土壤水力参数对全球中期数值天气预报系统的影响

王素霞^{1,2},赵文静²*

1国防科技大学计算机学院,长沙,410073

2国防科技大学气象海洋学院,长沙,410073

摘要: 土壤湿度是控制陆-气界面潜热和感热通量分配的关键要素之一, 而且由于其具有一 定的记忆特性,可以对多种时空尺度的天气气候过程产生重要影响。在数值模式中,土壤 水力参数的不确定性是导致土壤湿度模拟结果不确定性的主要原因之一。本文基于银河全 球大气谱模式 YHGSM (Yin He Global Spectral Model)的陆面模块,引入了 VG (van Genuchten)土壤水分特征曲线模型,并探讨了模型水力参数的两种不同取值方案对土壤湿 度离线模拟以及全球中期数值天气预报的影响。其中,土壤水力参数所需要的土壤类型数 据来源于全球土壤数据集 GSDE (Global Soil Dataset for Earth System Models)。离线试验结 果表明,除了冻土和有机土壤的模拟偏差较大外,YHGSM 的陆面模块对全球大部分地区 土壤湿度的模拟能力较好,模拟精度与 ERA5 土壤湿度再分析产品的精度近似;土壤水力 参数的不同取值方案对土壤湿度模拟有一定影响,其影响程度与土壤类型和局地气候条件 密切相关,粗质地和中等质地土壤对模型参数的敏感性更强。从全球中期数值预报结果来 看,土壤水力参数通过改变土壤湿度模拟,不仅对近地层温、湿度的短期预报结果产生重 要影响,而且可能会导致预报系统积分6天后的大尺度环流场发生显著变化。因此,对于 全球中期数值预报系统而言,优化土壤水力参数、提高土壤湿度模拟能力是非常重要的。 此外,对于数值预报系统而言,正确模拟土壤湿度随时间的变化特征可能要比土壤湿度模 拟值大小的准确与否更加重要。

关键词: 土壤水力参数, GSDE 全球土壤数据集, 土壤湿度, 全球中期数值天气预报

Influence of soil hydraulic parameters on global medium-range numerical

weather forecast system

Suxia Wang^{1,2}, Wenjing Zhao^{2*}

1 College of Computer Science and Technology, National University of Defense Technology,

Changsha 410073

2 College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology,

Changsha 410073

Abstract Soil moisture is one of the key factors to control the distribution of latent and sensible heat flux at the interface of land surface and atmosphere, which can have impacts both on weather and climate processes on various temporal and spatial scales, because of its certain memory properties. In the numerical model, the uncertainty of soil hydraulic parameters is one of the main

收稿日期 2022-02-19; 网络预出版日期 2022-**-**
作者简介 王素霞,女,1991 年出生,博士研究生,主要研究方向为陆面过程与陆气相互 作用研究。E-mail: wangsuxia@nudt.edu.cn
通讯作者 赵文静, E-mail: wjzhao@nudt.edu.cn
资助项目 国家自然科学基金 41605004
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41605004) reasons for the uncertainty of soil moisture simulations. Based on the land surface modules coupled in the Yin He Global Spectral Model (YHGSM), this paper introduces the VG (van Genuchten) soil water retention curve model, and discusses the influence of two different sets of soil hydraulic parameters on the offline simulation of soil moisture and the global medium-range numerical weather forecast. The soil type information needed for soil hydraulic parameters comes from the Global Soil Dataset for Earth System Models (GSDE). The offline results show that, except for the large simulation deviation of permafrost and organic soil, the land surface module of YHGSM has a good ability to simulate soil moisture in most parts of the world, and the simulation accuracy is similar to that of ERA5 soil moisture reanalysis products. Soil hydraulic parameters have a certain influence on soil moisture, and that the influence strength is closely related to soil types and local climatic conditions, and coarse and medium texture soil is more sensitive to model parameters. The results of the global medium-range numerical forecast experiments indicate that, by changing soil moisture simulations, soil hydraulic parameters not only have impacts on the short-term forecasting of near surface temperature and humidity, but may also lead to significant changes in the largescale circulation after 6-days forecast. Therefore, for the global medium-range numerical forecasting system, it is very important to optimize soil hydraulic parameters and improve the ability of soil moisture simulation. In addition, the ability to simulate time variations of soil moisture may be more important to a numerical prediction system than simulations of soil moisture absolute magnitudes.

Key words: Soil hydraulic parameters, Global Soil Dataset for ESMs (GSDE), Soil moisture, Global medium-range numerical weather forecast

1.引言

土壤湿度是影响陆-气间能量和水分交换的重要因素,而且由于其具有一定的记忆特性 (Seneviratne et al., 2010;赵家臻等,2021),可以对不同时空尺度的天气气候过程产生重 要影响。例如,已有大量研究表明,土壤湿度与中尺度对流系统之间存在重要的反馈机制 (Taylor et al., 2010; Wei et al., 2015; Koukoula et al., 2019),土壤湿度异常与季节性降水 和气温异常有密切关系(Koster et al., 2004; Ardilouze et al., 2017; Zhu et al., 2021; 陈海 山和周晶,2013),土壤湿度初始化对次季节-季节尺度降水和气温预测准确率具有显著影响 (Koster et al., 2010; Prodhomme et al., 2016)。因此,准确模拟土壤湿度对于提高天气气 候模式的预报预测水平具有重要价值。

在数值模式中,通常采用土壤水分特征曲线模型来描述土壤含水量与土壤水势和水力传导系数之间的关系。目前国际上最常用的两种土壤水特征曲线模型分别是CH模型(Campbell, 1974; Clapp and Hornberger, 1978)和VG模型(Mualem, 1976; van Genuchten, 1980)。 其中 CH 模型的关系式相对简单,引入的模型参数较少,已被广泛应用于各主要陆面模式, 例如通用陆面模式 CoLM (Common Land Model; Dai et al., 2003)和欧洲中期数值天气预 报中心 ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasting)早期的陆面模式 TESSEL (Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchange over Land; Van den Hurk et al., 2000)。 VG 模型的关系式相对复杂,但由于模型参数的物理意义更加明确、适用性较好,而且模拟 的土壤水特征曲线与实际观测曲线有较好的一致性 (Shao and Irannejad, 1999),目前已逐渐 被陆面模式所采用,如 ECMWF 的 H-TESSEL (the Hydrology TESSEL; Balsamo et al., 2009) 已经引入了 VG 模型, Dai et al. (2019b)发布的全球土壤水热参数集也包含了该模型。

然而,由于土壤水力参数很难直接测量,通常需要借助经验或半经验关系式(土壤转换 函数),利用易观测的土壤特性值(例如土壤孔隙度、土壤砂粒含量等)间接计算得到,从 而导致土壤水力参数具有很大的不确定性。目前,国内外学者针对 CH 模型和 VG 模型已经 分别提出了多种土壤转换函数(Cosby et al., 1984; Wösten et al., 1999, 2001; Schaap et al., 2001; Tóth et al., 2015)以及根据土壤类型给出的水力参数表(Wösten et al., 1999; Dai et al., 2013, 2019b)。然而,不同转换函数之间仍存在较大差异(Dai et al., 2019b; Zhang and Schaap, 2019)。因此,在数值预报系统中,合理选择土壤水力参数、研究其不确定性对数 值模式的影响是非常必要的。

此外,土壤质地和孔隙度等物理特性是决定土壤水热参数的关键要素,进而对土壤水热 过程产生重要影响(张宇和吕世华, 2001;梁晓和戴永久, 2008;李得勤等, 2015;何媛等, 2017)。Dai et al. (2019a) 对地球系统模式中所使用的土壤数据集进行了系统性总结。其中, 陆面模式中最常用的全球土壤数据源主要来自联合国粮农组织 FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations)的各个不同版本的世界土壤地图(FAO, 1981, 1995, 2003),但是该系列数据集的制作时间较早,分辨率较低,数据精度和代表性不足,正在逐 渐被新的数据集所取代。世界土壤数据库 HWSD (Harmonized World Soil Database; FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2012)相比于 FAO 数据集所包含的土壤图分辨率和数据精 度显著提高,已被英国协同陆地环境模拟器 JULES (The Joint UK Land Environment Simulator; Best et al., 2011) 等陆面模式所采用。全球土壤数据集 GSDE (Global Soil Dataset for Earth System Models; Shangguan et al., 2014) 在 HWSD 基础上做了较大改进,所包含的土壤廓 线数据更多、垂直分辨率和数据精度更高,已被应用于通用陆面模式 CoLM2014 (http://globalchange.bnu.edu.cn/colm2014/colm2014 src.tar.gz [2022-04-08]) 以及水文模型 VIC(Variable Infiltration Capacity; Liang et al., 1994; Miao and Wang, 2020)。但尚未见到 GSDE 数据集在数值预报系统中的应用评估工作。有研究表明, 数值模式对土壤数据源的选 择很可能会增加模式的不确定性(Livneh et al., 2015),对于陆气耦合的数值预报系统而言, 这种不确定性很可能被放大。因此,在全球数值天气预报系统中引入新的土壤数据集,对其 应用效果进行系统性评估和敏感性试验分析是必须的。

本文在银河全球大气谱模式 YHGSM (Yin-He Global Spectral Model) (吴建平等, 2011; Yang et al., 2015; Peng et al., 2019, 2020; Yin et al., 2018, 2021) 的陆面模块中引入了 VG 模型和 GSDE 全球土壤质地数据集,并对比分析了模型参数的不同取值方案对数值天气预 报的影响。全文内容安排如下:第2节介绍了 YHGSM 的陆面模块中所采用的土壤水运动 模型和本文所使用的主要数据集,同时给出了试验设计和分析方法;第3节对不同试验的土 壤湿度离线模拟结果进行了统计检验和对比分析;第4节以2014年7月份为例,统计分析 了模型参数的两种取值方案对全球中期数值天气预报的影响;第5节是全文总结和讨论。 2 方法

2.1 土壤水运动模型

在 YHGSM 的陆面模块中,非饱和土壤水的垂直运动由一维 Richards 方程描述:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h(\theta)}{\partial z} + 1 \right) \right] + S(\theta)$$
(1)

式中*θ*为土壤体积含水量(m³ m⁻³), z为深度坐标(向上为正), h为土壤吸力或负压(用同等水柱高度表示), K为水力传导系数(m s⁻¹), S表示由于植被蒸腾等效应引起的土壤失水率(m³ m⁻³ s⁻¹)。为了便于离散求解,引入土壤水扩散率定义式(Klute, 1952)

$$D(\theta) = -K(\theta) \frac{dh(\theta)}{d\theta}$$
(2)

(3)

4)

其中, D(θ)为土壤水扩散率 (m²s⁻¹)。将 (2) 式与 (1) 式结合,可以得到扩散型的土壤水运动微分方程:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - K(\theta) \right] + S(\theta)$$

方程的上边界由地表水分的净通量值决定(地表水净通量=总降水+融雪-冠层截留-地表 蒸发-地表径流),方程的底边界采用自由渗透假设。土壤层总深度为3米,垂直分为4 层,不考虑土壤质地在垂直方向的非均匀性。

由(1)~(3)式可见,求解土壤水运动微分方程的一个关键问题在于如何确定h(θ) 和K(θ) 的函数关系。YHGSM 原有陆面模块采用的是 CH 模型,且假设全球土壤质地 相同,即忽略了土壤水文特性的非均匀分布特征。本文在 YHGSM 的陆面模块中引入了 VG 模型来确定土壤含水量(θ)与土壤吸力(h)之间的关系曲线:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{(1 + (\alpha h)^n)^{1 - 1/n}}$$

式中 θ_r 是土壤含水量萎蔫值(h = 1500 kPa), θ_s 是饱和土壤含水量(h = 0 kPa)。根据 VG 模型,土壤水力传导系数为:

$$K(\theta) = K_{S} \Theta^{L} \left[1 - \left(1 - \Theta^{1/(1-1/n)} \right)^{1-1/n} \right]^{2}$$
(5)
$$\Theta = \frac{\theta - \theta_{r}}{\theta_{s} - \theta_{r}}$$
(6)

式中θ为有效饱和度; K_s表示饱和土壤水力传导系数 (ms⁻¹); α代表用水柱高度表示的毛细 管负压值的倒数 (m⁻¹); n是曲线的形态参数,细质地土壤的n值往往比粗质地土壤的更小; L是与土壤孔隙度有关的形状参数。将(4~6)式带入(2)式和(3)式,即可得到关于θ的 偏微分方程。 针对 VG 模型的 5 个土壤水力参数的取值问题,不同学者给出的研究结果有较大差异。 本文选择了 Wösten et al. (1999)提出的基于土壤类型的两套 VG 参数取值方案(表 1 的 Topsoil 方案和 Subsoil 方案),分别应用于数值模式,并对模拟结果进行了对比分析。需要 指出的是,Wösten et al.(1999)的这两套取值方案是分别基于表层(0~30 cm)和深层(30~100 cm)土壤观测信息得到的,可见,表层和深层土壤的某些水力特性存在较大差异。但是,由 于 YHGSM 的原陆面模块中尚未考虑土壤在垂直方向的异质性,且有研究表明,土壤性质 垂向非均匀分布时的土壤湿度廓线对于陆面模式垂直分层和离散化方案比较敏感(张述文 等,2009),因此,为了降低对全球数值预报系统稳定性的影响,本文仍然假设土壤质地在 垂直方向均匀分布,即土壤水力参数取值不考虑垂直分层的变化,表1中的两套取值方案分 别独立应用于数值模拟试验。全球土壤类型的水平分布信息由 GSDE 土壤质地数据集提供, 数据处理方式见本文第 2.2 节。

Table 1 The VG model parameters based on the soil texture class (Wösten et al., 1999)										
Textural	θ_r	θ_s	α	n	L	Ks				
class	$(m^3 m^{-3})$	$(m^3 m^{-3})$	(m^{-1})	(-)	(-)	$(cm day^{-1})$				
				Topsoil						
Coarse	0.025	0.403	3.83	1.38	1.250	60.000				
Medium	0.010	0.439	3.14	1.18	-2.342	12.061				
MedFine	0.010	0.430	0.83	1.25	-0.588	2.272				
Fine	0.010	0.520	3.67	1.10	-1.977	24.800				
VeryFine	0.010	0.614	2.65	1.10	2.500	15.000				
Organic	0.010	0.766	1.30	1.20	0.400	8.000				
				Subsoil						
Coarse	0.025	0.366	4.30	1.52	1.250	70.000				
Medium	0.010	0.392	2.49	1.17	-0.744	10.755				
MedFine	0.010	0.412	0.82	1.22	0.500	4.000				
Fine	0.010	0.481	1.98	1.09	-3.712	8.500				
VeryFine	0.010	0.538	1.68	1.07	0.0001	8.235				
Organic	0.010	0.766	1.30	1.20	0.400	8.000				

表1 基于土壤类型的 VG 模型参数(Wösten et al., 1999)

2.2 数据简介

本文使用的土壤数据来自 GSDE 数据集(<u>http://globalchange.bnu.edu.cn/research/data</u> [2022-04-08]); 离线陆面模拟试验的大气强迫场及耦合预报试验的大气模式初始场都来自 ERA5 再分析产品(Hersbach et al., 2020; <u>https://cds.climate.copernicus.eu</u> [2022-04-08]); 土 壤湿度离线模拟结果检验的参考数据来自国际土壤湿度观测网 ISMN(International Soil Moisture Network; Dorigo et al., 2011, 2013; <u>https://ismn.geo.tuwien.ac.at/en</u> [2022-04-08]) 的现场观测数据和欧洲航天局气候变化服务 ESA CCI (European Space Agency Climate Change Initiative)的土壤湿度融合产品(Dorigo et al., 2017; <u>https://cds.climate.copernicus.eu</u> [2022-04-08]);用于陆-气耦合预报试验效果检验的数据为 ERA5-Land(Muñoz-Sabater et al., 2021; <u>https://cds.climate.copernicus.eu</u> [2022-04-08]) 全球 2 米温、湿度再分析产品(分辨率 为 0.1°×0.1°, 需插值到模式网格分辨率 0.25°×0.25°),以及水平分辨率为 1.5°×1.5°的全 球逐日气候态数据集(温度、气压、位势高度、纬向风和经向风; Jung and Leutbecher, 2008)。 2.2.1 土壤类型数据

本文利用 GSDE 提供的砂粒(SAND)、黏粒(CLAY)和土壤有机碳(SOC)含量的原 始数据,根据 Wösten et al. (1999)所采用的 FAO 土壤分类标准(Coarse、Medium、Med-Fine、Fine、Very Fine、Organic),计算陆面模块所需的全球土壤类型。该套数据有两种水平 分辨率(30"×30"和5'×5'),垂直分为8层,本文采用的是分辨率为5'×5'的数据集。由于 YHGSM 的陆面模块不考虑土壤特性在垂直方向的异质性,因此,首先需要将 GSDE 原始数 据在垂直方向采用土壤深度加权平均的方式插值到 30~100 cm,得到全球单层土壤数据。选 择 30~100 cm 作为代表层数据的主要原因有两个:一是利用 GSDE 数据在全土壤层(0~2.296 m)的加权平均值得到的土壤类型分布特征与 30~100 cm 深度的土壤类型基本一致,只有大 洋洲东部的局部地区土壤质地偏粗,我国东南部局地土壤质地偏细(图略);二是目前国际 上陆面模式最常用的两套土壤数据集(FAO 和 HWSD)在垂直方向只有上(0~30 cm)、下 (30~100 cm)两层,由于影响土壤水分变化的植被根系主要集中在下层,所以陆面模式通 常采用的是下层土壤数据,因此本文针对 GSDE 数据也选择了 30~100 cm 的土壤层,以增 强陆面模块对不同土壤数据源的可选择性。

以单层土壤数据为基础,生成水平分辨率为 0.083°×0.083°(即 5′×5′)的全球土壤类 型数据。具体分类标准如下: Coarse (CLAY < 18%且 SAND > 65%)、Medium (18% < CLAY < 35%且 SAND > 15%,或 CLAY < 18%且 15% < SAND < 65%)、Med-Fine (CLAY < 35%且 SAND < 15%)、Fine (35% < CLAY < 60%)、Very Fine (CLAY > 60%)。在此基础上,根据 土壤有机碳含量的等级划分标准 (FAO, 2012),将 SOC > 2%的土壤重新定义为"Organic" 类。再利用最大面积法计算粗网格 (水平分辨率为 0.25°×0.25°)内的主导类型,以此作为 模式网格的土壤类型。图 1 给出的是由 GSDE 原始数据计算得到的 30~100 cm 深度的全球 土壤类型分布,其中,图 1a 未包含有机土壤类型,图 1b 包含有机土壤类型。





图 1 基于 GSDE 数据集的全球 30~100 cm 深度土壤类型分布: (a) 不含有机土壤类型, 蓝色"Δ"表示 土壤湿度观测站点的位置; (b) 包含有机土壤类型

Fig. 1 Global map of soil texture classes based on GSDE soil information for the depth of 30~100 cm: (a) not including and (b) including the Organic class

2.2.2 土壤湿度数据

本文利用 2010~2014 年的 ISMN 土壤湿度现场观测数据对离线模拟结果进行了统计检验。ISMN 数据的具体处理步骤如下:1)提取所有站点的表层土壤湿度观测数据(由于不同 点使用的仪器及其放置方式等并不统一,观测的表层土壤深度有所不同,本文将所有 0~15cm 的观测均视为表层土壤);2) 剔除 flag 不等于 G (good)的记录;3) 计算土壤湿度日平均 值;4) 仅保留全年有日均值记录大于 180 天的站点。最终得到有效观测站点数 3457 个 (包括不同年份之间的重复站点):2010 年 540 个、2011 年 626 个、2012 年 871 个、2013 年 955 个、2014 年 465 个。如果去除不同年份之间的重复部分,则共剩余 1130 个观测点,主要集 中在北美地区,部分站点分布在欧洲和大洋洲,少数分布在亚洲和非洲 (图 1a)。

ESA CCI 土壤湿度融合产品是以 GLDAS-Noah 表层土壤湿度为基准,对多种主、被动 微波遥感土壤湿度产品进行融合处理得到,空间分辨率为 0.25°×0.25°,时间序列从 1978 年 持续至今,包含日平均、10 日平均和月平均三种时间尺度。本文采用的是 ESA CCI 2010~2014 年的逐日土壤湿度融合产品,该时段对应的传感器包括 ASCAT-A、SMOS 和 AMSR2。其土 壤湿度产品已经剔除了 flag 不等于零(雪、冻土、热带雨林等特殊下垫面和异常值)的记录,本文未做其它处理。

2.2.3 大气再分析产品

ERA5 是 ECMWF 推出的第五代大气再分析产品。相关研究表明, ERA5 再分析产品精度相比于其上一代 ERA-Interim 产品有较大提升(Beck et al., 2019; Nogueira, 2020)。本文采用 ERA5 水平分辨率为 0.25°×0.25°的逐小时再分析产品离线驱动 YHGSM 的陆面模块。 具体的大气强迫场要素包括:2米温度、2米露点温度(需转换为2米比湿)、10米风速、降水率、表面气压、地表接收的向下长波辐射和向下短波辐射。同时,利用 ERA5 2014 年 7 月的分辨率为 T639/L137 的大气再分析产品为陆气耦合试验提供大气初始场。

2.3 试验设计和分析方法

第一组试验是全球离线陆面模拟试验,水平分辨率为 0.25°×0.25°。大气强迫场来自水 平分辨率为 0.25°×0.25°的 ERA5 逐小时再分析产品,所选时间段为 2010 年 1 月 1 日至 2014 年 12 月 31 日。模式积分步长为 30 min,输出间隔为 3 小时,连续积分 45 年 (2010-2014 重 复运行 9 次),前 40 年作为 spin-up,最后 5 年的模拟结果用于统计检验,并为耦合预报试 验提供相应时段的陆面初始场。需要指出的是,受计算条件和 ERA5 数据集时间序列长度限 制,本文利用有限时间序列的大气强迫场循环驱动陆面模式的方法使其达到近似平衡状态。 虽然这种 spin-up 方法得到的气候态与直接采用连续强迫场驱动所得到的气候态比较接近, 也是一种常用的陆面模式 spin-up 方法,但是由于土壤湿度等陆面过程的多种状态变量具有 相对较长的记忆,可能会导致循环驱动所得到的年际变化存在一定误差。但该问题并不是导 致土壤湿度离线模拟偏差的主要原因,因此本文暂不做深入讨论。

第二组试验是陆-气耦合预报试验。为节省计算开支,大气谱模式的分辨率设为 TL639/L137,预报时段选择的是 2014 年 7 月 1 日至 31 日,每日 00 时起报,每个算例预报 10 天,共 31 个算例。耦合试验的大气初始条件由分辨率为 TL639/L137 的 ERA5 再分析产 品提供,陆面初始条件由第一组试验的离线模拟结果提供,后者的水平网格需要从 0.25°× 0.25°的等经纬度网格插值到 TL639 对应的精简高斯网格。

根据土壤数据处理方式的不同以及所采用的土壤水力参数的差异,共设计了 3 个对比试验(表 2): "GSDE.SUBP"、"GSDE.TOPP"和"GSDE.OC.TOPP"试验。其中,后缀"TOPP"和"SUBP"分别对应表 1 中的上(Topsoil)、下(Subsoil)两套土壤水力参数。"GSDE.SUBP"和"GSDE.TOPP"的土壤类型不包含"Organic",即在计算土壤类型时仅考虑砂粒和黏粒的含量,不考虑有机碳信息(图 1a)。"GSDE.OC.TOPP"的土壤类型包含"Organic"(图 1b)。

表 2. 试验设计 Table 2 Configurations of experiments									
	GSDE.TOPP	GSDE.SUBP	GSDE.OC.TOPP						
VG Parameters	Table1. "Topsoil"	Table1. "Subsoil"	Table1. "Topsoil"						
Including "Organic"	No	No	Yes						

本文针对土壤湿度离线模拟结果所采用的统计检验指标主要包括线性相关系数(R)、平均偏差(Bias)和无偏均方根误差(ubRMSE)。其中,R只保留了显著性水平达到95%以上的计算结果。用于统计检验的基础数据是土壤体积含水量的日平均值,其中模拟和站点观测的日平均值由每日 00、03、06、09、12、15、18、21UTC 的土壤湿度值取平均得到,ESA CCI 土壤湿度日平均值由融合产品直接提供。由于 ISMN 站点数量随时间有增加变化,因此本文首先对离线模拟结果(2010-2014年)进行了逐年的统计检验,最后将 5 年的统计指标做平均处理。陆-气耦合试验中的 2 米温度和露点温度预报效果的统计检验指标为月平均偏差,用 ERA5-Land 再分析产品作为真实值。对于大尺度环流场的预报结果,其统计检验指标为7月份北半球 500hPa(位势高度、温度、纬向风、经向风)的均方根误差(RMSE)和距平相关系数(ACC),所有求和以及平均都考虑了网格权重。

3.土壤湿度离线模拟结果检验和对比分析

3.1 基于 ISMN 数据的检验

本文首先利用 ISMN 数据对第一组试验的全球土壤湿度离线模拟结果进行了统计检验, 模拟值选择的是与观测站点最邻近的模式网格数据。为了明确给出陆面模块对不同土壤类型 的模拟能力,需要根据模式网格土壤类型信息将观测站点进行分类统计。表 3 给出了三个试 验中各土壤类型的分类统计检验结果,其中的"Num"代表所有年份的有效站点数之和(包 含不同年份之间的重复站点)。可以看出,在所有 3457 个观测站点中,"Medium"土壤类型 占比最大,约有 80%;其它土壤类型相对较少,其中"Very Fine"类型的站点数最少,只有 7 个。

表 3. 基于 2010~2014 年 ISMN 的外场观测数据对离线土壤湿度模拟结果的统计检验, Bias 和 ubRMSE 的单位为 m³ m⁻³ 其中 GSDE.OC.TOPP 试验与 GSDE.TOPP 试验只有"Organic"类型的模拟结果不同。 Table 3. Statistical scores for the comparison between offline simulated soil moisture and ISMN's in situ observations for 2010~2014. Bias and ubRMSE are in m³ m⁻³. The difference of simulation results between GSDE.OC.TOPP and GSDE.TOPP is only shown in the "Organic" soil texture class.

Texture	Num		GSDE.TOPP			GSDE.SU	IBP	GSDE.OC.TOPP		
class		R	Bias	ubRMSE	R	Bias	ubRMSE	R	Bias	ubRMSE
Coarse	216	0.669	0.034	0.041	0.657	-0.012	0.040	-	-	-
Medium	2842	0.651	0.085	0.059	0.645	0.069	0.058	-	-	-
MedFine	51	0.733	0.029	0.057	0.731	0.024	0.056	-	-	-
Fine	268	0.695	0.146	0.056	0.686	0.143	0.056	-		
VeryFine	7	0.628	0.125	0.063	0.599	0.119	0.059	-	10	-
Organic	73	0.500	0.082	0.062	0.526	0.250	0.075	0.539	0.322	0.079

从总体统计指标来看,YHGSM 的陆面模块对土壤湿度的离线模拟能力较好。各试验给 出的土壤湿度模拟值与观测值的相关性较好,除有机土壤之外,其它土壤类型的 R 值都达 到了 0.6 以上,无偏均方根误差在 0.05 m³ m⁻³ 左右。此外,各试验总体都高估了土壤湿度, 其主要原因很可能与降水强迫场有关。有研究表明,ERA5 降水产品存在明显的正偏差(Xu et al., 2019; Amjad et al., 2020)。当然,产生模式偏差的因素较多,除了气象场偏差外,还 要重点考虑模式的系统性偏差,以及模式网格与观测站点的空间尺度不匹配等问题,需要进 行更加系统性的分析研究。本文利用相同的统计方法和观测数据对 2014 年 ERA5 的土壤体 积含水量再分析产品进行了统计分析,按照不同土壤类型划分,相关系数分别为: 0.659 (Coarse)、0.678(Medium)、0.619(Med-Fine)、0.682(Fine)和 0.499(Ogranic);GSDE.TOPP 试验相应的统计指标为: 0.655(Coarse)、0.649(Medium)、0.611(MedFine)、0.656(Fine) 和 0.407(Ogranic)。可见,虽然本文尚未采用陆面同化技术对模拟结果进行订正,但土壤湿 度的模拟能力已经与 ERA5 再分析产品近似。

从不同土壤类型的统计检验结果来看,各试验对"Organic"类型土壤湿度的模拟能力明显不足,而且 Wosten1999 提出的有机土壤水力参数值并不适合引入 YHGSM。表 3 中,GSDE.OC.TOPP 作为 GSDE.TOPP 的补充试验,两者仅对"Organic"类型的土壤水力参数取值不同。GSDE.OC.TOPP 的相关系数(0.539)明显低于其它土壤类型,而 Bias 和 ubRMSE分别高达 0.322 和 0.079 m³ m⁻³。如果不考虑土壤有机质的存在(GSDE.TOPP 试验),则相关系数虽然略有下降(降低约 7%),但是平均偏差和无偏均方根误差都显著减小(分别减小了约 75%和 22%)。



图 2 GSDE.TOPP 的土壤体积含水量与 ESA CCI 逐日土壤湿度产品的多年平均(2010~2014)的(a)线性 相关系数和(b)无偏均方根误差

Fig. 2 The multi-year (2010~2014) average of (a) correlation coefficients and (b) unbiased RMSE between offline simulated soil volumetric water content of GSDE.TOPP and ESA CCI daily soil moisture product

由于 ISMN 观测站点主要集中在北美(如图 1a),为了更详细分析土壤湿度在全球的模 拟情况,本文进一步将模拟结果与 2010~2014 年 ESA CCI 的全球土壤湿度融合产品进行了 对比分析。图 2 给出的是 GSDE.TOPP 试验的土壤体积含水量与 ESA CCI 逐日土壤湿度产 品的线性相关系数和无偏均方根误差(2010~2014 年平均值)的全球分布,其中相关系数已 经剔除了未通过显著性检验的部分。可以看出,除了长期被冻土和积雪覆盖的北半球高纬度 地区以外,其它大部分地区的相关系数都在 0.6 以上,无偏均方根误差在 0.05 m³ m⁻³以下。 结合图 1b 可以看出,模式对于有机土壤(例如北美、非洲以及我国西北部)和冻土的模拟 能力偏低,该分布特征与基于 ISMN 站点观测资料的统计结果基本一致。GSDE.SUBP 试验 相应统计指标的全球分布情况与图 2 近似(图略)。

3.3 土壤湿度对土壤水力参数的敏感性

对比表 3 中 GSDE.TOPP 与 GSDE.SUBP 试验的统计指标可以看出,除有机土壤类型外, 两试验的 ubRMSE 基本相当,GSDE.TOPP 试验的 R 普遍高于 GSDE.SUBP 试验,但同时

Bias 也相对更大。此外,还可以看出,对于粗质地("Coarse")和中等质地("Medium")的 土壤类型,土壤水力参数对土壤湿度模拟有更加显著的影响。

图 3 进一步给出了 2014 年 7 月 GSDE.TOPP 与 GSDE.SUBP 试验的土壤体积含水量之差的全球分布。结合全球土壤类型分布特征(图 la)可以发现,两试验的土壤湿度差异与土壤类型密切相关,但同时也表现出一定的局地性特征。对于全球大部分粗质地和中等质地土壤地区,GSDE.TOPP 的土壤体积含水量明显更高(冷色),两试验的月平均最大差值达到 0.04~0.08 m³ m⁻³,例如北美北部、南美和非洲大部、大洋洲中西部、亚欧大陆北部和中国中部等;但是在局部粗质地土壤地区,例如非洲北部,出现了 GSDE.TOPP 的土壤体积含水量偏低的现象(暖色)。对于部分细质地土壤("Fine"、"VeryFine")地区,GSDE.TOPP 试验的土壤湿度略低(暖色),年平均差值在 0.02 m³ m⁻³ 以内,例如大洋洲东部、非洲中东部、南美中东部等;但也有部分地区的土壤湿度高于 GSDE.SUBP 试验(冷色),例如东南亚、非洲中部和北美局部等。该结论与表 3 给出的年平均偏差的统计结果基本一致。上述两试验的对比结果再次表明,土壤水力参数对土壤湿度模拟具有重要影响,其影响程度与土壤质地密切相关,粗质地和中等质地土壤对水力参数的敏感性更强。此外,水力参数的影响同时受气候条件等环境因素的制约,表现出一定的局地差异性。





4 土壤水力参数对全球中期数值天气预报的影响

已有大量研究表明,土壤湿度通过改变地表感热和潜热通量的分配,对近地层温、湿度 产生重要影响。本文侧重分析了全球2米温度预报结果对土壤水力参数的敏感程度。模式结 果来自本文2.3节陆-气耦合预报试验(GSDE.TOPP与GSDE.SUBP试验各31个预报算例), 参考数据来自 ERA5-Land 全球再分析产品,检验指标采用的是月平均结果。由于近地层气 温具有显著的日变化特征,某一给定时刻的全球温度分布图并不能反映相同代表时段的温度 特征。因此,本文首先利用2014年7月逐日4个时刻(00、06、12、18UTC)的 ERA5-Land 的2米温度再分析数据,首先计算出全球每个网格点出现2米温度最大值时的近似时间 (time.T2Max)。在此基础上,根据 time.T2Max 的全球分布结果,确定每个网格点上与其相应的模式积分时长,即 24、30、36 和 42 小时的模式预报结果分别对应 00、06、12 和 18UTC 的再分析数据。最终,得到 2 米温度最大值(T2.Max)的全球分布数据集。同理,可以得到 2 米温度最小值(T2.Min)的全球分布数据集。



-3 -2 -1 -0.6 -0.4 -0.2 0.2 0.4 0.6 1 2 3 图 4 GSDE.TOPP 与 GSDE.SUBP 预报的 2 米气温的 (a) 日最大值之差和 (b) 日最小值之差 Fig. 4 The difference of 2 m temperature between GSDE.SUBP and GSDE.TOPP: (a) the daily maximum and (b) the daily minimum

图 4 给出的是 2014 年 7 月 GSDE.TOPP 与 GSDE.SUBP 预报的 2 米气温的日最大值之 差(图 4a)和日最小值之差(图 4b)的全球分布情况,蓝色表示 GSDE.TOPP 预报的气温 低于 GSDE.SUBP。由图可见,2 米气温的差异具有明显的日变化特征,GSDE.TOPP 试验的 日最高气温(T2.max)明显偏低(图 4a 冷色),相反,日最低气温(T2.min)明显偏高(图 4b 暖色)。2 米气温的这种显著差异与土壤含水量的变化(图 3)密切相关。在土壤含水量 偏高的大部分地区,日最高气温明显降低,例如北欧、非洲中部、北美中部等局部地区的 T2.max 月平均最大差值达到 0.6 度左右;同时,2 米温度最小值明显升高,例如非洲北部和 南部、大洋洲、亚洲中部等局部地区的 T2.min 月平均最大差值升高了约1度以上。这是因 为,土壤湿度偏高,地表潜热通量增加,感热释放减小,导致该地区近地层的白天温度(最 大值)降低、夜间温度(最小值)升高,从而降低了温度的日变化幅度。此外,还可以看出, 土壤湿度对气温的影响还与土壤本身含水量多少以及天气气候条件等外界因素有关,通常对 于干旱和半干旱气候区,降水量较少、土壤粒径较粗、含水量较低,气温对土壤湿度的敏感 性更大,相反对于湿润多雨地区,土壤湿度对气温的影响较小,例如我国东南部、非洲热带 雨林等地区。





Fig. 5 The difference of forecast bias of (a) the daily maximum and (b) the daily minimum 2 m temperature between GSDE.SUBP and GSDE.TOPP: the positive value (red) means the bias of GSDE.SUBP is larger than that of GSDE.TOPP

图 5 给出的是 7 月份两个试验的 2 米气温预报偏差的差值,正值(红色)表示 GSDE.TOPP 试验的预报偏差小于 GSDE.SUBP 试验。可以看出,在绝大部分地区,GSDE.TOPP 的日最 高气温和日最低气温的预报偏差都明显小于 GSDE.SUPP 试验,月平均预报偏差降低约 0.5~1 度。此外,与图 5 类似,GSDE.TOPP 的 2 米露点温度的预报偏差也低于 GSDE.SUBP 试验 (图略)。

表 4 是两个预报试验的 7 月份北半球 500hPa 位势高度(GH)、温度(T)和风速(U、V)的 1~10 天预报场的统计检验结果的对比情况。其中,"1"表示 GSDE.TOPP 试验的预报 结果优于 GSDE.SUBP 试验(置信区间为 75%),"0"表示两试验的预报效果并无显著差异。

从月平均的统计结果来看,无论是均方根误差还是距平相关系数,GSDE.TOPP 试验 6 天以 后的各气象要素场的预报效果都优于 GSDE.SUBP 试验。也就是说土壤水力参数的差异可以 导致数值模式积分 6 天以后的大尺度环流场发生一定变化。为了进一步了解不同土壤水力 参数配置对单次预报的影响程度,本文随机选择了 2014 年 7 月的一个预报算例(7 月 1 日 00 时起报),对比了两试验对北半球 500hPa 位势高度场的预报技巧(表 5)。结果表明,两 试验第 7~10 天的预报技巧出现明显差异,GSDE.TOPP 试验比 GSDE.SUBP 试验的距平相关 系数增加了 2%~18%。由上述分析可见,陆面过程对中期数值天气预报的影响凸显,合理选 择土壤水力参数不仅可以有效降低短期内近地层温湿度的预报偏差,而且可以进一步提升中 期数值天气预报水平。当然,不同预报算例的结果差异有所不同,土壤水力参数对大尺度过 程的具体影响机制还需要根据不同的天气过程进行更深入的研究。

表 4 北半球 500hPa 位势高度场(G500)、温度场(T500)和风场(U500、V500)的 10 天预报技巧的对 比结果:"1"表示 GSDE.TOPP 结果明显优于 GSDE.SUBP(置信区间为 75%),"0"表示两试验结果差 异不显著; RMSE-均方根误差,ACC-距平相关系数

Table 4 Comparison of root-mean-square-error (RMSE) and anomaly correlation coefficient (ACC) for 500 hPa geopotential height (G500), Temperature (T500) and wind (U500, V500) fields for 10-day forecast for the North-Hemisphere between two experiments: "1" means that the results of GSDE.TOPP is obviously better than that of GSDE.SUBP (with 75% confidence interval), and "0" means there's no significant

difference between the two experiments.										
	024H	048H	072H	096H	120H	144H	168H	192H	216H	240H
		RMSE								
G500	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
T500	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
U500	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
V500	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
	ACC									
G500	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
T500	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
U500	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
V500	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1

表 5 2014 年 7 月 1 日 00 时预报的北半球 500hPa 位势高度场(G500)的均方根误差(RMSE)和距平相 关系数(ACC)

 Table 5 The root-mean-square-error (RMSE) and anomaly correlation coefficient (ACC) for 500 hPa geopotential height field for 10-day forecast (start from 2014-07-01_00UTC) for the North-Hemisphere

	024H	048H	072H	096H	120H	144H	168H	192H	216H	240H
	RMSE									
GSDE.TOPP	4.79	8.23	13.41	18.57	24.94	38.67	47.13	51.85	56.10	59.33
GSDE.SUBP	4.78	8.23	13.36	18.4	24.87	38.52	47.81	54.58	58.98	62.36
		ACC								
GSDE.TOPP	0.997	0.991	0.973	0.944	0.900	0.777	0.711	0.653	0.595	0.557
GSDE.SUBP	0.997	0.991	0.973	0.946	0.900	0.777	0.697	0.612	0.541	0.470

5 结论和讨论

本文基于 YHGSM 的陆面模块引入了 VG 土壤水特征曲线模型和 GSDE 全球土壤质地 数据集,并探讨了模型参数的两种取值方案(表1)对土壤湿度离线模拟以及全球中期数值 天气预报的影响。其中,全球土壤类型共分为六类("Coarse"、"Medium"、"MedFine"、"Fine"、 "VeryFine"、"Organic"),且不考虑垂直方向异质性。

土壤湿度验证数据来自 2010~2014 年的 ISMN 站点观测资料和 2014 年的 ESA CCI 的全 球土壤湿度融合产品。离线陆面模拟的大气强迫场来自 ERA5 全球逐小时再分析产品,模式

积分 45 年,最后 5 年 (2010~2014)的模拟结果用于统计检验。分析结果表明,除了有机土 壤以及长期有冻土和积雪覆盖地区之外,YHGSM的陆面模块对全球大部分地区土壤湿度的 模拟能力较好,与 ERA5 再分析产品的精度近似。土壤水力参数对土壤湿度模拟具有重要影 响,其影响程度与土壤质地密切相关,粗质地和中等质地土壤的敏感性最强。同时,由于受 气候条件等环境因素的制约,模型参数的影响具有一定的局地差异性。

为了进一步分析土壤水力参数差异对数值天气预报产生怎样的影响,本文分别利用 GSDE.TOPP和GSDE.SUBP试验的离线模拟结果作为全球中期数值预报系统的陆面初始场, 进行了一个月的数值预报试验(2014年7月,每个预报算例积分10天),并对两个试验的 预报结果进行了统计检验和对比分析。统计结果表明,土壤水力参数不仅可以影响全球近地 层2米温、湿度预报结果,而且可能导致积分6天以后的高空大尺度环流场发生明显变化。

此外,离线陆面模拟的统计检验结果表明,与 GSDE.SUBP 试验相比,GSDE.TOPP 试验的相关系数更高,但同时平均偏差也更大。在耦合预报试验中,GSDE.TOPP 试验的预报 效果更好,给出的2米温度日最大值和最小值的预报偏差都明显小于 GSDE.SUBP 试验,而 且其6天后的位势高度、温度、风速等要素的统计指标也优于 GSDE.SUBP 试验。对比两试 验的统计结果,可以发现,对于数值预报系统而言,正确模拟土壤湿度随时间的变化特征可能要比土壤湿度模拟值大小的准确与否更加重要。

理论上讲,表1中的"Subsoil"参数方案与本文所采用的土壤数据代表层(30~100 cm) 更匹配。然而,实际统计检验结果表明,"Topsoil"参数方案似乎更适合于本文的数值预报 系统。这也说明了在数值预报系统中,针对某个陆面参数的优化非常复杂,不仅需要考虑陆 面过程内部的相互作用问题,而且要关注陆气之间的耦合过程。此外,由于本文的陆-气耦 合试验仅针对7月份进行了统计检验,而不同季节土壤湿度对大气的影响有所不同,结论也 可能有所差异,因此在后续工作中仍需针对参数化方案的选择开展更多的试验进行全面的分 析。同时,本文的离线评估结果还表明,YHGSM的陆面模块对于有机土壤水分的模拟能力 明显不足。根据全球土壤数据显示,北半球中高纬地区的浅层土壤(0~30 cm 深度)富含大 量有机质。有研究指出,土壤有机质对 0~20 cm 深度的土壤水热性质有显著影响(符晴等 2021)。因此,YHGSM 的陆面模块将继续改进对土壤有机质和土壤垂向异质性特征的参数 化描述,提高模式对多时间尺度土壤水文过程的模拟能力,从而更好地为全球中期和月延伸 期数值预报系统服务。

参考文献(References)

- Amjad M, Yilmaz M T, Yucel I, et al. 2020. Performance evaluation of satellite- and model-based precipitation products over varying climate and complex topography [J]. Journal of Hydrology, 584: 124707.
- Ardilouze C, Batté L, Bunzel F, et al. 2017. Multi-model assessment of the impact of soil moisture initialization on mid-latitude summer predictability [J]. Climate Dynamics, 49(11): 3959-3974.

Balsamo G, Viterbo P, Beljaars A, et al. 2009. A revised hydrology for the ECMWF model:

Verification from field site to terrestrial water storage and impact in the Integrated Forecast System [J]. Journal of Hydrometeorology, 10(3): 623-643.

- Beck H E, Pan M, Roy T, et al. 2019. Daily evaluation of 26 precipitation datasets using Stage-IV gauge-radar data for the CONUS [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 23(1): 207-224.
- Best M J, Pryor M, Clark D B, et al. 2011. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 1: Energy and water fluxes [J]. Geoscientific Model Development, 4(3): 677-699.
- Campbell G S. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data [J]. Soil Science,117(6): 311-314.
- 陈海山,周晶. 2013. 土壤湿度年际变化对中国区域极端气候事件模拟的影响研究II: 敏感性 试验分析[J]. 大气科学, 37(1): 1-13. Chen H, Zhou J. 2013. Impact of interannual soil moisture anomaly on simulation of extreme climate events in China. Part II: Sensitivity experiment analysis [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(1): 1-13.
- Clapp R W, Hornberger G M. 1978. Empirical equations for some soil hydraulic properties [J]. Water Resources Research, 14(4): 601-604.
- Cosby B J, Hornberger G M, Clapp R B, et al. 1984. A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils [J]. Water Resources Research, 20(6): 682-690.
- Dai Y J, Zeng X B, Dickinson R E, et al. 2003. The common land model [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 84(8): 1013-1023.
- Dai Y J, Shangguan W, Duan Q Y, et al. 2013. Development of a China dataset of soil hydraulic parameters using pedotransfer functions for land surface modeling [J]. Journal of Hydrometeorology, 14(3): 869-887.
- Dai Y J, Shangguan W, Wei N, et al. 2019a. A review of the global soil property maps for Earth system models [J]. Soil, 5(2): 137-158.
- Dai Y J, Xin Q C, Wei N, et al. 2019b. A global high-resolution data set of soil hydraulic and thermal properties for land surface modeling [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 11(9): 2996-3023.
- Dorigo W A, Wagner W, Hohensinn R, et al. 2011. The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global in situ soil moisture measurements [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 15(5): 1675-1698.
- Dorigo W A, Xaver A, Vreugdenhil M, et al. 2013. Global automated quality control of in situ soil moisture data from the International Soil Moisture Network [J]. Vadose Zone Journal, 12(3): vzj2012.0097.
- Dorigo W A, Wagner W, Albergel C, et al. 2017. ESA CCI soil moisture for improved earth system understanding: state-of-the art and future directions [J]. Remote Sensing of Environment, 203: 185-215.
- FAO. 1981. Soil Map of the World [R], Vol. 110, UNESCO, Paris, France.
- FAO. 1995. Digitized Soil Map of the World and Derived Soil Properties [R], FAO, Rome, Italy.
- FAO. 2003. The Digitized Soil Map of the World Including Derived Soil Properties version 3.6[R], FAO, Rome, Italy.
- FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC. 2012. Harmonized World Soil Database version1.2 [R], FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.
- 符晴, 阳坤, 郑东海, 等. 2021. 青藏高原中部土壤有机质含量对不同深度土壤温湿度的影响

研究[J]. 高原气象: 1-12. Fu Q, Yang K, Zheng D H, et al. 2021. Impact of Soil Organic Matter Content on Soil Moisture and Temperature at Different Depths in the Central Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese): 1-12.

- 何媛, 文军, 黄彦彬, 等. 2017. 黄河源区土壤湿度时空分布的模拟研究[J]. 高原气象, 36(1): 129-137. He Y, Wen J, Huang Y B, et al. 2017. Spatio-temporal characteristics of soil moisture simulated over the source region of the Yellow River [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 36(1): 129-137.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730): 1999-2049.
- Jung T, Leutbecher M. 2008. Scale-dependent verification of ensemble forecasts [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 134(633): 973-984.
- Klute A. 1952. A numerical method for solving the flow equation for water in unsaturated materials [J]. Soil Science, 73(2):105-116.
- Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z, et al. 2004. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. Science 305(5687): 1138-1140.
- Koster R D, Mahanama S P P, Yamada T J, et al. 2010. Contribution of land surface initialization to subseasonal forecast skill: first results from a multi-model experiment [J]. Geophysical Research Letters 37(2): L02402.
- Koukoula K, Nikolopoulos E I, Kushta J, et al. 2019. A Numerical Sensitivity Analysis of Soil Moisture Feedback on Convective Precipitation [J]. Journal of Hydrometeorology, 20(1): 23-44.
- 李得勤, 段云霞, 张述文, 等. 2015. 土壤湿度和土壤温度模拟中的参数敏感性分析和优化 [J]. 大气科学, 39(5): 991-1010. Li D Q, Duan Y X, Zhang S W, et al. 2015. Quantifying parameter sensitivity and calibration in simulating soil temperature and moisture [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39(5): 991-1010.
- 梁晓, 戴永久. 2008. 通用陆面模式对土壤质地和亮度的敏感性分析[J]. 气候与环境研究, 13(5): 585-597. Liang X, Dai Y J. 2008. A sensitivity study of the common land model on soil texture and soil brightness [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 135: 585-597.
- Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F, et al, 1994. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models [J]. Journal of Geophysical Research [Atmosphere], 99(D7): 14415-14428.
- Livneh B, Kumar R, Samaniego L. 2015. Influence of soil textural properties on hydrologic fluxes in the Mississippi River basin [J]. Hydrological Processes, 29(21): 4638-4655.
- Miao Y, Wang A H. 2020. A daily 0.25°×0.25° hydrologically based land surface flux dataset for conterminous China, 1961-2017 [J]. Journal of Hydrology, 590: 125413.
- Mualem Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media [J]. Water Resources Research, 12(3): 513-522.
- Muñoz-Sabater J, Dutra E, Agustí-Panareda A, et al. 2021. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications [J]. Earth System Science Data,13(9): 4349-4383.
- Nogueira M, 2020. Inter-comparison of ERA-5, ERA-interim and GPCP rainfall over the last 40 years: Process-based analysis of systematic and random differences [J]. Journal of Hydrology, 583: 124632.
- Peng J, Wu J P, Zhang W M, et al. 2019. A modified nonhydrostatic moist global spectral

dynamical core using a dry-mass vertical coordinate [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 145(723): 2477-2490.

- Peng J, Zhao J, Zhang W M, et al. 2020. Towards a dry-mass conserving hydrostatic global spectral dynamical core in a general moist atmosphere [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(732), 3206-3224.
- Prodhomme C, Doblas-Reyes, F, Bellprat O, et al. 2016. Impact of land-surface initialization on sub-seasonal to seasonal forecasts over Europe [J]. Climate Dynamics, 47(3): 919-935.
- Shao Y P, Irannejad P. 1999. On the choice of soil hydraulic models in land-surface schemes [J]. Boundary-Layer Meteorology, 90(1): 83-115.
- Shangguan W, Dai Y J, Duan Q Y, et al. 2014. A global soil data set for earth system modeling [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 6(1): 249-263.
- Schaap M G, Leij F J, and van Genuchten M T. 2001. ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions [J]. Journal of Hydrology, 251(3-4): 163-176.
- Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, et al. 2010. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review [J]. Earth-Science Reviews, 99(3-4): 125-161.
- Taylor C M, Harris P P, Parker, D J. 2010. Impact of soil moisture on the development of a Sahelian mesoscale convective system: a case-study from the AMMA Special Observing Period [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 136(S1): 456-470.
- Tóth B, Weynants M, Nemes A, et al. 2015. New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe [J]. European Journal of Soil Science, 66(1): 226-238.
- Van den Hurk B J J M, Viterbo P, Beljaars A C M, et al. 2000. Offline validation of the ERA40 surface scheme [R]. ECMWF Technical Memorandum No. 295.
- van Genuchten M T. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 44(5): 892-898.
- Wei J F, Su H, Yang Z L. 2015. Impact of moisture flux convergence and soil moisture on precipitation: a case study for the southern united states with implications for the globe [J]. Climate Dynamics, 46(1-2): 467-481.
- Wösten J H M, Lilly A, Nemes A, et al. 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils [J]. Geoderma, 90(3): 169-185.
- Wösten J H M, Pachepsky Y A, Rawls W J. 2001. Pedotransfer functions: Bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics [J]. Journal of Hydrology, 251(3-4): 123-150.
- 吴建平,赵军,宋君强,等. 2011. 全球非静力谱模式动力框架初步设计[J]. 计算机工程与设计, 32(10): 3539-3543.Wu J P, Zhao J, Song J Q, et al. 2011. Preliminary design of dynamic framework for global non-hydrostatic spectral model [J]. Computer Engineering and Design (in Chinese), 32(10): 3539-3543.
- Xu X Y, Frey S K, Boluwade A, et al. 2019. Evaluation of variability among different precipitation products in the Northern Great Plains [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 24: 100608.
- Yang J H, Song J Q, Wu J P, et al. 2015. A high-order vertical discretization method for a semiimplicit mass-based non-hydrostatic kernel [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 141(692): 2880-2885.
- Yin F K, Wu G L, Wu J P, et al. 2018. Performance evaluation of the fast spherical harmonic

transform algorithm in the Yin–He global spectral model [J]. Monthly Weather Review, 146(10): 3163-3182.

- Yin F K, Song J Q, Wu J P, et al. 2021. An implementation of single-precision fast spherical harmonic transform in Yin–He global spectral model [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 147(737): 2323-2334.
- 张述文,李得勤,邱崇践. 2009. 三类陆面模式模拟土壤湿度廓线的对比研究[J]. 高原气象, 285: 988-996. Zhang S W, Li D Q, Qiu C J. 2009. A comparative study of the three land surface models in simulating the soil moisture [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 285: 988-996.
- 张宇, 吕世华. 2001. 陆面过程模式对不同土壤物理性质的敏感性研究[J]. 冰川冻土, 23(3):
 270-275. Zhang Y, Lv S H. 2001. The sensitivity of land surface model to physical properties of different soils [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 23(3): 270-275.
- Zhang Y G, Schaap M G. 2019. Estimation of saturated hydraulic conductivity with pedotransfer functions: A review [J]. Journal of Hydrology, 575: 1011-1030.
- 赵家臻, 王爱慧, 王会军. 2021. 中国地区土壤湿度记忆性及其与降水特征变化的关系[J]. 大气科学, 45(4): 799-818. Zhao J Z, Wang A H, Wang H J. 2021. Soil moisture memory and its relationship with precipitation characteristics in China Region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(4): 799-818.
- Zhu S G, Qi Y J, Chen H S, et al. 2021. Distinct impacts of spring soil moisture over the Indo-China Peninsula on summer precipitation in the Yangtze River Basin under different SST backgrounds [J]. Climate Dynamics, 56(5): 1895-1918.

