文章编号:1000-7601(2020)04-0184-08 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2020.04.23

最大熵增蒸散模型在中国区域的应用及时间尺度对比分析

阳 勇[1],孙怀卫[1],罗红英[2]

(1. 华中科技大学水电与数字化工程学院,湖北 武汉 430074;2.西藏农牧学院,西藏 林芝 860000)

摘 要:为解决传统蒸散发计算中模型参数、模型缺陷和不确定性等问题,基于最大熵增蒸散发(MEP)模型的模型假设,针对我国不同植被覆盖下的蒸散发(潜热)通量进行估算,并分析半小时、日、周、月等不同时间尺度下的模型表现,以期获得适合我国区域的蒸散发计算方法。结果表明:MEP 模型具有较好的模型计算表现,与多个站点的涡度相关实测数据较为接近;MEP 模型在半小时尺度上应用更优,所有站点的潜热通量平均决定性系数(R^2)为 0.75,周、月尺度上潜热通量精度较显热通量高。对 MEP 模型的两个输入参数(表面温度和比湿)分析表明,表面温度对预测结果影响较大。MEP 模型精度高且具有所需输入参数少的优势,研究结果可用于对各种植被覆盖地表的蒸散发估算。

关键词:最大熵增模型;潜热通量;蒸散发;涡度相关;能量平衡

中图分类号:S271; S161.4 **文献标志码**:A

Application of Maximum Entropy Production Model for estimation of evapotranspiration in China

YANG Yong[1], SUN Huaiwei[1], LUO Hongying[2]

(1. *School of Hydropower and Information Engineering*, *Huazhong University of Science and Technology*, *Wuhan*, *Hubei* 430074, *China*;
2. *Tibet Agricultural and Animal Husbandry College*, *Linzhi*, *Tibet* 860000, *China*)

Abstract: To solve limitations of model parameters, model structure defects, and uncertainties in estimating *ET* by traditional models, this paper estimates *ET* flux under different vegetation-covered land surface in China based on assumptions of the Maximum Entropy Production (MEP) Model. Meanwhile, this study analyzed the MEP model performances at different temporal scales including half-hourly, daily, weekly, and monthly to obtain a suitable method for estimating *ET* in China.The results showed that: The MEP model had a good estimate performance and was consistent with the measurements of multiple eddy covariance stations; The MEP model was better applied on the half-hourly scale, the averaged coefficient of determination (R^2) of latent heat over all site was 0.75, and the accuracy of latent heat estimate was higher than that of sensible heat over the weekly and monthly scales; Analysis on the surface temperature and specific humidity of the MEP model's inputs showed that the surface temperature had a greater influence on the predictions; Due to the high accuracy of the MEP model and advantage of fewer required input parameters, results can be used to estimate *ET* under various vegetation-covered land surfaces.

Keywords: Maximum Entropy Production Model; latent heat; evapotranspiration; eddy covariance system; energy balance

蒸散发表征了由于太阳辐射驱动水分从土壤、植被等散发到大气之中的过程,在水文、农业、生态等多方面都具有广泛的研究。当前,基于物理过程的蒸散发模拟主要基于离散梯度法和 Penman 公式

收稿日期:2020-05-20 **修回日期**:2020-05-28

资助项目:国家自然科学基金项目(51879110);湖北省水利重点科研项目(HBSLKY201907)

作者简介:阳勇(1996-),男,江西赣州人,硕士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail:goku@ hust.edu.cn

通信作者:孙怀卫(1985-),男,副教授,硕士研究生导师,主要从事水文水资源研究。E-mail:hsun@ hust.edu.cn

法[1],其中,离散梯度法模型虽具有简单直观等优势,但模拟蒸散发不受能量守恒的约束,需要众多输入参数(梯度变量、风速、粗糙度等)且模型的不确定性较大[2-3];Penman 公式法则满足了能量平衡条件但模型输入参数多,且需要风速、表面粗糙度等不易量化的参数[4-5]。由此,如何改进和提升蒸散发观测和模拟,是当前水文、农业、生态等多学科研究的前沿和难点。

在蒸散发估算过程中,如何考虑不同时间尺度影响下的估算精度是当前仍需要思考的关键问题。近年来针对 Penman 公式法的蒸散发研究虽对日、月等不同时间尺度的蒸散发进行了估算,但如何简化估算的输入变量要求、如何考虑模型输入参数影响等问题仍存在较多难点[6-8]。基于最大熵增原理,通过综合贝叶斯概率论、信息熵理论和非平衡态热力学理论,构造地球大气质能交换非平衡态热力学系统的函数并推求和获得满足地表能量守恒的解,Wang 等[9]建立了基于最大熵增理论(Maximum Entropy Production,MEP)的地表潜热(蒸散发)估算方法。近年来,MEP 模型在研究全球气候、水文过程和计算地表热通量方面已得到广泛运用,大量研究表明 MEP 模型计算地表热通量表现优于基于传统物理过程的蒸散模型[10-14]。但有关 MEP 模型在国内的研究较少,尤其是对于多站点、多时间尺度的验证较少。由此,本文选取多个不同植被覆盖类型的试验站点,运用 MEP 模型估算地表潜热通量(蒸散发),用基于涡度相关系统观测数据对 MEP 模型进行验证,对比不同时间尺度的计算精度并对模型输入变量进行敏感性分析,以期获得适合我国区域的蒸散发计算方法。

1　数据来源与研究方法

1.1　数据来源

选取中国 6 个涡度相关(EC)试验站点(长白山站、长岭站、多伦站、海北站、千烟洲站和四子王站),运用 FLUXNET 2015 数据集作为 MEP 模型的输入变量,并用数据集内显热通量和潜热通量的实测值验证 MEP 模型表现。6 个站点的植被覆盖类型按照 IGBP(International geosphere-biosphere program)[15]项目划分为混合森林类、草地类、灌丛和常绿针叶林类(数据来源于全球通量数据网 https://fluxnet.fluxdata.org,包含具体站点信息和多种时间尺度的气象、碳通量及热通量观测数据)。本研究运用数据集中的物理及气象变量,包括:净辐射(R_n)、表面温度(T_s)、气压(P)、相对湿度(RH)、饱和蒸汽压亏缺(Vapor pressure deficit, VPD)、显热通量(H)、潜热通量(LE)和土壤热通量(G)等。

数据集对各个观测变量(包括 T_s、P、VPD、H、LE 等)的缺失值进行插补以获得完整的长时间序列值,主要的插补方法包括多维标度分析法(Multidimensional scaling, MDS)[16]和 ERA-Interim 降尺度方法[17],前者主要用于通量插补而后者主要用于气象变量的插补处理。

1.2　最大熵增蒸散(MEP)模型

最大熵增蒸散(MEP)模型是 Wang 等[9]在最大熵增原理的基础上建立的蒸发蒸腾量模型,是基于贝叶斯概率论、信息熵理论、大气边界层湍流论的现代非平衡态热力学理论,是用于计算湍流显热通量、潜热通量(蒸散发)和地表热通量作为表面净辐射最有可能的能量分配且满足能量平衡的新方法。不同于传统的离散梯度法,MEP 模型预测地表热通量时只需要 3 个输入参数:净辐射、表面温度和比湿,就能得到热通量的唯一解。它的优势在于输入参数少且参数不敏感,不需要温度梯度和水汽梯度变量、风速及表面粗糙度等参数。对于土壤和植被等不透明介质表面,MEP 模型计算显热通量(H)、潜热通量(LE)和土壤热通量(G)的公式如下:

$$LE = B(\sigma)\,H$$
$$G = \frac{B(\sigma)}{\sigma}\frac{I_s}{I_0}\,|H|^{-\frac{1}{6}}H \tag{1}$$
$$H + LE + G = R_n$$

式中,R_n 为地表净辐射,I_s 为土壤热惯量,I_0 为空气的“表观”热惯性,代表边界层中的湍流传输过程,σ 为表面温度和表面水汽密度的无量纲函数,$B(\sigma)$ 为波文比的倒数,可表示为:

$$\sigma = \frac{\lambda^2}{c_p R_v}\frac{q_s}{T_s^2} \tag{2}$$

$$B(\sigma) = 6\left(\sqrt{1 + \frac{11}{36}\sigma} - 1\right) \tag{3}$$

$$I_s \equiv \rho c\sqrt{\alpha} \tag{4}$$

$$I_0 = \rho_a c_p\sqrt{C_1 kz}\left(C_2\frac{kzg}{\rho_a c_p T_0}\right)^{\frac{1}{6}} \tag{5}$$

式中,λ 为水的相变潜热($J\cdot kg^{-1}$);R_v 为水汽体常数($461\ J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$);$c_p$ 为常压下的空气比热($10^3\ J\cdot$

$kg^{-1} \cdot K^{-1}$)，q_s 为地表空气比湿($kg \cdot kg^{-1}$)，T_s 为地表温度(K)。式(4)中，ρ 为介质密度($kg \cdot m^{-3}$)，c 为比热($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)，$\alpha$ 为热扩散率($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)。式(5)中，$\rho_a$ 为空气密度($kg \cdot m^{-3}$)，g 为重力加速度($m \cdot s^{-2}$)，T_0 为常规室温(约 300 K)，z 为离地表高度(m)，k 为 Von karman 常数(0.4)。C_1 和 C_2 为描述温度和风速稳定性的经验常数，取值详见参考文献[9]。

1.3 模型输入计算方法

MEP 模型的 3 个输入变量中，净辐射和表面温度变量由涡度相关数据集 FLUXNET2015 直接提供，而比湿则不能由观测直接获取。比湿(q_s)的计算基于 Clausius - clapeyron 方程得到，涉及表面温度(T_s)、大气压(P)、相对湿度(RH)等变量，计算公式[5]如下：

$$q_s = \varepsilon \frac{RH\, e_s(T_s)}{P} \tag{6}$$

$$e_s(T_s) = e_s(T_r) \exp\left(\frac{\lambda}{R_v}\left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_s}\right)\right) \tag{7}$$

式中，ε(= 0.622)为水蒸气与干燥空气的分子量之比，$e_s(T_s)$ 表示在 T_s 时的饱和蒸气压，$e_s(T_r)$ (= 6.11 mb)则表示参考温度(T_r = 273.15 K)下的饱和蒸气压。采用的涡度相关数据集提供了 T_s、P、RH、VPD 等实测值，比湿的计算能够满足要求。

1.4 模型表现评定

为了分析 MEP 模型的预测表现，采用了常用的误差指标体系对结果进行评价。主要的评价指标包括决定性系数(R^2)，Nash - sutcliffe 效率系数(NSE)，均方根误差($RMSE$)及正规化均方根误差($NRMSE$)[18-19]。

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n}(y_{m,i} - \bar{y}_m)(y_{0,i} - \bar{y}_0)\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_{m,i} - \bar{y}_m)^2 \sum_{i=1}^{n}(y_{0,i} - \bar{y}_0)^2} \tag{8}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_{m,i} - y_{0,i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_{m,i} - \bar{y}_0)^2} \tag{9}$$

$$RMSE = \sqrt{(y_{m,i} - y_{0,i})^2} \tag{10}$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(y_{m,i} - y_{0,i})^2}{\sum_{i=1}^{N} y_{0,i}^{\ 2}}} \tag{11}$$

式中，y_m 为模型预测值，y_0 为通量实测值，$\bar{y}_m$ 和 $\bar{y}_0$ 分别为预测值和实测值的均值。

2 结果与分析

2.1 显热通量与潜热通量估算

运用 6 个 EC 站点半小时尺度数据作为 MEP 模型的输入，通过与显热、潜热通量实测值对比以评估 MEP 模型预测通量的精度和可靠度，并验证有植被覆盖下的地表通量计算，具体预测表现如图 1、图 2 所示。对于显热通量(H)，除了千烟洲站的，其余 5 个站点的 R^2 都大于 0.82，6 个站点的平均 R^2 为 0.84，表明 MEP 模型预测的显热通量和实测值具有良好的相关性。大部分站点的最小二乘法回归直线斜率都接近于 1，表明预测值和实测值具有较好的一致性，且大部分显热通量预测值略微偏小。对于潜热通量，海北站的预测值与实测值拟合最好，R^2 最高，但是结果偏小约 23%，其余站点也存在不同程度的偏小，且预测结果的偏小率整体上大于显热通量的偏小率。千烟洲站的潜热通量、显热通量预测值和实测值线性拟合较好(斜率为 1)，但相关性(R^2)较其他站点略低。

所有站点的预测误差($RMSE$，$NRMSE$)和 NSE 系数结果见图 3、图 4。对于显热通量，$RMSE$ 取值范围为 24.70~36.89 $W \cdot m^{-2}$，最小值为四子王站而最大值为长白山站，所有站点均值为 31.86 $W \cdot m^{-2}$。潜热通量 $RMSE$ 取值范围为 19.97~48.92 $W \cdot m^{-2}$，最小为多伦站，最大值为千烟洲站，所有站点均值为 33.18 $W \cdot m^{-2}$。对于四子王站，MEP 模型预测显热通量表现最好，$RMSE$ 最小，为 24.70 $W \cdot m^{-2}$，表明预测值误差较小，且 NSE 最高为 0.89，表明模型可信度高。但是与之对应的潜热通量项则表现稍差，误差也较显热通量大。对于潜热通量，在海北站的预测结果最佳：R^2 系数最高为 0.84，NSE 最高为 0.79，$NRMSE$ 在所有站点中最低，为 45.50%，表明在海北站(灌丛植被)地表中，MEP 模型能够准确地预测潜热通量。

2.2 基于不同时间尺度数据的模型表现

在数据集 FLUXNET2015 中包含多种时间尺度的变量观测数据：半小时、每日、七天及每月数据。现有的国内外对 MEP 模型估算通量及蒸散发的验证研究中，运用半小时尺度的数据居多，而对于更大时间跨度的模型验证较少。根据 6 个站点的半小时、每日、七天、月 4 种不同时间尺度的数据，运用 MEP 模型对基于多时间尺度的热通量进行估算，经

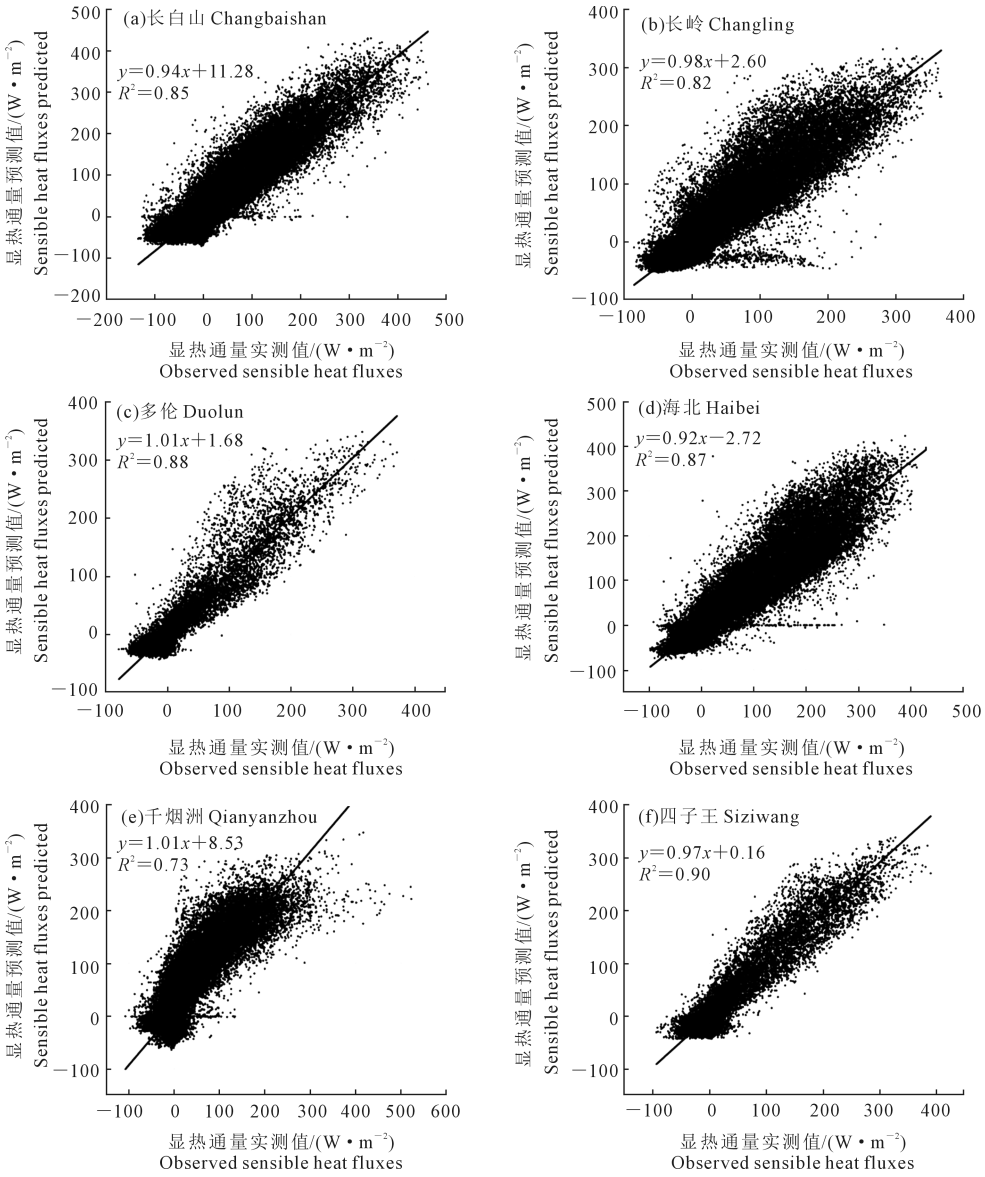

图 1　MEP 模型预测显热通量的散点图(半小时时间尺度数据)

Fig.1　Scatter diagrams of sensible heat flux predicted by MEP model (half-hourly temporal scale data)

统计分析后的模型表现如图 3(显热通量)和图 4(潜热通量)所示。对于显热通量,除四子王站,其余 5 个站点随着时间尺度的增大预测精度降低,误差也随之增大。甚至部分站点(海北、千烟洲)在七天、月尺度模拟中出现了负值的 *NSE*,说明此时模型对于七天以上尺度数据的显热通量估算已经不可信。虽然所有站点的 *RMSE* 随着时间尺度增大而减小,但 *NRMSE* 却呈增大趋势,反映的误差实际上却是增大。这是由不同时间尺度的观测数值变化幅度范围不同导致的。以长白山站为例,由显热通量观测值箱线图(图 5)可以看出,半小时尺度的 1.5 倍四分位距(IQR)处于-150~180 之间,且离群异常值较多;随着日、七天、月时间跨度扩大,上下边缘缩小,异常值减少,因此采用 *NRMSE* 系数评估误差可避免较多异常值造成的累积误差。

图 4 表明,MEP 模型预测的基于多时间尺度潜热通量的验证结果并不与显热通量一致,随着时间尺度的增大所有站点的 R^2 随之增大,*NSE* 得到提高,*NRMSE* 也呈减小趋势。但是,日尺度潜热通量估算结果在 4 种尺度中较差,*NSE* 较小且 *NRMSE* 较大。这主要是由于一天中白天和夜晚潜热通量相差较大,夜间较弱的湍流运动难以精确测量,导致测量紊乱,使数据可靠性降低。而运用七日、月数据等更大时间尺度的数据验证却取得了较好的预测效果,以四子王站为例,月尺度估算在 4 种时间尺度中精度最高。这表明 MEP 模型可以用来预测长时期的地表蒸散发如周、月、年甚至多年蒸散发。

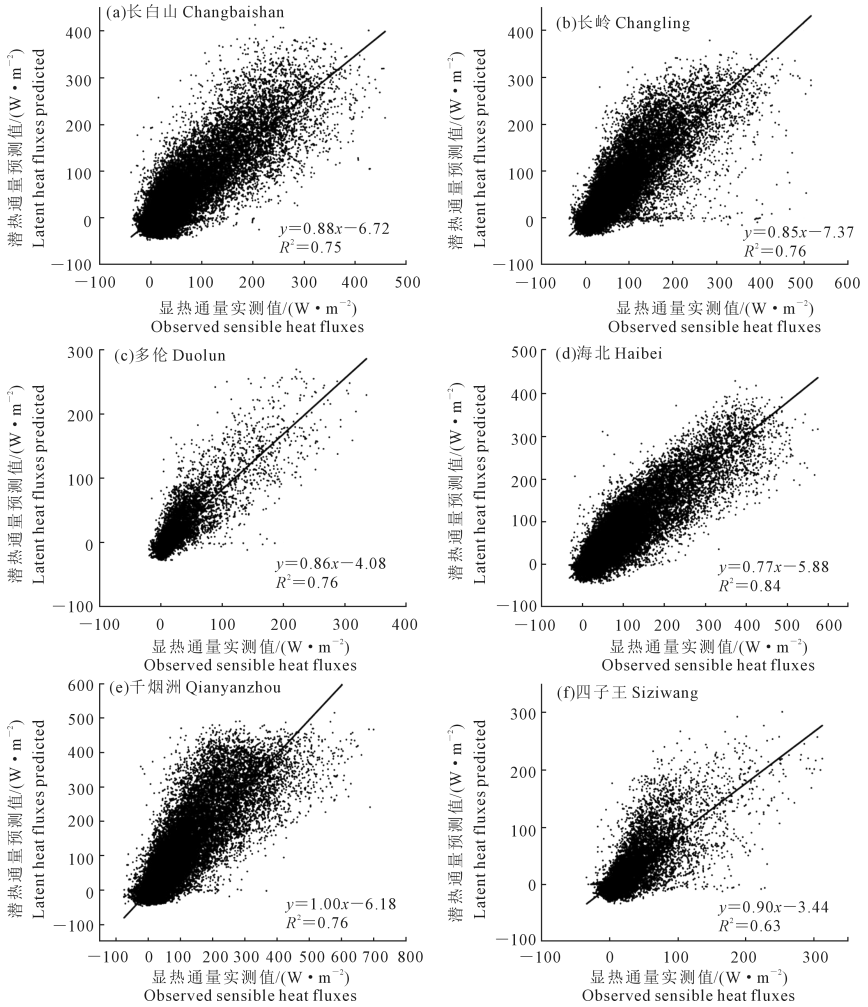

图 2 MEP 模型预测潜热通量的散点图(半小时时间尺度数据)

Fig.2 Scatter diagrams of latent heat flux predicted by MEP model (half-hourly temporal scale data)

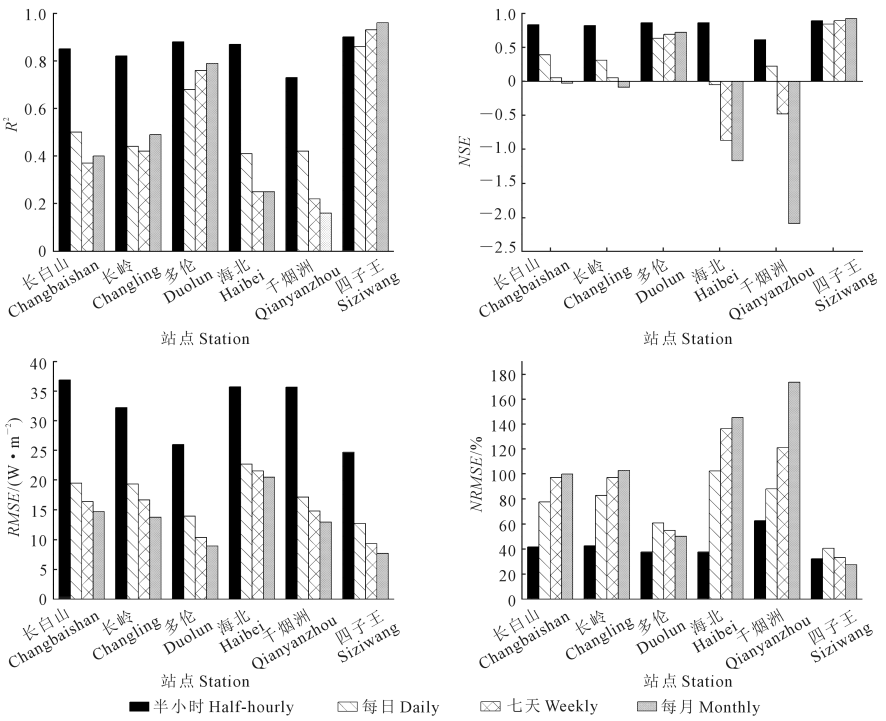

图 3 不同时间尺度(半小时/每日/七天/月)下 MEP 模型预测显热通量的统计分析

Fig.3 Statistical histograms of sensible heat flux predicted by MEP model at different temporal scales (half-hourly/daily/weekly/ monthly)

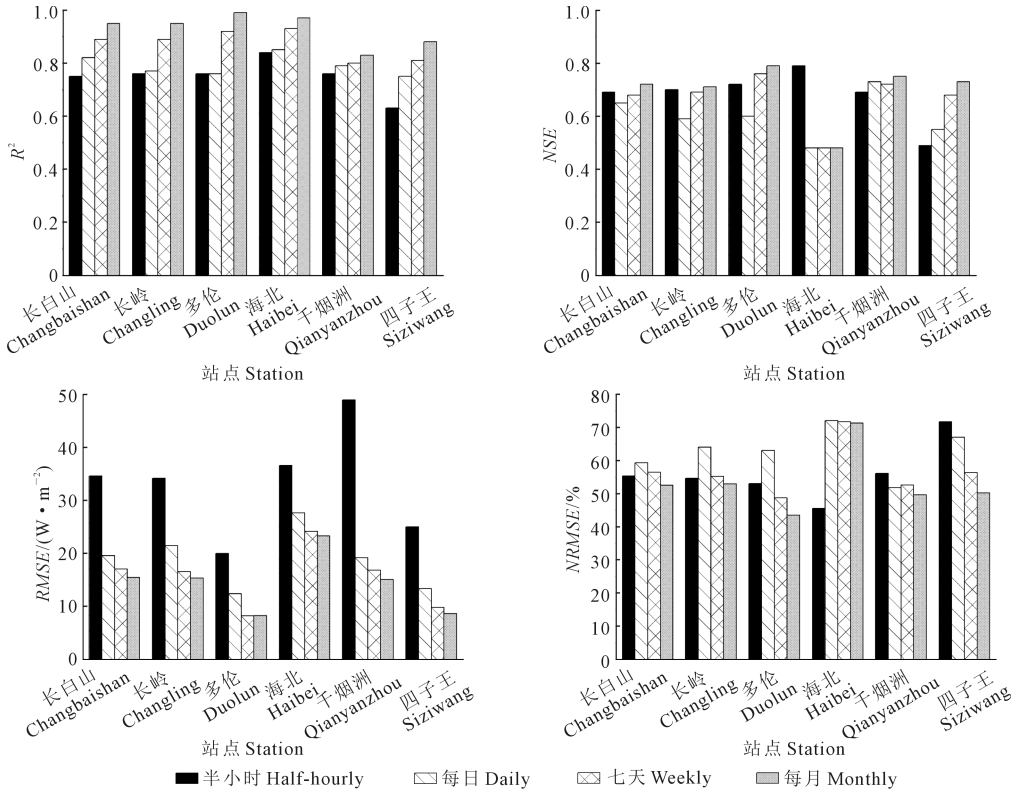

图 4　不同时间尺度(半小时/每日/七天/月)下 MEP 模型预测潜热通量的统计分析

Fig.4　Statistical histograms of latent heat flux predicted by MEP model at different temporal scales (half-hourly / daily / weekly/ monthly)

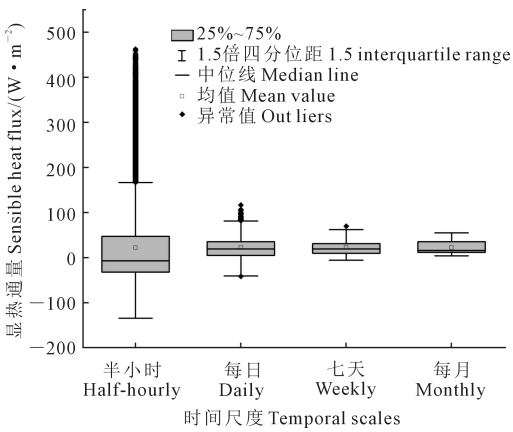

图 5　长白山站不同时间尺度下的显热通量实测值箱线图

Fig.5　Boxplot of measured sensible heat flux at different temporal scales at Changbaishan site

3　讨　论

在理想情况下,地表能量的输入与支出应达到平衡状态,即净辐射应与显热通量、潜热通量及土壤热通量(或冠层热储量)之和相等。但是由于观测仪器、观测方法以及外部环境条件(例如高风速等)引起的观测误差在涡度相关系统中是普遍存在的,因此能量闭合状况可作为评价观测数据可靠性的方法。以长岭站为例,长岭站 4 种时间尺度下的地表能量闭合状况如图 6 所示。4 种时间尺度下能量不闭合度(即 $1-(H+LE)/(Rn-G)$)为 20%~31%,而据国内外研究[20]表明 FLUXNET 在中国站点的平均能量不闭合度为 27%,与之相比较,该区间处于可接受范围内,认为通量观测数据是可靠的。同时,表面能量不平衡也是解释显热通量、潜热通量预测值偏小及造成误差的原因,例如,在半小时尺度模型验证中(图 1、图 2),长岭站 H 的预测值偏小 11%,E 的预测值偏小 15%,因此在模型验证中除 MEP 模型本身误差外,也包含了观测数据约 31%的能量不闭合所导致的误差。

为了分析在 MEP 模型中,输入变量包括净辐射、表面温度、比湿及相关气象变量与 MEP 模型预测的热通量和实测通量的相关性,以半小时尺度中估算精度最高的海北站为例,表 1 给出了各个变量间的相关系数,*MEPLE*、*MEPH* 表示 *MEP* 模型预测的潜热、显热通量,*LE*、*H* 代表实测值。由于净辐射值在 *MEP* 模型输入中取决于观测仪器的精度,可以近似认为是正确的;由表 1 可知表面温度与预测及实测显热、潜热通量的相关性最高,而比湿与实测热通量的相关性较表面温度的低,大气压与热通量

相关性最弱而相对湿度与热通量呈负相关。以上表明表面温度是模型中最为敏感的输入参数。

在半小时时间尺度的蒸散发计算中,海北站(植被类型为灌丛)精度最高;而千烟洲站(植被类型为常绿针叶林类,覆盖率在 60%以上且平均树高 12 m)误差较大;在较长时间尺度上,以四子王站(植被类型为草地,覆盖率小于 10%)为例,随着时间尺度扩大计算精度得到提高。这表明通常情况下 MEP 模型在植被较稀疏的下垫面应用相对较好。总的来说,MEP 模型具有以下特有优势:(1)满足表面能量守恒;(2)所需输入变量少,且没有可调的经验参数;(3)适用范围广,可用于任何土壤含水量和地表覆盖情况,对于估算蒸散发是一种简单且可靠的方法。在未来的应用中,MEP 模型可结合遥感方法通过时间尺度扩展来反演区域蒸散发,实现从站点至区域空间尺度的扩展,尤其对于干旱、半干旱地区的农业及水资源管理[21]具有重要意义。

4 结 论

1)基于半小时时间尺度,MEP 模型能给出精度较高的显热和潜热通量估算值,估算的显热通量精度较潜热通量稍高,但二者的预测值都趋于偏小。其中,4 个站点的显热通量估算结果平均偏小 4.33%,5 个站点的潜热通量估算结果平均偏小 14.8%。

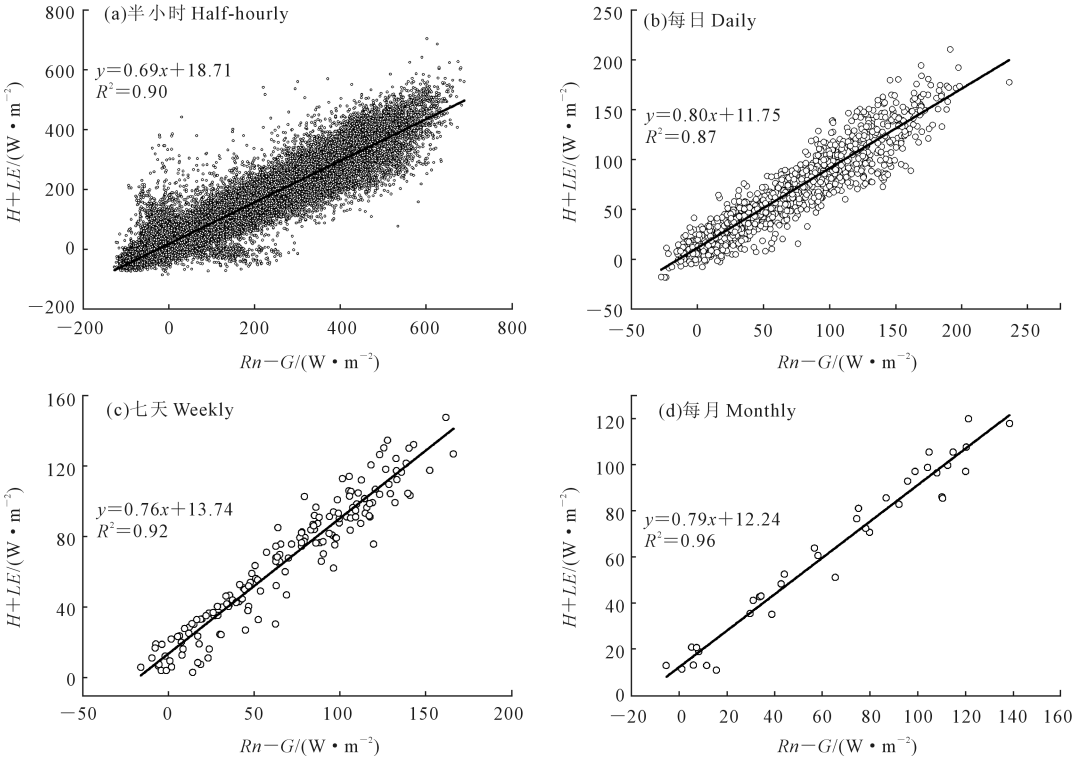

图 6 长岭站不同时间尺度下的能量平衡

Fig.6 Surface energy balance at different temporal scales of Changling site

表 1 海北站各变量间的相关系数

Table 1 Correlation coefficient among variables at Haibei site

	MEPLE	*MEPH*	*LE*	*H*	R_n	T_s	q_s	*PA*	*RH*
MEPLE	1.00								
MEPH	0.84**	1.00							
LE	0.92**	0.77**	1.00						
H	0.69**	0.93**	0.61**	1.00					
Rn	0.92**	0.99**	0.84**	0.89**	1.00				
T_s	0.52**	0.50**	0.59**	0.38**	0.53**	1.00			
q_s	0.36**	0.15	0.38**	−0.02	0.22	0.78**	1.00		
PA	0.13	0.06	0.15	0.00	0.09	0.32**	0.39**	1.00	
RH	−0.26	−0.45**	−0.31**	−0.55**	−0.41**	−0.08	0.45**	0.27	1.00

注:**,1%水平下显著相关。

Note: ** significant correlation at 1% level.

2)对于长时间尺度的七天和月数据,MEP 模型能够准确地计算潜热通量,与实测值符合较好,但显热通量符合稍差。这揭示 MEP 模型能运用于较长时间尺度的蒸散发预测。

3)在 MEP 模型的 3 个输入变量中,地表温度较比湿更为敏感,模型的计算精度主要取决于地表温度。

4)研究表明 MEP 模型计算热通量的精度和可靠度较高,在中国站点尺度具有较好的适用性。

致谢:本文及相关研究的完成过程中受到了 Georgia Institute of Technology 的王敬锋教授的直接指导,共同合作研究开发的 R 包程序已在 Github 上线(github/Yangyonghust/RMEP)。

参 考 文 献:

[1] 王敬锋,刘元波,张珂. 最大熵增地表蒸散模型:原理及应用综述[J]. 地球科学进展,2019,34(6): 596-605.

[2] Isabelle P E, Nadeau D F, Rousseau A N, et al. Applicability of the bulk-transfer approach to estimate evapotranspiration from boreal peatlands[J]. Journal of Hydrometeorology, 2015, 16(4):1521-1539.

[3] Blyth E J, Gash A, Lloyd M, et al. Evaluating the JULES land surface model energy fluxes using FLUXNET data [J]. Hydrometeorology, 2010,11:509-519.

[4] McMahon T,Peel M,Lowe L,et al. Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data:A pragmatic synthesis [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2013, 17(4):1331-1363.

[5] Sharif H E, Zhou W B, Ivanov V Y, et al. Surface energy budgets of arctic tundra during growing season [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2019, 124.

[6] 高云飞,赵传燕,彭守璋. 黑河上游天涝池流域草地蒸散发模拟及其敏感性分析[J]. 中国沙漠, 2015, 35(5):1338-1345.

[7] 潘云,宫辉力,李小娟. 蒸散发模拟的 Valiantzas 方法在中国的应用[J]. 水科学进展,2011,22(1):30-37.

[8] 刘莹,陈报章,陈婧. 千烟洲森林生态系统蒸散发模拟模型的适用性[J]. 植物学报,2016,51(2):226-234.

[9] Wang J F, Bras R L .A model of evapotranspiration based on the theory of maximum entropy production [J]. Water Resources Research,2011,47(3):297-306.

[10] 李志威,杨大文,雷慧闽. 基于最大熵增原理的蒸发蒸腾量模型应用[J]. 清华大学学报,2012,52(6):785-790.

[11] Huang S Y,Wang J F. A coupled force-restore model of surface temperature and soil moisture using the maximum entropy production model of heat fluxes [J]. Journal of Geophysical Research-Atmosphere,2016,121(13):7528-7547.

[12] Wang H,Tetzlaff D,Soulsby C. Testing the maximum entropy production approach for estimating evapotranspiration from closed canopy shrub land in a low-energy humid environment [J]. Hydrological Processes,2017,31(25):4613-4621.

[13] Islem H, Nadeau D F, Biljana M. Application of the maximum entropy production model of evapotranspiration over partially vegetated water-limited land surfaces[J]. Journal of Hydrometeorology,2018,19(6):989-1005.

[14] Xu D H, Agee E, Wang J F, et al. Estimation of evapotranspiration of Amazon rainforest using the maximum entropy production method [J]. Geophysical Research Letters,2019,46(3):1402-1412.

[15] Global Carbon Project. International geosphere-biosphere Programme [J].International Geosphere-Biosphere Programme,2010,(21):36.

[16] Hout M C ,Papesh M H , Goldinger S D . Multidimensional scaling [J]. Wiley Interdiplinary Reviews: Cognitive ence, 2013, 4(1): 93-103.

[17] Vuichard N, Papale D. Filling the gaps in meteorological continuous data measured at FLUXNET sites with ERA-Interim reanalysis [J]. Earth System Science Data,2015,7: 157-171.

[18] 孙怀卫,严冬,陈皓锐.参考作物腾发量的 GARCH 类模型模拟与比较[J]. 农业工程学报,2015,31(7): 131-136.

[19] Gupta H V, Kling H, Yilmaz K K. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling[J]. Journal of Hydrology,2009,377(1):80-91.

[20] 刘渡,李俊,于强. 涡度相关观测的能量闭合状况及其对农田蒸散测定的影响[J]. 生态学报,2012,(17):27-35.

[21] 韩志慧, 刘小刚, 郝琨, 等. 基于 SPI 指数的内蒙古地区干旱演变特征及趋势预测[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(5): 430-439.