

CLM4.5 模拟淮南山地森林陆气交换过程

戴秋丹¹ 郭振海¹ 王龙欢¹ 孙向明² 谢正辉¹ 孙菽芬¹ 肖霞³

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 (LASG), 北京 100029

² 新加坡国立大学, 新加坡 119077

³ 中国科学院大气物理研究所公共技术服务中心, 北京 100029

摘要 基于 2010-2019 年 ERA5 单层再分析资料, 结合淮南森林观测站 2016 年 5 月 1 日至 2017 年 4 月 30 日的大气边界层塔 (PBL 塔) 观测资料, 驱动陆面模式 CLM4.5, 模拟了淮南山地森林下垫面上的陆面过程; 并比较分析了不同驱动场对其影响; 同时也设计了土壤质地对土壤湿度影响的三个模拟实验。结果表明, CLM4.5 对淮南森林陆气交换过程表现了较好的模拟性能, PBL 塔观测资料驱动的总体模拟效果优于 ERA5 再分析资料的。在辐射模拟方面, CLM4.5 利用 ERA5 资料和 PBL 塔观测资料, 都很好地模拟了辐射分量, 特别是 PBL 塔观测资料驱动的全年模拟结果与观测相关系数达 0.97 以上, 均方根误差在 25.056 W m^{-2} 以下。ERA5 再分析资料强迫模拟的相关系数略低, 但也达到了 0.92, 均方根误差在 29.939 W m^{-2} 以下; 在土壤温度模拟方面, 相关系数都达到 0.98 以上; 土壤湿度模拟的相关系数都在 0.86 以上, 但系统性偏高; 对感热通量的模拟全年平均的相关系数分别为 0.72 和 0.78。实测的三层土壤质地加上深层给定的土壤质地的数据对土壤湿度的模拟结果与观测最为接近, 土壤质地的准确描述可以大幅提高土壤湿度的模拟。本研究发现 ERA5 再分析单层资料在淮南森林站精度较好, 可以应用于该山地森林区域陆气交换过程的模拟研究。

关键词 CLM4.5 陆面模式; 南北气候过渡带; 山地森林; 土壤质地

文章编号 1006-9895(2023)04-0000-00 中图分类号 P461 文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2304.22186

Simulating land and atmosphere exchange processes over a mountainous forest in Huainan using CLM4.5

DAI Qiudan¹, Guo Zhenhai¹, Wang Longhuan¹, Sun Xiangming², Xie Zhenghui¹, Sun Shufen¹ and Xiao xia³

¹ State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² National University of Singapore, Singapore 119077

³ Public Technology Service Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Using the ERA5 single-layer reanalysis data combined with the planetary boundary layer tower (PBL tower) meteorological observations from a north-south climate transition zone mountainous forest in Huainan as forcing data, we evaluate the applicability of the Community Land Model (CLM4.5) against observed canopy flux and micrometeorological data at this site. Also three experiments to study the impact of soil texture on soil moisture are designed to improve the model performance. The results show that overall CLM4.5 performances good in Huainan mountainous forest, and the simulated results driven by observation is better than that of ERA5 data. In terms of radiation simulation, both the simulated results of the radiation components using ERA5 data and PBL tower observation data are good, especially driven by PBL tower observation, and the correlation coefficient between the simulation results and observations throughout the year is more than 0.97, and the root mean square error is below 25.056 W m^{-2} . The correlation coefficient of the ERA5 forcing simulation is slightly lower, but it also reaches 0.92, and the root mean square error is below 29.939 W m^{-2} ; In terms of soil temperature, both the correlation coefficients reach more than 0.98; the correlation coefficients of soil moisture results are all above 0.86, but systematically higher; and the average correlation coefficients

收稿日期 2022-09-22; 网络预出版日期 2023-00-00

作者简介 戴秋丹, 女, 1971 年出生, 副研究员, 主要从事陆面过程与陆气相互作用研究。E-mail: dqd@lasg.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划 2017YFA0604500, 国家自然科学基金项目 42075162、41575092

Funded by National Key Research and Development Program (Grant 2017YFA0604500) National Natural Science Foundation of China (Grant 42075162 and 41575092)

of the simulated results of the sensible heat flux are 0.72 and 0.78, respectively. Through the comparison simulating tests of three soil texture parameters, it is shown that the simulated results of the soil moisture with the measured three layers of soil texture plus the data of the deep soil texture are closest to the observation. Thus the accurate description of the soil texture can greatly improve the simulation of soil moisture. But further tuning of the parameters or parameterization scheme is still needed. In addition, the ERA5 reanalysis single-layer data as forcing in this site are reliable, and thus can be used in the further simulating work. This study could be useful for further study of land and atmosphere exchange in the north-south climate transition zone of Huainan, China.

Keywords CLM4.5 model, North-south climate transition zone, Mountainous forest, Soil texture

1 引言

森林植被处在大气和地面之间，是陆面过程的重要下垫面，通过影响行星能量、水文循环和大气成分的物理、化学和生物过程影响气候（Bonan, 2008），复杂和非线性的土壤-森林植被-大气相互作用可以抑制或放大人为气候变化，一方面促使森林水文、大气和相关领域的研究人员在世界各地的一些地点对森林及林下能量、水汽、碳和养分循环进行大量测量（Baldocchi et al., 1997; Heijmans et al., 2004; Saleska et al., 2003; Liu et al., 2013; 韦志刚等, 2016），包括自然森林也包括城市森林（Weissert et al., 2014）和人工林（Dai et al., 2021）等。处在城乡交界处的山地森林可以缓解城市热岛、减轻城市污染和碳排放，随着气候变化和人类城市扩张的加剧，重要性越来越突出。另一方面也促使研究人员建立各种陆面过程模式进行数值模拟，其中有针对森林单一物理过程的相关的水文、积雪、辐射和光合作用等模型（Collatz et al., 1991; Qiu et al., 2016; Lackner et al., 2021），以及从第三代开始考虑植被的越来越完善的包括各种下垫面和物理过程及碳循环的全球陆面过程模式，如 SSiB, CLM、CABLE、Noah-MP 和 CoLM 等模式。

作为天气和气候预测的一部分，陆面过程模式最初设计用于捕捉陆地和大气之间的基本特征和反馈过程（Blyth et al., 2021），随着观测和模型的发展，更趋于完善，在天气和气候研究中应用的越来越广，但它始终还是陆面过程研究中的有力工具。本研究采用陆面模式 CLM4.5，此模式是美国国家大气中心（NCAR）研发的陆面过程模式，是当下发展相对完善并且广泛应用于陆面过程研究的模式之一，是 CESM1.2.0 的陆面分量，在全球大气和陆面领域得到广泛的应用（Oleson et al., 2013; Fisher et al., 2015; Raczka et al., 2016; Wang et al., 2016; Fox et al., 2018）。Bonan 等人（2011）通过修改植被冠层过程的辐射传输模型结构、叶过程尺度、光合作用及其相关生理参数和气孔传导模型，显著改进了 CLM4.5 模式对植被初级生产量（GPP）和潜热通量的模拟（Oleson et al., 2013），但对热带地区的碳和水汽通量仍有高估现象。CLM4.5 也可以单独应用，在全球、区域和单个站点模拟各种下垫面类型同样也有着广泛应用。Fu et al. (2016) 在八个 AmeriFlux 站点联合测量和使用 CLM4.5 的模拟，研究不同生态系统水力再分配对水文的影响，这些站点的气候和植被条件各个不同。CLM4.5 在青藏高原（谢志鹏等, 2017; 袁源等, 2019; 苏有琦等, 2020; 马翠丽等, 2020; Pan et al., 2022）、黑河流域（Zeng et al., 2016）和在西北农牧交错带（朱昱作等, 2019）的应用，都展现较好的模拟性能。Zhang 等（2016）对五个具有代表性的中国陆地生态系统通量观测研究网络（ChinaFlux）涡度相关法观测的碳水通量系统评估 CLM4.5 的模拟，结果表明 CLM4.5 低估了长白山、鼎湖山和千烟洲三个森林站点的年度碳汇，对年度 GPP 也存在正偏差。Zhang 等（2016）提出对季节性 GPP 和呼吸参数化的进一步发展，需要更有效地表示季节性水的条件以及净辐射在感热和潜热通量之间的合理分配。Song 等（2020）利用 CLM4.5 和 CLM5 对一个热带山区雨林的单点模拟表明，CLMs 还不能精确模拟这个森林的多个冠层过程，土壤、空气和树冠温度以及叶子湿度对入射太阳辐射率仍然过于敏感。Xie 等（2016）对 CLM4.5 在亚热带森林干旱过程中水汽和 CO₂ 通量的研究表明，CLM4.5 捕获了水汽通量的变化，但高估了净生态系统 CO₂ 交换。

CLM4.5 模式在我国大部分区域具有良好的模拟能力，但 CLM4.5 在淮河流域的淮南地区尚未得到应用。淮河流域地处中国季风区南北气候过渡带，是中国七大流域中旱涝灾害最频繁的流域，属于典型天气气候敏感区和气候脆弱区。随着全球气候变化和人类活动影响加剧，淮河流域的能量、水及碳循环的改变备受关注，目前启动第二次大气科学试验来认识该区域的气候、环境与水文变化规律，其中一项试验是陆气相互作用综合野外观测试验。该流域内淮南山地人工林，是典型的城乡周围复杂山地森林下垫面，对该地区水土保持、碳汇的准确评估及陆气的相互作用都有重要意义，有必要利用陆面模式进行研究。因此检验和评估陆面模式 CLM4.5 在淮南山地森林站的适用性，是本研究的主要目的。

我们利用 ERA5 再分析资料和 PBL 塔观测资料驱动陆面模式 CLM4.5 对淮南站进行单点模拟并对模拟性能进行初步评估。考虑土壤质地对土壤湿度的影响，设计了土壤质地对土壤湿度影响的三个模拟实验，一是利用原模式制作的地表数据，二是实测的三层土壤质地数据替代原模式制作的地表数据中的土壤质地，第三是实测三层数据结合深层假设的土壤质地，进行对比分析。本研究对于 CLM 在淮河流域南北气候过渡带典型的城乡周围复杂山地森林下垫面的应用具有重要意义，为后继利用 CLM 研究该区地表水热和 CO₂ 过程提供依据。

2 模式和数据

2.1 观测站点及资料介绍

本文研究站点为中国科学院大气物理研究所淮南气候环境综合观测试验站（32°44'N，117°08'E），其森林 PBL 塔站下垫面植被类型是以栎树为主的次生混交林，土壤为砂壤土，站点图见 Dai et al., 2021 中的图 1，观测仪器及其布设情况见表 1。站点及仪器的详细信息也可参见其他研究中的介绍（戴秋丹等，2021；Dai et al., 2021）。涡度相关系统仪器采样频率为 10Hz，涡度原始资料处理使用 EddyPro 软件。观测资料进行了质量控制用于本研究。

ERA5 0.25°×0.25 度单层再分析资料来源于 ECMWF 对全球气候的第五代大气再分析数据集 <https://cds.climate.copernicus.eu/> [2022-09-01]。

表1 观测仪器和布设情况。

Table 1. Measurements and instruments employed in this study.

观测项目	仪器（型号，厂家）	布设高度/深度(米)
辐射四分量	四分量净辐射传感器（CNR4, Kipp & Zonen）	25
空气温度、湿度	空气温湿度传感器（HMP155A, Vaisala）	30
风速	二维超声风速传感器（WINDSONIC, Campbell Scientific）	30
土壤温度	土壤温度传感器（109-L, Campbell Scientific）	0.1, 0.2
土壤湿度	土壤湿度传感器（CS616, Campbell Scientific）	0.1, 0.2
感热和潜热	三维超声风速仪（WindMaster Pro, Gill）和开路 CO ₂ /H ₂ O 分析仪（LI-7500A, Li-COR）组成的涡度相关系统	30
数采器	CR3000（Campbell Scientific）	35

2.2 模式介绍

本研究选用的陆面模式是 CLM4.5 (NCAR Community Land Model Version 4.5) (Oleson et al., 2013), 此模式作为地球系统模式(Community Earth System Model, CESM)的陆面模块, 已被耦合到多个气候模式中, 也可以用于单点陆面过程模拟。首先利用 CLM4.5 自带的工具制作淮南站 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的地表数据。其中土壤质地(砂土/黏土比例)及土壤颜色采用模式默认的国际地圈—生物圈计划(International Geosphere-Biosphere Program, IGBP)土壤数据集, 叶面积指数采用 MODIS 卫星反演的数据, 植被冠层高度因植被类型而异。大气强迫场包括辐射(入射长波、入射太阳、入射太阳散射和入射太阳直射辐射)、降水、大气最低层气压、大气最低层相对湿度、大气最低层比湿、大气最低层温度、露点温度、大气最低层风及观测高度等要素。其中必须包含的气象要素是向下太阳辐射、降水、大气低层的气温和风速。根据观测数据及 ERA5 单层再分析数据条件, 我们也包含了向下长波辐射及露点温度, 制作了 ERA5 单层再分析(ERA5 强迫)和站点观测(观测强迫)大气强迫数据。模拟中模式所有参数均采用默认的适用于本地的设置。

2.3 试验设计和检验方法

本文采用 ERA5 单层再分析数据集于淮南观测站 2010 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日的单点数据作为大气强迫, 资料时间间隔为 1 小时, 资料包括 30 m 高度的气温($^\circ\text{C}$)、露点温度($^\circ\text{C}$)、风速(m s^{-1})、降水强度(mm s^{-1})、入射太阳短波辐射(W m^{-2})及入射长波辐射(W m^{-2})共 6 个气象要素。同时选取淮南站 2016 年 5 月 1 日至 2017 年 4 月 30 日观测资料作为强迫。淮南站植被森林顶大约 10-15 m 高, 我们取 PBL 塔冠层顶上面离冠层顶最近的 30 m 的气象数据。为了与 ERA5 数据比较, 站点的观测资料由 10 min 和 30 min 观测都平均到 1 小时作为强迫数据。观测的相对湿度利用 Magnus-Tetens 近似法(Lawrence, 2005)转换为露点温度, 具体计算见公式(1)和(2)。观测资料的缺测部分, 降水资料全部来自于 ERA5 再分析数据, 其他要素缺测值由 ERA5 资料补充。观测资料显示 2016 年 5-2017 年 4 月间的日均最高气温为 32.65°C , 日均最低气温为 -3.87°C ; 降水主要集中在 5-7 及 10 月(ERA5 资料, 见图 2), 总降水量分别为 113.05 mm, 164.44 mm, 237.94 mm, 及 161.18 mm, 全年总降水量为 1073.80 mm。

露点温度近似计算(Lawrence, 2005)为:

$$T_d = b\gamma(T, RH)/[a - \gamma(T, RH)] \quad (1)$$

其中 γ 为:

$$\gamma(T, RH) = aT/(b + T) + \ln(RH/100) \quad (2)$$

T 和 T_d 分别为温度和露点温度, 单位为摄氏度, RH 为相对湿度, 单位为百分比, $\ln$ 代表自然对数。常数 a 和 b 分别为 17.27°C 和 237.7°C 。

实验设计利用 2010-2019 年 ERA5 单层再分析资料作为强迫场驱动陆面模式 CLM4.5, spin-up 50 年使土壤湿度达到平衡。再运行 10 年, 舍去前 6 年的结果, 分析后面的模拟值, 与资料对比。同样, 利用 spin-up 初值和站点 PBL 塔观测资料作为强迫场进行模拟, 模拟时段为 2016 年 5 月 1 日 00:00 (世界标准时)至 2017 年 4 月 30 日 23:30, 模拟结果半小时输出一次。模拟结果与实测进行对比, 检验和评估 CLM4.5 对淮南复杂森林下垫面陆气间通量的模拟能力, 检验强迫资料应用的可靠性, 考察不同土壤质地垂直分布对土壤湿度的模拟效果。

检验方法采用皮尔逊相关系数（R）、平均偏差（BIAS）和均方根误差（RMSE）来定量评估模式模拟值和观测值之间的相关性及差异，衡量模式模拟效果及强迫资料对模拟结果的影响。公式如下：

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) / \sigma_x \sigma_y \quad (3)$$

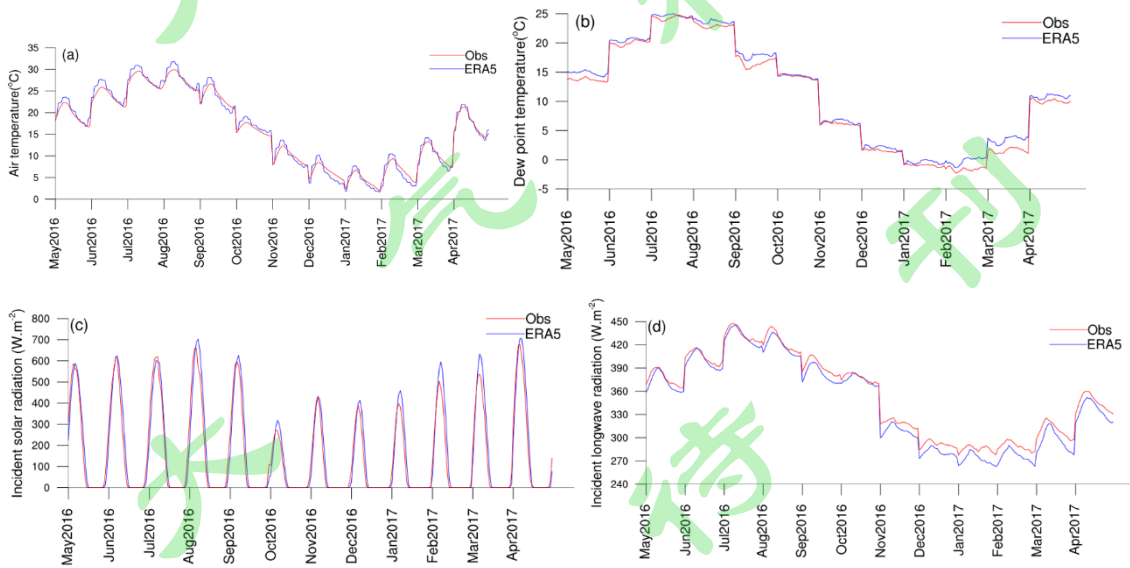
$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i) \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (5)$$

其中，R为相关系数，n 为样本个数， $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 为模拟和观测均值， x_i 和 y_i 为模拟和观测值， σ_x 和 σ_y 分别为模拟和观测的标准差。R越接近 1，BIAS的绝对值和RMSE越小，说明模式模拟效果越好。

2.4 气象强迫数据的对比分析

两套强迫场中，ERA5 再分析单层资料中的大气最低层空气温度、露点温度、入射太阳辐射和长波辐射与观测强迫场的值比较（图 1），可以看出，ERA5 温度与观测值接近（图 1a），日变化特征明显，日间近中午时段普遍比观测偏高，2016 年 5 月-2017 年 4 月时段内两者最大偏差 2.272，最小偏差为-1.731，平均差为 0.265℃，两者各自的标准差分别为 8.784 与 8.311℃。露点温度（图 1b）也是 ERA5 比较高，平均差为 0.794℃，ERA5 资料的标准差为 8.779℃，观测资料的标准差为 8.936。ERA5 入射太阳辐射资料与观测值很接近（图 1c），尤其是 5-7 月及 11 月，其他月份比观测值稍高。ERA5 比观测值最大相差 144.952 W m⁻²，最小-110.372 W m⁻²，两者全年平均差异为 9.928 W m⁻²。ERA5 入射长波辐射与观测值更为接近（图 1d），但总体比观测值低，ERA5 比观测最大相差 3.984 W m⁻²，最小差-21.130 W m⁻²，全年平均相差为 -8.299 W m⁻²。风速也是 ERA5 明显高于观测强迫（图 1e），最大相差 4.522 m s⁻¹，全年平均相差为 1.572 m s⁻¹。2016 年 8 月 12 日-9 月 7 日以及 12 月观测强迫的风速都是由 ERA5 填入。



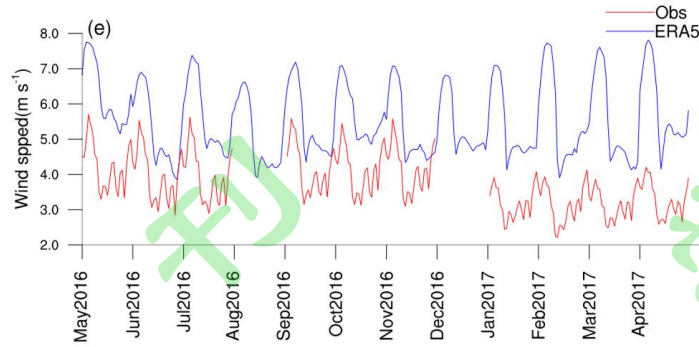


图 1 ERA5 强迫数据 2016 年 5 月-2017 年 4 月空气温度(a)、露点温度(b)、入射太阳辐射(c)、入射长波辐射(d)和风速(e)与观测强迫数据值的各月日变化

Fig. 1 The diurnal variation of ERA5 forcing data and observed values of (a) air temperature, (b) dew temperature, (c) incident solar radiation, (d) incident longwave radiation and (e) wind speed in each month from May 2016 to April 2017

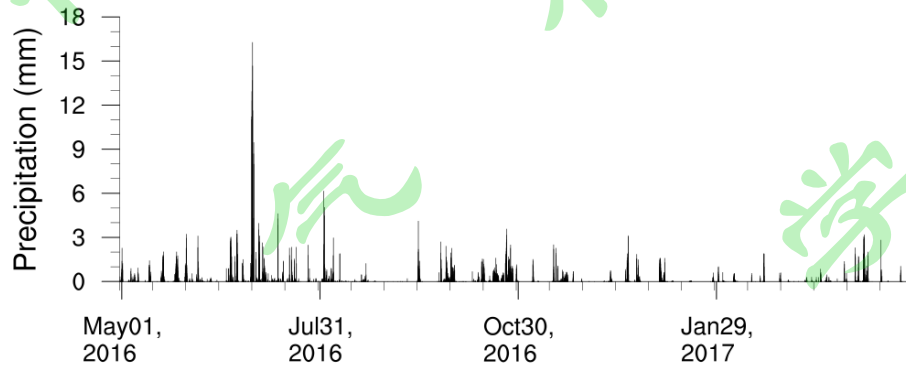


图 2 2016 年 5 月-2017 年 4 月 1 小时降水量时间序列图

Fig. 2 The time serial of total precipitation of 1 hour by ERA5 from May 2016 to April 2017

3 结果与讨论

3.1 辐射平衡分量的模拟

利用两套强迫数据驱动 CLM4.5 模拟 2016 年 5 月-2017 年 4 月淮南站的辐射平衡分量, 由观测和模拟的日平均变化曲线 (图 3) 可以看出, CLM4.5 可以较好地模拟出森林下垫面的反射太阳辐射、出射长波辐射和净辐射随季节变化的特征。观测强迫模拟的反射太阳辐射值与观测值之间的相关系数为 0.978, 与 CLM4.5 在草地模拟效果差不多 (朱昱作等, 2019), ERA5 模拟的相关系数略低, 但也达到了 0.920。两个模拟与观测的均方根误差分别为 3.091 和 5.206 W m^{-2} 。图 3a 可以看到总体上春季模拟较低, 冬季模拟较高。ERA5 模拟稍微偏高, BIAS 为 1.357 W m^{-2} , 观测强迫模拟的偏低, BIAS 为 -0.976 W m^{-2} 。观测强迫与 ERA5 强迫驱动 CLM4.5 模拟的长波出射辐射分别与观测的值对比 (图 3b), 两者都比较接近, 相关系数分别为 0.995 和 0.993, 均方根误差分别为 6.580 和 8.302。净辐射的模拟与前面的反射太阳辐射和出射长波辐射的模拟效果相关, 由图 3c 可以看到, 与观测值比较, 也是观测强迫模拟的比较好, 相关系数为 0.973, 均方根误差为 25.056。ERA5 模拟的稍差, 与观测数据的相关系数为 0.928, 均方根误差为 29.839。但观测强迫模拟的 BIAS 较为显著, 为 -9.396 W m^{-2} , 而 ERA5 的为 -1.600 W m^{-2} 。

我们也给出了各个月份模拟与观测的相关系数和均方根误差统计（表 2），可以看到冬季 12 月和 1 月对净辐射的模拟较差，相关系数比较低。

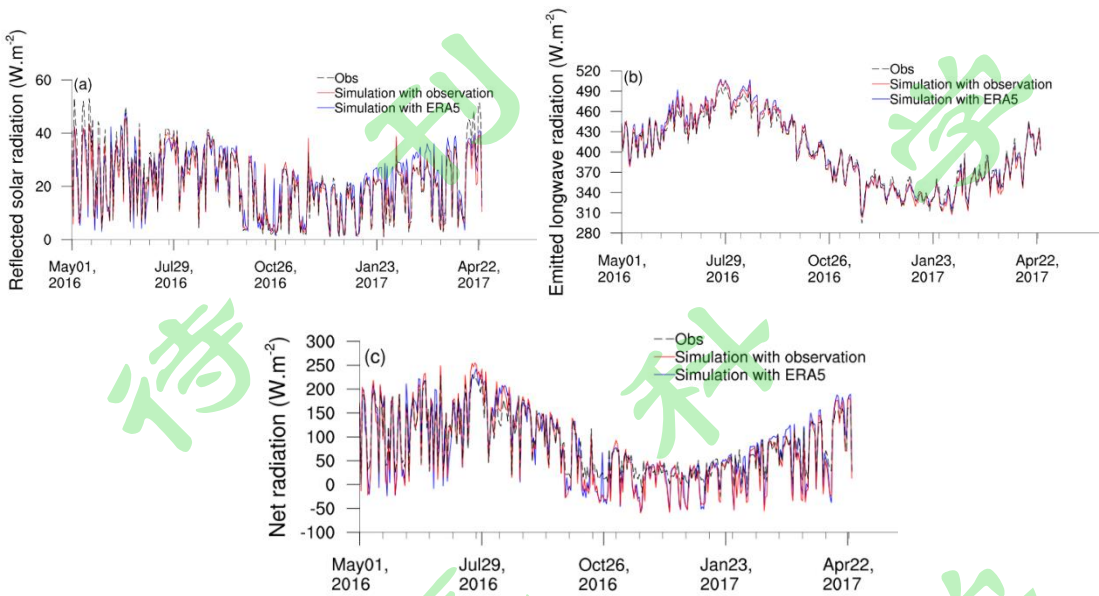


图 3 2016 年 5 月-2017 年 4 月淮南森林观测和模拟的反射辐射(a)、长波辐射(b)和净辐射(c)的日平均变化（黑色虚线为观测值，蓝线为 ERA5 强迫，红线为观测强迫模拟值）

Fig.3 The observed and simulated daily variations of (a) reflected radiation, (b) emitted longwave radiation and (c) net radiation over forest at Huainan station from May 2016 to April 2017 (black dash line: observations; blue line: simulation with ERA5 data forcing; red line: simulation with observation data forcing.)

表 2 2016 年 5 月-2017 年 4 月两套强迫数据驱动 CLM4.5 模拟辐射分量结果和淮南站观测值的相关系数和均方根误差

Table 2. The correlation coefficients and root-mean-square-error between the simulated radiation components results (reflected radiation, emitted longwave radiation and net radiation) of CLM4.5 driven by two sets of forcing data (ERA5 and Obs forcing data) and the observed values at Huainan station from May 2016 to April 2017

时间/ (年-月)	强迫数据	反射太阳辐射		出射长波辐射		净辐射	
		R	RMSE/ (W m ⁻²)	R	RMSE/ (W m ⁻²)	R	RMSE/ (W m ⁻²)
2016-05	ERA5	0.946	7.148	0.964	6.726	0.945	29.219
	Obs	0.996	6.352	0.977	4.303	0.980	25.526
2016-06	ERA5	0.925	4.815	0.954	13.171	0.868	35.730
	Obs	0.996	2.834	0.986	7.416	0.991	14.602
2016-07	ERA5	0.882	5.270	0.981	10.617	0.862	35.589
	Obs	0.997	2.082	0.997	8.153	0.994	17.265
2016-08	ERA5	0.909	3.900	0.985	13.478	0.799	34.752
	Obs	0.994	1.613	0.993	8.237	0.972	17.730

2016-09	ERA5	0.957	3.800	0.979	8.791	0.900	22.044
	Obs	0.997	0.844	0.976	6.255	0.979	17.084
2016-10	ERA5	0.885	5.178	0.977	5.304	0.880	35.085
	Obs	0.997	1.542	0.990	3.386	0.971	33.169
2016-11	ERA5	0.955	3.555	0.983	5.438	0.855	28.078
	Obs	0.988	2.123	0.981	5.633	0.902	31.173
2016-12	ERA5	0.946	2.710	0.938	5.994	0.525	29.316
	Obs	0.996	1.427	0.962	5.960	0.640	29.468
2017-01	ERA5	0.944	4.939	0.942	6.131	0.687	27.486
	Obs	0.994	0.962	0.912	6.965	0.802	28.786
2017-02	ERA5	0.850	7.556	0.966	6.896	0.845	24.951
	Obs	0.980	2.167	0.976	7.837	0.901	27.540
2017-03	ERA5	0.968	5.802	0.937	5.575	0.941	21.955
	Obs	0.998	0.845	0.942	7.349	0.963	24.866
2017-04	ERA5	0.956	5.919	0.982	4.149	0.956	28.450
	Obs	0.979	7.089	0.977	5.362	0.984	24.821
2016-05~2017-04	ERA5	0.920	5.206	0.993	8.302	0.928	29.839
	Obs	0.978	3.091	0.995	6.580	0.973	25.056

3.2 土壤温度和湿度的模拟

图4是模拟的10 cm 土壤温度的结果，与两个土壤采样点的平均值对比。可以看到，CLM4.5 可以较好地模拟森林下垫面土壤温度随月份的变化特征，从5月逐渐升高，到夏季最高，从8月开始又逐渐降低，冬季最低，再逐渐升高。与实测相比，模式模拟的土壤温度在春夏比观测偏高，秋冬则偏小。ERA5数据驱动的结果和观测数据驱动的结果与观测的BIAS分别为0.190和-0.264℃，均方根误差分别为1.736和1.976℃，与观测值的相关系数分别是0.990和0.986，ERA5驱动的模拟结果总体上更好一些，但各个月份的表现不尽相同（表3）。ERA5强迫模拟每个月的BIAS最大在8月，为1.841℃，观测强迫结果的最大偏差在1月，为1.814℃。CLM4.5模拟的森林土壤温度效果好于CLM4.5在草地的土壤温度模拟结果（朱昱作等，2019）。

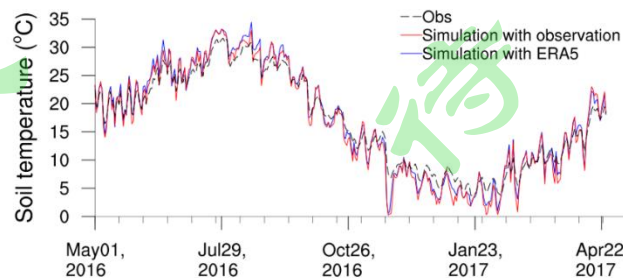


图4同图3，只是10 cm 土壤温度

Fig.4 Same as fig. 3, but for soil temperature at the 10 cm depth

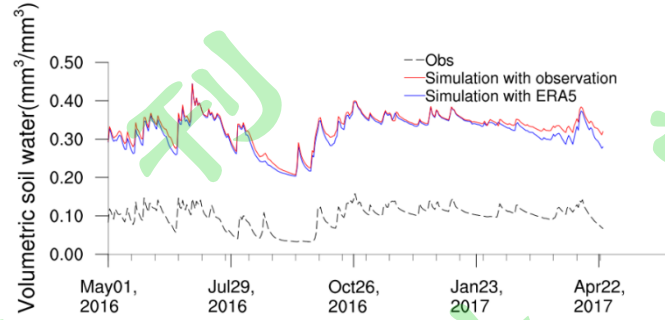


图5同图3，只是10 cm 土壤湿度

Fig.5 Same as fig. 3, but for volumetric soil water at the 10 cm depth

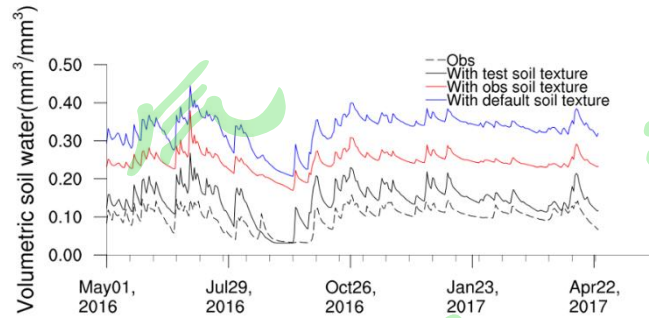


图6同图3，只是10 cm 土壤湿度

Fig.6 Same as fig. 3, but for volumetric soil water at the 10 cm depth

CLM4.5模式中土壤湿度有15层(Oleson et al., 2013)，与10 cm和20 cm 观测接近的输出层是9.1 cm，16.55 cm和28.91 cm的土壤层。因模拟是有一定厚度土壤层的平均值，即这几层代表的是4.51~9.06 cm，9.06 cm~16.55 cm和16.55 cm~28.91 cm的平均状态（李明星等，2011；袁源等，2019）。所以在与观测值进行对比分析时，考虑到10 cm 观测也带有10 cm附近土壤的信息，我们选取模式中9.06 cm与16.55 cm 两层的输出平均与之对比，同理，我们选16.55 cm 和28.91 cm 两层的输出平均与20 cm 的土壤湿度观测作对比。图5是10 cm 观测与模式结果的对比图。可以看到，模式可以较好地模拟出土壤湿度的变化模态，观测数据强迫和ERA5强迫结果与观测值的相关系数分别达0.882和0.863，相关性非常好，与CLM4.5对青藏高原玛曲和那曲站的模拟结果较为一致（袁源等，2019）。但是模式模拟有明显的系统误差，观测强迫和ERA5强迫模拟的土壤湿度的均方根误差分别为0.231和0.221 m^3m^{-3} ，即模拟值约为观测值的3倍。20 cm 深度的土壤湿度观测值与模拟值比较与此相似（图略），观测数据强迫和ERA5强迫的相关系数分别为0.873和0.847，均方根误差分别为0.234和0.225 m^3m^{-3} ，与10 cm的结果对比差不多。20 cm 深度的土壤湿度观测值与10 cm 的非常接近，10 cm 年平均值稍大，比20 cm 的湿度年平均相差仅为0.001 m^3m^{-3} 。各个月份的相关系数和均方根误差详见表3。

模式模拟的土壤湿度存在系统偏差，可能跟土壤的持水能力有关，土壤的持水能力跟土壤成分关系密切。Yang等（2009）采用三个陆面模式对青藏高原浅层土壤含水量的模拟偏小，认为主要原因是由于模式未考虑土壤垂直异质性的影响。研究表明调整黏土和砂土比例，土壤湿度模拟更为合理（吴龙刚等，2014）。苏有琦等人（2018）采用CLM4.5对青藏高原三个站点的

土壤湿度的模拟结果偏高或偏低各不相同，但考虑实测土壤属性数据的模拟结果普遍与观测值更为接近。淮南站土壤是砂壤土（戴秋丹等，2021），土壤里面含有丰富的砾石，颗粒粗糙，对土壤含水量有直接影响。土壤质地对土壤传导率参数的计算中起着重要作用，改善土壤深度信息可以改善陆面模拟结果（Gochis et al., 2010; Singh et al., 2015）。在模式中考考虑砾石，可以导致土壤浅层的含水量模拟变小，深层变多（马翠丽等，2020）。还有可能是因为降水强度的影响。由于观测资料缺乏，我们采用的是ERA5的降水，但实际降水量会有差别。考虑土壤质地对土壤湿度的影响以及淮南站土壤质地的实际情况，我们采用实际测量的土壤表面三层三个采样点土壤质地平均值替代模式默认方案（表4），发现土壤湿度的模拟值有所降低，接近测量值（图6中红线所示），土壤深层土质的值用假设比第三层土壤砾粒微小的砂壤土值代入（表4），结果模拟的值更加接近测量值（图6中虚线所示），说明模式模拟该站点的土壤水需要实际的土壤质地数据，土壤表层和深层的属性对土壤湿度的模拟都有重要影响，在陆面过程观测实验中应考虑对各个土壤层土壤质地的相应测量。两种资料驱动的结果接近，为显示清晰图6中只展示了观测强迫模拟。模式中土壤质地的改变会影响土壤水文学和热力学参数，造成土壤间热量和能量的传输变化，而影响地表的感热和潜热通量（吴龙刚等，2014；马翠丽等，2020），森林的模拟也需要考虑蒸腾。本文不做深入探讨。

表 3 同表 2，但为 10 cm 土壤温度、10 cm 土壤湿度和感热的结果

Table 3. Same as Table 2., but for soil temperature at the 10 cm depth, volumetric soil water at the 10 cm depth and sensible heat fluxes at 30 m

时间/ (年-月)	强迫数据	土壤温度		土壤湿度		感热	
		R	RMSE (W m ⁻²)	R	RMSE (W m ⁻²)	R	RMSE (W m ⁻²)
2016-05	ERA5	0.974	1.076	0.886	0.197	0.735	52.206
	Obs	0.967	1.214	0.926	0.209	0.811	44.587
2016-06	ERA5	0.926	2.035	0.915	0.214	0.736	47.054
	Obs	0.946	1.405	0.916	0.227	0.865	37.955
2016-07	ERA5	0.966	1.676	0.943	0.255	0.667	41.276
	Obs	0.976	1.556	0.938	0.258	0.828	37.797
2016-08	ERA5	0.922	2.006	0.556	0.205	0.626	50.418
	Obs	0.915	1.282	0.594	0.217	0.804	41.753
2016-09	ERA5	0.978	1.566	0.651	0.195	0.753	55.341
	Obs	0.987	1.447	0.638	0.203	0.874	38.988
2016-10	ERA5	0.970	1.234	0.972	0.228	0.546	53.959
	Obs	0.976	1.687	0.969	0.239	0.686	44.715
2016-11	ERA5	0.912	2.577	0.754	0.237	0.678	48.451
	Obs	0.907	3.149	0.475	0.240	0.737	44.337
2016-12	ERA5	0.876	1.707	0.812	0.232	0.684	48.954
	Obs	0.834	2.201	0.810	0.236	0.775	42.868
2017-01	ERA5	0.780	1.659	0.974	0.238	0.686	51.782
	Obs	0.575	2.440	0.975	0.241	0.758	46.233

2017-02	ERA5	0.908	1.945	-0.034	0.223	0.772	45.024
	Obs	0.853	2.588	0.308	0.232	0.822	43.946
2017-03	ERA5	0.881	1.183	0.297	0.203	0.851	42.042
	Obs	0.798	1.736	0.492	0.225	0.869	43.828
2017-04	ERA5	0.950	1.644	0.801	0.214	0.832	44.612
	Obs	0.952	2.100	0.797	0.236	0.873	40.555
2016-05~2017-04	ERA5	0.990	1.736	0.863	0.221	0.723	48.013
	Obs	0.986	1.976	0.882	0.231	0.783	42.720

注：8月12日-9月7日感热数据缺失。

表4 三个模拟实验的土壤质地设置
Table 4. Soil texture in the three simulation experiments

S1		S2		S3	
砂土含量%	黏土含量%	砂土含量%	黏土含量%	砂土含量%	黏土含量%
27	31	95.7	3.3	95.7	3.3
27	32	96.1	3.4	96.1	3.4
27	32	96.1	3.6	96.1	3.6
27	32	27	32	96	4
27	33	27	33	96	4
28	36	28	36	96	4
29	34	29	34	96	4
31	32	31	32	96	4
35	32	35	32	96	4
52	28	52	28	96	4

注：S1实验的砂土含量和黏土含量为原土壤属性数据（模式默认）；S2实验的表面三层砂土含量和黏土含量为实测，其余模式默认；S3实验的表面三层砂土含量和黏土含量为实测，其余给定。实测值为三个采样点的观测值的平均，以黑体表示。

3.3 感热和潜热通量的模拟

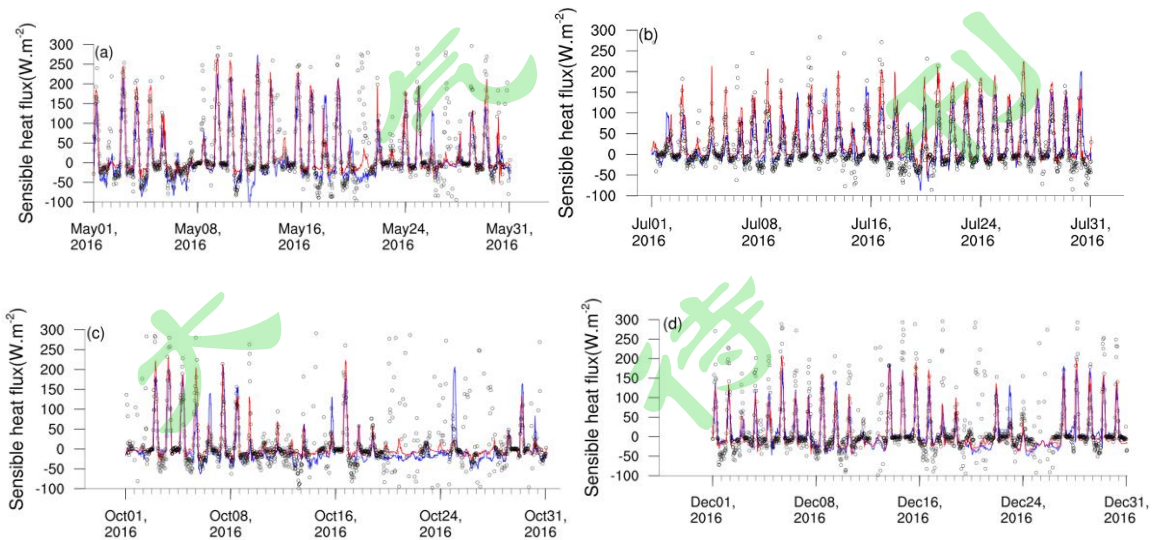


图 7 2016 年 5(a)、7(b)、10(c)和 12 月(d)的观测和模拟的感热半小时时间序列变化（黑色圆圈为观测值，蓝线为 ERA5 强迫，红线为观测强迫模拟值）

Fig. 7 Time serials of observed and simulated 30 min sensible heat fluxes over forest at Huainan station in (a) May, (b) July, (c) October and (d) December 2016 (black circles: observations; blue line: simulation with ERA5 data forcing; red line: simulation with observation data forcing.)

同样利用两套强迫数据，采用 CLM4.5 模拟了感热和潜热通量，分别与观测 30 m 感热对比。对比中对观测结果进行严格的质量控制，采用相对可靠范围内的数据，得到 2016 年 5 月-2017 年 4 月时段内观测强迫模拟的感热与观测的相关系数为 0.783，均方根误差为 42.720 W m^{-2} ，ERA5 强迫模拟的感热与观测的相关系数为 0.723，均方根误差为 48.013 W m^{-2} 。表 3 也给出了各个月份感热模拟和测量的相关系数和均方根误差，可以看到观测强迫模拟的较好。两个数据强迫都可以很好地模拟出感热的日变化和季节变化，以及受天气的影响。ERA5 对感热的模拟结果比观测略低，二者全年BIAS为 -0.729 W m^{-2} ，观测强迫模拟与观测值BIAS为 -2.585 W m^{-2} 。图 7 给出 2016 年 5、7、10 和 12 月的感热模拟结果与观测值的比较，各处于春夏秋冬的情况。可以看到除了降水的天气，5 月模拟的感热比较高(图 7a)，但与测量相比白天偏低，可能测量本身也有系统性偏高。也可能是模拟的结果仅代表地表一定高度，而冠层顶不同高度的通量是有一定差别的。但观测强迫模拟的晚上偏高（图 8a），导致 BIAS 比观测略高。7 月降水多导致感热较弱(图 7b)，模拟值偏高。10 月份也是降水较多，感热也比较小(图 7c)，但模拟值偏低，同样也可能是感热的测量偏高。从图 7 可以看到 ERA5 强迫模拟的感热在夜晚变化比较大，可能是由 ERA5 的风速大造成的（图 1e）。由图 7d 可以看到 ERA5 模拟的感热的夜晚变化趋势比较一致，这是因为两者的风速是一样的，都是 ERA5 的（图 1e），对感热造成的影响也是一样的。从表 3 可以看到对 CLM4.5 对感热的模拟，春夏相对好一些，秋冬模拟相对较差。对其他陆面分量的模拟（表 2 和表 3）也是冬天模拟相对较差。2016 年 5 月-2017 年 4 月潜热的测量偏低，略去。图 8b 只给出这个时段内两个强迫的模拟值，可以看到二者对潜热的模拟比较接近。

由于观测仪器故障的原因，2019 年 7 月 18 日-12 月 31 日只有感热和潜热的测量，缺乏气象要素的测量。因此只给出 ERA5 强迫的感热和潜热模拟与观测结果的对比（图 9）。模式对感热的模拟偏高（9a），对潜热的模拟偏低（9b），BIAS 分别为 15.36 和 -1.59 W m^{-2} 。感热和潜热模拟与观测值的相关系数分别为 0.74 和 0.75。与前面对感热和潜热的模拟效果相差不多。

因模式采用的是默认的设置，没有进行参数调整，对模拟的准确性是有影响的。森林内部过程复杂，应布设更多的观测（Bernhofer, 1992;Santana et al., 2018），为更好地研究水、热和 CO_2 等通量的变化及随气候变率的变化，应增加对植被与深层土壤性质及地面附近感热和潜热的测量。

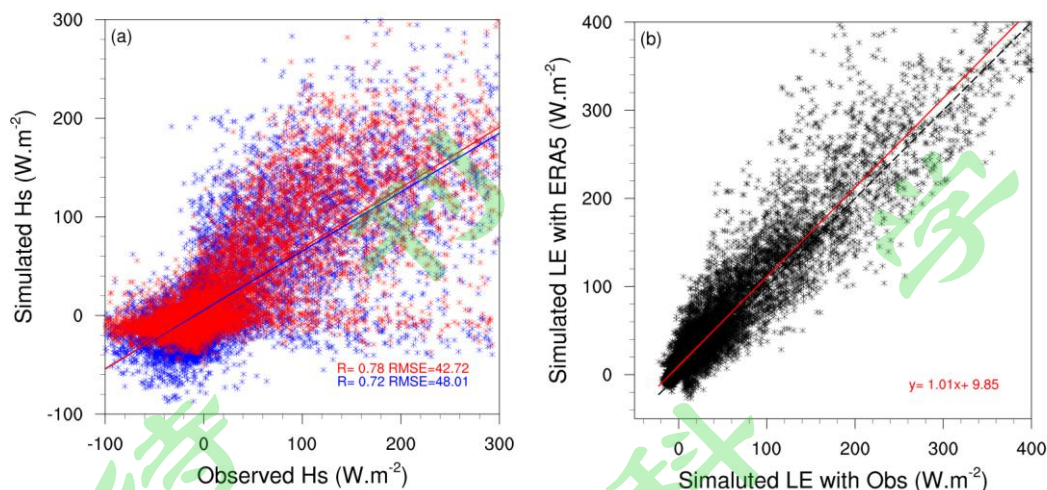


图8 2016年5月-2017年4月淮南森林观测和模拟的感热通量(a)及观测强迫和ERA5强迫模拟的潜热(b)对比(a中蓝色代表ERA5强迫,红色代表观测强迫;直线为模拟值与观测值的线性回归; b中黑色虚线为 $y=x$ 线,红色实线为ERA5强迫模拟值与观测值的回归曲线 $y=1.01x+9.85$.)

Fig. 8 The simulated versus observed 30 min (a) sensible heat fluxes and the simulated (b) latent heat fluxes forced by ERA5 versus observation over forest at Huainan station from May 2016 to April 2017 (Hs: Sensible heat fluxes; LE: Latent heat fluxes. In fig. (a), blue stands for ERA5 forcing and red stands for observation forcing; Lines are the regression curves; In fig. (b), black dash line is $y=x$; red line is the regression curve of the simulations forced by ERA5 and observation.)

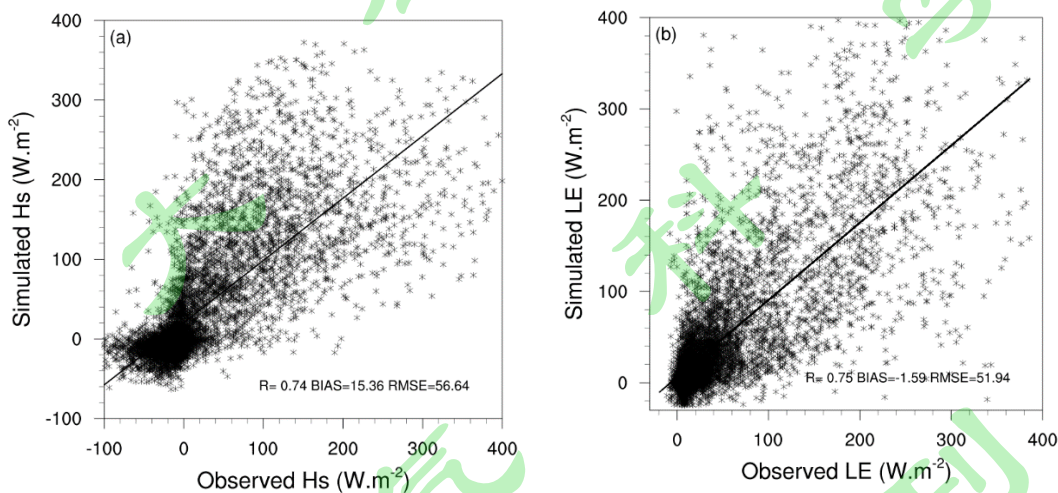


图9 2019年7月18日-12月31日模拟(ERA5强迫)和观测的感热(a)和潜热(b)对比

Fig. 9 The simulated (forced by ERA5 data) versus observed 30 min (a) sensible heat fluxes and (b) latent heat fluxes over forest at Huainan station from July 18 to December 31, 2019 (Hs: Sensible heat fluxes; LE: Latent heat fluxes.)

4 结论

本文基于 ERA5 单层再分析资料,结合淮南森林站 PBL 塔观测资料作为驱动数据,采用 CLM4.5 模式模拟了淮南森林站的陆气交换过程,并与实测资料对比。得到主要结果如下:

- 1) CLM4.5 可以很好地模拟淮南森林站的辐射平衡分量的日变化和季节变化特征,采用 PBL 塔观测资料构建的强迫场,2016年5月-2017年4月全年模拟结果与观测值的相关系数均达到 0.97 以上,BIAS在 $-9.396\sim 0.324 \text{ W m}^{-2}$,均方根误差小于 25.056 W m^{-2} 。采用 ERA5 的资料作为强迫,模拟结果与观测值的相关系数也达到 0.919 以上,均方根误差小于 29.839 W m^{-2} 。

m^{-2} 。本研究表明 ERA5 再分析单层资料在淮南森林站精度较好,在观测气象数据没有或缺乏的情况下,ERA5 再分析资料可以补充观测资料的不足,应用于陆面过程的模拟研究。

- 2) ERA5 数据驱动模拟的 10 cm 土壤温度的结果和观测数据驱动的结果与观测的全年BIAS分别为 0.190 和 -0.264 $^{\circ}\text{C}$, 均方根误差分别为 1.736 和 1.976 $^{\circ}\text{C}$, 与观测值的相关系数分别是 0.990 和 0.986, ERA5 驱动的结果更好一些。两套数据也可以很好地模拟出土壤湿度的变化, ERA5 和观测强迫与 10 cm 和 20 cm 土壤湿度观测值的相关系数分别为达 0.85 和 0.86 以上, 但模拟值都比观测系统性偏高。
- 3) 利用实际测量的土壤表面三层三个采样点土壤质地平均值替代模式默认方案模拟的土壤湿度结果接近观测。土壤深层土质的值用假设比第三层土壤砾粒微小的砂壤土值代入, 结果模拟的土壤湿度更加接近测量值。说明该站点土壤表层和深层的属性对土壤湿度的模拟都有重要影响, 模式模拟该站点的土壤水, 需要实际的土壤质地数据或调整土壤质地参数, 在陆面过程观测实验中应考虑对各个土壤层土壤质地的相应测量。
- 4) ERA5 强迫驱动 CLM4.5 模拟的感热与观测的相关系数为 0.723, 均方根误差为 48.013 W m^{-2} , 观测强迫驱动模拟的感热与观测的相关系数为 0.783, 均方根误差为 42.720 W m^{-2} 。ERA5 强迫对感热的模拟结果比观测略低, 二者全年BIAS为 -0.729 W m^{-2} , 观测强迫模拟与观测值BIAS为 -2.585 W m^{-2} 。另外, 2019 年 7 月 18 日-12 月 31 日时段内, ERA5 数据强迫的模式对感热的模拟偏高, 对潜热的模拟偏低, BIAS 分别为 15.36 和 -1.59 W m^{-2} 。感热和潜热模拟与观测值的相关系数分别为 0.74 和 0.75。与前面对感热和潜热的模拟效果相差不多。

本文仅针对淮南森林观测站进行了单点的模拟, 评估了模式对辐射、土壤温湿度及感热和潜热的模拟性能、检验了 ERA5 资料在该站点应用的可靠性, 以及分析了土壤质地对模拟结果的影响。未来工作将进一步利用模式对水热和碳循环进行模拟研究, 以帮助我们深入理解淮河流域典型山地森林植被下垫面过程以及植被和气候的相互作用。

致谢 感谢国家重大科技基础设施项目“地球系统数值模拟装置”提供支持。

参考文献 (References)

- Baldocchi D, Vogel C A, Hall B. 1997. Seasonal variation of energy and water vapor exchange rates above and below a boreal jack pine forest canopy. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 102(D24)
- Blyth E, Arora V K, Clark D B, et al. 2021. Advances in Land Surface Modelling. *Current Climate Change Reports*. 7. 10.1007/s40641-021-00171-5
- Bonan G B. 2008. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests [J]. *Science*, 320(5882): 1444-1449
- Bonan G B, Lawrence P J, Oleson K W, et al. 2011. Improving canopy processes in the Community Land Model version 4 (CLM4) using global flux fields empirically inferred from FLUXNET data, *J. Geophys. Res.-Biogeo.*, 116, G02014, <https://doi.org/10.1029/2010JG001593>
- Bernhofer C. 1992. Estimating forest evapotranspiration at a non-ideal site. *Agric. For. Meteorol.* 60 (1-2), 17-32
- Collatz G J, Ball J T, Grivet C, et al. 1991. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: A model that includes a laminar boundary layer. *Agricultural and Forest Meteorology*. 54. 107-136. 10.1016/0168-1923(91)90002-8
- Gochis D J, Vivoni E R, Watts C J. 2010. The impact of soil depth on land surface energy and water fluxes in the North American Monsoon region, *J. Arid Environ.*, 74(5), 564-571
- 戴秋丹, 郭振海, 孙菽芬, 等. 2021. 安徽省淮南森林冠层辐射传输过程的特征[J]. *大气科学*, 45(1): 205-216. Dai Qiudan, Guo Zhenhai, Sun Shufen, et al. 2021. Characteristics of Solar Radiation and Radiative Transfer of a Forest

- Canopy in Huainan, Anhui Province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(1): 205–216. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19251
- Dai Q D, Guo Z H, Sun S F, et al. 2021. Soil–vegetation–atmosphere interaction over a hilly forest in the southern Huaihe River Basin: Long-term field experiment and preliminary analysis of basic observations. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 14 (1), 1-7
- Fisher R A, Muszala S, Versteinstein M, et al. 2015. Taking off the training wheels: The properties of a dynamic vegetation model without climate envelopes, CLM4.5(ED). Geosci Model Dev, 8: 3593–3619
- Fu C S, Wang G L, Goulden M, et al. 2016. Combined measurement and modeling of the hydrological impact of hydraulic redistribution using CLM4.5 at eight AmeriFlux sites. Hydrology and Earth System Sciences. 20. 2001-2018. 10.5194/hess-20-2001-2016
- Heijmans, M M P D, Arp W, Chapin III F S. 2004. Carbon dioxide and water vapor exchange from understory species in boreal forest. Agricultural and Forest Meteorology 123 (2004) 3-4. 123. 10.1016/j.agrformet.2003.12.006
- Lawrence M G. 2005. The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: a simple conversion and applications. Bulletin of the American Meteorological Society, 86(2), 225-233
- Liu J G, Xie Z H, Jia B H. 2013. The long-term field experiment observatory and preliminary analysis of land-atmosphere interaction over hilly zone in the subtropical monsoon region of southern China, Atmos. Oceanic. Sci. Lett., 6, 203–209, doi:10.3878/j.issn.1674-2834.13.0112
- 李明星, 马柱国, 牛国跃. 2011. 中国区域土壤湿度变化的时空特征模拟研究[J]. 科学通报, 56(16): 1288-1300. Li Mingxing, Ma Zhuguo, Niu Guoyue. 2011. Modeling spatial and temporal variations in soil moisture in China [J]. Chinese Science Bulletin, 56(17): 1809-1820. doi:10.1007/s11434-011-4493-0
- 马翠丽, 吕世华, 潘永洁, 等, 2020. 砾石参数化对青藏高原陆面过程模拟的影响及敏感性分析 [J] . 高原气象, 39 (6) : 1219-1231. MA Cuili, LÜ Shihua, PAN Yongjie, et al, 2020. Impact and Sensitivity Analysis of Gravel Parameterization on Simulation of Land Surface Processes on the Qinghai-Xizang Plateau [J] . Plateau Meteorology, 39 (6) : 1219-1231. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00005
- Oleson K, Lawrence D, Bonan G B et al. 2013. Technical description of version 4.5 of the Community Land Model (CLM) (No. NCAR/TN-503+STR). doi:10.5065/D6RR1W7M
- Pan Y J, Li S S, Li X, et al. 2022. Modeling the effects of changes in air temperature and precipitation on heterotrophic respiration in the central Tibetan Plateau. Theoretical and Applied Climatology. 149. 10.1007/s00704-022-04049-w
- Qiu B, Guo W D, Xue Y K, et al. 2016. Implementation and evaluation of a generalized radiative transfer scheme within canopy in the soil-vegetation-atmosphere transfer (SVAT) model [J]. J. Geophys. Res.,121(20): 12145–12163. doi:10.1002/2016JD025328
- Saleska S, Miller S D, Matross D M, et al. 2003. Carbon in Amazon forests: Unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses, Science, 302(5650),1554–1557, doi:10.1126/science.1091165
- Raczka B, Duarte H F, Koven C D, et al. 2016. An observational constraint on stomatal function in forests: Evaluating coupled carbon and water vapor exchange with carbon isotopes in the community land model (CLM4.5). Biogeosciences, 13: 5183–5204
- Santana R, Dias-Júnior C Q, Tota J, et al. 2018. Air turbulence characteristics at multiple sites in and above the Amazon rainforest canopy. Agricultural and Forest Meteorology. 260-261. 10.1016/j.agrformet.2018.05.027
- Singh R, Reager JT, Miller N L, et al. 2015. Toward hyper-resolution land-surface modeling: The effects of fine-scale topography and soil texture on CLM4.0 simulations over the Southwestern U.S.: Effects of fine-scale resolution on CLM4.0 in Southwest US. Water Resources Research. 51. 10.1002/2014WR015686
- Song J Y, Miller G R, Cahill T, et al. 2020. Modeling land surface processes over a mountainous rainforest in Costa Rica using CLM4.5 and CLM5. Geoscientific Model Development. 13. 5147-5173. 10.5194/gmd-13-5147-2020

- 苏有琦, 张宇, 宋敏红, 等. 2020. 基于实测土壤属性CLM4. 5 对青藏高原高寒草甸模拟性能的评估 [J]. 高原气象, 39 (6): 1295-1308. SU Youqi, Zhang Yu, Song Minhong, et al. 2020. Evaluation of Simulated Performance of CLM4. 5 in Alpine Meadow over the Qinghai-Xizang Plateau based on Measured Soil Properties [J]. Plateau Meteorology, 39 (6): 1295-1308. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2019.000136
- 吴龙刚, 王爱慧, 盛炎平. 2014. 土壤质地对中国区域陆面过程模拟的影响[J]. 气候与环境研究, 19(5):559-571. WU Longgang, WANG Aihui, SHENG Yanping. 2014. Impact of Soil Texture on the Simulation of Land Surface Processes in China[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19(5):559-571
- 韦志刚, 胡嘉骢, 董文杰, 等. 2016. 珠海凤凰山陆气相互作用与碳通量观测塔的基本观测及晴天主要观测量的日变化特征 [J]. 大气科学, 40 (2): 423-436. Wei Zhigang, Hu Jiacong, Dong Wenjie, et al. 2016. Basic observations and diurnal variation of key meteorological variables on clear days in the Phoenix Mountain area of Zhuhai [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (2): 423-436, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.15111
- Xie Z H, Wang L Y, Jia B H, et al. 2016. Measuring and modeling the impact of a severe drought on terrestrial ecosystem CO₂ and water fluxes in a subtropical forest. Journal of Geophysical Research
- 谢志鹏, 胡泽勇, 刘火霖, 等. 2017. 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, 36(1): 1—12. Xie Zhipeng, Hu Zeyong, Liu Huolin, et al. 2017. Evaluation of the surface energy exchange simulations of land surface model CLM4.5 in alpine meadow over the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology, 36(1): 1—12. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00012
- Yang K, Chen Y Y, Qin J. 2009. Some practical notes on the land surface modeling in the Tibetan Plateau [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 13(5): 687-701. DOI: 10.5194/hess-13-687-2009
- 袁源, 赖欣, 巩远发, 等. 2019. CLM4.5模式对青藏高原土壤湿度的数值模拟及评估 [J]. 大气科学, 43(3): 676-690. Yuan Yuan, Lai Xin, Gong Yuanfa, et al. 2019. CLM4.5 model simulation of soil moisture over the Qinghai-Xizang Plateau and its performance evaluation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(3): 676-690. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1808.18143
- 朱昱作, 张兰慧, 谈幸燕, 等. CLM4. 5 在西北农牧交错带盐池站的模拟性能评估 [J]. 干旱气象, 2019, 37(3): 430 — 438. ZHU Yuzuo, ZHANG Lanhui, TAN Xingyan, et al. Evaluation of Simulation Performance of CLM4. 5 at the Yanchi Station in the Agricultural — Pastoral Ecotone of Northwest China [J]. Journal of Arid Meteorology, 2019, 37(3): 430 — 438. DOI: 10.11755/j.issn.1006-7639(2019)-03-0430
- Lackner G, Domine F, Nadeau D F, et al. 2021. On the energy budget of a low-Arctic snowpack. The Cryosphere. 16. 127-142. 10.5194/tc-16-127-2022
- Wang A H, Zeng X B, Guo D L. 2016. Estimates of global surface hydrology and heat fluxes from the Community Land Model (CLM4.5) with four atmospheric forcing datasets, J. Hydrometeorol., 17, 2493–2510, <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0041.1>
- Weissert L F, Salmond J A, Schwendemann L. 2014. A review of the current progress in quantifying the potential of urban forests to mitigate urban CO₂ emissions. Urban Climate. 8. 10.1016/j.uclim.2014.01.002
- Zeng Y J, Xie Z H, Yu Y, et al. 2016. Ecohydrological effects of stream-aquifer water interaction: A case study of the Heihe River basin, northwestern China. Hydrology and Earth System Sciences. 20. 2333-2352. 10.5194/hess-20-2333-2016
- Zhang L, Mao J F, Shi X Y, et al. 2016. Evaluation of the community land model simulated carbon and water fluxes against observations over ChinaFLUX sites. Agric Forest Meteorol 226–227, 174–185. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.05.018>