

荀爱萍, 吴其冈, 胡雅君, 等. 2019. 观测分析非洲南部地区土壤湿度异常对南半球大气环流的显著影响 [J]. 大气科学, 43(3): 552-564.
Xun Aiping, Wu Qigang, Hu Yajun, et al. 2019. The influence of southern Africa soil moisture anomalies on the Southern Hemisphere atmospheric circulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(3): 552-564. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1806.18116

观测分析非洲南部地区土壤湿度异常 对南半球大气环流的显著影响

荀爱萍^{1,2} 吴其冈³ 胡雅君¹ 姚永红⁴

1 海峡气象开放实验室, 厦门 361012

2 厦门市气象台, 厦门 361012

3 复旦大学大气与海洋科学系/大气科学研究院, 上海 200438

4 南京大学大气科学学院, 南京 210093

摘 要 本文基于 44 年 ERA40 再分析月平均土壤湿度资料和大气环流变量场资料, 去除 ENSO 遥相关以及趋势影响后, 利用滞后最大协方差方法分析非洲南部地区土壤湿度分布与南半球大气环流异常之间的线性耦合。第一最大协方差模态的结果表明: 在南半球冬季 (Jun-Jul-Aug, 6~8 月) 和夏季 (Jan-Feb-Mar, 1~3 月), 大气中类似南极涛动 (Antarctic Oscillation, 简称 AAO) 正位相的环流型与超前月份 (最长时间达到 5 个月) 的非洲南部地区土壤湿度的异常分布显著相关。基于土壤湿度变率中心的线性回归分析方法证实非洲南部地区其北部土壤湿度正异常、中南部土壤湿度负异常的空间分布对后期夏季和冬季的大气有显著的反馈作用。诊断结果显示由于夏秋季节和春季初夏非洲南部地区土壤湿度异常均有显著的持续性, 同时对后期 AAO 产生持续增强作用, 所以滞后最大协方差方法可以检测出它们对后期 AAO 的显著影响。以上非洲南部地区土壤湿度异常超前于南极涛动的信号, 将有助于加强对土壤湿度反馈机制及其对南半球大尺度环流变率影响的认识。

关键词 土壤湿度 非洲南部地区 最大协方差分析 南极涛动

文章编号 1006-9895(2019)03-0552-13

中图分类号 P46

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1806.18116

The Influence of Southern Africa Soil Moisture Anomalies on the Southern Hemisphere Atmospheric Circulation

XUN Aiping^{1,2}, WU Qigang³, HU Yajun¹, and YAO Yonghong⁴

1 Laboratory of Straits Meteorology, Xiamen 361012

2 Xiamen Meteorological Bureau, Xiamen 361012

3 Department of Atmospheric and Ocean Sciences/Institute of Atmospheric Sciences, Fudan University, Shanghai 200438

4 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023

Abstract This study uses maximum covariance analysis (MCA) to investigate the linear covariance between anomalous soil moisture at southern Africa and atmospheric circulation in the Southern Hemisphere (SH) based on the ERA40 reanalysis dataset. In the Southern Hemisphere winter (JJA, Jun-Jul-Aug) and summer (JFM, Jan-Feb-Mar), the

收稿日期 2018-01-23; 网络预出版日期 2018-06-12

作者简介 荀爱萍, 女, 1990 年出生, 硕士研究生, 工程师, 主要从事陆气相互作用研究。E-mail: xunaiping@foxmail.com

通讯作者 吴其冈, E-mail: qigangwu@nju.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41075052, 国家重点基础研究发展规划项目 2012CB956002

Found by National Natural Science Foundation of China (Grant 41075052), National Program on Key Basic Reserch Project (Grant 2012CB956002)

atmospheric signal resembling the positive phase of the Antarctic Oscillation (AAO) is significantly correlated with persistent soil moisture anomalies in southern Africa that can be up to five months ahead in the leading MCA modes. Regression analysis based on the soil moisture anomaly centers from the MCA covariance patterns confirms that early-season positive soil moisture anomaly in the northern part of southern Africa and negative soil moisture anomaly in the central and southern part of southern Africa later have significant effects on winter and summer atmospheric circulation. Significant squared covariance of JJA (JFM) AAO seems to be related to persistent soil moisture anomalies in the preceding summer and autumn (spring and early summer) and their continuous and cumulative impacts on the atmosphere. The leading time of southern Africa soil moisture anomaly provides an implication for skillful predictability of large-scale atmospheric variability in the Southern Hemisphere winter and summer.

Keywords Soil moisture, Southern Africa, Maximum covariance analysis, Antarctic Oscillation

1 引言

土壤湿度 (Soil Moisture, 简称 SM) 是反映地表水文过程的一个总体指标, 是陆面过程的重要参量, 土壤中的水分含量主要是由土壤总的含水量、降水、蒸发和径流等因素综合决定 (郭维栋等, 2003), 对气候变化具有重要作用 (林朝晖等, 2001; Song et al., 2009)。研究表明, 对气候变化影响而言, 土壤湿度是仅次于海表面温度 (Sea Surface Temperature, 简称 SST) 的参量, 在中高纬度地区, 土壤湿度对气候变化的影响与海温是相当的 (US National Research Council, 1994; 马柱国等, 2001)。现在许多的模式结果和观测研究都已经强调土壤湿度在区域气候变化中的重要性 (Betts, 2004; Koster et al, 2004; Seneviratne et al, 2006; Taylor and Ellis, 2006)。土壤湿度用于对温度和降水等气候变量的季节性预报, 能提高预报的准确性 (Schlosser and Milly, 2002; Koster et al, 2000, 2010a, 2010b; Lorenz et al, 2010)。Shukla and Mintz (1982) 利用数值模式对比了干湿两种状态下土壤湿度的影响, 结果表明干湿土壤对后期的气温和降水的影响存在较大的差异。Walker and Rowntree (1977) 做的敏感性试验也指出干土壤使后期的温度升高, 湿土壤使后期的降水增加。马柱国等 (2000) 分析发现土壤湿度和降水有正相关关系, 与气温呈负相关关系。左志燕和张人禾 (2007) 通过资料的诊断分析, 发现当春季从长江中下游到华北的土壤湿度偏湿, 东北土壤湿度偏干时, 对应中国夏季东北和长江流域降水偏多, 华北和南京降水偏少。Zhang and Zuo (2011) 利用土壤湿度观测资料和再分析资料研究发现春季的土壤湿度是通过改变地表热力条件影响后期夏季东

亚的季风环流和中国东部的降水。

过去的研究着重于区域性土壤湿度与温度或降水的关系, 缺乏土壤湿度异常对大尺度大气环流的影响研究。王万秋 (1991) 认为, 土壤湿度异常的作用是以长波波列的形式向异常区以外传播, 从而影响大尺度的大气环流。尚国伟和吴其冈 (2015) 利用 ERA40 资料研究发现大气中类似于负位相北极涛动的环流型与前期土壤湿度的持续变化显著相关。由于南半球的陆地较少, 对于南半球土壤湿度异常的研究少有涉及。南半球中高纬主要的气候变率模态是南极涛动 (Antarctic Oscillation, 简称 AAO), 不少研究表明, 南极涛动对北半球大气环流以及气候特征有重要的影响 (鲍学俊等, 2006; 范可和王会军, 2006; 宋洁和李崇银, 2009)。南半球土壤湿度的异常能否引起大气环流主要气候变率模态的变化是本文的研究重点。本文主要分析非洲南部地区土壤湿度异常对 AAO 型大气环流的影响。本研究将增强对土壤湿度反馈机制的认识, 有助于全面理解土壤湿度在全球大尺度环流以及季节气候变化中的作用。

2 资料和方法

2.1 资料

由于已有的站点观测土壤湿度资料质量存在差异, 且观测密度不同, 张文君等 (2008) 利用中国区域观测土壤湿度资料评估了欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 40 年再分析资料 (简称 ERA40 资料) 等四套土壤湿度资料, 发现 ERA40 土壤湿度的年际变化与观测相关最好。ERA40 使用 TESSEL (Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchanges overland) 陆面过程 (van den Hurk et al, 2000), 有 4 个土壤层, 厚度分别为 7、21、72、189 cm,

资料时间1957年9月至2002年8月,空间分辨率为T159(约为125 km),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,为避免土壤湿度偏差过大,ERA40通过相对湿度和温度不断地校正土壤湿度(Uppala et al, 2005)。本文使用ERA40资料,时间为1958~2001年,资料包括:月平均ERA40土壤湿度资料,850 hPa、500 hPa以及250 hPa位势高度场资料。对于滞后最大协方差分析(MCA)的结果,经过多层计算,发现第一层土壤湿度和第二层土壤湿度和大气环流场的变化联系比较紧密,并且这两层土壤湿度对大气环流场的影响类似,故本文只给出了第一层土壤湿度的分析结果。

关于检验资料依赖性,我们也利用NCEP再分析资料(Kalnay et al., 1996)来代替ERA40大气资料进行MCA分析。

2.2 方法

资料预处理:(1)使用最小二乘法去除土壤湿度与大气要素距平场线性趋势以减小长期趋势造成的影响;(2)将土壤湿度场与大气要素场分别回归到前期Niño3.4区海温异常指数,回归系数选取前6个月中的最大值,以去除热带太平洋海温中厄尔尼诺和南方涛动(ENSO)变率对SM和大气的影。经过步骤(1)和(2)处理后得到土壤湿度异常场(SM)以及850 hPa、500 hPa以及250 hPa位势高度异常场(分别简称Z850、Z500、Z250);(3)Z500与SM均乘以纬度余弦的平方根进行面积加权以确保相应的面积有相应的权重。

滞后最大协方差分析(lagged maximum covariance analysis, MCA分析):通过对两个场的协方差矩阵做奇异值分解(singular value decomposition, 简称SVD),分离出成对的两个场的空间型以及各自对应的时间序列,每个场都被扩展到彼此正交的空间型以保证它们之间协方差的最大化,其对应的时间序列同样是相互正交的。Czaja and Frankignoul (2004)指出滞后最大协方差分析的优点在于能够很好地区分变量之间的因果关系,已有很多研究发现,大气环流对降水有显著影响,而土壤湿度的变化与降水密切相关(李国平等, 1991),因为在月和年际时间尺度上,大气变化的记忆时间一般小于一个月,大气对土壤湿度的强迫主要是白噪声。如果土壤湿度只是被动响应大气强迫,超过大气的持续时间(大约一个月)后,大气和土壤湿度之间就不会存在显著的协方差。相

反,如果土壤湿度影响大气,当土壤湿度异常超前大气一个月后,两者之间仍应该存在显著的协方差。因此,在一年的不同季节里,当土壤湿度异常超前大气时,我们可以用月平均观测资料寻找大气和土壤湿度之间是否存在显著的协方差。为了研究非洲南部地区土壤湿度对大气的影,对不同季节南半球中高纬地区(20°S~90°S, 0°~360°)Z500(例如考虑连续3个月Z500),与不同滞后时间非洲南部地区(0°~45°S, 0°~60°E)月平均SM(例如SM在超前5个月和滞后2个月时间)做MCA分析, MCA分析的资料长度均为43 a。

蒙特卡洛检验方法:检验MCA分析两个场的平均协方差以及相关系数在统计意义上的显著性。利用最初的SM与打乱时间顺序的Z500重复做100次MCA分析,打破两个变量场在时间次序上的关联性。需要注意的是,打乱的仅仅是年的时间顺序,月份的次序不变,并且是以连续的2 a为单元。

EOF分析:对冬季(JJA, 6~8月)和夏季(JFM, 1~3月)南半球Z500进行EOF分析,第一EOF模态的空间型定义为南极涛动(AAO),其对应的标准化时间序列定义为冬季和夏季南极涛动指数。

3 结果分析

3.1 MCA第一模态检验结果分析

图1给出了非洲南部地区(0°~45°S, 0°~60°E)SM和南半球中高纬地区(20°S~90°S, 0°~360°)Z500与MCA第一模态(MCA1)有关的平方协方差(Squared Covariance, 简称SC)(图1a)和相关系数(图1b)随季节超前/滞后的蒙特卡洛检验结果。MCA计算使用连续三个月的Z500和SM, SM超前Z500五个月到滞后二个月,图中横坐标代表Z500连续三月份,纵坐标负值代表SM超前Z500,正值代表Z500超前SM。图1表明,对于全年大部分时间当Z500超前SM时,SC不显著;而当SM超前南半球初夏到冬季(NDJ-JJA, NDJ代表11~1月)的Z500时,SC显著。对于南半球冬季(JJA)Z500, SM超前其5个月到同期时,SC显著,其中SM超前3~5个月,相关系数显著。表1为Z500固定为JJA和JFM时MCA第一模态的相应统计量变化,从表中可见,当SM超前南半球冬季(JJA)Z500 5~3个月时, MCA1解释方差贡献分别为19.28%、16.02%和16.41%,相关系数都大于

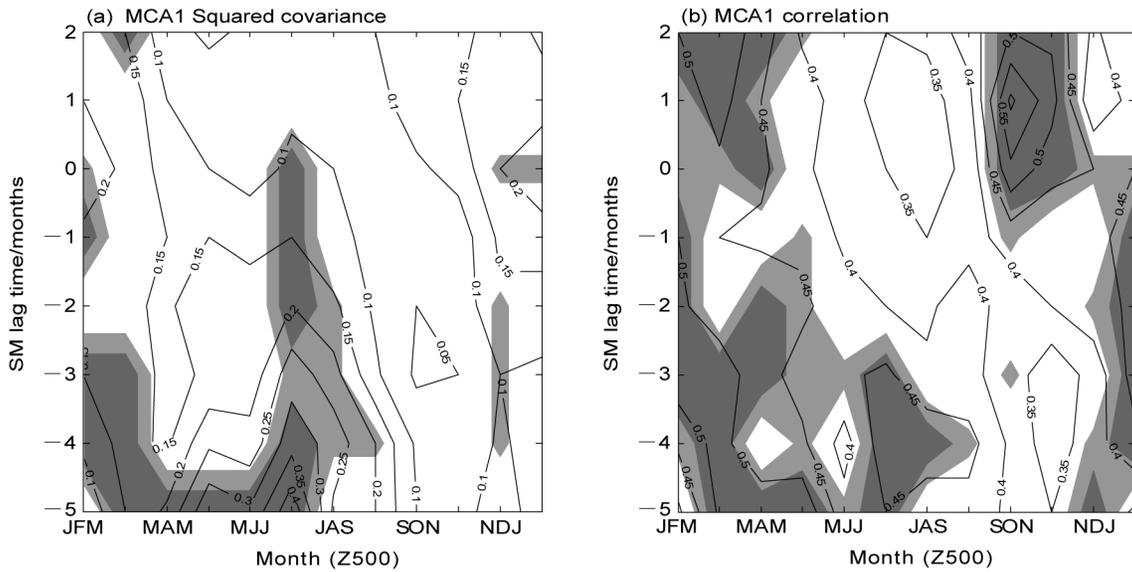


图1 1958~2001 非洲南部地区(0°~45°S, 0°~60°E) SM和南半球中高纬度(20°~90°S, 0°~360°) Z500与MCA第一模态(MCA1)有关的(a)平方协方差(Squared Covariance, SC)和(b)相关系数随季节和超前/滞后时间的变化(SM和Z500来自ERA40资料)。阴影表示SC通过95%(深)和99%(浅)信度检验

Fig. 1 (a) The squared covariance (SC) and (b) the correlation coefficient associated with the first MCA mode (MCA1) between Z500 in region(20° S-90°S, 0°-360°) and SM in southern Africa (0°-45°S, 0°-60°E) as a function of seasons and leading-lagging times (SM and Z500 data are from ERA40 data). Shadings indicate values at 95% (heavy) and 99% (light) confidence levels

表1 当Z500固定为冬季(JJA, Jun-Jul-Aug)和夏季(JFM, Jan-Feb-Mar)时MCA第一模态(MCA1)的相应统计量(R1: MCA-Z500和MCA-SM时间序列的相关系数; R2: MCA-Z500时间序列与AAO指数的相关系数; SC: 平方协方差; SCF: 方差贡献率)

Table 1 Statistics associated with the first MCA mode (MCA1) when Z500 is specified as that in JJA (Jun-Jul-Aug) and JFM (Jan-Feb-Mar). R1: correlation coefficient between time series of MCA-Z500 and MCA-SM; R2: correlation coefficient between time series of MCA-Z500 and AAO (Antarctic Oscillation) index; SC: squared covariance; SCF: squared covariance fraction

季节 (Z500)	Lag/ months	R1	R2	SC	SCF
JJA	-5	0.451**	0.905	0.44**	19.28%
	-4	0.480**	0.909	0.33**	16.02%
	-3	0.460**	0.907	0.28*	16.41%
JFM	-4	0.457*	0.895	0.11**	16.85%
	-3	0.526**	0.907	0.15**	16.31%

注: Lag表示SM滞后Z500的时间。

*代表通过99%信度水平检验; **代表通过95%信度水平检验

0.45, 超前4个月时最大为0.48, 说明南半球冬季大气环流很可能受前期夏秋季土壤湿度的显著影响。对于南半球夏季(JFM), 当SM超前Z500 3~4个月时, SC以及相关系数均显著, MCA1解释方差贡献

分别为16.31%和16.85%, 相关系数分别为0.526和0.457, 这说明非洲南部地区南半球春季土壤湿度异常也很可能对南半球夏季大气环流产生显著的影响。

3.2 土壤湿度异常对南半球冬季大气的影响

为显示南半球夏季至冬季土壤湿度对冬季大气环流的影响, 我们将未加权的土壤湿度异常场与位势高度异常场分别回归到相应季节标准化后的MCA-SM时间序列上, 得到SM超前南半球冬季(JJA) Z500 5个月到滞后其1个月时SM(图2a-g左)和Z500(图2a-g右)的空间分布(其中图2a-c通过90%的信度检验)。从图2可以看到, SM超前Z500 5~2个月时, 土壤湿度的空间型都非常相似(图2a-d左), 主要特征是以15°S左右为界限的非洲南部地区其南部、北部土壤湿度异常的反相的偶极型分布, 并随着SM超前时间的减少, 北部土壤湿度正异常持续且有所增强, 而南部土壤湿度负异常不断减弱。到SM超前Z500为1个月至滞后其1个月时南部负异常基本消失。计算图2a-c中相邻两个季节的MCA-SM时间序列, 结果表明JFM与FMA(2~4月)的相关系数为0.717, FMA与MAM(3~5月)的相关系数为0.782, 说明土壤湿度异常在空间分布和时间变化上有显著的持续性。

SM超前Z500 5个月到滞后其1个月时, Z500

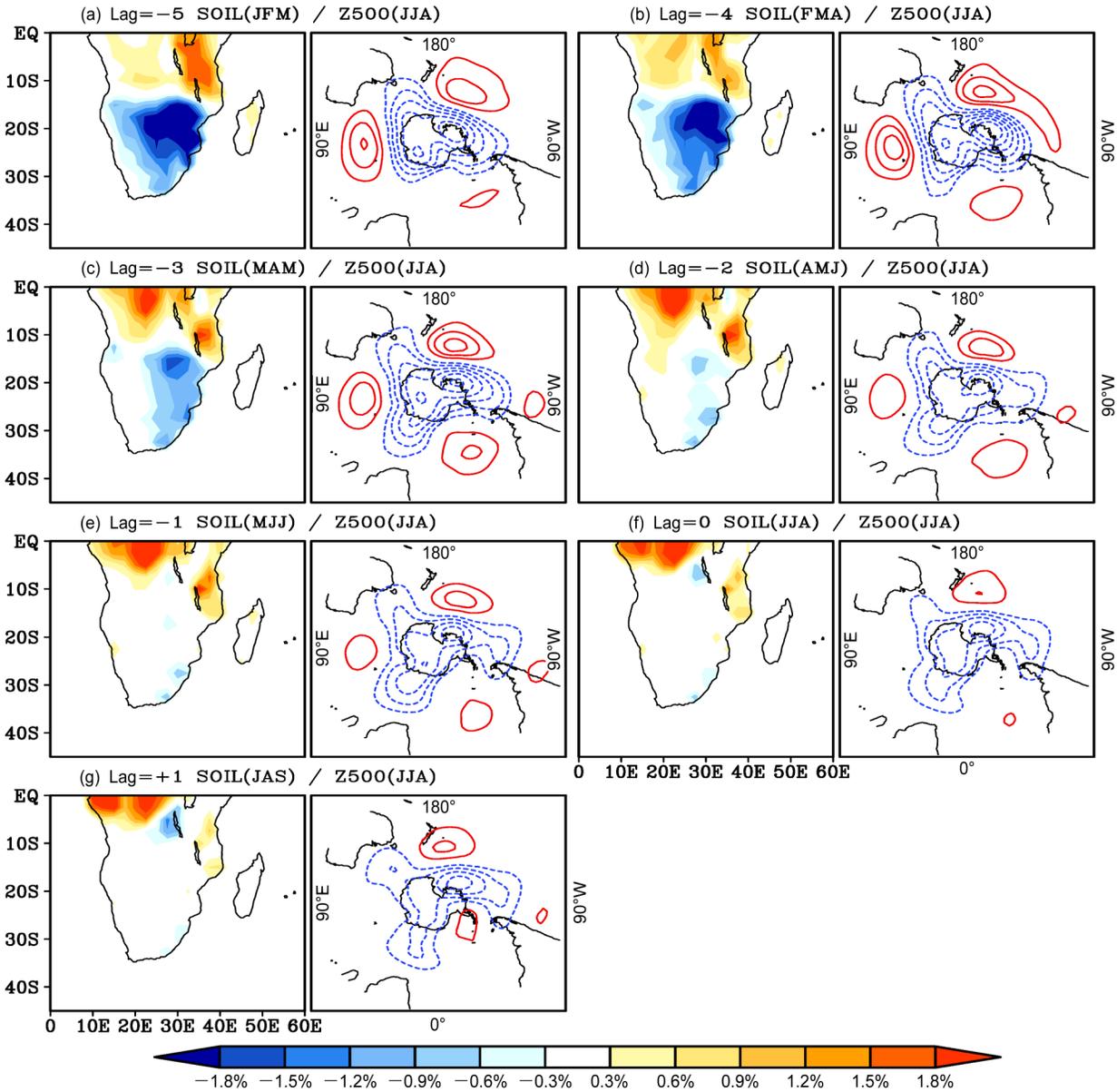


图2 SM超前JJA Z500 5个月至滞后其1个月 (SM滞后时间Lag等于-5至+1 months) 的MCA第一模态: (a-g左图) SM的同质相关协方差图 (阴影); (a-g右图) Z500的异质相关协方差图 (等值线间距是5 gpm, 虚线是负值, 省略了零等值线)

Fig. 2 (a-g left) Homogeneous SM (shaded) and (a-g right) heterogeneous Z500 (contours) covariance maps of JJA Z500 and SM in the first MCA mode at SM lag times from -5 to +1 months. Contour interval is 5 gpm, dashed contours are negatives, and the zero line is omitted

的空间分布都类似于正位相的南极涛动 (AAO) (图2a-g右), 即在南极大陆有负异常, 最大值为-30 gpm, 而在中纬度地区为正异常, 最大值为10~15 gpm。表1中可以看出, 当SM超前南半球冬季 (JJA) Z500 5个月到3个月时, MCA-Z500时间序列与南半球冬季 (JJA) 的AAO指数高度相关, 两者的相关系数都在0.9以上, 说明非洲南部地区其北部土壤湿度正异常变化、南部负异常变化时, 将引起冬季正位相AAO变化。

以上的分析结果表明, JJA的Z500与前期JFM-MAM SM的相关性最为显著, 这在土壤湿度场中就有很好反映, 为了进一步分析前期土壤湿度对后期位势高度场影响的过程, 我们选取SM超前Z500 4个月时的结果为例 (超前5个月以及3个月的情况类似, 图略)。图3a是MCA-SM在SM滞后时间 (Lag) 取-4 months时的标准化时间序列演变, 该时间序列可以看出, 在1970年和1987年左右有比较明显的年代际变化, 如果将MAM、AMJ

(4~6月)、MJJ (5~7月)、JJA 的土壤湿度异常回归到该时间序列上 (图 3b-e), 可以看出非洲南部地区土壤湿度的偶极型异常空间型随时间变化具有持续性, 但随着时间减弱, 这与图 2c-f 非常类似。

为了分析土壤湿度对整个对流层大气的影响, 图 4a-d 为 MAM、AMJ、MJJ、JJA 的 Z850 对图 3a 时间序列的回归结果, 图中可以看出 FMA 土壤湿度异常对后期 Z850 场的影响是一个发展的过程。对应 MAM 和 AMJ 的 Z850 场主要是在中纬度地区以及南极地区的高度负异常, 负异常值为 -4~-8 gpm, 太平洋地区有 4 gpm 左右的正异常。到 MJJ, 大西洋地区的负异常减弱, 南极地区的负异常加强, 范围扩大, 负异常最大达到 -12 gpm, 同时澳大利亚附近的负异常消失, 印度洋地区出现 4 gpm 左右的正异常。对应 JJA 时, 南极大陆形成一个完整的低压区, 低压中心负异常达到 -24 gpm, 印度洋以及太平洋区域为高压区, 高压中心正异常值在 4~12 gpm, 为类似正位相 AAO 的空间型。图 4e-h 是 MAM、AMJ、MJJ、JJA 的 Z250 对图 3a 时间序列的回归结果, 图中显示, Z250 对于前期土壤湿度的反馈信号同样是类似正位相 AAO 的空间型, 这说明南半球冬季整个对流层大气对土壤湿度异常强迫响应的信号是相当正压的。

类似的分析同样显示图 2a、c-e 中的土壤湿度异常场对后期大气产生持续增强的 AAO 型影响。正因为以上 JFM 至 MAM 偶极型土壤湿度的持续性变化, 和对后期大气连续相似性的反馈作用, 我们利用 MCA 分析可以诊断出夏秋季节的非洲南部地区土壤湿度异常对后期冬季 AAO 的显著影响作用。

前期非洲南部地区土壤湿度对后期环流有影响的异常空间分布型为偶极型的分布 (图 2a-c), 即其北部与南部的土壤湿度变率均较大, 且其异常是反相变化的关系。我们以 15°S 为界限将南北两个不同的区域的土壤湿度异常的平均值作为一个指数, 将 JJA 的 Z500 回归到这两个指数上, 发现这两个区域的土壤湿度对高度场的影响是相反的 (图略)。故我们将北部土壤湿度异常平均值与南部土壤湿度异常平均值的差值作为一个新的非洲南部地区土壤湿度异常指数, 这个指数可以表征非洲南部地区土壤湿度的空间型 (图 2)。计算不同月份土壤湿度异常指数的相关系数发现, JFM 与 FMA 的相关系数为 0.67, FMA 与 MAM 的相关系数为 0.54, 都能通过 95% 的信度检验, 这进一步说明了

前期土壤湿度异常的变化在时间上具有很好的持续性, 与前面所得结论一致。

为了与 MCA 分析结果进行对比, 我们利用 JFM、FMA 以及 MAM 土壤湿度异常指数的时间序列对 JJA 的 Z500 做回归分析 (图 5a-c), 结果表明, 大气对土壤湿度响应的型也是类似的, Z500 负异常在南极大陆附近, 最大值约为 -20 gpm, 正异常在中纬度地区, 最大值为 10 gpm, 说明非洲南部地区 JFM、FMA 以及 MAM 的土壤湿度是对冬季南半球 AAO 型大气环流异常有持续和直接的影响。与 MCA 分析的结果对比发现, 高度场异常数值略小, 这是因为 MCA 分析最大化了两个场之间的协方差, 而回归分析仅仅是根据土壤湿度异常的平均值得到的。需要注意的是, 回归分析除了季节以及区域的选定外, 完全独立于 MCA 分析, 因此证明了 MCA 结果的可信程度。

3.3 土壤湿度异常对南半球夏季大气的影响

为解释南半球春季土壤湿度与夏季大气环流的相互影响, 图 6 给出了 SM 超前 JFM Z500 4 个月至滞后其 1 个月时 MCA1 的空间型 (图 6a、b 信度水平超过 90%), 从图 6a-c 左列图可以看出, 土壤湿度的空间型在超前 Z500 为 4~2 个月时, 非洲南部地区其西北部土壤湿度正异常不断减小, 中部负异常逐渐增强。在超前 Z500 为 1 个月至滞后其 1 个月时, 负异常逐渐减弱, 整个非洲南部地区以正异常为主, 且南部正异常更明显, 这可能与夏季该地区降水增多有关。SM 超前 Z500 为 4 个月至滞后其 1 个月, Z500 的空间型都表现为类似于正位相的南极涛动 (AAO) (图 6a-f 右), 在南极地区有多达 25 gpm 的负异常, 而在中纬度地区有约 10~15 gpm 的正异常。同样从表 1 中可以看出 SM 超前 JFM 的 Z500 为 4~3 个月时, MCA-Z500 时间序列与 JFM 的 AAO 指数高度相关, 两者的相关系数都在 0.9 左右, 说明春季非洲南部地区土壤湿度的异常变化导致夏季正位相 AAO 增强。利用春季非洲南部地区的土壤湿度异常信息, 将有效提高夏季南半球气候预测准确率。

图 7a 的时间序列是 JFM-Z500 与 SON-SM (Lag=-4 months) 第一模态 MCA-SM 标准化的时间序列, 图 7b-e 给出了土壤湿度滞后 SON (9~11 月) 1~4 个月的持续性变化, 可以看出, 该变化与图 6 对应季节的土壤湿度空间型类似, 这也说明 MCA 能揭示春季土壤湿度异常与夏季大气的相互作用。图 8a-d 给出了滞后 SON 1~4 个月时 Z850

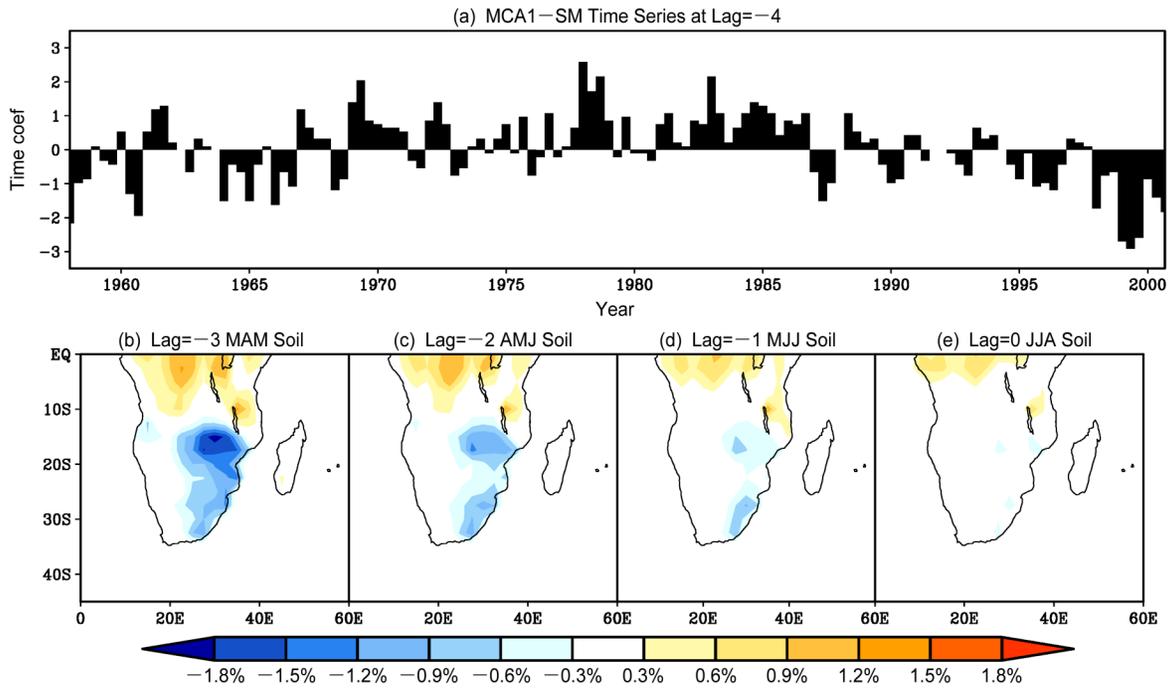


图3 (a) JJA-Z500 和 FMA-SM (SM 滞后时间 Lag 为 -4 months) 第一模态 MCA-SM 标准化的时间序列。SM 异常对图 3a 时间序列的回归 (阴影); (b) SM 异常滞后 1 个月; (c) SM 异常滞后 2 个月; (d) SM 异常滞后 3 个月; (e) SM 异常滞后 4 个月

Fig. 3 (a) Normalized MCA-SM time series for the first MCA mode at SM lag time of -4 months (FMA) when Z500 is fixed in JJA. Regression maps of SM anomalies lagged at (b) 1 month (MAM SM, MAM: Mar-Apr-May), (c) 2 months (AMJ SM, AMJ: Apr-May-Jun), (d) 3 months (MJJ SM), and (e) 4 months (JJA SM) onto the MCA-SM time series shown in Fig. 3a (shaded)

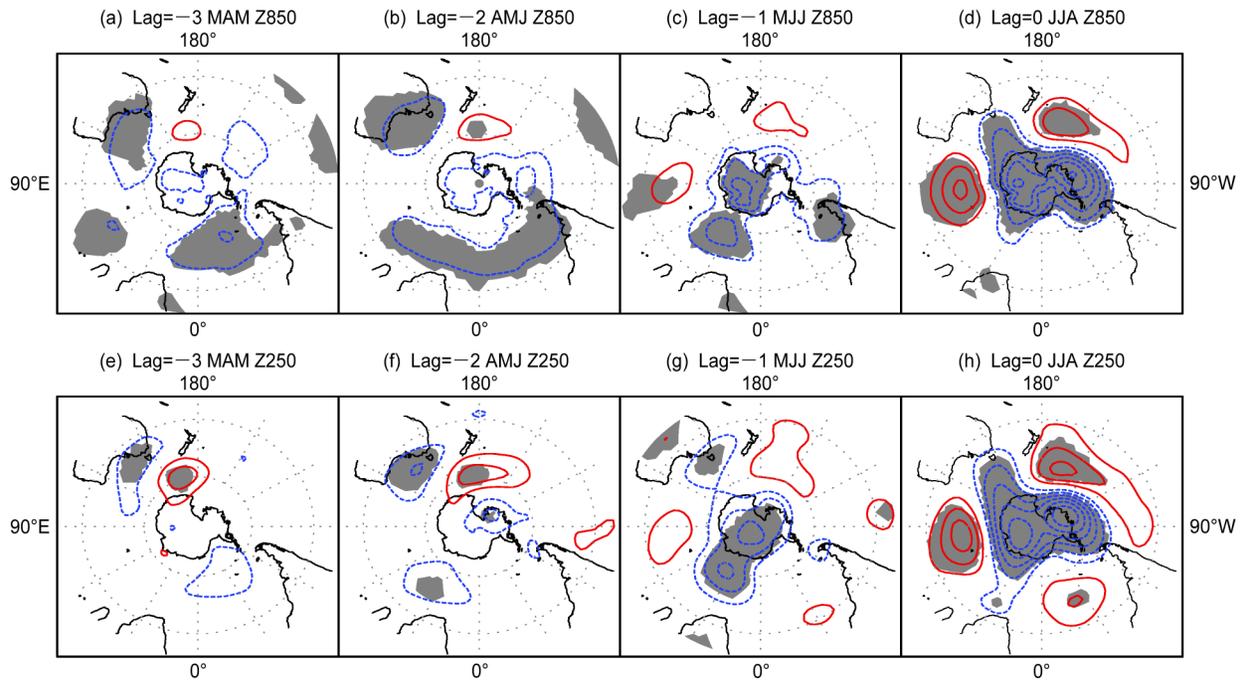


图4 滞后 FMA SM 1~4 个月的 (a-d) Z850 和 (e-h) Z250 对图 3a 时间序列的回归。等值线间距是 (a-d) 4 gpm 和 (e-h) 6 gpm, 虚线是负值, 省略了零等值线。阴影部分表示通过 95% 的信度检验

Fig. 4 Lagged regression of (a-d) Z850 and (e-h) Z250 at lag times from 1 to 4 months (to FMA SM) onto the time series shown in Fig. 3a. Contour intervals are (a-d) 4 gpm and (e-h) 6 gpm, dashed contours are negatives, and the zero line is omitted. Shadings indicate values at 95% confidence level

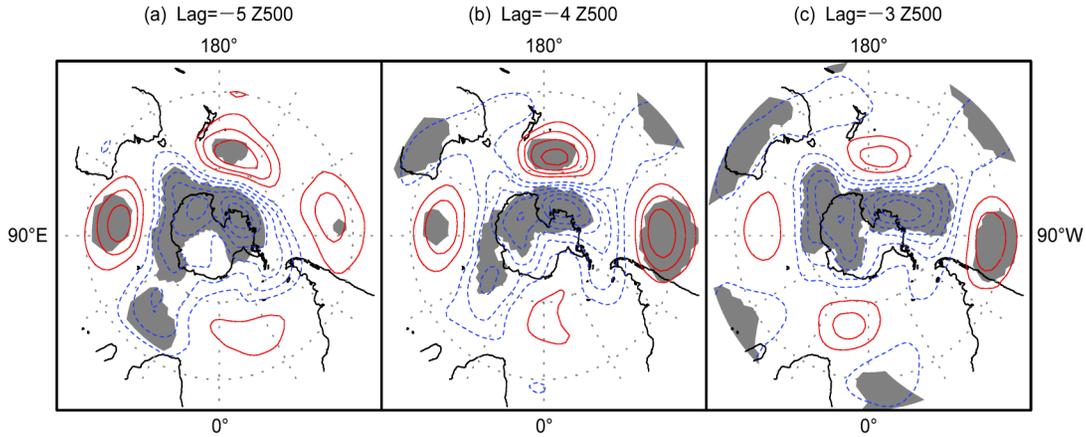


图5 JJA Z500对 (a) JFM、(b) FMA和 (c) MAM非洲南部地区土壤湿度异常指数的时间序列回归。阴影部分表示通过95%的信度检验，等值线间距是3 gpm，虚线是负值，省略了零等值线

Fig. 5 Maps of JJA Z500t regressed onto time series of (a) JFM, (b) FMA (Feb-Mar-Apr), and (c) MAM southern Africa SM anomaly index. Shadings are values at 95% confidence level. Contour interval is 3 gpm, dashed contours are negatives, and the zero contour is omitted

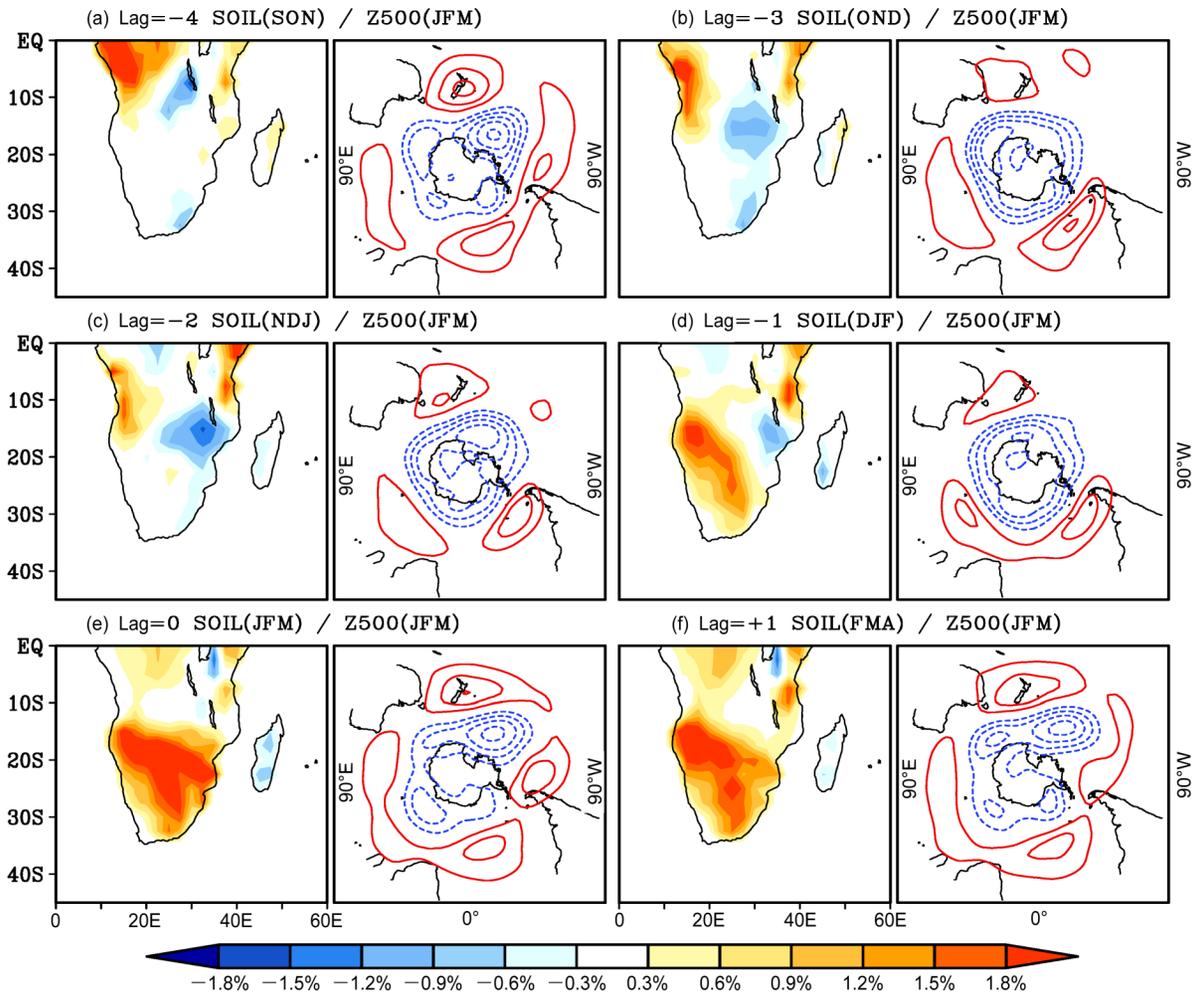


图6 SM超前JFM Z500 4个月至滞后其1个月 (Lag等于-4至+1 months)的MCA第一模态：(a-f左图) SM的同质相关协方差图 (阴影)；(a-f右图) Z500的异质相关协方差图。等值线间距是5gpm，虚线是负值，省略了零等值线

Fig. 6 (a-f left) Homogeneous SM (shaded) and (a-f right) heterogeneous Z500 covariance maps of JFM Z500 and SM in the first MCA mode at SM lag times from -4 to +1 months. Contour interval is 5 gpm, dashed contours are negatives, and the zero contour is omitted

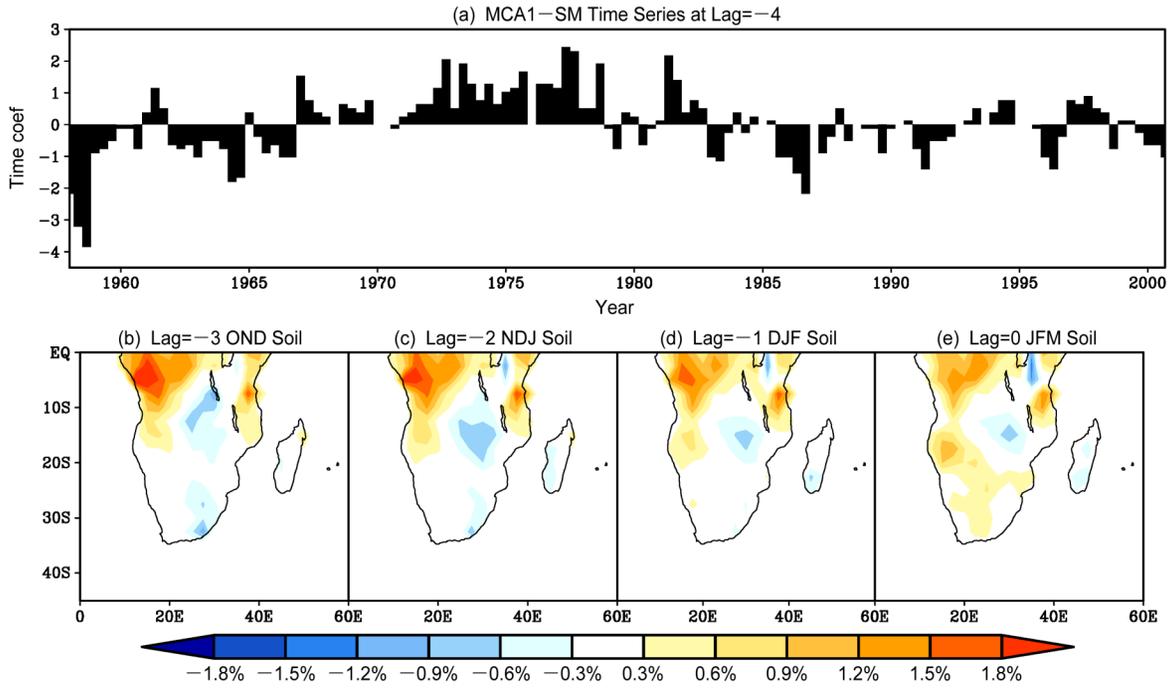


图7 (a) JFM-Z500 和 SON-SM (SM滞后时间Lag为-4 months) 第一模态 MCA-SM 标准化的时间序列。SM异常对图7a时间序列的回归: (b) SM异常滞后1个月; (c) SM异常滞后2个月; (d) SM异常滞后3个月; (e) SM异常滞后4个月

Fig. 7 (a) Normalized MCA-SM time series for the first MCA mode at SM lag time of -4 months (SON) when Z500 is fixed in JFM; (b-e) regression maps of SM anomalies lagged at (b) 1 month (OND SM, OND: Oct-Nov-Dec), (c) 2 months (NDJ SM), (d) 3 months (DJF SM), and (e) 4 months (JFM SM) onto the MCA-SM time series shown in Fig. 7a

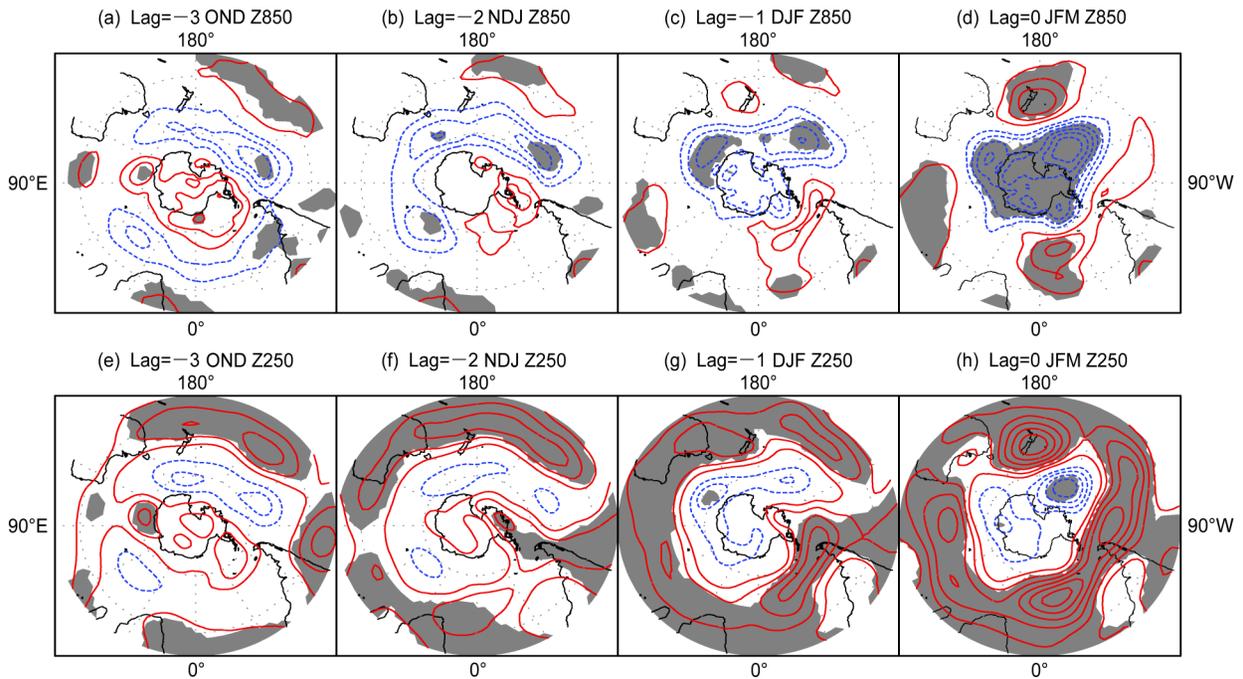


图8 滞后SON SM 1~4个月的(a-d) Z850和(e-h) Z250对图7a时间序列的回归。等值线间距是(a-d) 2 gpm和(e-h) 4 gpm, 虚线是负值, 省略了零等值线。阴影部分表示通过95%的信度检验

Fig. 8 Regression of (a-d) Z850 and (e-h) Z250 at lag times from 1 to 4 months (to SON SM, SON: Sep-Oct-NOv) onto the time series shown in Fig. 7a. Contour intervals are (a-d) 2 gpm and (e-h) 4 gpm, dashed contours are negatives, and the zero line is omitted. Shadings indicate values at 95% confidence level

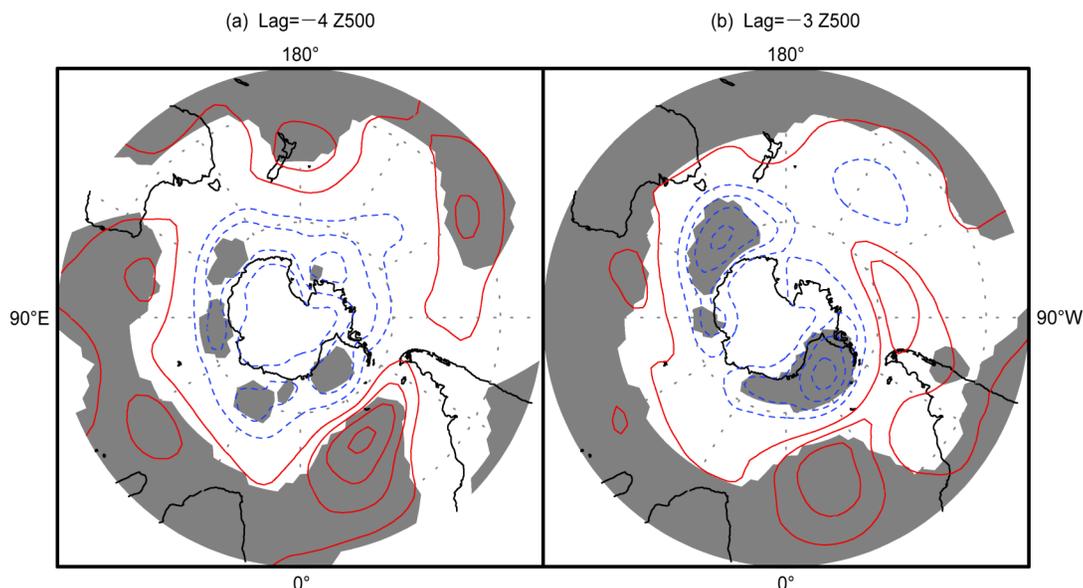


图9 JFM的Z500对(a) SON(9~11月)和(b) OND(10~12月)非洲南部地区土壤湿度异常指数的时间序列回归。阴影部分表示通过95%的信度检验,等值线间距是3 gpm,虚线是负值,省略了零等值线

Fig. 9 Regression maps of the JFM 500 hPa geopotential height field onto time series of the (a) SON (Sep-Oct-Nov) and (b) OND (Oct-Nov-Dec) southern Africa SM anomaly index. Shadings indicate values at 95% confidence level. Contour interval is 3 gpm, dashed contours are negatives, and the zero contour is omitted

对SM的响应,表现为夏季大气正位相AAO增强的过程,在南极地区有负异常,中纬度地区有正异常。图8e-h是滞后SON 1~4个月的Z250对SM的响应,在南极地区有负异常,而在中纬度地区有显著正异常(约20 gpm),是类似正位相的AAO,这表明夏季整个对流层大气对春季土壤湿度异常强迫的响应也是相当正压的。进一步的分析同样揭示图7b-d中的土壤湿度异常场对后期AAO型大气产生持续增强作用。正因为以上SON至DJF(12~2月)土壤湿度的持续性变化,和对后期AAO的持续影响,我们利用MCA分析可以诊断出春季至初夏非洲南部地区土壤湿度异常对JFM-AAO的显著影响。

同样,我们由非洲南部地区土壤湿度的季节演变图(图6a,b)可以看出,其北部与南部的土壤湿度变率具有反相变化关系。同样可以用3.2章节中的土壤湿度异常指数表征春季土壤湿度变化,为了验证夏季大气对春季土壤湿度指数的敏感性,将JFM的Z500分别回归到SON以及OND(10-12月)的土壤湿度异常指数得到回归系数图(图9),可以看到,夏季Z500对于SON以及OND土壤湿度异常的响应同样是类似正位相的AAO型,在南极地区有-12 gpm的负异常,而在中纬度地区有6~

9 gpm的正异常。这从侧面证明了MCA结果的客观性和可信程度,也能说明非洲南部地区土壤湿度异常指数可以很好地表征非洲南部地区土壤湿度异常变率对大气环流的影响。

4 结论

本文利用44年(1958~2001)年ERA40再分析月平均土壤湿度场和大气环流场资料,去除了ENSO以及趋势变化的影响后,通过滞后最大协方差分析以及回归分析方法研究前期非洲南部地区土壤湿度异常对后期南半球大气环流的影响。主要结论如下:

(1) MCA分析的结果表明持续性南半球夏秋季节(JFM、FMA、MAM)非洲南部地区的土壤湿度异常会对南半球冬季(JJA)大气环流产生重要影响,南半球春季初夏(SON、OND)土壤湿度异常会对南半球夏季(JFM)的大气环流产生重要影响,回归分析进一步证明MCA分析结果的客观性和可靠性。

(2) 夏秋季节非洲南部地区其北部土壤湿度正异常、南部土壤湿度负异常的偶极空间分布引起后期南半球冬季大气中类似AAO正位相的环流型加

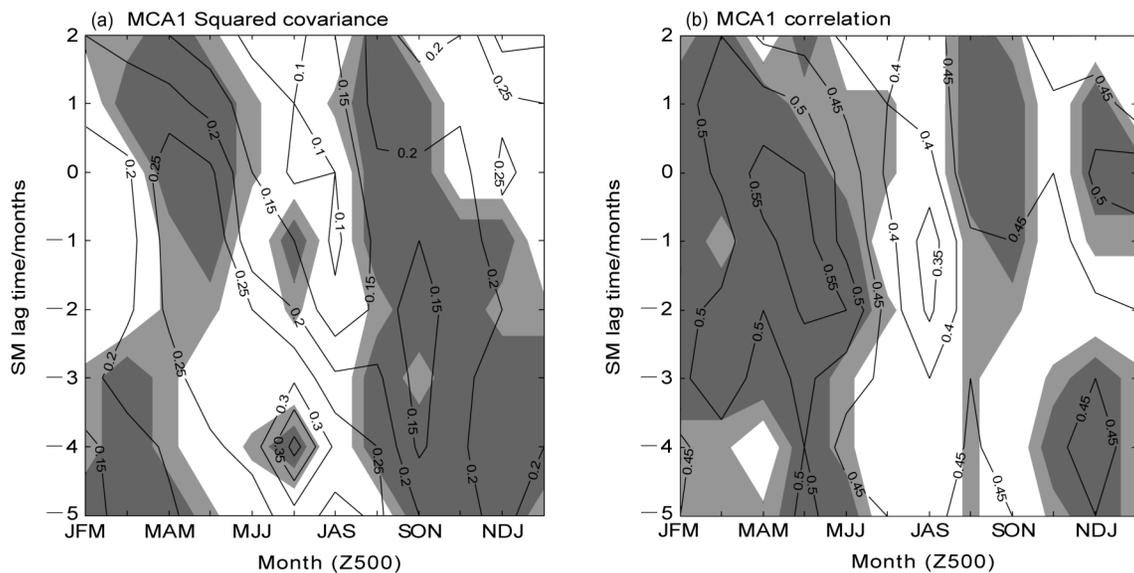


图10 同图1, 但利用NCEP再分析Z500代替ERA40 Z500资料和ERA40 SM资料做MCA分析
Fig. 10 Same as Fig. 1, except that the NCEP reanalysis Z500 and ERA40 SM data are used in the MCA

强, 大气在南极地区以及中纬度地区均有显著的影响, 且这种影响在对流层呈现正压结构。

(3) 春季初夏非洲南部地区土壤湿度异常和夏季正位相AAO型大气环流显著关联, 大气对土壤湿度异常的响应在整个对流层也具有相当正压结构, 且高层中纬度地区的正异常响应比低层更加明显。

我们还利用了ERA40 SM资料和NCEP Z500资料进行同样的资料处理和MCA分析, 图10为MCA第一模态有关的SC和相关系数及其蒙特卡洛检验结果, 表明南半球JFM的SC和相关系数的结果依旧显著, 南半球冬季(JJA) SM超前Z500两个月和四个月时(Lag=-2和-4 months), SC仍然超过90%的信度检验, 只是JJA相关系数的显著性结果略有影响。其次, MCA的空间型(图略)和图2及图7基本一致。以上交叉验证表明由ERA40资料得出的主要结论一定程度上不受资料依赖性的影响。

最后, 一些研究表明印度洋海温变化可能影响AAO (Li et al, 2010)。我们对1957~2002年的印度洋地区(20°S~20°N, 40°E~120°E)海温进行EOF分析, EOF分析的第一模态以及第二模态主分量时间序列定义为IOB模态(Indian Ocean Basin Mode)指数和IOD模态(Indian Ocean Dipole Mode)指数, 再利用论文中的线性回归方法, 去除IOB和IOD对SM及Z500的影响, 结果

(图略)显示对SC和相关系数的显著性及其MCA的空间型没有影响, 表明SM对后期南半球冬季和夏季Z500的显著影响不是由于两者与ENSO或者印度洋海温相关引起的。

本文在过去研究的基础上, 重点关注了前期非洲南部地区土壤湿度分布对后期南半球冬季以及夏季与南极涛动相关的大气环流型的影响。由于南半球夏秋季节(春季初夏)非洲南部地区土壤湿度异常的持续性, 对后期大气产生持续增强的AAO型影响, 滞后MCA分析可以检测出其南半球冬季(夏季)AAO的显著影响作用。但是鉴于再分析土壤湿度资料对于实际土壤湿度的模拟有很大的局限性, 南半球大气环流对于非洲南部地区土壤湿度分布的响应还需要更加完善的观测资料和数值试验来验证。同时, 以上观测分析中前期非洲南部地区土壤湿度异常对后期南极涛动影响机理还需要在今后研究中进一步探讨。

参考文献 (References)

- 鲍学俊, 王盘兴, 覃军. 2006. 南极涛动与江淮梅雨异常的时滞相关分析[J]. 南京气象学院学报, 29(3): 348-352. Bao Xuejun, Wang Panxing, Qin Jun. 2006. Time lag correlation analyses of Antarctic oscillations and Jianghuai Meiyu anomaly [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 29(3): 348-352. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2006.03.009
- Betts A K. 2004. Understanding hydrometeorology using global models [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 85(11): 1673-1688. doi: 10.

- 1175/BAMS-85-11-1673
- Czaja A, Frankignoul C. 2004. Observed impact of Atlantic SST anomalies on the North Atlantic oscillation [J]. *J. Climate*, 15(6): 606–623. doi:10.1175/1520-0442(2002)015<0606:OIOASA>2.0.CO;2
- 范可, 王会军. 2006. 南极涛动的年际变化及其对东亚冬春季气候的影响 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 36(4): 385–391. Fan Ke, Wang Huijun. 2006. Interannual variability of Antarctic Oscillation and its influence on East Asian climate during boreal winter and spring [J]. *Science in China Series D*, 49(5): 554–560. doi:10.1007/s11430-006-0554-7
- 郭维栋, 马柱国, 姚永红. 2003. 近 50 年中国北方土壤湿度的区域演变特征 [J]. *地球科学进展*, 58(S7): 83–90. Guo Weidong, Ma Zhuguo, Yao Yonghong. 2003. Regional characteristics of soil moisture evolution in northern China over recent 50 years [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 58(S7): 83–90. doi: 10.11821/xb20037s010
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77(3): 437–472. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2
- Koster R D, Suarez M J, Heiser M. 2000. Variance and predictability of precipitation at seasonal-to-interannual timescales [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 1(1): 26–46. doi:10.1175/1525-7541(2000)001<0026:VAPOPA>2.0.CO;2
- Koster R D, Mahanama S P P, Livneh B, et al. 2010a. Skill in streamflow forecasts derived from large-scale estimates of soil moisture and snow [J]. *Nature Geoscience*, 3(9): 613–616. doi: 10.1038/ngeo944
- Koster R D, Mahanama S P P, Yamada T J, et al. 2010b. Contribution of land surface initialization to subseasonal forecast skill: First results from a multi-model experiment [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37(2): L02402. doi:10.1029/2009GL041677
- 李国平, 符淙斌, 叶笃正. 1991. 大尺度降雨异常对地面过程的影响——一类气候反馈机制的初步研究 [J]. *大气科学*, 15(2): 23–32. Li Guoping, Fu Congbin, Ye Duzheng. 1991. Study on the influences of large-scale persistent rainfall anomalies on the land surface processes—One kind of climatic feedback processes [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 15(2): 23–32. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1991.02.03
- Li S L, Perlwitz J, Hoerling M P, et al. 2010. Opposite annular responses of the Northern and Southern Hemispheres to Indian Ocean warming. [J]. *J. Climate*, 23(13): 3720–3738. doi: 10.1175/2010JCLI3410.1
- 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 [J]. *气候与环境研究*, 6(2): 240–248. Lin Zhaohui, Yang Xiaosong, Guo Yufu. 2001. Sensitivity of land surface model to the initial condition of soil moisture [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 6(2): 240–248. doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2001.02.017
- Lorenz R, Jaeger E B, Seneviratne S I. 2010. Persistence of heat waves and its link to soil moisture memory [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37(9): L09703. doi:10.1029/2010GL042764
- 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 [J]. *气象学报*, 58(3): 278–287. Ma Zhuguo, Wei Helin, Fu Congbin. 2000. Relationship between regional soil moisture variation and climatic variability over East China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 58(3): 278–287. doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2000.03.003
- 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): 563–566. Ma Zhuguo, Fu Congbin, Xie Li, et al. 2001. Some problems in the study on the relationship between soil moisture and climatic change [J]. *Advance in Earth Sciences (in Chinese)*, 16(4): 563–566. doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2001.04.019
- Schlosser C A, Milly P C D. 2002. A model-based investigation of soil moisture predictability and associated climate predictability [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 3(4): 483–501. doi: 10.1175/1525-7541(2002)003<0483:AMBIOS>2.0.CO;2
- Seneviratne S I, Lüthi D, Litschi M, et al. 2006. Land-atmosphere coupling and climate change in Europe [J]. *Nature*, 443(7108): 205–209. doi:10.1038/nature05095
- 尚国伟, 吴其冈. 2015. 欧亚土壤湿度异常对北半球大气环流的显著影响 [J]. *气象科学*, 35(1): 33–43. Shang Guowei, Wu Qigang. 2015. Significant influence of Eurasian soil moisture anomaly on Northern Hemisphere atmospheric circulation [J]. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 35(1): 33–43. doi: 10.3969/2013jms.0068
- Shukla J, Mintz Y. 1982. Influence of land-surface evapotranspiration on the Earth's climate [J]. *Science*, 215(4539): 1498–1501. doi: 10.1126/science.215.4539.1498
- 宋洁, 李崇银. 2009. 南极涛动和北半球大气环流异常的联系 [J]. *大气科学*, 33(4): 847–858. Song Jie, Li Chongyin. 2009. The linkages between the Antarctic oscillation and the Northern Hemisphere circulation anomalies [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33(4): 847–858. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2009.04.17
- Song Y M, Guo W D, Zhang Y C. 2009. Numerical study of impacts of soil moisture on the diurnal and seasonal cycles of sensible/latent heat fluxes over semi-arid region [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26(2): 319–326. doi:10.1007/s00376-009-0319-2
- Taylor C M, Ellis R J. 2006. Satellite detection of soil moisture impacts on convection at the mesoscale [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33(3): L03404. doi:10.1029/2005GL025252
- Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z C, et al. 2004. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation [J]. *Science*, 305(5687): 1138–1140. doi:10.1126/science.1100217
- Uppala S M, Kållberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 re-analysis [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131(612): 2961–3012. doi:10.1256/qj.04.176
- US National Research Council. 1994. GOALS (Global Ocean–Atmosphere–Land System) for Predicting Seasonal-to-International Climate [M]. Washington D C: National Academy Press
- van den Hurk BJM, Viterbo P, Beljaars ACM, et al. 2000. Offline

- validation of the ERA-40 surface scheme [R]. ECMWF Technical Memorandum.
- Walker J, Rowntree P R. 1977. The effect of soil moisture on circulation and rainfall in a tropical model [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 103(435): 29-46. doi:10.1002/qj.49710343503
- 王万秋. 1991. 土壤温湿异常对短期气候影响的数值模拟试验 [J]. *大气科学*, 15(5): 115-123. Wang Wanqiu. 1991. Numerical experiments of the soil temperature and moisture anomalies' effects on the short term climate [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 15(5): 115-123. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1991.05.14
- Zhang R H, Zuo Z Y. 2011. Impact of spring soil moisture on surface energy balance and summer monsoon circulation over East Asia and precipitation in East China [J]. *J. Climate*, 24(13): 3309-3322. doi:10.1175/2011JCLI4084.1
- 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 [J]. *大气科学*, 32(3): 581-597. Zhang Wenjun, Zhou Tianjun, Yu Rucong. 2008. Spatial distribution and temporal variation of soil moisture over China. Part I: Multi-data intercomparison [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(3): 581-597. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.03.15
- 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 [J]. *科学通报*, 52(14): 1722-1724. Zuo Zhiyan, Zhang Renhe. 2007. The spring soil moisture and the summer rainfall in eastern China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(23): 3310-3312. doi:10.1007/s11434-007-0442-3