彭静漫, 刘少锋, 戴永久, 等. 2020. 基于陆面模式基准平台 ILAMB 对陆面模式 CoLM 的评估 [J]. 气候与环境研究, 25(6): 649-666. PENG Jingman, LIU Shaofeng, DAI Yongjiu, et al. 2020. Evaluation of Common Land Model Based on International Land Model Benchmarking System [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (6): 649-666. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20021

基于陆面模式基准平台 ILAMB 对陆面 模式 CoLM 的评估

彭静漫¹ 刘少锋^{1,2} 戴永久^{1,2} 魏楠^{1,2}

1 中山大学大气科学学院,广东珠海 519082 2 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海),广东珠海 519082

摘 要 模式评估是模式发展中不可或缺的重要一环。本文利用最新版陆面模式评估软件——ILAMB (International Land Model Benchmarking) 对通用陆面模式 (The Common Land Model, CoLM) 进行客观评估,并与 NCAR 陆面模式 CLM5(Community Land Model version 5) 结果进行比较。作为一个陆面模式评估软件,ILAMB 能对参与评估的模式变量自动生成诊断图形并对模式性能进行评分。评估结果表明,CoLM 总体性能良好,模拟结果与基准数据较为接近。与 CLM5 相比,CoLM 在总初级生产力及水文方面的表现略微逊色,在辐射方面则表现相当,对部分变量如地表向上长波辐射、地表净辐射等的模拟甚至优于 CLM5。通过对比 CRUNCEPv7 和 GSWP3v1 两种强迫资料发现,它们在气候平均态上具有一定的差异,模式在 GSWP3v1 强迫下的表现相对较好。CoLM 和 CLM5 在 CRUCNEPv7 强迫下模拟的潜热通量在亚马逊平原、亚洲东部和南部地区以及北美东部一带正偏差显著,而在 GSWP3v1 强迫下的模拟则有明显改善。这两个模式对感热通量的模拟在非洲北部、亚洲中部一带均明显偏高。在辐射方面,CoLM 模拟的地表向上短波辐射在全球以偏高为主,这在一定 程度上造成了地表净辐射的模拟偏低。各组试验模拟的地表向上长波辐射得分相差不大,但在具体的空间分布上 有一定的差别。

关键词 陆面模拟 CoLM 模式 ILAMB 软件 模式评估
 文章编号 1006-9585(2020)06-0649-18 中图分类号 P461 文献标识码 A
 doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20021

Evaluation of Common Land Model Based on International Land Model Benchmarking System

PENG Jingman¹, LIU Shaofeng^{1, 2}, DAI Yongjiu^{1, 2}, and WEI Nan^{1, 2}

School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Zhuhai, Guangdong Province 519082
 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Zhuhai, Guangdong Province 519082

Abstract Model evaluation is an indispensable part of model development. In this study, the authors evaluated the Common Land Model (CoLM) using the latest benchmark software called International Land Model Benchmarking (ILAMB) and compared this model with the Community Land Model version 5 (CLM5) from NCAR. As a land surface

收稿日期 2020-02-25; 网络预出版日期 2020-06-02

作者简介 彭静漫,女,1994年出生,硕士研究生,主要从事陆面模式研究。E-mail: 1139672720@qq.com

通讯作者 刘少锋, E-mail: liushaof5@mail.sysu.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2017YFA0604300,国家自然科学基金 41875128、41730962

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2017YFA0604300), National Natural Science Foundation of China (Grants 41875128 and 41730962)

气候与环	境研	究
Climatic and Enviro	nmenta	Research

25 卷

Vol. 25

model benchmark software, ILAMB can automatically generate graphical diagnostics for model variables and score model performance. Results show that CoLM generally performs well, and its simulation result is close to the benchmark data. Compared with CLM5, CoLM is slightly inferior for gross primary productivity and hydrologic processes. For radiation, CoLM performs as well as CLM5, and is even better for variables such as surface upward long-wave radiation and surface net radiation. Comparing the forcing data of CRUNCEPv7 and GSWP3v1, the authors found differences in the climate average state and observed that the model performance under GSWP3v1 forcing is better. The latent heat flux simulated by CoLM and CLM5 under CRUCNEPv7 forcing has a significant positive bias in the Amazon plains, eastern and southern Asia, and eastern North America, but the bias decreases under GSWP3v1 forcing. The two models overestimate the sensible heat flux in north Africa and central Asia with either of the two forcing datasets. Regarding the radiative process, the surface upward shortwave radiation simulated by CoLM was mainly on the high side in the world, which to a certain extent caused the low level of surface net radiation. The surface upward long-wave radiation scores of four experiments are similar, but a difference exists in the specific spatial distribution.

Keywords Land surface simulation, CoLM model, ILAMB software, Model evaluation

1 引言

陆面过程是指发生在陆地表面上所有的物理、 化学、生物过程,及其与大气、海洋的相互作用过 程,是地球系统的重要组成部分,是人类活动及受 人类活动影响的关键界面。近期发布的 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)气候变 化与陆地的特别报告表明,受自然与人类活动影响, 陆面系统正在不断发生变化(IPCC, 2019)。为了 评估陆面系统对自然变化及人类活动的反馈,量化 陆面系统在气候变化中所起的作用,人们不断推动 陆面模式的发展和应用。

CoLM (The Common Land Model) 是当前国际 上应用最广泛的陆面模式之一,它的发展结合了 Bonan(1996)的陆面模式(简记LSM,下同)、 Dickinson et al. (1993)的生物圈—大气转移方案 (BATS)和中国科学院大气物理研究所LSM(IAP94) (Dai and Zeng, 1997) 这三个陆面模式的优点,并 在此基础上,研制了植被冠层双大叶、土壤水、湖 泊和河网径流等一系列的陆面关键过程模式,以及 全球土壤、植被等陆面关键基础数据集,全面扩充 了 CoLM (Dai et al., 2003, 2004; Yuan et al., 2011; Shangguan et al., 2014), 建立了通用陆面模式升 级版 (http://land.sysu.edu.cn/research/models[2019-03-08])。CoLM综合考虑了大气、植被、雪盖、 土壤间的相互作用,能够较好地描述发生在陆地表 面的生物物理和生物化学过程。Zhang et al. (2017) 利用 FLUXNET 多个站点资料对 CoLM 模拟的能 量通量进行评估,结果表明 CoLM 对感热通量、 潜热通量、净辐射等通量的模拟均有较好的效果。

Shi et al. (2011)将陆地生物地球化学模式与 CoLM进行耦合,测试结果表明该组合模式能较好 地模拟生态系统净碳交换的日变化和季节变化。Li et al. (2017)对 CoLM 在全球及区域范围内的水 和能量收支模拟进行了评估,表明 CoLM 的 2014 版本比 2005版本有改进,在能源和水分平衡的许 多方面与 CLM4.5 相当。CoLM 作为陆面分量模块 已耦合入国内外多个著名天气和气候模式中,如 NCAR CCM3 (Kiehl et al., 1996)、CWRF (Liang et al., 2012)、北京师范大学地球系统模式 BNU-ESM (Ji et al., 2014)、中国气象局数值预报系统 GRAPES (沈学顺等, 2017)、中国科学院地球系 统模式 CAS-ESM (刘少锋等, 2009;曾庆存和林朝 晖, 2010; Zhu et al., 2018)等。

系统的模式评估是模式发展中不可或缺的重要 一环,它可以帮助人们全面了解模式的准确度和不 确定性,从而为模式的发展与改进提供依据。在实 际工作中,模式评估往往需要耗费大量的时间和精 力。为了提高模式评估的效率,人们根据模式评估 的原理结合计算机技术,研发出一些专门用于模式 评估的软件工具。如 PALS (Protocol for the Analysis for Land Surface models) 是一个用于陆面模式自动 评估和基准测试的在线应用程序,但它只适用于特 定单点(Abramowitz, 2012; Best et al., 2015)。 LVT (The Land surface Verification Toolkit) 是一 个包含模式—数据融合范例的自动化评估框架 (Kumar et al., 2012), 最初设计用于支持 NASA 的陆面信息系统; PMP(The Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison Metrics Package) 和 ESMValTool (The Earth System Model Evaluation Tool) 主要是针对地球系统模式非陆地 组件的评估,它们更常用于模式相互比较项目中, 如耦合模式比较计划CMIP (Coupled Model Intercomparison Project) 等 (Gleckler et al., 2016; Eyring et al., 2016)。

ILAMB (Hoffman et al., 2016) 是一个开源的 陆面模式评估软件,它能对陆面模式结果自动生成 诊断图形并对模式性能进行打分。相比其他同类软 件,ILAMB 有其特有的一些特点。首先,ILAMB 拥有一套从全球网格到特定站点的基准数据集,它 可以基于这些数据集对相关模式变量生成统计分数 和分析图表。其次,ILAMB 的使用非常灵活,人 们可以根据自己的需要,自由选择参与评估的变量, 自行决定使用哪些基准数据集, 甚至可以定义不同 基准数据集所占的权重。此外, ILAMB 不仅可以 对模式结果与基准数据之间进行比较,还可以考察 变量之间的关系(Collier et al., 2018)。ILAMB的 这些特点使得它在多个国际模式研究计划中得到广 泛应用,如它曾用于 CMIP5 以确定不同模式间性 能的差别,也用于 CLM 模式不同版本的改进评估 (Lawrence et al., 2019)。在使用 ILAMB 时需注 意的一点是,不能片面关注模式得分而忽略对其他 要素的分析。想要全面了解一个模式的性能,除了 参考得分,还需要考量得分的计算原理、基准数据 对模式的约束、诊断图形的形式,并结合特定的研 究区域和研究目的来综合分析。

离线陆面模式的模拟性能由模式的结构、基础 数据、参数化方案以及所用的大气强迫共同决定, 这在早期的一些陆面模式项目 PILPS(The Project for Intercomparison of Land-surface Parametrization Schemes) 和 GSWP (Global Soil Wetness Project) 中已经证实(Henderson-Sellers et al., 1996; Dirmeyer et al., 2006)。后人的一些研究也进一步证实了这 些观点。刘金婷等(2009)利用同一大气观测数据 分别驱动 BATS、LSM 和 CoLM 模式,对新疆地 区 99 个测站进行离线模拟,发现同一驱动下的 3 个陆面模式模拟的热通量有明显差别。Lawrence et al. (2019) 将 CLM 模式在 WFDEI、CRUNCEP、 GSWP3 三个驱动下进行模拟,结果表明同一模式 在不同强迫下模拟的各变量同样存在明显差异。本 文利用陆面模式评估软件 ILAMB, 对通用陆面模 式 CoLM 的全球模拟进行系统评估。文中的评估 图表均由 ILAMB 自动生成,对模式的性能分析则 主要基于相关评估图表。为了能从多方面评估 CoLM 的性能,本文的模拟试验使用了 CRUNCEPv7 和 GSWP3v1 两种大气强迫,并加入了 CLM5 结果为 参照进行比较。

2 模式、数据与试验设计

2.1 模式介绍

2.1.1 CoLM 简要介绍

CoLM 发行过 2005 和 2014 两个正式版本,本 文使用的是 2014 版本。CoLM 的物理过程可分为 两类,一类是与植被覆盖相关的物理过程,另一类 则是与土壤水热传导相关的物理过程。CoLM 在计 算辐射、叶片温度和光合作用气孔导度时对同一叶 片分开考虑向阳面和背光面,即所谓的双大叶模型 (Dai et al., 2004)。在植被反照率的计算上,使 用简化的二流近似方案 (Dai et al., 2003)。土壤 温度和湿度的计算分别采用一个 10 层非均匀土壤 分层方案和一个至多 5 层雪盖分层方案。模式的地 表能量平衡方程如下:

$$c\Delta z \frac{\partial T}{\partial t} = R_{\rm net} - H - LE, \qquad (1)$$

其中, c 代表体积热容, Δz 为表面土层的厚度, T是土壤温度, R_{net} 代表地表净辐射, H代表感热通 量, LE 代表潜热通量(其中, L 为蒸发潜热, E为水汽蒸散通量), t 为时间。地表净辐射由向下 辐射(包括向下长波 R_{d_L} 和向下短波 R_{d_S})减去向 上辐射(包括向上长波 R_{u_L} 和向上短波 R_{u_S})得 到[公式(2)]。向上短波辐射与地表反照率相关, 而向上长波辐射则与发射率和地表温度相关[公 式(3)和公式(4)]:

$$R_{\rm net} = R_{\rm d_{S}} + R_{\rm d_{L}} - R_{\rm u_{S}} - R_{\rm u_{L}}, \qquad (2)$$

$$R_{\rm u_S} = \alpha R_{\rm d_S},\tag{3}$$

$$R_{\rm u\ L} = \sigma \varepsilon_{\rm S} T_{\rm S}^4 + (1 - \varepsilon_{\rm S}) R_{\rm d\ L}, \tag{4}$$

其中, α 为地表反照率, σ 为斯蒂芬—玻尔兹曼常数, ε_s 为地表发射率, T_s 为地表温度。公式(1)中的感热通量和水汽蒸散通量的计算公式如下:

$$H = -\rho_{\rm atm} c_p \frac{(T_{\rm atm} - T_{\rm s})}{r_{\rm ah}},$$
 (5)

$$E = -\rho_{\rm atm} \frac{(q_{\rm atm} - q_{\rm S})}{r_{\rm aw}},\tag{6}$$

其中, ρ_{atm} 为空气密度, c_p 为空气定压比热, T_{atm}

表示大气温度; *r*_{ah}和*r*_{aw}分别为感热和潜热输送阻抗; *q*_{atm}和*q*_s分别表示大气和地面的比湿。近期, CoLM 研发团队对湖泊过程发展了新的参数化方案, 建立了新一代湖泊模型(戴永久等, 2018),并在 三维结构植被冠层传输和湍流交换等方面做出新的 改进(Dai et al., 2019)。

2.1.2 CLM5 与 CoLM 的主要异同

CLM 和 CoLM 是目前国际上应用最广、发展 最为完善的两个陆面模式,二者具有相同的起源 (Dai et al., 2003),在结构和机理上既有共性也 有差异。CLM5 是 CLM 系列的最新版本,它是地 球系统模式CESM2(CommunityEarthSystemModel) 的陆面组成部分。CLM5 采用与 CoLM 相同的双 大叶光合作用、叶片温度和能量通量子模型。在计 算能量和水分平衡时模式网格的模拟结果均来自于 次网格模拟结果的面积加权平均。它们的地表径流 都是基于地形指数统计量的参数化方案,地下水运 动则基于 TOPMODEL 概念的基流。

CLM5与 CoLM 之间的差异一是表现在土壤 及雪盖的分层, CLM5 增加了土壤垂直分辨率 (20 层土壤+5 层基岩),将最大雪层数从5 层增 加到 12 层。其次在植被上, CLM5 使用了 Medlyn 气孔导度模型,它还利用 LUNA(Leaf Use of Nitrogen for Assimilation) 模型计算 V_{cmax25} (25°C 时的最大羧化速率)的叶片氮浓度和 Rubisco 中叶 片氮的比例。植物水分通过植被的水力应力模型, 取代了经验性的土壤水分应力公式。在河流汇流方 案上 CLM5 使用 MOSTER 模型,即以曼宁方程为 基础的模型代表了从山坡到支流到主河道的流动, CoLM 的产流则输出到 CaMa-Flood 模型。CLM4、 CLM4.5及CLM5系列版本的性能评估结果表明, 尽管在评估过程中存在强迫及观测数据不确定性的 问题,但最新版本 CLM5 的总体性能优于前两个 版本(Lawrence et al., 2019)。

2.2 ILAMB介绍

ILAMB 发行了两个版本,第1版由 NCL 语言 编写;本文使用的是第2版,该版本由 Python 语 言编写。ILAMB 能自动对每个参与评估的模式变 量生成诊断图形,包括空间分布图、时间序列图和 泰勒图等,并对偏差(bias)、均方根误差(rmse)、 空间分布(dist)、年际变异(iav)、季节周期(phase) 等表征模式性能的指标分别打分。简言之,利用 ILAMB 平台可以很便捷地得到一个多方面的模式 评估结果。

ILAMB的打分原理主要是基于基准数据,计 算模式结果的误差,之后将误差归一化成相对误差, 然后通过指数函数将相对误差映射到一个分数,多 个误差指标的分数最后加权平均形成表征模式多方 面性能的总分数。假设*c*为模式与基准数据间的相 对误差,则将相对误差映射到分数*S*的公式为

$$S = e^{-\varepsilon}, \tag{7}$$

由公式(7)可知,当相对误差ε=0时,得分S=1, 且S会随着相对误差的增大而平滑下降。最后将各 个误差指标分数加权平均得到总体绝对分数:

$$S_{\text{overall}} = \frac{S_{\text{bias}} + 2S_{\text{rmse}} + S_{\text{phase}} + S_{\text{iav}} + S_{\text{dist}}}{1 + 2 + 1 + 1 + 1}.$$
 (8)

一般来说,好的性能对应较高的得分。基于绝对分数,ILAMB还计算相对分数:

$$S_{\text{relative}} = (S_{\text{overall}} - S_{\text{mean}})/s_{\text{td}},$$
 (9)

其中, *S*_{mean}表示同一变量各模式绝对分数的平均 值, *s*_{td}为标准差。相对分数将模式之间的差异以一 种更加明显的方式展现出来,显示了参与比较的模 式之间的相对性能。每个变量的评估可以选择使用 一个或多个基准数据。对于使用多个基准数据的, 各基准数据所占的权重将按该数据集的确定性及时 间和空间覆盖的范围所确定。更多详细描述可参 考 ILAMB 手册(Hoffman et al., 2016)。

2.3 试验设计

本文使用了 CRUNCEPv7 和 GSWP3v1 两组大 气强迫资料进行全球离线模拟。CRUNCEP(Viovy, 2018) 是一个 6 小时 0.5°分辨率的全球强迫产品, 它是两个现有数据集 CRU TS3.2 与 NCEP 再分析 的组合。CRU TS3.2 0.5°月数据覆盖 1901~2002 年,NCEP 再分析 2.5°6 小时数据覆盖 1948~2016 年。 CRUNCEP 作为强迫已经在 CLM 植被生长、蒸散 和总初级生产力研究以及 TRENDY (1980~2010 年期间陆地—大气碳净交换趋势)(Le Quéré et al., 2018)项目中得到应用。本文现使用的是其第 7版数据。GSWP3(Hyungjun, 2017)是一个3小 时 0.5°分辨率的全球强迫产品,它的时间覆盖范围 为1901~2014年。它是基于20世纪NCEP模式进 行的第二版再分析,并利用全球光谱模型,通过光 谱轻推数据同化技术,动态地将再分析资料缩小 到 T248(0.5°)分辨率。此外,它还分别使用 CRU TS v3.21、GPCCv7 和 SRB(地表辐射预算)数据

Land ...

集对温度、降水、长波辐射和短波辐射进行了偏差 校正。GSWP3 是 LS3MIP (Van den Hurk et al., 2016)和LUMIP (Lawrence et al., 2016)陆面模拟 的默认强迫数据集。

两组大气强迫具体包括大气温度、大气湿度、 太阳短波辐射、大气长波辐射、风速和降水等要素, 这些要素统一插值成 0.9°(纬度)×1.25°(经度) 的分辨率。模式运行 40 年(1975~2014 年),前 5 年的模拟作为 spin-up。模拟每 30 分钟更新一次 大气强迫,结果输出以月为单位。我们选择 CLM5 作为参照对象,与CoLM 结果进行比较。CLM5 的模拟结果数据直接由官网下载(https://www. earthsystemgrid.org/dataset/ucar.cgd.ccsm4.CLM_LA ND_ONLY.CLM5.htmlNCAR[2019-03-06])需要说 明的是,CLM5 在 CRUNCEPv7 强迫下的向下长波 辐射由气温和水汽压计算而得,而非直接来自于 CRUNCEPv7,这点与 CoLM 模拟有别。此外, CLM5 的模拟试验关闭了其中的生物地球化学模块, 与 CoLM 一致。试验设计如表 1 所示。

本文中, CoLM 的土壤质地和有机碳数据来源 ∃ → GSDE(Global Soil Dataset for use in Earth System Models) (Shangguan et al., 2014); CLM5 的土壤 数据来源较为复杂,它的土壤质地数据来自 IGBP(The International Geospere-Biospere Programme) (Global Soil Data Task, 2000), 土壤有机碳 数据采用了 ISRIC-WISE (World Inventory of Soil Emission Potentials of International Soil Reference and Information Centre) (Batjes, 2006)。二者的 土壤颜色数据都来自 Lawrence and Chase (2007)。 CoLM 和 CLM5 的 LAI 数据均由 MODIS LAI 数据 集加工得到。其中, CoLM 的 LAI 数据集是通过 对 MODIS LAI 产品进行两步滤波加工处理而来 (Yuan et al., 2011); 而 CLM5 的 LAI 数据则是基于 植物功能类型(Plant Functional Type, PFT)的一 系列性质,将 MODIS LAI 月平均数据映射到每个

0.05°网格的不同植物功能类型上得到的 (Lawrence and Chase, 2007)。

ILAMB 接受单变量 NetCDF 数据格式。故在 得到模式模拟结果后,需将原始数据处理成单变量 时间序列,同时将变量名转化成符合 CMIP5 要求 的标准名称,对单变量每个时间、经纬度的边界进 行说明。这部分的数据处理是本次模式评估中至关 重要的一步,因为它决定了模式变量结果能否被 ILAMB 正确识别。

2.4 基准数据

ILAMB目前拥有二十多个变量共六十多个基 准数据集,这些基准数据集被分成4个类别,来源 有现场观测、遥感和再分析资料(http://redwood.ess. uci.edu/mingquan/www/ILAMB/[2020-09-14])。本 文根据陆面模式的特征及现有基准数据集的情况, 选定16个变量(表2)进行评估。每个变量的评 估可使用一个或多个基准数据集。对使用多个基准 数据集进行评估的变量,各数据集按一定的权重参 与对该变量的评估(见2.2节)。ILAMB的所有 数据集按月输出并以NetCDF3格式保存,可在指 定网站下载https://www.ilamb.org/ILAMB-Data/DATA/ [2019-05-21]。

本次评估所使用的这些数据集中,FLUXNET (Lasslop et al., 2010)和 WRMC.BSRM(König-Langlo et al., 2013)为站点数据集,其中 FLUXNET 的站点个数为 104, WRMC.BSRM 的是 55,其余

表 1 本文 4 组模拟试验所用模式、分辨率及大气强迫 Table 1 Models, resolution, and atmospheric forcings used

in	the	four	simulation	experiments
----	-----	------	------------	-------------

模拟试验	模式名称	分辨率(纬度×经度)	大气强迫
CoLM_CRU	CoLM	0.9°×1.25°	CRUNCEP_v7
CoLM_GSW	CoLM	0.9°×1.25°	GSWP3_v1
CLM_CRU	CLM5	0.9°×1.25°	CRUNCEP_v7
CLM_GSW	CLM5	0.9°×1.25°	GSWP3_v1

表 2 参与评估的 16 个变量的分类

Table 2C	lassification	of the	16 varia	bles select	ted for	evaluation

分类	变量
生物地球化学类	总初级生产力 (GPP)、叶面积指数 (LAI)
水文类	蒸散(ET)、潜热(LE)、径流(Runoff)
辐射和能量类	感热(SH)、反照率(Albedo)、向上短波辐射(RSUS)、净短波辐射(RSNS)、向上长波辐射(RLUS)、净长 波辐射(RLNS)、净辐射(RNS)
大气强迫类	气温(TAS)、降水(PR)、向下短波辐射(RSDS)、向下长波辐射(RLDS)

则均为相同分辨率的网格数据。LAI(Myneni et al., 1997)的ARHVV数据集是通过平均15天的原 数据来获得每月数据的,即原数据是一个15天的 平均值,它通过将这个数值赋予这15天的每一天, 再做月平均得到。Albedo变量的基准数据集 CERES (Kato et al., 2013)和 GEWEX.SRB(Stackhouse et al., 2011)都是由地表向上短波辐射除以总的向下 短波辐射获得。径流数据集 Dai(Dai and Trenberth, 2002)由925条河流水位观测结合TRIP(Total Runoff Integrating Pathways)河流流域,选择其中 全球流量最大的50条河流(径流数据集 Dai的资 料提供全球925条河流每条河流流进海洋的总量, 不包括河流的具体位置,TRIP提供每条河流的具 体位置),并进行流量换算得到。

3 结果分析

模式的总体性能如图 1 所示,它包括了 CoLM 和 CLM5 分别采用 CRUNCEPv7 和 GSWP3v1 为强

迫共4组试验(即CoLM CRU、CoLM GSW、 CLM CRU、CLM GSW)的评估结果。由图 1a 可 知,不同的模式及大气强迫均会导致模拟结果的差 异。4组试验各变量的绝对得分均大于 0.5, 大多 数处于 0.5~0.75 之间, 部分得分高达 0.75 以上, 这表明 CoLM 和 CLM5 的模拟结果均与基准数据 较为接近,二者具有良好的性能。各试验结果之间 存在差异,但总体来说,差异不是很大,得分差距 基本在 0.1 以内。通过对比相对分数(图 1b)发现, 同一模式使用不同的大气强迫产生的结果差异相对 明显,部分变量在不同强迫下的差异甚至超过了相 同强迫下不同模式之间的差异,如地表净短波辐射、 地表向上长波辐射。二者的这种表现与 CRUNCEP 及 GSWP3 中降水、辐射强迫变量的差别有关。总 体来看,模式在GSWP3v1驱动下的得分普遍高于 CRUNCEPv7 的。

所有参与评估的变量根据 ILAMB 的标准分成 4 类。由图 1 可知, CoLM 在总初级生产力及水文 方面得分偏低,与 CLM5 相比表现稍逊。CLM5



Fig. 1 Summary score graphic of model evaluation: (a) Absolute score; (b) relative score

对 GPP 的模拟相对较好,这可能与 CLM5 利用 LUNA 模型计算Vcmax25的叶片氮浓度和 Rubisco 中 叶片氮的比例, 且在植物水分通过植被运动时使用 了水力应力模型有关, CoLM 则对这些过程描述不 足。至于 LAI,两个模式均采用了静态植被模型, LAI 数值由外部文件读取。在水文方面, CoLM 对 土壤水的刻画还不够准确。目前大多数陆面模式水 文过程只考虑垂直方向的运动,对水平侧向交换的 描述非常欠缺。CLM5 对地表径流和蒸散发等水文 变量的模拟相对较好,可能与其在植被截流和土壤 水等方面的改进有关。在辐射与能量方面,CoLM 的表现较好,与CLM5比较接近,对部分变量如 地表向上长波辐射和地表净辐射的模拟甚至优于 CLM5。通过总体性能评分图,对 CoLM 和 CLM5 在不同强迫配置下的模拟性能有了一个总体把握。 下面将从地表热通量及辐射通量这两个最能反映模

6期

No. 6

式基本性能的方面去进一步分析评估结果。

3.1 地表热通量

研究表明,全球范围内地表吸收的太阳辐射约 有 60% 以 潜 热 和 感 热 的 形 式 释 放 到 大 气 中 (Sellers, 1965),因此陆面模式能否准确模拟地 表感热和潜热等热通量是衡量其模拟能力的重要标 志。地表热通量的评估使用了多个基准数据集,在 以下的具体分析中,潜热通量的分析是基于 FLUXNET MTE (Jung et al., 2010)数据集,而感热通量则基 于 GBAF (Jung et al., 2009)。

3.1.1 潜热通量

由潜热通量诊断表(表3)可知,4组试验模 拟的潜热通量的偏差较大、均方根误差得分较低, 说明不同配置下模拟的潜热通量与基准数据之间的 偏差及拟合偏差较大。图2为潜热通量偏差分布图, 它显示的是模式与基准之间的日偏差的多年平均。

表 3 潜热通量诊断 Table 3 Diagnosis for latent heat flux

模拟试验	偏差/W m ⁻²	均方根误差/Wm ⁻²	位相偏差/Month	偏差得分	均方根误差得分	季节循环得分	空间分布得分	总分
CLM_CRU	6.84	17.9	0.760	0.52	0.42	0.86	0.92	0.63
CLM_GSW	2.55	14.6	0.783	0.62	0.46	0.87	0.98	0.67
CoLM_CRU	6.77	20.9	0.974	0.56	0.34	0.83	0.96	0.61
CoLM_GSW	4.20	19.4	1.06	0.58	0.35	0.82	0.98	0.62

注: 以FLUXNET MTE数据集(1982~2008年)为基准



图 2 1982~2008 年潜热通量偏差(模拟减去基准)分布: (a) CLM_CRU; (b) CLM_GSW; (c) CoLM_CRU; (d) CoLM_GSW Fig. 2 Bias (model minus benchmark) distributions of latent heat flux from 1982 to 2008: (a) Expt CLM_CRU; (b) Expt CLM_GSW; (c) Expt CoLM_CRU; (d) Expt CoLM_GSW

由图 2 可知,4 组试验模拟的潜热通量在全球陆地 范围正偏差显著,其中又以 CLM_CRU 最明显, 它在亚马逊平原及印度尼西亚一带的平均日偏差 达 20 W/m² 以上。CLM_GSW 相对来说与基准数 据最为接近。CoLM_CRU 模拟的潜热通量在低纬 地区包括亚马逊平原、亚洲东部和南部地区以及北 美东部一带偏高,量值在 10~20 W/m² 之间。CoLM_ GSW 模拟的分布情况和 CoLM_CRU 基本类似, 但偏差量值有改善。此外,它在南美洲中部、非洲 中部以及亚洲南部有小幅度的负偏差。

ILAMB 除了可以对模式做相对于基准数据的 评估,也可以对模式中相关变量之间的关系进行考 察。图 3 为潜热通量和降水之间的关系响应曲线图, 由图可知各试验模拟的潜热通量对降水的响应比观 测的高,且随着降水的增大,响应偏高程度越大。 所谓响应偏高,即在同样降水的情况下,模式模拟 的潜热通量比实际观测大。模式在 CRUNCEPv7 强迫下的响应偏高非常明显,在 GSWP3v1 强迫下 的响应偏高程度稍小。结合 4 组试验的潜热偏差 (图 2)及潜热对降水的响应可知: CoLM 与 CLM5 模拟的潜热通量对降水的响应都偏高,而且随着降 水的增多,响应的偏差越大。这也解释了为什么在 亚马逊平原、印度尼西亚低纬一带降水全球最多的 地区,潜热高估最明显。

3.1.2 感热通量

由感热通量的诊断表(表4)和空间分布(图4) 可知,模式模拟的感热通量与潜热通量的表现并不 一致。各模拟试验的感热通量的均方根误差、空间 分布得分相差较大,其余各项得分包括变量总体得 分都相对接近。由偏差分布图(图4)显示,4组 试验的感热通量主要在非洲北部、亚洲中部和西部 以及澳大利亚一带地区均存在较为明显的正偏差,



图 3 潜热通量与降水量之间的关系响应:(a)CLM_CRU;(b)CLM_GSW;(c)CoLM_CRU;(d)CoLM_GSW。黑色代表观测数据,彩色代表模式结果;数据点反映每个独立值的平均值,误差条反映标准差范围

Fig. 3 Relationship response between latent heat flux and precipitation: (a) CLM_CRU; (b) CLM_GSW; (c) CoLM_CRU; (d) CoLM_GSW. The references in black and model in color; data points show the mean for each independent value and the error bars indicate the standard deviation range

	衣 4 感然通重区划										
Table 4 Diagnosis for sensible heat flux											
模拟试验	偏差/W m ⁻²	均方根误差/Wm ⁻²	位相偏差/Month	偏差得分	均方根误差得分	季节循环得分	空间分布得分	总分			
CLM_CRU	4.09	22.9	0.917	0.55	0.46	0.91	0.78	0.63			
CLM_GSW	2.33	19.5	0.795	0.59	0.50	0.92	0.92	0.68			
CoLM_CRU	0.899	22.6	0.855	0.55	0.40	0.92	0.90	0.63			
CoLM_GSW	1.71	22.0	0.793	0.59	0.41	0.93	0.91	0.65			

注:以GBAF数据集(1982~2008年)为基准。



图 4 同图 2, 但为 1982~2008 年感热通量偏差分布

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for bias distributions of sensible heat flux from 1982 to 2008

而其他地区则以负偏差为主。其中 CLM_CRU 模拟的感热在北半球高纬度地区低估明显,偏差值在 20 W/m² 以上,其余 3 组试验的偏差分布非常相似,在高纬度地区的负偏差较小,在北美南部、南美部分地区的负偏差较大。

感热通量对气温的关系响应曲线(图 5)显示, 4 组模拟试验的关系响应图的变化形式基本一致。 当温度低于 280 K 时,模式模拟的响应曲线低于观 测的,即对同一温度,模拟的感热与观测相比偏低; 当温度高于 280 K 时,表现则与之相反。CLM_CRU 的响应曲线与观测相差最远,感热随温度变换幅度 最大,CLM_GSW 次之。CoLM 在不同强迫下模拟 的响应曲线与观测比较接近,当温度大于 280 K 时, 模式模拟与观测基本重合。结合感热通量的偏差分 布图与关系响应可知:模式模拟的感热通量随温度 变化有不同的表现,在低温时(温度低于 280 K) 280 K 时则偏高, CoLM 的感热对温度的响应比 CLM5 更接近观测。

模式模拟中影响潜热和感热通量结果的因素是 多方面的。首先,二者的计算使用了很多参数替代, 参数的不确定性会在一定程度上影响模拟结果。如 在 CoLM 与 CLM5 的模拟中,使用了不同的土壤 数据集,不同数据集中参数的差异会造成土壤含水 量的差异,进而影响感热和潜热的模拟。CLM5 中 增加的土壤分层、引入空间显示土壤深度,以无通 量底边界条件替换土柱下的非承压含水层,将经验 土壤蒸发阻力参数化改为基于机械的参数化等一系 列结构和参数化改进,提高了模式中土壤水文表示 的真实性,有利于改进地表热通量的模拟。此外, 模式在 GSWP3v1 强迫下模拟的潜热和感热较好表 现表明对于地表热通量的模拟,强迫的影响也同样 重要。太阳辐射作为土壤热的主要来源,降水作为 模式中水分的唯一输入,它们的差异将会直接影响



Fig. 5 Same as Fig. 3, but for relationship response between sensible heat flux and surface air temperature

3.2 地表辐射通量

对于地表辐射通量的评估,我们使用了多组基 准数据集: CERES (Kato et al., 2013)和 WRMC. BSRN (König-Langlo et al., 2013)全球网格数据集 以及 GEWEX.SRB (Stackhouse et al., 2011)和 FLUXNET (Lasslop et al., 2010)站点数据集。以 下的分析基于 CERES 数据集。

3.2.1 地表向上短波辐射

由地表向上短波辐射的诊断表(表5)可知,

CLM5与 CoLM 的偏差得分相差较大,二者之差 达到了 0.1。各试验的年际变异得分的差异则主要 与大气强迫有关。由图 6 可知,除了格陵兰岛和南 极地区,同一模式在不同强迫下的偏差分布基本一 致,表明对于地表向上短波辐射变量,各模拟试验 的空间分布差异主要与模式的物理过程及基础数据 有关。CLM5 模拟的向上短波辐射在两极以外地区 偏差较小,而 CoLM 在中低纬地区的模拟明显偏 高,在非洲一带平均日偏差达 20 W/m²。模式在 CRUNCEPv7 强迫下模拟的地表向上短波辐射在格

表 5	地	表向上短波辐射诊	断		
Table	5	Diagnosis for sur	face upward	shortwave	radiation

模拟试验	偏差/W m ⁻²	均方根误差/Wm ⁻²	位相偏差/Month	偏差得分	均方根误差得分	季节循环得分	空间分布得分	年际变异得分	总分
CLM_CRU	1.82	12.5	0.789	0.64	0.57	0.90	0.99	0.58	0.71
CLM_GSW	-0.878	12.3	0.759	0.65	0.56	0.91	0.99	0.67	0.72
CoLM_CRU	4.53	15.3	0.789	0.53	0.56	0.90	0.96	0.57	0.68
CoLM_GSW	1.77	15.3	0.725	0.57	0.55	0.91	0.93	0.66	0.69

注:以CERES数据集(2000~2013年)为基准。

土壤温度、湿度,进而影响地表热通量。

陵兰岛地区偏低显著,而在 GSWP3v1 强迫下的模 拟则在南极地区明显偏低。CoLM_GSW 模拟的向 上短波辐射在南极地区的较大负偏差可能是因为模 式经过较长时间的积分,导致该区域的雪龄偏长 (即旧雪持续很长时间不融化),造成反照率偏小, 使模式在该地区模拟的地表向上短波辐射远小于观 测的。

ILAMB 既可以评估模式在空间水平分布上的

性能,也可以考察模式在时间尺度上的表现。由地 表向上短波辐射季节变化(图7)可知,CLM5与 CoLM均能模拟出该变量的基本季节变化趋势,二 者的峰值和谷值出现的月份与观测基本一致,模拟 与观测结果在9月以前随时间主要呈下降趋势,9 月以后则随时间增加,但二者在量值上有不同程度 的差别。CLM_CRU模拟的向上短波辐射在1~3 月大于观测,3~5月小于观测,5月中旬以后与观

659







图 7 2000~2013 年地表向上短波辐射全球平均季节变化: (a) CLM_CRU; (b) CLM_GSW; (c) CoLM_CRU; (d) CoLM_GSW。灰 色实线为 CERES 观测数据,彩线虚线为模拟结果

Fig. 7 The global average seasonal variations of surface upward shortwave (SW) radiation from 2000 to 2013: (a) CLM_CRU; (b) CLM_GSW; (c) CoLM_CRU; (d) CoLM_GSW. The gray curves represent the CERES data and the color curves represent the results of the model

测之间的正偏差保持在一个稳定的水平。CLM_GSW 模拟的表现相对较好,在1~6月比观测小,其余 月份基本与观测重合。CoLM模拟的向上短波辐射 与观测之间的偏差较CLM5大,它在CRUNCEPv7 强迫下在1~9月呈下降趋势,在9月达到谷值后 上升,它的量值在各季节均比基准数据高。CoLM_ GSW模拟的向上短波辐射变化形式与CoLM_CRU 相似,但CoLM_GSW在量值上略低,更加接近观测。 3.2.2 地表向上长波辐射

由地表向上长波辐射的诊断(表 6)可知, CLM5与 CoLM在不同强迫下的各项得分相近, 但通过偏差分布(图 8)发现它们在空间分布上却 存在较大差异。CLM_CRU模拟的地表向上长波辐 射在亚洲南部及非洲有显著的正偏差,南极地区为 负偏差,在青藏高原地区偏差较小。CoLM_CRU 在全球范围内呈负偏差,尤其在青藏高原一带,低 估量值超过 20 W/m²,表现与同强迫下的 CLM5 相 差甚远,但它在非洲一带表现好于CLM5。CLM_GSW 模拟的向上长波辐射在全球范围内主要以偏高为主, CoLM_GSW的模拟表现为4组模拟试验中最佳, 除了南极地区有较明显正偏差外,其他地区均与观 测接近。

从季节变化(图 9)来看,各试验模拟的地表向上长波辐射随时间均呈单峰型变化,在1~7月有一个逐渐增大过程,在7月达到峰值后又逐渐下降。4组模拟试验的多年平均季节变化曲线的变化形式与观测基本一致,量值也相对接近。CLM5在CRUNCEPv7强迫下模拟的地表向上长波辐射的变化曲线与观测相比,在1~4月及10~12月略微偏高,但总体情况与观测比较接近,在GSWP3v1强迫下的结果则比观测高。CoLM_CRU变化曲线的表现与CLM_GSW相反,与观测相比在各季节均偏低,而CoLM_GSW模拟的几乎与基准数据集重合。

表 6 地表向上长波辐射诊断 Table 6 Diagnosis for surface upward long-wave radiation

模拟试验	偏差/W m ⁻²	均方根误差/Wm ⁻²	位相偏差/Month	偏差得分	均方根误差得分	季节循环得分	空间分布得分	年际变异得分	总分
CLM_CRU	2.36	15.5	0.507	0.73	0.68	0.94	1.0	0.68	0.78
CLM_GSW	5.23	15.4	0.494	0.74	0.67	0.94	1.0	0.69	0.79
CoLM_CRU	-5.36	15.3	0.500	0.74	0.68	0.94	1.0	0.68	0.79
CoLM_GSW	0.291	14.2	0.470	0.76	0.68	0.95	1.0	0.72	0.80

注:以CERES数据集(2000~2013年)为基准。





Fig. 8 Same as Fig. 2, bur for bias distributions of surface upward long-wave radiation from 2000 to 2013

彭静漫等:基于陆面模式基准平台 ILAMB 对陆面模式 CoLM 的评估 PENG Jingman et al. Evaluation of Common Land Model Based on International Land ...



Fig. 9 Same as Fig. 7, bur for global average seasonal variation of surface upward long-wave (LW) radiation

3.2.3 地表净辐射

由表 7 可知,各试验模拟的地表净辐射与基准数据相比均偏小,且偏小程度较大。在得分方面,除年际变异得分之外,其余各项得分均十分接近。图 10 显示,与基准数据 CERES 相比,CLM_CRU模拟的地表净辐射在南北半球高纬度地区负偏差显著,在赤道一带如亚马逊平原、非洲中部及亚洲南部有一定的正偏差。其余 3 组试验模拟的地表净辐射在南极以外地区的空间分布基本相似,在低纬一带均为负偏差,在亚欧大陆的模拟偏差极小。

从季节变化曲线(图 11)来看,4组试验模拟的地表净辐射与基准数据相比在各季节均有不同程度的负偏差,与诊断表及偏差分布图的结论一致。 CLM5_CRU模拟的地表净辐射季节变化曲线与其他3组试验在变化形式上有所不同,它在7~9月 与基准数据的偏差接近于0,这可能与模式在赤道 一带模拟偏高相关。而CLM_GSW模拟的净辐射 随时间变化趋势与观测几乎一致,但低估程度是4 组试验里面最大的,低估值在各季节都保持在 15 W/m² 左右。CoLM 在两个不同强迫下模拟的净 辐射偏差介于 CLM_CRU 与 CLM_GSW 之间。

地表净辐射的模拟偏低主要与地表向上短波辐射的高估有关,而地表向上短波辐射的大小则主要由地表反照率决定。CoLM模拟的地表向上短波辐射在中低纬偏高,原因可能与模式计算中没有考虑植物茎面积指数(茎干的反射透射率比较低)有关。此外,图7中CoLM与CLM5在GSWP3v1下模拟结果的多年平均季节变化曲线总是小于CRUNCEPv7下的且与观测更接近,这与图12中向下短波辐射在GSWP3v1强迫的值较CRUNCEPv7小,图1中各辐射强迫变量在GSWP3v1下较好表现相对应。该结果表明,对辐射通量的模拟,强迫也是一个重要影响因子。

4 强迫资料的不确定性

如前所述,大气强迫的不确定性也是影响模式 模拟结果的重要原因之一。下面我们对本文所用的

表 7 地表净辐射诊断 Table 7 Diagnosis for surface net radiation

				-					
模拟试验	偏差/W m ⁻²	均方根误差/Wm ⁻²	位相偏差/Month	偏差得分	均方根误差得分	季节循环得分	空间分布得分	年际变异得分	总分
CLM_CRU	-5.80	22.4	0.719	0.66	0.62	0.92	0.96	0.60	0.73
CLM_GSW	-12.5	22.0	0.682	0.66	0.62	0.92	0.98	0.67	0.74
CoLM_CRU	-8.33	22.0	0.848	0.69	0.62	0.90	0.99	0.62	0.74
CoLM_GSW	-10.1	21.4	0.662	0.69	0.62	0.92	0.99	0.65	0.75

注:以CERES数据集(2000~2013年)为基准。



Fig. 10 Same as Fig. 2, bur for bias distributions of surface net radiation from 2000 to 2013





两组强迫 CRUNCEPv7 和 GSWP3v1 进行对比。

图 12 左列为 CRUNCEPv7 的降水、温度、向 下短波辐射和向下长波辐射从 1992~2012 年的日 平均分布。由图可知, CRUNCEPv7 各强迫变量的 数值从高纬到低纬呈递增趋势,在北半球这种递增 变化趋势较为明显,南半球则相对较弱。南极地区 的降水、温度、向下长波辐射均为全球最小。图 12 右列为 GSWP3v1 与 CRUNCEPv7 的差值分布,该 图表明, GSWP3v1 与 CRUNCEPv7 各强迫变量间 均存在一定的差异。首先从降水来看,两组强迫的降水因地区呈不同变化,总体来说在南极和格陵兰岛地区,CRUNCEPv7降水相对较多,其他地区则是GSWP3v1降水较多。GSWP3v1与CRUNCEPv7的温度差在全球南极以外地区基本小于0.1K,在南极地区的差值较大,在0.5K以上。两组强迫之间的向下短波、长波辐射差异相对显著。GSWP3v1的向下短波辐射在全球范围内较CRUNCEPv7低,该差值在南极地区为5~10W/m²,在亚欧大陆地

彭静漫等:基于陆面模式基准平台 ILAMB 对陆面模式 CoLM 的评估 PENG Jingman et al. Evaluation of Common Land Model Based on International Land ...



图 12 CRUNCEPv7 强迫变量(a)降水量、(c)温度、(e)向下短波辐射、(g)向下长波辐射 1992~2012 年平均全球分布(左列)及其 与 GSWP3v1 的差值分布(右列)

Fig. 12 Average global distributions of CRUNCEPv7 forcing variables (a) precipitation, (c) temperature, (e) downward shortwave radiation, and (g) downward long-wave radiation from 1992 to 2012 is shown on the left. The difference between GSWP3v1 and CRUNCEPv7 is shown on the right

区高达 40 W/m²;而向下长波辐射的表现则与短波相反,在全球陆地范围内比 CRUNCEPv7 高。

不同强迫之间的差异会对模式的模拟结果产生 重要影响,这种影响在 ILAMB 的评分系统中得到 很好的体现。如图 1 所示,GSWP3v1 各强迫量的 得分普遍高于 CRUNCEPv7,即 GSWP3v1 总体上 更接近于基准数据。无论是 CoLM 还是 CLM5, 较优的降水与辐射强迫使得径流、蒸散发等陆面水 文过程和地表热通量的模拟相对较好,对应模拟变 量的得分亦相应较高。以上分析表明,ILAMB的 评分系统对于分析陆面模式机理、追踪模式不确定 性来源等非常有用。

5 结论与讨论

本文利用陆面模式基准平台 ILAMB 对通用陆 面模式 CoLM 进行评估,并与 NCAR 陆面模式 CLM5 一起比较。CoLM 和 CLM5 分别在 CRUNCEPv7、 GSWP3v1 两种大气强迫下进行模式模拟。本文的 评估分析主要从模式的总体性能、地表热通量以及 辐射通量这几个方面进行。

结果表明, CoLM 总体性能良好, 模拟结果与 基准数据较为接近。与 CLM5 相比, CoLM 在总 初级生产力及水文方面表现稍落后, 原因可能与 CLM5 采用了 LUNA 模型、植被水力应力模型及 其在植被截留和土壤水等方面的改进有关。CoLM 在辐射方面的表现与 CLM5 相当, 对部分变量如 地表向上长波辐射、地表净辐射等的模拟甚至优 于 CLM5。

CoLM 和 CLM5 在 CRUCNEPv7 强迫下模拟 的潜热通量在亚马逊平原、亚洲东部和南部以及北 美东部地区正偏差显著,而在 GSWP3 强迫下的模 拟有明显改进。这两个模式在不同强迫下模拟的感 热通量在非洲北部、亚洲中部一带均明显偏高。通 过对潜热、感热的关系响应分析发现,这两个模式 模拟的潜热通量均对降水响应过高,而感热通量随 温度的变化有不同的表现,CoLM 模拟的感热通量 对温度的响应与基准更接近。

在辐射方面,CoLM 模拟的地表向上短波辐射 在全球以偏高为主,这可能与模式模拟中没有考虑 植物茎面积指数,造成反照率偏高有关。地表向上 短波辐射的高估在一定程度上造成了地表净辐射的 模拟偏低。各组试验模拟的地表向上长波辐射得分 相近,但在具体的空间分布上有一定差别。

大气强迫的不确定性是影响模式模拟结果的重要原因之一。通过对比发现,CRUNCEPv7和 GSWP3v1这两种强迫数据在气候平均态上均具有 一定差异,不同强迫之间的差异会对模式的模拟结 果产生重要影响。ILAMB的评估结果显示, GSWP3v1各强迫变量的得分普遍高于CRUNCEPv7, 即GSWP3v1总体上与基准数据更为接近。较优的 降水与辐射强迫使得模式对径流、蒸散发等陆面水 文过程及陆面地表热通量的模拟相对较好,对应变 量的得分亦相应较高。这种影响在 ILAMB 的评分 系统中得到很好的体现。

本文利用 ILAMB 的全球评估功能,展示了我 们团队在发展新一代陆面模式进程中的阶段性进展, 测试了 ILAMB 评分系统在陆面模式机理分析和模 式不确定性追踪方面的能力。但总体来说,还存在 以下不足。首先,ILAMB 配置的基准数据本身具 有一定的误差和不确定性,本文没有对这方面进行 相关讨论。此外,如何综合 ILAMB 提供的大量评 估信息,对模式做出最客观的评价,这是将来在陆 面模式评估工作中需要不断改进的。下一步我们将 以 ILAMB 为基础,开发新的单点评估功能模块, 进一步扩展基准测试数据集,形成基准数据质量控 制体系,建立起单点—区域—全球一体的陆面模式 性能评估系统,为新一代陆面模式的研发和改进提 供一个有力的基准平台和分析测试工具。

致谢 感谢 NCAR 气候数据网共享的 CLM5 全球范围模拟 数据;感谢穆明权老师在 ILAMB 的使用方面给予的帮助; 感谢评审专家们提出的宝贵意见。

参考文献(References)

- Abramowitz G. 2012. Towards a public, standardized, diagnostic benchmarking system for land surface models [J]. Geosci. Model Dev., 5(3): 819–827. doi:10.5194/gmd-5-819-2012
- Batjes N H. 2006. ISRIC-WISE derived soil properties on a 5 by 5 arcminutes global grid (version 1.1) [R]. Report 2006/02, 50pp.
- Best M J, Abramowitz G, Johnson H R, et al. 2015. The plumbing of land surface models: Benchmarking model performance [J]. J. Hydrometeor., 16(3): 1425–1442. doi:10.1175/JHM-D-14-0158.1
- Bonan G B. 1996. A land surface model (LSM Version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: Technical description and user's guide [R]. NCAR Tech. Note, NCAR/TN-417+STR, 150pp.
- Collier N, Hoffman F M, Lawrence D M, et al. 2018. The International Land Model Benchmarking (ILAMB) system: Design, theory, and implementation [J]. J. Adv. Model. Earth Syst., 10(11): 2731–2754. doi:10.1029/2018MS001354
- Dai A, Trenberth K E. 2002. Estimates of freshwater discharge from continents: Latitudinal and seasonal variations [J]. J. Hydrometeor., 3(6): 660. doi:10.1175/1525-7541(2002)003<0660:EOFDFC>2.0. CO;2
- Dai Y J, Zeng Q C. 1997. A land surface model (IAP94) for climate studies part I: Formulation and validation in off-line experiment [J]. Adv. Atmos. Sci., 14(4): 433–460. doi:10.1007/s00376-997-0063-4

- Dai Y J, Zeng X B, Dickinson R E, et al. 2003. The common land model [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 84(8): 1013–1024. doi:10.1175/BAMS-84-8-1013
- Dai Y J, Dickinson R E, Wang Y P. 2004. A Two-Big-Leaf Model for canopy temperature, photosynthesis, and stomatal conductance [J]. J. Climate, 17(12): 2281–2299. doi:10.1175/1520-0442(2004)017< 2281:ATMFCT>2.0,CO;2
- 戴永久,魏楠,黄安宁,等. 2018. 通用陆面模式(CoLM)湖泊过程 方案与性能评估[J]. 科学通报, 63(28-29): 3002-3021. Dai Yongjiu, Wei Nan, Huang Anning, et al. 2018. The lake scheme of the Common Land Model and its performance evaluation [J]. Chinese Sci. Bull. (in Chinese), 63(28-29): 3002-3021. doi:10.1360/N972018-00609
- Dai Y J, Yuan H, Xin Q C, et al. 2019. Different representations of canopy structure —A large source of uncertainty in global land surface modeling [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 269-279: 119–135. doi:10.1016/j.agrformet.2019.02.006
- Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J. 1993. Biosphere–Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model [R]. NCAR Tech. Note, NCAR/TN-387+STR, 72pp.
- Dirmeyer P A, Gao X, Zhao M, et al. 2006. GSWP-2: Multimodel analysis and implications for our precipitation of the land surface [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 87(10): 1381–1398. doi:10.1175/BAMS-87-10-1381
- Eyring V, Righi M, Lauer A, et al. 2016. ESMValTool (v1.0) A community diagnostic and performance metrics tool for routine evaluation of Earth System Models in CMIP [J]. Geosci. Model Dev., 9(5): 1747–1802. doi:10.5194/gmd-9-1747-2016
- Gleckler P J, Doutriaux C, Durack P J, et al. 2016. A more powerful reality test for climate models [J]. Eos, 97. doi:10.1029/2016EO 051663
- Global Soil Data Task. 2000. Global soil data products CD-ROM (IGBP-DIS). CD-ROM. International geosphere–biosphere Programme, data and information system, potsdam, Germany [CD]. Available from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.
- Henderson-Sellers A, McGuffie K, Pitman A J. 1996. The Project for Intercomparison of Land-surface Parametrization Schemes (PILPS): 1992 to 1995 [J]. Climate Dyn., 12(12): 849–859. doi:10.1007/s003820050147
- Hoffman F M, Koven C D, Kappel-Alek G, et al. 2016. International Land Model Benchmarking (ILAMB) workshop report [R]. Tech. Rep. DOE/SC-0186, 159pp.
- Hyungjun K. 2017. Global soil wetness project phase 3 atmospheric boundary conditions (Experiment 1) [DB]. Data Integration and Analysis System (DIAS). doi: 10.20783/DIAS.501
- IPCC. 2019. Summary for policymakers [M]//Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems. Arneth A, Barbosa H, Benton T, et al, Eds. Cambridge, United Kingdom and

New York, NY, USA: Cambridge University Press, 41pp.

- Ji D Y, Wang L, Feng J M, et al. 2014. Description and basic evaluation of BNU-ESM version 1 [J]. Geosci. Model Dev. Discuss., 7(2): 1601–1647. doi:10.5194/gmdd-7-1601-2014
- Jung M, Reichstein M, Bondeau A. 2009. Towards global empirical upscaling of FLUXNET eddy covariance observations: Validation of a model tree ensemble approach using a biosphere model [J]. Biogeosciences, 6(10): 2001–2013. doi:10.5194/bg-6-2001-2009
- Jung M, Reichstein M, Ciais P, et al. 2010. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply [J]. Nature, 467(7318): 951–954. doi:10.1038/nature09396
- Kato S, Loeb N G, Rose F G, et al. 2013. Surface irradiances consistent with CERES-derived top-of-atmosphere shortwave and longwave irradiances [J]. J. Climate, 26(9): 2719–2740. doi:10.1175/JCLI-D-12-00436.1
- Kiehl J T, Hack J J, Bonan G B, et al. 1996. Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3) [R]. NCAR Tech. Note, NCAR/TN-420+STR, 112pp.
- König-Langlo G, Sieger R, Schmithusen H, et al. 2013. The baseline surface radiation network and its world radiation monitoring centre at the Alfred Wegener Institute [R]. Tech. Rep. WCRP-24/2013, 25pp.
- Kumar S V, Peters-Lidard C D, Santanello J, et al. 2012. Land surface Verification Toolkit (LVT) —A generalized framework for land surface model evaluation [J]. Geosci. Model Dev., 5(3): 869–886. doi:10.5194/gmd-5-869-2012
- Lasslop G, Reichstein M, Papale D, et al. 2010. Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: Critical issues and global evaluation [J]. Glob. Change Biol., 16(1): 187–208. doi:10.1111/j.1365-2486.2009. 02041.x
- Lawrence P J, Chase T N. 2007. Representing a new MODIS consistent land surface in the Community Land Model (CLM 3.0) [J]. J. Geophys. Res. Biogeosci., 112(G1): G01023. doi:10.1029/2006JG 000168
- Lawrence D M, Hurtt G C, Arneth A, et al. 2016. The Land Use Model Intercomparison Project (LUMIP) contribution to CMIP6: Rationale and experimental design [J]. Geosci. Model Dev., 9(9): 2973–2998. doi:10.5194/gmd-9-2973-2016
- Lawrence D M, Fisher R A, Koven C D, et al. 2019. The Community Land Model version 5: Description of new features, benchmarking, and impact of forcing uncertainty [J]. J. Adv. Model. Earth Syst., 11(12): 4245–4287. doi:10.1029/2018ms001583
- Le Quéré C, Andrew R M, Friedlingstein P, et al. 2018. Global Carbon Budget 2017 [J]. Earth Syst. Sci. Data, 10(1): 405–448. doi:10.5194/essd-10-405-2018
- Li C W, Lu H, Yang K, et al. 2017. Evaluation of the Common Land Model (CoLM) from the perspective of water and energy budget simulation: Towards inclusion in CMIP6 [J]. Atmosphere, 8(8): 141. doi:10.3390/atmos8080141
- Liang X Z, Xu M, Yuan X, et al. 2012. Regional climate–weather research and forecasting model [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 93(9): 1363–1387. doi:10.1175/BAMS-D-11-00180.1

- 刘金婷, 马柱国, 罗德海. 2009. 三个陆面模式对新疆地区陆面过程 模拟的对比研究 [J]. 高原气象, 28(6): 1242-1249. Liu Jinting, Ma Zhuguo, Luo Dehai. 2009. A study on the thermal process simulations of multiple land surface models in Xinjiang [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28(6): 1242-1249.
- 刘少锋,林朝晖,蒋星,等. 2009. IAP 大气—植被耦合模式的建立及 其模拟 [J]. 气候与环境研究, 14(3): 258-272. Liu Shaofeng, Lin Zhaohui, Jiang Xing, et al. 2009. The IAP coupled atmosphere-vegetation model and its numerical simulation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14(3): 258-272. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2009.03.03
- Myneni R B, Nemani R R, Running S W. 1997. Algorithm for the estimation of global land cover, LAI and FPAR based on radiative transfer models [J]. IEEE Trans. Geosc. Remote Sens., 35: 1380–1393. doi:10.1109/36.649788
- Sellers W D. 1965. Physical Climatology [M]. Chicago: University of Chicago Press, 272pp.
- Shangguan W, Dai Y J, Duan Q Y, et al. 2014. A global soil data set for earth system modeling [J]. J. Adv. Model. Earth Syst., 6(1): 249–263. doi:10.1002/2013MS000293
- 沈学顺, 苏勇, 胡江林, 等. 2017. GRAPES_GFS 全球中期预报系统的 研发和业务化 [J]. 应用气象学报, 28(1): 1-10. Shen Xueshun, Su Yong, Hu Jianglin, et al. 2017. Development and operation transformation of GRAPES global middle-range forecast system [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 28(1): 1-10. doi:10.11898/1001-7313.20170101
- Shi X Y, Mao J F, Wang Y P, et al. 2011. Coupling a terrestrial biogeochemical model to the common land model [J]. Adv. Atmos.

Sci., 28(5): 1129–1142. doi:10.1007/s00376-010-0131-z

- Stackhouse Jr P W, Gupta S K, Cox S J, et al. 2011. The NASA/GEWEX surface radiation budget release 3.0: 24.5-year dataset [J]. GEWEX News, 21(1): 10–12.
- Van den Hurk B, Kim H, Krinner G, et al. 2016. LS3MIP (v1.0) contribution to CMIP6: The Land Surface, Snow and Soil Moisture Model Intercomparison Project—Aims, setup and expected outcome [J]. Geosci. Model Dev., 9(8): 2809–2832. doi:10.5194/gmd-9-2809-2016
- Viovy N. 2018. CRUNCEP version 7—Atmospheric forcing data for the community land model [DB]. Research data archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, CO.
- Yuan H, Dai Y J, Xiao Z Q, et al. 2011. Reprocessing the MODIS leaf area index products for land surface and climate modelling [J].
 Remote Sens. Environ., 115(5): 1171–1187. doi:10.1016/j.rse. 2011.01.001
- 曾庆存,林朝晖. 2010. 地球系统动力学模式和模拟研究的进展 [J].
 地球科学进展, 25(1): 1-6. Zeng Qingcun, Lin Zhaohui. 2010.
 Recent progress on the earth system dynamical model and its numerical simulations [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 25(1): 1-6. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2010.01.0001
- Zhang X X, Dai Y J, Cui H Z, et al. 2017. Evaluating common land model energy fluxes using FLUXNET data [J]. Adv. Atmos. Sci., 34(9): 1035–1046. doi:10.1007/s00376-017-6251-y
- Zhu J W, Zeng X D, Zhang M H, et al. 2018. Evaluation of the new dynamic global vegetation model in CAS-ESM [J]. Adv. Atmos. Sci., 35(6): 659–670. doi:10.1007/s00376-017-7154-7