刘斌, 谢正辉, 刘双, 等. 2018. 基于 EC 观测估算最小冠层阻力分布及其在潜热通量插补中的应用 [J]. 大气科学, 42 (6): 1235–1244. Liu Bin, Xie Zhenghui, Liu Shuang, et al. 2018. Estimation of minimum canopy resistance by EC data and its application in the interpolation of latent heat flux [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (6): 1235–1244, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1711.17179.

## 基于 EC 观测估算最小冠层阻力分布及其在 潜热通量插补中的应用

刘斌 1,2 谢正辉 1,2 刘双 1,2 李锐超 1,2

- 1中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京100029
- 2 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 准确估计水热通量对于认识和理解地气交换与水循环变化过程具有重要意义。利用 Penman-Monteith (P-M)模型计算季节尺度水热通量变化的不确定性很大程度上依赖于与冠层变化相关的最小冠层阻力参数,但模型中通常将其设为定值。为此,本文基于多年通量观测采用分段与整体相结合的迭代算法拟合出最小冠层阻力的季节分布。以湖南省宁乡通量观测站为例,针对 2012~2015 年观测拟合计算最小冠层阻力的季节分布曲线,并利用 2016 年通量数据进行独立数据验证。结果表明:最小冠层阻力曲线具有鲜明夏低冬高的季节变化特征;利用拟合的具有季节分布的最小冠层阻力改进潜热通量计算,独立数据验证表明其该方法的合理性;相比于原阻力方案得出的潜热模拟结果,其在相关系数、均方根误差和一致性指数都有改进;此外,将该估计方法应用于水热通量的数据插补,较常规统计插补方法,其插补稳定性不随连续缺失数据的增加而降低,而且还能通过模型的微分误差分析量化由于数据输入带来的插补不确定性,在保持通量数据完整性的同时也为数据应用场景提供科学依据。

关键词 Penman-Monteith 模型 最小冠层阻力 潜热通量 数据插补

文章编号 1006-9895(2018)06-1235-10

中图分类号 P413

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1711.17179

# Estimation of Minimum Canopy Resistance by EC Data and Its Application in the Interpolation of Latent Heat Flux

LIU Bin<sup>1, 2</sup>, XIE Zhenghui<sup>1, 2</sup>, LIU Shuang<sup>1, 2</sup>, and LI Ruichao<sup>1, 2</sup>

- 1 The State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
- 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract** Accurate latent heat flux estimation is important for land-atmosphere exchange and water cycle research. The seasonal uncertainty of latent heat flux simulation by Penman-Monteith equation is caused by the minimum canopy resistance, which varies with various canopy conditions but is often set to a fixed value in present modeling studies. To solve the problem, the seasonal curve of the minimum canopy resistance is fitted based on an integral and piecewise

收稿日期 2017-06-13; 网络预出版日期 2017-11-16

作者简介 刘斌, 男, 1990年出生, 博士研究生, 主要从事陆面过程研究。E-mail: liubin@mail.iap.ac.cn

通讯作者 谢正辉, E-mail: zxie@lasg.iap.ac.cn

**资助项目** 国家自然科学基金项目 41575096、91125016,中国科学院前沿科学重点研究计划 QYZDY-SSW-DQC012

**Founded by** National Natural Science Foundation of China (Grants 41575096, 91125016), Key Research Program of Frontier Sciences, Chinese Academy of Sciences (Grant QYZDY-SSW-DQC012)

fitting method which velies on multi-year measurements of EC (Eddy Covariance) flux. The Ningxiang flux station is taken as an example. Flux data from 2012–2015 are used to fit the seasonal curve of the minimum canopy resistance, and data from 2016 is used to verify the simulated results. It is found that the minimum canopy resistance has a seasonal variation, which is lower in the summer and higher in the winter. The modified simulation shows better results by applying seasonally varying minimum canopy resistance. Also the correlation coefficient, root mean square error and agreement of index are better than those using the original canopy resistance scheme. The modified scheme is then used to interpolate the missing data. Results indicate that the modified scheme is more stable than the traditional interpolating method, and the uncertainty of the input data can be determined by the differential equation. This research is helpful to keep flux data complete, and to provide scientific basis for the data application.

**Keywords** Penman-Monteith model, Minimum canopy resistance, Latent heat flux, Data interpolation

## 1 引言

潜热通量改变影响大气过程,准确量化地表水 热通量对于认识与理解水循环演变、气候与水资源 变化过程具有重要意义。基于 Jarvis 冠层阻力方案 的 Penman-Monteith (P-M) 模型估计的潜热通量结 果(Jarvis, 1976)依赖于最小冠层阻力参数(Kumar et al., 2014), 它与冠层内部特性密切相关, 在常规 方法中将其设为定值的做法导致了模拟的不确定 性 (Chen and Dudhia, 2001; Douglas et al., 2009)。 刘春伟等(2016)模拟冬小麦潜热通量过程中发现 在生育后期潜热模拟值明显高估,原因在于该方案 忽略了最小冠层阻力的季节变化特征(Bie et al., 2015); Alfieri et al. (2008) 通过对最小冠层阻力的 估算指出其具有日变化及更长时间尺度的变化特 征,不能简单设为定值(Kumar et al., 2014)。同时, 敏感性研究表明定值方案的不足在陆地水循环模 拟研究中将对气候预估产生极大偏差(Alapaty et al., 1997; Cooter and Schwede, 2000)。为了规避最小冠 层阻力为定值的不足,通过分时段修正最小冠层阻 力值改善模拟性能,并在不同生育期小麦蒸散估计 应用中取得了较好效果(Fang et al., 2014; 陈志忠, 2016), 然而这种修正方案使最小冠层阻力值在生 育过渡期不连续,同时也没有合理刻画其在全生育 期中的季节分布特征。

本文利用多年高质量通量、气象(风速、温文、湿度和压强)及 MODIS 卫星的地表叶面积指数数据,反向利用 P-M 模型,采用整体和分段相结合的最小冠层阻力拟合迭代算法,将最小冠层阻力分布扩展至全年以表现其在全生育期的季节分布特征,弥补常规 Jarvis 阻力参数化中最小冠层阻力不随生育期变化的缺陷,进而改善潜热通量模拟,并以宁乡通量观测站为例进行验证。同时,值得关注的是受湍流瞬时

变化、大气层结状态、降水、电力故障和人为等因素潜热数据连续性和数据质量也存在不确定性(Jia et al., 2015),针对该站点涡度相关通量缺测问题,应用本文改进后的冠层阻力方案以模拟值插补缺测数据,为涡度相关潜热通量数据完整性提供新的方式。同时采用 P-M 模型模拟潜热通量还依赖其他通量及环境数据,为了定量评估数据输入误差对模拟精度的影响,本文对模型采用微分误差分析方法,以确定不同变量对潜热通量模拟的误差贡献。

## 2 研究方法

## 2.1 通量估计方法

P-M 模型:

$$\lambda E = \frac{\Delta (R_{\rm n} - G_{\rm 5} - S) + \rho \cdot c_p \cdot (e_{\rm s} - e) / r_{\rm a}}{\Delta + \gamma (1 + r_{\rm s} / r_{\rm s})}, \quad (1)$$

其中,  $\lambda E$  为潜热通量 (单位: W m<sup>-2</sup>);  $\rho$  为空气密 度(单位: kg m<sup>-3</sup>);  $c_p$  为空气比热(单位: J kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>); *e*<sub>s</sub> 为饱和水汽压(单位: Pa); *e* 为实 际水汽压(单位: Pa);  $R_n$  为净辐射(单位: W m<sup>-2</sup>);  $\Delta$  为饱和水汽压随温度变化率 (单位: Pa °C<sup>-1</sup>); γ 为干湿球常数;  $G_5$  为 5 cm 土壤热通量(单位: W  $m^{-2}$ ): 储热项 S 包含  $0\sim5$  cm 的土壤储热  $S_{soil}$  (单 位:  $W m^{-2}$ )、潜热储存  $S_{LE}$  (单位:  $W m^{-2}$ )、显热 储存  $S_{\rm H}$  (单位: W m<sup>-2</sup>) 和冠层储热  $S_{\rm canopy}$  (单位: W m<sup>-2</sup>),即  $S=S_{\text{soil}}+S_{\text{LE}}+S_{\text{H}}+S_{\text{canopy}}$ ,储热项详细 计算参见文献 (Meesters and Vugts, 1996); rs、ra 分别为冠层阻力和空气动力学阻力(单位:  $s m^{-1}$ )。 参数敏感性分析中已有研究表明 P-M 模型中冠层 阻力对模型模拟敏感性高于边界层阻力(Ortega-Farias et al., 2007; 李俊等, 2014), 这也表明了本 文通过改善冠层阻力方案提高模拟能力具有合 理性,本文不做过多赘述。通量估计流程如图 1

所示。

在通量估计流程中本文设计了整体与分段拟合相结合的迭代算法,发展了基于最小冠层阻力分布的阻力方案,从而改进了原始冠层阻力方案。这是本文有别于同类 P-M 模型最主要的方面,敏感性分析旨在表明冠层阻力对潜热模拟的重要性,参数率定采用最小二乘法以得到最优参数(Kişi, 2006)。

## (1) 最小冠层阻力分布拟合与参数估计

冠层阻力方案采用 Jarvis 冠层阻力模型 [公式(2)], 其表述为最小冠层阻力与环境因子胁迫函数的乘积形式; 叶面积、净辐射、水汽压差、空气温度和土壤湿度胁迫的参数化方案见公式(3)至(7), 本文为了兼顾参数连续性和模拟效果, 本文采用了新的最小冠层阻力拟合迭代算法, 基于整体参数拟合以保持与净辐射、水汽压差、空气温度和

土壤湿度相关的参数在全生育期的连续性;并借助分段参数拟合以限定最小冠层阻力的分布并且降低不同生育期的模拟误差。分段参数拟合以两个月为间隔,每个间隔期采用最小二乘非线性同时拟合得出每个间隔期的气象胁迫参数(叶面积、土壤湿度、水汽压差、温度)。根据公式(8),最小冠层阻力由分段和整体拟合相结合共同得到分布,它具体迭代流程见图2;并重复上述流程经过迭代以得到更好模拟效果,当前后两次迭代潜热模拟值变化小于阈值,或者模拟精度降低时迭代终止。

$$r_{\rm s} = r_0 \frac{1}{f(\text{LAI}) \cdot f(R_{\rm n}) \cdot f(\text{VPD}) \cdot f(T) \cdot f(\theta)},$$
 (2)

$$f(LAI) = \frac{LAI}{1 + 0.5LAI},$$
 (3)

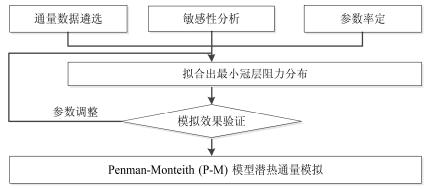


图 1 潜热通量估计流程图

Fig. 1 The flow chart of latent heat flux estimation

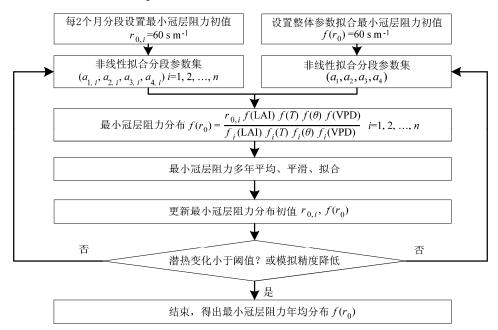


图 2 最小冠层阻力分布迭代流程图

Fig. 2 The flow chart of iterative method of the minimum canopy resistance

$$f(R_n) = 1 - e^{-R_n/a_1},$$
 (4)

$$f(p_{\text{VPD}}) = 1 - a_2 \cdot p_{\text{VPD}}, \tag{5}$$

$$f(T) = 1 - a_3 \cdot (28 - T)^2$$
, (6)

$$f(\theta) = a_4 \frac{\theta - \theta_1}{\theta_2 - \theta_1}. \tag{7}$$

其中, $r_0$  为最小冠层阻力(单位: s m<sup>-1</sup>),其表征 的是下垫面未受环境强迫状况时的冠层阻力;LAI 为叶面积指数; $R_n$  为净辐射(单位: W m<sup>-2</sup>); $p_{VPD}$  为水汽压差(单位: Pa);T 为空气温度(单位: °C); $\theta$  为土壤湿度; $\theta_u$ 、 $\theta_l$  分别为土壤湿度上下限; $a_1$  至  $a_4$  为净辐射、水汽压差、温度和土壤湿度的胁迫 参数。

$$f(r_0) = \frac{r_{0,i} f(\text{LAI}) f(R_n) f(p_{\text{VPD}}) f(T) f(\theta)}{f_i(\text{LAI}) f_i(R_n) f_i(p_{\text{VPD}}) f_i(T) f_i(\theta)}, \quad i = 1, 2 \cdots 6.$$
(8)

其中, $f(r_0)$ 为求得的最小冠层阻力分布; $r_{0,i}$ 为分段最小冠层阻力(分段初值设置为  $60 \text{ sm}^{-1}$ );f(LAI)、 $f(R_n)$ 、 $f(p_{\text{VPD}})$ 、f(T)、 $f(\theta)$ 分别为整体胁迫函数,其参数  $a_1 \cong a_4$ 取值为整体参数拟合结果; $f_i(\text{LAI})$ 、 $f_i(R_n)$ 、 $f_i(p_{\text{VPD}})$ 、 $f_i(T)$ 、 $f_i(\theta)$ 为分段胁迫函数,其参数取值  $a_{\text{L}i} \cong a_{4i}$ 为分段拟合出的参数结果。

参数  $a_1 \cong a_4$  初始、限制区间和拟合值见表 1。 基于迭代出的最小冠层阻力分布、气象及 MODIS 叶面积指数数据采用 P-M 模型计算潜热通量。其 中,2012~2015 年数据用于最小冠层阻力分布拟 合,2016 年数据用于独立验证。

表 1 参数初值及限制区间

Table 1 Initial parameters and their limitation ranges

参数	初值	限制区间	参数拟合值
$a_1$	500	[0,1000]	42.67
$a_2$	0.1	[0,1]	1.00
$a_3$	0.1	[0,1]	0.99
$a_4$	0.1	[0,3]	1.31

### (2) 高质量通量数据遴选

遴选高质量数据旨在为数据拟合年均最小冠层阻力分布及数据模拟及验证提供可靠性。文章采用潜热和显热阈值筛选、降雨时次剔除和基于湍流发展和平稳性的质量分级方案遴选宁乡通量观测站已有通量数据。根据局地特点,对潜热通量阈值设置为一50~60 W m<sup>-2</sup>,显热通量阈值设置为一100~60 W m<sup>-2</sup>;依照雨量筒数据按时次剔除降雨时段通量数据;基于 Foken and Wichura(1996)给出

的湍流发展性和湍流平稳性分级方案,选择"0级"(最优)通量数据。

## 2.2 评估方法

采用多个统计量用以评估模拟性能,包括相关系数(R)、均方根误差(RMSE)和一致性指数(IA)。相关性系数(R):

$$R = \frac{\sum_{n} \left(o - \overline{o}\right) \left(s - \overline{s}\right)}{\sqrt{\sum_{n} \left(o - \overline{o}\right)^{2} \sum_{n} \left(s - \overline{s}\right)^{2}}},$$
(9)

均方根误差 (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{n} (o - s)^2} , \qquad (10)$$

一致性指数 (IA):

IA = 
$$1 - \frac{\sum_{n} (s - o)^{2}}{\sum_{n} (|s - \bar{s}| + |o - \bar{o}|)^{2}}$$
, (11)

其中,o 为观测值,s 为模拟值,o 为观测均值,s 为模拟均值。

## 3 模型验证与应用

## 3.1 站点概况与数据

通量观测站位于湖南省宁乡县(28°20′N,112°34′E)属东亚季风区,海拔高度 110 m,年均温17.6°C,年降水 1458 mm。观测下垫面相对平坦均质以阔叶和针叶林为主,冠层高度约 7.5 m。该通量观测站连续通量观测始于 2012 年 8 月,对通量及气象观测达 4 a。

通量观测塔高 20 m, 距地 17.5 m 安装三维超声风速仪(CSAT3, Campbell 公司, USA)和红外气体分析仪(EC150, Campbell 公司, USA)监测三维风速及水汽和 CO2浓度,原始数据以 10 Hz 频率记录于 CR3000 数据采集器(Campbell 公司,USA)。同高度设置四分量辐射计(CNR4, Kipp & Zonen 公司,NL)同步观测净辐射。在观测塔 9.5 m和 13.5 m两个高度放置普通风速计和温湿度传感器同步观测风速和温湿度。塔顶安置雨量筒观测降水状况,塔下测量不同土壤深度(0.05 m、0.1 m、0.2 m、0.4 m、0.6 m、0.8 m、1 m)温湿度,并在地下 0.05 m深度放置土壤热通量板记录土壤热通量,上述数据以半小时间隔存储于 CR1000(Campbell 公司,USA)数据采集器。

选用 EddyPro 软件将原始涡度相关数据处理为

半小时的通量数据。先后经过仪器表征量剔除、5 倍方差异常值剔除、坐标旋转、频率损失订正、超声虚温订正和水汽浓度修正等质量控制(Lee et al., 2004)。通量数据  $R_n-G_5-S$  (净辐射、5cm 土壤热通量和储热项的差值)与 H+LE (显热和潜热之和)相关系数为 0.93,平均回归斜率 1.18;能量闭合度日均值为 0.52,略低于一般林地的能量闭合度,能量残差( $\delta=R_n-G_5-S-LE-H$ )日均范围为 2.44±21.9 W  $\mathrm{m}^{-2}$ 。

观测站点并无叶面积实测数据,故以宁乡通量站为中心,1 km 范围的 MODIS 叶面积反演数据代替。该数据时间间隔为 8 d,对每年的 3~11 月采用多项式拟合,1~2 月和 12 月采用数据插值得到叶面积的半小时变化数据(图 3)。本文数据采集过程中由于可规避的人为疏忽,导致部分净辐射、土壤热通量和储热项存在缺失。本文采用该站点CLDAS(中国气象局陆面数据同化系统)数据(Shiet al., 2014)以代替。而关于输入数据不确定性产生的模拟误差将在本文 3.4 节误差分析中阐述。

图 4 为宁乡通量观测站 2012 年 8 月至 2016 年 6 月通量观测数据质量比例的日均分布图;受仪器不确定性及人为失误的影响,缺测数据占比超过总量的 20%,降水期间的数据占比也较大。可用数据约为 50%左右,夜间受弱湍流影响占比更低,具有白天高夜间低的日变化特征。

## 3.2 通量估计和模型验证

经两次迭代终止,最小冠层阻力年均分布见图 5 其分布规律存在夏低、冬高的季节变化特征,其中春、秋季分别呈快速下降和上升趋势,变化区间在 20.8~90.1 s m<sup>-1</sup>,5 次多元回归拟合曲线如下:

$$y = -1.2 \times 10^{-9} x^5 + 1 \times 10^{-6} x^4 - 3.1 \times 10^{-4} x^3 + 0.037 x^2 - 1.6x + 85,$$
 (12)

其中, x 为日序, y 为年均最小冠层阻力。

以 2012~2016 年改进前后的模拟与实测潜热 通量数据的 1:1 线可知,改进后的模拟效果好于原模型方案(图 6)。基于最小冠层阻力分布的模拟值

与实测数据拟合回归系数由原来的 1.11 降低至 0.99。全天数据对比来看,原方案整体呈高估现象,改进后潜热通量高估现状有所缓减,白天数据对比亦是如此,同时改进后模型对夜间模拟效果也有一定改善。从绝对误差来看,改进前后全天误差分别为 36.74、35.60 W m<sup>-2</sup>,改进后模拟效果稍好于原始方案的模型。

改进后的各项统计量相比于原始方案也有一定程度提高(表 2),且白天模拟效果好于夜间。改进后整体数据的相关系数(R)为 0.86,均方根误差(RMSE)为 58.46,一致性指数(IA)0.91,而昼夜 R、RMSE和IA分别为 0.83、71.8、0.89(昼)和 0.1、28.62、0.26(夜)。2016年的独立数据验证也存在白天潜热通量模拟效果好于夜间现象,其中夜间受潜热通量量级小故 RMSE 较小,其他统计量数值上夜间小于白天表明夜间潜热通量模拟效果不如白天。误差水平来看,总体绝对误差在 50 W m<sup>-2</sup>左右,同样的是受量级影响白天绝对误差大于夜间。

对 2012~2016 年潜热通量日变化按照季节平 均后,对比改进前后模拟与实测(图7)可知,改 进后的模拟值能更好刻画潜热通量的夏高冬低的 季节变化特征,模拟值相比于实测潜热(春季到冬 季潜热实测依次为: 53.44、97.02、49.01、23.26 W m<sup>-2</sup>), 平均季节潜热模拟误差(春季到冬季平均 误差依次为: 11.85、13.01、21.67、12.75 W m<sup>-2</sup>) 小于原方案(春季到冬季平均误差依次为: 12.94、 17.27、22.49、12.76 W m<sup>-2</sup>), 其中秋季绝对误差较 大, 而夏季误差偏离程度相对较大。日平均的变化 趋势方面两者也非常相似,能表现潜热白天高夜间 低的日变化特征,较实测夏天的白天潜热模拟值略 高估而其他季节白天有低估现象。此外,对个别时 段分析也具有高估现象,主要集中在2013年夏季, 可能受当地骤旱影响导致模拟性能降低(Xie et al., 2016), 而 P-M 模型无法及时刻画短时气象要素骤 变对植被带来的负影响。年际模拟来看,2014和

表 2 改进前后模拟与实测的统计量

Table 2 Statistics of simulations and measurements

		*	相关系数 (R)		均方根误差(RMSE)			一致性指数(IA)		
		全天	昼	夜	全天	昼	夜	全天	昼	夜
2012~2015年	改进前	0.81	0.78	-0.13	62.01	76.00	31.26	0.89	0.86	-0.3
	改进后	0.86	0.83	0.1	58.46	71.80	28.65	0.91	0.89	0.26
2016年	改进前	0.77	0.76	-0.07	75.58	89.25	46.14	0.89	0.83	0.09
	改进后	0.84	0.77	0.20	70.22	88.93	17.99	0.90	0.83	0.17

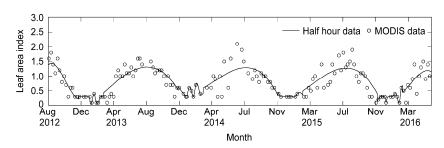


图 3 2012~2016 年叶面积指数变化图

Fig. 3 Leaf area index variation from 2012 to 2016

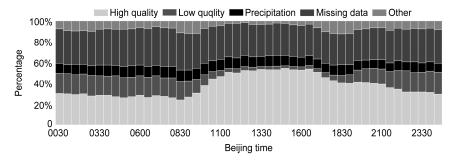


图 4 2012 年 8 月至 2016 年 6 月潜热通量数据质量比例的日均分布

Fig. 4 Average daily distribution of the quality percentage of latent heat flux from August 2012 to June 2016

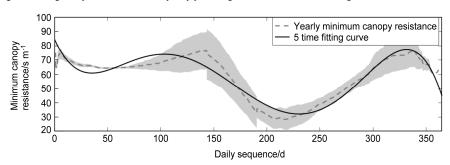


图 5 年均最小冠层阻力分布。虚线为年均最小冠层阻力,阴影区域为年均阻力标准差限范围,实线为拟合曲线

Fig. 5 Annual variation of the minimum canopy resistance. The dotted line is for annual minimum canopy resistance, the shaded region is for standard deviation of the minimum canopy resistance, the solid line indicates the fitting curve

2015 年模拟与实测绝对误差较低,且统计指标优异,表明具有好的模拟效果,2016 年独立数据验证平均误差稍大于 2013~2015 模拟期,但同样也表明具有较好效果。

### 3.3 缺失数据插补应用

应对站点潜热通量缺测问题,采用本文给出的最小冠层阻力分布方案,基于 P-M 模型模拟用于通量缺失数据插补。选取 2014 年 7 月 18 日至 8 月 7 日连续通量数据,此数据段较完整优质,分别验证单数据缺失和多数据连续缺失的插补性能,各插补方法见表 3。单数据缺失插补性能比较中,从数据段始末依次剔除单个数据,分析误差统计量来评估插补性能;多数据连续插补性能比较中,采用相似

方法,从数据段始末连续滑动删除多个数据,并对 比连续缺失数据的插补性能。

#### 表 3 插补方案描述

Table 3 Description of different interpolation methods

-					
方案描述					
采用包含缺失数据在内的相邻 11 个数据点 3 次					
样条差值,插补缺失数据					
基于单日数据,采用7次线性拟合通量日变化特					
征,缺失数据采用拟合值替代					
采用辐射与温度相近原则, 从已知数据中遴选最					
相近的数据以替代缺失数据					

本文方案插补单点及连续缺失数据方面都表现优异,与实测最为接近。从插补单点缺失数据性能对比来看(图8),非线性插值、日变化趋势插补

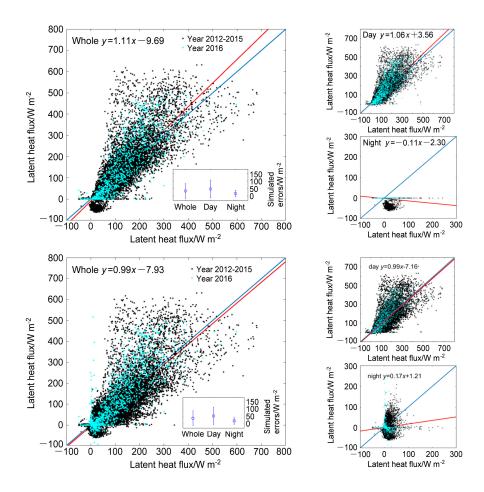


图 6 改进前后潜热通量实测与模拟值比较: (a) 原始模拟与实测 1:1 线; (b) 改进后模拟值与实测 1:1 线。红线为所有模拟值的回归线,蓝线为 1:1 线; 黑点为 2012~2015 年模拟点,蓝点为 2016 年数据验证点; whole、day、night 分别表示全天、白天和夜间

Fig. 6 Latent heat flux comparison between measurements and simulations: (a) 1:1 line diagram between raw simulated data and measured data; (b) 1:1 line diagram between corrected simulated data and measured data. The red line is for the regression line of all data, the blue line is for 1:1 line; black dots indicate simulated data 2012–2015 and blue dots indicate data verified in 2016; whole, day, night each represent the wole day, the daytime and nighttime

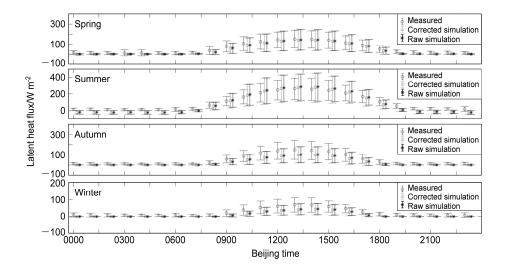


图 7 2012~2016 年潜热通量实测与模拟改进前后日变化的季节平均分布图

Fig. 7 Seasonally averaged daily variation diagrams of measured and simulated latent heat fluxes from 2012 to 2016

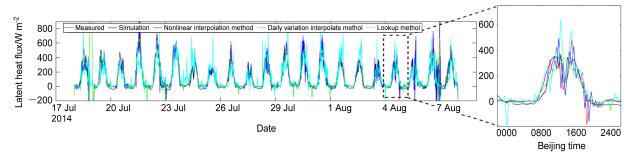


图 8 各插补方法时序比较

Fig. 8 Comparison between different interpolation methods

法、查表法与本文方案皆能有效捕捉潜热通量日变化特征,以 2014 年 8 月 4 日为例,单点插补都能表现当日潜热的双峰现象;查表法受样本数量限制,插补表现较为离散。四种方法插值误差统计见图 9。对比表明,各方法标准差都在 160 W m<sup>-2</sup> 附近,本文插补方案 RMSE 和 R 好于其他 3 种方法,相关系数达 0.93,RMSE 为 60.7 W m<sup>-2</sup>,单点缺失插补效果最优;日变化趋势插补法各统计量表现也较好,仅次于本文方法。

从连续缺失数据插补方面来看,本文方法优于 其他插补方案。连续缺失数据个数从 2 升至 8,各 统计量变化趋势见图 10。结果可知,本文方法和查 表法插补性能稳定,各统计量不随连续缺失数据的 改变而改变;而非线性插值和日变化随连续缺失数 据的增多,RMSE 增大,R 和 IA 呈快速下降趋势, 插补性能降低,且非线性插值法降低更明显。当连 续缺失点超过 2 个时,本方法插补效果皆保持最优; 当连续缺失点超 4 个时,查表法插补效果好于非线 性插值和日变化趋势插补法,但仍次于本文方法。

#### 3.4 数据不确定性分析

本文对潜热通量模拟及插补有赖于其他通量数据(包含净辐射、土壤热通量和土壤储热)及阻力项(冠层阻力和边界层阻力)数据,这些数据的不确定性会给潜热通量的模拟和插补带来不同程度的影响,同时,本文模型具有明确表达式,这里对 P-M 模型采用微分误差分析方法来预估输入数据的不确定性产生的误差贡献。具体方法如下:

分别对净辐射、土壤热通量、储热项、冠层阻力和边界层阻力求导(刘斌等,2015),并将结果中微分以差分形式代替,然后基于宁乡通量站的相关量级关系( $R\approx 2E_{\rm a}$ , $\Delta\approx 3\gamma$  , $r_{\rm a}\approx r_{\rm s}$  , $G_{\rm 5}\approx 0.005R_{\rm n}$  , $S\approx 0.18R_{\rm n}$  ,其中 $R=R_{\rm n}-G_{\rm 5}-S$  ,

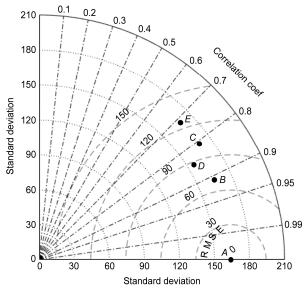


图 9 单点插补效果的泰勒图。A 至 E 分别代表实测、本文模拟方案、非线性插值法、日变化趋势插补法和查表法

Fig. 9 Taylor diagram of single-point data interpolation. *A–E* represent measured data, method in this paper, nonlinear interpolate method, daily variation interpolation method and lookup method, respectively

$$E_a = \frac{\rho \cdot c_p \cdot (e_s - e)}{\gamma \cdot r_a}$$
, 各变量含义同上),得出净辐射、土壤热通量、储热项和阻力项引起最大潜热相对误差如下:

$$\delta_{\text{input}}\Big|_{\text{max}} = 1.05 \left| \frac{\Delta R_{\text{n}}}{R_{\text{n}}} \right| + 0.05 \left| \frac{\Delta G_{\text{s}}}{G_{\text{s}}} \right| + 0.19 \left| \frac{\Delta S}{S} \right| + 0.25 \left| \frac{\Delta r_{\text{s}}}{r_{\text{s}}} \right| + 0.06 \left| \frac{\Delta r_{\text{a}}}{r_{\text{a}}} \right|.$$

$$(13)$$

潜热模拟误差来源与各输入分量息息相关,随各分项相对误差的增大而增大。若模型各分量相对误差相同时,数据输入项中的净辐射、冠层阻力、储热项、空气动力学阻力和土壤热通量对插补的潜热误差贡献依次降低,其贡献比例依次为 0.65、

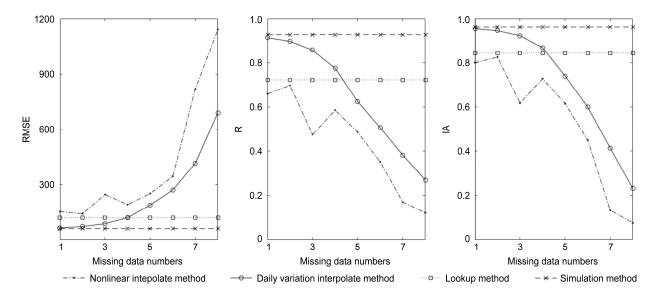


图 10 均方根误差(RMSE)、相关系数(R)和一致性系数(IA)随缺失数据的变化趋势

Fig. 10 Trends of RMSE (Root Mean Square Error), R (Correlation coefficient) and IA (Index of Agreement) with the increasing of missing data

0.16、0.12、0.04 和 0.03。净辐射的对潜热误差贡献最大,应尽量保持净辐射数据的连续性,数据替代的做法需要更加谨慎。此外,本文净辐射主要通过观测方法获得,在这里我们并不考虑仪器的观测误差。忽略净辐射对潜热通量的误差贡献后,冠层阻力对潜热误差贡献最大,其连续观测较难直接获得,且对模型有高敏感性(刘斌等,2014; Ershadi et al., 2015),故本文基于最小冠层阻力多年平均分布改善了冠层阻力的季节响应的做法是合理的。根据既有资料,土壤热通量影响较小,忽略土壤热通量对潜热通量误差影响不及储热项和边界层阻力项。

## 4 结论与讨论

本文遴选 2012~2015 年多年高质量潜热通量和气象数据,采用整体与分段相结合的拟合迭代算法,反向利用 P-M 模型拟合最小冠层阻力的季节分布,其呈夏低冬高的季节变化特征,变化范围在20.8~90.1 s m<sup>-1</sup>。

基于 Jarvis 冠层阻力方案中的最小冠层阻力年均分布曲线以规避其设为定值导致的模拟误差,通过比较 2016 年模拟与实测的相关系数、均方根误差和一致性指数,表明方法的合理性并能改进了潜热通量估计。并应用于宁乡通量观测站潜热通量缺失数据的插补,比较其与非线性插值法、日变化趋势插补法和查表法等统计方法插补效果,结果表明:就单点和连续缺失数据的插补效果而言,本方法表现皆优于统计方法,且连续缺失插补结果的稳

定性不随缺失数据个数的增加而降低。

利用微分误差分析方法量化输入数据对模拟 和插补结果的不确定性,误差估计表明:当模型各 输入分量相对误差相同时,净辐射、冠层阻力、储 热项、空气动力学阻力和土壤热通量对插补的潜热 误差贡献依次降低。

本文方法在模型应用和通量估计这两方面都 具有扩展性。模型应用方面,考虑了更多的潜热贡 献源,物理过程也更完善的双层模型(Shuttleworth and Wallace, 1985) 和多源模型 (Mu et al., 2011), 在采用 Javis 阻力参数化方案过程中仍涉及到最小 冠层阻力为定值的问题,可借助本文方法改进其模 拟性能;通量估计方面,基于潜热通量的插补结果 及波文比关系本方法可应用于显热通量估计(Irmak et al., 2014), 但也还需关注的是, 受潜热插补和波 文比观测双重不确定性影响, 显热通量估计效果会 弱于潜热。此外,本研究还面临着一些不足,一方 面,本文最小冠层阻力分布曲线是基于单个通量站 点拟合得到, 受观测时长限制及下垫面代表性的限 制,该曲线在其他站点应用还存在不确定性;另一 方面,本文改进的阻力方案是基于统计分布而未考 虑植被生理过程,未来可在最小冠层阻力分布的过 程表述中进行更深入研究。

#### 参考文献 (References)

Alapaty K, Pleim J E, Raman S, et al. 1997. Simulation of atmospheric boundary layer processes using local-and nonlocal-closure schemes [J]. J.

- Appl. Meteor., 36 (3): 214–233, doi:10.1175/1520-0450(1997)036<0214: SOABLP>2.0.CO;2.
- Alfieri J G, Niyogi D, Blanken P D, et al. 2008. Estimation of the minimum canopy resistance for croplands and grasslands using data from the 2002 international H<sub>2</sub>O project [J]. Mon. Wea. Rev., 136 (11): 4452–4469, doi:10.1175/2008MWR2524.1.
- Bie W, Casper M C, Reiter P, et al. 2015. Surface resistance calibration for a hydrological model using evapotranspiration retrieved from remote sensing data in Nahe catchment forest area [J]. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 368: 81–86, doi:10.5194/piahs-368-81-2015.
- Chen Fei, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [J]. Mon. Wea. Rev., 129 (4): 569–585, doi:10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2.
- 陈志忠. 2016. 焉耆盆地冬小麦生育期蒸散量估算研究 [J]. 水利技术监督, 24 (5): 74–76, 115. Chen Zhizhong. 2016. Evapotranspiration estimation of growing period of winter wheat in Yan Qi basin [J]. Technical Supervision in Water Resources (in Chinese), 24 (5): 74–76, 115, doi:10.3969/j.issn.1008-1305.2016.05.026.
- Cooter E J, Schwede D B. 2000. Sensitivity of the National Oceanic and Atmospheric Administration multilayer model to instrument error and parameterization uncertainty [J]. J. Geophys. Res., 105 (D5): 6695–6707, doi:10.1029/1999JD901080.
- Douglas E M, Jacobs J M, Sumner D M, et al. 2009. A comparison of models for estimating potential evapotranspiration for Florida land cover types [J]. J. Hydrol., 373 (3–4): 366–376, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.04.029.
- Ershadi A, McCabe M F, Evans J P, et al. 2015. Impact of model structure and parameterization on Penman-Monteith type evaporation models [J]. J. Hydrol., 525: 521–535, doi:10.1016/j.jhydrol.2015.04.008.
- Fang Q X, Ma L, Flerchinger G N, et al. 2014. Modeling evapotranspiration and energy balance in a wheat–maize cropping system using the revised RZ-SHAW model [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 194: 218– 229, doi:10.1016/j.agrformet.2014.04.009.
- Foken T, Wichura B. 1996. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 78 (1–2): 83–105, doi:10.1016/0168-1923(95)02248-1.
- Irmak S, Kilic A, Chatterjee S. 2014. On the equality assumption of latent and sensible heat energy transfer coefficients of the Bowen ratio theory for evapotranspiration estimations: Another look at the potential causes of inequalities [J]. Climate, 2(3): 181–205, doi:10.3390/cli2030181.
- Jarvis P G. 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field [J]. Philos. Trans. Roy. Soc. London, 273(927): 593–610, doi:10.1098/rstb.1976.0035.
- Jia B H, Xie Z H, Zeng Y J, et al. 2015. Diurnal and seasonal variations of CO<sub>2</sub> fluxes and their climate controlling factors for a subtropical forest in Ningxiang [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 32 (4): 553–564, doi:10.1007/s00376-014-4069-4.
- Kişi Ö. 2006. Daily pan evaporation modelling using a neuro-fuzzy computing technique [J]. J. Hydrol., 329 (3–4): 636–646, doi:10.1016/j. jhydrol.2006.03.015.
- Kumar A, Chen Fei, Barlage M, et al. 2014. Assessing impacts of

- integrating MODIS vegetation data in the weather research and forecasting (WRF) model coupled to two different canopy-resistance approaches [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 53 (6): 1362–1380, doi:10.1175/JAMC-D-13-0247.1.
- Lee X H, William M, Beverly L. 2004. Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis [M]. New York: Spring-Verlag, 250pp.
- 李俊, 韩凤明, 同小娟, 等. 2014. 麦田蒸散模型的改进及其对阻力参数的敏感性分析 [J]. 中国农业气象, 35 (6): 635-643. Li Jun, Han Fengming, Tong Xiaojuan, et al. 2014. Evapotranspiration models for a winter wheat field: The improvements and analyses on their sensitivities to the resistance parameters [J]. Chinese Journal of Agrometeorology (in Chinese), 35 (6): 635-643, doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2014.06.005.
- 刘斌, 胡继超, 张雪松, 等. 2014. 稻田逐时蒸散量的测定及其模拟方法的比较 [J]. 灌溉排水学报, 33 (4): 369–373. Liu Bin, Hu Jichao, Zhang Xuesong, et al. 2014. Measurement simulation of hourly evapotranspiration in paddy field with different methods [J]. Journal of Irrigation and Drainage (in Chinese), 33 (4): 369–373, doi:10.13522/j. cnki.geps.2014.04/05.079.
- 刘斌, 胡继超, 赵秀兰, 等. 2015. 应用 Penman-Monteith 模型估算稻田 蒸散的误差分析 [J]. 中国农业气象, 36 (1): 24–32. Liu Bin, Hu Jichao, Zhao Xiulan, et al. 2015. Error analysis on evapotranspiration estimation of paddy rice field by Penman-Monteith model [J]. Chinese Journal of Agrometeorology (in Chinese), 36 (1): 24–32, doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2015.01.004.
- 刘春伟,曾勰婷, 邱让建. 2016. 用分时段修正双源模型估算南京地区 冬小麦生育期蒸散量 [J]. 农业工程学报, 32 (S1): 80–87. Liu Chunwei, Zeng Xieting, Qiu Rangjian. 2016. Simulated total evapotranspiration of winter wheat with modified Shuttle worth-Wallace model in different stages in Nanjing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (in Chinese), 32(S1): 80–87, doi:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.z1.012.
- Meesters A G C A, Vugts H F. 1996. Calculation of heat storage in stems [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 78 (3–4): 181–202, doi:10.1016/0168-1923(95)02251-1.
- Mu Qiaozhen, Zhao Maosheng, Running S W. 2011. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115 (8): 1781–1800, doi:10.1016/j.rse. 2011.02.019.
- Ortega-Farias S, Carrasco M, Olioso A, et al. 2007. Latent heat flux over Cabernet Sauvignon vineyard using the Shuttleworth and Wallace model [J]. Irrigation Science, 25 (2): 161–170, doi:10.1007/s00271-006-0047-7.
- Shi C X, Jiang L P, Zhang T, et al. 2014. Status and plans of CMA land data assimilation system (CLDAS) project [C]//EGU General Assembly Conference Abstracts. Vienna, Austria: EGU, 5671.
- Shuttleworth W J, Wallace J S. 1985. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 111 (469): 839–855, doi:10.1002/qj.49711146910.
- Xie Zhenghui, Wang Linying, Jia Binghao, et al. 2016. Measuring and modeling the impact of a severe drought on terrestrial ecosystem CO<sub>2</sub> and water fluxes in a subtropical forest [J]. J. Geophys. Res., 121 (10): 2576–2587, doi:10.1002/2016JG003437.