

中国土壤湿度的分布与变化 I. 多种资料间的比较

张文君^{1, 2} 周天军¹ 宇如聪^{3, 1}

1 中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国气象局中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘 要 土壤湿度是影响气候的重要因子之一, 但观测资料的欠缺制约着该领域研究工作的开展。本文汇总了目前国际上运用较为广泛的四套土壤湿度资料: ERA40 和 NCEP/NCAR 再分析资料、全球土壤湿度计划资料(GSWP2)、以及 NCAR 最近完成的利用观测资料强迫“通用陆面模式”CLM 所产生的土壤湿度资料。在此基础上, 利用中国区域观测的 19 年(1981~1999 年)的土壤湿度和 13 年(1992~2004 年)的土壤相对湿度资料, 对四套资料在中国区域的可靠性进行了分析和比较, 主要结论如下: 四套资料基本揭示出土壤湿度的空间分布, GSWP2 揭示了四套资料最多的共性, 即东北、华南湿, 华北、西北干, 土壤湿度基本由西北向东北和东南呈梯度增加的特征; GSWP2 较好地描述了土壤湿度的季节循环; ERA40 土壤湿度的年际变化与观测相关最好; 观测资料 and 四套资料都表明前期降水会增加土壤湿度, 但土壤湿度异常对后期降水的影响则不显著; 气温与土壤湿度的关系较复杂, 不同的区域有不同的特征。

关键词 土壤湿度 空间分布 季节循环 年际变化 资料比较

文章编号 1006-9895(2008)03-0581-17

中图分类号 P463

文献标识码 A

Spatial Distribution and Temporal Variation of Soil Moisture over China Part I: Multi-data Intercomparison

ZHANG Wen-Jun^{1, 2}, ZHOU Tian-Jun¹, and YU Ru-Cong^{3, 1}

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

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3 *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

Abstract Soil moisture is one of the most important factors affecting the climate. However, deficiency of data coverage has limited the progress of soil moisture studies in terms of its role in climate. In this paper, four sets of widely-used soil moisture data are collected, i. e. the European Centre for Medium Range Weather Forecasting (ECM-WF) 40-year reanalysis (ERA40), the National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) reanalysis data, Global Soil Wetness Project product, and the output of the Community Land Model forced by observational atmospheric conditions. Qualities of these four sets of soil moisture data over mainland China are evaluated by using observational evidences. The results show that the spatial patterns of the

收稿日期 2006-12-04, 2007-07-02 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40523001、40221503, 国家重点基础研究发展规划项目 2005CB321703, 中国科学院创新团队国际合作伙伴计划“气候系统模式研发及应用研究”

作者简介 张文君, 男, 1979 年出生, 博士研究生, 目前主要从事陆面过程及其气候影响的观测分析与模拟研究。

E-mail: zhangwj@mail.iap.ac.cn

four soil moisture data sets generally agree well with the observation. The GSWP2 data are the best one among four datasets in producing the observational pattern, i. e., the soil moisture gradually increases from northwestern to northeastern and southeastern China, with northeastern and southern China being wet, northern and northwestern China being dry. The seasonal cycle of GSWP2 soil moisture is also better than any of the others. The ERA40 data have the highest correlation with the observation in producing the interannual variability of the soil moisture. All data show significant positive correlation between the precipitation and later time soil moisture, while no significant correlation can be found between precipitation and preceding soil moisture. The relationship between the soil moisture and air temperature is complex and the results are region-dependent.

Key words soil moisture, spatial distribution, seasonal cycle, interannual variation, multi-data intercomparison

1 引言

陆面过程作为全球变化研究中的一个重要方面,引起了国际科学界的重视,为此,国际上设立了一系列的研究计划,如全球水分和能量循环计划(GEWEX)、国际地圈和生物圈计划及其下属水分循环中的生物作用计划(BAHC)等。土壤湿度作为陆面过程中重要的物理量之一,通过改变地表反照率、热容量和向大气输送的感热、潜热等途径影响气候^[1]。有观点认为,土壤湿度在气候中的作用仅次于海表温度^[2],而在中高纬,其对气候的影响与海洋相当^[3],所以,土壤湿度是除海温外影响气候预测的另一重要因子^[4~5]。

在观测研究方面,围绕着土壤湿度特性及其与气候的关系,马柱国等^[6]指出土壤湿度与降水呈正相关,与气温呈反相关,且不同深度不同区域有显著差异;Etin等^[7]的工作表明土壤湿度的时间尺度为几个月,空间尺度为几百公里;Wu等^[8]通过分析美国 Illinois 州土壤湿度资料指出,随着土壤深度增加,土壤湿度的振幅减小,位相转移;类似工作^[9, 10]还有一些,但这些工作都是基于零星的、时间长度较短的观测资料,对分析土壤湿度与气候的关系来说比较困难。因此,受观测资料的限制,目前关于土壤湿度对气候影响的工作主要借助数值模式^[11],许多学者通过数值试验研究了干、湿土壤对后期气候的影响,例如 Shukla 和 Mintz^[3]的研究结果说明干、湿土壤对后期降水和气温的影响有较大差异;Walker 和 Rowntree^[12]的敏感性试验指出,干土壤可使未来气温升高,湿土壤可使后期降水增加;Yeh等^[13]用普林斯顿大学地球流体力学试验室(GFDL)的大气环流模式(GCM)研究了不同纬度带的灌溉对气候的影响,发现增加土壤湿度可使降水增加、温度降低,但不同纬度带降水和温度

变化的范围及其持续时间各异;其他一些工作亦证实了土壤湿度对短期气候的重要作用^[14~17]。

鉴于土壤湿度在气候变化中的重要性,有必要发展一套准确的、全球范围的土壤湿度资料,以用于气候模式的初始化和气候变率研究。全球水分和能量循环试验(GEWEX)中的全球土壤水分计划(GSWP)正是基于这一目标制定并实施的,GSWP的第二期计划(GSWP2^[18])已经结束,产生了十年(1986~1995年)的全球土壤湿度资料(简称 GSWP2 资料)。目前,再分析资料由于覆盖广、时间长而被广泛使用,例如来自于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)40年的再分析资料(简称 ERA40 资料)^[19]和美国国家环境预测中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析资料(简称 NCEP 资料)^[20, 21]。CLM是目前世界上发展较为完善的,较具有发展潜力的陆面模式之一,它综合了 BATS、IAP94、NCAR 的 LSM 等几个陆面模式的优点,并加入了水文过程,改进了一些物理过程的参数化,其有效性已在陆气耦合模式中得以证实^[22]。最近,Qian等^[23]通过气象观测场校正过的 NCEP 资料强迫陆面模式 CLM,产生了一套陆面资料(简称 CLM 资料)。这些资料为探讨土壤湿度与气候变率的关系提供了基础,但是它们在气候较为复杂的东亚地区的可靠性如何,需要进行验证。

本文的目的是利用中国区域的土壤湿度观测资料对两套再分析资料(ERA40、NCEP)、GSWP2 及 CLM 中的土壤湿度进行分析和比较,检验它们在东亚地区的可靠性,同时,确定一套可作为“观测”标准用于模式结果验证的资料。本文的另外一个主要目的,是从“观测”的角度,揭示土壤湿度的季节循环特点、年际变率特征,及其与降水和气温变化的关系。本文其他部分安排如下:第二部分为资料与方法的介绍;第三部分讨论土壤湿度的气

候分布；第四部分讨论土壤湿度的年际变化；第五部分讨论土壤湿度与降水、气温的关系；第六部分对全文进行总结。

2 资料与方法

本文所用的资料包括中国区域土壤湿度的观测资料、两套再分析资料、GSWP2 资料和 CLM 资料，分别介绍如下。

2.1 观测资料

Robock 等^[11]收集了全球的土壤湿度观测资料，其中包括中国 1981~1991 年 43 个站的观测资料。这些资料已经广泛应用于土壤湿度的尺度研究^[7, 24]和陆面模式的评估^[25, 26]。Li 等^[27]在此基础上把中国土壤湿度资料延续到 1999 年。图 1a 为土壤湿度观测站点的分布，40 个站主要分布在东北和黄河流域。中国区域土壤湿度一个月观测三次，分别为每月的第 8 天、第 18 天和第 28 天，共有 11 层。最初的土壤湿度是通过称重法测量的，然后转化为体积比的土壤湿度，如公式 (1) 所示， ρ_b 为土壤密度， ρ_w 为水的密度， θ_m 为土壤湿度的重量比， θ_v 为土壤湿度的体积比^[27]，

$$\theta_v = \theta_m \cdot \rho_b / \rho_w. \quad (1)$$

Li 等^[27]用此资料评估了三套再分析资料 (ERA40、NCEP/NCAR 再分析、和 NCEP/DOE 再分析)，指出对中国大部分观测站点，ERA40 最接近观测。然而，土壤湿度在单站尺度上存在很大的变率^[25]，为了减小单站的不确定性，我们根据图 1 中站点分

布，选择了 3 个站点集中的区域去评估再分析资料和陆面模式资料的季节循环和年际变化。这 3 个区域分别为东北区域 (43°N~48°N, 123.5°E~132.5°E) (对应图 1 的 1 区)、中部区域 (34°N~39°N, 105°E~108°E) (对应图 1 的 2 区)和东部区域 (33°N~35.5°N, 112°E~117.5°E) (对应图 1 的 3 区)。

由于 Roboc 等^[11]和 Li 等^[27]收集的中国区域土壤湿度站点稀少，不能用于空间分布的分析。作为补充，本文还用到中国气象局提供的 1992~2004 年相对土壤湿度资料，此资料站点较多 (图 1b)，但在冬季由于冻土，北方观测少。观测频率、方法与上述资料相同，

$$r = \theta_m / f_c, \quad (2)$$

其中， θ_m 为土壤湿度重量比， f_c 为田间持水量， r 为土壤相对湿度。虽然土壤相对湿度与体积比土壤湿度是有差别的，但能一致地反映出土壤湿度的干、湿变化。下文中除在土壤湿度纬向平均季节循环的分析中用到此资料外，其余所用土壤湿度的观测资料都为 Robock 等^[11]和 Li 等^[27]收集的中国区域土壤湿度资料。

2.2 再分析资料

目前，全球使用最为广泛的两套再分析资料是 ERA40 和 NCEP/NCAR 再分析资料。再分析资料的土壤湿度依赖于所用的陆面模式、强迫场及同化技术。ERA40 使用的陆面过程为 TESSEL (Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchanges over land)^[28]，有 4 个土壤层，厚度分别为：7 cm、21 cm、

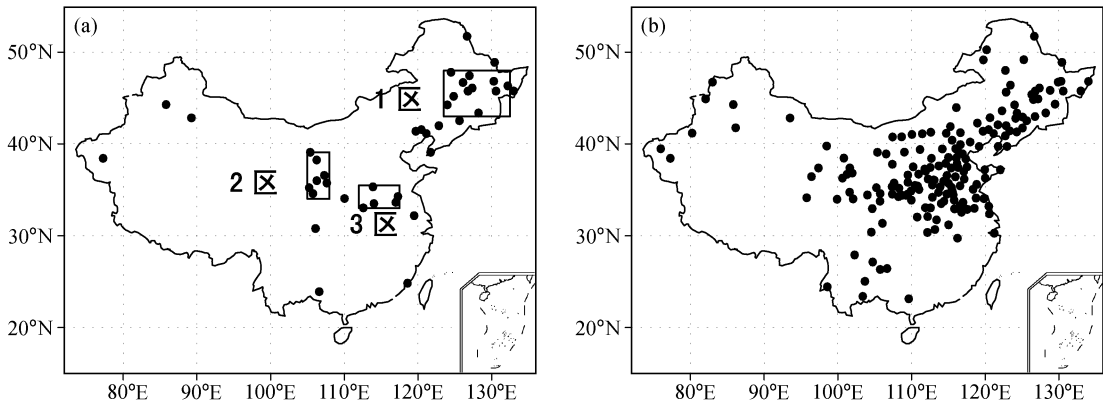


图 1 中国土壤湿度观测站点分布：(a) Robock 等^[11]、Li 等^[27]收集的中国区域土壤湿度资料；(b) 中国气象局提供的土壤湿度资料 (3~9 月观测次数超过 80% 的站点)

Fig. 1 Distributions of soil moisture observation stations in China: (a) The data collected by Robock et al. ^[11] and Li et al. ^[27]; (b) the data from the China Meteorological Administration (the observation stations with data available frequency above 80% from Mar to Sep)

72 cm 和 189 cm, 模式包含有 20 种植被类型, 陆表参数随植被类型的变化而变化。为了避免土壤湿度偏差过大, ERA40 通过相对湿度和温度去不断地校正土壤湿度^[29, 30]。

NCEP 资料使用的陆面模式为 OSU LSM (the Oregon State University land surface model)^[31], 土壤湿度有 2 层, 厚度分别为 10 cm 和 190 cm。植被类型是源于 SiB 气候态的类型分布, 许多参数如土壤特性、植被冠层覆盖率等都是固定的。土壤湿度的校正以 Mintz 和 Serafini^[32] 发展的气候平均土壤湿度为标准。

2.3 GSWP2 资料

随着人们对土壤湿度重要性认识的加深, 气候研究迫切需要覆盖全球的土壤湿度资料。遥感技术虽能反演出全球的土壤湿度, 但微波遥感技术仅对植被稀少的区域有效, 且仅能反演出地表下几毫米深度^[33]。为解决土壤湿度资料的缺乏, 世界气候研究计划 (WCRP) 中的全球能量和水分循环试验 (GEWEX) 实施了全球土壤湿度计划 (GSWP), 运用国际卫星地面气候计划 (ISLSCP) 提供的资料, 强迫陆面模式来产生一套多模式集合的陆面资料^[34], 第一期计划积分了两年 (1987 ~ 1988 年)^[35], 第二期计划积分了十年 (1986 ~ 1995 年)^[36], 多模式平均的土壤湿度共 6 层, 各层厚度分别为 10 cm、20 cm、20 cm、20 cm、30 cm 和 50 cm。本文仅评估第二期计划的结果。

2.4 CLM 资料

Qian 等^[23]通过校正过的 NCEP 资料强迫陆面模式 CLM, 产生了一套 55 年 (1948 ~ 2002 年) 的土壤湿度资料。CLM 植被冠层有 1 层, 土壤温度和湿度共有 10 层, 显式处理液态水和冰; CLM 包含一个多层积雪模式, 雪盖最多为 5 层; 同时加入了地表径流参数化方案。下垫面陆地部分每个格点内为 5 个次网格覆盖类型 (冰川、湖泊、湿地、城市和植被), 每个网格内的植被又被分成 4 ~ 16 种不同功能的植物类型, 每种类型有自己叶面指数、茎面积指数和冠层高度, 土壤质地数据考虑了沙地和粘土的垂直变化。

为了便于比较, 本文把每套资料中的土壤湿度线性地插值到上层 10 cm (0 ~ 10 cm, 下同) 和上层 1 m (0 ~ 1 m, 下同) 的深度。此外, 本文还用到了中国台站的降水资料和 2 m 气温资料、NCEP 和

ERA40 再分析的降水、气温资料。

3 土壤湿度的气候分布

3.1 空间分布

孙丞虎等^[37]选取资料状况较好的 1990 ~ 2000 年中国 114 站的土壤湿度 (土壤重量含水百分率) 资料, 分析了土壤湿度气候场特征, 结果表明, 0 ~ 50 cm 各层土壤湿度均呈“两湿一干”分布: 东北、华东较为潮湿, 华北则较为干燥, 尤其河套地区是土壤干中心; 夏季和秋季、春季极为相似; 冬季由于北方冻土, 观测仅出现在南方零星站点而没做分析。图 2 给出了四套资料 10 cm 土壤湿度年平均分布 [ERA40、NCEP、CLM 的平均时间为 1981 ~ 1999 年, GSWP2 的平均时间为 1986 ~ 1995 年 (下同)], 由图可见, 四套资料都描述出了我国土壤湿度东北湿、华北干的特征, 而且都一致表现为西北为干中心。但河套地区的干中心都没有描述出, 华东区域的湿中心 CLM 与观测一致, 尤其是长江下游区域, 而 ERA40 和 GSWP2 资料湿中心太弱, NCEP 在华东没能再现出湿中心。夏、冬季的土壤湿度梯度分布与年平均类似, 但冬季 NCEP 在西北区域偏差较大 (图 3、4)。1 m 土壤湿度分布与 10 cm 相似 (图略)。

表 1 给出了四套资料间土壤湿度的空间相关系数。四套资料除了冬季 NCEP 1 m 土壤湿度与 CLM、GSWP2 土壤湿度呈负相关外, 彼此间都呈正相关, 说明四套资料空间分布基本一致。夏季的相关性最高, 冬季最差, 10 cm 土壤湿度空间相关性好于 1 m; GSWP2 土壤湿度与其他资料的空间相关最好, ERA40 资料也较好, NCEP 土壤湿度与其他资料的空间相关最差。因此, GSWP2 土壤湿度较好地反映了土壤湿度的空间分布, 即东北、华南湿, 华北、西北干, 土壤湿度基本由西北向东北和东南呈梯度增加的特征。

3.2 季节循环

土壤湿度的季节循环能够直接对潜热和感热通量的季节循环产生影响^[38]。中国处在东亚季风区, 其季节循环非常明显。观测中, 东北区域土壤湿度不论 10 cm 还是 1 m 都具有显著的季节循环 (图 5): 土壤湿度在冬季由于温度低、蒸发小, 10 cm 土壤湿度达到极大, 随着温度升高、蒸发增加, 而雨季没有来临, 土壤湿度随之减小, 7 月达最低, 8

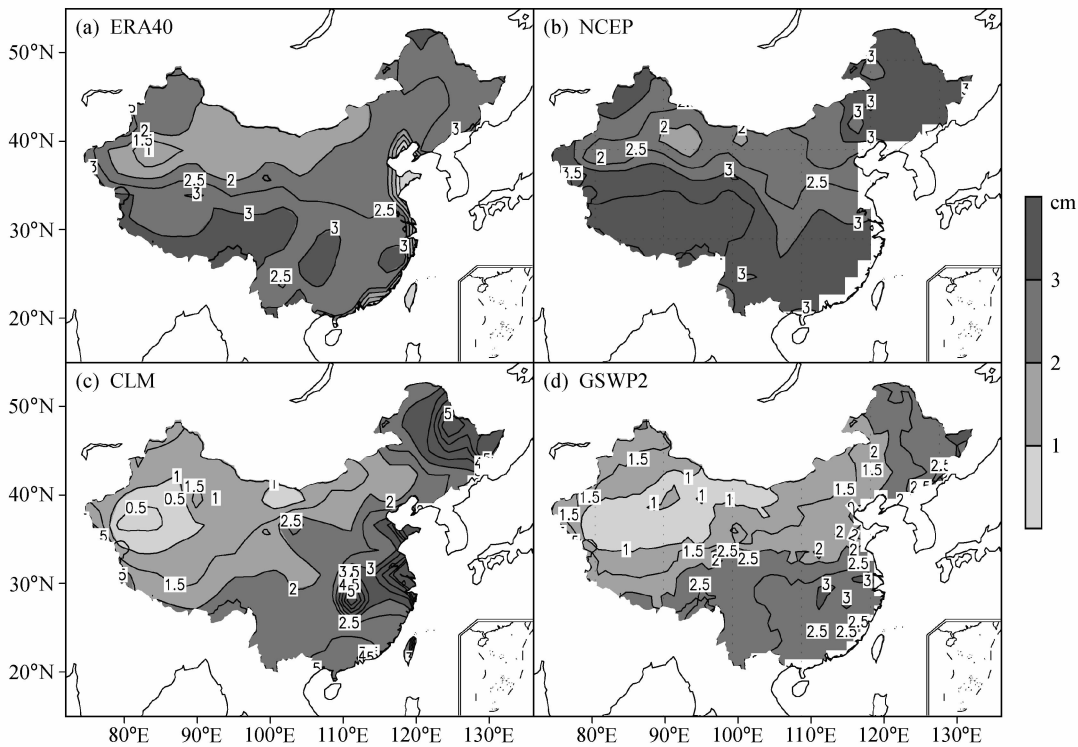


图 2 中国区域 10 cm 土壤湿度年平均气候态的水平分布：(a) ERA40；(b) NCEP；(c) CLM；(d) GSWP2
Fig. 2 Annual mean 10-cm soil moisture over China for (a) ERA40, (b) NCEP, (c) CLM, and (d) GSWP2

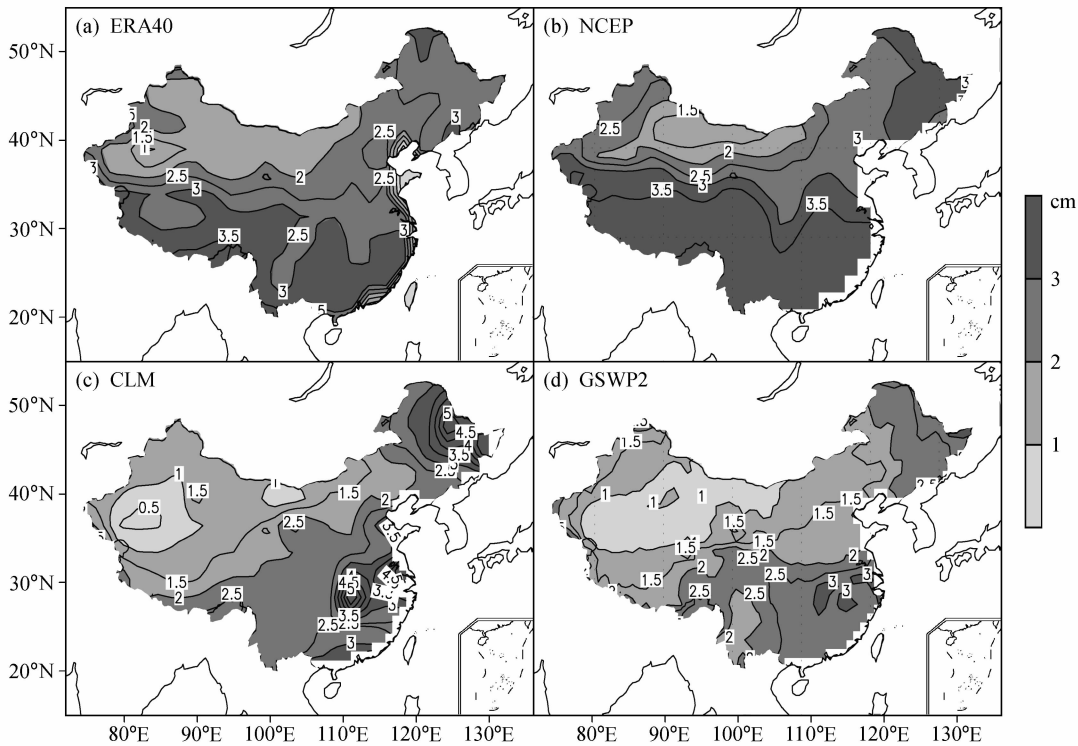


图 3 同图 2，但为夏季
Fig. 3 Same as Fig. 2, but for JJA (Jun, Jul and Aug)

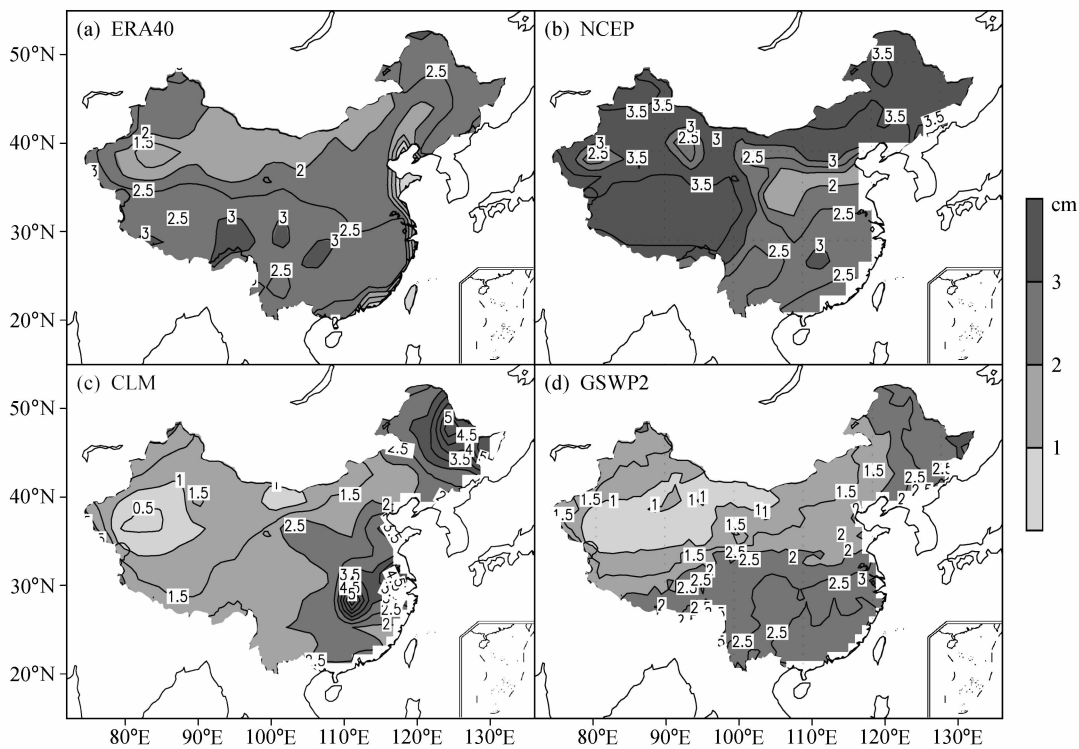


图4 同图2, 但为冬季
Fig. 4 Same as Fig. 2, but for DJF (Dec, Jan and Feb)

表 1 四套资料土壤湿度在中国区域 (15°N~55°N, 70°E~140°E) 气候平均场的空间相关系数
Table 1 Spatial correlation coefficients among soil moisture from ERA40, NCEP, CLM and GSWP2 over China (15°N - 55°N, 70°E - 140°E)

		10 cm 土壤湿度				1 m 土壤湿度			
		ERA40	NCEP	CLM	GSWP2	ERA40	NCEP	CLM	GSWP2
年平均	ERA40	1.00	0.73	0.34	0.63	1.00	0.63	0.32	0.61
	NCEP	/	1.00	0.29	0.48	/	1.00	0.19	0.36
	CLM	/	/	1.00	0.77	/	/	1.00	0.69
	GSWP2	/	/	/	1.00	/	/	/	1.00
夏季平均	ERA40	1.00	0.85	0.47	0.67	1.00	0.82	0.41	0.67
	NCEP	/	1.00	0.54	0.73	/	1.00	0.37	0.67
	CLM	/	/	1.00	0.79	/	/	1.00	0.68
	GSWP2	/	/	/	1.00	/	/	/	1.00
冬季平均	ERA40	1.00	0.45	0.26	0.57	1.00	0.25	0.22	0.56
	NCEP	/	1.00	0.09	0.11	/	1.00	-0.05 *	-0.03 *
	CLM	/	/	1.00	0.73	/	/	1.00	0.67
	GSWP2	/	/	/	1.00	/	/	/	1.00

注: * 表示未通过 95% 以上的信度检验。

月土壤湿度迅速增加, 9 月降低, 10 月后由于温度降低、蒸发减小, 湿度逐渐增加; 1 m 土壤湿度与 10 cm 类似 (但 4 月呈现低值的原因尚不清楚)。四套资料 10 cm 土壤湿度基本描述出了雨季来临前土

壤湿度的低值, 但时间都超前于观测, 尤其是 ERA40 和 NCEP 资料。除了 GSWP2 资料, 其他三套资料的土壤湿度 8 月后都有明显下降, 而 NCEP 资料在 10 月达到极低值后又开始上升; 1 m

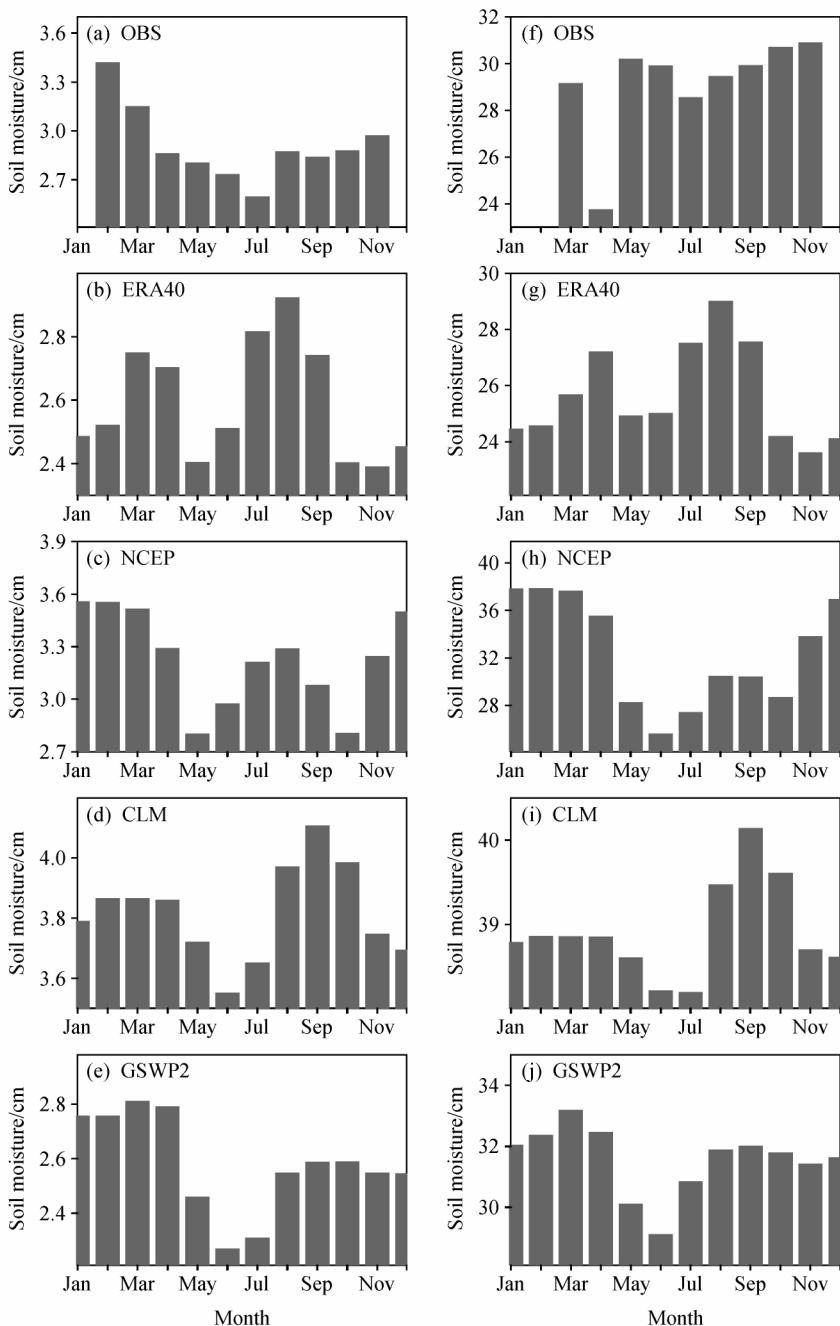


图 5 东北区域 10 cm (a、b、c、d、e) 和 1 m (f、g、h、i、j) 土壤湿度的季节循环：(a、f) 观测；(b、g) ERA40；(c、h) NCEP；(d、i) CLM；(e、j) GSWP2

Fig. 5 The seasonal cycle of soil moisture over northeastern China for (a, f) observation, (b, g) ERA40, (c, h) NCEP, (d, i) CLM, and (e, j) GSWP2; (a–e) 10-cm depth; (f–j) 1-m depth

土壤湿度与 10 cm 类似。比较而言，GSWP2 资料较好地揭示了东北区域土壤湿度的季节循环。

图 6 是中国中部观测土壤湿度的季节循环：10 cm 土壤湿度随着春季温度增加引起的蒸发加大而减小，5 月最低，6 月后雨水增多，湿度开始增加，

到 7 月达到极值，后又开始下降，10 月湿度增加，随后降低。1 m 土壤湿度谷值与 10 cm 相比滞后 1 个月。除 NCEP 资料外，其他三套 10 cm 土壤湿度资料都揭示出土壤湿度的季节循环，但与观测相比，GSWP2 资料谷值滞后 1 个月，ERA40 和 CLM

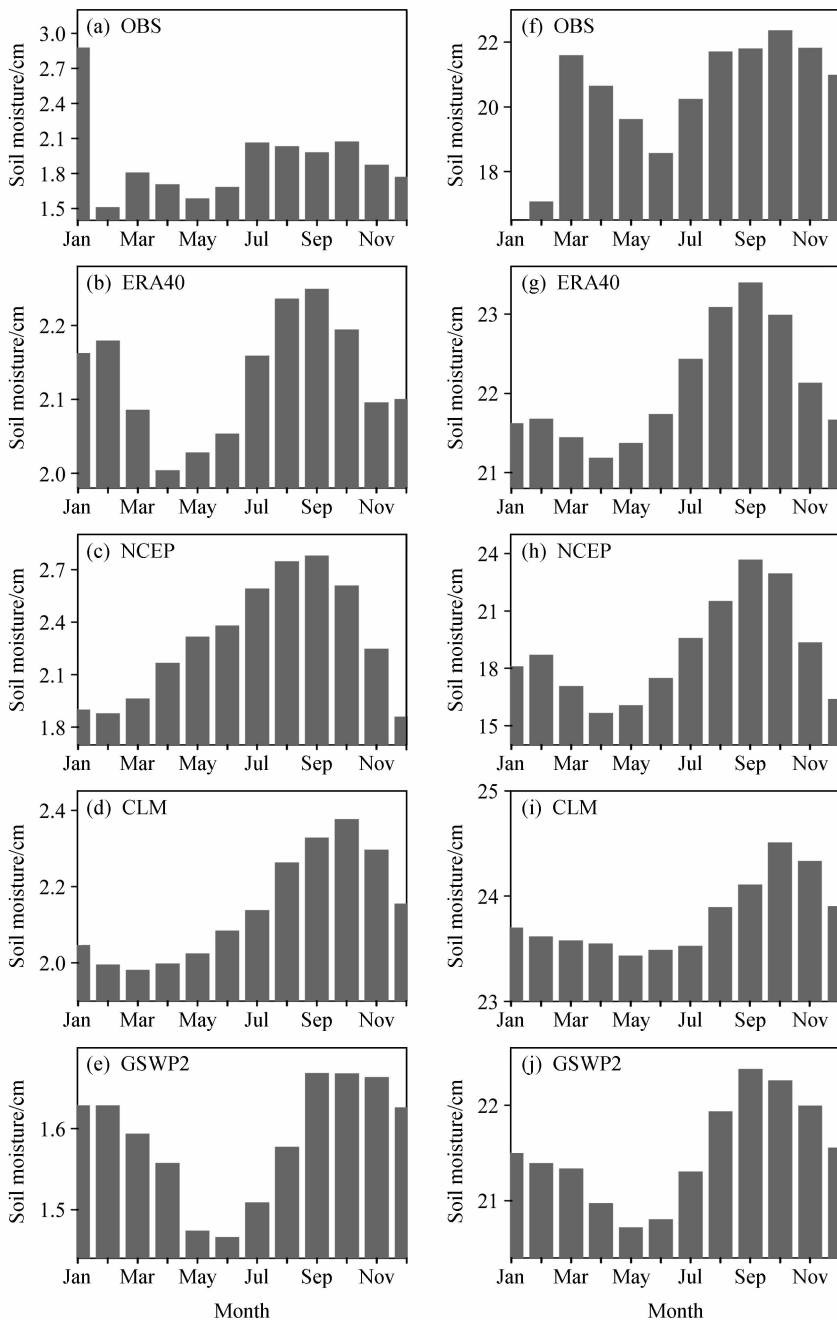


图6 同图5, 但为中部区域

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for central China

资料的谷值都超前。1 m 土壤湿度比 10 cm 更接近观测, 但除了 CLM 和 GSWP2 资料外, 夏季土壤的干期都超前 (图 6)。

观测中东部 10 cm 和 1 m 土壤湿度一致表现为冬季最大, 秋、夏季次之, 春末最小 (图 7)。四套资料都未能较准确地描述出中国东部土壤湿度的季节循环, GSWP2 和 CLM 资料都描述出了 5 月的低

值, 但夏季以后与观测相反, 两套再分析资料在 8 月达到最大, 与观测差别较大; GSWP2 1 m 土壤湿度除秋末与观测相反外, 其他季节基本揭示出了土壤湿度的实际变化 (图 7)。总体而言, 它们对土壤湿度的描述较差, 对于再分析资料来说, 土壤湿度的分布, 很大程度上受资料同化所用模式的性能影响, 而模式对东亚季风区的降水模拟则可能存在

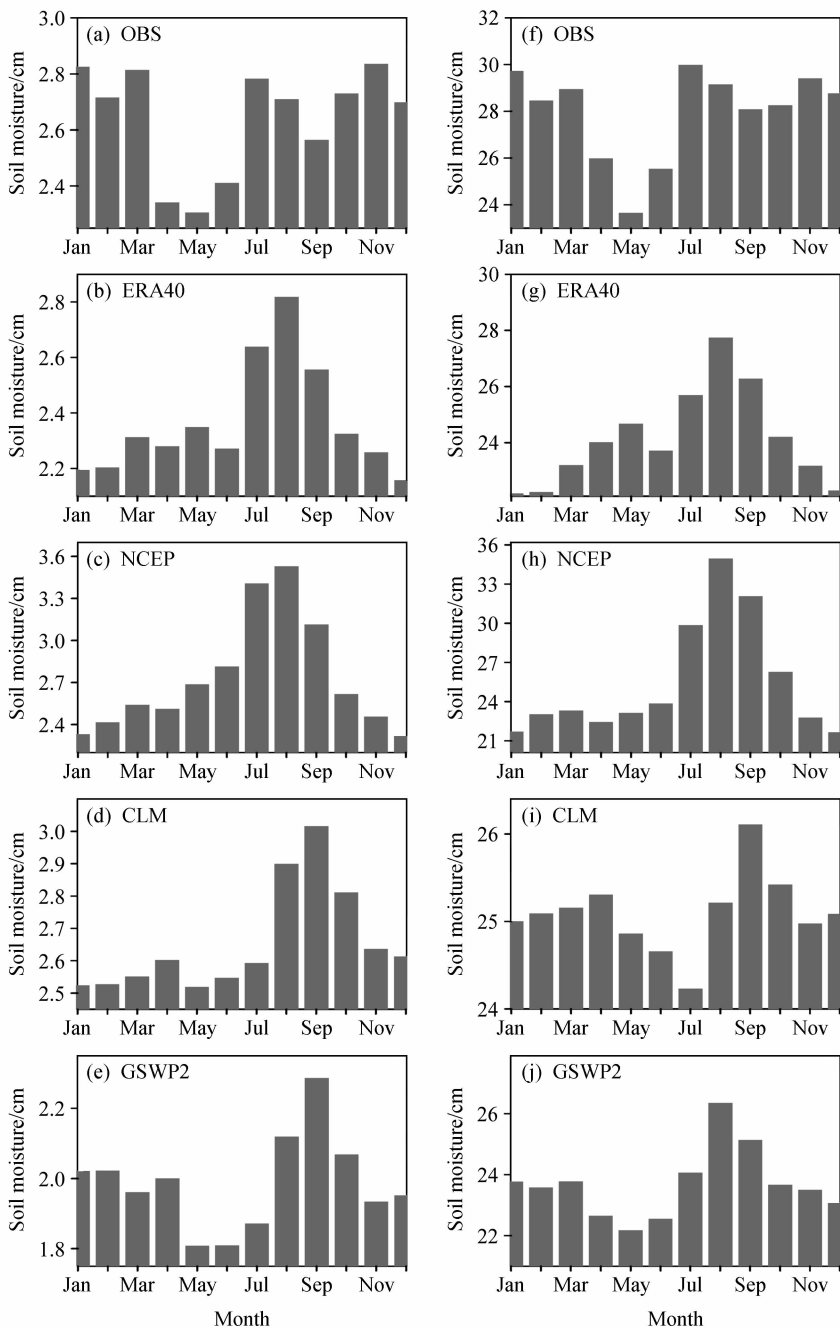


图 7 同图 5，但为东部区域

Fig. 7 Same as Fig. 5, but for eastern China

偏差；对于陆面模式的结果，原因可能在于当利用观测资料强迫陆面模式时，没有考虑陆气反馈过程所致。相比较而言，不论 10 cm 还是 1 m 土壤湿度，GSWP2 都较好地描述出土壤湿度的季节循环。

图 8 为中国区域 10 cm 土壤湿度的纬向平均季节循环分布图。观测中，华北为一条干土壤带，且在春末和秋季为两低值中心，这与上面的分析一

致。四套资料中，NCEP 资料与观测的土壤湿度差别较大，其他资料基本都描述出了华北土壤的干带；不过 ERA40 资料的土壤湿度几乎呈南北平行分布，且华北区域的干带一直从秋季延续到第二年的春末；CLM 的华北干带偏北；GSWP2 资料在华北秋季的低值延续时间过长。相比而言，GSWP2 资料较好地描述了土壤湿度的季节循环。

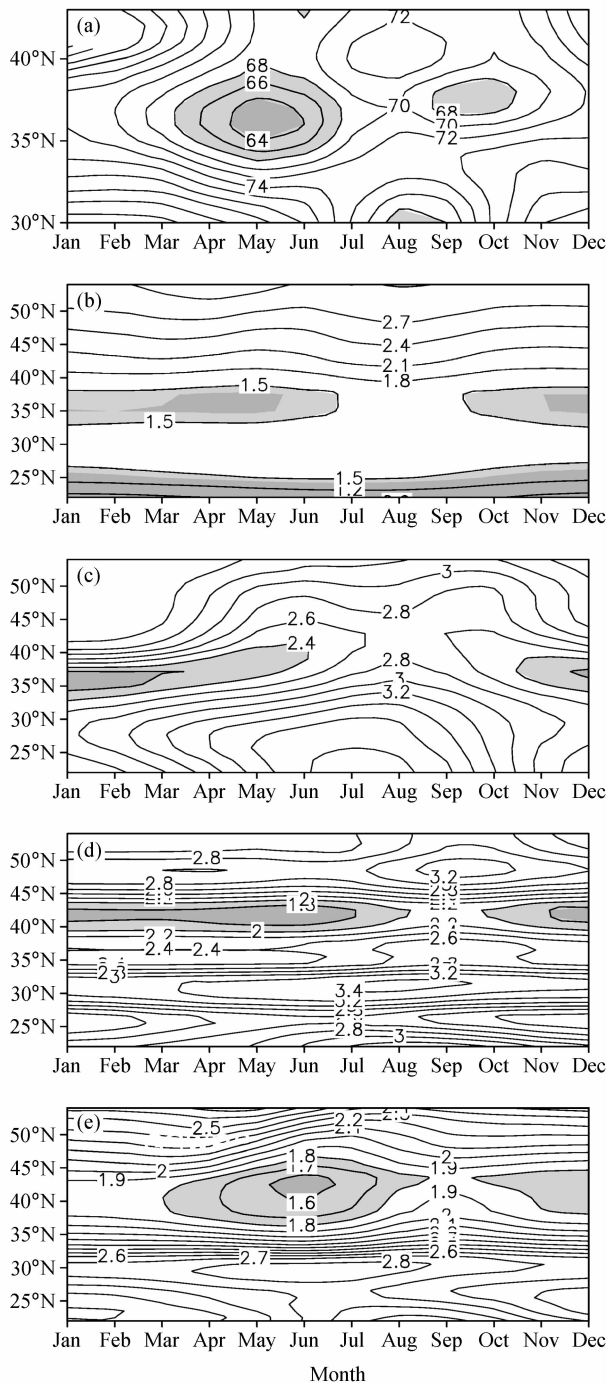


图8 105°E~135°E 土壤湿度的季节循环: (a) 观测的相对土壤湿度 (%); (b) ERA40; (c) NCEP; (d) CLM; (e) GSWP2。(a) 平均时间为 1992~2004 年, (b~d) 为 1981~1999 年, (e) 为 1986~1995 年; (b~e) 单位为 cm

Fig. 8 Climatological seasonal cycle of soil moisture zonally averaged over 105°E–135°E: (a) Observed relative soil moisture (%); (b) ERA40; (c) NCEP; (d) CLM; (e) GSWP2. (a) is for 1992–2004 mean, (b–d) for 1981–1999, (e) for 1986–1995; units of (b–e): cm

4 土壤湿度的年际变化

4.1 年平均值的变化

观测中东北 10 cm、1 m 土壤在 1988 年前较湿, 1989~1991 年为偏干期, 1992 年后回升, 1995 年后开始下降 (图 9a、d)。10 cm 土壤湿度有一很弱的下降, 1 m 下降较明显, 呈现变干趋势 (图 9a、d)。四套资料基本都揭示出东北土壤湿度的年际变化, 与观测的土壤湿度在东北都呈正相关, 尤其是 CLM 10 cm、1 m 土壤湿度与观测的相关系数都通过 98% 的信度检验 (如表 2)。但四套资料土壤湿度的变化比观测小 (表 3), 且都没有描述出 1989~1991 年的偏干及 1989 年前的偏湿 (图 9a、d)。

观测的中部土壤湿度不论 10 cm 还是 1 m, 在 1990 年代中期前增加, 之后开始下降 (图 9b、e)。除 NCEP 资料外, 四套资料基本都揭示出土壤的干、湿变化, 10 cm、1 m 土壤湿度都呈现弱的下降趋势 (图 9b、e), 其在 10 cm 与观测都呈正相关, 但 1 m 相关较差, 其中 ERA40 不管 10 cm 还是 1 m 都通过了 98% 的显著性检验 (表 2)。此外, 四套资料的标准差比观测小 (表 3)。

观测的东部土壤湿度 10 cm 变化与 1 m 差别较大, 某些年份甚至反向 (图 9c、f)。四套资料 10 cm 土壤湿度与观测非常一致, 除 GSWP2 外都通过了 98% 的信度检验; 1 m 土壤湿度与观测的相关性不如 10 cm 好 (表 2)。四套资料各自的标准差都约为观测的一半 (表 3)。

4.2 夏季平均值的变化

观测中, 东北 10 cm、1 m 土壤湿度夏季平均值的年际变化一致, 在 1982 年异常干, 1984 年后有一下降趋势, 尤其是在 1 m (图 10a、d)。四套资料除了 GSWP2 外, 都较好地揭示了夏季土壤湿度的年际变化以及 1984 年后的减小。由表 2 可见, 除 GSWP2 外都通过了 90% 以上的显著性检验。但四套资料土壤湿度年际变化标准差比观测小 (表 3)。

观测的中部 10 cm 和 1 m 土壤湿度变化也非常一致, 1982 年异常干, 1992~1996 年较湿润; 四套资料基本能描述出干、湿年的变化 (图 10b、e)。四套资料各自与观测的相关系数, 除 GSWP2 外, 都是 10 cm 土壤湿度明显高于 1 m, 但只有 ERA40 通过 90% 以上的信度检验 (表 2), 且四套资料年际变化的标准差比观测小 (表 3)。

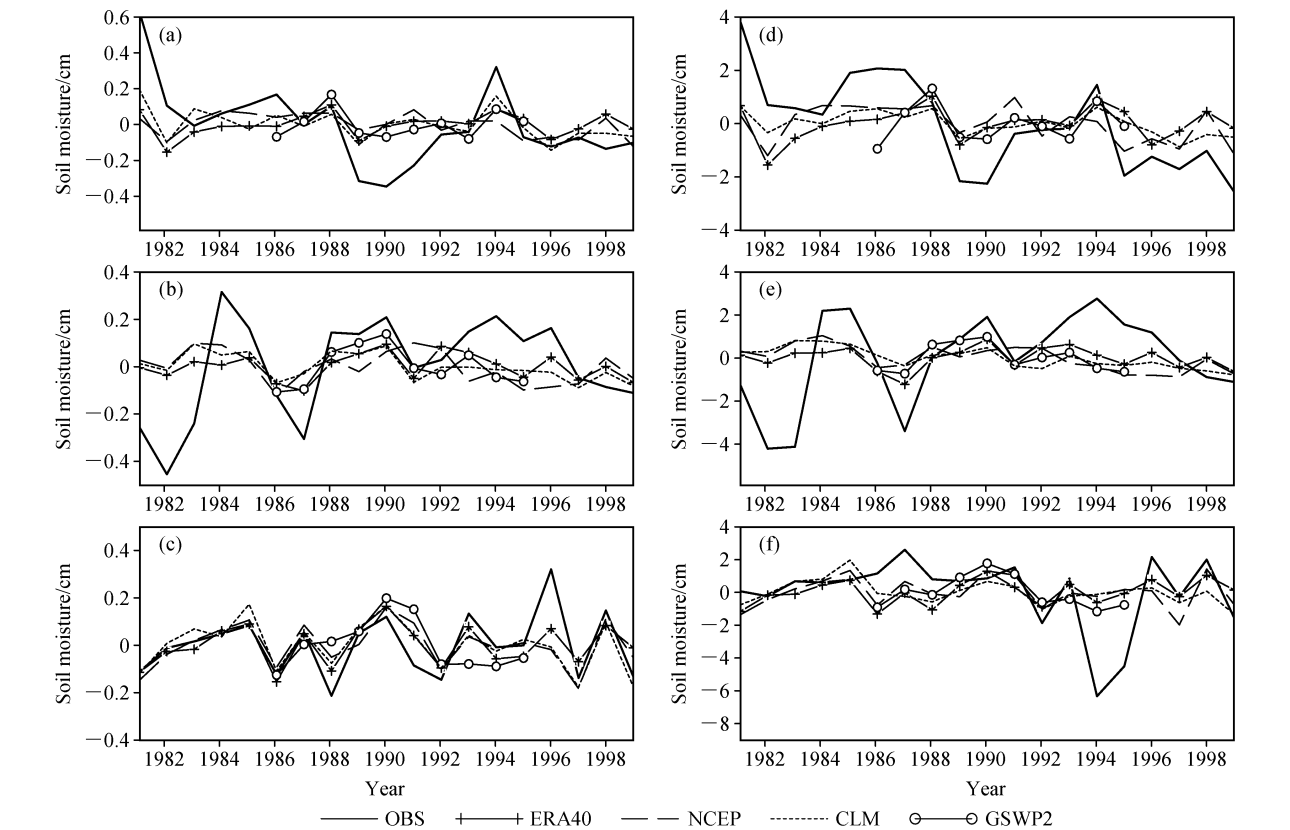


图 9 年平均 10 cm (a~c) 和 1 m (d~f) 土壤湿度的年际变化: (a、d) 东北区域; (b、e) 中部区域; (c、f) 东部区域
Fig. 9 Interannual variation of annual mean (a~c) 10-cm and (d~f) 1-m soil moisture: (a, d) Northeastern China; (b, e) central China; (c, f) eastern China

表 2 四套资料区域平均土壤湿度在不同区域与观测的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between soil moisture of ERA40, NCEP, CLM, GSWP2 and observations

		10 cm 土壤湿度				1 m 土壤湿度			
		ERA40	NCEP	CLM	GSWP2	ERA40	NCEP	CLM	GSWP2
年平均	东北	0.39 *	0.24	0.70 ***	0.50	0.36	0.55 ***	0.81 ***	0.37
	中部	0.56 ***	0.04	0.32	0.68 **	0.53 ***	-0.05	0.02	0.35
	东部	0.77 ***	0.60 ***	0.67 ***	0.25	0.34	0.33	0.24	0.59 *
夏季平均	东北	0.59 ***	0.56 ***	0.63 ***	0.09	0.45 *	0.57 ***	0.73 ***	0.05
	中部	0.56 ***	0.36	0.24	-0.03	0.39 *	0.15	0.04	0.10
	东部	0.89 ***	0.61 ***	0.79 ***	0.49	0.73 ***	0.55 ***	0.58 ***	0.83 ***

注: *、**、*** 分别表示通过 90%、95%和 98%的信度检验。

表 3 区域平均土壤湿度年际变化的标准差 (单位: mm)

Table 3 Standard deviation of annual and summer mean soil moisture (units: mm)

		10 cm 土壤湿度					1 m 土壤湿度				
		OBS	ERA40	NCEP	CLM	GSWP2	OBS	ERA40	NCEP	CLM	GSWP2
年平均	东北	2.17	0.63	0.64	0.84	0.74	17.22	6.12	6.84	4.32	8.30
	中部	2.02	0.54	0.68	0.55	0.80	20.51	4.90	5.62	4.65	7.20
	东部	1.28	0.84	0.90	1.00	1.03	21.71	7.31	9.15	7.24	11.60
夏季平均	东北	2.41	1.18	1.20	1.00	0.88	18.97	10.22	13.58	6.11	6.96
	中部	3.07	0.89	1.10	0.87	0.99	28.00	7.45	7.67	5.44	7.14
	东部	2.89	1.43	1.43	1.37	1.71	26.20	12.20	12.20	7.88	19.88

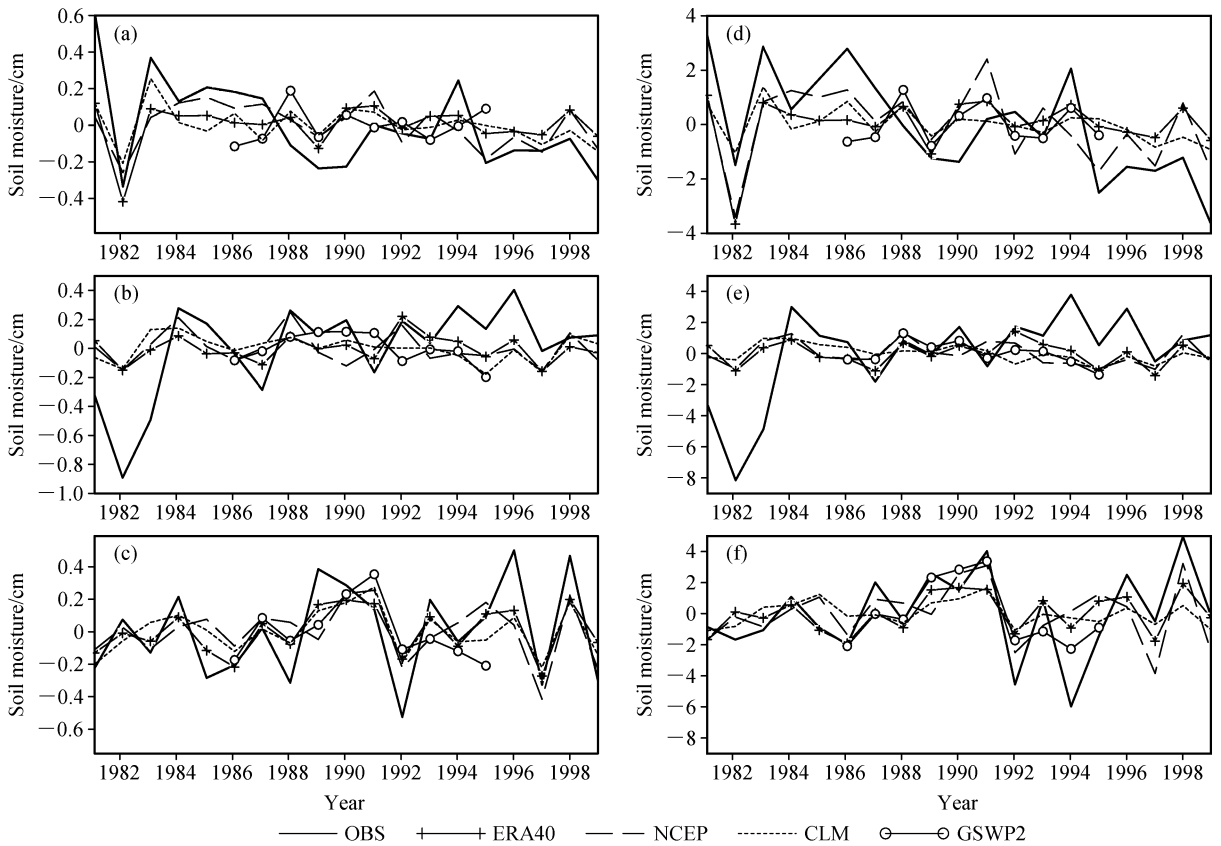


图 10 同图 9, 但为夏季平均

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for JJA

观测中, 东部 10 cm 和 1 m 土壤湿度从 1980 年代初到 1980 年代末增加, 1990 年代初下降, 10 cm 土壤湿度 1993 年后增加, 1 m 土壤湿度 1994 年后增加。四套资料都很好地描述出了土壤湿度的变化 (图 10c、f), 除 GSWP2 的 10 cm 土壤湿度外, 与观测相关性都非常高 (表 2), 但年际变化的标准差比观测小 (表 3)。

5 土壤湿度变化和降水、气温的关系

受观测资料的限制, 土壤湿度与降水、温度的关系一直不清楚, 本节分析 228 个月 (GSWP2 为 120 个月) 区域平均 10 cm 和 1 m 土壤湿度距平序列与降水、气温的时滞相关, 揭示其相互关系。由于观测资料稀少, 尤其在北方, 使得结果存在一定的不确定性, 此处, 结合再分析资料和模式资料的结果分析土壤湿度与降水、温度的关系。由于 GSWP2 和 CLM 资料的驱动场尽量利用了观测资料, 这里用中国台站降水和气温代替原驱动场与土壤湿度做相关分析; 再分析资料分别用各自的降水

和气温与土壤湿度做相关分析。此外, 由于东北区域冬季观测少, 对部分缺测点进行了线性插值。

5.1 东北

由图 11a 可见, 观测中, 东北 10 cm 土壤湿度和降水同期正相关最大, 1 m 土壤湿度在降水超前 1 个月正相关最大, 反映了 1 m 土壤湿度对降水异常响应的滞后性; 10 cm 土壤湿度在降水超前 1 个月到同期都超过了 95% 的信度检验, 1 m 土壤湿度在降水超前 1 个月也通过了 95% 的显著检验, 说明前期降水会增加土壤湿度; 但 10 cm、1 m 土壤湿度的异常对后期降水的影响都不明显。两套再分析资料降水与土壤湿度的关系与观测基本类似, 但土壤湿度对前期降水的记忆强于观测: ERA40 在降水超前 7 个月内都呈显著正相关, 1 m 土壤湿度类似; NCEP 10 cm 和 1 m 土壤湿度在降水超前 5 个月内都显著相关 (图 11c、e)。两套陆面模式资料反映出前期降水对土壤湿度的作用, 在降水超前 1 个月到 4~6 月呈显著正相关, 但同期相关差 (图 11g、i)。

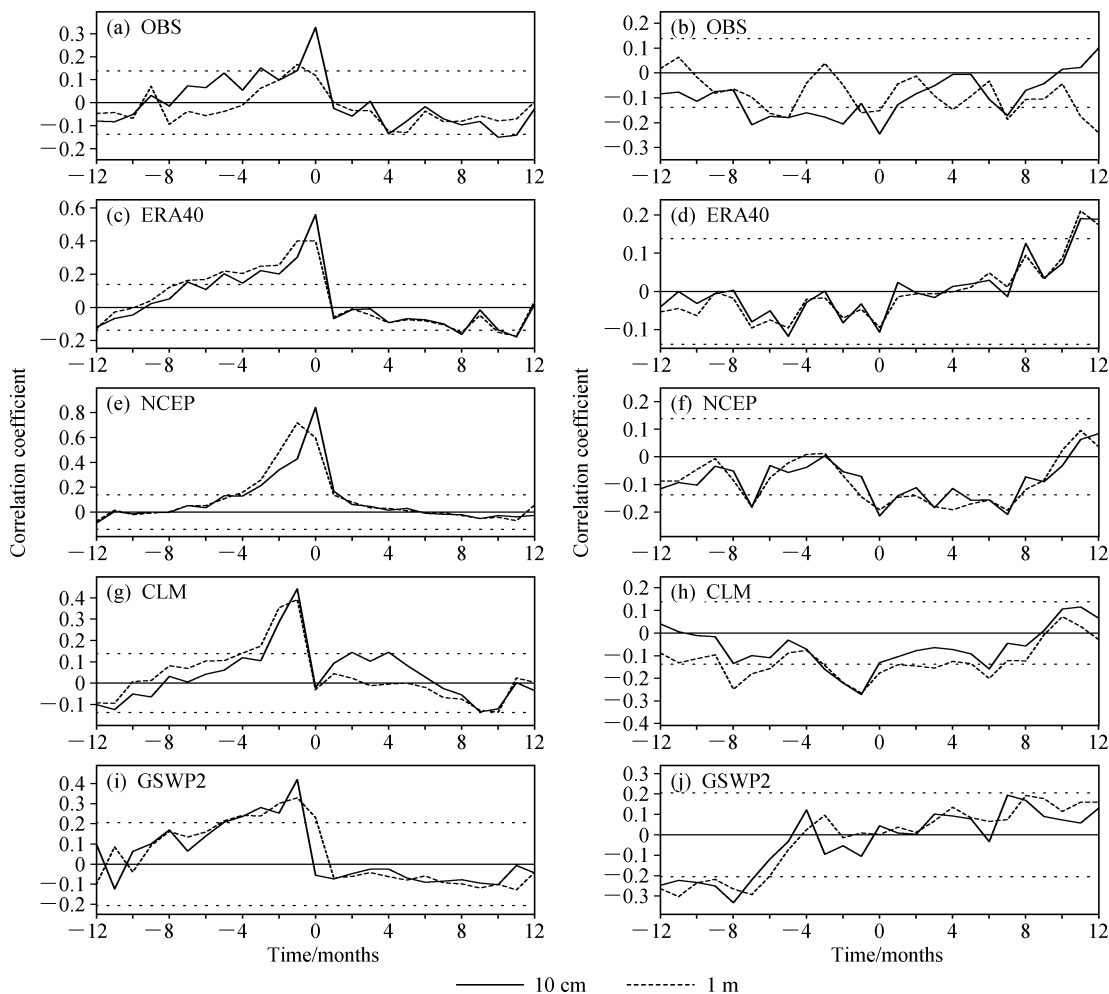


图 11 东北区域平均 ($43^{\circ}\text{N}\sim 48^{\circ}\text{N}$, $123.5^{\circ}\text{E}\sim 132.5^{\circ}\text{E}$) 土壤湿度与降水 (a、c、e、g、i)、地表气温 (b、d、f、h、j) 的时滞相关系数。横坐标轴：负值表示土壤湿度滞后，正值表示土壤湿度超前；两条横线为时滞相关系数超过 95% 显著检验的临界值

Fig. 11 The leading-lag correlation coefficients between soil moisture and precipitation (a, c, e, g, i), soil moisture and surface air temperature (b, d, f, h, j) over northeastern China ($43^{\circ}\text{N}\sim 48^{\circ}\text{N}$, $123.5^{\circ}\text{E}\sim 132.5^{\circ}\text{E}$). x axis: Negative (positive) indicates that precipitation/air temperature leads (lags) soil moisture; two dotted lines paralleling x axis indicate correlation coefficients at 95% significance level

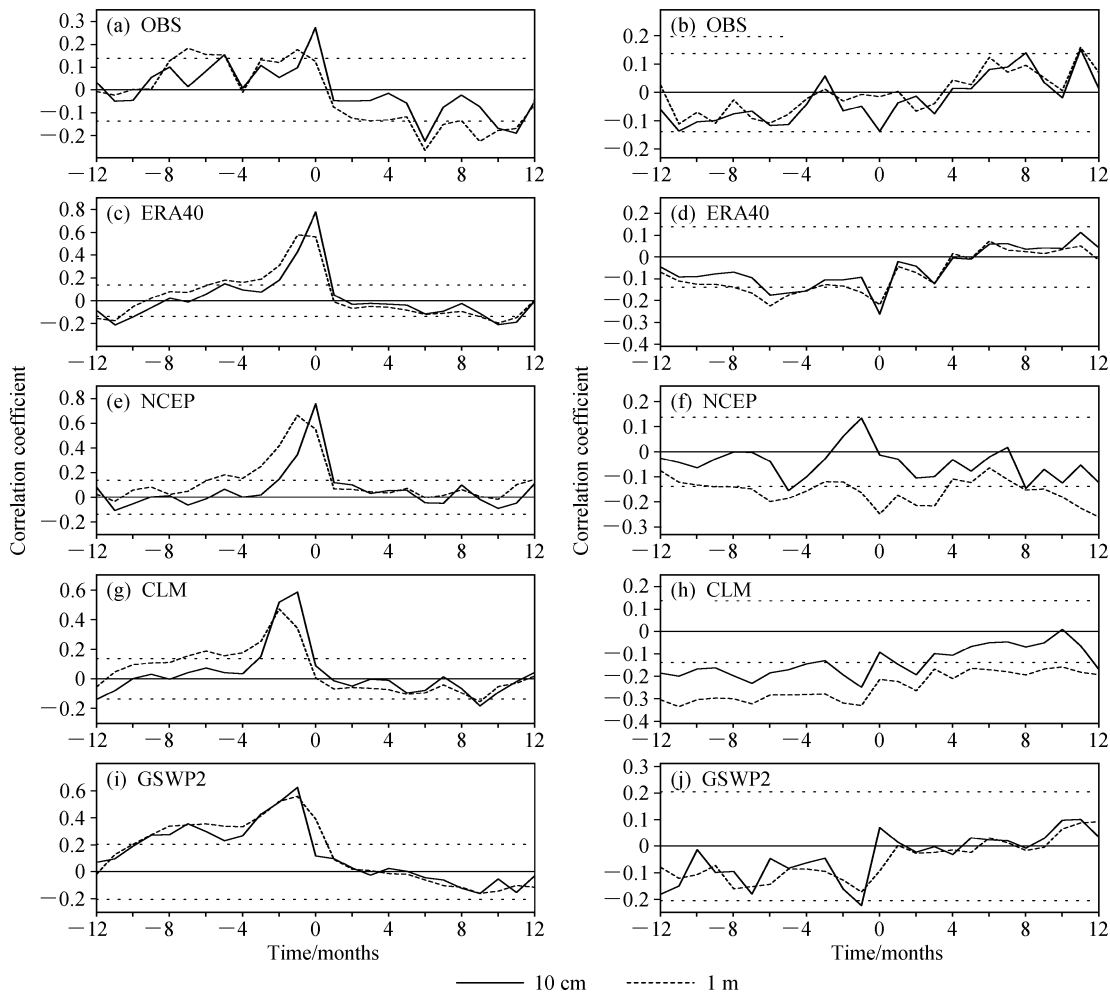
由图 11b 可知，观测 10 cm 土壤湿度与气温同期相关最好，在气温超前 7 个月和滞后 1 个月内，都呈显著负相关；而 1 m 土壤湿度较复杂，在气温滞后 12 个月相关最高，且在超前 6 个月到 5 个月、超前 1 个月到同期、滞后 7 个月、滞后 10 个月到 12 个月都呈显著负相关。四套资料与观测差别都较大，ERA40 土壤湿度与气温负相关不显著，GSWP2 相关显著区气温过分超前（图 11d、f、h、j）。

5.2 中部

观测中，中部 10 cm 土壤湿度与降水同期相关最高，1 m 土壤湿度在降水超前 3 个月到 1 个月、8 个月到 6 个月都超过了 95% 的显著检验，但 10 cm

和 1 m 土壤湿度在降水滞后 6 个月都呈明显的负相关，且 1 m 相关显著时间一直延续到 11 个月，具体原因尚待研究（图 12a）。再分析资料和陆面模式资料基本都反映出前期降水对土壤湿度的影响（图 12c、e、g、i）。

由图 12b 可见，观测中，10 cm、1 m 土壤湿度与气温的时滞相关都没有通过显著检验，说明气温对中部土壤湿度的影响不明显。除了 GSWP2 资料外，ERA40、NCEP 和 CLM 都表现出土壤湿度与气温存在很强的相关，尤其是 NCEP 和 CLM 的 1 m 土壤湿度（图 12d、f、h、j），可见它们在刻画气温与土壤湿度的关系方面存在缺陷。

图 12 同图 11, 但为中部区域 ($34^{\circ}\text{N}\sim 39^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E}\sim 108^{\circ}\text{E}$)Fig. 12 Same as Fig. 11, but for central China ($34^{\circ}\text{N}\sim 39^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\text{E}\sim 108^{\circ}\text{E}$)

5.3 东部

在东部区域, 观测土壤湿度 (10 cm、1 m) 与降水同期相关最高, 在降水超前 2 个月内, 都超过 95% 的信度检验 (图 13a)。ERA40 与观测一致, NCEP 在降水超前 5 个月到滞后 2 个月都通过信度检验, 与土壤湿度的相关偏强; CLM 和 GSWP2 显著相关时间比观测超前 1~2 个月 (图 13c、e、g、i)。

东部 10 cm 观测土壤湿度与气温同期负相关最高, 在气温滞后 7~8 个月存在显著正相关, 1 m 观测土壤湿度在气温超前 5 个月到同期都通过了显著检验 (图 13b)。四套资料与观测差别较大: ERA40 仅在同期相关通过检验; NCEP 气温与土壤湿度相关基本不明显; GSWP2 1 m 土壤湿度在气温超前 3 个月到同期相关显著, 10 cm 土壤湿度在气温超前 1~2 个月显著; CLM 土壤湿度与气温超前相关偏

强 (图 13d、f、h、j)。

6 总结与讨论

运用观测的中国区域 19 年 (1981~1999 年) 土壤湿度资料和 13 年 (1992~2004 年) 的土壤相对湿度资料, 揭示土壤湿度的季节循环特点、年际变率特征, 及其与降水、气温变化的关系, 检验了 ERA40 和 NCEP 再分析资料、GSWP2 和 CLM 陆面模式土壤湿度资料在中国区域的可靠性。结果表明:

(1) 就气候平均态而言, 四套资料基本都揭示出土壤湿度的空间分布, 但冬季 NCEP 资料在西北区域不是干中心, 与其他资料差别较大, GSWP2 揭示了四套资料最多的共性: 东北、华南湿, 华北、西北干, 土壤湿度基本由西北向东北和东南呈梯度

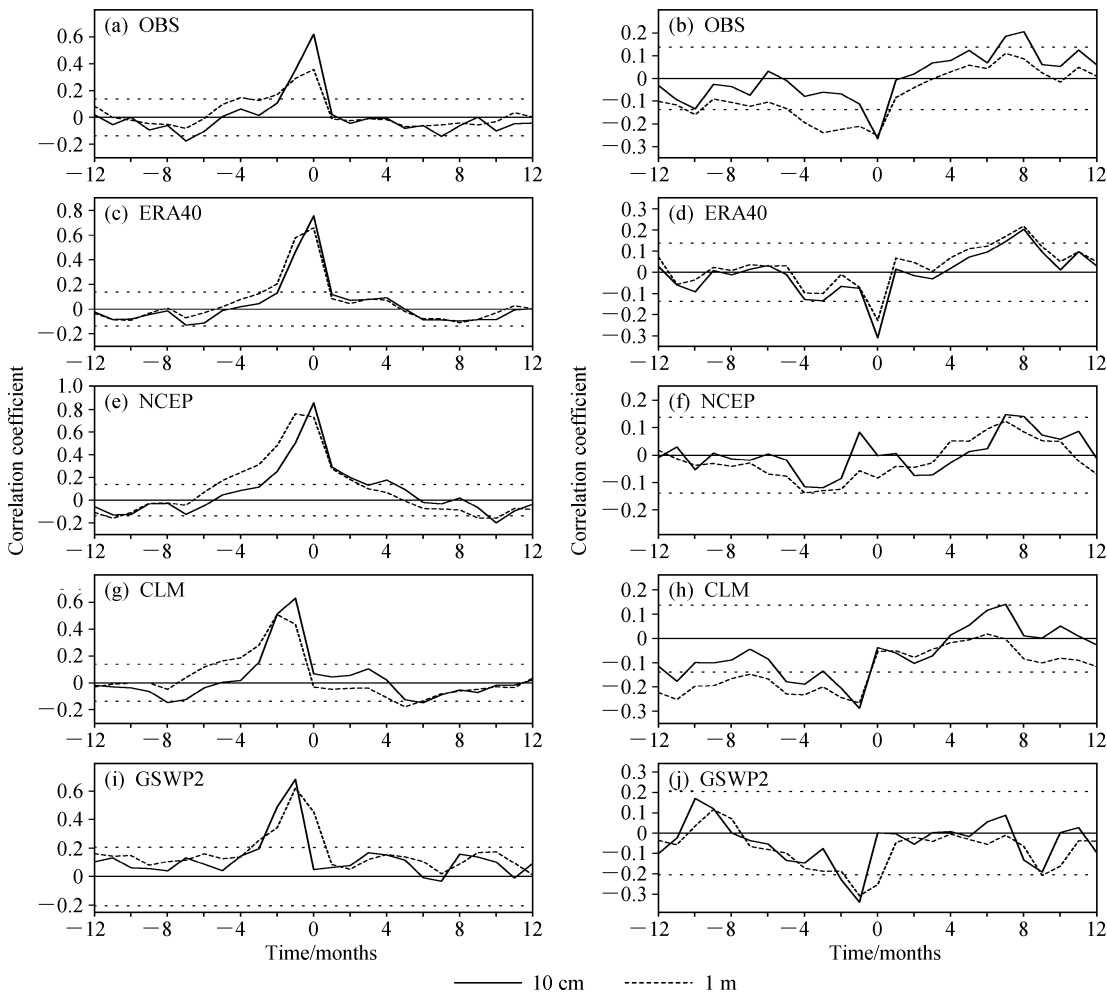


图 13 同图 11，但为东部区域 (33°N~35.5°N, 112°E~117.5°E)

Fig. 13 Same as Fig. 11, but for eastern China (33°N~35.5°N, 112°E~117.5°E)

增加。

(2) 就季节循环而言，观测中不论东北、中部还是东部，土壤湿度春末夏初干，秋冬季湿。四套资料在东北都描述出土壤的干期，但都超前，而 8 月后土壤湿度变化除 GSWP2 资料外，与观测差别较大；在中部，四套资料除 NCEP 资料外基本都描述出土壤湿度的季节循环；在东部，四套资料土壤湿度的季节循环与观测差别都较大。相比较而言，GSWP2 资料较好地模拟了土壤湿度的季节循环。

(3) 就年际变化而言，四套资料中 ERA40 资料土壤湿度的年际变化与观测土壤湿度的相关性最好；CLM、NCEP 描述的年际变化在中部较差，但总体而言，较好地再现了土壤湿度的年际变化；GSWP2 的年际变化较差。四套资料中土壤湿度年际变化的振幅都远小于观测资料。

(4) 在月平均时间尺度上，观测中前期降水会增加土壤湿度，但土壤湿度的异常对后期降水的影响并不显著；气温与土壤湿度的关系较复杂，不同区域有不同特征。四套资料中降水和土壤湿度的关系与观测基本一致，尤其是两套再分析资料，而 CLM 和 GSWP2 表现出土壤湿度对前期降水的记忆偏强；四套资料中气温和土壤湿度的关系与观测差别较大。

本文以中国区域实际观测资料为依据，证实了 GSWP2 土壤湿度气候分布和季节循环、ERA40 土壤湿度年际变化在中国区域的有效性。在实际大气资料的强迫下，陆面模式 CLM 尽管能够在一定程度上再现土壤湿度的年际变化，但依然亟待改进。基于上述评估结果，作为对观测资料的补充，GSWP2 土壤湿度可作为气候态研究的代用观测资

料, 而 ERA40 土壤湿度可作为年际变化研究的代用观测资料。

最后, 土壤湿度模拟问题是气候模式研究的一个重要方面。有证据表明, 土壤湿度的水平非均匀性可导致局地环流的形成^[39~41], 甚至对强天气系统的形成产生影响^[42]。目前“海洋-大气-陆面”耦合的气候系统模式发展迅速, 仅报名参加 IPCC AR4 评估的耦合模式就已经达到 20 多个^[43], 这些模式对陆面过程的处理较之以前的气候模式^[44]要复杂得多, 但它们对中国区域土壤湿度的气候分布、季节循环与年际变率的模拟能力到底如何, 目前还不是很清楚。以本文的观测事实分析结果为依据, 本文第 II 部分将对国际上 14 个耦合模式的模拟效果进行细致的分析与比较。

致谢 本文所用的观测资料强迫下的 CLM 模式输出的土壤湿度资料, 系由美国国家大气研究中心的戴爱国博士、钱海涛博士提供, 特此致谢。

参考文献 (References)

- [1] 马柱国, 符淙斌, 谢力, 等. 土壤湿度和气候变化关系研究中的某些问题. 地球科学进展, 2001, **16** (4): 563~568
Ma Zhuguo, Fu Congbin, Xie Li, et al. Some problems in the study on the relationship between soil moisture and climatic change. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 2001, **16** (4): 563~568
- [2] U. S. National Research Council. *GOALS (Global Ocean - Atmosphere - Land System) for Predicting Seasonal-to-International Climate*. Washington D C: National Academy Press, 1994. 103pp
- [3] Shukla J, Mintz Y. Influence of land-surface evapotranspiration on the Earth's climate. *Science*, 1982, **215**: 1498~1501
- [4] Dirmeyer P A. Using a global soil wetness data set to improve seasonal climate simulation. *J. Climate*, 2000, **13**: 2900~2922
- [5] Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Zhichang, et al. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science*, 2004, **305**: 138~1140
- [6] 马柱国, 魏和林, 符淙斌. 中国东部区域土壤湿度的变化及其与气候变率的关系. 气象学报, 2000, **58** (3): 278~287
Ma Zhuguo, Wei Helin, Fu Congbin. Relationship between regional soil moisture variation and climatic variability over east China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2000, **58** (3): 278~287
- [7] Entin J K, Robock A, Konstantin Y V, et al. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variation in the extratropics. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 865~877
- [8] Wu Wanru, Geller M A, Dickinson R E. The response of soil moisture to long-term variability of precipitation. *J. Hydro-meteor.*, 2002, **3**: 604~613
- [9] Hollinger S E, Isard S A. A soil moisture climatology of Illinois. *J. Climate*, 1994, **7**: 822~833
- [10] 张秀芝, 吴迅英, 何金海. 中国土壤湿度的垂直变化特征. 气象学报, 2004, **62** (1): 51~60
Zhang Xiuzhi, Wu Xunying, He Jinhai. Vertical character of soil moisture in China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (1): 51~60
- [11] Robock A, Vinnikov K Y, Srinivasan G, et al. The global soil moisture data bank. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2000, **81**: 1281~1299
- [12] Walker J, Rowntree P R. The effect of soil moisture on circulation and rainfall in a tropical model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1977, **103**: 29~46
- [13] Yeh T C, Wetherald R I, Manabe S. The effect of soil moisture on the shortterm climate and hydrology change: A numerical experiment. *Mon. Wea. Rev.*, 1984, **112**: 474~490
- [14] Rind D. The influence of ground moisture conditions in North America on summer climate as modeled in the GISS GCM. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**: 1487~1494
- [15] 季劲均, 胡玉春. 陆面过程模式的敏感性试验. 大气科学, 1989, **13** (3): 265~272
Ji Jinjun, Hu Yuchun. The sensitivity of the land surface model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1989, **13** (3): 265~272
- [16] 王万秋. 土壤温湿异常对短期气候影响的数值模拟试验. 大气科学, 1991, **15** (5): 115~123
Wang Wanqiu. Numerical experiments of the soil temperature and moisture anomalies' effects on the short term climate. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1991, **15** (5): 115~123
- [17] 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. 气象与环境研究, 2001, **6** (2): 240~248
Lin Zhaohui, Yang Xiaosong, Guo Yufu. Sensitivity of land surface model to the initial condition of soil moisture. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6** (2): 240~248
- [18] Dirmeyer P A, Gao Xiang. The Second Global Soil Wetness Project GSPW-2. IGPO Publication, 2002
- [19] Simmons A J, Gibson J K. The ERA-40 Project Plan, ERA-40 Project Report Series No. 1, ECMWF, Shinfield Park, Reading, UK, 2000. 63pp
- [20] Kalnay E, Kanamistu M, Kister R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**: 437~472
- [21] Kistler R, Kalnay E, Collins W, et al. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documenta-

- tion. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2000, **82** (2): 247~268
- [22] 包庆, 刘屹岷, 周天军, 等. LASG/IAP 大气环流谱模式对陆面过程的敏感性研究. *大气科学*, 2006, **30** (6): 1077~1090
- Bao Qing, Liu Yi-Min, Zhou Tian-Jun, et al. The sensitivity of the spectral atmospheric general circulation model of LASG/IAP to the land process. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (6): 1077~1090
- [23] Qian T, Dai A, Trenberth K E, et al. Simulation of global land surface conditions from 1948 to 2002. Part I: Forcing data and evaluation. *J. Hydrometeor.*, 2006, **7**: 953~975
- [24] Liu Suxia, Mo Xingguo, Li Haibin, et al. Spatial variation of soil moisture in China: Geostatistical characterization. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2001, **79**: 555~574
- [25] Etin J, Alan R, Vinnikov K Y, et al. Evaluation of Global Soil Wetness Project soil moisture simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1999, **77**: 183~198
- [26] Dan Li, Ji Jinjun, Zhang Peiqun. The soil moisture of China in a high resolution climate-vegetation model. *Adv. Atmos. Sci.*, 2005, **22** (5): 720~729
- [27] Li Haibin, Robock A, Liu Suxia, et al. Evaluation of reanalysis soil moisture simulations using updated Chinese soil moisture observations. *J. Hydrometeor.*, 2004, **6**: 180~193
- [28] Van den Hurk B J J M, Viterbo P, Beljaars A C M, et al. Offline validation of the ERA40 surface scheme. ECMWF Tech Memo 295, 2000. 42pp
- [29] Douville H, Viterbo P, Mahfouf J F, et al. Evaluation of the optimal interpolation and nudging techniques for soil moisture analysis using FIFE data. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, **128**: 1733~1756
- [30] Mahfouf J F, Viterbo P, Douville H, et al. A revised land-surface analysis scheme in the integrated forecasting system. *ECMWF Newsletter*, 2000, **88**: 8~13
- [31] Pan H L, Mahrt L. Interaction between soil hydrology and boundary-layer development. *Bound.-Layer Meteor.*, 1987, **38**: 185~202
- [32] Mintz Y, Serafini Y V. A global monthly climatology of soil moisture and water balance. *Climate Dyn.*, 1992, **8**: 13~27
- [33] Choudhury B J. Reflectivities of selected land surface types at 19 and 37 GHz from SSM/I observations. *Remote Sens. Environ.*, 1993, **46**: 1~17
- [34] Dirmeyer P A, Gao Xiang, Zhao Mei, et al. Supplement to GSWP2: Details of the forcing data. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2006, **87** (10): s10~s16
- [35] Dirmeyer P A, Dolman A J, Nobuo Sato. The pilot phase of the Global Soil Wetness Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1999, **80** (5): 851~878
- [36] Dirmeyer P A, Gao Xiang, Zhao Mei, et al. The Second Global Soil Wetness Project (GSWP-2): Multi-model analysis and implications for our perception of the land surface. COLA Technical Report 185, 2005
- [37] 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分析. *应用气象学报*, 2005, **16** (2): 129~138
- Sun Chenghu, Li Weijing, Zhang Zuqiang, et al. Distribution and variation features of soil humidity anomaly in Huaihe River and its relationship with climatic anomaly. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2005, **16** (2): 129~138
- [38] Namias J. Surface - atmosphere interactions as fundamental causes of droughts and other climatic fluctuations. *Arid Zone Research*, Vol 20. Changes of Climate Proc. of Rome Symp., UNESCO. 75700 Paris, France, 1963. 345~359
- [39] Ookouchi Y, Segal M, Kessler R C, et al. Evaluation of soil moisture effects on the generation and modification of mesoscale circulation. *Mon. Wea. Rev.*, 1984, **112**: 2281~2292
- [40] Mahfouf J F, Richard E, Mascart P. The influence of soil and vegetation on the development of mesoscale circulation. *J. Climate Appl. Meteor.*, 1987, **26**: 1483~1493
- [41] Avissar R, Chen F. The impact of land-surface wetness heterogeneity on mesoscale heat fluxes. *J. Appl. Meteor.*, 1994, **33**: 1382~1401
- [42] Chang J T, Wetzel P J. Effect of special variation of soil moisture and vegetation on the evolution of a pre-storm environment: A numerical case study. *Mon. Wea. Rev.*, 1991, **119**: 1386~1390
- [43] Zhou Tianjun, Yu Rucong. 20th century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models. *J. Climate*, 2006, **19**: 5843~5858
- [44] Zhou Tianjun, Li Zhaoxin. Simulation of the East Asian summer monsoon by using a variable resolution atmospheric GCM. *Climate Dyn.*, 2002, **19**: 167~180