

淮河流域土壤湿度的分布特征和记忆能力分析

詹艳玲¹ 林朝晖^{1, 2} 田风云^{1, 2} 曹美春¹ 许永芳^{1, 2}

(1 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 利用1992—2013年包括台站观测在内的五套土壤湿度资料, 分析了淮河流域土壤湿度的时空分布特征和记忆能力, 并验证了卫星遥感和再分析资料在淮河流域的适用性。结果表明, 台站观测的土壤湿度在淮河流域表现出北干南湿的空间特征, 其年际变率呈现西大东小的特点; 总体说来, 欧洲中期天气预报中心最新的陆面再分析数据集(ERA5-Land)的土壤湿度在时空分布和演变上与观测最为接近, 此外通用陆面模式CLM4离线模拟得到的土壤湿度的年际变化与台站观测也较为接近。流域土壤湿度的记忆能力随时间尺度的增加而增加, 但这种差异主要体现在土壤浅层, 到40~50 cm深度记忆能力随时间尺度的变化已相对较小; 土壤湿度的记忆能力还具有较强的季节变化, 流域平均土壤湿度的记忆能力在秋末、冬初较大, 而在夏季较小, 其中CLM4以及耦合CLM4的IAP大气环流模式模拟的土壤湿度记忆能力的季节循环与台站观测较为接近。就土壤湿度记忆能力的空间分布而言, 不同资料均呈现出记忆能力在流域西北部较强, 而在南部区域较弱的特点, 且这种空间差异在秋季最为显著。

关键词: 土壤湿度, 时空分布, 记忆能力, 淮河流域

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.05.014

The Spatio-Temporal Characteristics of Soil Moisture and Its Memory over Huaihe River Basin

Zhan Yanling¹, Lin Zhaohui^{1, 2}, Tian Fengyun^{1, 2}, Cao Meichun¹, Xu Yongfang^{1, 2}

(1 International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Using five soil moisture data sets of, including the station observation during 1992–2013 over Huaihe River Basin (HRB), the spatio-temporal characteristics of soil moisture variation and its memory are analyzed, meanwhile, the remote-sensed and reanalysis soil moisture dataset are also evaluated against the observation. Based on the station observation, it is found that the observed soil moisture is relatively dry in the northern HRB, and wet in the southern HRB, with stronger inter-annual variability in western HRB and weaker variability in eastern part of the basin. Generally, the latest reanalysis soil moisture, from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ERA5-Land), agrees well with the station observation in both spatial distribution and temporal variation, and the community land surface model (CLM4) can well reproduce the observed inter-annual variation of soil moisture when forced with observed meteorological variables. The longer memory of soil moisture can be found with increased time scale in surface soil layer, but this enhancement of memory with time scale becomes weak in deeper soil layer, like 40–50 cm. The soil moisture memory also shows strong seasonal variation, with longer memory in late autumn and early winter, and weak memory in summer, and the observed seasonal cycle of soil moisture memory can be well reproduced by both the stand-alone CLM4 simulation and the IAP atmospheric general circulation model coupled with CLM4. The spatial difference of soil moisture memory can be found for ERA5-Land, CLM4 and IAP-AGCM4.1, with longer memory in the northwest part of HRB and weaker memory in the southern HRB, and the regional contrast of soil moisture memory is the most significant in autumn.

Keywords: soil moisture, spatio-temporal distribution, memory, Huaihe River Basin

0 引言

淮河流域人口密集, 土地肥沃, 资源丰富, 交

通便利, 是我国重要的粮食产地, 在我国经济社会发展全局中占有十分重要的地位。但是该区旱涝、高温灾害频发, 比如2007年6月29日—7月25日, 流域发生了新中国成立以来仅次于1954年的第2位流域性大洪水, 造成了沿淮安徽、河南、江苏受灾严重, 直接经济损失154.9亿元。2010年8月淮河流域西南部出现了大范围高温天气。2013年7—8月淮河流域出现持续高温天气。如果能准确预测这些天气气候事件, 就可以

收稿日期: 2020年7月23日; 修回日期: 2020年9月14日
第一作者: 詹艳玲(1981—), Email: zyl@mail.iap.ac.cn
通信作者: 林朝晖(1968—), Email: lzh@mail.iap.ac.cn
资助信息: 公益性行业(气象)科研专项项目(GYHY201406021);
国家自然科学基金(41575095, 41661144032); 国家
重大科技基础设施项目“地球系统数值模拟装置”

提前做好准备,减少损失。

已有大量研究集中于海温对该区域降水异常的影响,但是仅考虑海温的影响,并不能准确预测该区域降水异常。已有研究表明土壤湿度等陆面状况的异常对中国东部气候异常存在显著的影响^[1-2],林朝晖等^[3]基于陆面过程模式的离线模拟结果,指出淮河流域土壤湿度初值异常可以影响地表净辐射和热通量;孙丞虎等^[4]发现淮河流域土壤湿度变化显著,并与约半年后的降水(气温)呈负(正)相关;Zhang等^[2]的研究则指出包括淮河流域在内的长江中下游至华北广大地区的春季土壤湿度与华东地区夏季降水有显著相关。基于多气候模式的模拟结果,Koster等^[5]给出了全球陆气耦合强度的空间分布,发现淮河流域属于陆气耦合强度较强的区域,这也为淮河流域陆面状况的异常对区域降水的影响提供了很好的理论解释。

土壤湿度是陆面过程的重要变量,准确认识土壤湿度的时空分布特征,对改进次季节-季节尺度的区域气候异常的模拟和预测能力都有着重要的意义。林朝晖等^[6]利用淮河流域能量与水循环试验(HUBEX)的观测资料,分析了淮河流域不同下垫面的土壤湿度的时间变化和垂直变化特征。左志燕等^[7]利用中国区域61个站点、Nie等^[8]利用中国178个站点、李明星等^[9]利用中国143个站从不同季节分析了土壤湿度的时空分布特征。由于台站观测土壤湿度资料不足,以上对淮河流域土壤湿度的时空分布等的研究并不充分。近年来再分析和卫星遥感等土壤湿度资料越来越充足,为进一步阐明淮河流域土壤湿度的时空变化特征,进而将这些土壤湿度资料应用于短期气候预测实践提供了条件。然而鉴于卫星遥感反演及陆面过程模式的不确定性,已有遥感反演和再分析的土壤湿度资料,以及陆面模式和陆气耦合模式模拟的土壤湿度在淮河流域的适用性还有待检验。因此本文的目的之一,将基于更多站点的站点观测土壤湿度资料,探讨现有最新的卫星遥感、再分析以及陆面模式模拟的土壤湿度资料在淮河流域的适用性。

土壤湿度初始异常对天气、气候预测技巧影响的强弱,在很大程度上取决于土壤湿度初始异常的持续时间(亦即记忆能力)的长短,有关土壤湿度记忆能力的分析已有一些工作。1988年Delworth等^[10]对美国地球物理流体动力实验室(GFDL)的大气环流模式模拟的土壤湿度进行了谱分析,发现土壤湿度的能量主要集中于低频波段,是一种红噪音,可以近似用一阶马尔可夫过程表示;他们的研究发现,在初始土壤湿度异常随时间衰减的过程中,衰减的时间尺度可以

通过一阶马尔可夫过程的自相关函数得到,且土壤湿度的自相关系数随时间呈 e 指数衰减。由此他们定义了土壤湿度的记忆能力,而土壤湿度记忆能力的长短则定义为土壤湿度的自相关系数降低到 $1/e$ 所用的时间。上述方法已被用于全球不同区域,如俄罗斯、蒙古、美国和中国,土壤湿度的记忆能力的研究分析^[8,11-12]。

值得指出的是,在Delworth等^[10]提出的计算土壤湿度记忆能力的方法中,他们假设在初始土壤湿度异常的衰减过程中降水强迫是随机的白噪音,可以忽略。Schlosser和Dirmeyer(未出版手稿)利用全球土壤湿度计划第二阶段(GSWP2)的资料,针对北美地区土壤湿度的分析时指出,土壤湿度的自相关系数随时间的变化除了 e 指数衰减(在衰减过程中降水被认为是白噪音而不起作用)外,部分地区还存在自相关系数线性衰减和类高斯衰减的特征,分别与降水强迫的持续性、以及陆气耦合强度的强弱紧密相关。因此他们将Delworth等^[10]的计算土壤湿度记忆能力的方法进行了更新,将土壤湿度的自相关系数降低到99%的信度水平的的时间,定义为土壤湿度的记忆能力。在本文的分析中,我们采用的即是更新后的土壤湿度记忆能力的计算方法。但由于高时间分辨率资料的缺乏,已有土壤湿度记忆能力的研究主要是利用旬^[8]和月尺度^[13]的土壤湿度资料,难以考虑不同时间尺度下土壤湿度的记忆能力的差别如何。因此本文将采用日时间分辨率的再分析土壤湿度资料,以淮河流域为试验区域,给出土壤湿度记忆能力随不同时间尺度、土壤深度的变化情况,及其相应的时空变化特征。

需要指出的是,就短期气候预测系统而言,预测模式模拟的土壤湿度的时空分布及其记忆能力是否与观测实况较为接近,也是理解预测系统中陆面资料初始化/同化可否提高气候预测水平的前提。本文还将以中国科学院大气物理研究所IAP短期气候预测模式为研究对象,评估耦合了CLM4的IAP大气环流模式(IAP-AGCM4.1)对流域土壤湿度及其记忆能力的模拟情况,以及基于CLM4离线模拟的土壤湿度时空分布及其记忆能力特征,以期为将来在IAP短期气候预测系统中引进陆面土壤湿度的初始化方案,进而改善和提高我国短期气候预测技巧提供科学依据。

1 数据和方法

1.1 土壤湿度数据

本文用到了5套土壤湿度资料,台站观测土壤湿度为Wang等^[13]对中国气象局国家气象信息中心的1471个台站观测土壤湿度资料,经过质量控制,且由土壤重量含水率转换成土壤体积分含水率,选取了中国区

域共732个站点。土壤层次有5层：0~10、10~20、40~50、60~70、90~100 cm，文中用到了淮河流域观测比较完整的前3层资料。土壤湿度的单位是 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 。该资料是1992—2013年的月平均资料。

欧洲中期天气预报中心（ECMWF）发布的再分析（re-analysis）数据集5的陆面部分（ERA5-Land），是利用世界各地的观测数据，对ERA5再分析的陆面部分进行再分析得到的^[14]。ERA5垂直4层，垂直深度分别为7、28、100、289 cm。空间分辨率是 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。时间分辨率为小时和月。该资料从1981年1月至今。

作为欧洲航天局（ESA）气候变化倡议（CCI）计划的一部分发布的多年代全球卫星观测土壤湿度（SM）数据集ESA-CCI V04.4^[15]，由3个地表土壤水分数据集组成：分别是使用散射计的主动产品、使用辐射计的被动产品，以及两者的组合产品。该产品的空间分辨率是 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，时间分辨率是日，涵盖了1978年11月到2018年6月的39年。

通用陆面模式（Community Land Model version 4, CLM4）^[16]土壤湿度资料是利用全球土壤湿度项目三期（Global Soil Wetness Project Phase 3, GSWP3）^[17]大气强迫场资料离线驱动陆面模式CLM4得到。该资料垂直10层，垂直深度分别为1.75、4.51、9.06、16.55、28.91、49.29、82.89、138.28、229.61、380.19 cm。空间分辨率约 $1.4^\circ \times 1.4^\circ$ ，时间分辨率有两种：日平均和月平均，时间跨度是1980—2014年。

中国科学院大气物理研究所最新的短期气候预测系统采用的是耦合了CLM4的大气物理研究所新一代大气环流模式（简记为IAP-AGCM4.1）^[18-19]，用于本文比较分析的该陆气耦合模式模拟的土壤湿度（简称为IAP4.1），是基于大气模式比较计划（Atmospheric Model Intercomparison Project, AMIP）试验的标准，采用融合了哈得来中心的版本1.1海温/海冰（HADISST1）与NOAA最优插值（版本2；OI.v2）海温/海冰的HadOI资料^[20]作为海温/海冰边界条件驱动IAP-AGCM4.1而积分得到的。鉴于IAP-AGCM4.1中的陆面过程模式为CLM4，因此IAP-AGCM4.1模拟得到的土壤湿度的垂直层次、空间分辨率和时间分辨率也与CLM4离线土壤湿度一致，时间范围是1978—2013年。

1.2 分析方法

淮河流域如图1所示，其中土壤湿度观测台站在流域西北部密集，全流域共84个站点。为了对不同土

壤湿度资料比较分析，对资料做了三方面的统一：时间上，选取共同时间段1992—2013年；单位上，统一为 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 的土壤体积含水率；垂直方向上，假定同一层次的土壤湿度的体积含水率相同，采用线性插值法，得到新层次的土壤湿度。



图1 淮河流域河流、湖泊和台站观测土壤湿度站点的分布
Fig. 1 Spatial distribution of the rivers, the lakes, and the soil moisture stations in Huaihe River Basin

土壤湿度的记忆能力（ T ）定义为土壤湿度异常的持续时间，计算采用Dirmeyer等^[21]的方法，即土壤湿度的滞后自相关系数降低到99%信度水平的的时间。具体做法可概述如下：假定 r_t 为给定站点（格点）的土壤湿度滞后 t 时间的自相关系数， $r_{99\%}$ 为对应的99%信度水平检验的相关系数临界值，从 $t=1$ 开始检验自相关系数 r_t ，到 $t=m$ 时自相关系数 r_m 第一次降到了 $r_{99\%}$ 或者以下，那么土壤湿度的记忆能力（ T ）可由方程（1）计算给出：

$$T = m - (r_m - r_{99\%}) / (r_m - r_{m-1}), m \geq 1. \quad (1)$$

当计算土壤湿度记忆能力时，可采用日、月平均的土壤湿度，从而得到日、月时间尺度的土壤湿度记忆能力。此外，我们还可以利用 N 天平均的土壤湿度资料，来计算相应时间尺度（ N 天）的记忆能力。本文中我们除了采用日、月平均土壤湿度资料外，还采用了5 d、9 d、19 d滑动平均的土壤湿度资料，来计算相应的土壤湿度记忆能力，进而来分析土壤湿度记忆能力随时间尺度的变化情况。

2 淮河流域土壤湿度的时空分布特征

2.1 土壤湿度的气候态和年际变率

本文首先介绍淮河流域土壤湿度的干湿分布及其年际变率的空间分布。图2给出了1992—2013年的气候平均土壤湿度。从图中可以看出，台站观测土壤湿度北干南湿，其中流域西北部土壤湿度较干，约 $0.1 \sim 0.3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ；干流区土壤湿度较湿，约

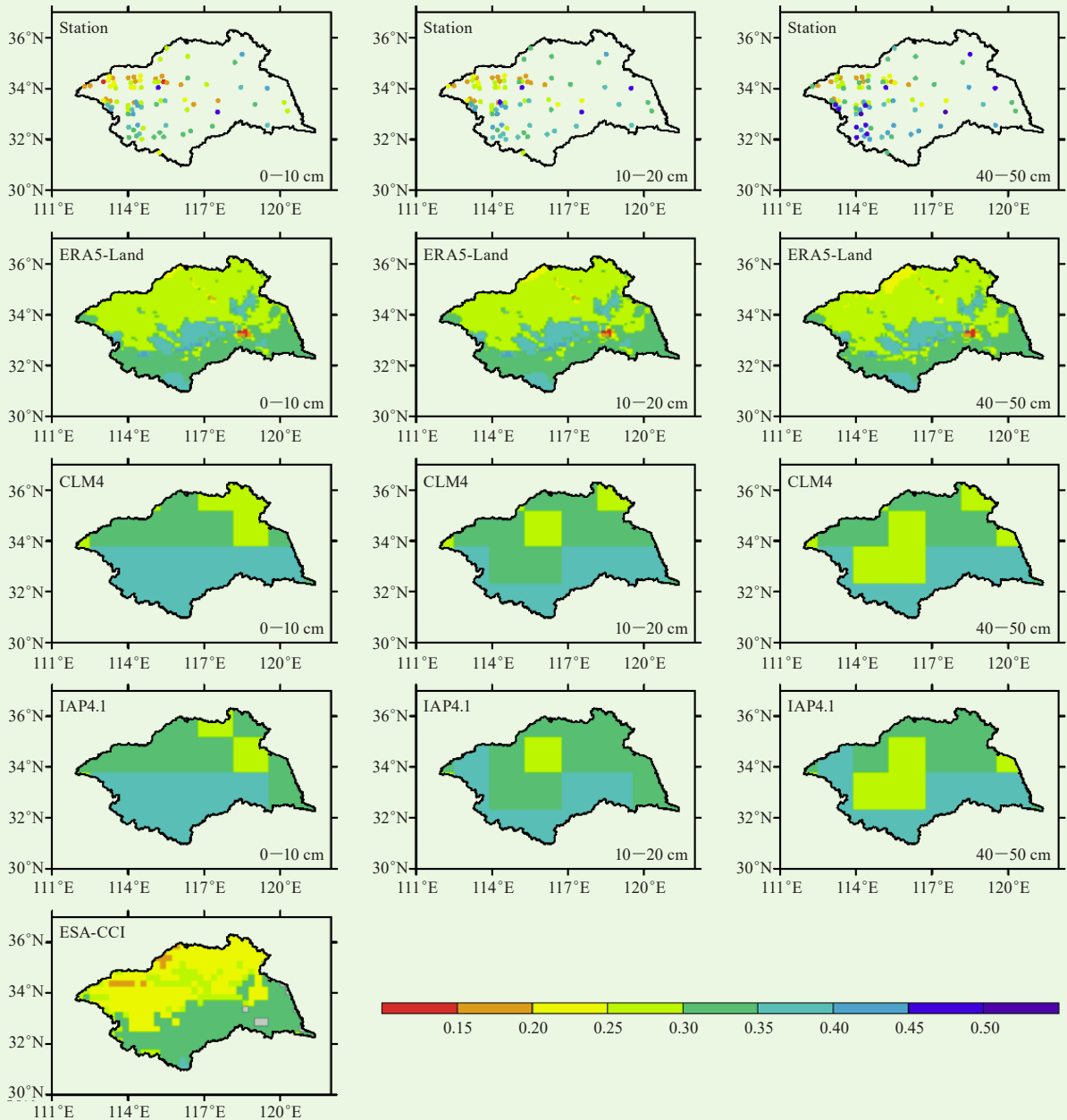


图 2 1992—2013年平均的淮河流域的土壤湿度的气候态 (第一行为台站观测、第二行为ERA5-Land、第三行为CLM4、第四行为IAP4.1、第五行为ESA-CCI; 第一列为0~10 cm和卫星遥感反演表层、第二列为10~20 cm、第三列为40~50 cm)
Fig. 2 Soil moisture climatology mean of 1992—2013 in Huaihe River basin (The first row is for station observation; the second row is for ERA5-Land; the third row is for CLM4; the fourth row is for IAP4.1; the fifth row is for ESA-CCI. The first column is for 0—10 cm and the surface layer of satellite remote sensing; the second column is for 10—20 cm; the third column is for 40—50 cm)

0.3~0.5 m³·m⁻³。ERA5-Land的气候土壤湿度的空间分布与台站观测最为相近。但是在40~50 cm土层中, ERA5-Land土壤湿度在淮河流域西北部比台站观测偏低。

CLM4和IAP4.1土壤湿度的空间分辨率较粗, 与台站观测土壤湿度相比, 除40~50 cm土层中的上中游的中部地区土壤湿度偏干外, 另外两层中, CLM4

与IAP4.1在流域大部土壤湿度均偏湿。ESA-CCI土壤湿度在流域北部比台站观测偏干较多。

淮河流域土壤湿度的年际变率(以标准差与平均值的比表示)的分布如图3。从台站观测来看, 淮河流域土壤湿度的年际变率在西部较大, 而在东部较小。0~10 cm土层的土壤湿度的年际变率, 西部约为10%, 东部为5%。随着土壤深度的增加, 40~50 cm

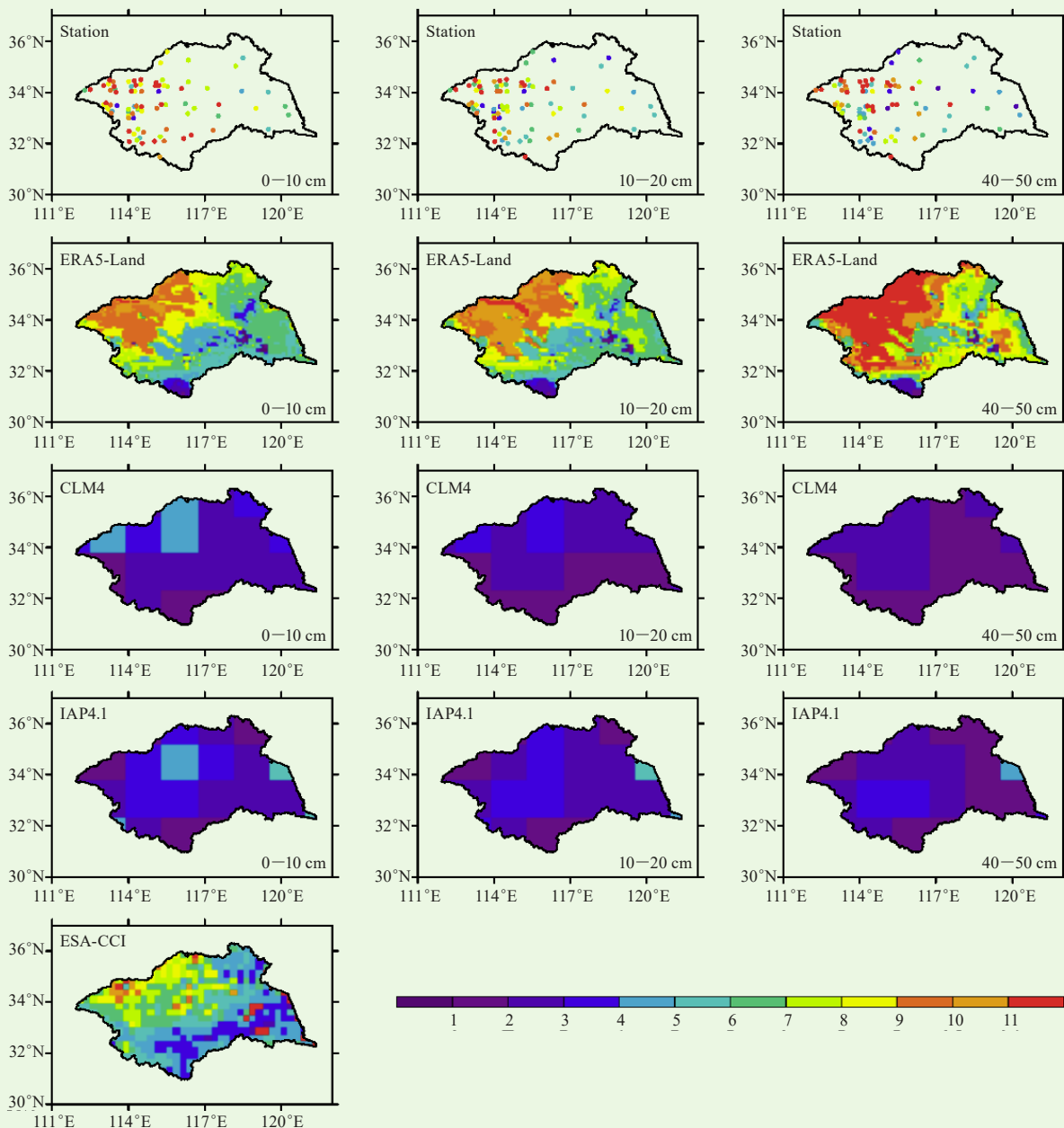


图 3 1992—2013年淮河流域的土壤湿度的年际变率（单位：%）（第一行为台站观测、第二行为ERA5-Land、第三行为CLM4、第四行为IAP4.1、第五行为ESA-CCI；第一列为0~10 cm和卫星遥感反演表层、第二列为10~20 cm、第三列为40~50 cm）

Fig. 3 Interannual variability of soil moisture (unit: %) during 1992—2013 in Huaihe River basin (The first row is for station observation; the second row is for ERA5-Land; the third row is for CLM4; the fourth row is for IAP4.1; the fifth row is for ESA-CCI. The first column is for 0—10 cm and the surface layer of satellite remote sensing; the second column is for 10—20 cm; the third column is for 40—50 cm)

土层中，流域南部和西部的土壤湿度的年际变率略微减小。

ERA5-Land土壤湿度的年际变率空间分布与台站观测最为接近，但其随深度增加而增大，与台站观测不符。CLM4和IAP4.1土壤湿度的年际变率在各土层均小于台站观测，大部地区仅为3%。ESA-CCI的土壤

湿度的年际变率在流域北部与台站观测较接近，但在流域南部比台站观测偏小。

2.2 区域平均土壤湿度的时间变化特征

1992—2013年淮河流域区域平均的土壤湿度的年际变化如图4所示。从0~10 cm土层看，台站观测土壤湿度有显著的变干趋势（通过95%信度水平检

验), 为 $0.009 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} / 10\text{a}$, 而ERA5-Land的年际变化和量值均与台站观测最接近。CLM4、IAP4.1和ESA-CCI土壤湿度以年际变化为主, 其中CLM4和IAP4.1土壤湿度比台站观测偏湿, 而ESA-CCI土壤湿度比台站观测偏干。去除趋势后, ERA5-Land、CLM4、IAP4.1和ESA-CCI土壤湿度与台站观测的时间相关系数分别为0.70、0.54、0.01和0.61。说明ERA5-Land可以很好地再现出淮河流域表层土壤湿度的年际变化特征。

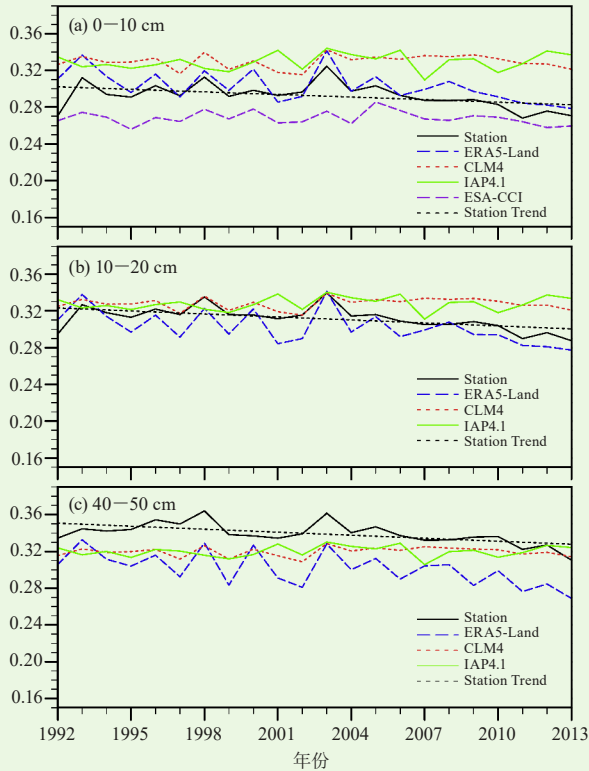


图4 1992—2013年淮河流域区域平均的年平均土壤湿度的时间变化

(a) 0~10 cm, (b) 10~20 cm, (c) 40~50 cm

Fig. 4 Temporal variation of annual mean soil moisture during 1992—2013 in Huaihe River Basin for 0—10 cm (a), 10—20 cm (b), and 40—50 cm (c)

在10~20 cm土层中, 台站观测土壤湿度同样存在显著的变干趋势, 为 $0.011 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} / 10\text{a}$ 。ERA5-Land土壤湿度的年际变化和量值均与台站观测最接近。CLM4和IAP4.1土壤湿度仍以年际变化为主, 且比台站观测和EAR5-Land土壤湿度偏湿。去趋势后, ERA5-Land、CLM4和IAP4.1土壤湿度与台站观测的相关分别为0.65、0.53和0.04。

40~50 cm土层中, 台站观测土壤湿度量值最大, 且有显著变干趋势, 为 $0.011 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} / 10\text{a}$ 。ERA5-Land土壤湿度也存在类似特征。CLM4和IAP4.1以年际变化为主。去除趋势后, ERA5-Land、CLM4和

IAP4.1土壤湿度与台站观测的相关分别为0.58、0.58和0.12。

图5给出了淮河流域区域平均土壤湿度的季节变化。在0~10 cm土层, 台站观测土壤湿度在1—2月偏湿、2—4月逐渐变干、4—6月维持偏干状态、6—9月由于降雨补给逐渐变湿、9—12月维持偏湿状态。ERA5-Land、CLM4和ESA-CCI土壤湿度的季节变化均与台站观测较一致, 区别是: ERA5-Land土壤湿度在7—8月比台站观测偏湿较多; CLM4土壤湿度在全年均比台站观测偏湿; 而ESA-CCI土壤湿度在大多数月均比台站观测偏干。

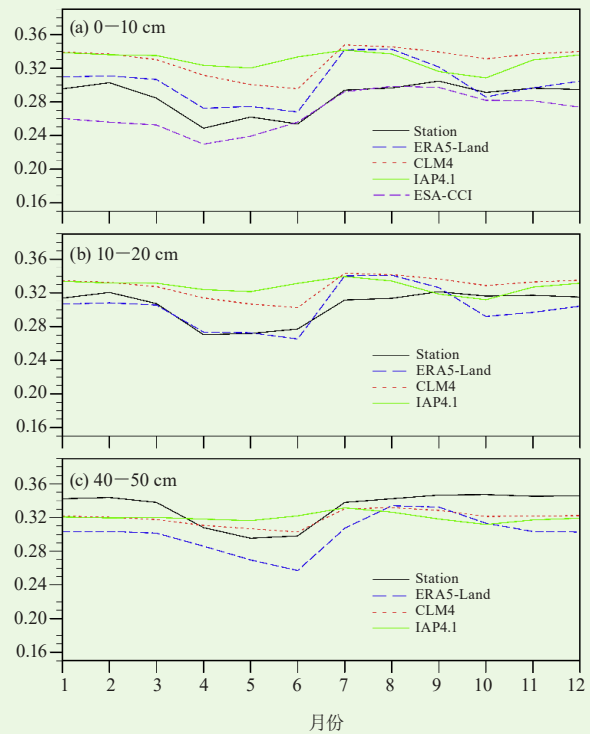


图5 1992—2013年平均的淮河流域区域平均的土壤湿度的季节变化

(a) 0~10 cm, (b) 10~20 cm, (c) 40~50 cm

Fig. 5 Seasonal variation of regional average soil moisture mean of 1992—2013 in Huaihe River Basin for 0—10 cm (a), 10—20 cm (b), and 40—50 cm (c)

随着土层深度的增加, 各土壤湿度的季节变化的幅值逐渐减小, 且土壤湿度处于偏干的时间进一步缩短。

3 土壤湿度的记忆能力

3.1 不同时间尺度的土壤湿度记忆能力

从土壤湿度的时空分布来看, ERA5-Land土壤湿度的年际变率和时间变化均与台站观测最为接近。因此, 下文利用ERA5-Land日平均土壤湿度, 分析不同时间尺度的土壤湿度记忆能力的差异。某一时间尺度

采用对应日数的滑动平均表示。基于此，下文将根据5、9、19 d滑动平均和日平均的土壤湿度资料，计算

土壤湿度的记忆能力。图6给出了淮河流域区域平均的不同时间尺度的土壤湿度的记忆能力及其差异。

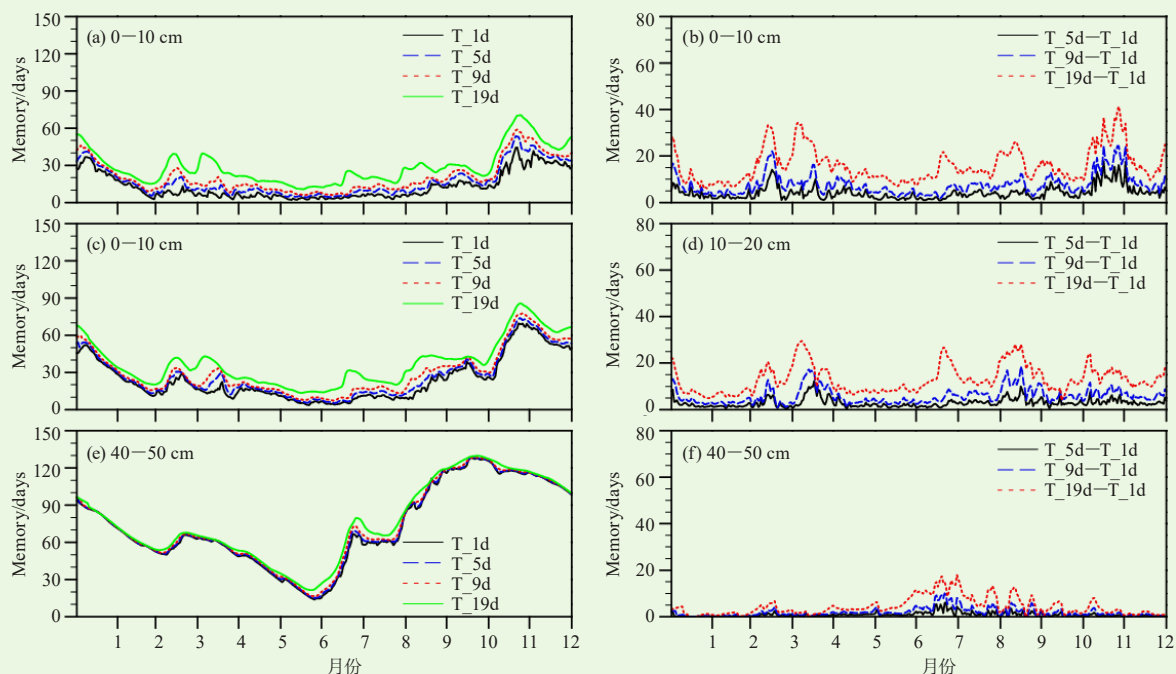


图6 根据5、9、19 d滑动平均和日平均土壤湿度得到的淮河流域区域平均的ERA5-Land土壤湿度记忆能力的季节变化（左列）和5、9、19 d滑动平均的土壤湿度的记忆能力与日平均土壤湿度记忆能力的差异（右列）（第一行为0~10 cm，第二行为10~20 cm，第三行为40~50 cm）

Fig. 6 Regional average soil moisture memory in Huaihe River Basin based on the 5, 9 and 19 days running mean and daily data (left column), and the soil moisture memory difference between the 5, 9, 19 days running mean and daily data (right column). The first row is for 0—10 cm; the second row is for 10—20 cm; the third row is for 40—50 cm

从图中可以看出，ERA5-Land土壤湿度的记忆能力随着时间尺度的增加而增大。0~10 cm土层中，随着时间尺度的增加，土壤湿度的记忆能力的增大最明显，尤其在土壤湿度的记忆能力由大变小的3、4月和土壤湿度记忆能力由小增大的9、11月，时间尺度19 d比1 d的土壤湿度记忆能力增大最大可达40 d。

时间尺度对土壤湿度记忆能力的影响随着土层深度的增加而逐渐减弱。与0~10 cm土层的土壤湿度记忆能力随着时间尺度增加而增大的幅值相比，该增大的幅值在10~20 cm土层中略偏小，在40~50 cm土层中最小。时间尺度的增加导致土壤湿度的记忆能力增大的现象也同样存在于CLM4和IAP4.1的相同层次的土壤湿度中。

由上述分析可知，5 d时间尺度的土壤湿度能较长时间地保持异常，而又不至于像日平均土壤湿度那样太多地受天气扰动的影响。这在利用模式开展的短期气候预测中有重要意义，因此下文将根据5 d平均的土壤湿度来分析其记忆能力的变化特征。此外本文还通过与台站观测的月土壤湿度的记忆能力的对比分

析，来揭示就记忆能力而言的不同土壤湿度资料的适用性。

3.2 区域平均土壤湿度记忆能力的季节变化

图7为根据月平均资料得到的淮河流域区域平均的土壤湿度记忆能力的季节变化。从图中可以看出，0~10 cm层中，ERA5-Land、CLM4、IAP4.1和ESA-CCI土壤湿度的记忆能力与台站观测较为接近。随着深度的增加，各土壤湿度的记忆能力与台站观测的差异逐渐增大，10~20 cm层中ERA5-Land土壤湿度与台站观测最接近；40~50 cm层，CLM4和IAP4.1土壤湿度与台站观测较接近，而ERA5-Land土壤湿度的记忆能力比台站观测偏大较多。总体而言，在月尺度上，这些资料能在一定程度上再现台站观测土壤湿度的记忆能力。

本节将利用ERA5-Land、CLM4和IAP4.1土壤湿度资料，对其进行5 d平均，进而分析流域平均土壤湿度记忆能力的季节变化（图8）。从图8可以发现，在0~10 cm土层中，土壤湿度的记忆能力在4—8月较小（约为10 d），且3种资料较一致；在秋季及初冬土壤

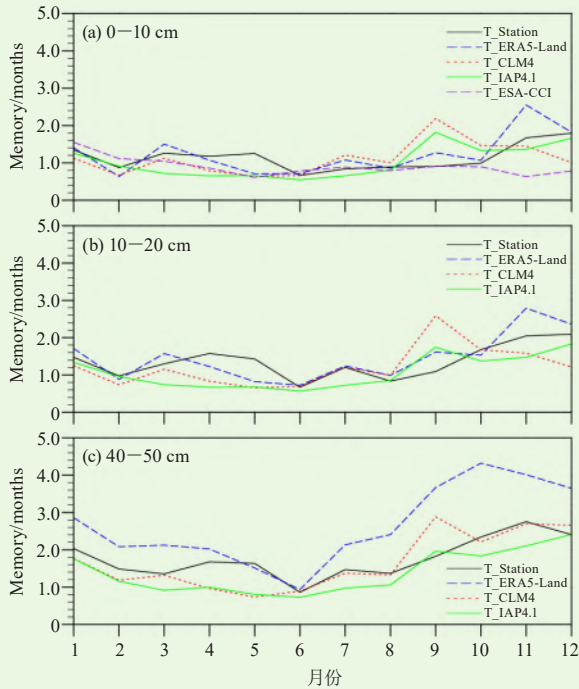


图7 基于月平均土壤湿度得到的淮河流域区域平均的土壤湿度的记忆能力

(a) 0~10 cm, (b) 10~20 cm, (c) 40~50 cm

Fig. 7 Regional average soil moisture memory in Huaihe River Basin based on the monthly data in the soil layers of 0—10 cm (a), 10—20 cm (b), and 40—50 cm (c)

湿度的记忆能力则相对较大,其中CLM4与IAP4.1土壤湿度记忆能力近似,约为30 d,而ERA5-Land土壤湿度记忆能力则相对偏大,约为40 d。

10~20 cm层中,土壤湿度的记忆能力也在4—8月较小(约15 d);在秋末冬初较大,CLM4和IAP4.1土壤湿度记忆能力约30 d,ERA5-Land土壤湿度记忆能力约60 d。

在40~50 cm层,CLM4和IAP4.1土壤湿度的记忆能力在4—8月较小(约20 d),在秋季冬初较大(约50 d)。ERA5-Land土壤湿度的记忆能力比CLM4和IAP4.1偏大较多,与月尺度上的结果近似。

3.3 季节平均土壤湿度记忆能力的空间分布

从图8可以发现,在40~50 cm深度,流域平均的土壤湿度记忆能力均要大于20 d,而ERA5-Land的记忆能力最高甚至可达3个月以上。较长的土壤记忆能力表明该区域土壤湿度的初始异常对后期区域气候异常具有重要的潜在影响。为此,我们在图9中给出了在40~50 cm深度,淮河流域不同季节土壤湿度记忆能力的空间分布。从图9可以发现,无论是ERA5-Land,还是CLM4和IAP4.1土壤湿度资料,其记忆能力均在流域西北部较大,而在流域南部则相对较小,

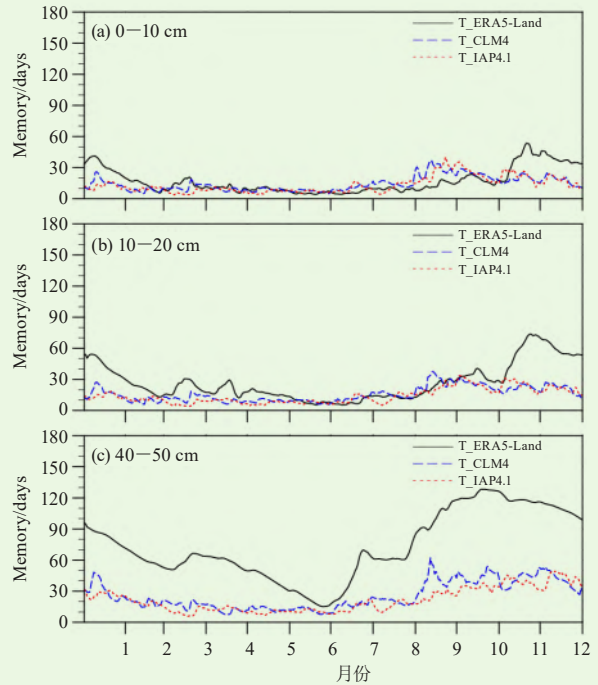


图8 基于5 d滑动平均的土壤湿度得到的淮河流域区域平均的土壤湿度的记忆能力

(a) 0~10 cm, (b) 10~20 cm, (c) 40~50 cm

Fig. 8 Regional average soil moisture memory in Huaihe River Basin based on the 5 days running mean data in the soil layers of 0—10 cm (a), 10—20 cm (b), and 40—50 cm (c)

这种记忆能力的空间差异尤以秋季最为显著。从图9还可以发现,对于春、夏季节而言,基于CLM4和IAP4.1土壤湿度资料得到的记忆能力在流域大部分地区均要小于20 d,其空间差异并不显著,这可能与这两套资料较粗的空间分辨率有关。对于较高分辨率的ERA5-Land资料而言,其记忆能力的空间差异即使在春、夏季也较为显著,其中夏季流域西北部的土壤湿度记忆能力可达60 d以上,而在流域南部地区则为20 d左右;此外ERA5-Land中春季土壤湿度记忆能力呈现为流域西北部偏小、东南部相对偏大的特点,而其他季节不同。

就土壤湿度记忆能力较强的秋季而言,在流域的西北部CLM4土壤湿度的记忆能力达90 d,IAP4.1土壤湿度记忆能力约为50 d,在南部这两种土壤湿度的记忆能力仅为10~30 d。ERA5-Land土壤湿度的记忆能力呈现出与CLM4和IAP4.1类似的空间差异特征,只是记忆能力的强度比CLM4和IAP4.1偏大较多,其中在西北部的记忆能力大都可达90~150 d,在南部地区大都为60~80 d,这可能与ERA5-Land再分析资料中所用到的降水驱动异常的持续性有关。

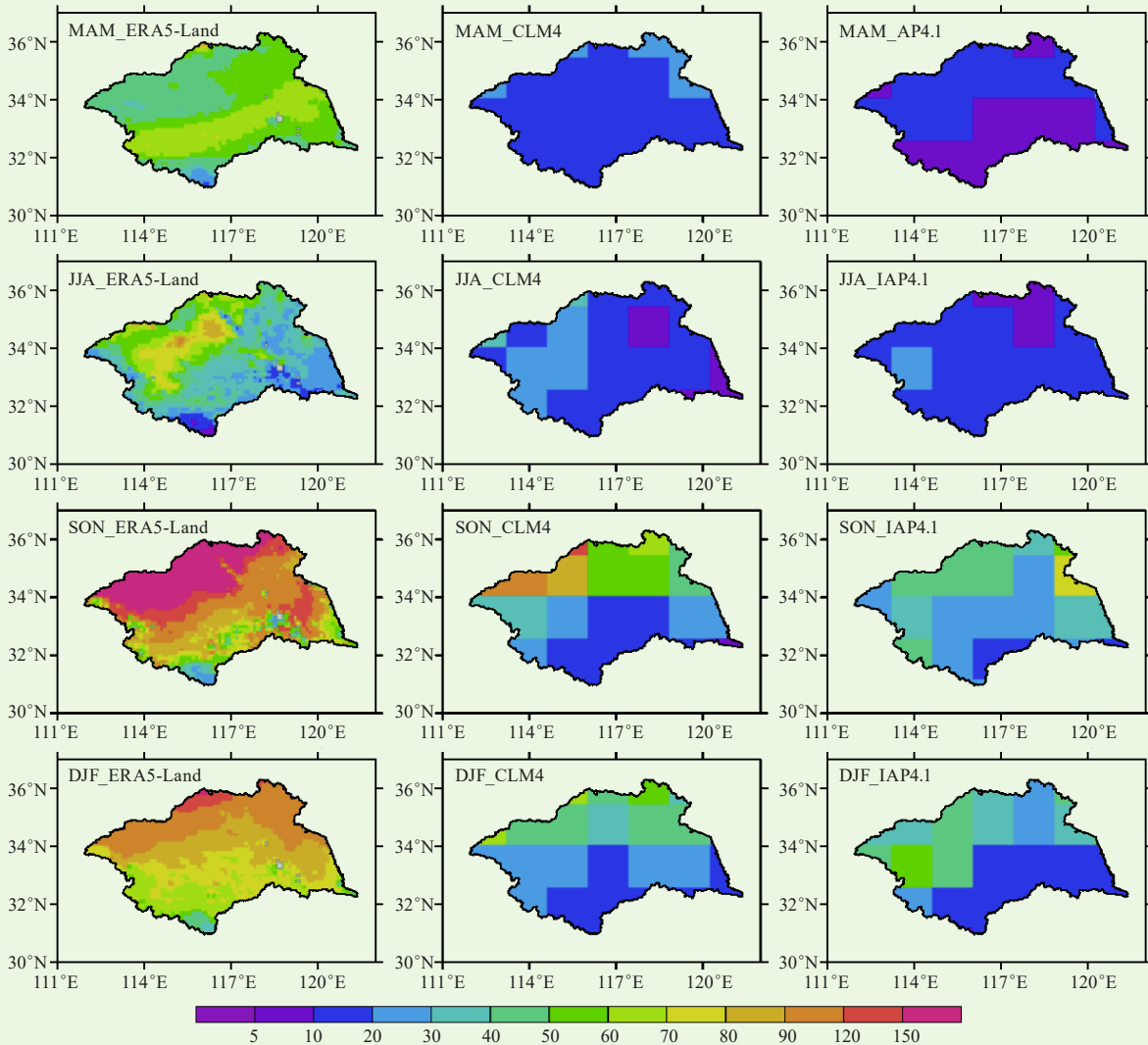


图9 基于5 d平均的40~50 cm深度的土壤湿度计算得到的不同季节土壤湿度记忆能力(单位:d),其中第一行为春季、第二行为夏季、第三行为秋季、第四行为冬季;第一列为ERA5-Land,第二列为CLM4,第三列为IAP4.1
Fig. 9 Seasonal soil moisture memory at 40~50 cm in Huaihe River Basin based on the 5 days running mean data. The first row is for MAM; the second row is for JJA; the third row is for SON; the fourth row is for DJF. The first column is for ERA5-Land; the second column if for CLM4; the third column is for IAP4.1

4 结论和讨论

本文基于1992—2013年的台站观测、ERA5-Land再分析、ESA-CCI卫星遥感、CLM4离线模拟和IAP-AGCM4.1模拟共5套土壤湿度资料,分析了淮河流域土壤湿度的时空分布特征和记忆能力,并考察了不同资料在该流域的适用性。

基于台站观测的淮河流域土壤湿度的分析表明,流域土壤湿度呈现出北干南湿的特点,流域干流及周边土壤湿度较大,淮河中上游的北部地区土壤湿度较小。表层(0~10 cm)土壤湿度的年际变率在流域上游地区较大,而在下游地区较小。总体说来,ERA5-Land的土壤湿度及其年际变率的空间分布与台站观测最相近,而CLM4和IAP4.1土壤湿度的年际变率比台

站观测相对偏弱。

此外,台站观测土壤湿度在不同层次均呈现显著变干的趋势(通过0.05显著性检验),ERA5-Land的土壤湿度也存在显著的变干趋势,与台站观测最接近,但CLM4、IAP4.1和ESA-CCI土壤湿度以年际变化为主,难以看到显著的长期变干的趋势后。去除趋势后,ERA5-Land的土壤湿度与台站观测土壤湿度的时间相关也最大。就土壤湿度的记忆能力而言,在月时间尺度上,各资料均能在一定程度上刻画出台站土壤湿度记忆能力的特征,尤以CLM4和IAP4.1土壤湿度的记忆能力与台站观测最接近。

基于流域土壤湿度记忆能力对时间尺度依赖性的分析结果表明,对于浅层土壤湿度其记忆能力随时间

尺度增加而增大,但对较深层土壤(40~50 cm),其记忆能力随时间尺度的变化不大。5 d时间尺度的土壤湿度能较长时间地保持异常,而又不至于像日平均土壤湿度那样太多地受天气扰动的影响,这在利用模式开展的短期气候预测中有重要意义。利用5天平均的土壤湿度,分析了记忆能力的季节变化特征,结果表明CLM4与IAP4.1土壤湿度的记忆能力在4—8月较小,在0~10 cm、10~20 cm、40~50 cm层分别约为10、15、20 d;在秋末冬初较大,在前两层约30 d,在40~50 cm层约50 d。在前两层土壤湿度记忆能力较小的4—8月,ERA5-Land土壤湿度的记忆能力与CLM4和IAP4.1近似,而在土壤湿度记忆能力较大的秋末冬初,ERA5-Land土壤湿度的记忆能力偏大约30~40 d。而在40~50 cm层,ERA5-Land土壤湿度的记忆能力比CLM4和IAP4.1偏大较多,与月尺度上的结果近似。

基于不同资料土壤湿度记忆能力的空间分布分析表明,淮河流域记忆能力总体呈现流域西北部较大,在流域南部相对偏小的特点,且这种空间差异在秋季均较为明显。就ERA5-Land而言,其空间差异在夏季也较为显著,但CLM4和IAP4.1这两套资料在夏季土壤湿度记忆能力的空间差异并不显著。此外,相对于CLM4和IAP4.1这两套资料,基于ERA5-Land资料的土壤湿度记忆能力要更强,其中在夏季可达60 d以上,秋季则最高可达150 d。这也说明在利用不同的土壤湿度资料进行初始化时,需要考虑遥感反演与再分析资料是否与预测模式系统匹配的问题。

值得指出的是,已有土壤时空变化特征及记忆能力的分析工作,大都针对整个中国区域乃至更大的范围来进行研究,而本文则是以淮河流域为研究重点,从而得到更为细致的、流域尺度的土壤湿度的分布和演变特征,这对未来改进和完善淮河流域水循环的模拟,探讨流域陆面状况对区域天气气候的影响具有重要意义。此外,虽然本研究中采用的卫星遥感、再分析及模式模拟土壤湿度均有日尺度的高分辨率资料,但长时间观测的台站土壤湿度资料却仅有月平均尺度,从而难以评估多源土壤湿度在月内时间尺度的变化特征。另外,本文在分析土壤湿度记忆能力随时间尺度的变化时,仅能用再分析资料(如ERA5-Land)等替代资料开展分析。如果能获取流域尺度更多站点的长时间序列、高时间分辨率的土壤湿度资料,则可以得到基于台站观测资料的土壤湿度记忆能力随时间

尺度的变化,这对进一步验证多源土壤湿度资料在不同区域、流域的适用性具有重要的意义。

参考文献

- [1] Zhan Y, Lin Z. The relationship between June precipitation over mid-lower reaches of the Yangtze River basin and spring soil moisture over the East Asian monsoon region. *Acta Meteor. Sinica*, 2011, 25(3): 355-363.
- [2] Zhang R, Zuo Z. Impact of spring soil moisture on surface energy balance and summer monsoon circulation over East Asia and precipitation in East China. *Journal of Climate*, 2011, 24: 3309-3322.
- [3] 林朝晖, 杨小松, 郭裕福. 陆面过程模式对土壤含水量初值的敏感性研究. *气候与环境研究*, 2002, 6(2): 240-248.
- [4] 孙丞虎, 李维京, 张祖强, 等. 淮河流域土壤湿度异常的时空分布特征及其与气候异常关系的初步研究, 2005, 16(2): 129-139.
- [5] Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z C, et al. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science*, 2004, 305: 1138-1140.
- [6] 林朝晖, 杨小松, 郭裕福. HUBEX 试验期间淮河流域陆面过程特征的初步分析. *自然科学进展*, 2001, 11(6): 588-594.
- [7] 左志燕, 张人禾. 中国东部春季土壤湿度的时空变化特征. *中国科学(地球科学)*, 2008, 38(11): 1428-1437.
- [8] Nie S, Luo Y, Zhu J. Trends and scales of observed soil moisture variations in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2008, 25: 43-58.
- [9] 李明星, 马柱国, 牛国跃. 中国区域土壤湿度变化的时空特征模拟研究. *科学通报*, 2011, 56(16): 1288-1300.
- [10] Delworth T, Manabe S. The influence of potential evaporation on the variabilities of simulated soil wetness and climate. *Journal of Climate*, 1988, 1: 523-547.
- [11] Vinnikov K Y, Robock A, Speranskaya N A, et al. Scales of temporal and spatial variability of midlatitude soil moisture. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(D3): 7163-7174.
- [12] Entin J, Robock A, Vinnikov K Y, et al. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics. *J. Journal of Geophysical Research*, 2000, 105, 11865-11877.
- [13] Wang A, Shi X. A multilayer soil moisture dataset based on the gravimetric method in China and its characteristics. *Journal of Hydrometeorology*, 2019, 20: 1721-1736.
- [14] Copernicus Climate Change Service (C3S). C3S ERA5-Land reanalysis. Copernicus Climate Change Service, 2019, <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>.
- [15] Dorigo W, Wagner W, Albergel C, et al. ESA CCI soil moisture for improved Earth system understanding: state-of-the art and future directions. *Remote Sensing of Environment*, 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.001>.
- [16] Oleson K W, Lawrence D M, Bonan G B, et al. Technical description of version 4.0 of the community land model (CLM). NCAR Tech. Note NCAR/TN-4781STR, 2010: 257.
- [17] Kim H J. Global soil wetness project phase 3 atmospheric boundary conditions (experiment 1) [dataset]. Data Integration and Analysis System (DIAS), 2017, <https://doi.org/10.20783/DIAS.501>.
- [18] Zhang H, Zhang M, Zeng Q. Sensitivity of simulated climate to two atmospheric models: interpretation of differences between dry models and moist models. *Month Weather Review*, 2013, 141: 1558-1576.
- [19] Lin Z, Yu Z, Zhang H, et al. Quantifying the attribution of model bias in simulating summer hot days in China with IAP AGCM 4.1. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2016, 9(6): 436-442.
- [20] Hurrell J W, Hack J J, Shea D, et al. A new sea surface temperature and sea ice boundary dataset for the community atmosphere model. *Journal of Climate*, 2008, 21: 5145-5153.
- [21] Dirmeyer P A, Schlosser C A, Brubaker K L. Precipitation, recycling, and land memory: an integrated analysis. *Journal of Hydrometeorology*, 2009, 10: 278-288.