

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2020.12.002

王智慧,师春香,沈润平,等.CLDAS 驱动陆面模式模拟中国区域潜热通量的精度评价[J].中国农业气象,2021,42(12):761-773

# CLDAS 驱动陆面模式模拟中国区域潜热通量的精度评价\*

王智慧<sup>1</sup>, 师春香<sup>2\*\*</sup>, 沈润平<sup>1</sup>, 孙 帅<sup>2</sup>, 单 帅<sup>1</sup>, 韩 帅<sup>2</sup>

(1. 南京信息工程大学地理科学学院, 南京 210044; 2. 国家气象信息中心, 北京 100081)

**摘要:** 利用不同下垫面的通量塔站潜热通量观测数据, 计算中国气象局陆面数据同化系统的 3 个陆面模式 (CLDAS-CLM、CLDAS-Noah 和 CLDAS-Noah-MP) 和全球陆面同化系统 (GLDAS-Noah) 与通量塔站观测资料之间的相关系数 (R)、平均偏差 (ME)、均方根误差 (RMSE) 和纳什系数 (NSE), 进行多时间尺度、多下垫面的精度评价。结果表明: 4 个模式模拟结果基本能模拟出单峰型的日内变化和年变化趋势以及峰值出现时间, 日变化峰值基本出现在 14:00, 年变化峰值出现在夏季, 在分别存在灌溉和土壤冻融现象的农田和湿地处春季数值模拟效果稍差; 在小时、日和月尺度上, CLDAS 系列模式的模拟效果基本优于 GLDAS, 从相关系数 (R) 上看, CLDAS 系列的平均值较 GLDAS-Noah 分别高出 0.07、0.08 和 0.02, 从均方根误差 (RMSE) 上看, CLDAS 系列的平均值较 GLDAS-Noah, 分别减少 6.6、5.5 和 2.3 W·m<sup>-2</sup>。模式模拟效果随着时间尺度和下垫面性质发生变化, 月尺度上的模拟效果最好, 其中 Noah-MP 表现较好, 其 R 值为 0.88, RMSE 为 20.8 W·m<sup>-2</sup>, NSE 为 0.58。4 个模式模拟结果在不同下垫面上的表现有一定的共性, 在混合林和针叶林存在高估现象, 在其余下垫面存在低估现象, 但没有一个模型结果在所有下垫面均表现最优, CLM 在戈壁、混合林和针叶林站点为最优模型, Noah 在荒漠和农田站点为最优模型, Noah-MP 在草甸、草原和湿地为最优模型。

**关键词:** 潜热通量; CLDAS2.0; 陆面模式资料; 精度评价

## CLDAS Drive Land Surface Model to Simulate Latent Heat Flux in China

WANG Zhi-hui<sup>1</sup>, SHI Chun-xiang<sup>2</sup>, SHEN Run-ping<sup>1</sup>, SUN Shuai<sup>2</sup>, SHAN Shuai<sup>1</sup>, HAN Shuai<sup>2</sup>

(1. School of Geographic Sciences, Nanjing University of Information Science &amp; Technology, Nanjing 210044, China; 2. National Meteorological Information Center, Beijing 100081)

**Abstract:** The correlation coefficient (R), the average deviation between (ME), root mean square error (RMSE), and coefficient of Nash (NSE) were calculated between the three land surface model from the land data assimilation system of the China Meteorological Administration (CLDAS CLM, CLDAS Noah and CLDAS-Noah-MP) and global land surface assimilation system (GLDAS-Noah) and the flux tower standing observation data, and the accuracy evaluation in terms of different time scales and the different underlying surface were given. The results show that the diurnal variation and annual variation trends and peak time of the single peak can be simulated according to the simulation results of the four models. The peak of diurnal variation generally occurs at 14:00, the annual variation peak occurs in summer, and the numerical simulation effect is slightly worse in irrigated or freezing-thawing farmland and wetland in spring. On the scale of the hour, day, and month, the simulation of models driven by CLDAS is generally better than that of GLDAS. The mean R-value of simulation by models driven by CLDAS is higher than that of GLDAS-NOAH, which is 0.07, 0.08, and 0.02, respectively. The mean value of RMSE

\* 收稿日期: 2020-07-21

\*\* 通讯作者师春香, E-mail: shicx@cma.gov.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFC1506604; 2019YFA0606904); 中国气象局“气象资料质量控制及多源数据融合与再分析”

第一作者联系方式: 王智慧, E-mail: 13057589810@163.com

is lower than that of GLDAS -NOAH, and the errors are reduced by 6.6, 5.5, and  $2.3\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ , respectively. The simulation of the model will change along with the time scale and the underlying surface properties. From the hour to the day to the month scale, the simulation goes through a process of first getting worse and then getting better. The simulation on the month scale is the best, in which Noah-MP performs well, with R value of 0.88, RMSE of  $20.8\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ , and NSE of 0.58. Four model simulation results under different performance have the same certain commonality that simulation in mixed forest and coniferous forest were overestimated and that in the rest underlying surface are underestimated. Although no models work well for all underlying surfaces, CLM performs best in stations covered by Gobi, mixed forest, and coniferous forest, Noah performs best in desert and cropland, and Noah-MP performs best in meadow, grassland, and wetland.

**Key words:** Latent heat flux; CLDAS2.0; Land surface model data; Accuracy evaluation

潜热通量是陆-气间物质和热量交换过程的重要参数,表达了地表可以为大气提供水汽和能量的多少。研究表明,若陆地表面没有蒸散发,近地面气温将升高  $15\sim 25^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>,可见陆面通量交换对大气系统的显著效应。同时,水热传输过程也与植物生理生态过程、环境特征密切相关,张功等<sup>[2-5]</sup>准确地定量了解各时间尺度的潜热通量,对农业、水文、生态、气象等相关领域意义重大。

近年来,一系列大型野外观测实验站的建立,为相关研究提供了大量的观测资料,这些资料揭示了陆面过程的一些基本特征,同时也对陆面模式的发展和验证提供了参考依据。地面站点观测主要采用的是涡动相关仪法(Eddy Covariance technique, EC)直接测得潜热通量,一般认为是可靠的。国内外学者分析了不同下垫面的水热交换情况,如青藏高原高寒金露梅灌丛潜热通量的平均日变化和季节变化均为单峰型,峰值在 7 月下旬<sup>[6]</sup>;绿洲潜热通量远大于荒漠<sup>[7]</sup>;平凉站净辐射分配以潜热为主,定西站以感热为主<sup>[8]</sup>等,不同下垫面的潜热通量存在一定的差异。观测难度大的特性导致观测站点稀少,难以进行空间上的分析,于是寻找可以准确描述潜热通量时空特征的替代资料变得很重要。

陆面模式模拟可以得到时空连续的数据,使得长时间序列、大区域尺度空间分布研究成为可能,但是模拟的精度受初始场和参数化方案的影响,存在不同程度的系统误差和不确定性<sup>[9]</sup>。随着同化技术的发展,不同来源、不同空间分辨率的数据实现了有机融合,产生了一系列陆面融合资料。目前,国际上比较主流的陆面数据同化系统包括全球陆面数据同化系统(Global Land Data Assimilation System, GLDAS)<sup>[10]</sup>、北美陆面数据同化系统(North American

Land Data Assimilation System, NLDAS)等。2013 年,中国气象局也开始了中国气象局陆面数据同化系统的建设<sup>[11]</sup>,对土壤湿度、温度等数据的适用性进行了大量研究<sup>[12-13]</sup>,但是对中国区域潜热通量的研究较少。另外,以往对潜热通量的研究多是进行单点实验,叶丹等<sup>[14]</sup>基于兰州大学半干旱气候与环境观测站分析了 Noah-MP 不同参数化方案的模拟效果,谢志鹏等<sup>[15]</sup>基于那曲站数据分析了 CLM4.5 模拟效果。模型的质量是开展研究的前提和基础,在数据使用之前对数据进行精度评价是必不可少的,Cai 等<sup>[16]</sup>使用 NLDAS 北美陆面数据同化系统数据评估了美国本土 4 种陆地表面模型的性能,结果表明 CLM4 在模拟 ET 方面表现最好;陈莹莹等<sup>[17]</sup>调用 GLDAS 的 Noah 模式对中国区域地表能量通量进行了模拟分析,从残差的角度得出 GLDAS 对中国区域地势相对低平的华北平原、黄土高原、蒙古草原和西北干旱区的模拟效果好于海拔较高的青藏高原和纬度较高的东北地区以及内蒙古东部区;李宏宇等<sup>[18]</sup>分析研究了草原和森林两种下垫面 7 个站点月尺度上多种再分析资料和模式资料的质量。

综上所述,虽然前人对潜热通量的研究已获得一定的成果,但由于观测资料稀少,多数研究基于单点数据或者单个时间尺度进行模拟或验证,对多个站点不同下垫面潜热资料精度评价的研究报道较少。因此,本研究选择不同下垫面的 12 个站点数据,采用较长时间的观测资料对基于 CLDAS 驱动下的三个陆面模式(Community Land Model, CLM; Noah; Noah-MP)以及 GLDAS-Noah 模拟结果进行精度评价,以期模拟结果的改进提供一定的参考。

## 1 数据与方法

### 1.1 观测资料

潜热通量的观测主要来源于涡动相关系统, 包括三维超声风速仪 CSAT3 (美国, Camp-bell Scientific, Inc.)、开路式水汽二氧化碳分析仪 LI-7500RS (美国, LI-COR Biosciences) 以及 CR3000 数据采集器。涡动相关法是一种直接测定物质垂直湍流通量的方法。与其它处理方法相比, 涡动相关法所得的湍流通量数据均基于实际测量值, 不包含任何经验关系或假设, 即通过高频测量风速脉动、温度、水汽浓度, 从而计算某一时间段内 (通常为 30min) 平均垂直感热通量和潜热通量的值。目前, 涡动相关法是国内外公认的测量热通量较为可靠的方法。

选取在中国区域内分布相对均匀、观测时间超过两年且分别代表混合林、针叶林、草原、高寒草甸、农田、湿地、荒漠和戈壁 8 种植被下垫面特点的 12 个通量塔站点观测的潜热通量数据, 站点信息见表 1。戈壁站和花寨子站位于甘肃省张掖市, 阿柔位于青海省祁连县, 以上 3 个站点数据来自黑河综合遥感实验, 发布的观测数据质量分为三个量级, 质量标识分别为 0、1 和 2, 验证时只保留质量标识为 0 和 1 的数据; 大兴站位于北京市大兴区魏善庄, 下垫面为玉米/小麦、瓜果, 数据来自于海河流域多尺度地表通量与气象要素观测数据集, 其发布观测数据的质量标识分为 9 级, 剔除质量标识为 9 的观

测数据; 戈壁站、花寨子站、阿柔站和大兴数据均来源于国家青藏高原科学数据中心 (<http://data.tpd.ac.cn>)。青藏高原的那曲站和安多站代表高寒草地生态系统类型, 数据来源于青藏高原第三次科学考察实验数据集 (<http://tipex.data.cma.cn/tipex>); 长白山站、千烟洲站、海北灌丛、海北湿地站、内蒙古站和当雄站 2008–2010 年数据均来自中国通量观测研究联盟 ChinaFlux (<http://www.chinaflux.org/>)。站点数据均经过去野点、去趋势、坐标旋转、频率响应校正、超声虚温校正和 WPL 校正等程序处理<sup>[19–21]</sup>。

### 1.2 陆面模式资料

(1) 由美国航空航天局戈达德空间飞行中心 NASA/GSFC (National Aeronautics and Space Administration/ Goddard Space Flight Center)、美国海洋和大气局 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 和国家环境预报中心 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 联合开发的全球陆面数据同化系统 GLDAS-2 中的 NOAH 模式输出产品, 时间分辨率为 3h, 空间分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

(2) 由 CLDAS 大气驱动场产品 (V2.0) 驱动 CLM、Noah、Noah-MP 3 个陆面模式模拟潜热通量的结果。针对 CLM、Noah 和 Noah-MP 3 个陆面模式, 利用模式自带的静态参数数据分别制作  $0.0625^{\circ} \times 0.0625^{\circ}$  等经纬度网格的地表参数数据, 作为

表 1 站点基本信息

Table 1 Basic information of sites

站点 Station	经度 Longitude (°E)	纬度 Latitude (°N)	海拔 Altitude (m)	时间范围 Period	下垫面性质 Land surface condition
长白山 Cbs	128.083	42.4	738	2008–2010	混合林 Mixed forest (MF)
千烟洲 Qyz	115.06	26.7333	110.8	2008–2010	针叶林 Coniferous forest(CNF)
海北灌丛 Hbgc	101.3312	37.66	3250	2008–2010	草原 Grassland(GRA)
海北湿地 Hbsd	101.31	37.61	3160	2008–2009	湿地 Wetland(WET)
内蒙古 Nmg	116.68	43.55	1189	2008–2010	草原 Grassland(GRA)
当雄 Dx	91.083	30.85	4333	2008–2010	草原 Grassland(GRA)
安多 Ad	91.62	32.24	4695	2014–2016	草甸 Meadow(MD)
那曲 Nq	91.9	32.24	4509	2014–2016	草甸 Meadow(MD)
大兴站 Dxz	116.4271	39.6213	20	2008–2010	农田 Cropland(CL)
阿柔 Ar	100.4643	38.0473	3033	2013–2017	草甸 Meadow(MD)
花寨子 Hzz	100.3201	38.7659	1731	2013–2018	荒漠 Desert(DES)
戈壁 Gb	100.30420	38.91496	1562	2012–2014	戈壁 GoBi (GB)

陆面模式输入数据。再利用“CLDAS 大气驱动场产品 (V2.0)”对 3 个陆面模式进行 spin-up, 分别制作得到每个陆面模式的初始场。CLDAS2.0 大气驱动产品来自国家气象信息中心, 覆盖亚洲区域 (0–65°N, 60–160°E), 空间分辨率为 0.0625°×0.0625°, 时间分辨率 1h, 包括 2m 气温、2m 比湿、10m 风速、地面气压、降水<sup>[22]</sup>、短波辐射<sup>[23]</sup>6 个要素。经 2400 余个国家级自动站观测数据评估中国区域 2m 气温、2m 比湿、10m 风速、地面气压、小时降水产品。朱智等<sup>[24]</sup>研究表明, 与国际和国内同类产品相比, 该产品在中国区域质量更高, 时空分布特征更为合理准确。最后利用驱动数据和初始场信息驱动 3 个陆面模式得到地表潜热通量的模拟结果。

### 1.3 分析方法

将模式资料和观测资料均处理成 3 h 分辨率数据。采用双线性插值方法将模拟结果插值到站点, 即在经向和纬向分别进行线性插值, 根据实际站点与周围 4 个邻点的距离确定相应的权重, 从而计算站点数值。利用平均值法, 将匹配后的小时资料进行处理得到多年小时平均 (0: 00–23: 00 的每 3h 平均值)、日平均、月平均和年平均潜热通量数据, 以分析在不同时间尺度上的模拟效果。

定量统计方法主要包括回归分析、无量纲化和误差分析。每个数学方法评估模式模拟都有一定的局限性, 精度验证和评价指标包括斜率、截距、相关系数(R)、平均偏差 (ME)、均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 和 Nash 效率系数 (Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient, NSE)。

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i) \tag{1}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{N}} \tag{2}$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \tag{3}$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2}} \tag{4}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \tag{5}$$

式中, N 代表样本个数。S<sub>i</sub> 代表 3 种模式模拟的

潜热通量数值 (W·m<sup>-2</sup>),  $\bar{S}$  为其平均值 (W·m<sup>-2</sup>)。O<sub>i</sub> 为各站通量塔观测的潜热通量数值 (W·m<sup>-2</sup>),  $\bar{O}$  为平均值 (W·m<sup>-2</sup>)。其中, 斜率和截距是模拟值与观测值拟合线的两个指标, 斜率越接近 1, 截距越接近 0 表明模拟值越接近观测值, 模拟效果越好; 平均误差 ME 可以量化模拟值相对于观测值的偏差; 均方根误差经常用于量化模拟结果的准确性, RMSE 越小表明模拟值数值上与观测值越接近; 相关系数 R 用于检测模拟值与站点观测值在时间上的一致性, R 越接近 1, 一致性越高。NSE 常用来表示模拟结果的效率, 范围为负无穷到 1, NSE 在 [0.0, 1.0] 通常被认为是模拟性能在可接受的范围, 越接近 1 表示模拟结果与实际观测值越接近, 当 NSE 值小于 0 时, 表明模拟性能较差<sup>[25]</sup>。

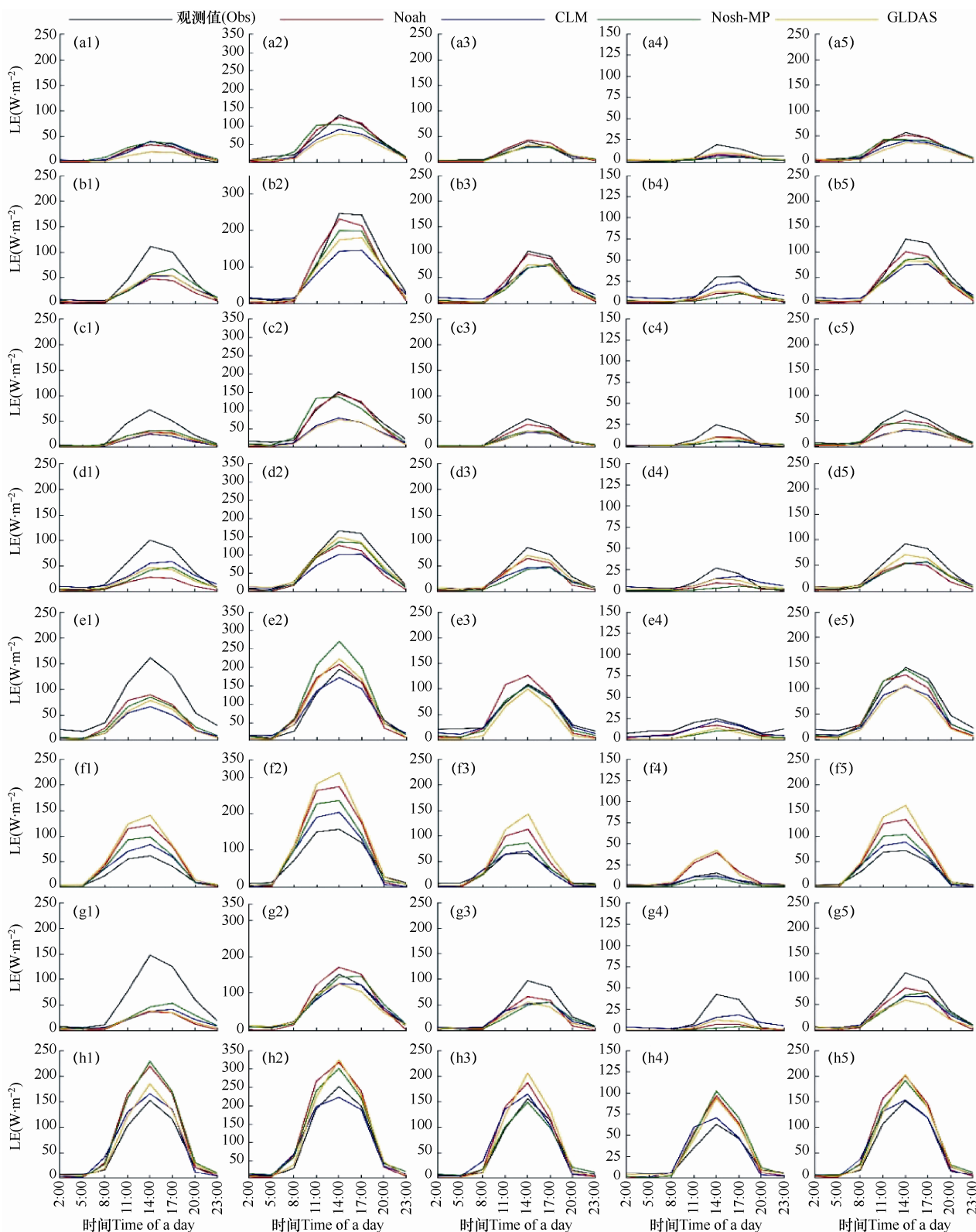
## 2 结果与分析

### 2.1 小时尺度潜热通量产品的精度评价

#### 2.1.1 不同下垫面潜热通量的日变化特征

由图 1 可见, 不同下垫面潜热通量观测数据的季节平均和年平均值均表现出单峰型的日变化趋势, 每日峰值出现在午后, 夜间数值较低, 接近 0, 全天均为正值, 但是全天数值上相差较大, 年均日动态最大值为 152.13W·m<sup>-2</sup>, 出现在针叶林下垫面的 14: 00, 最小值为 67.94W·m<sup>-2</sup>, 出现在戈壁站的 14: 00。由图 2 可以看出, 4 个模式模拟结果的表现有一定差异, 除 Noah-MP 和 CLM 在草甸、草原和湿地上模拟峰值出现时间落后于观测数据, 其余数据模拟值峰值出现时间与观测结果均一致。在不同季节, 4 个潜热通量日值的模拟结果也有一定的差异, (1) 针叶林、草原、荒漠、混合林、戈壁和草甸观测数据均满足日变化幅度夏季最高, 冬季最低, 春秋相差不大的规律, 模式能很好地模拟出夏季最高, 冬季最低的变化规律, 对春秋两季变化规律的模拟效果较差。(2) 农田四季的日变化趋势差异较大, 具体表现为夏季数值是秋季的两倍, 春季介于两者之间, 冬季最低, 模式模拟结果均表现为夏季>秋季>春季>冬季, 春秋两季表现相反。(3) 湿地观测数据表现出春季和夏季日变化相差不大, 并为最高值, 同时冬季数值最低的变化规律, 这与陆宜承等<sup>[26]</sup>的结论一致, 但是 4 个模式均表现出夏季>秋季>春季>冬季的变化规律, 春季模拟值与观测数据相差较大。

由上述分析可知, 模式模拟结果基本能反应潜热通量的日变化特征, 但是, 从与站点数据的差异



a.戈壁 GB (戈壁站 Gb), b.草甸 MD (安多 Ad、那曲 Nq、阿柔 Ar), c.荒漠 DES (花寨子 Hzz), d.草原 GRA (海北灌丛 Hbgc、内蒙古 Nmg、当雄 Dx), e.农田 CL (大兴站 Dxz), f.混合林 MF (长白山 Cbs), g.湿地 WET (海北湿地 Hbsd), h.针叶林 CNF (千烟洲 Qyz)。图 2、图 3 同 The same as Fig.2 and Fig.3. 1.春季 Spring, 2.夏季 Summer, 3.秋季 Autumn, 4.冬季 Winter, 5.全年 Annual

图 1 8 种不同下垫面站点潜热通量观测值和陆面模式输出值 (LE) 的季节平均日变化和年变化

Fig. 1 Average diurnal variation of latent heat flux observed at eight different underlying surface types and output value (LE) of three land surface models

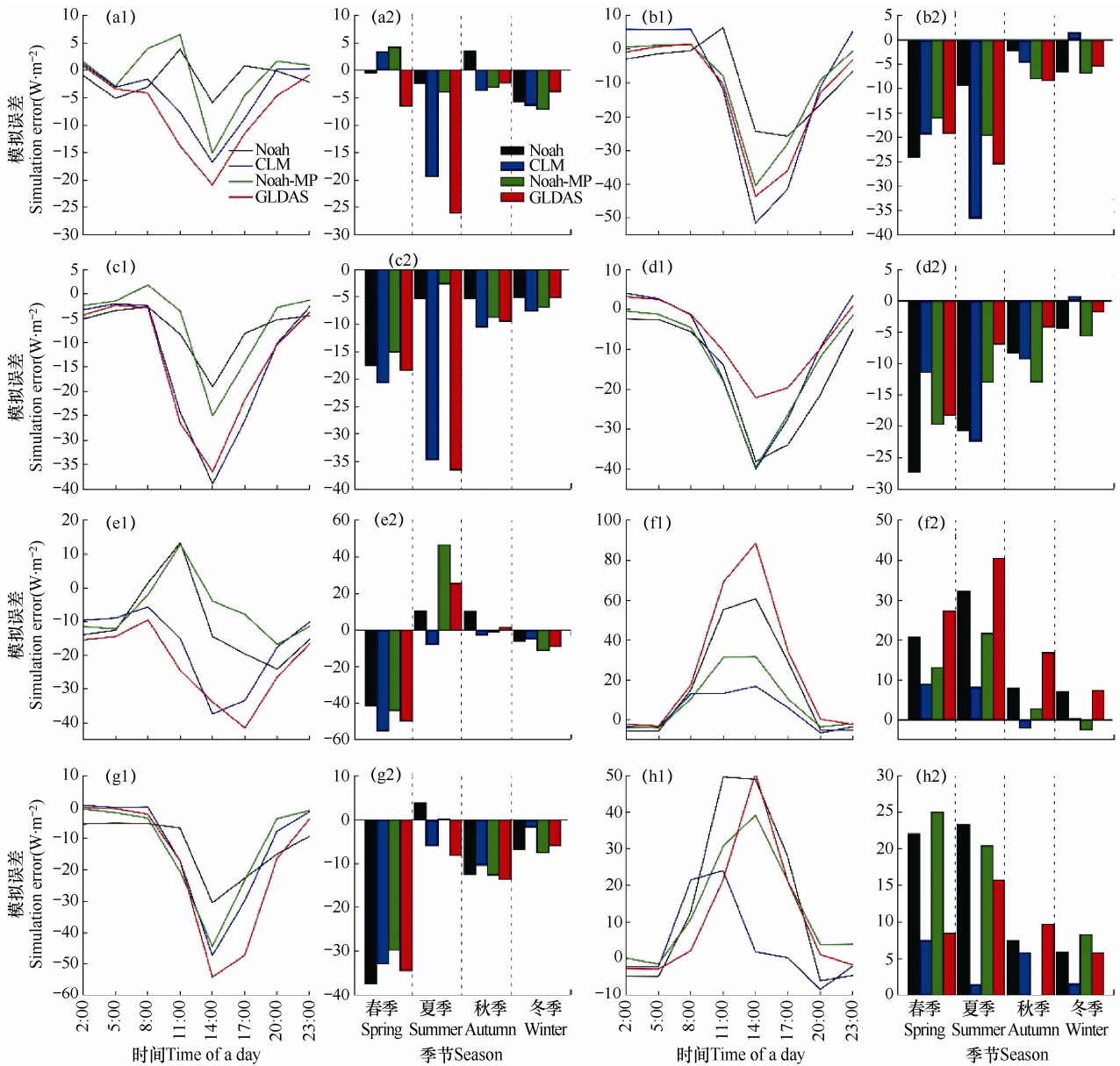


图 2 4 种模式模拟结果在不同下垫面模拟误差的平均日内变化 (1) 和季节变化 (2)

Fig. 2 Annual mean daily change(1) and seasonal change(2) of simulation error (simulated value minus measured value) on different underlying surfaces of the 4 models

上看, 4 个模拟结果误差的年平均日变化有一定差异, 表现为 (1) 在草甸、荒漠、草原、混合林和湿地, 4 个模式模拟误差的年平均日变化特征相似, 混合林处模拟误差平均日变化基本为正值, 其余 4 种下垫面模拟误差平均日变化基本为负值。(2) 在戈壁和农田, Noah 和 Noah-MP 模拟误差的日变化特征相似, 即白天存在一定正偏差, 夜晚基本是负偏差, CLM 和 GLDAS 的日变化特征相似, 即基本均为负偏差。(3) 对于针叶林下垫面, CLM 模拟误差峰值时间较其它 3 个模式提前。

4 个模式在不同季节的表现也不同: (1) 混合林和针叶林基本均为正偏差, Noah-MP 模式在秋季的模拟值与观测值更接近, 其余季节 CLM 模式的模拟值与观测值更接近。(2) 其余 6 种下垫面, 四季基本为负偏差。Noah 在戈壁的春夏两季、草甸的夏秋两季、荒漠的秋冬两季以及农田的春季模拟值与观测值更接近; CLM 在草甸的冬季、草原的春冬两季、农田的夏冬两季以及湿地的秋冬两季模拟值与观测值更接近; Noah-MP 在草甸的春季、荒漠的春夏两季、农田的秋季以及湿地的春夏两季模拟值与观测

值更接近; GLDAS 在戈壁的秋冬和草原的夏秋模拟值与观测值更接近。

2.1.2 潜热通量精度评价

表 2 给出了小时尺度上 4 个陆面模式模拟数据在不同下垫面上模拟结果的评价指标。由表可知, (1) GLDAS 在不同下垫面上拟合线的斜率波动较大(0.94±0.68), Noah 的斜率变化范围最小(0.73±0.35), 4 个模式的截距基本为正值, 在戈壁处截距最大, 均在 10W·m<sup>-2</sup> 以上。(2) 从 RMSE 上看, 除针叶林,

GLDAS 的 RMSE 介于 CLDAS 驱动下 3 个陆面模式模拟结果的 RMSE 之间, 其余下垫面, CLDAS 驱动下的 3 个陆面模式的 RMSE 均小于 GLDAS-Noah。CLM 在戈壁、草原、混合林和针叶林下垫面上的 RMSE 较小, Noah-MP 在草甸和湿地的 RMSE 最小, Noah 在荒漠和农田的 RMSE 最小。(3) 各模式在不同下垫面上均能很好地模拟出潜热通量的变化趋势, R 值都在 0.6 以上(除 GLDAS 在戈壁站 R 为 0.54), 但是在不同的下垫面表现不同。在混合

表 2 8 种下垫面上 4 个陆面模式潜热通量的模拟值评价指标

Table 2 Evaluation index of simulated values of latent heat flux of four land surface models on eight underlying surfaces

模式 Model data	斜率 Slope	截距 Intercept (W·m <sup>-2</sup> )	RMSE(W·m <sup>-2</sup> )	R	NSE	
戈壁 GB	Noah	0.49	16.81	44.51	0.66**	0.43
	CLM	0.45	12.02	41.27	0.74**	0.51
	Noah-MP	0.45	16.69	44.00	0.67**	0.45
	GLDAS	0.26	15.64	50.93	0.54**	0.26
草甸 MD	Noah	0.78	1.67	44.61	0.86**	0.72
	CLM	0.48	12.80	51.32	0.88**	0.63
	Noah-MP	0.66	5.76	43.31	0.88**	0.74
	GLDAS	0.57	8.33	54.56	0.78**	0.58
荒漠 DES	Noah	0.53	8.27	44.56	0.68**	0.43
	CLM	0.38	4.14	44.68	0.78**	0.42
	Noah-MP	0.50	9.26	45.11	0.67**	0.41
	GLDAS	0.26	9.19	50.94	0.60**	0.25
草原 GRA	Noah	0.50	2.96	41.63	0.77**	0.51
	CLM	0.42	10.30	40.46	0.80**	0.54
	Noah-MP	0.54	3.85	38.31	0.81**	0.58
	GLDAS	0.58	7.24	42.05	0.72**	0.50
农田 CL	Noah	0.80	7.63	51.33	0.80**	0.58
	CLM	0.60	13.27	62.58	0.70**	0.38
	Noah-MP	0.89	6.04	63.44	0.75**	0.36
	GLDAS	0.78	8.09	65.24	0.71**	0.32
混合林 MF	Noah	1.51	1.29	46.31	0.90**	0.11
	CLM	1.08	1.38	26.05	0.90**	0.72
	Noah-MP	1.29	-0.28	34.42	0.90**	0.51
	GLDAS	1.61	4.04	60.29	0.86**	-0.51
湿地 WET	Noah	0.64	1.90	44.09	0.71**	0.43
	CLM	0.46	8.70	41.64	0.74**	0.50
	Noah-MP	0.54	6.10	41.49	0.73**	0.50
	GLDAS	0.47	5.65	46.56	0.66**	0.37
针叶林 CNF	Noah	1.14	7.21	42.59	0.92**	0.73
	CLM	0.82	13.81	35.60	0.90**	0.81
	Noah-MP	1.02	12.35	44.87	0.89**	0.70
	GLDAS	1.06	6.41	43.18	0.90**	0.72

注: \*、\*\*分别表示相关系数通过 0.05、0.01 水平的显著性检验。

Note: \* is P<0.05, \*\* is P<0.01.

林和针叶林 R 较大 (0.85 以上), 其中 Noah 的表现较好; 在戈壁站, 模式对潜热通量变化的模拟能力稍差, 其中 CLM 的表现较好 (R 为 0.74); 基于 CLDAS 驱动下的 3 个陆面模式对潜热通量变化的模拟效果略优于 GLDAS-Noah。(4) 从表 2 还可以看出, NSE 基本为正值 (除 GLDAS 在混合林为负值), 基于 CLDAS 驱动下的 3 个陆面模式的 NSE 系数均高于 GLDAS, CLM 在戈壁、混合林、湿地和针叶林表现较好, Noah 在荒漠和农田表现较好, Noah-MP 在草甸和草原表现较好。

## 2.2 日和月尺度潜热通量的精度评价

### 2.2.1 潜热通量变化过程

由图 3 可知, 各模式模拟值与观测数据具有相似的年内变化特征, 呈现夏季最高的单峰型变化趋势, 但在不同的下垫面表现又有所不同。在戈壁、草甸、荒漠和草原下垫面上, 模拟数据基本在观测数据曲线附近变化, 在长白山和千烟洲两个森林站, 模式数据高估了实际潜热通量。下垫面为农田的大兴站, 观测数据有着双峰型的变化趋势, 峰值出现在 5 月和 8 月, 而各模式模拟值都呈单峰型的变化

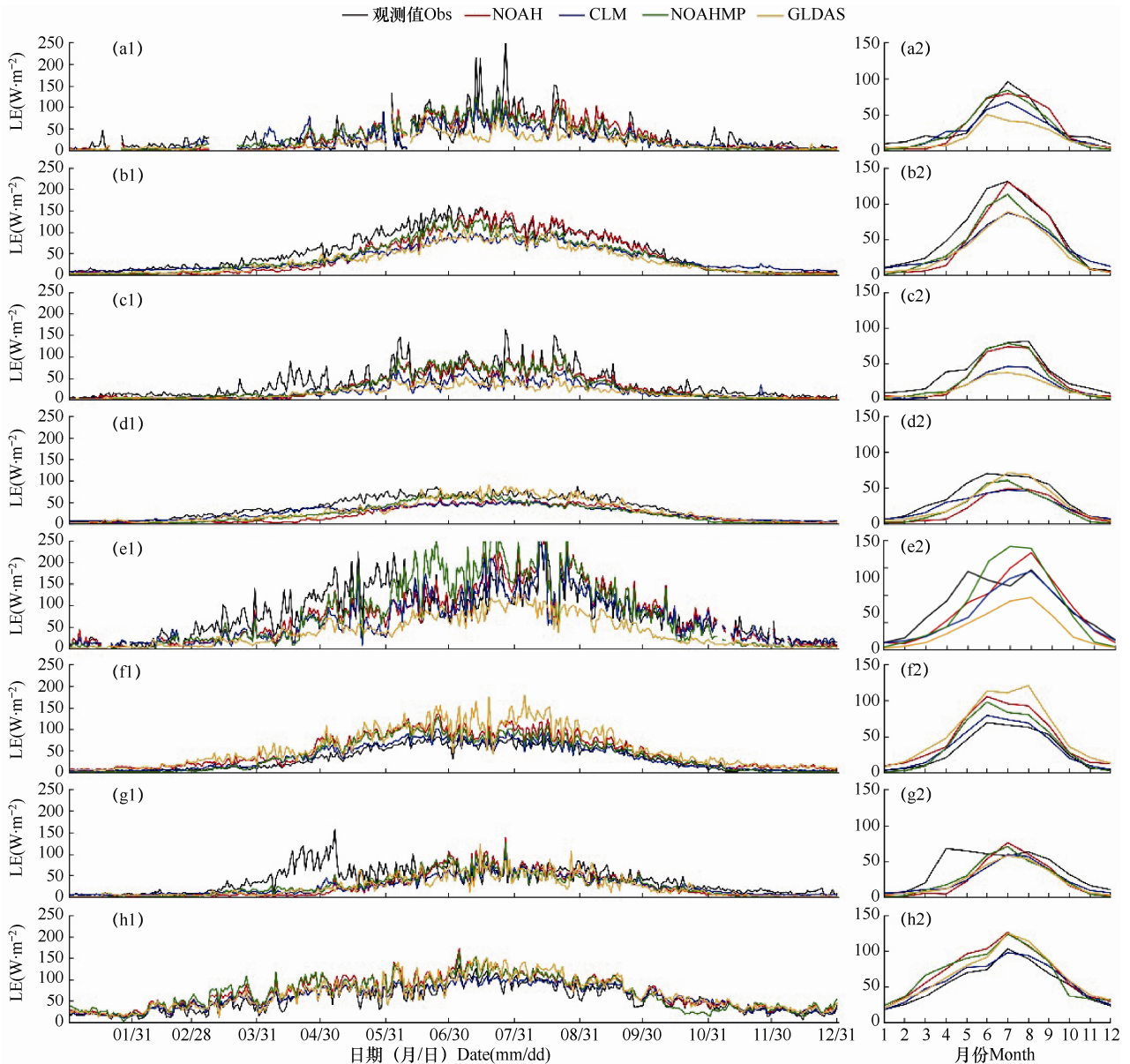


图 3 8 种不同下垫面站点潜热通量观测值和陆面模式输出值 (LE) 的多年日平均 (1) 和月平均 (2) 变化趋势

Fig. 3 Average annual(1) and monthly(2) variation of observed latent heat flux and land surface model output value (LE) at eight sites with different underlying surface types



趋势, 陆面模式能模拟出 8 月出现的峰值。大兴所在的地区农业上采取的是冬小麦夏玉米的种植方式, 春天需要补充灌溉以保证农作物对水分的需求, 灌溉后土壤含水量较高, 蒸发量增加, 潜热通量明显升高, 感热通量明显降低, 而陆面模式不能模拟出灌溉的情况, 导致模拟的潜热通量在春季出现一定的低估现象。下垫面为湿地的海北湿地站, 从观测数据来看, 潜热通量在春季显著增加, 夏季保持高值变

化幅度不大, 秋季有明显的下降趋势, 冬季潜热保持低值, 模式模拟结果在冰雪消融的初春与实际相差较大, 以往研究表明, 白天土壤融化之后潜热通量会显著升高, 冻结、融化前后的差异主要由于土壤体积含水量的变化所致<sup>[27]</sup>, 但 4 个模式模拟结果均未模拟出融化后潜热通量显著增加的变化趋势。

### 2.2.2 潜热通量精度评价

图 4 展示了模式资料与站点观测数据在日尺度

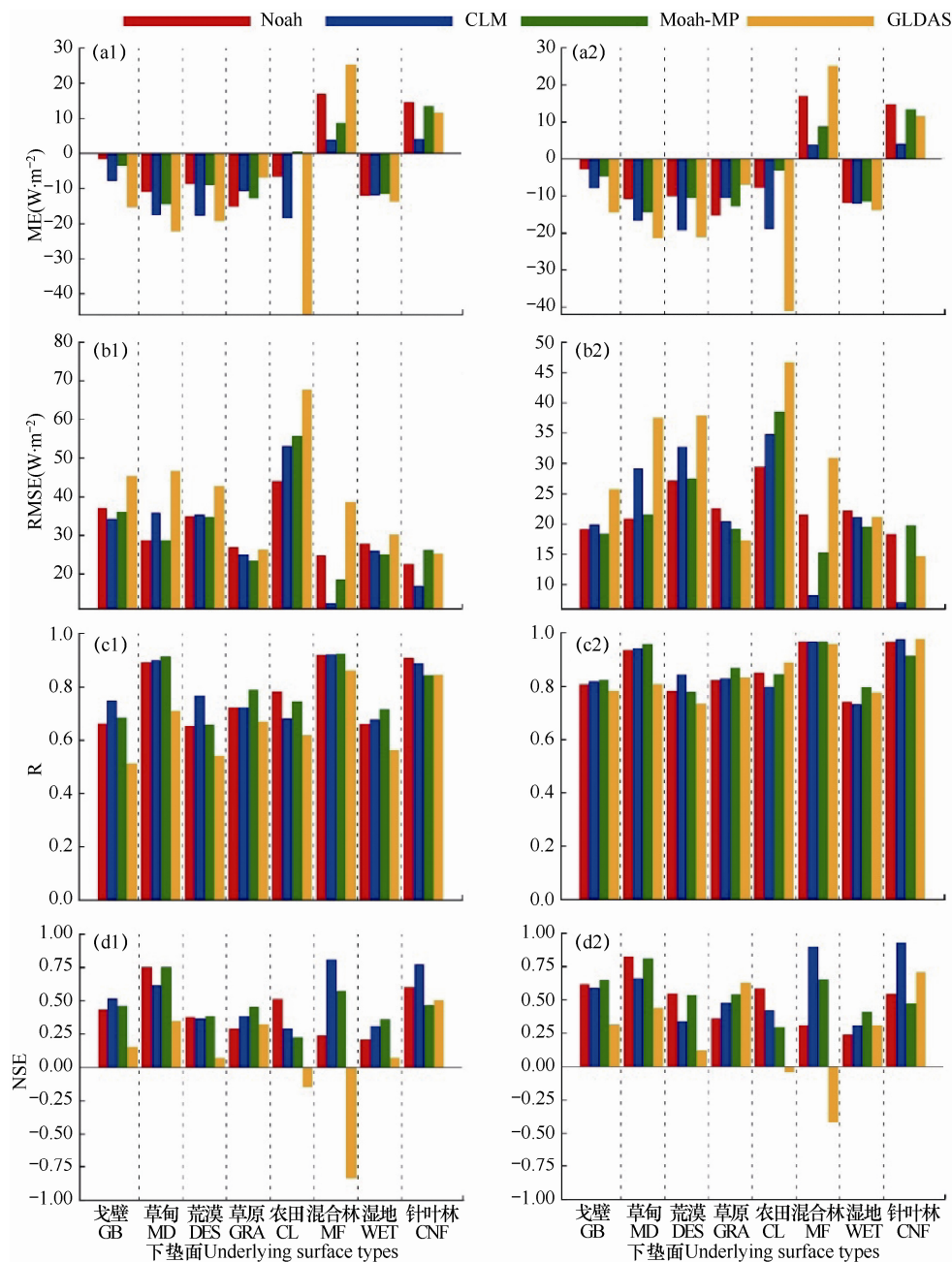


图 4 模式与观测数据在日尺度 (1) 和月尺度 (2) 的统计指标

Fig. 4 Statistical indices of model and observed data on daily(1) and monthly(2) scale

和月尺度上的统计指标。由平均偏差统计（图 4a1-图 4b2）可知，模式模拟的潜热通量与观测值的平均偏差在混合林和针叶林两个森林站为正值，其余下垫面基本为负值；陆面模式在大多数站点的模拟偏差较小，平均偏差在 $-20\sim 20\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，均方根误差在 $40\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 以下，农田模式资料与站点观测偏差较大，结合图 3 可知，偏差主要集中在春季。从相关系数统计（图 4c1、图 4c2）可以看出，在所有下垫面各模式模拟的潜热通量与观测值呈极显著正相关关系（ $P<0.01$ ）；日尺度上，CLDAS 驱动下的 3 个陆面模式模拟值与观测值的相关性均高于 GLDAS，月尺度上，戈壁、草甸、荒漠和混合林下垫面上，CLDAS 的 R 值明显高于 GLDAS，草原、湿地和针叶林垫面上，GLDAS 的 R 值介于 CLDAS 驱动下的 3 个陆面模式之间，在农田，GLDAS-Noah 的 R 值稍高于 CLDAS 驱动下的 3 个陆面模式结果。比较模式模拟值与站点观测值的 NSE 可知，除 GLDAS 在农田和混合林处为负值外，模式模拟值与观测值的 NSE 均为正值；日尺度上，NSE 在  $0.07\sim 0.81$  区间，草原和针叶林下垫面上，GLDAS 模拟值与观测的 NSE

介于 CLDAS 驱动的 3 个陆面模式之间，其余下垫面，CLDAS 驱动的 NSE 明显高于 GLDAS；月尺度上，NSE 在  $0.12\sim 0.93$  区间，草原下垫面上，GLDAS 的 NSE 高于 CLDAS 驱动下的 NSE，针叶林和湿地上，GLDAS 的 NSE 介于 CLDAS 驱动下的 NSE 之间，其余下垫面 CLDAS 驱动的 NSE 明显高于 GLDAS。

### 2.3 年尺度潜热通量的精度评价

把所有站点年平均数据作为一个整体来分析 4 个模式模拟结果年尺度上的模拟效果。由图 5 可知，4 个模式模拟结果与观测数据拟合线的斜率均为正值，截距基本为正值，其中 GLDAS-Noah 的截距远大于其余 3 个模拟结果，在高值区域存在明显的低估现象，模拟值与观测值的相关系数 R 低于 0.5，模拟效果稍差。基于 CLDAS 驱动下的 3 个模式模拟效果较为接近，且在不同站点模拟效果较为稳定，R 值均在 0.8 以上，RMSE 在  $20\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  以下，NSE 系数在  $0\sim 1$  之间，其中 CLDAS-Noah-MP 的趋势线与 1:1 拟合线最接近，斜率最接近 1 且 R 最高，RMSE 最小，NSE 最大，表现出最好的模拟效果。

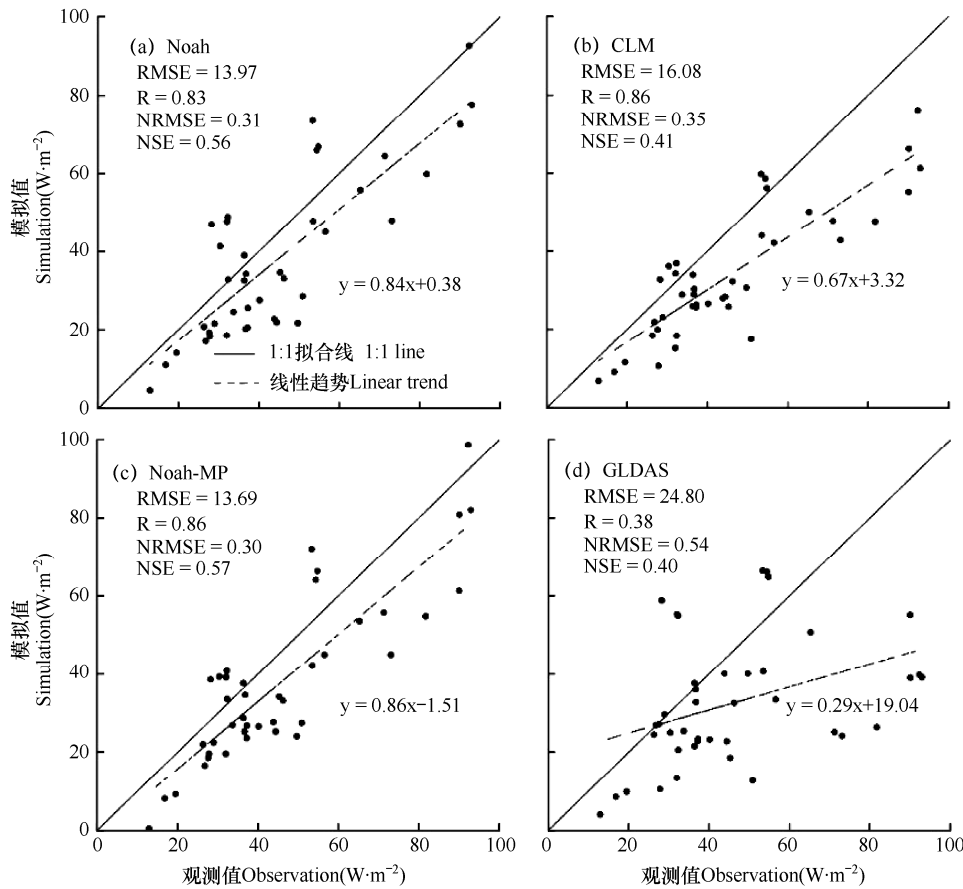


图 5 12 个站点潜热通量模拟值与观测数据在年尺度的散点图

Fig. 5 Annual scatter plots of simulated latent heat flux values and observed data at 12 sites

### 3 结论与讨论

#### 3.1 讨论

##### 3.1.1 模型在不同时间尺度的模拟效果

在不同时间尺度上, 最优模型的选择不是一成不变的。小时尺度上, CLM 模型模拟值与观测值的 R 值较高, 日尺度和月尺度上, Noah-MP 模型的 R 值较高, 3 个时间尺度上 NSE 较高的均为 CLM 模型。各模型模拟值与观测值的相关系数和 NSE 从小到日尺度均经历了先降低后提高的变化趋势, 表现为从 3h 尺度到日尺度, 基于 CLDAS 驱动下的模式模拟值与观测值的 R 和 NSE 在荒漠、草原、湿地、农田和针叶林下垫面上存在不同程度的降低, 其中 Noah-MP 的 R 值降低程度最轻, 但其 NSE 降低最多, GLDAS 模式的 R 值在所有下垫面都存在降低现象且降低值最多; 日尺度到月尺度, 4 个模型模拟结果与观测值的 R 和 NSE 均大幅上升。

##### 3.1.2 模型在不同下垫面的模拟效果

各模式模拟效果存在一定的一致性, 在森林站点处存在高估, 在其余下垫面存在低估, 这与李宏宇的 CLM 在草地存在低估, 森林存在高估的研究结果一致<sup>[18]</sup>。森林处模拟的高估可能与 EC 观测值的高低有关。多项研究表明, 在森林下垫面的 EC 观测研究中冠层热储量会对能量闭合产生较大的影响从而导致对潜热的低估<sup>[28-29]</sup>。农田观测数据表现为双峰型的年变化, 而模式只能模拟出 8 月的峰值。农田处的热量交换较为复杂, 包含了土壤、灌溉水、大气以及农作物生长的影响<sup>[30]</sup>, 在灌浆成熟期由于灌溉等人为因素的影响会导致模拟值与观测值之间的差异。湿地 4 月土壤融化后潜热通量显著升高, 同张海宏<sup>[27]</sup>研究结论一致, 模式在土壤冻结和融化期间的模拟有待加强。

不同模型在同一下垫面的表现各有优劣。从 NSE 上看, Noah 在荒漠和农田的模拟效果较好, CLM 在混合林和针叶林模拟效果较好, Noah-MP 在湿地模拟效果较好, 以上 5 个下垫面的站点在多长时间尺度上最优模型是固定的, 戈壁、草甸和草原上的站点在不同时间尺度上, 最优模型则不固定。在戈壁下垫面, 小时和日尺度上 CLM 是最优模型, 月尺度上 Noah-MP 是最优模型; 在草甸和草原下垫面, 小时尺度上 Noah-MP 是最优模型, 日尺度和月尺度上 Noah 是最优模型。

综上所述, 陆面模式的模拟效果在不同的时间尺度和不同下垫面不是一成不变的, 对其进行不同时间尺度和下垫面的精度评价有利于更好地了解模拟结果。由于数据观测难度较大, 分布较分散, 数据的代表性有限, 在中国的中部和西北部地区缺少站点进行验证, 在具体的地点有待布置更多的站点来进行分析。另外, 本研究没有对空间尺度进行分析, 今后可对比遥感产品以及国内外广泛使用的数据进行进一步分析。总体来说, CLDAS 驱动下的陆面模式模拟效果较好, 但 3 个陆面模式在不同下垫面的表现效果不同, 未来可以采取基于陆面模式的多模式集成的方法避免单一模式模拟造成的严重偏差, 集合多个数据集的特点, 弥补单个数据集的不足。

#### 3.2 结论

(1) 4 个模式模拟结果都能较好地再现各下垫面站点季节和年平均日变化趋势, 且峰值时间也较为一致。数值上秋冬两季模拟值与观测值较为接近, 春季相差较大。GLDAS 在戈壁的秋冬两季和草原的夏秋两季日变化模拟值与观测值更接近, 其余下垫面上, 基于 CLDAS 驱动下的 3 个陆面模式模拟值与观测值更接近。

(2) 在不同时间尺度上, CLDAS 系列模式的模拟效果基本优于 GLDAS, 且时间分辨率和空间分辨率更高。小时尺度上, CLM 表现较优, 日尺度和月尺度上, Noah-MP 表现较优。

(3) 不同下垫面上模式模拟结果存在共性, 即在混合林和针叶林两个森林站点存在高估现象, 在其余下垫面存在低估现象。没有一个模式在所有下垫面均表现为最优, CLM 在戈壁、混合林和针叶林站点为最优模型, Noah 在荒漠和农田站点为最优模型, Noah-MP 在草甸、草原和湿地为最优模型。

#### 参考文献 References

- [1] Wang K, Dickinson R E. A review of global terrestrial evapotranspiration: observation, modeling, climatology, and climatic variability[J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(2): RG2005. doi: 10.1029/2011RG000373.
- [2] 张功, 张劲松, 孟平, 等. 双波长交互法测算华北人工林平均水热通量的应用分析[J]. *中国农业气象*, 2018, 39(6): 380-389.

- Zhang G,Zhang J S,Meng P,et al.Application of two-wavelength bichromatic correlation method to calculate the average surface energy and water vapor fluxes in plantation north China[J].Chinese Journal of Agrometeorology, 2018,39(6):380-389.(in Chinese)
- [3] 丁日升,康绍忠,张彦群,等.干旱内陆区玉米田潜热通量多层模型研究[J].水利学报,2014,45(1):27-35.  
Ding R S,Kang S Z,Zhang Y Q,et al.Multi-layer model of water vapor and heat fluxes over maize field in an arid inland region[J].Journal of Hydraulic,2014,45(1):27-35.(in Chinese)
- [4] 江晓东,华梦飞,胡凝,等.不同水源灌溉对水稻高温热害影响的微气象学分析[J].中国农业气象,2019,40(4):260-268.  
Jiang X D,Hua M F,Hu N,et al.Micrometeorological analysis of the effects of different irrigation water sources on the heat stress of rice[J].Chinese Journal of Agrometeorology, 2019,40(4):260-268.(in Chinese)
- [5] 吴方涛,曹生奎,曹广超,等.青海湖 2 种高寒高草湿草甸湿地生态系统潜热通量比较[J].水土保持学报, 2017, 31(5): 176-182.  
Wu F T,Cao S K,Cao G C,et al.Comparative study on hydrothermal fluxes of two alpine kobresia wet meadow wetland ecosystems in Qinghai Lake[J].Journal of Soil and Water Conservation,2017,31(5):176-182.(in Chinese)
- [6] 张法伟,韩赟,李红琴,等.青藏高原高寒金露梅灌丛湍流热通量交换与分配特征及其环境影响机制[J].中国农业气象,2020,41(2):76-85.  
Zhang F W,Han Y,Li H Q,et al.Turbulent heat exchange and partitioning and its environmental controls between the atmosphere and an alpine potentilla fruticosa shrublands over the Qinghai-Tibetan plateau[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2020,41(2):76-85.(in Chinese)
- [7] 张芬,刘绍民,徐自为,等.张掖绿洲-荒漠区域近地层微气象与水热交换特征[J].高原气象,2016,35(5):1233-1247.  
Zhang F,Liu S M,Xu Z W,et al.Characteristics of micrometeorology and energy transfer in the surface layer over the Zhangye Oasis-desert area[J].Plateau Meteorology, 2016, 35(5):1233-1247.(in Chinese)
- [8] 周甘霖,李耀辉,孙旭映,等.我国北方不同下垫面地表能量通量的变化特征[J].干旱气象,2019,37(4):577-585.  
Zhou G L,Li Y H,Sun X Y,et al.Characteristics of surface energy fluxes over different types of underlying surfaces in north China[J].Journal of Arid Meteorology, 2019,37(4): 577-585.(in Chinese)
- [9] 史学丽.陆面过程模式研究简评[J].应用气象学报,2001, 12(1):102-112.  
Shi X L.Research on land-surface process modeling:a review[J].Journal of Applied Meteorological Science, 2001,12(1):102-112.(in Chinese)
- [10] Rodell M,Houser P R,Jambor U E A,et al.The global land data assimilation system[J].Bull Am Meteor Soc,2004, 85(3): 381-394.
- [11] 龚伟伟.CMA 陆面数据同化系统(CLDAS)产品评估[D].南京:南京信息工程大学,2014.  
Gong W W.Evaluation on the products of CMA Land Data Assimilation System[D].Nanjing:Nanjing University of Information Science &Technology,2014.(in Chinese)
- [12] 韩帅,师春香,姜立鹏,等.CLDAS 土壤湿度模拟结果及评估[J].应用气象学报,2017,28(3):369-378.  
Han S,Shi C X,Jiang L P,et al.The simulation and evaluation of soil moisture based on CLDAS[J].J Appl Meteor Sci,2017,28(3):369-378.(in Chinese)
- [13] 孙帅,师春香,梁晓,等.不同陆面模式对我国地表温度模拟的适用性评估[J].应用气象学报,2017,28(6):737-749.  
Sun S,Shi C X,Liang X,et al.Assessment of ground temperature simulation in China by different land surface models based on station observations[J].J Appl Meteor Sci,2017,28(6):737-749.(in Chinese)
- [14] 叶丹,张述文,王飞洋,等.基于陆面模式 Noah-MP 的不同参数化方案在半干旱区的适用性[J].大气科学, 2017,41(1): 189-201.  
Ye D,Zhang S W,Wang F Y,et al.The applicability of different parameterization schemes in semi-arid region based on Noah-MP land surface model[J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2017,41(1):189-201.(in Chinese)
- [15] 谢志鹏,胡泽勇,刘火霖,等.陆面模式 CLM4.5 对青藏高原高寒草甸地表能量交换模拟性能的评估[J].高原气象,2017,36(1):1-12.  
Xie Z P,Hu Z Y,Liu H L,et al.Evaluation of the surface energy exchange simulations of land surface model CLM 4.5 in alpine meadow over the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology,2017,36(1):1-12.(in Chinese)
- [16] Cai X,Yang Z L,Xia Y,et al.Assessment of simulated water balance from Noah,Noah - MP,CLM,and VIC over CONUS

- using the NLDAS test bed[J].*Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(24): 13751-13770.
- [17] 陈莹莹,施建成,杜今阳,等.基于 GLDAS 的中国区地表能量平衡数值试验[J].*水科学进展*, 2009, 20(1): 25-31.  
Chen Y Y, Shi J C, Du J Y, et al. Numerical experiments of surface energy balance over China area based on GLDAS[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(1): 25-31. (in Chinese)
- [18] 李宏宇. 中国大陆地区陆面能量交换及其对大尺度气候变化响应的初步分析[D]. 南京: 南京大学, 2015.  
Li H Y. Land surface energy exchange over mainland China and preliminary analyse of its responses to large-scale climate change[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015. (in Chinese)
- [19] 于贵瑞,张雷明,孙晓敏. 中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的主要进展及发展展望[J]. *地理科学进展*, 2014, 33(7): 903-917.  
Yu G R, Zhang L M, Sun X M. Progresses and prospects of Chinese terrestrial ecosystem flux observation and research network(ChinaFLUX)[J]. *Progress in Geography*, 2014, 33(7): 903-917. (in Chinese)
- [20] Liu S M, Xu Z W, Wang W Z, et al. A comparison of eddy-covariance and large aperture scintillometer measurements with respect to the energy balance closure problem[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(4): 1291-1306.
- [21] Liu S M, Xu Z W, Zhu Z L, et al. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 487: 24-38.
- [22] Sun S, Shi C X, Pan Y, et al. Applicability assessment of the 1998-2018 CLDAS multi-source precipitation fusion dataset over China[J]. *J. Meteor. Res.*, 2020, 34(4): 879-892.
- [23] 刘军建,师春香,韩帅,等.多源地面短波辐射数据融合与评估[J].*遥感技术与应用*, 2018, 33(5): 850-856.  
Liu J J, Shi C X, Han S, et al. The data fusion of multi-source downward surface solar radiation and evaluation[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(5): 850-856. (in Chinese)
- [24] 朱智. 中国区域高时空分辨率驱动数据的建立及其在 Noah-MP 陆面模式中的应用[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.  
Zhu Z. Construction of high spatial and temporal resolution forcing data and its application in Noah-MP land surface model[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2016. (in Chinese)
- [25] 罗立辉,张耀南,周剑,等.基于 WRF 驱动的 CLM 模型对青藏高原地区陆面过程模拟研究[J].*冰川冻土*, 2013, 35(3): 553-564.  
Luo L H, Zhang Y N, Zhou J, et al. Simulation and application of the land surface model CLM Driven by WRF in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geacryology*, 2013, 35(3): 553-564. (in Chinese)
- [26] 陆宣承,文军,田辉,等.若尔盖高寒湿地-大气间水热交换湍流通量的日变化特征分析[J].*高原气象*, 2020, 39(4): 719-728.  
Lu X C, Wen J, Tian H, et al. Analysis of the turbulent fluxes of water & heat exchange between the Zoige Alpine wetland and atmosphere[J]. *Plateau Meteorology*, 2020, 39(4): 719-728. (in Chinese)
- [27] 张海宏,肖宏斌,祁栋林,等.青藏高原湿地土壤冻结、融化期间的陆面过程特征[J].*气象学报*, 2017, 75(3): 481-491.  
Zhang H H, Xiao H B, Qi D L, et al. Features of land surface process over wetland at Tibetan Plateau during soil freezing and thawing periods[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2017, 75(3): 481-491. (in Chinese)
- [28] Mc Caughey J H. Energy balance storage terms in a mature mixed forest at Petawawa, Ontario: a case study[J]. *Boundary Layer Meteorology*, 1985, 31(1): 89-101.
- [29] Kormann R, Meixner F X. An analytical footprint model for non-neutral stratification[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99: 207-224.
- [30] 袁再健,沈彦俊,褚英敏,等.华北平原冬小麦生长期典型农田热、碳通量特征与过程模拟[J].*环境科学*, 2010, 31(1): 41-48.  
Yuan Z J, Sheng Y J, Chu Y M, et al. Characteristics and simulation of heat and CO<sub>2</sub> fluxes over a typical cropland during the winter wheat growing in the North China Plain[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(1): 41-48. (in Chinese)