

## 东亚中纬度夏季陆面增暖与土壤湿度异常的联系



通信作者简介: 陈海山, 二级教授/博士生导师, 现任南京信息工程大学大气科学学院院长、气象灾害教育部重点实验室主任, WCRP 中国委员会、GEWEX 中国委员会、iLEAPS 中国委员会委员。长期致力于陆面过程与大气相互作用的机理与模拟研究; 主持国家级项目 10 余项, 发表论文 200 余篇, 其中 SCI 论文 90 余篇; 曾获教育部特聘教授、国家“万人计划”科技创新领军人才、国家杰出青年基金获得者、国家百千万人才工程人选、国家“有突出贡献中青年专家”等荣誉。

余波 陈海山\* 孙悦

南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害教育部重点实验室, 江苏 南京 210044

**摘要** 利用 1979—2015 年 ERA-Interim 再分析土壤湿度、云量资料, NCEP/NCAR 再分析环流资料和 CPC 土壤湿度资料, 分析了东亚中纬度夏季陆面热力异常的时空分布特征及其与前期春季土壤湿度异常的联系, 探讨了前期春季土壤湿度影响东亚中纬度夏季陆面增暖的可能途径。结果表明, 东亚中纬度夏季土壤表层温度呈全区一致增暖趋势, 其中贝加尔湖及以南地区温度变化最剧烈、增暖最迅速, 且 1990 年代中期前后存在一个明显由冷向暖的年代际转变。进一步分析发现, 春、夏季西西伯利亚到贝加尔湖北部地区的土壤湿度与夏季贝加尔湖及以南地区的土壤表层温度在年代际和年际尺度上均存在紧密联系: 西西伯利亚到贝加尔湖北部地区土壤湿度异常偏高, 通常对应贝加尔湖及南部地区夏季土壤表层温度偏高。西西伯利亚到贝加尔湖北部地区春、夏土壤湿度异常可以引起夏季大气环流异常, 从而对东亚夏季中纬度陆面热力异常产生影响: 春、夏土壤湿度偏高时, 贝加尔湖及其南部地区上空位势高度为正异常, 对应为反气旋性异常环流, 云量减少, 有利于东亚中纬度陆面增暖; 反之, 则对应为气旋性异常环流, 不利于陆面增暖。

**关键词** 东亚中纬度; 土壤表层温度; 陆面增暖; 土壤湿度

IPCC 第五次评估报告指出, 过去 30 a 地表温度每 10 a 的增暖幅度高于 1850 年来的任何时期, 1880—2012 年全球表面温度升高了 0.85 °C (IPCC 2013), 而欧亚中纬度地区是增暖最为显著的区域之一 (Hansen et al. 2010)。欧亚大陆作为全球面积最大的陆地, 其表层热力异常对区域大气环流的变异具有重要影响。研究表明, 夏季欧亚中纬度地表温度呈显著上升趋势; 同时, 东亚地区这种增暖现象在 20 世纪 90 年代中期表现最为明显 (Zhu et al. 2012; Chen and Lu 2014; Dong et al. 2016, 2017; Chen et al. 2017; Hong et al. 2017)。研究发现, 夏季东亚中纬度地区的陆面热力异常对我国降水、温度和东亚夏季风有重要影响 (Li et al. 2010; 徐康等, 2011a, 2011b; Zhu et al. 2012; Chen and Lu 2014; Chen et al. 2017)。因此, 深入理解东亚中纬度地区的陆面热力异常及其成因对进一步理解东亚地区的天气、气候变异有重要意义。

目前关于欧亚大陆夏季陆面热力异常的成因研究, 一方面集中于大气涛动 (如 AMO, 大西洋年代际涛动; NAO, 北大西洋涛动) 和海

\* 联系人, E-mail: haishan@nuist.edu.cn

2019-04-07 收稿, 2019-04-12 接受

国家自然科学基金杰出青年项目 (41625019); 国家自然科学基金重点项目 (41230422)

引用格式: 余波, 陈海山, 孙悦. 2020. 东亚中纬度夏季陆面增暖与土壤湿度异常的联系 [J]. 大气科学学报, 43(1): 201-211.

Yu B, Chen H S, Sun Y. 2020. Linkage between summer land surface warming in mid-latitude of East Asia and soil moisture anomalies [J]. Trans Atmos Sci, 43(1): 201-211. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20190407001. (in Chinese).

温、海冰的异常强迫作用。最近的研究表明大尺度环流异常对东北亚地表温度的年代际变化有重要影响(Sun et al., 2008; Sutton and Dong, 2012; Zhu et al., 2012; Gao et al., 2015; Dong et al., 2016, 2017; Hong et al., 2017)。例如, Hong et al. (2017) 指出由AMO 调控的SRP(丝绸之路遥相关型)对东北亚地表温度有增暖放大效应;而 Dong et al. (2016) 则通过模式模拟指出海冰和海温变化能解释夏季东北亚区域异常增暖信号的76%。另一方面,则主要考虑了温室气体和人为气溶胶排放的影响(Zhu et al., 2012; Dong et al., 2016, 2017)。例如, Dong et al. (2016, 2017) 通过敏感性试验,探讨了温室气体、人为气溶胶等对欧洲和东北亚夏季地表温度的影响,指出在未来几十年随着温室气体增多及北美与欧洲人为气溶胶排放持续减少,欧洲和东北亚地表温度的增暖现象将会延续。此外,还有研究从云量和降水(Dai et al., 1997, 1999)的角度来分析夏季欧洲异常增暖的可能成因。例如 Dai et al. (1997, 1999) 指出云量偏多会导致到达地表的太阳辐射减少,进而影响日最高温度;同时,土壤水分会通过蒸发冷却对气温日较差产生影响,当土壤水分含量少,潜热释放较少时,云量对地表温度的影响更为突出。

众所周知,陆面作为气候系统的重要组成部分,与大气之间存在强烈的物质和能量交换;陆面因子的异常变化会对大气产生重要影响(Shukla and Mintz, 1982; 陈海山和孙照渤, 2002)。土壤湿度作为一个重要的陆面因子,会通过改变地表反照率、热容量和地表向大气输送的感热、潜热等进而对气候产生影响(马柱国等, 2001)。研究表明土壤湿度对气候变化的作用仅次于海温(U S National Research Council, 1994);在中高纬地区二者的作用甚至相当(Shukla and Mintz, 1982),陆地上大部分的降水来自陆地表面的蒸发(Chahine, 1992)。此外,土壤湿度具有较好的记忆,Shukla and Mintz(1982)指出前期土壤湿度的异常变化,会对后期降水和气温产生重要影响。Ye et al. (1984) 通过数值实验也证实了这一点。最近的研究表明,春季华南地区土壤湿度的异常会对我国夏季气候产生影响(梁乐宁和陈海山, 2010);陈海山和周晶(2013)、周晶和陈海山(2012)利用模式证实了土壤湿度异常能够对极端降水产生重要的影响。

前人关于东亚中纬度夏季异常增暖的成因研究,主要集中于海温、海冰等外强迫及温室气体和人为气溶胶的影响方面。关于土壤湿度这一重要陆面因子对东亚中纬度异常夏季增暖的影响,目前研究

还不多。因此,本文试图就前期春季土壤湿度与东亚中纬度地区夏季陆面热力异常的可能联系及相关机理开展研究,以期为更好理解夏季东亚中纬度异常增暖提供参考。

## 1 资料和方法

所用资料包括欧洲中期天气预报中心(ECWMF)的ERA-Interim 土壤表层温度(0~7 cm)和云量再分析资料(Dee and de Rosnay, 2011)、美国国家环境预报中心(NCEP)和国家大气研究中心(NCAR)的月平均风场和位势高度场再分析资料(Kalnay et al., 1996)。土壤湿度资料为美国国家海洋大气局(NOAA)气候预测中心(CPC)的月平均土壤湿度和1.6 m 深土壤层含水量(单位: mm)(van den Dool, 2003)。其中,温度和云量的空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ ,其余资料的空间分辨率均为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ;资料的时间段均为1979—2015年。研究主要采用了回归、相关、合成分析等常用的统计分析方法。

## 2 东亚中纬度夏季陆面温度的异常变化特征

利用ERA-interim 月平均土壤表层温度再分析资料,首先分析了夏季东亚中纬度陆面热力时空分布特征。图1给出了去趋势前、后夏季土壤表层温度的标准差场,可以看出贝加尔湖南部地区为夏季温度变率的大值区,温度变化最剧烈。图1c为土壤温度线性趋势的空间分布,不难发现夏季陆面增暖最快的区域主要位于 $45^\circ\text{N}$ 以北、贝加尔湖以南地区。由于上述区域不仅是土壤温度年际变化最剧烈也是增暖最快的区域,后文选取( $85^\circ \sim 115^\circ\text{E}$ ,  $45^\circ \sim 55^\circ\text{N}$ )作为考察东亚中纬度夏季陆面热力异常的关键区(简称热力关键区)。为了进一步研究该区域土壤表层温度的变化特征,计算了热力关键区内土壤表层温度区域平均的标准化时间序列STL1。由图2a可知,热力关键区内夏季土壤表层温度呈显著升高的趋势,同时1990年代中期前后存在一个明显的年代际变化。图2b给出了去趋势后热力关键区夏季平均土壤表层温度的时间序列STL1<sub>detrend</sub>,反映了夏季土壤表层温度的年际变化特征。

## 3 东亚中纬度夏季陆面增暖与前期土壤湿度的联系

为了进一步分析东亚中纬度夏季土壤表层温度与前期春季土壤湿度之间的关系,图3a给出了热力

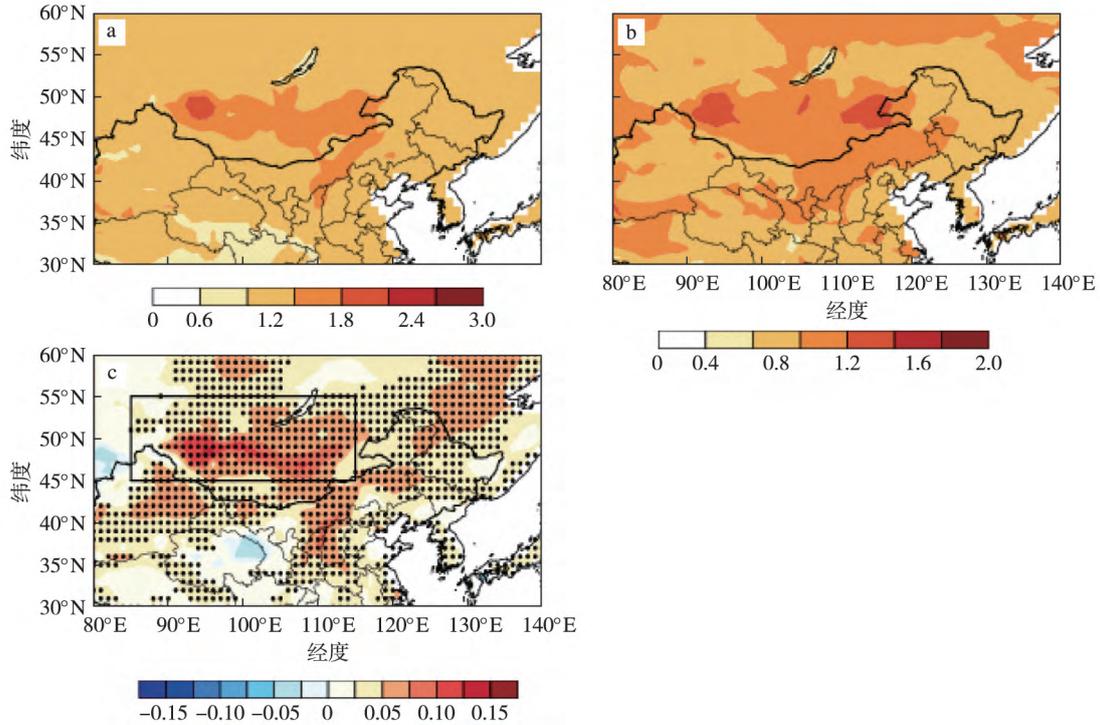


图1 1979—2015年东亚夏季表层土壤温度的去趋势前(a)和去趋势后(b)的标准差(单位:  $^{\circ}\text{C}$ ), 以及线性变化趋势(c; 单位:  $^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ; 方框表示选定的热力关键区, 打点区域通过0.01信度的显著性检验)

Fig.1 (a) Standard deviation( $^{\circ}\text{C}$ ), (b) detrended standard deviation( $^{\circ}\text{C}$ ) and (c) linear trend (units:  $^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ) of summer surface soil temperature over East Asia during 1979—2015, in which the square shows the selected thermal key area and the dotted areas denote the trends being statistically significant at 0.01 level in (c)

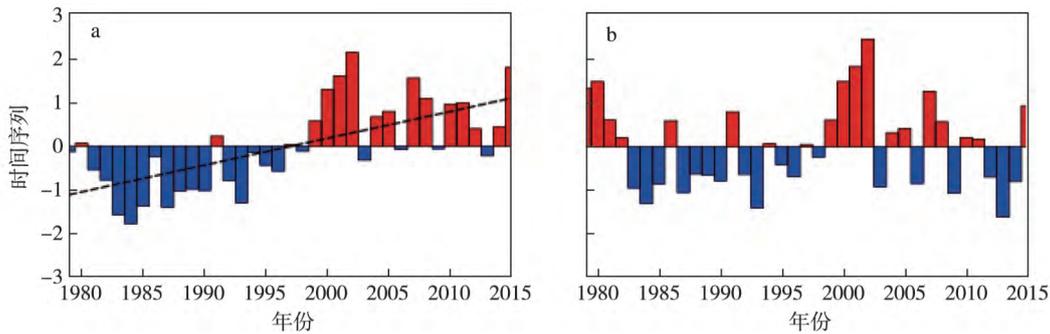


图2 1979—2015年夏季热力关键区平均土壤温度的标准化时间序列 STL1(a; 虚线为线性趋势)及其去趋势的标准化时间序列  $\text{STL1}_{\text{detrend}}$ (b)

Fig.2 Normalized summer surface soil temperature averaged in the selected thermal key area during 1979—2015: (a) the original time series STL1 (Dashed line denotes the linear trend); (b) the detrended time series  $\text{STL1}_{\text{detrend}}$

夏季关键区平均土壤温度标准化时间序列 STL1 回归得到的春季土壤湿度。结果表明, 回归得到的土壤湿度的显著正异常区域主要位于  $55^{\circ}\text{N}$  以北的西西伯利亚及贝加尔湖以北地区, 这也说明东亚中纬度夏季土壤表层温度与上述区域的前期土壤湿度可能存在一定的联系。夏季贝加尔湖及其南部地区陆面异常偏暖, 通常对应春季西西伯利亚及贝加尔湖以北春季土壤湿度异常偏高; 反之, 春季土壤湿度则

异常偏低。根据图 2a 土壤表层温度的年代际变化特征, 给出了异常暖时段(1999—2015年)与异常冷时段(1979—1995年)春季土壤湿度的合成差值场(图 3b), 也得到了类似的结果。

为了考察二者在年际尺度的可能联系, 图 3c 给出了热力关键区夏季平均土壤温度去趋势后的标准化时间序列  $\text{STL1}_{\text{detrend}}$  回归得到的春季土壤湿度, 其空间分布大致与图 3a 类似, 但显著异常区域范围有

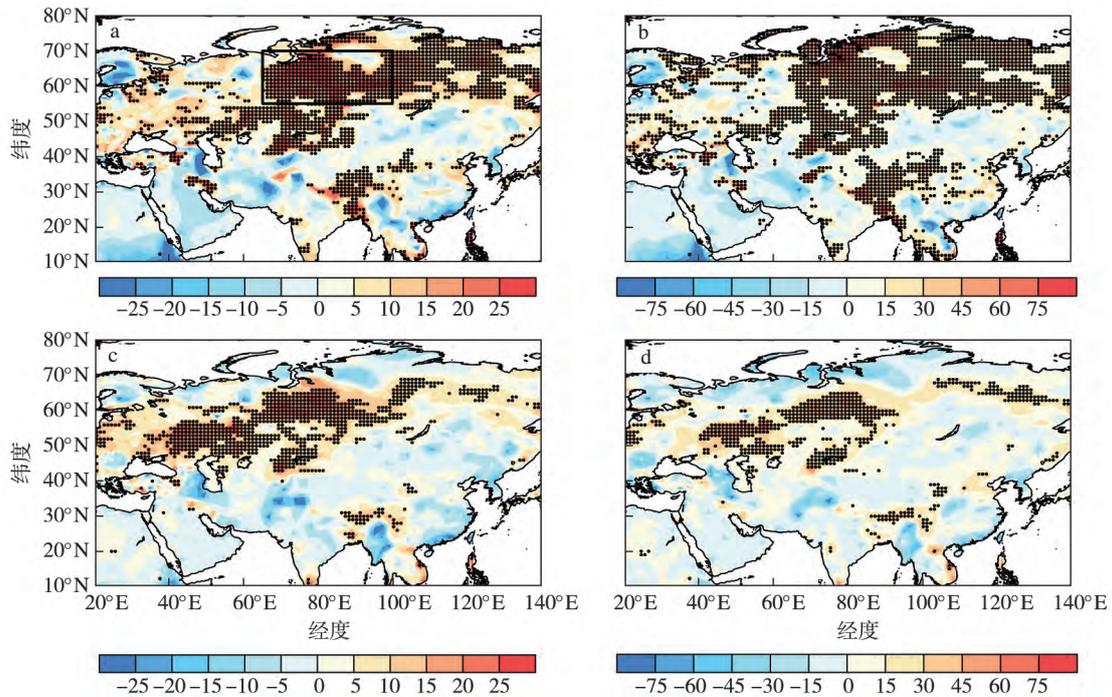


图3 夏季热力关键区标准化土壤表层温度时间系列 ( a.STL1; c.STL1<sub>detrend</sub>) 回归得到的春季土壤湿度异常,以及春季土壤湿度的合成差值场 ( b.1999—2015年减 1979—1995年; d.STL1<sub>detrend</sub>高值年减低值年) (单位: mm; 方框表示选定的湿度关键区,打点区域通过 0.05 信度的显著性检验)

Fig.3 Regression of spring soil moisture anomalies onto the normalized time series( a.STL1; c.STL1<sub>detrend</sub>) of summer surface soil temperature averaged in the selected thermal key area and the composite differences in spring soil moisture( b.1999—2005 minus 1979—1995; d.the high STL1<sub>detrend</sub> years minus the low STL1<sub>detrend</sub> years) ,in which the square in ( a) shows the selected key area of soil moisture and the dotted areas denote the values being statistically significant at 0.05 level

所减小。同时,根据 STL1<sub>detrend</sub> 选取了土壤温度异常的典型年份进行合成分析,将 STL1<sub>detrend</sub> 大于 0.8 的年份定义为偏暖年( 1979、1980、1991、2000、2001、2002、2007、2015 年),而 STL1<sub>detrend</sub> 小于 -0.8 的年份定义为偏冷年( 1983、1984、1985、1987、1993、2003、2006、2009、2013 年)。图 3d 为东亚中纬度夏季陆面异常偏暖年与异常偏冷年春季土壤湿度的差值场,土壤湿度异常的大值区也主要位于西西伯利亚地区,这进一步证实了东亚中纬度夏季土壤表层温度与上述区域的前期土壤湿度在年际尺度上同样存在较为密切的联系。后文选择西西伯利亚到贝加尔湖北部地区( 65°~100°E, 55°~70°N) 作为土壤湿度异常变化的关键区( 简称湿度关键区),便于后文分析。

为了直观比较湿度关键区( 65°~100°E, 55°~70°N) 春季土壤湿度异常变化与热力关键区( 85°~115°E, 45°~55°N) 夏季土壤表层温度的异常变化特征。图 4a 给出了 1979—2015 年湿度关键区春季平均土壤湿度的标准化系列( SM) 与夏季 STL1。

不难发现,春季西西伯利亚到贝加尔湖北部地区春季土壤湿度异常和热力关键区夏季土壤表层温度都呈上升趋势,二者相关系数为 0.62; 去掉趋势的春季土壤湿度标准化时间序列 SM<sub>detrend</sub> 与 STL1<sub>detrend</sub> 同样表现出较为一致的年际变化( 图 4b), 二者相关系数为 0.45( 均通过 0.01 信度的显著性检验)。以上结果表明春季西西伯利亚到贝加尔湖北部地区土壤湿度与热力关键区夏季土壤表层温度在年代际和年际尺度上均存在紧密联系: 湿度关键区春季土壤湿度异常偏高,通常对应贝加尔湖及南部地区夏季土壤表层温度偏高; 反之,土壤表层温度异常偏低。

之前的分析表明,夏季东亚中纬度土壤温度的异常增暖可能与春季西西伯利亚到贝加尔湖北部地区土壤湿度异常存在一定联系。为了更好说明春季西西伯利亚到贝加尔湖北部地区土壤湿度对夏季增暖的可能影响,进一步分析了春季西西伯利亚到贝加尔湖北部地区土壤湿度异常对应的夏季陆面热力异常特征。图 5 给出了春季关键区土壤湿度标准化时间序列( 去趋势前 SM、后 SM<sub>detrend</sub>) 回归得到的夏

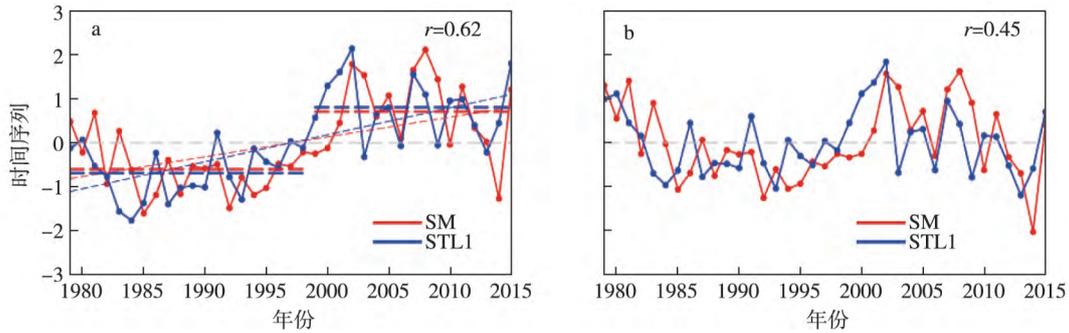


图4 1979—2015年区域(65°~100°E, 55°~70°N)平均土壤湿度(SM, 红实线)和热力关键区夏季土壤温度(STL1, 蓝实线)的标准化时间序列(a; 虚线表示线性趋势)及其去趋势的标准化时间序列(b)

Fig.4 (a) Normalized time series of regional averaged spring soil moisture(SM, red solid line) in (55°—70°N, 65°—100°E) and summer soil temperature(STL1, blue solid line) in the selected thermal key area (Dashed lines denote the linear trends), and (b) detrended SM (SM<sub>detrend</sub>) and detrended STL1 (STL1<sub>detrend</sub>)

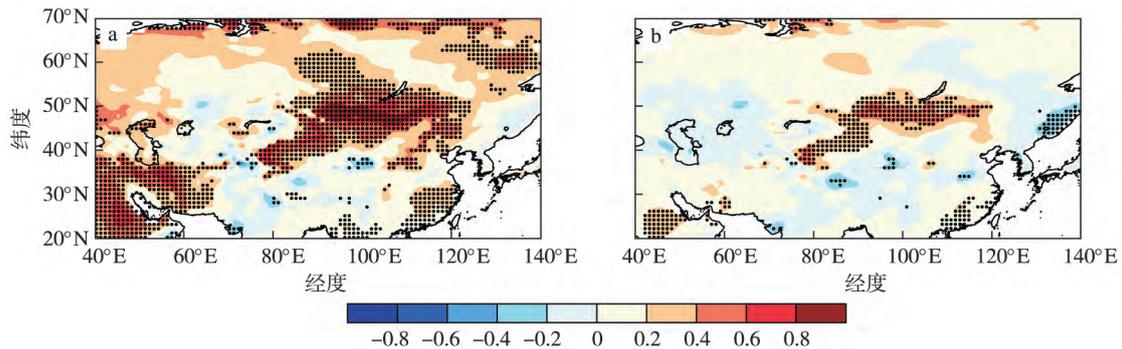


图5 春季区域(65°~100°E, 55°~70°N)平均标准化土壤湿度去趋势前(a)和去趋势后(b)回归得到的夏季土壤表层温度(单位: °C; 打点区域通过0.05信度的显著性检验)

Fig.5 (a) Regression of summer surface soil temperature onto the normalized spring soil moisture averaged in (55°—70°N, 65°—100°E) (a, the original series; b, the detrended series), in which the dotted areas denote the values being statistically significant at 0.05 level

季土壤表层温度场的空间分布。可以看出, 无论去除趋势前后, 湿度关键区春季土壤湿度回归得到的夏季土壤表层温度回归场的大值区均出现在贝加尔湖及其以南地区, 春季土壤湿度异常大值对应的夏季异常增暖区和之前给出的土壤表层温度显著增暖的区域(图1c)总体一致。

此外, 进一步的分析发现春季土壤湿度的异常具有一定的持续性。图6a给出了夏季土壤湿度与湿度关键区春季标准化土壤湿度去趋势前、后的相关分布。不难发现, 夏季土壤湿度异常与春季土壤湿度异常具有较好的相关性: 西西伯利亚到贝加尔湖北部地区春季土壤湿度偏高, 通常对应上述地区夏季土壤湿度的异常偏高; 反之亦然。为了更直观评估湿度关键区春、夏季土壤湿度异常变化的关系, 计算了湿度关键区春、夏季平均土壤湿度的标准化时间序列(图7), 二者表现出非常一致的变化特征,

去趋势前、后的相关系数分别为0.88、0.84(均通过了0.01信度的显著性检验)。这在一定程度上说明, 西西伯利亚到贝加尔湖北部地区春季土壤湿度异常表现出较好的持续性, 这也是湿度关键区春季土壤湿度异常能影响夏季温度的一个可能原因。图8给出了湿度关键区平均标准化夏季土壤湿度去趋势前、后回归得到的夏季土壤表层温度, 结果与春季土壤湿度回归得到的结果(图5)总体类似, 去趋势前、后夏季土壤表层温度对同期土壤湿度回归的大值区也主要位于贝加尔湖及其南部地区。总之, 湿度关键区春、夏季土壤湿度均与贝加尔湖及其南部地区陆面增暖均存在密切联系, 夏季土壤湿度影响的范围和强度较春季更显著。春季土壤湿度异常, 可以持续到夏季, 二者的共同作用可能是导致东亚中纬度夏季增暖的一个重要原因。

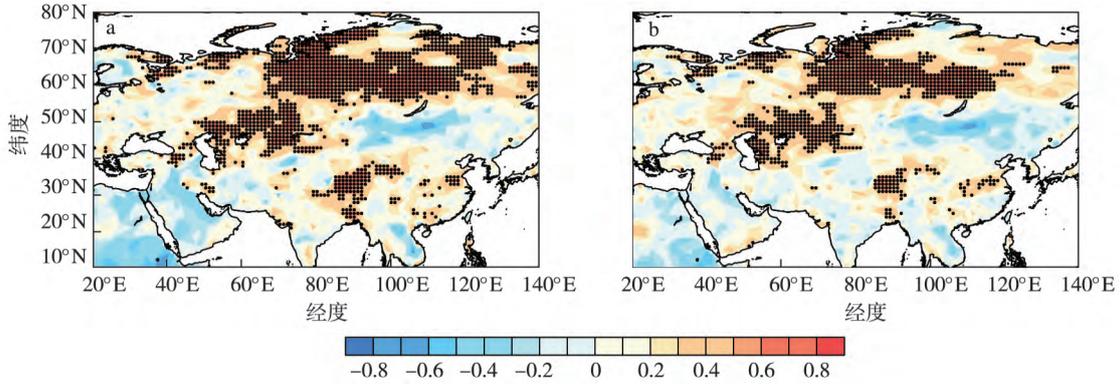


图6 夏季土壤湿度与去趋势前(a)和去趋势后(b)春季区域(65°~100°E, 55°~70°N)平均标准化土壤湿度的相关分布(打点区域通过0.01信度的显著性检验)

Fig.6 Correlation between summer soil moisture and the normalized spring soil moisture averaged in (65°—100°E, 55°—70°N), in which the dotted areas denote the correlation coefficients being statistically significant at 0.01 level: (a) the original series; (b) the detrended series

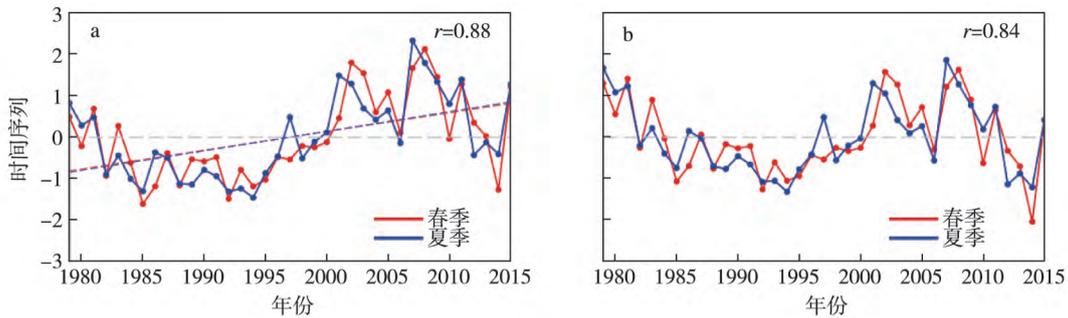


图7 1979—2015年春季(红实线)和夏季(蓝实线)区域(65°~100°E, 55°~70°N)平均土壤湿度的标准化时间序列(a;虚线为线性趋势)及其去趋势的标准化时间序列(b)

Fig.7 (a) Normalized time series of regional averaged spring (red solid line) and summer (blue solid line) soil moisture in (55°—70°N, 65°—100°E) (Dashed line denotes the linear trend), and (b) their detrended time series

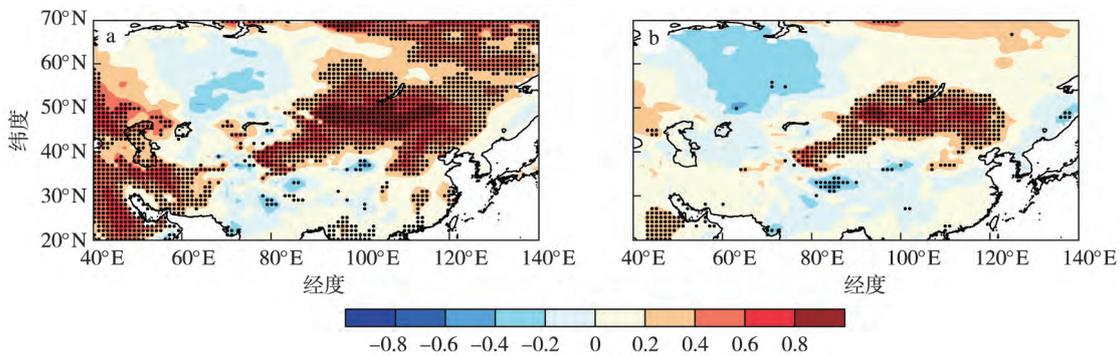


图8 去趋势前(a)和去趋势后(b)夏季区域(55°~70°N, 65°~100°E)平均标准化土壤湿度回归得到的夏季土壤表层温度(单位:°C;打点区域表示通过0.05信度的显著性检验)

Fig.8 (a) Regression of summer surface soil temperature onto the normalized summer soil moisture averaged in (65°—100°E, 55°—70°N), in which the dotted areas denote the values being statistically significant at 0.05 level: (a) the original series; (b) the detrended series

#### 4 土壤湿度影响东亚中纬度夏季陆面热力异常的可能途径

那么湿度关键区春、夏土壤湿度异常是如何影响东亚夏季中纬度陆面热力异常的呢? 土壤湿度异常可以通过改变地表的热力状态进而影响地表对大气的加热, 对大气环流产生影响。以下重点分析湿度关键区春、夏土壤湿度异常对应的异常大气环流特征, 以期为进一步理解夏季东亚中纬度陆面增暖提供可能的解释。图 9 给出了湿度关键区春、夏土壤湿度标准化系列去趋势前、后回归得到的夏季 500 hPa 位势高度场异常的空间分布。不难发现, 湿度关键区春、夏土壤湿度标准化系列回归得到的夏季 500 hPa 位势高度场具有大致类似的空间分布特征。具体表现为: 土壤湿度异常关键区(乌拉尔山以东)上空对应 500 hPa 位势高度场的负异常, 而在其下游地区(贝加尔湖及其南部地区)则为显著的正异常区域, 而日本海地区表现为位势高度负异常(图 9a、c)。总体而言, 500 hPa 位势高度场对湿度关键区夏季土壤湿度异常的响应更为显著。此外, 去趋势后的回归场也得到了较为一致的空间分布特征(9b、d)。上述结果表明, 湿度关键区春、夏土壤湿度异常无论在年代际还是年际尺度上均与夏季的大气环流直接存在密切的联系。湿度关键区春、夏土壤湿度异常偏高, 通常会减弱地表对大气的加热,

引起湿度关键区附近位势高度场的降低(对应 500 hPa 高度场的负异常), 并导致贝加尔湖及其南部地区等下游地区的位势高度显著升高(对应 500 hPa 高度场的正异常)。对比春、夏季土壤湿度回归的位势高度场, 可以发现当春、夏季土壤湿度偏高时, 在贝加尔湖及其南部地区通常维持位势高度的显著正异常。

与 500 hPa 高度场异常分布形势相对应, 春、夏土壤湿度回归得到的 850 hPa 风场异常(图 10) 也给出了一致的结果。湿度关键区春、夏土壤湿度正异常, 通常对应乌拉尔山以东上空的异常气旋性环流和贝加尔湖及附近地区上空的异常反气旋性环流。而湿度关键区春、夏土壤湿度偏高引起的贝加尔湖及附近地区的位势高度场正异常和异常反气旋性环流; 异常反气旋性环流通常会导致异常下沉运动, 云量和降水减少, 同时增强暖平流的输送, 均有利于贝加尔湖及附近地区夏季陆面的异常增暖。因此, 可以认为湿度关键区春、夏土壤湿度偏高引起的贝加尔湖及附近地区的位势高度场正异常和异常反气旋性环流是造成夏季该区域异常增暖的一个重要原因。

已有的研究也强调了云量变化对陆面异常增暖的贡献, 云量减少通常会使得到达地表的太阳辐射增加, 从而有利于地表温度升高(Dai et al., 1997, 1999)。图 11 给出了湿度关键区春、夏土壤湿度标

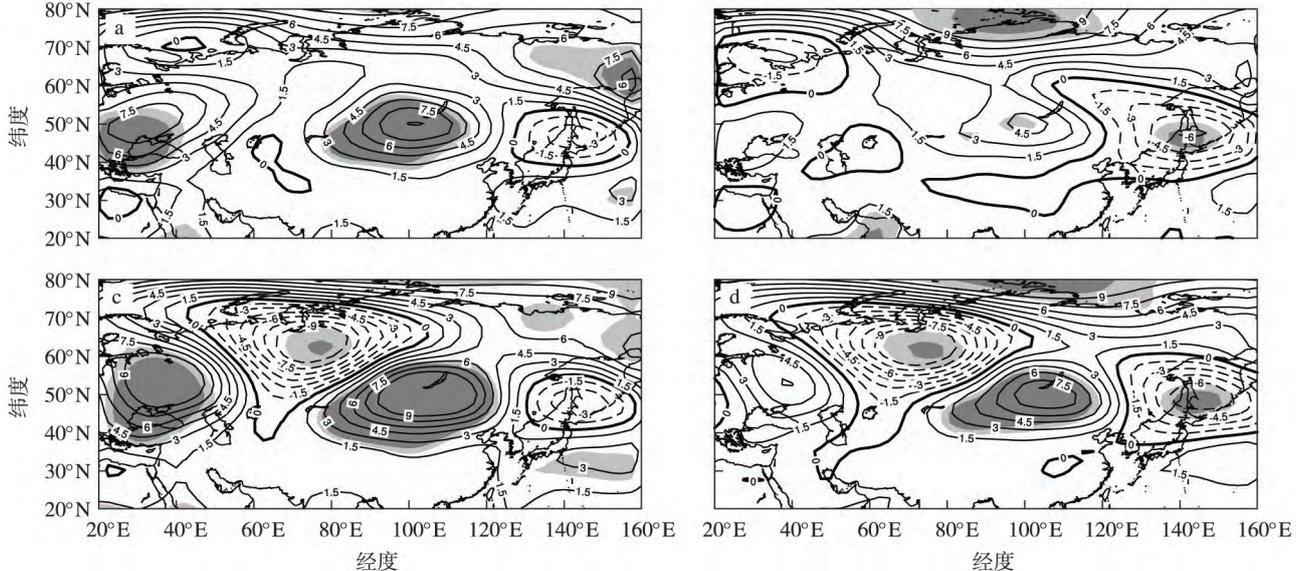


图 9 去趋势前(a、c)、去趋势后(b、d)春季(a、b)、夏季(c、d)区域(65°~100°E, 55°~70°N)平均土壤湿度标准化系列回归得到的夏季 500 hPa 位势高度异常(单位: gpm; 深色和浅色阴影分别表示通过 0.05 和 0.1 信度的显著性检验)

Fig.9 Regression of summer 500 hPa geopotential height anomalies (units: gpm) onto the normalized (a, b) spring and (c, d) summer soil moisture averaged in (55°—70°N, 65°—100°E), in which the dark (light) shaded areas denote the anomalies being statistically significant at 0.05 (0.1) level: (a, c) the original time series; (b, d) the detrended time series

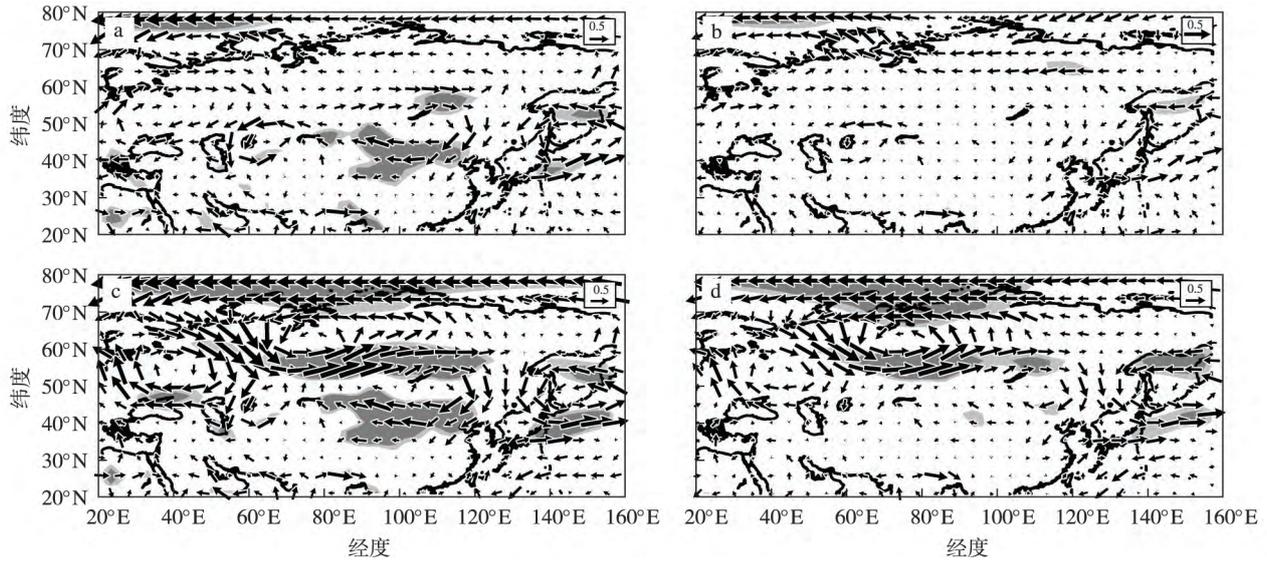


图 10 去趋势前(a,c)、去趋势后(b,d)春季(a,b)、夏季(c,d)区域(65°~100°E, 55°~70°N)平均土壤湿度标准化系列回归得到的夏季850 hPa 风速异常(单位:  $m \cdot s^{-1}$ ; 深色和浅色阴影分别表示通过0.05和0.1信度的显著性检验)

Fig.10 Regression of summer 850 hPa wind speed anomalies (units:  $m \cdot s^{-1}$ ) onto the normalized (a b) spring and (c d) summer soil moisture averaged in (55°—70°N, 65°—100°E) in which the dark (light) shaded areas denote the anomalies being statistically significant at 0.05(0.1) level: (a c) the original time series; (b d) the detrended time series

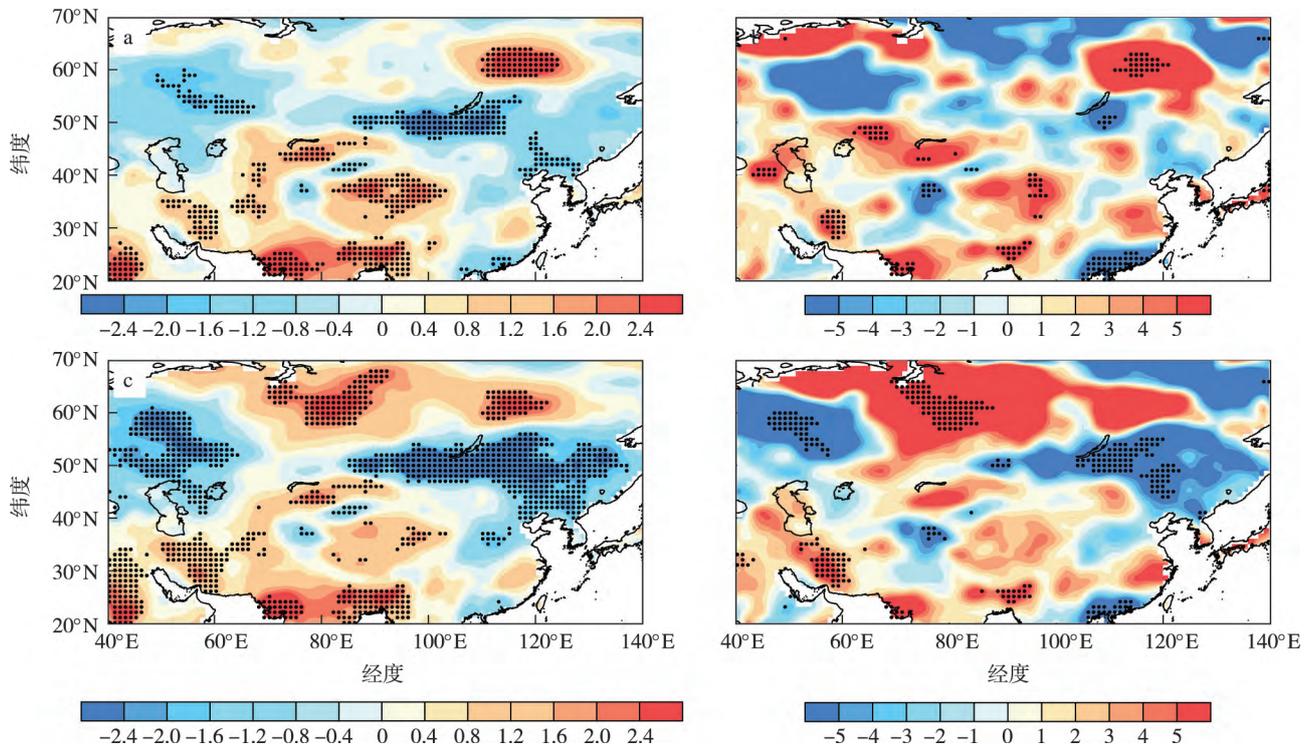


图 11 去趋势前(a,c)、去趋势后(b,d)春季(a,b)、夏季(c,d)区域(65°~100°E, 55°~70°N)平均土壤湿度标准化系列回归得到的夏季云量异常(打点区表示通过0.05信度的显著性检验)

Fig.11 Regression of summer cloud amount anomalies onto the normalized (a b) spring and (c d) summer soil moisture averaged in (55°—70°N, 65°—100°E) in which the dotted areas denote the anomalies being statistically significant at 0.05 level: (a c) the original time series; (b d) the detrended time series

准化系列去趋势前、后回归得到的夏季云量异常的空间分布。上述结果表明湿度关键区春、夏土壤湿度异常在年代际和年际尺度上均与贝加尔湖及其南部地区的夏季云量有紧密的联系,且云量的变化和之前环流异常的结果是一致的。湿度关键区春、夏土壤湿度异常偏高(低),贝加尔湖及其南部地区云量减少(增多),云量减少(增多)有利于该地区陆面增暖(降温)这也进一步证实了我们之前的结果,为土壤湿度影响陆面异常增暖提供了进一步的解释。

## 5 结论与讨论

利用 1979—2015 年 ERA-Interim、NCEP/NCAR 再分析资料和 CPC 土壤湿度资料,分析了东亚中纬度夏季陆面热力异常的时空分布特征及其与前期春季土壤湿度异常的联系,探讨了前期春季土壤湿度影响东亚中纬度夏季陆面增暖的可能途径。结果表明:

1) 东亚中纬度夏季土壤表层温度呈全区一致增暖趋势,其中贝加尔湖及以南地区温度变化最剧烈、增暖最迅速,且 1990 年代中期前后存在一个明显由冷向暖转变的年代际转变。

2) 春、夏西西伯利亚到贝加尔湖北部地区土壤湿度与夏季贝加尔湖及以南地区土壤表层温度在年

代际和年际尺度上均存在紧密联系:西西伯利亚到贝加尔湖北部地区春、夏土壤湿度异常偏高,通常对应贝加尔湖及南部地区夏季土壤表层温度偏高;反之,土壤表层温度异常偏低。

3) 春、夏西西伯利亚到贝加尔湖北部地区土壤湿度异常可以引起夏季大气环流异常,从而对东亚夏季中纬度陆面热力异常产生影响。春、夏土壤湿度偏高时,贝加尔湖及其南部地区上空位势高度正异常,对应异常反气旋性异常环流,云量会减少,有利于夏季东亚中纬度的陆面增暖;反之,则对应气旋性异常环流,不利于陆面增暖。

当然,本文从土壤湿度影响的角度探讨了夏季东亚中纬度陆面异常增暖的可能原因,所得结果对于深入理解近年来东亚中纬度陆面的异常增暖可以提供一定的参考,同时为夏季东亚中纬度土壤表层温度的预测提供了可能的指示信号(前期春季的土壤湿度异常)。由于受观测资料的限制,研究中采用了 ERA-Interim 土壤湿度再分析资料,在今后的研究中有必要增加多源资料的结果对比。此外,本文的研究仅仅基于观测资料和统计分析而得,至于土壤湿度如何影响云量,以及土壤湿度、云量、土壤表层温度之间复杂的反馈过程,还有待于我们在今后的工作中结合数值模拟来开展深入的探究。

## 参考文献(References)

- Chahine M T, 1992. The hydrological cycle and its influence on climate [J]. *Nature*, 359(6394): 373-380.
- 陈海山, 孙照渤, 2002. 陆气相互作用及陆面模式的研究进展 [J]. *南京气象学院学报*, 25(2): 277-288. Chen H S, Sun Z B, 2002. Review of land-atmosphere interaction and land surface model studies [J]. *J Nanjing Inst Meteor*, 25(2): 277-288. (in Chinese).
- 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 S, Zhou J, 2013. Impact of interannual soil moisture anomaly on simulation of extreme climate events in China. part II: sensitivity experiment analysis [J]. *Chin J Atmos Sci*, 37(1): 1-13. (in Chinese).
- Chen H S, Teng F D, Zhang W X, et al., 2017. Impacts of anomalous midlatitude cyclone activity over East Asia during summer on the decadal mode of East Asian summer monsoon and its possible mechanism [J]. *J Climate*, 30(2): 739-753.
- Chen W, Lu R Y, 2014. A decadal shift of summer surface air temperature over Northeast Asia around the mid-1990s [J]. *Adv Atmos Sci*, 31(4): 735-742.
- Dai A G, Genio A D D, Fung I Y, 1997. Clouds, precipitation and temperature range [J]. *Nature*, 386(6626): 665-666.
- Dai A G, Trenberth K E, Karl T R, 1999. Effects of clouds, soil moisture, precipitation and water vapor on diurnal temperature range [J]. *J Climate*, 12(8): 2451-2473.
- Dee D P, de Rosnay P, 2011. The ERA-interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 137: 553-597.
- Dong B W, Sutton R T, Chen W, et al., 2016. Abrupt summer warming and changes in temperature extremes over Northeast Asia since the mid-1990s: drivers and physical processes [J]. *Adv Atmos Sci*, 33(9): 1005-1023.
- Dong B, Sutton R T, Shaffrey L, 2017. Understanding the rapid summer warming and changes in temperature extremes since the mid-1990s over western Europe [J]. *Clim Dyn*, 48(5/6): 1-18.
- Gao L H, Yan Z W, Quan X W, 2015. Observed and SST-forced multidecadal variability in global land surface air temperature [J]. *Clim Dyn*, 44(1/2):

359-369.

- Hansen J ,Ruedy R ,Sato M ,et al. 2010.Global surface temperature change[J].*Rev Geophys* 48( 4) : RG4004.
- Hong X W ,Lu R Y ,Li S L. 2017.Amplified summer warming in Europe–West Asia and Northeast Asia after the mid-1990s[J].*Environ Res Lett* ,12( 9) : 094007.
- IPCC. 2013.Climate change 2013: the physical science basis ,the contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R].Cambridge: Cambridge University Press.
- Kalnay E ,Kanamitsu M ,Kistler R ,et al. ,1996.The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J].*Bull Amer Meteor Soc* 77( 3) : 437-471.
- Li J P ,Wu Z W ,Jiang Z H ,et al. 2010.Can global warming strengthen the East Asian summer monsoon? [J].*J Climate* 23( 24) : 6696-6705.
- 梁乐宁 ,陈海山. 2010.春季华南土壤湿度异常与中国夏季降水的可能联系[J].*大气科学学报* 33( 5) : 536-546. Liang L N ,Chen H S. 2010.Possible linkage between spring soil moisture anomalies over south China and summer rainfall in China[J].*Trans Atmos Sci* ,33( 5) : 536-546.( in Chinese) .
- 马柱国 ,符淙斌 ,谢力 ,等. 2001.土壤湿度和气候变化关系研究中的某些问题[J].*地球科学进展* ,16( 4) : 563-568. Ma Z G ,Fu C B ,Xie L ,et al. 2001.Some problems in the study on the relationship between soil moisture and climatic change[J].*Adv Earth Sci* ,16( 4) : 563-568.( in Chinese) .
- Shukla J ,Mintz Y ,1982.Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate[J].*Science* 215( 4539) : 1498-1501.
- Sun J Q ,Wang H J ,Yuan W. 2008.Decadal variations of the relationship between the summer North Atlantic Oscillation and middle East Asian air temperature[J].*J Geophys Res* ,113( D15) : D15107.
- Sutton R T ,Dong B W. 2012.Atlantic Ocean influence on a shift in European climate in the 1990s[J].*Nature Geosci* 5( 11) : 788-792.
- U S National Research Council. 1994.GOALS( Global Ocean–Atmosphere–Land System) for predicting seasonal-to-interannual climate[M].Washington: National Academy Press: 103.
- van den Dool H. 2003.Performance and analysis of the constructed analogue method applied to US soil moisture over 1981–2001[J].*J Geophys Res* , 108( D16) : 8617.
- 徐康 ,祝从文 ,何金海. 2011a.近 50 年环贝加尔湖区变暖对中国华北夏季降水的影响机理[J].*高原气象* ,30( 2) : 309-317. Xu K ,Zhu C W ,He J H. 2011.Impact of the surface air temperature warming around lake baikal on trend of summer precipitation in North China in the past 50 years [J].*Plateau Meteor* 30( 2) : 309-317.( in Chinese) .
- 徐康 ,何金海 ,祝从文. 2011b.近 50 年中国东部夏季降水与贝加尔湖地表气温年代际变化的关系[J].*气象学报* ,64( 4) : 570-580. Xu K ,He J H ,Zhu C W. 2011.The interdecadal linkage of the summer precipitation in eastern China with the surface air temperature over Lake Baikai in the past 50 years[J].*Acta Meteorologica Sinica* 69( 4) : 570-580.( in Chinese) .
- Yeh T C ,Wetherald R T ,Manabe S ,1984.The effect of soil moisture on the short-term climate and hydrology change: a numerical experiment[J].*Mon Wea Rev* ,112( 3) : 474-490.
- 周晶 ,陈海山. 2012.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 I .基于 CAM3. 1 的模式评估[J].*大气科学* ,36( 6) : 1077-1092. Zhou J ,Chen H S. 2012.Impact of interannual soil moisture anomaly on simulation of extreme climate events in China.Part I : model evaluation of CAM3. 1[J].*Chin J Atmos Sci* 36( 6) : 1077-1092.( in Chinese) .
- Zhu C ,Wang B ,Qian W ,et al. 2012.Recent weakening of northern East Asian summer monsoon: A possible response to global warming[J].*Geophys Res Lett* 39( 9) : 9701.

## Linkage between summer land surface warming in mid-latitude of East Asia and soil moisture anomalies

YU Bo ,CHEN Haishan ,SUN Yue

*Key Laboratory of Meteorological Disaster ,Ministry of Education ( KLME) /Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change ( ILCEC) /Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters ( CIC-FEMD) ,Nanjing University of Information Science & Technology ,Nanjing 210044 ,China*

Based on the ERA-Interim NCEP/NCAP reanalysis data and CPC soil moisture data during 1979—2015 ,this paper investigated the temporal and spatial distribution characteristics of land surface heat in mid-latitude of East Asia in summer and the linkage between soil moisture anomalies in early spring and anomalous land surface warming in mid-latitude of East Asia ,and discussed the possible mechanisms of the influence of soil moisture in early spring on the land surface heat warming in mid-latitude of East Asia in summer. Results show that there is a significant warming trend of summer land surface in mid-latitude of East Asia with the most rapid and strongest warming happened in the Lake Baikal and its south. Meanwhile ,there is an evident interdecadal transition from cold to warm around the middle of 1990s. Further analysis suggests that there are close relationships between spring and summer soil moisture anomalies over regions from the West Siberia to the north of the Lake Baikal and summer soil surface temperature in the Lake Baikal and its south at both interdecadal and interannual scales. Increased spring and summer soil moisture over regions from the West Siberia to the north of the Lake Baikal is usually related to summer land surface warming in the Lake Baikal and its south. The anomalous soil moisture can alter the general circulation anomalies in summer ,thus affect the land surface thermal anomalies in mid-latitude of East Asia in summer. Increased spring and summer soil moisture tends to induce positive geopotential height anomalies and anticyclonic anomalous circulation in the Lake Baikal and its south ,which can further reduce summer cloud amount over the region and result in significant land surface warming in mid-latitude of East Asia. On the contrary ,decreased spring and summer soil moisture usually produces cyclonic anomalous circulation and increases summer cloud amount ,which is not conducive to land surface warming over the region.

**mid-latitude of East Asia; surface soil temperature; land surface warming; soil moisture**

doi: 10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20190407001

(责任编辑: 张福颖)