pa)。

$$r_{corr} = \frac{1.0}{\frac{101300}{P} \times \left(\frac{T_a + 273.15}{293.15}\right)^{1.75}} \quad (11)$$

空气动力学阻抗  $r_a$  (s/m) 计算公式为:

$$r_a = \frac{\frac{rh \times \rho \times C_p}{2.268 \times 10^{-7} \times T_a^3}}{rh + \frac{\rho \times C_p}{2.268 \times 10^{-7} \times T_a^3}} \quad (12)$$

式中,  $rh$  表示对流平行阻抗, 其取值与叶尺度边界层导度 ( $gl\_bl$ , m/s) 有关, 而叶尺度边界层导度的取值近似等于叶片边界层阻抗的取值:

$$rh = \frac{1.0}{gl\_bl} \quad (13)$$

### 1.3.2 土壤蒸发

土壤蒸发 ( $ET_{soil}$ ,  $W/m^2$ ) 估算方程为:

$$ET_{soil} = \frac{\lambda E_{soil\_pot} \times \left(\frac{RH}{100}\right)^{VPD/200}}{\lambda} \quad (14)$$

式中,  $\lambda E_{soil\_pot}$  ( $W/m^2$ ) 为土壤潜热蒸发, 其计算方法为<sup>[19,22]</sup>:

$$\lambda E_{soil\_pot} = \frac{S \times A_{soil} + \rho \times C_p \times VPD \times \frac{1 - F_c}{r_{as}}}{S + \gamma \times \left(1 + \frac{r_{tot}}{r_{as}}\right)} \quad (15)$$

式中,  $A_{soil}$  ( $W/m^2$ ) 为  $A$  在土壤表面的分配值,  $r_{as}$  (s/m) 为土壤表面空气动力学阻抗,  $r_{tot}$  (s/m) 为水汽运输总空气动力学阻抗。  $A_{soil}$  计算公式为:

$$A_{soil} = (1 - F_c) \times A - G \quad (16)$$

式中,  $G$  ( $W/m^2$ ) 为土壤热通量, 其计算公式为:

$$G = (4.73 \times T_a - 20.87) \times (1 - F_c) \quad (17)$$

$r_{as}$  和  $r_{tot}$  具体计算方法如下<sup>[23]</sup>:

$$r_{as} = \frac{r_{tot} \times \frac{\rho \times C_p}{2.268 \times 10^{-7} \times T_a^3}}{r_{tot} + \frac{\rho \times C_p}{2.268 \times 10^{-7} \times T_a^3}} \quad (18)$$

$$r_{tot} = \frac{r_{totc}}{\frac{101300}{P} \times \left(\frac{T_a + 273.15}{293.15}\right)^{1.75}} \quad (19)$$

$$r_{totc} = \begin{cases} 50 & VPD \leq 650Pa \\ 50 - \frac{(50 - 20) \times (4500 - VPD)}{(4500 - 650)} & 650Pa < VPD < 4500 \\ 20 & VPD \geq 4500Pa \end{cases} \quad (20)$$

## 1.4 模型模拟效果的验证

模型模拟结果的适应性验证是大尺度生态系统相关模型研究及推广的基础和重要环节, 本研究主要通过 MODIS-ET 模型模拟值与地面实际观测值的时间动态曲线的一致性对模型在研究区烟田生态系统的适用性进行评价, 同时结合最小二乘法所计算实测值与模拟值的一元线性回归斜率、决定系数 ( $R^2$ )、效率系数 (NS) 及平均误差对模型模拟效果进行验证。其中效率系数 NS 的计算公式为<sup>[24]</sup>:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (21)$$

式中,  $O_i$  和  $M_i$  分别为研究区烟田生态系统第  $i$  天的 ET 地面实际观测值与 MODIS-ET 模型模拟值,  $\bar{O}$  为研究时间段内 ET 地面实际观测值的平均值。效率系数 NS 越接近于 1, 说明模型模拟值与实测值之间的差异越小, 模型模拟效果越好。

## 2 结果分析

### 2.1 MODIS-ET 模型默认参数模拟结果验证

采用 MU 等<sup>[18]</sup> 在 MODIS-ET 模型中对农田生态系统 ET 估算的相关默认参数取值, 对研究区烟田 ET 进行模拟后, 与田间实测值进行精度检验, 结果如图 1 所示。由图 1a 可知, 采用默认参数 MODIS-ET 模型 ET 模拟值与观测值相比, 一元线性回归斜率为 0.872, 决定系数  $R^2=0.832$ , 效率系数  $NS=0.767$ , 平均误差为 0.169, 说明 ET 模拟值与观测值相关性显著, 但模拟值偏低。

进一步对比两者在整个研究时段的变化特征 (图 1b) 可以发现, ET 模拟值与观测值变化趋势整体一致, 基本反映了烟田 ET 的季节变化特征。但是, 在整个研究时段内, 模拟值与观测值的平均相对误差为 0.169, 其中, 烤烟生育期前期 (DOY 105~161) 平均相对误差最大, 为 0.258, 成熟采收期 (DOY 201~257) 平均相对误差较小, 为 0.121。

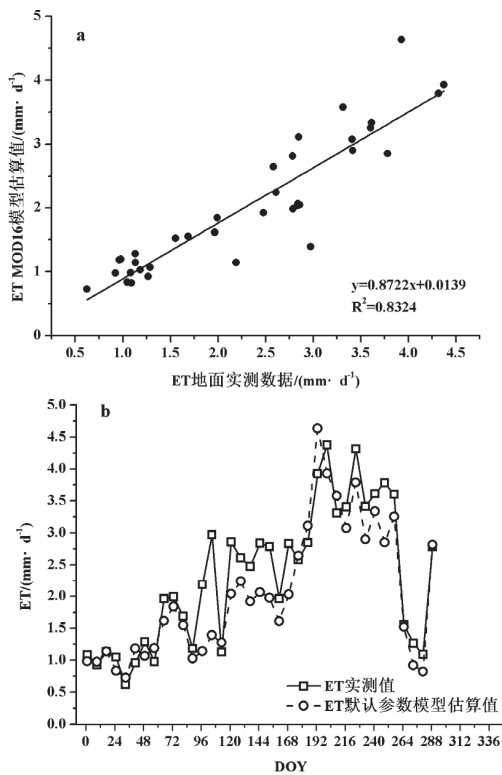


图 1 MODIS-ET 模型默认参数模拟值与观测值比较

Fig. 1 Comparison of MODIS-ET model simulated values with defaulted parameters against field flux observations

表 1 叶片边界层阻抗参数化调整下 MODIS-ET 模型模拟效率比较

Tab.1 Comparison on simulation efficiency of MODIS-ET model in parameterizing process of leaf boundary layer impedance

| 叶片边界层阻抗取值 / (m/s) | 一元线性回归斜率 | 决定系数  | 效率系数  | 平均相对误差 |
|-------------------|----------|-------|-------|--------|
| 0.01              | 0.772    | 0.836 | 0.584 | 0.220  |
| 0.02 (默认值)        | 0.872    | 0.832 | 0.767 | 0.169  |
| 0.04              | 0.929    | 0.837 | 0.786 | 0.152  |
| 0.08              | 1.247    | 0.792 | 0.630 | 0.316  |

### 2.2.2 叶面积指数参数化

冠层阻抗是 MODIS-ET 模型中的另一个重要参数,冠层阻抗偏高会显著降低 ET 的模拟估算值<sup>[25]</sup>。MODIS-ET 模型在计算冠层阻抗时将其定义为冠层导度的倒数,由冠层导度的计算公式可知,冠层导度主要受 LAI 的影响。在模拟过程中,如果 LAI 输入数据比观测值偏大,会导致冠层导度高于观测值,冠层阻抗比观测值偏小,ET 模拟值偏大;反之,模型中 LAI 输入

## 2.2 MODIS-ET 模型参数化

### 2.2.1 叶片边界层阻抗参数化

前人研究指出,MODIS-ET 模型中的默认参数在区域尺度研究中的不适用性是导致模拟值与观测值存在偏差的关键因素<sup>[11,17]</sup>。其中,空气动力学阻抗的取值是影响 MODIS-ET 模型模拟值与观测值产生偏差的重要因素,空气动力学阻抗的计算又直接与叶片边界层阻抗的取值有关<sup>[4,9,11,17]</sup>。因此,本研究参照 Mu 等<sup>[18]</sup>提出的农田生态系统叶片边界层阻抗取值范围,对 MODIS-ET 模型进行参数化校正,通过对比调整叶片边界层阻抗取值后的模拟精度,选定适用于与研究区烟田生态系统的叶片边界层阻抗取值,分析结果如表 1 所示。

从表中可以看出,叶片边界层阻抗取值为 0.04m/s 时,研究时间段内研究区烟田 ET 模拟值与实测值差异最小,一元线性回归斜率为 0.929,决定系数提高到 0.837,效率系数提高到 0.786,平均相对误差下降至 0.152。表明叶片边界层阻抗的参数化调整能提高 MODIS-ET 模型在研究区的模拟精度。

数据小于观测值则会导致 ET 模拟值小于观测值。

MODIS-ET 模型中 LAI 数据为 MODIS/MOD15A2 产品,由于受到云层、降水等因素的干扰,该产品往往与观测值存在差异。由图 2 可知, LAI 遥感数据产品与观测值相比,一元线性回归斜率为 0.494,决定系数  $R^2=0.593$ ,效率系数为 0.475,平均相对误差为 0.394,说明研究区 MODIS/LAI 数据产品比观测值明显偏小。

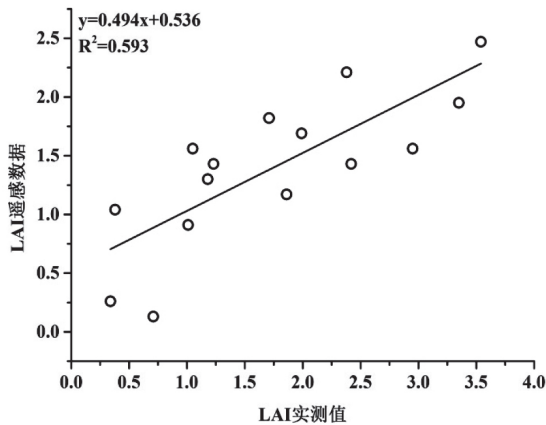


图 2 MODIS/LAI 数据产品与观测值比较

Fig.2 Comparison of MODIS/LAI dataset against field observation records

在叶片边界层阻抗参数化调整的基础上, 根据 LAI 遥感数据与观测值的统计结果, 对 MODIS/LAI 数据产品进行参数化, 参数后的 LAI 值与实测值及原始 MODIS/LAI 产品数据的比较结果如图 3 所示。从图中可以看出, 参数化后的 LAI 与实测值差异缩小, 平均相对误差降低到 0.160。

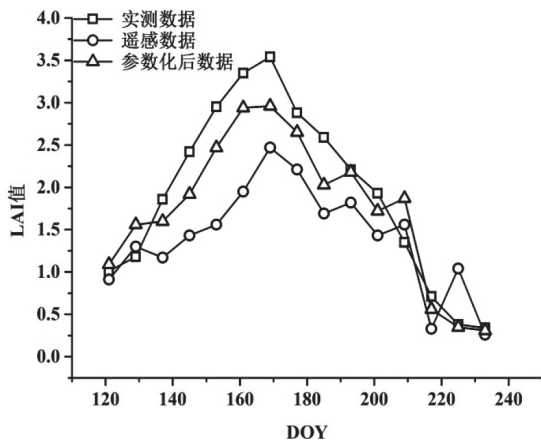


图 3 参数化调整后的 MODIS-LAI 数据与观测值

Fig.3 Comparison of MODIS-LAI values after parameterization against field observations

将参数化后的 LAI 值输入到 MODIS-ET 模型计算公式中, 调整后的 MODIS-ET 模型模拟值与观测值的比较结果如图 4 所示。由图 4a 可知, MODIS-ET 模型模拟值与观测值相比, 一元线性回归斜率为 0.997, 决定系数  $R^2=0.835$ , 效率系数为 0.808, 平均误差为 0.117, ET 模拟值与观测值已基本一致。从研究时段内 ET 模拟值与观测值的动态变化曲线来看(图 4b), 进一步参数化后的模拟值与观测值的变化趋势基本吻合, 同时解决了默认参数模拟值在烤烟生育期

前期偏低的问题。

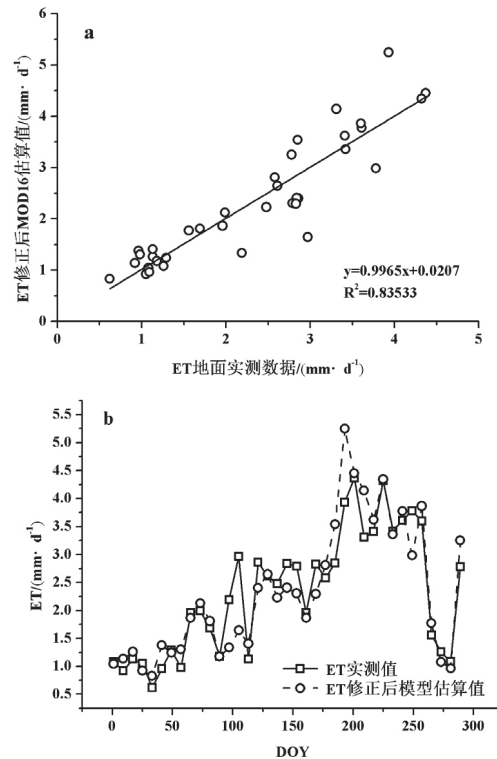
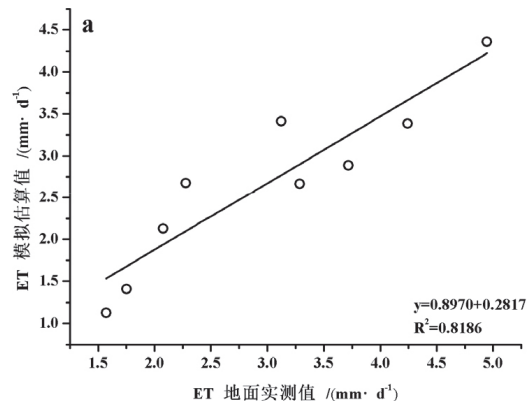


图 4 参数化调整后 MODIS-ET 模型模拟值与观测值

Fig.4 Comparison of MODIS-ET model simulated values after parameterization against field flux observations

### 2.3 参数化后的 MODIS-ET 模型适应性验证

利用研究区烟田 2015 年 8 月~10 月气象和遥感数据对参数化后的 MODIS-ET 模型进行独立验证, 验证结果如图 5 所示。从图中可以看出, ET 地面实测值与参数化后的 MODIS-ET 模型模拟值相比, 一元线性回归斜率为 0.8970, 决定系数  $R^2=0.8970$ , 效率系数  $NS=0.7808$ , 平均误差为 0.1700, ET 实测值与模拟值整体变化趋势及数值大小差异较小, 说明参数化后的模型在不同年份间也具有较好的适应性。



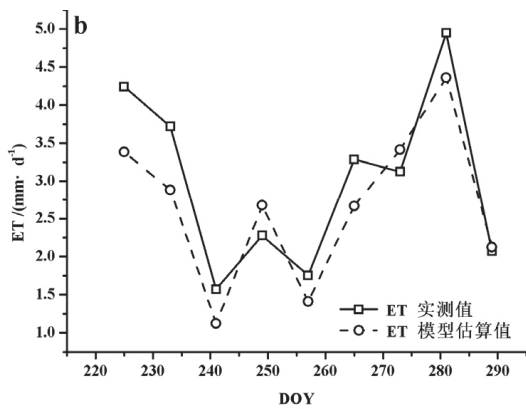


图5 参数化后的MODIS-ET模型独立验证结果

Fig.5 Independent verification results of parameterized MODIS-ET model

### 3 讨论

#### 3.1 MODIS-ET模型参数化校正结果分析

本研究基于遥感数据、地面通量观测数据及微气象数据,依据一元线性回归斜率、决定系数、效率系数及平均相对误差对MODIS-ET模型模拟精度进行评价,并通过参数化校正,以提高该模型在区域烟田生态系统ET模拟中的适用性。

前人研究指出,生物物理模型的模拟值与观测值的效率系数大于0.8是衡量该模型模拟效果的一个标准<sup>[25]</sup>。本研究中,采用默认参数的MODIS-ET模型对研究区ET模拟的效率系数为0.767。对模型进行参数化后,效率系数提升到0.808,模型模拟的精度提升,参数化后的模拟值与观测值基本吻合,证明了该模型在研究区应用的适用性和精确性。

研究中发现,使用默认参数的模型对研究区烟田ET进行模拟时,模拟值与观测值相比偏小,尤其是在烤烟生育期前期差异更明显。ZHANG等<sup>[12]</sup>通过对不同站点的MODIS数据与通量观测数据进行比较指出,天气、植物构成、地表参数等都会影响模型的模拟效果。本研究中,试验站与周围农田相连,作物种植结构以稻烟混作为主。研究区周围水稻5月上旬插秧,5~7月份水稻处于分蘖期和拔节孕穗期,在相同的观测时间,稻田LAI与烟田相比偏小。研究中所采用的MODIS遥感数据的尺度为1km,因此在模拟过程中,可能受到烟田周围作物的影响而使整个区域的LAI估算值偏小,从而降低模型在烤烟生育期前期的模拟精度。此外,本研究采用轮作期和烤烟大田生育期数据对模型进行检验,一定程度上增加了模型模拟值与实测值的误差大小,但是提高了MODIS-

ET模型在研究区烟田生态系统的验证效果,增加了模型的适用性。总的来看,在依据前人研究和地面观测数据的基础上,对模型进行参数化后,修正了生物和非生物因素的影响,提高了模型模拟精度,但由于西南地区环境的复杂性,如果以此为代表对整个西南地区进行反演仍需要更多的试验点数据的支持和进一步的验证。

#### 3.2 MODIS-ET模型参数敏感性分析

MODIS-ET模型在模拟过程中,不同的参数对模型模拟结果的影响存在敏感性差异。前人研究指出,空气动力学阻抗、冠层阻抗和植被覆盖度是MODIS-ET模型模拟过程中的三个重要参数<sup>[10,17,26]</sup>。LAI和FPAR来源于MODIS/MOD15A2产品,LAI不仅是冠层阻抗的关键影响因素,还直接决定FPAR值。模型中植被覆盖度直接用FPAR来表示,因此MODIS/FPAR值与观测值的偏差,会通过植被覆盖度影响群体冠层与土壤能量的分配比例,进而影响ET模拟值的大小。

对MODIS-ET模型中空气动力学阻抗、冠层阻抗和FPAR分别进行参数化调整,其余参数保持不变,分析三者对MODIS-ET模型中的敏感性差异。由表2可知,MODIS-ET模型在模拟过程中,FPAR的敏感性最强,对ET模拟值的影响最大。FPAR上调10%和下调10%,其对应的模拟值与观测值一元线性回归斜率变化范围为0.791~0.953,效率系数范围为0.655~0.804。空气动力学阻抗的变化对ET模拟值的影响相对较小,敏感性相对较弱,其上、下调10%对应的模拟值与观测值一元线性回归斜率变化范围为0.855~0.890,效率系数范围为0.757~0.774。总体看来,空气动力学阻抗和冠层阻抗参数化与ET模拟精度变化呈负相关,FPAR参数化则与ET模拟精度变化呈正相关。

### 4 结论

本研究以2016年1月~10月每8天遥感数据和气象数据作为MODIS-ET模型的输入参数,依据通量观测ET数据,对MODIS-ET模型在攀西烟田的适应性进行评价,并通过参数化提高该模型在研究区烟田ET模拟中的准确度和适用性,主要结论如下:

(1) 采用默认参数的MODIS-ET模型模拟值与观测值相比,模拟值偏小12.78%,决定系数 $R^2=0.872$ ,效率系数为0.767,平均误差为0.169,其中烤烟生育期前期差异最显著。

表 2 MODIS-ET 模型参数敏感性分析  
Tab.2 Sensitivity analysis on parameters in MODIS-ET model

| 参数            | 调整方向 | 一元线性回归斜率 | 决定系数  | 效率系数  | 平均误差  |
|---------------|------|----------|-------|-------|-------|
| 空气动力学阻抗 (s/m) | +10% | 0.855    | 0.841 | 0.757 | 0.172 |
|               | -10% | 0.890    | 0.833 | 0.774 | 0.167 |
| 冠层阻抗 (s/m)    | +10% | 0.812    | 0.833 | 0.679 | 0.197 |
|               | -10% | 0.943    | 0.839 | 0.815 | 0.149 |
| FPAR (%)      | +10% | 0.953    | 0.833 | 0.804 | 0.150 |
|               | -10% | 0.791    | 0.834 | 0.655 | 0.205 |
| 原始 MOD16 算法   |      | 0.872    | 0.837 | 0.767 | 0.169 |

注：“+”表示取值增加；“-”表示取值减少。

(2) 对 MODIS-ET 模型中叶片边界层阻抗和 LAI 进行参数化调整后, 模型模拟值与观测值基本吻合, 研究时段内两者的动态变化曲线接近一致, 一元线性回归斜率为 0.997, 决定系数  $R^2$  为 0.835, 效率系数为 0.808, 平均误差为 0.117, 表明该模型在经过参数化后, 在攀西烟区具有较好的适用性。

(3) 基于参数化后的 MODIS-ET 模型, 在准确获得地面气象输入数据 (气温、降水、净辐射、VPD) 的基础上, 能够实现对研究区烟田生态系统 ET 的准确模拟, 为研究区烟田水分管理提供数据支持。

#### 参考文献

- [1] CHAHINE MT. The hydrological cycle and its influence on climate [J]. 1992, 359(6394): 373-80.
- [2] WANG K, DICKINSON RE. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability [J]. Reviews of Geophysics, 2012, 50(2): RG2005.
- [3] JUNG M, REICHSTEIN M, CIAIS P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply [J]. Nature, 2010, 467(7318): 951.
- [4] 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): 617-27. 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): 617-27.
- [5] MAHMOOD R, HUBBARD KG. Simulating sensitivity of soil moisture and evapotranspiration under heterogeneous soils and land uses [J]. Journal of Hydrology, 2003, 280(1-4): 72-90.
- [6] 闫人华, 熊黑钢, 张芳. 夏秋季绿洲-荒漠过渡带芨芨草地蒸散及能量平衡特征研究 [J]. 中国沙漠, 2013, 33(1): 133-40. YAN Renhua, XIONG Heigang, ZHANG Fang. The Evapotranspiration and energy budget of an achnatherum splendens grassland in the Oasis-desert Ecotone in Xinjiang, China, during Summer and Autumn [J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(1): 133-40.
- [7] 张淑兰, 于澎涛, 王彦辉, 等. 泾河上游流域实际蒸散量及其各组分的估算 [J]. 地理学报, 2011, 66(3): 385-95. ZHANG Shulan, YU Pengtao, WANG Yanhui, et al. Estimation of actual evapotranspiration and its component in the upstream of Jinghe Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(3): 385-95.
- [8] 位贺杰, 张艳芳, 朱妮, 等. 基于 MOD16 数据的渭河流域地表实际蒸散发时空特征 [J]. 中国沙漠, 2015, 35(2): 414-22. WEI Hejie, ZHANG Yanfang, ZHU Ni, et al. Spatial and temporal characteristic of ET in the Weihe River Basin based on MOD16 data [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(2): 414-22.
- [9] MORAN MS, RAHMAN AF, WASHBURNE JC, et al. Combining the Penman-Monteith equation with measurements of surface temperature and reflectance to estimate evaporation rates of semiarid grassland [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 1996, 80(2-4): 87-109.
- [10] BASTIAANSEN WGM, PELGRUM H, WANG J, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL).: Part 2: Validation [J]. Journal of Hydrology, 1998, 212(1-4): 213-29.
- [11] JIANG L, ISLAM S. A methodology for estimation of surface evapotranspiration over large areas using remote sensing observations [J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(26): 2773-6.
- [12] ZHANG Li, TIAN Jing, HE Honglin, et al. Evaluation of Water Use Efficiency Derived from MODIS Products against Eddy Variance Measurements in China [J]. remote sensing, 2015, 7: 11183-11201.
- [13] 莫兴国, 刘苏峡, 林忠辉, 等. 华北平原蒸散和 GPP 格局及其对气候波动的响应 [J]. 地理学报, 2011, 66(5): 589-98. MO Xingguo, LIU Suxia, LIN Zhonghui, et al. Patterns of evapotranspiration and GPP and their responses to climate variations over the North China Plain [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 589-98.
- [14] KALMA JD, MCVICAR TR, MCCABE MF. Estimating Land

- Surface Evaporation: A Review of Methods Using Remotely Sensed Surface Temperature Data[J]. *Surveys in Geophysics*, 2008, 29(4): 421-69.
- [15] 孙志刚, 王勤学, 欧阳竹, 等. MODIS 水汽通量估算方法在华北平原农田的适应性验证 [J]. *地理学报*, 2004, 59(1): 49-55.  
SUN Zhigang, WANG Qinxue, OU Yangzhu, et al. Validation of the feasibility of MOD16 algorithm for estimating crop field vapor flux in North China Plain [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(1): 49-55.
- [16] FALGE E, BALDOCCHI D, TENHUNEN J, et al. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2002, 113(1-4): 53-74.
- [17] 刘琰琰, 李海燕, 陈超, 等. 攀西地区烤烟气候适宜性评价指标建立及应用 [J]. *四川农业大学学报*, 2015, 3(33): 299-305.  
LIU Yanyan, LI Haiyan, CHEN Chao, et al. Establishment and application of climatic suitability indicator of flue-cured tobacco in Panxi region [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2015, 3(33): 299-305.
- [18] MU Q, ZHAO M, RUNNING SW. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(8): 1781-1800.
- [19] FISHER JB, TU KP, BALDOCCHI DD. Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 901-919.
- [20] MONTEITH JL. Evaporation and environment [J]. *Symposia of the society for experimental Biology*, 1965, 19(19): 205-234.
- [21] MAIDMENT DR. Handbook of hydrology [J]. *Earth-Science Reviews*, 1992, 24: 227-229.
- [22] BOUCHET RJ. Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique [J]. 1963, 62: 134-142.
- [23] CHOUDHURY BJ, DIGIROLAMO NE. A biophysical process-based estimate of global land surface evaporation using satellite and ancillary data I. Model description and comparison with observations [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 205(3-4): 164-185.
- [24] MORALES P, SYKES MTIC, SMITH P, et al. Comparing and evaluating process-based ecosystem model predictions of carbon and water fluxes in major European forest biomes [J]. *Global Change Biology*, 2006, 11(12): 2211-2233.
- [25] Baldocchi DD, Wilson KB. Modeling CO<sub>2</sub> and water vapor exchange of a temperate broadleaved forest across hourly to decadal time scales [J]. *Ecological Modelling*, 2001, 142: 155-184.
- [26] 顾婷婷, 周锁铨, 骆月珍, 等. 植被气孔阻抗对区域气候影响的数值试验 [J]. *气象科学*, 2011, 31(3): 290-297.  
GU Tingting, ZHOU Suoshuan, LUO Yuezheng, et al. Numerical experiments of stomatal resistance variation effects on regional climate [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2011, 31(3): 290-297.

## Validation of applicability of MODIS evapotranspiration simulation model to Panxi tobacco planting area

XU Tongqing<sup>1,2</sup>, XU Yimin<sup>1</sup>, WANG Chengdong<sup>1</sup>, ZHOU Lixin<sup>3</sup>, WANG Songfeng<sup>1</sup>, WANG Shusheng<sup>1</sup>, TAO Jian<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Tobacco Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Qingdao 266101, Shandong, China;

<sup>2</sup> Graduate School, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

<sup>3</sup> China Tobacco Hunan Industrial Co., Ltd. Changsha 410014, China

**Abstract:** Estimating ecosystem evapotranspiration (ET) using model simulation is of great significance to study regionally spatiotemporal variation of water resources and to evaluate effects of climate change on water management. Based on MODIS-ET model, ecosystem ET in Panzhihua-Xichang (Pan-xi) tobacco planting area was simulated by using remote sensing data and meteorological data from January to October in 2016. The model was parameterized and validated by field flux observation data. Results showed that the ET values calculated by MODIS-ET model with defaulted parameters were about 12.8% lower than observation values. The efficiency coefficient was 0.767, and the average error in early growth period (DOY 105 ~ 161) was the highest. After parameterization on the basis of field observation data, the dynamic curve of ET was consistent with measured dynamic curve. The slope of linear regression was 0.997, and the efficiency coefficient was 0.808. These results proved that MODIS-ET model has efficient applicability after parameterization in the study area. The study could provide an applicable ET dataset to support study on water and heat balance in Pan-xi tobacco planting area.

**Keywords:** MODIS-ET model; evapotranspiration; flux observation; Pan-xi tobacco planting area

**Citation:** XU Tongqing, XU Yimin, WANG Chengdong, et al. Validation of applicability of MODIS evapotranspiration simulation model to Panxi tobacco planting area [J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2017, 23(6)