文章编号:1000-7601(2018)05-0270-07 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2018.05.38

CLDAS 和 GLDAS 土壤湿度资料在黄土高原的适用性评估

刘欢欢[1],王 飞[1,2,3],张廷龙[1,4]

(1.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100;2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;
3.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;4.西北农林科技大学林学院生态预测与全球变化实验室,陕西 杨凌 712100)

摘 要:本研究基于 2011~2013 年 3~9 月 CMA 陆面数据同化系统(CLDAS)和全球陆面数据同化系统(GLDAS)Noah 陆面模式提供的表层 10 cm 土壤湿度数据,以国家气象信息中心提供的站点土壤湿度观测资料为参考,通过对比分析两套模拟数据在黄土高原区域的时空差异,并分别计算其与观测资料的相关系数(Corr)、平均偏差(MBE)和均方根误差(RMSE)等统计特征值,就两套模拟数据在黄土高原地区的适用性进行综合对比和评估,旨在选出一种适用于研究黄土高原地区土壤湿度时空特征的大范围、长时间序列的替代资料。结果显示:(1)两套陆面模式资料均能较好模拟黄土高原地区土壤湿度的空间变化特征,主要呈现出从西北向东南和西南增加的趋势,其中 CLDAS 具有较高的空间分辨率,能够较好刻画研究区细部特征;(2)从站点角度的统计特征值来看,两套资料的 Corr 值普遍偏高,CLDAS 有 71%和 63%的站点分别达到极显著和显著差异水平,而 GLDAS 的略低,分别为 70%和 62%;研究区内各套资料的 MBE 和 RMSE 分布均类似;正负偏差站点个数相差不大,分布区间主要为-0.05~0.05,其中 CLDAS 有 26 和 32 个站点分别处于-0.05~0 和 0~0.05 之间,而 GLDAS 则为 28 和 24;GLDAS 的 RMSE 主要集中在 0.05~0.07 之间,而 CLDAS 绝大部分低于 0.05;(3)从时间序列来看,GLDAS 资料与实测最为接近,但在春季存在一定程度的偏干情况,偏干程度小于 CLDAS;(4)从整个研究区土壤湿度的模拟状况来看,GLDAS 的 Corr、MBE 和 RMSE 值分别为 0.821、0.0126 和 0.0221,较 CLDAS 资料具有更小的平均偏差、均方根误差和更大的相关系数。总体来说,两套陆面模式资料在黄土高原区域土壤湿度模拟上均存在各自的优势,均可作为土壤湿度观测的替代资料,对于土壤湿度研究和业务应用都具有积极的意义。

关键词:CMA 陆面数据同化系统(CLDAS);全球陆面数据同化系统(GLDAS);土壤湿度;黄土高原

中图分类号:S152.7+1 **文献标志码**:A

Evaluation applicability of CLDAS and GLDAS soil moisture for the Loess Plateau

LIU Huan-huan[1], WANG Fei[1,2,3], ZHANG Ting-long[1,4]

(1. *College of Resources and Environment*, *Northwest A & F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*;
2. *Institute of Soil and Water Conservation*, *Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*;
3. *Institute of Soil and Water Conservation*, *Northwest A & F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*;
4. *Laboratory of Ecosystems Forecasting and Global change*, *College of Forestry*, *Northwest A & F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Field measurements of top 10 cm soil moisture in cropland were used to assess the applicability of the soil moisture derived from the Land Data Assimilation System to the Chinese Loess Plateau. Monthly soil moisture data from March to September during 2011 to 2013 derived from the CMA Land Data Assimilation System (CLDAS) and Global Land Data Assimilation System (GLDAS) were compared with field data, and the results were evaluated by using three indicators, correlation coefficients (Corr), mean bias errors (MBE) and root mean square (RMSE). The comparison was to select soil moisture data suitable for the condition on the Loess Plateau used in a

收稿日期:2017-05-05 **修回日期**:2017-05-16

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0501707);中国科学院西部之光项目(院[2013]165);科技基础性工作专项(2014FY210120);中国科学院国际合作局对外合作重点项目(16146KYSB20150001);欧盟委员会 Horizon2020 项目(635750)

作者简介:刘欢欢(1991-),男,陕西省绥德县人,在读硕士,研究方向:资源环境监测与评价。E-mail:liuhh050892@163.com

通信作者:王飞(1971-),男,研究员,博士研究生导师,研究方向:水土保持效应。E-mail:wafe@ms.iswc.ac.cn

张廷龙(1971-),男,讲师,研究方向:生态环境遥感。E-mail:dargon810614@126.com

large spatial and long-term temporal scale. The results showed that both the CLDAS and GLDAS soil moisture had the relatively high Corr, low MBE and RMSE.They could be used to reproduce the spatial variation of soil moisture over the Loess Plateau. However, the CLDAS soil moisture was found to be the best with relatively higher spatial resolution to better reflect the local minutiae than the GLDAS soil moisture. In terms of the statistical indicators, the Corr between field measurements and the two datasets was relatively high. Compared to the GLDAS soil moisture, nearly 71% and 63% of the gauging stations reached 0.01 significance and 0.05 significance level, while for the GLDAS soil moisture the proportion (70% and 62%) of gauging stations with 0.01 and 0.05 significance level was slightly lower; The spatial pattern of the MBE and RMSE for the two datasets were approximately the same across the Loess Plateau. MBE ranged from −0.05 to 0.05. Twenty six CLDAS gauging stations had values falling in −0.05 ~0 and 32 stations falling in 0~0.05. For GLDAS gauging stations these were 28 and 24 respectively. The RMSE of the GLDAS soil moisture was 0.05~0.07, while the majority of CLDAS was less than 0.05. But in terms of temporal variation of soil moisture and statistical indicators over the Loess Plateau, the GLDAS soil moisture better reflected dry and wet conditions. Overall both datasets had their own advantages over each other, and could serve as a good proxy for the soil moisture condition over the Loess Plateau.

Keywords: CLDAS; GLDAS; soil moisture; Loess Plateau

近年来随着人类活动的加剧,地球系统受到严重的侵扰,自然生态环境不断发生恶化。以全球气候变化为首的生态问题成为我们人类生产生活面临的严峻挑战之一。土壤湿度作为气候系统中的一个重要的物理量,它是检验陆面水文过程中的重要指标[1],也是自然生态系统最直接的水分来源,直接影响着植被的生长发育[2]。其通过控制陆面过程中物质和能量的交换和收支平衡,影响着大气环流状况和气候变化[3]。了解土壤湿度特征对理解水文循环、天气与气候变化、干旱监测等具有重要的意义[4-5],因此对于土壤湿度的研究显得尤为必要。

土壤湿度传统的方法是定点监测,精度较高但是观测站点较少,费时费力,不确定性较大,研究大多数针对单点进行研究和分析。而较大时间序列和区域尺度的研究则主要依赖于遥感监测[6-7],这种方法虽然具备大区域尺度覆盖的优势,但很大程度也受限于反演算法,同时其无法反演深层的土壤湿度。近年来随着数值模式的发展和应用[8],借助陆面模式模拟使得获取长时间序列和较大空间尺度的土壤湿度资料成为可能。刘建国[9]研究表明,陆面模式模拟的土壤湿度能较好地再现中国区域土壤湿度的时空变异性。目前,常用的比较成熟的陆面数据同化系统有美国航空航天局(NASA)和海洋大气局(NOAA)发展的全球陆面数据同化系统(GLDAS)和北美陆面数据同化系统(NLDAS)[10]、欧洲陆面数据同化系统(ELDAS)、加拿大气象服务局研发的加拿大陆面数据同化系统(CaLDAS)等。但是模式资料由于所用陆面模式、资料同化方法、土壤湿度计算方法、偏差校正方法和质量控制方法等不尽相同,存在较大的不确定性[11-12],数据的准确性还需要进行一定的验证。Rodell M[13]等研究表明,相比较其它模拟产品,GLDAS 驱动数据更准确,其模拟结果更合理。目前,GLDAS 以其优势支持了大量的研究工作[14-16]。中国气象局陆面数据同化系统(CLDAS)由国家气象信息中心研发,起步较晚,2013 年进入业务化运行,近些年来陆续开始使用[17-18]。其时间分辨率为 1 h,空间分辨率为 0.0625°×0.0625°,均高于 GLDAS 资料。

近年,一些学者针对不同的研究目的,对各种陆面模式土壤湿度资料在区域的适用性进行评估,并在此基础上进行应用。Chen et al[19]利用青藏高原中部土壤湿度观测数据对 CLDAS 中 4 种陆面模式土壤湿度产品的适用性进行对比评估。吴盼[20]等利用 GLDAS 资料与 TVDI 的相关性对青藏高原的土壤含水量进行了反演;程善俊[21]等利用 GLDAS 资料分析研究了黄土高原半干旱区土壤湿度对气候变化的响应;而对于近年来发展的 CLDAS 资料,也有不少研究就不同区域 CLDAS 与 GLDAS 资料的适用性进行对比评估,宋海清和刘川[22-23]等分别在内蒙古和青藏高原地区进行了评估。黄土高原地处半干旱半湿润地区,土壤湿度严重制约着该区农业的生产,因此对于该区这样较大范围土壤湿度的研究显得尤为重要。然而利用模式资料针对黄土高原地区的相关研究较少,程善俊[24]只是利用 GLDAS 土壤湿度资料在华北地区(包括黄土高原)进行简单的验证并基于此分析该区土壤湿度的变化特征,仅使用了相关分析,同时验证过程中存

在土壤湿度分层不对应的情况(20 cm 观测与 10~40 cm 同化数据),且鲜有研究利用 CLDAS 资料分析该区域土壤湿度情况。

因此,本文基于所获取的 CLDAS 和 GLDAS 土壤湿度资料,选取 2011~2013 年 3~9 月时间尺度的资料为研究数据,以观测站点数据为参考就两套模式模拟的土壤湿度资料在黄土高原的适用性进行对比评估验证,旨在选取一种适用于研究黄土高原地区土壤湿度时空特征的大范围、长时间序列的替代资料,从而为黄土高原土壤水分的演化、水土状况的改善、气候资源的合理利用、农业生产的合理布局和气候变化的应对等监管问题提供科学依据,同时为陆面模式的改进提供一定的参考。

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

黄土高原[25]地处黄河的中上游,东起太行山脉、西至日月山,北起燕山、南至秦岭,总面积达 621 000 km^2。属于半干旱半湿润气候区,年均降水量多在 400~600 mm 之间,蒸发量为 800~1 000 mm,远大于降水量,降水相对不足且分配不均。土壤类型主要为疏松的黄绵土、褐土和黑垆土,深厚疏松的土质覆盖,使得降水易于贮存于土体内,然而较大的土壤孔隙度相反又助长了蒸发量的增加,从而保水性较差,且地下水埋藏较深,致使该区土壤水分匮缺,同时该区地形破碎,水土流失严重[26],土壤贫瘠,有效养分缺乏,基础肥力较低,多发展旱作农业。

1.2 数据来源

1.2.1 CLDAS 土壤湿度资料 CMA 陆面数据同化系统(CMA Land Data Assimilation System)是由国家气象信息中心发展的数据同化系统,其利用数据融合和同化技术对多源数据进行融合,从而获取高质量土壤温湿度、气压、降水等要素的格点数据,进而驱动陆面过程模式以获得土壤湿度等陆面变量。本研究采用的是 CLDAS 发布的 CLDAS-V1.0 版本的 2008 年至今的土壤湿度资料。该数据覆盖整个东亚地区(0°~60°N,70°~150°E),时间分辨率为 1 h,空间分辨率为 0.0625°×0.0625°,垂直剖面包含 4 层(0~10、10~40、40~100、100~200 cm)。

1.2.2 GLDAS 土壤湿度资料 全球陆面数据同化系统(Global Land Data Assimilation System)数据是由美国航空航天局 NASA 和美国海洋和大气局 NOAA 共同发布的基于卫星、陆面模式和地面观测数据的全球陆面同化数据。目前 GLDAS 结合 Noah、CLM、Mosaic 和 VIC 四种陆面模式提供了大量的陆面资料。本文所使用的 GLDAS 土壤湿度资料是由 GLDAS-1 提供的 Noah 模式生成的全球 2000 年至今的土壤湿度月资料数据,空间分辨率为 0.25°×0.25°,包括 4 个深度层,分别为 0~10、10~40、40~100、100~200 cm。为了同观测资料同量纲比较,需先将 GLDAS 资料土壤湿度转换为体积含水量。

1.2.3 站点观测资料 本文所用实测资料来源于中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn) 提供的 1991~2013 年黄土高原 109 个国家农业气象观测站的农田实测土壤相对湿度旬值观测数据,该数据垂直深度包含 5 层(0~10、10~20、40~50、60~70、90~100 cm)。

1.2.4 土壤参数数据 土壤容重与田间持水量来源于北京师范大学戴永久[27]等制作的面向陆面过程模型的中国土壤水分数据集,其空间分辨率为 30 弧秒,田间持水量数据分为 7 层(0~0.045、0.045~0.091、0.091~0.166、0.166~0.289、0.289~0.493、0.493~0.829、0.829~1.383 m),土壤容重数据较田间持水量多了 1 层(1.383~2.296 m)。考虑不同土壤层所占的权重,将容重数据利用公式 1[28]插值到对应的 0~10 cm 的平均值(田间持水量采用相同的方法)。

$$bd_{10\ cm} = \frac{bd_1 \times Z_1 + bd_2 \times Z_2 + bd_3 \times (Z - Z_1 - Z_2)}{Z} \quad (1)$$

式中,$bd_{10\ cm}$(bulk density)为所需要的 0~10 cm 深度的平均土壤容重($g \cdot cm^{-3}$),bd_1 为第 1 层即 0~0.045 m 的土壤容重平均值($g \cdot cm^{-3}$),bd_2为第 2 层即 0.045~0.091 m 的土壤容重平均值($g \cdot cm^{-3}$),bd_3为第 3 层即 0.091~0.166 m 的土壤容重平均值($g \cdot cm^{-3}$),三层平均土壤容重所占的权重,按照各层所占 10 cm 总厚度中的比例确定,Z_i代表第 i 层的土壤容重厚度(m),Z 为所需计算的总厚度即 10 cm,Z_1/Z、Z_2/Z 及 $(Z-Z_1-Z_2)/Z$ 分别为三层所占总厚度的权重值,本文中计算可得比例各占:45%、46%、9%。计算之后利用 ArcGIS 得到各实测站点对应的 0~10 cm 土壤深度土壤容重和田间持水量值。

Wang W[29]等的研究表明,0~10 cm 土壤湿度对于气候的研究十分重要,其对于农作物生长的影响也非常大。因此本研究仅选取表层 10 cm 的土壤湿度为研究对象,2011~2013 年生长季(3~9 月)为研究时段,进而对两套陆面模式土壤湿度资料进行评估。此外在验证比较过程中为了减少分析的误差,如

果模式模拟数据缺测,将对应的观测数据也视为缺测,不进行比较和评估,最终筛选出研究时间段内连续的 79 个观测站点作为模式数据评估的参考。

1.3　数据处理和计算方法

1.3.1　*模式资料拟合空间分布情况分析*　为了对两套陆面模式土壤湿度资料进行评估,首先,需统一三种数据资料的量纲。利用公式 2 将观测站点土壤相对湿度数据转化为模式输出结果对应的土壤体积含水量。其次,本研究内实测站点观测、CLDAS 及 GLDAS 三种土壤湿度数据具有不同的时间分辨率,不能直接进行比较。因此分析前需将时间分辨率统一到月尺度。对资料进行统一量化分级,计算研究时段内的区域平均值,并分析对比实测情况,比较模式资料拟合研究区土壤湿度空间分布情况。

$$\theta_v = R \times f_c \times B_d \qquad (2)$$

式中,θ_v为土壤体积含水量,R 为土壤相对湿度,f_c为田间持水量,B_d为土壤容重。

1.3.2　*统计分析*　(1)观测站点与对应模式资料格点间比较,在对比研究模拟与观测数据的差异时,首先将陆面模式资料与站点观测值进行一一匹配[22-23];(2)在计算模式与观测资料各月区域均值的基础上,从整个研究区尺度对观测与模拟资料进行分析。

为了定量对比评估两套陆面模式资料在黄土高原的适用性,本文选取相关系数(Corr)、平均偏差(MBE)、均方根误差(RMSE)等指标,在 SPSS 软件中进行计算。

1.3.3　*模拟资料在时间序列上的拟合程度*　首先对 79 个站点土壤湿度观测数据进行平均得到各月的区域平均值,再对模式资料在观测网精度范围内的格点数据进行求均,同样得出研究时段内各月的区域均值,分别对比两套陆面模式资料与站台实测值在时间序列上的差异。

2　结果与分析

2.1　土壤湿度的空间分布与统计分析

图 1 给出的是两套陆面模式和实测站点土壤湿度 2011~2013 年 3~9 月表层 0~10 cm 的空间分布图,CLDAS 和 GLDAS 土壤湿度的空间分布与站台观测基本一致。土壤水分整体从西北地区向东南和西南地区呈递增趋势。其中陕西南部秦岭山区、西安北部子午岭地区及青海东部西宁周边地区为常年土壤湿润区,而内蒙古临河以南、甘肃白银、银川以东至陕北毛乌素沙地等地区为土壤水分低值区域。但是 GLDAS 模拟值较观测值在西宁周边地区存在偏低的情况,同时在渭河流域、河套地区、汾河谷地及陕西毛乌素沙地以南大部分区域在研究时段内受降水补给,土壤水分含量较高,相比较 GLDAS 资料,CLDAS 能够很好地模拟这一情况;此外 CLDAS 较 GLDAS 模式土壤湿度资料具有较高的空间分辨率,能较好地表征黄土高原土壤湿度的时空分布特征和细部情况。综上,两套资料中 CLDAS 资料与站台资料最接近。

由图 2 可见,两套资料与观测的相关系数普遍偏高,主要呈现出与土壤湿度空间分布相同的趋势(南高北低)。CLDAS 模式资料有 56 个站点达到显著差异水平,其中 50 个站点达到极显著差异水平,分别占总站点个数的 71%和 63%;而 GLDAS 资料达

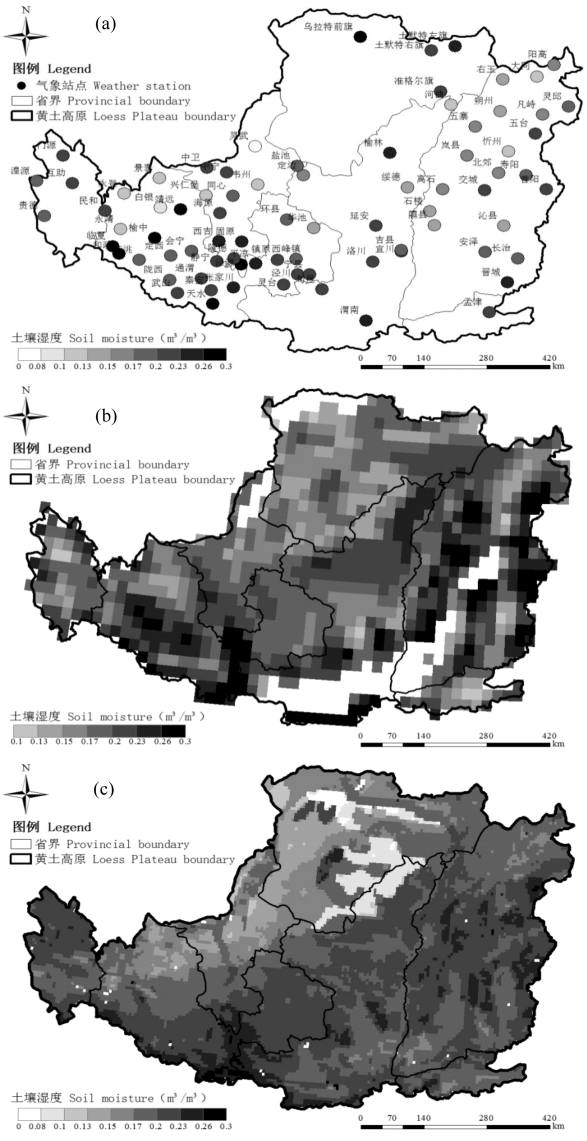

图 1　2011~2013 年 3~9 月月均 0~10 cm 模拟和观测土壤湿度空间分布(单位:$m^3 \cdot m^{-3}$)(a)实测站点均值;(b)GLDAS 模拟均值;(c)CLDAS 模拟均值

Fig.1　Spatial distribution of mean soil moisture of observation values (a), GLDAS (b), and CLDAS (c) in warm season (form March to September) in the period of 2011~2013

到显著差异和极显著差异水平的站点分别为 55 和 49,占比略低,分别为 70%和 62%。研究区南部区域相关系数均较高,部分站点相关系数超过 0.8,如甘肃东部的西峰镇,相关系数超过 0.9(其中 CLDAS 为 0.93,GLDAS 为 0.95)。而在山西、内蒙人古地区、宁夏西北、青海、甘肃白银及靖远等地略差,且两套资料间存在差异,CLDAS 稍好于 GLDAS 资料。这说明 CLDAS 对黄土高原的土壤湿度的变化趋势有着稍微较好的模拟能力。从偏差分布可以看出两套资料在研究区域的偏差分布类似。正负偏差的站点个数相差不大,负偏差站点个数稍小于正偏差站点个数,这表明相对观测资料,模式资料在研究区整体均表现出轻微的偏干现象。此外,研究区内不同区位干湿情况存在差异。如山西北部、陕西、青海、内蒙古及宁夏西南部及其周边甘肃地区主要为正偏差,其它站点均为负偏差。从偏差的分布区间(±0.15)来看,模式资料对于土壤湿度的模拟是可信的。从负偏差情况整体看来 GLDAS 站点多于 CLDAS 资料,分布主要集中在-0.05~0 之间,可以说明模式资料也均存在一定程度的偏湿情况,

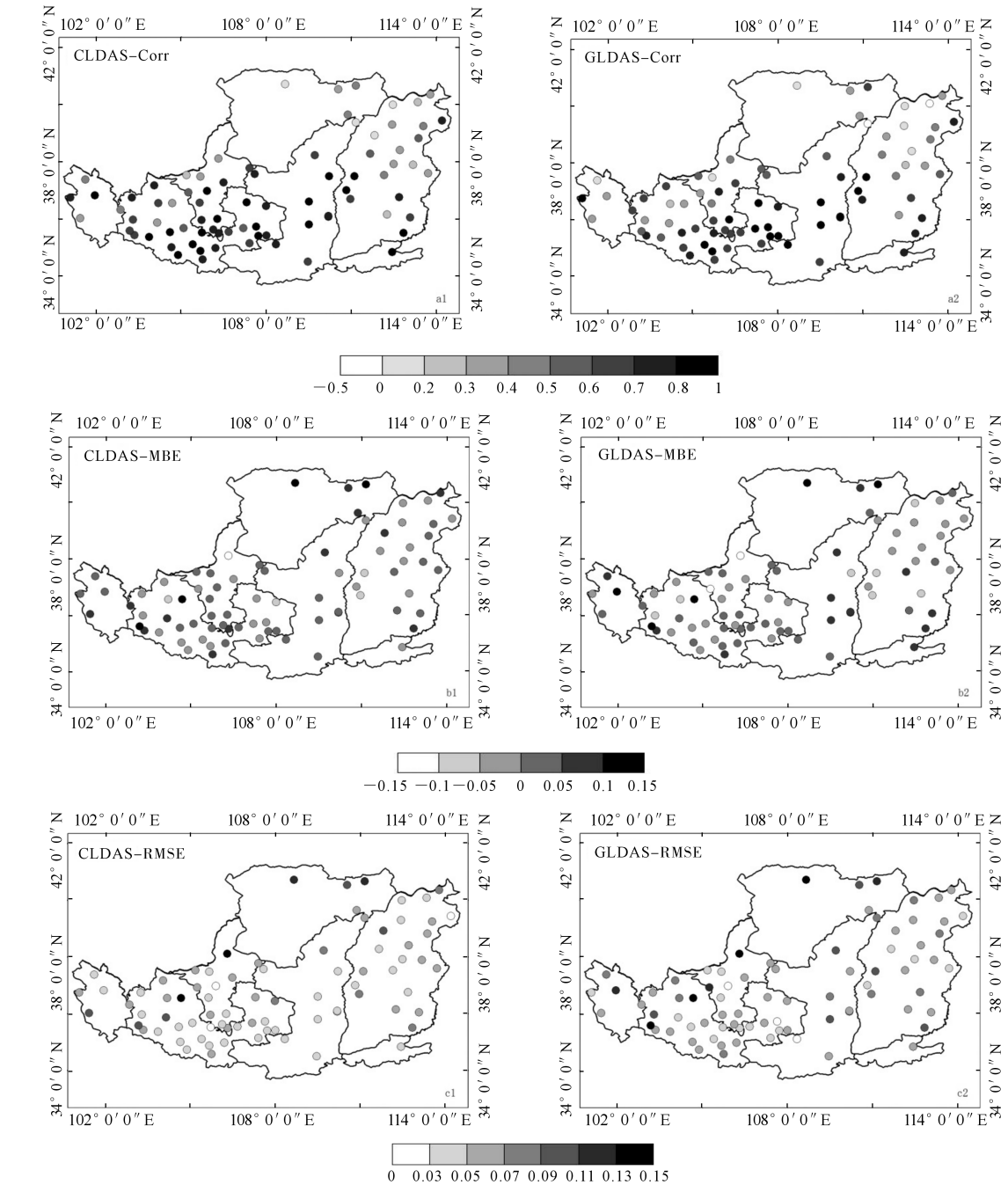

图 2 0~10 cm CLDAS、GLDAS 土壤湿度资料与观测的相关系数(Corr)、平均偏差(MBE)和均方根误差(RMSE)分布

Fig.2 The correlation coefficients(Corr), mean bias errors(MBE) and root mean square(RMSE) for monthly volumetric soil moisture from CLDAS and GLDAS compared to observation over the Loess Plateau

其中 GLDAS 资料偏湿情况大于 CLDAS 资料。而从正偏差角度看,GLDAS 站点少于 CLDAS 资料,且区间主要分布于 0~0.05,且在 0.05~0.1 之间也有分布,可以看出,相对于观测资料 CLDAS 资料偏干程度大于 GLDAS。从模式资料和站台观测之间的均方根误差的分布可以看出,两套资料在研究区的均方根误差分布大致相同,GLDAS 资料的均方根误差绝大多数处于 0.05~0.07 之间,而 CLDAS 资料均方根误差整体稍小,绝大部分低于 0.05,0.05~0.07之间也有较多站点分布。整体可以看出,研究区内 CLDAS 均方根误差普遍低于 GLDAS 资料。

综上,从相关系数、平均偏差和均方根误差三个统计指标可以看出,CLDAS 具有较 GLDAS 高的分辨率优势下,能够更多的刻画研究区的细部特征,而且也表现出了较大相关系数和较小均方根误差上的优势,显示出了较为合理的模拟能力。

2.2　陆面模式土壤湿度资料与观测资料的对比

图 3 是研究时段内两套模式资料同站点观测资料的时间序列比较。整体来看,CLDAS 和 GLDAS 资料均能较好的表征研究区土壤湿度的季节变化趋势。由于降水是黄土高原土壤水分的主要补给来源,降水集中的大陆性季风气候使得该区域土壤水分存在明显的季节性动态变化。3、4 月份返青时节,降水少,蒸发大,土壤出现失墒情况;夏秋季节增墒,雨季来临,土壤得到大量降水补偿,土壤湿度明显增加,在 8、9 月份达到极值[30]。可以看出两套陆面模式资料相对于站点观测在春季均出现不同程度的低估情况,其中 CLDAS 低估程度大于 GLDAS 资料;而在夏秋之际模式资料与观测值较为接近,且 GLDAS 资料存在一定程度的高估情况。整体而言,在与实测的季节变化拟合情况下,GLDAS 能够较好地捕捉和拟合土壤湿度观测的时间变异性。从表 1 黄土高原陆面模式资料与实测土壤湿度月平均统计特征,可以看出表层 0~10 cm 的 CLDAS 与 GLDAS 资料与观测均呈显著相关,并通过了 0.01 的显著性检验,偏差和均方根误差也均较小,其中 GLDAS 较 CLDAS 具有更小的平均偏差、均方根误差和更大的相关系数。

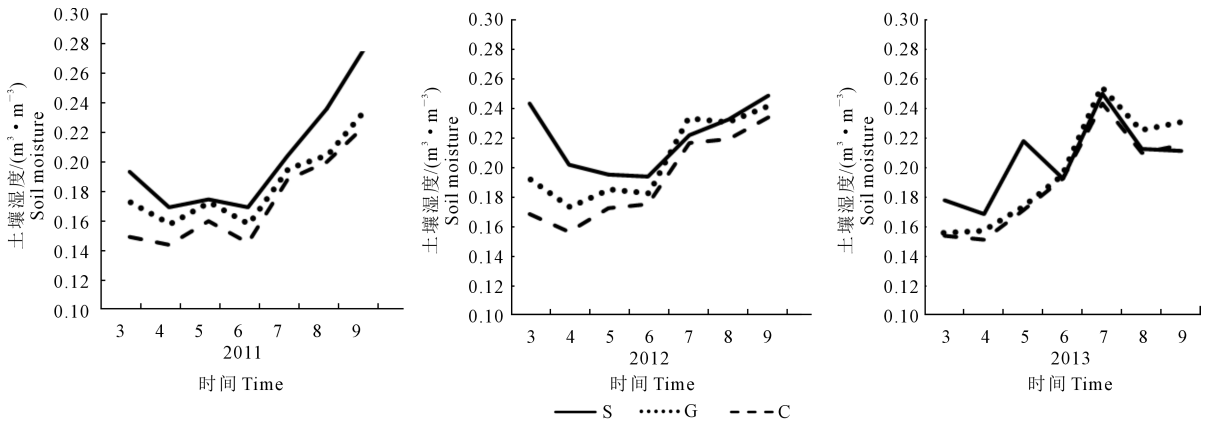

图 3　黄土高原地区 2011~2013 年 3~9 月份 0~10 cm 观测与模拟月均土壤湿度时间序列
(S、C 和 G 分别表示观测资料、CLDAS 和 GLDAS 资料)

Fig.3　The time series of monthly volumetric soil moisture from the observations, GLDAS simulation and CLDAS simulation for the Loess Plateau: for the top 10cm layer, 2011~2013

表 1　黄土高原 0~10 cm 模拟土壤湿度和观测值的相关系数、平均偏差和均方根误

Table 1　The correlation coefficients, mean bias errors and root mean square errors for monthly soil moisture from CLDAS and GLDAS simulation compared to observation over the Loess Plateau

模式资料 Land surface model products	相关系数 Corr	平均偏差 MBE	均方根误差 RMSE
CLDAS	0.800**	0.0237	0.0305
GLDAS	0.821**	0.0126	0.0221

注:** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

Note: ** Signifies differences reaching 0.01 significance level.

3　结论与讨论

运用黄土高原区域 2011~2013 年 3~9 月 79 个站点的表层 0~10 cm 土壤湿度观测资料,对比评估了全球陆面同化系统(GLDAS)Noah 模式和中国陆面同化系统(CLDAS)的土壤湿度产品数据,结论如下:

(1)从土壤湿度空间分布状况而言,黄土高原地区的土壤湿度呈现西北较干燥,东南和西南较为湿润的空间分布特征。两套陆面模式资料均能较好的模拟这种分布状况,局部地区存在差异,CLDAS 资料与站台观测最接近,且能够较好的模拟研究区的细部特征。

(2)从站点模拟值和观测值的统计特征分析来看,两套陆面模式资料均能较好的模拟研究区土壤湿度情况。CLDAS的表现稍好,具有较高的相关系数和较小的均方根误差,主要问题就是存在一定程度的低估,还需要进一步的改进。

(3)就季节变化趋势来看,模式资料均能够较好地捕捉和拟合土壤湿度观测的时间变化情况。在春季失墒阶段均出现不同程度的低估。两套资料中,GLDAS较CLDAS资料低估程度小;在夏末秋初模式资料与观测最为接近,GLDAS存在轻微高估的情况。整体来看GLDAS资料与站台观测值最接近。

(4)从区域尺度的土壤湿度模拟状况来看,模式与观测资料均呈极显著相关,并通过了0.01的极显著性检验,同时偏差和均方根误差也均较小。其中GLDAS较CLDAS具有较小平均偏差、均方根误差和较大的相关系数。

文中通过对CLDAS与GLDAS-Noah1表层10 cm的土壤湿度数据在黄土高原地区进行综合对比评估,证实两套陆面模式资料均能较好的模拟黄土高原土壤湿度的时空变化特征,都可用作大范围、长时间序列研究黄土高原地区土壤湿度时空特征和干旱监测的替代资料。整体而言,模拟资料在黄土高原的表现各有优劣,CLDAS模式资料能够较好的模拟研究区的局地特征,但整体较实测站点土壤湿度存在较大的偏干情况,春季偏干程度较大,这也可能与陆面模式生物地球物理过程描述不完善以及模式土壤质地分布不合理等有关,有待于更进一步的改进[22]。

GLDAS就整个研究区的模拟状况而言,与实测站台数值间具有较大的相关系数,较小的均方根误差和平均偏差。在春季存在一定程度的低估,而在夏秋季节与实测最为接近,且存在稍微的高估。但从站点角度来看,GLDAS略差,这可能与Noah模式的下垫面数据在中国地区不够精细和模式水文模块有待进一步完善有关[22]。陆面模式数据具备研究较大区域尺度的特点,但同时也因为这一特点,如本研究区(黄土高原)千沟万壑,地形破碎,植被及土质分布不均等的影响,在以实测气象站点为参考进行对比验证时,在没有考虑各观测站点、模式格点下垫面的差异[31]的情况下,不同模式资料在同一站点或者是同一模式资料在不同站点均表现为较大的差异。本研究就CLDAS与GLDAS资料的对比结果不同于宋海清[22]在内蒙古、刘川[23]在青藏高原和朱智[18]在中国区域的研究。因此可以看出,在对于较大区域、较长时间序列的可作为土壤湿度替代资料的陆面模式数据应用时,应首先考虑该数据在所研究区域的适用性,综合考虑数据应用的目的、区域范围、主要影响因素等。

研究在验证过程中对于观测站点的选取存在数量有限且没有考虑其代表性,一定程度会影响到两套模式资料的评比结果,需要作进一步的改进。同时在模式和观测值匹配的问题上,研究采用的是一一匹配的方法,后期对于匹配方法的选用将是可以深入研究的着力点。此外对于模式数据拟合春季较实测出现低估的情况,可能是由于春季返青季节受到人工灌溉的影响实测土壤湿度较高。基于此,对于模式资料进行评估验证时,对于土壤湿度影响因子的考虑也是下一步研究的重点。

致谢:国家气象信息中心的姜志伟副研级高工和内蒙古自治区生态与农业气象中心的宋海清先生在数据来源和分析方面给予了指导,特此感谢!

参 考 文 献:

[1] Henderson-sellers A, Pitman A J, Love P K, et al. The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1993, 74(7): 1335-1349.

[2] 管晓丹, 程善俊, 郭瑞霞, 等. 干旱半干旱区土壤湿度数值模拟研究进展[J]. 干旱气象, 2014, 32(1): 135-141.

[3] Chahine M T. The hydrological cycle and its influence on climate[J]. Nature, 1992, 359: 373-380.

[4] Trenberth K E. Atmospheric moisture recycling: Role of advection and local evaporation[J]. Journal of Climate, 1999, 12(5): 1368-1381.

[5] Bengtsson L. The global atmospheric water cycle[J]. Environmental Research Letters, 2010, 5(2): 1-8.

[6] 张强, 肖风劲, 牛海山, 等. 我国北方植被指数对土壤湿度的敏感性分析[J]. 生态学杂志, 2005, 24(7): 715-718.

[7] 郭铌, 陈添宇, 雷建勤, 等. 用NOAA卫星可见光和红外资料估算甘肃省东部农田区土壤湿度[J]. 应用气象学报, 1997, 8(2): 212-218.

[8] 刘树华, 蔺洪涛, 胡 非, 等. 土壤-植被-大气系统水分散失机理的数值模拟[J]. 干旱气象, 2004, 22(3): 1-10.

[9] 刘建国. 陆面水文过程集合模拟及其不确定性研究[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2013.

[10] 黄春林, 李 新. 陆面数据同化系统的研究综述[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(5): 424-430.

[11] Wang A H,Zeng X B. Evaluation of multireanalysis products with in situ observations over the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2012, 117(D5): 5102.

[12] Zou H, Zhu J, Zhou L, et al. Validation and application of reanalysis temperature data over the Tibetan Plateau [J]. Journal of Meteorological Research, 2014, 28(1): 139-149.

[13] Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. The global land data assimilation system[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2004, 85(3): 381-394.

[14] Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, et al. GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System[J]. Science, 2004, 305(5683): 503-505.

(下转第294页)