0577-6619/2012/70(2)-0236-43 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

# 6月长江中下游降水和春季东亚季风区土壤湿度的关系*

詹艳玲 林朝晖
ZHAN Yanling LIN Zhaohui

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
*International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Academy of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*
2009-05-25 收稿,2011-07-20 改回.

**Zhan Yanling, Lin Zhaohui. 2012. 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 Meteorologica Sinica*, 70(2):236-243**

**Abstract** Using the US Climate Prediction Center (CPC) soil moisture dataset and the observed precipitation over China together with the NCEP/NCAR reanalysis wind and air temperature, the relationship between June precipitation over mid-lower reaches of the Yangtze River basin (MLR-YRB) and spring soil moisture over the East Asian monsoon region was explored, with the signal of the ENSO effect on precipitation removed. A significant positive correlation was found between the mean June precipitation and the preceding soil moisture over the MLR-YRB. The possible response mechanism for this relationship was also investigated. It is found that when the soil over the MLR-YRB is wetter (drier) than normal in April and May, the air temperature in the lower troposphere over this region in May is lower (higher) than normal, and this temperature effect leads to a decrease (increase) in the temperature contrast between the land and the sea. Generally, a decrease (increase) in the land-sea temperature contrast leads to weaker (stronger) East Asian summer monsoon in June. Southerly (northerly) wind anomalies at 850 hPa then show up in the south of the Yangtze River basin while northerly (southerly) wind anomalies dominate in the north. These anomalies lead to the convergence (divergence) of wind and water vapor and hence gives rise to more (less) precipitation in June over the MLR-YRB.
**Key words** Spring soil moisture, Land-sea temperature contrast, Summer rainfall anomaly over the Yangtze River basin, East Asian summer monsoon

**摘 要** 利用美国气候预测中心(CPC)土壤湿度资料、中国台站观测降水资料以及NCEP/NCAR再分析的风场和气温资料,在去除了降水资料中的ENSO信号的影响后,分析了6月长江中下游降水和春季东亚季风区土壤湿度的关系。结果表明,长江中下游6月降水和前期春季土壤湿度存在很显著的正相关关系。进一步分析表明,当中晚春(4—5月)长江中下游地区的土壤湿度偏高(低)时,晚春(5月)长江中下游上空低层气温偏低(高),从而导致东亚季风区的海陆温差减小(增加)。海陆温差的减弱(增强)使得6月东亚夏季风较常年偏弱(强),伴随的风场异常主要体现在长江以南地区为南风(北风)异常所控制,而长江以北则为北风(南风)异常,从而使得长江中下游存在着异常辐合(散),最终导致长江中下游降水量较常年偏多(少)。
**关键词** 春季土壤湿度,海陆温差,长江流域夏季降水异常,东亚夏季风
**中图法分类号** P461

* 资助课题:国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421406)、财政部与科技部公益性行业专项项目(GYHY200906016)、国家科技支撑项目(2007BAC29B03)和国家自然科学基金委创新研究群体项目(40821092)。
作者简介:詹艳玲,主要从事陆气相互作用和短期气候预测研究。E-mail:zyl@mail.iap.ac.cn

## 1 引 言

海温是影响气候变化的重要因子,但其影响主要集中在热带地区,对中高纬度陆地区域气候异常的影响并不显著(Dirmeyer, et al, 2003; 王会军等, 1997)。Kinter 等(2002)的研究表明,对于亚洲季风区,亚洲季风与 ENSO 的关系存在着显著的年代际转折,约在 1976 年从高相关期转入低相关期。若仅考虑海温异常的影响,显然难以完全准确地预测出中高纬度地区的气候异常。作为气候系统的重要分量,陆面过程及其与大气的相互作用对区域乃至全球气候异常同样有着十分重要的影响,Koster 等(1995, 2000)通过数值试验指出,在北半球中高纬度和热带陆地,陆地下垫面对降水的作用甚至超过了海温的作用。作为陆地下垫面的一个重要物理量,土壤湿度具有较长的记忆能力。已有研究表明,中纬度陆地地区的土壤湿度具有 1—2.5 个月的记忆能力(Vinnikov, et al, 1996; Entin, et al, 2000),这表明土壤湿度可能对后期气候异常产生影响。

利用淮河流域的外场观测资料,林朝晖等(2001)探讨了陆面过程模式对土壤湿度初值的敏感性。结果表明,当淮河流域初始土壤湿度减小时,陆面过程模式模拟的地表净辐射和潜热通量减少,而感热通量增加,且这种敏感性在晚春(5 月)和夏季(8 月)较强。另外,Findell 等(1997,1999)利用美国伊利诺伊州的 14 a 观测土壤湿度资料,分析了土壤湿度和滞后 21 d 的降水量的相关,结果表明,该区域春末夏初的土壤湿度对夏季降水有很大影响。

马柱国等(2000)利用中国 100°E 以东地区的 98 站 1981—1991 年土壤湿度资料,分析了中国北方、中部和南方的土壤湿度与后期降水的关系,指出土壤湿度异常对滞后半年左右的降水量有显著影响。利用 1981—2002 年表层(0—10 cm)的土壤湿度资料,乐益龙等(2007)研究指出,春季河套及西南地区的土壤湿度异常偏高时,夏季长江流域的降水量偏少,而华北和河套地区的降水量偏多;张文君等(2008)的研究则指出,中国河套西部地区土壤湿度和该区滞后半年的降水量为显著负相关,但东北和黄淮两个区域的土壤湿度异常对各自区域的后期降水量的影响不显著。孙丞虎等(2005)利用 1990—2000 年台站土壤湿度资料,分析了淮河流域土壤湿度和降水的关系。结果表明,该区域前期土壤湿度与滞后的降水量存在显著负相关。左志燕等(2007)利用 EAR-40 的 0—10 cm 土壤湿度资料,发现春季华北到长江中下游地区的土壤湿度异常偏高时,夏季长江中下游地区降水异常偏多,而华北和华南地区降水偏少。

虽然已有上述一些研究探讨了中国不同区域前期土壤湿度异常对后期降水异常的影响,但不同研究的结论不尽相同,而且,在资料诊断分析时,并未将 ENSO 信号与土壤湿度异常对后期降水的可能影响分离开;此外,有关东亚地区前期土壤湿度异常对后期夏季风及其降水异常影响的过程及物理机制研究也尚待深入。在本研究中,将选取旱涝灾害频发的长江中下游地区,利用长时间序列的土壤湿度资料,系统性地考察该区域 6 月降水与东亚季风区春季土壤湿度的关系,并进一步探讨春季东亚季风区土壤湿度对长江中下游 6 月降水的影响过程及可能作用机制。值得指出的是,本研究在探讨前期土壤湿度异常对后期降水异常的影响时,已将前期 ENSO 信号(海温异常)的可能影响予以分离。

## 2 资料和方法

采用的土壤湿度资料来源于美国气候预测中心(CPC),它是利用全球观测降水和气温驱动陆面过程模型而得到(Fan, et al, 2004),其空间分辨率为 0.5°×0.5°,在垂直方向为一层(0—160 cm)。已有研究表明,在美国伊利诺伊地区,该资料可以很好地再现出观测的季节和年际变化过程(Van den Dool, et al, 2003)。通过与中国台站观测土壤湿度资料的比较,詹艳玲等(2011)研究指出,在中国区域 CPC 土壤湿度可以很好地再现观测土壤湿度的空间分布及年际变化特征。鉴于 CPC 土壤湿度具有较长的时间序列,文中将选用 CPC 土壤湿度来替代观测土壤湿度,用以分析春季土壤湿度与长江中下游 6 月降水的关系。此外,采用的观测降水为中国国家气候中心提供的 160 站地面降水资料,风场和气温资料则采用 NCEP/NCAR 再分析资料(Kalnay, et al, 1996)。本研究使用的资料时段均为 1951—2006 年。

由于 ENSO 循环对长江中下游夏季降水具有显著的影响(Wang, 2002; 宗海峰等, 2010),为了

在资料诊断分析中有效分离前期土壤湿度异常和ENSO循环对长江中下游6月降水异常的影响,采用了An(2003)所提出的处理方法,在降水资料中去除了ENSO循环的影响。具体去除ENSO信号影响的做法为:首先计算长江中下游6月降水和前冬全球海温的相关,可以发现显著正相关区域位于Nino3区;随后计算Nino3区的冬季海温异常,用式(1)对观测降水资料进行预处理,经过预处理后得到的降水资料,则可认为是去除了前冬Nino3区海温异常的影响,即

$$\xi = \xi^* - Z \times \mathrm{cov}(\xi^*, Z)/\mathrm{var}(Z) \qquad (1)$$

式中,$\xi^*$为去除海温信号前的6月降水量,$\xi$为去除海温信号后的6月降水量,$Z$为1951—2006年Nino3区冬季海温,cov为去除海温信号前的6月降水量和Nino3区冬季海温的协方差,var为Nino3区冬季海温的方差。在随后的相关分析中,所采用的降水资料均是经过预处理之后的降水资料。

## 3 长江中下游6月降水与春季东亚季风区土壤湿度的关系

选取南京、合肥、上海、杭州、安庆、屯溪、九江、汉口、钟祥、岳阳、宜昌、常德、宁波、衢县、贵溪、南昌和长沙共17个站点,用以代表长江中下游地区,已有研究表明,在梅雨期这些站点的平均降水特征基本反映了长江中下游地区的降水特征(钱永甫等,2007)。从6月长江中下游降水量与4、5月东亚季风区土壤湿度的相关分布(图1)可以发现,长江中下游6月降水量与该区域4、5月的土壤湿度均存在较好的正相关(通过90%的显著性水平检验),且6月降水量与5月土壤湿度的正相关更为显著。这表明,当长江中下游地区4—5月土壤湿度偏高时,该区域6月的降水量可能偏大;反之,若4—5月长江中下游地区的土壤湿度偏低,则该区域6月降水量偏小的可能性很大。

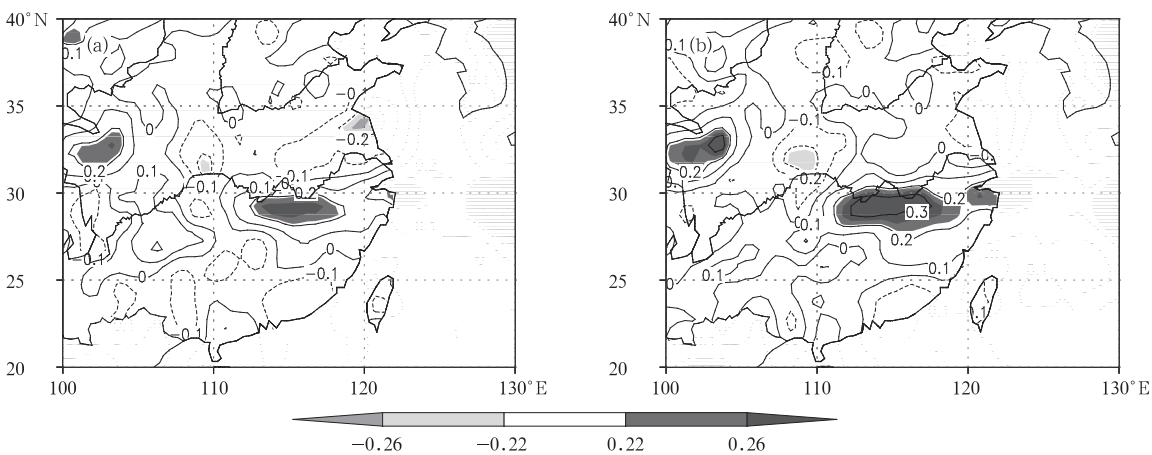



图1 1951—2006年6月长江中下游降水量与4月(a)和5月(b)东亚季风区土壤湿度的相关分布

(阴影为相关系数通过90%的显著性水平检验的区域;深色表示通过95%的显著性水平检验的区域)

Fig. 1 Correlation between June precipitation over the MLR-YRB and soil moisture in (a) April and (b) May

(Shadings indicate areas exceeding the 90% confidence level; darker shadings indicate areas exceeding the 95% confidence level)

从图1b中选取区域(27°—32°N,110°—125°E)内正相关通过90%显著性水平检验的长江中下游地区,计算该区域平均的4、5月的土壤湿度。分析长江中下游地区1951—2006年4、5月的土壤湿度的标准化时间序列和6月降水量的标准化时间序列(其中气候平均取1951—2006年平均)(图2)则可以发现,4和5月长江中下游地区土壤湿度的年际变化基本一致,两者的相关系数高达0.80,且与长江中下游6月降水量的年际变化也较为一致。其中,长江中下游6月降水量与该区域4月土壤湿度的相关系数为0.27,通过了95%的显著性水平检验,而5月该区域土壤湿度与长江中下游6月降水量的相关系数则可达0.35,通过了99%的显著性水平检验。

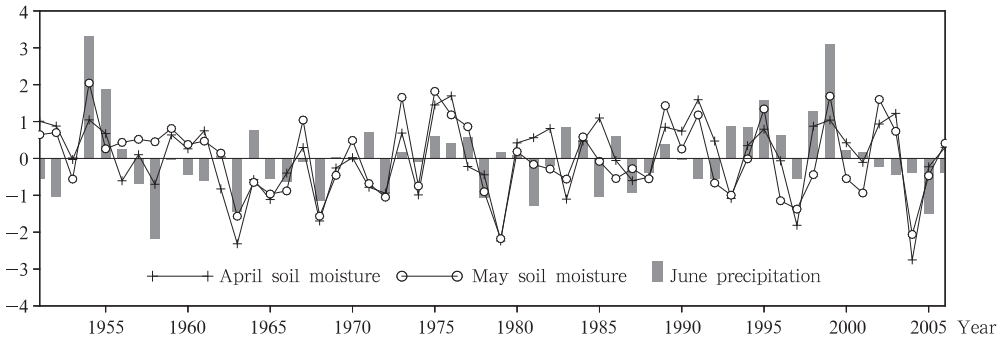



图2 长江中下游地区6月降水量和4、5月土壤湿度的标准化时间序列

Fig. 2 Time series of normalized June precipitation and soil moisture in April and May over the MLR-YRB

从4月长江中下游地区土壤湿度与中国东部6月降水量的相关分布(图3a)可见,整个江淮流域均为前期土壤湿度与6月降水量的正相关区,而且,在长江中下游的部分地区还存在较为显著的正相关区(通过90%的显著性水平检验)。5月长江中下游地区土壤湿度与6月降水量的相关分布(图3b)与4月的结果很相似,同样在整个江淮流域均表现为正相关,但显著相关区域的范围明显增大,在相当大的区域两者的相关系数大于0.26,超过了95%的信度检验。这也进一步证实了长江中下游地区前期(4、5月)土壤湿度异常对该区域6月降水量异常的显著影响。

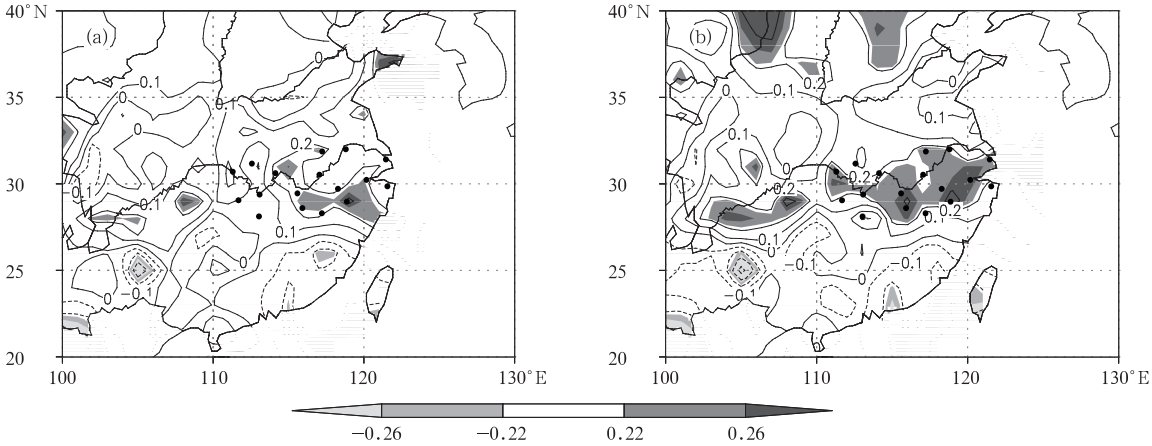



图3 1951—2006年4月(a)和5月(b)长江中下游土壤湿度与6月东亚季风区降水量的相关分布

(阴影表示相关系数通过90%的显著性水平检验。黑色圆点表示长江中下游降水观测站点)

Fig. 3 Correlation between soil moisture in (a) April and (b) May over the MLR-YRB and June precipitation over the East Asian monsoon region

(Shadings indicate areas exceeding the 90% confidence level. The black dots denote the precipitation observation stations in the MLR-YRB)

## 4 春季土壤湿度异常影响6月长江中下游降水的可能机制

根据图2中的长江中下游5月土壤湿度的标准化时间序列和该区域6月降水量的标准化时间序列,定义土壤湿度的标准化值≥0.5且降水量偏多年为土壤湿度偏高年(1954、1973、1975、1976、1977、1984、1989、1995和1999年共9 a);选取土壤湿度的标准化值≤−0.5且降水量偏少年为土壤湿度偏低年(1963、1965、1966、1968、1972、1978、1992、1997和2004年共9 a)。

依据上述对土壤湿度高、低年的划分标准,分析

分别由异常偏高、偏低年合成的土壤湿度距平分布(图 4)可发现,对应于春季(4—5 月)长江中下游土壤湿度偏高(低)年,4、5 月长江中下游至东南沿海的土壤湿度异常偏高(低),异常显著区域主要位于长江中下游地区,且 5 月土壤湿度异常的幅度要大于 4 月。

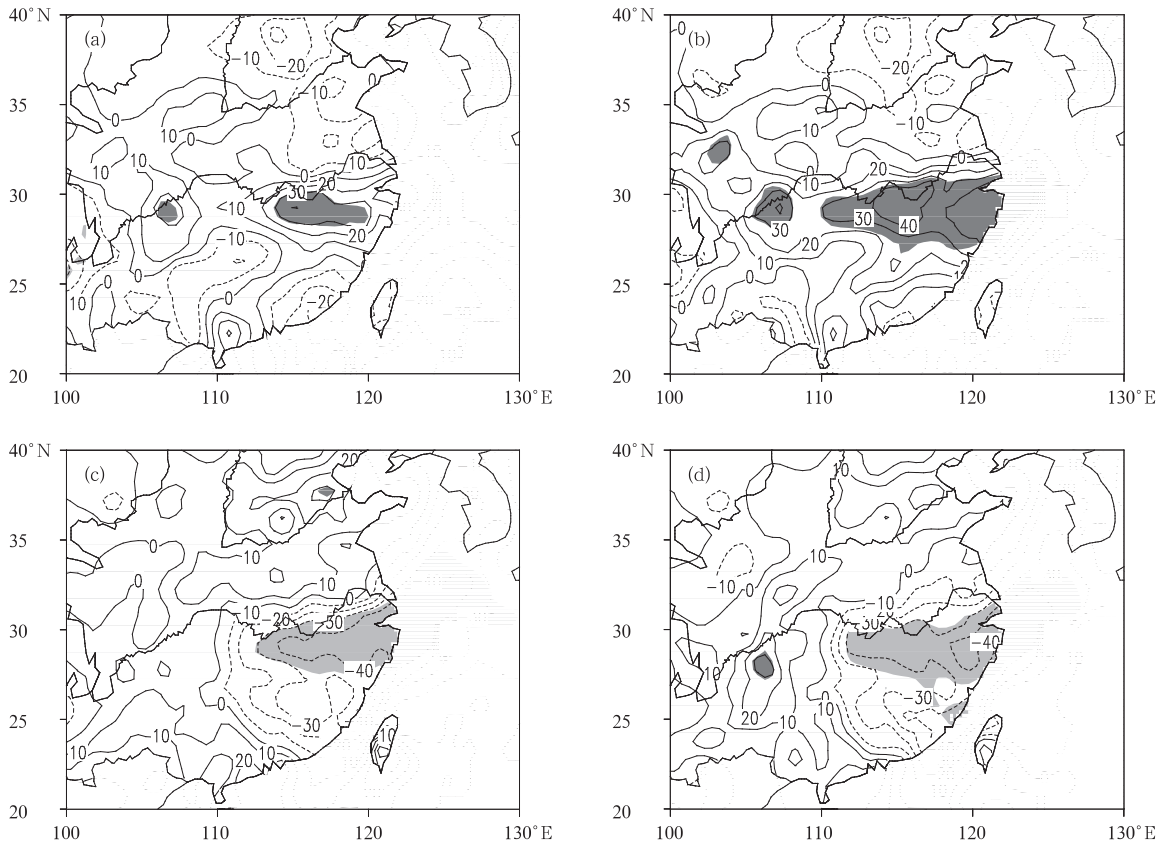



图 4 长江中下游土壤湿度高、低年份合成的土壤湿度距平分布

(a. 偏高年 4 月, b. 偏高年 5 月, c. 偏低年 4 月, d. 偏低年 5 月;

阴影表示湿度异常通过 95%的显著性水平检验区域)

Fig. 4 Composite soil moisture anomalies in (a) April of the wet soil moisture years, (b) May of the wet soil moisture years, (c) April of the dry soil moisture years, and (d) May of the dry soil moisture years

(Areas with anomalies significant at the confidence level higher than 95% are shaded)

土壤湿度的变化必然通过地表与低层大气间的热量和水汽交换,引起地表及其上空低层大气温度的变化。从土壤湿度高、低年合成的 5 月地表气温,以及 925 和 850 hPa 气温的距平分布(图 5)可以看出,对应于春季(4—5 月)长江中下游土壤偏湿(干),长江中下游地区从地面到 850 hPa 的低层大气温度偏低(高),而同期西太平洋上空低层大气温度偏高(低)。长江中下游地区上空低层大气温度偏低,会使得海陆温差减小;反之,该区域上空低层大气温度偏高,则海陆温差增加。

海陆温差的变化将直接影响到季风的强弱及其变化。图 6 给出了 1951—2006 年平均的 6 月 850 hPa 风场,以及土壤异常偏干、偏湿年合成的 6 月 850 hPa 风场距平。对于气候平均(图 6a)而言,由于受西太平洋副热带高压的影响,6 月中国东部主要为南风所控制。当 4—5 月长江中下游地区的土壤湿度异常偏高时(图 6b),江南至华南大部分地区均存在较为显著的南风正距平,而在长江以北至华北为北风正距平,从而在长江中下游地区存在着强的风场辐合。当 4—5 月长江中下游地区的土壤湿度偏低时(图 6c),上述情形完全相反,即在江南和华南地区存在北风正距平,而南风正距平则控

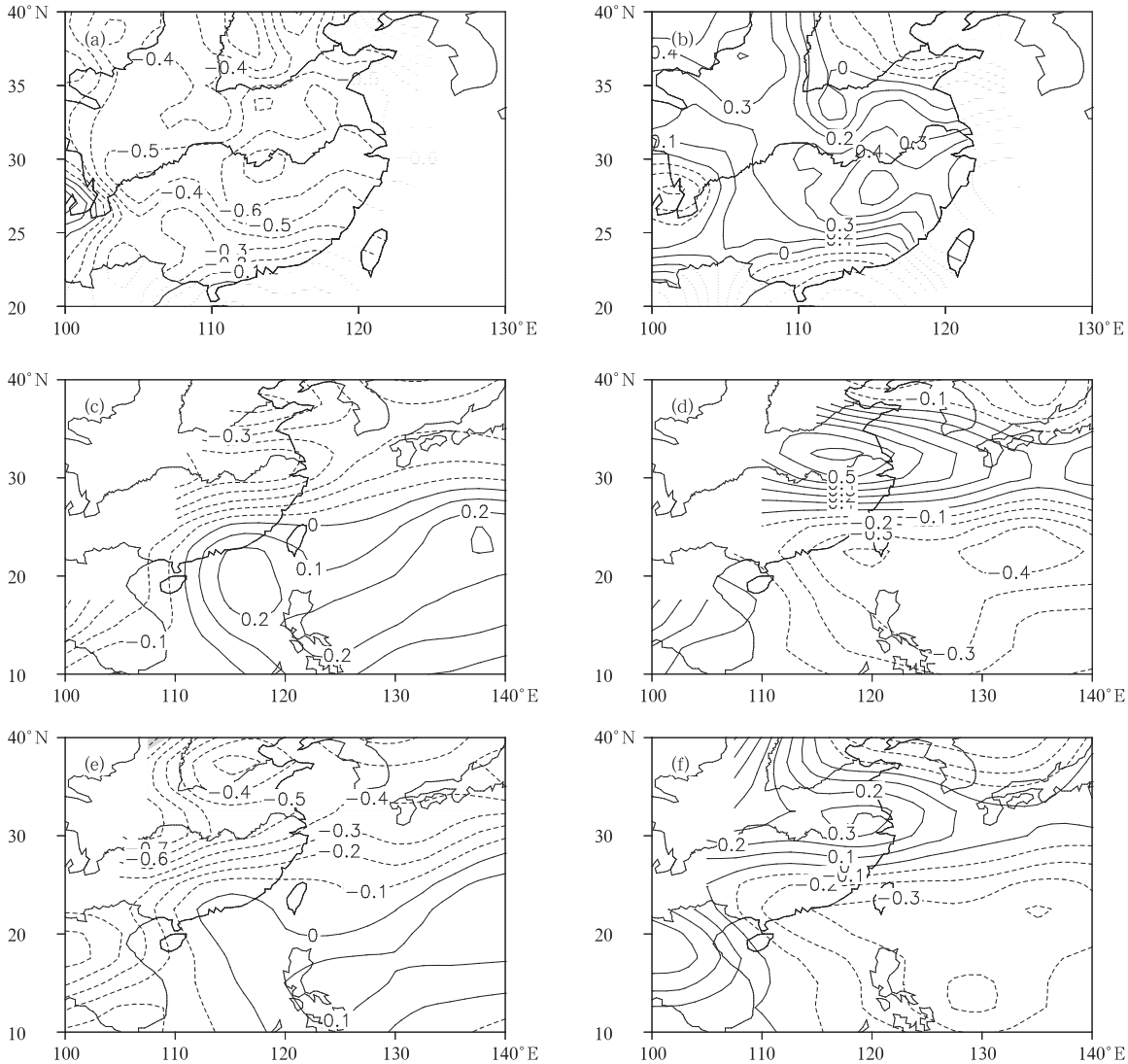


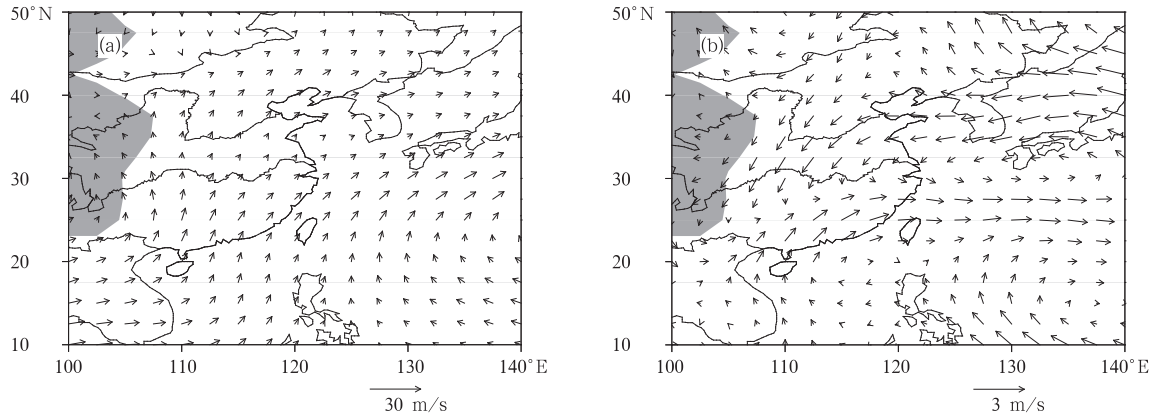

图 5 长江中下游土壤偏湿(a、c、e)和偏干年(b、d、f)合成的 5 月距地面 2 m 高度(a、b)、925 hPa(c、d)和 850 hPa(e、f)的气温距平分布(℃)

Fig. 5 Composite air temperature anomalies (℃) at 2 m above the ground surface (a, b), 925 hPa (c, d), and 850 hPa (e, f) in May for the wet soil moisture years (a,c,e) and dry soil moisture years (b,d,f)

制江北至华北的区域,从而在长江中下游地区存在异常的风场辐散。上述风场的辐合(散)致使长江中下游地区的水汽辐合(散),进而造成长江中下游地区降水偏多(少)。

图 7 给出了土壤偏干年和偏湿年合成的 6 月降水距平百分率(相对于 1971—2000 年的气候平均)。从图 7 可知,在 4—5 月长江中下游地区的土壤偏湿(干)年,6 月长江中下游降水偏多(少)3 成左右,部分地区通过了 95%的显著性水平检验。这与本文第 3 节中长江中下游地区的土壤湿度异常与降水量异常的相关分析结果是一致的。

综合上述分析,初步提出春季(4、5 月)土壤湿度异常影响 6 月长江中下游降水异常的概念模型(图 8),即前期(4—5 月)长江中下游土壤偏湿(干),将有利于大气低层气温的降低(增加),导致东亚季风区海陆温差的减弱(增强),从而使得夏季风偏弱(强),6 月在长江中下游风场异常辐合(散),导致该区域降水偏多(少)。



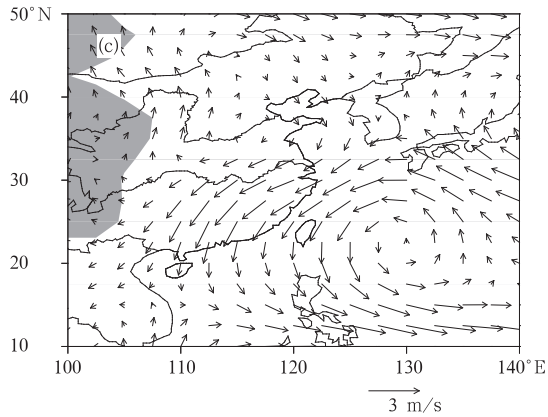




图 6 1951—2006 年 6 月气候平均(a)及长江中下游土壤偏干年(b)、偏湿年(c)合成的 850 hPa 风场距平(阴影表示地形)

Fig. 6 Wind climatology (average of 1951－2006; m/s) at 850 hPa in June (a), and composite wind anomalies at 850 hPa in June for the wet soil moisture years (b) and dry soil moisture years (c) (The terrain is shaded)

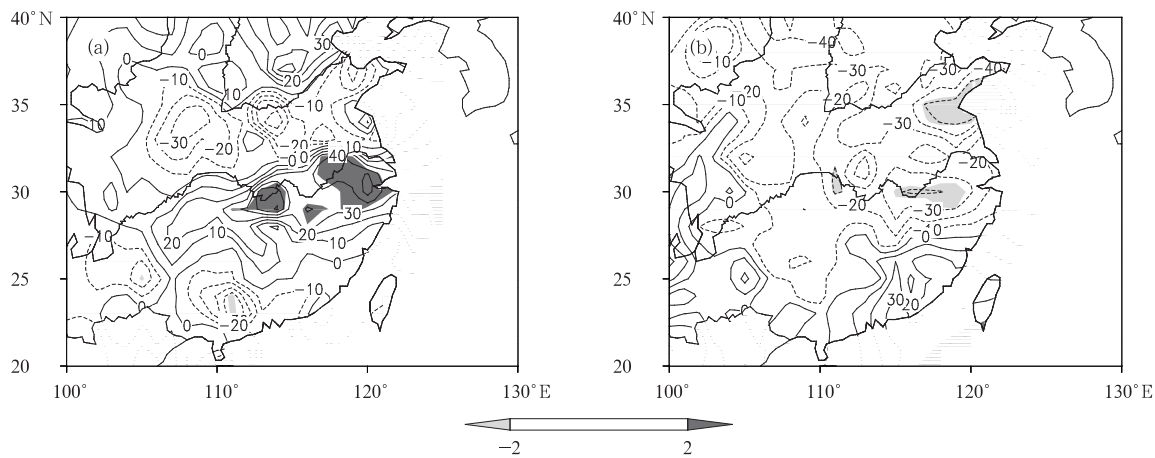



图 7 长江中下游土壤偏干年(a)、偏湿年(b)合成的 6 月降水距平百分率

(阴影表示异常通过 95%的显著性水平检验的区域)

Fig. 7 Composite percentage of rainfall anomalies (%) in June for (a) wet years and (b) dry years

(Areas with anomalies above the 95% confidence level are shaded)

## 5 结论与讨论

本文利用 CPC 土壤湿度资料、观测降水资料以及 NCEP 再分析风场和气温资料,在去除了降水资料中 ENSO 信号的影响后,考察了长江中下游地区 6 月降水和春季东亚季风区土壤湿度异常的关系。土壤湿度和降水量的相关分析表明,4—5 月长江中下游地区的土壤湿度和 6 月该区域的降水量存在显著的正相关,当 4—5 月长江中下游地区的土壤偏湿时,该区域 6 月降水很可能偏多,反之亦然。

基于前期土壤湿度异常的合成分析结果,进一步探讨了春季土壤湿度对 6 月长江中下游降水的影响过程及可能作用机制。研究结果表明,对应于春季(4—5月)长江中下游地区土壤湿度偏高(低),陆

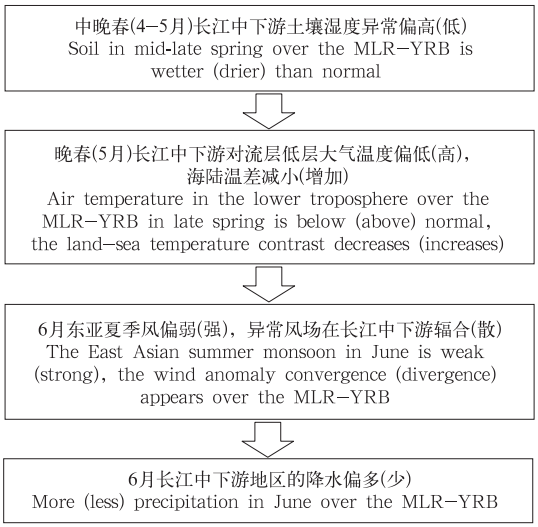



图 8 长江中下游地区春季土壤湿度异常影响 6 月降水的物理过程概念性模型

Fig. 8 Conceptual model demonstrating the impact of spring soil moisture on June precipitation over the MLR-YRB

气的相互作用将使得晚春(5 月)长江中下游地区的上空低层大气温度偏低(高);偏低(高)的长江中下游上空低层大气温度使得海陆温差减小(增加),引起东亚夏季风偏弱(强);6 月 850 hPa 风场异常则表现为长江以南为南风(北风)异常控制,长江以北受北风(南风)异常影响,长江中下游地区则存在异常的风场辐合(散),最终导致长江中下游地区的降水量偏多(少)。

本文主要基于观测资料及再分析资料的相关及合成分析,给出了前期土壤湿度异常与后期降水之间的关系,并初步分析了其影响过程及作用机制。今后尚需利用耦合气候系统模式开展不同的集合数值模拟试验,以期对前述的影响过程及作用机制予以验证。

**致谢**:感谢美国气候预测中心(CPC)提供的土壤湿度资料及美国国家环境预报中心(NCEP)提供的再分析资料。

## 参考文献

乐益龙,罗勇,郭品文. 2007. 中国春季土壤湿度与东亚夏季风的关系. 热带气象学报,23(5):474-482

林朝晖,杨小松,郭裕福. 2001. 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,6(2):240-248

马柱国,魏和林,符淙斌. 2000. 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,58(3):278-287

钱永甫,王谦谦,黄丹青. 2007. 江淮流域的旱涝研究. 大气科学,31(6):1279-1289

孙丞虎,李维京,张祖强等. 2005. 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. 应用气象学报,16(2):129-138

王会军,薛峰,毕训强. 1997. 气候模式的年际变率和可预测性. 应用气象学报,8(增刊):217-222

詹艳玲,林朝晖. 2011. 基于多源土壤湿度资料的中国区域土壤湿度时空演变特征的比较分析. 气候与环境研究(接收待刊)

张文君,周天军,宇如聪. 2008. 中国土壤湿度的分布与变化 I:多种资料间的比较. 大气科学,32(3):581-597

宗海峰,陈烈庭,张庆云. 2010. ENSO 与中国夏季降水年代际变化关系的不稳定性特征. 大气科学,34(1):184-192

左志燕,张人禾. 2007. 中国东部夏季降水与春季土壤湿度的联系. 科学通报,52(14):1722-1724

An S-I. 2003. Conditional maximum covariance analysis and its application to the tropical Indian Ocean SST and surface wind stress anomalies. J Climate, 16: 2932-2938

Dirmeyer P A, Fennessy M J, Marx L. 2003. Low skill in dynamical prediction of boreal summer climate: Grounds for looking beyond sea surface temperature. J Climate, 16: 995-1002

Entin J, Robock A, Vinnikov K Y, et al. 2000. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics. J Geophys Res, 105: 11865-11877

Fan Y, Van den Dool H. 2004. The CPC global monthly soil moisture data set at 0.5 degree resolution for 1948-present. J Geophys Res, 109: D10102, doi: 10.1029/2003JD004345

Findell K L, Eltahir E A B. 1997. An analysis of the soil moisture-rainfall feedback based on direct observations from Illinois. Water Resour Res, 33(4): 725-735

Findell K L, Eltahir E A B. 1999. Analysis of the pathways relating soil moisture and subsequent rainfall in Illinois. J Geophys Res-Atmos, 104(D24): 31565-31574

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull Amer Meteor Soc, 77: 437-471

Kinter J L, Miyakoda K, Yang S. 2002. Recent change in the connection from the Asian Monsoon to ENSO. J Climate, 15: 1203-1215

Koster R D, Suarez M J. 1995. The relative contributions of land and ocean processes to precipitation variability. J Geophys Res, 100: 13775-13790

Koster R D, Suarez M J, Heiser M. 2000. Variance and predictability of precipitation at seasonal-to-interannual timescales. J Hydrometeorol, 1: 26-46

Van den Dool H, Huang J, Fan Y. 2003. Performance and analysis of the constructed analogue method applied to U S soil moisture over 1981 - 2001. J Geophys Res, 108(D16): 8617, doi:10.1029/2002JD003114

Vinnikov Y, Robock A, Speranskaya N A, et al. 1996. Scales of temporal and spatial variability of midlatitude soil moisture. J Geophys Res, 101(D3): 7163-7174

Wang Huijun. 2002. The instability of the East Asian summer monsoon-ENSO relation. Adv Atmos Sci, 19(1): 1-11