索马里和澳大利亚越赤道气流的协同变化与我国夏季降水型

李琛*, 李双林

中国科学院大气物理研究所, 中国科学院气候变化研究中心, 北京 100029

* 联系人, E-mail: lichen@mail.iap.ac.cn

2015-09-14 收稿, 2015-11-09 修回, 2015-11-16 接受, 2016-03-11 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2012CB417403, 2015CB453202)和中国科学院战略性先导科技专项(XDA110104)资助

摘要 利用美国国家环境预报中心-国家大气研究中心(NCEP/NCAR)逐月再分析资料, 结合我国国家气候中心提供的160站月平均降水资料(1970~2012年), 在以前工作基础上, 进一步讨论了索马里与澳大利亚北部低空越赤道气流的协同变化与我国夏季降水异常型的联系. 结果表明: 该二支越赤道气流的反相关协同变化(seesaw)与我国西南-东北走向的降水异常型密切相关. 当索马里越赤道气流偏强(偏弱)而澳大利亚北部越赤道气流较弱(较强)时, 我国夏季降水型呈西南-东北走向, 即长江上游和中游、黄河流域以及华北大部分地区降水偏多(偏少). 这种联系的产生同西太平洋副热带高压位置变化有关, 在各月份的表现不尽相同. 对应索马里越赤道气流增强和澳大利亚越赤道气流减弱, 7月副高西伸, 8月副高位置偏北. 由于这种越赤道气流间的反相关关系从5月开始出现, 在整个夏季有很好的持续性, 所以它对我国夏季西南-东北走向的降水异常型具有预测意义.

关键词 越赤道气流, 反相关, 我国夏季降水异常型, 西南-东北走向, 年际变化

作为连接南北半球间水汽、质量和动能输送的重要通道, 北半球夏季亚澳季风区内低空越赤道气流(cross-equatorial flow, CEF)与我国夏季降水有密切的联系^[1,2]. 以往研究表明, 夏季亚澳季风区内主要存在5支低空越赤道气流^[3~6], 从西至东依次为: 索马里、孟加拉湾、中国南海、西太平洋和新几内亚越赤道气流. 其中, 中国南海、西太平洋和新几内亚越赤道气流均来自于澳大利亚高压北部的东南风, 系地形作用分裂而形成, 它们之间的变化高度一致, 在研究时可视为一个整体, 统称为澳大利亚北部越赤道气流^[7]. 对索马里越赤道气流的研究开始较早^[8~10], 它引起的输送量约占南北半球间总输送的一半, 其变化对东非、印度夏季降水有直接影响^[11,12], 同我国夏季降水也有显著的联系^[13~15]. 王会军和薛峰^[16]的

研究表明, 索马里急流的年际变化与东亚沿岸南北向的异常波列密切相关, 而这个波列是影响东亚气候的重要因素^[17]. 汪卫平和杨修群^[18]的研究显示, 在年际尺度上, 夏季索马里越赤道气流增强, 对应东亚夏季风增强, 我国北方降水偏多, 南方降水偏少. 随着观测资料的不断丰富, 对澳大利亚北部越赤道气流的研究也受到重视^[19~22]. 其强度虽不及索马里越赤道气流, 但年际变率较大, 对我国夏季降水影响更直接^[23]. 刘向文等人^[24]研究了中国南海和西太平洋越赤道气流与南北半球环流变化的关系, 发现强的澳大利亚越赤道气流有利于西太平洋副热带高压向东移动, 使得东亚夏季风减弱. 韩慎友^[25]详细分析了年际尺度上各支越赤道气流与我国夏季降水的联系, 指出强的索马里越赤道气流有利于我国北方

引用格式: 李琛, 李双林. 索马里和澳大利亚越赤道气流的协同变化与我国夏季降水型. 科学通报, 2016, 61: 1453–1461

Li C, Li S L. Connection of the interannual seesaw of the Somali-Australian cross-equatorial flows with China summer rainfall (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 1453–1461, doi: 10.1360/N972015-00807

降水增多、江淮降水减少；强的澳大利亚越赤道气流有利于华南降水增多、长江和黄河流域之间降水减少。

以往的研究往往只关注某一支越赤道气流与我国夏季降水之间的关系，但越赤道气流之间的变化彼此并不独立^[26,27]。例如，索马里与澳大利亚北部越赤道气流在年际尺度上存在很强的反相关性，当索马里越赤道气流强度偏强(偏弱)时，澳大利亚北部越赤道气流较弱(较强)(图1)。因此，若能综合考虑各支越赤道气流的协同作用可能更为合理。最近，Li等人^[7]对各支越赤道气流间的年际变化关系进行了分析，其中孟加拉湾越赤道气流的年际变化相对独立，而索马里越赤道气流同澳大利亚北部的越赤道气流呈现相反变化的跷跷板结构，由此定义了一个反映两者协同变化的指数，称为越赤道气流间的seesaw指数。之前的研究还发现^[7]，与单支越赤道气流相比，seesaw指数与我国夏季降水的联系更为紧密，可作为夏季降水的一个新的预测因子。本文在此基础上，进一步讨论了这种索马里与澳大利亚北部越赤道气流的协同变化与我国夏季降水型的联系，并分析了联系的季节内变化特征。

1 资料和方法

本文所用资料主要为美国国家环境预报中心-国家大气科学研究中心(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research, NCEP/NCAR)逐月再分析资料的水平风场和高度场部分，水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ^[28]。降水场使

图1 标准化的索马里和澳大利亚北部越赤道气流以及CEF-seesaw指数的时间序列

Figure 1 The year-to-year evolution of the normalized Somali CEF (red dashed line), the Australian CEF (blue dotted line), and the Somali-Australian CEF seesaw index (black solid line)

用国家气候中心提供的160站月平均降水观测资料，研究时间段为1970~2012年(共43年)。分析方法包括：线性相关、经验正交函数(empirical orthogonal function, EOF)分解以及例子合成。由于本文讨论的是年际尺度，所以首先去除了数据中的长期线性趋势，再针对每个月的43年时间序列分别进行傅里叶滤波，略去波数小于5的低频变率，从而提取出周期小于10年的年际变化分量。

考虑到不同低空越赤道气流最大强度所处层次的差异，分别取850和925 hPa来计算索马里和澳大利亚北部越赤道气流的强度^[7]。为方便比较，对两支气流的强度进行了标准化处理。同文献[7]，用标准化后索马里越赤道气流强度与澳大利亚越赤道气流强度的差值指数，即后文提到的CEF-seesaw指数，来表示两者的协同变化。

2 索马里与澳大利亚越赤道气流协同变化与我国降水异常的关系

2.1 CEF-seesaw指数与我国夏季降水型

图2对比了单独的索马里和澳大利亚北部越赤道气流以及CEF-seesaw指数与我国夏季160站站点降水的相关系数分布情况。由图2(a)和(b)可知，我国夏季降水与索马里、澳大利亚二支越赤道气流的联系大致相反。当索马里越赤道气流偏强时，我国大部分站点降水偏多，特别是长江流域上游和华中、华北一带偏多显著。当澳大利亚越赤道气流偏强时，降水异常分布相反，华中和华北大部分站点降水偏少，华南降水偏多。这些在前人的研究中已经提到了。从图2(c)可看出，当CEF-seesaw指数偏强时，长江中上游、黄河流域、以及北方大部地区降水偏多，华南沿海降水偏少，即大致呈现“华南少雨-长江中上游至华北多雨”的西南东北型分布。我们分别统计了与索马里和澳大利亚北部越赤道气流以及CEF-seesaw指数显著相关的站点个数，能通过信度水平为90%(95%)的显著性检验的站点数分别为41(28)，45(35)和50(33)个。这说明就像文献[7]所研究的，考虑CEF-seesaw指数与我国夏季降水的联系可能比仅考虑单支索马里或澳大利亚北部越赤道气流与降水的联系更为合理。

为研究CEF-seesaw指数与我国夏季降水型的关系，对1970~2012年夏季降水进行了EOF分解。图3为降水异常场的前3个主模态分布及其对应的时间序

图2 我国夏季降水与(a)索马里越赤道气流、(b)澳大利亚越赤道气流和(c)CEF-seesaw指数间的相关分布. 蓝色(红色)代表正相关(负相关), 小(大)实心圆表示能通过 90%(95%)显著性检验的站点, 空心圆表示未能通过显著性检验的站点. 右上方的数字表示能通过 90%(95%)显著性检验的站点个数. (c)是基于文献[7]的图 5(a)但用 1970~2012 年资料重做的

Figure 2 Correlation of mainland China summer precipitation with (a) the Somali CEF, (b) the Australian CEF, and the (c) somali-Australian CEF seesaw index. Blue indicates a positive correlation, while red indicates a negative correlation. The small (big) solid dot indicates significant at the level of 90% (95%), and the vacant dot indicates can not reach the significant level. The station number that can reach the significant level at 90% (95%) is indicated at the upper right of each panel. (c) Reproduced based on Figure 5(a) in Ref. [7] but with the dataset spanning 1970–2012

列. 第1模态(EOF1)的空间分布从南到北呈现为“+”, “-”, “+”的经向三极子分布, 即长江流域的降水异常

与黄河流域、华南呈现反位相的变化. 第2模态(EOF2)表现为一个西南-东北走向的分布型. 当西南地区和华南、华北等大部分地区降水偏多(偏少)时, 东南沿海以及长江下游降水偏少(偏多). EOF2的分布型态与CEF-seesaw指数同夏季降水的相关系数分布型(图2(c))非常相似, 其同号百分率为77.5%, 说明CEF-seesaw指数与西南-东北走向降水型有很好的联系. 第3模态(EOF3)表现为以长江为界, 从南至北“-”, “+”经向偶极子分布. 这里EOF1(三极子型)和EOF3(偶极子型)的分布型态与黄荣辉等人^[29]在分析我国东部降水异常的主模态时得到的前两个主模态很相似. 主模态顺序的不同可能是来源所选资料年份的时间跨度不同.

以前人们对经向三极子型和偶极子型的降水异常进行了大量讨论^[30,31], 但对于西南-东北走向的降水异常型研究较少. 这里我们对站点降水资料进行了滤波处理, 仅对年际尺度的变化进行EOF分解, 结果表明: 西南-东北型的降水异常在1970年之后是第2主要模态.

我们比较了西南-东北走向降水异常型(即EOF2)与越赤道气流指数包括CEF-seesaw指数、索马里越赤道气流强度指数、澳大利亚北部越赤道气流强度指数之间的联系. 考虑到ENSO和热带印度洋海温偶极子模态对东亚夏季降水的显著影响, 我们一并比较了该降水型与Niño3.4指数以及热带印度洋海温偶极子(dipole mode index, DMI)指数的相关. 如表1所示, 夏季西南-东北走向型的降水异常型(EOF2)与CEF-seesaw指数的相关系数最高(0.52), 通过了99.9%信度水平的显著性检验, 说明该降水型出现与索马里-澳大利亚越赤道气流的反相关协同变化关系最密切. 当CEF-职seesaw指数为正值(负值)时, 索马里越赤道气流偏强(偏弱)而澳大利亚越赤道气流较弱(较强), 我国长江中上游、黄河流域以及华北等大部分地区降水偏多(偏少), 华南沿海和长江下游部分地区降水偏少(偏多).

2.2 CEF-seesaw指数与我国夏季降水联系的季节内变化

我国夏季降水随着西太平洋副热带高压位置的季节性推移存在明显的季内变化^[32]. 为更详细认识CEF-seesaw指数与夏季降水的联系, 我们分月(6, 7和8月)讨论CEF-seesaw指数与降水场、850 hPa风场, 对外长波辐射场(OLR场)以及500 hPa高度场之间的联

图3 1970~2012年我国夏季降水的前3主模态及其对应的时间序列。(a)~(c) 蓝色(红色)站点表示降水偏多(偏少)。右上方的数字表示模态的解方方差百分比

Figure 3 The three leading modes as well as their time coefficients of the summer rainfall in China. (a)~(c) Blue (red) indicates more (less) rainfall. The fractional variance for each mode is indicated at the upper right of each panel

表1 西南-东北型(EOF2)降水异常与各种指数间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of the second leading pattern (EOF2) of summer rainfall with various atmospheric circulation or SST indices^{a)}

类型	CEF-seesaw Index	Somali CEF	Australian CEF	Niño3.4			DMI	
				JJA	D(-1)JF	DJF(+1)	JJA	SON
EOF2	0.52**	0.44**	0.46**	0.40**	0.25	0.44**	0.31*	0.49**

a) *和**分别表示能通过95%和99%显著性检验; JJA, 6~8月; DJF, 12~2月; SON, 9~11月

系。以月CEF-seesaw指数大于一个正的或小于一个负的标准差, 分月选取高低指数年, 进行合成分析。表2列举出了基于此定义得到的高低指数异常年份。

图4和5为6~8月高低CEF-seesaw指数年对应的我国站点降水距平场和大气环流异常的合成图。当CEF-seesaw指数偏强时, 6月, 赤道西太平洋地区在850 hPa上有明显的东风异常(图4(d)), 在菲律宾海区域呈现气旋性环流异常, 这有利于暖池地区的对流增强(图5(a))。暖池地区异常的上升气流会在偏北的地区形成补偿的下沉运动, 对应西太平洋副热带高

压增强(图5(d))。随着气候系统的不断发展和北移, 7月, 西北太平洋地区的下沉运动明显增强且向西延

表2 用于合成分析的年份

Table 2 Years used for composite

	高CEF-seesaw指数年	低CEF-seesaw指数年
6月	1973, 1978, 1984, 1986, 1989, 1998, 2000, 2007	1972, 1976, 1982, 1987, 1997, 2009
7月	1981, 1984, 1989, 1998, 2003, 2010	1972, 1982, 1987, 1994, 2002, 2011
8月	1973, 1975, 1984, 1985, 1992, 1998, 2010	1972, 1977, 1979, 1986, 1987, 1997, 2006

图 4 降水距平百分率(a)~(c)和 850 hPa风场(m/s)(d)~(f)在高低CEF-seesaw指数年的合成图. (a)~(c) 蓝色(红色)表示降水偏多(偏少), 小(大)实心圆表示能通过 90%(95%)显著性检验的站点, 空心圆表示未通过显著性检验的站点. 右上方的数字表示能通过 90%(95%)显著性检验的站点个数. (d)~(f) 阴影表示能通过 95%显著性检验的区域

Figure 4 The composite difference in precipitation ((a)~(c)) and 80 hPa wind (m/s) ((d)~(f)). Blue (red) indicates more (less) rainfall, the small (big) solid dot indicates significant at the level of 90% (95%), and the vacant dot indicates can not reach the significant level. The station number that can reach the significant level at 90% (95%) is indicated at the upper right of each panel. Shading in ((d)~(f)) represents significance over 95 level

伸(图5(b)), 使得副高位置在高CEF-seesaw指数年位置明显偏西. 此时, 我国东南部有一个异常反气旋性环流(图4(e)), 该反气旋异常环流加强西南季风, 使更多的水汽输送到长江流域及其以北地区, 我国北方地区降水增加, 同时反气旋异常不利于东南沿海降水发生(图4(b)). 8月, 随着气候系统的进一步向北推进, 西北太平洋地区转为异常的上升气流, 同时在其北部有一条增强的下沉气流带, 这有利于副高位置的北移(图5(f)). 在850 hPa风场上, CEF-seesaw指数偏高的年份在华北及东北有明显的偏南风异常(图4(f)), 对应华北-东北等地降水增多(图4(c)). 在低指数年情况则相反, 暖池地区对流减弱, 不利于副高的

西伸和北抬, 对应我国总部及北方大部分地区降水偏少, 而东南部地区降水偏多.

以上分析表明, 与seesaw指数相关的风场异常会引起暖池地区对流运动的变化, 进一步影响西太平洋副热带高压的强度和位置的变化. 副高的变化在各月表现并不一致, 7月副高西伸点的东西移动和8月副高位置的南北差异是西南-东北型降水异常产生的一个重要原因.

3 结论

关于夏季亚澳季风区内越赤道气流对我国夏季降水的影响以前已进行了许多研究, 但大多只关注

图5 OLR场(W/m^2)(a)~(c)在高低CEF-seesaw指数年的分月差值图以及西太平洋副热带高压(d)~(f)的分月合成图。(d)~(f) 红色实线(蓝色虚线)为高指数(低指数)年中586 gpd m等值线, 阴影为气候态(1981~2010年)586 gpd m等值线范围

Figure 5 The composite difference in OLR (W/m^2) ((a)~(c)), and a comparison of the characteristic contour of 586 gpd m ((d)~(f)) between the higher and the lower CEF seasaw index years. In (d)~(f) red solid contour (blue dotted contour) indicates the higher (lower) CEF seasaw years, and shading represents the domain the climatological (1981~2010) 586 gpd m contour contains

了某一支越赤道气流的变化。我们^[7]最近的一个工作从越赤道气流之间的协同变化出发, 讨论了索马里与澳大利亚越赤道气流反相关变化对我国夏季降水的影响, 结果显示比只考虑单支越赤道气流时要好。本文进一步探讨了这种协同变化与我们夏季降水型的联系, 发现与之相联系的主要是一种呈西南-东北走向的分布型。基于对1970年之后我国夏季站点降水异常场的EOF分析, 该降水型是第2主模态。其产生同西太平洋副热带高压位置变化有关, 在各月的表现不尽相同。对应索马里越赤道气流增强和澳大利亚越赤

道气流减弱, 7月副高西伸, 8月副高位置偏北, 这是西南-东北走向异常型产生的一个重要原因。

索马里与澳大利亚越赤道气流的反相关协同变化从5月开始出现, 在整个夏季具有很好的持续性^[7], 因此可用初夏(5, 6月)CEF-seesaw指数作为盛夏(7, 8月)西南-东北走向的降水异常型的前兆预测信号。这一结果对夏季降水预测有重要意义。值得指出的是, 目前关于西南-东北走向降水异常型的形成及预测研究还较少, 其产生的物理机制及与其他降水异常类型间的联系值得继续深入探讨。

致谢 本文的基本观点系与中国科学院大气物理研究所布和朝鲁研究员讨论而形成, 谨向布和朝鲁研究员表示感谢。

参考文献

- 1 Tao S Y, Xu S Y, Guo Q Y. The characteristics of the zonal and meridional circulation over tropical and subtropical regions in eastern Asia in summer (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 1962, 32: 91–103 [陶诗言, 徐淑英, 郭其蕴. 夏季东亚热带和副热带地区经向和纬向环流型的特征. *气象学报*, 1962, 32: 91–103]
- 2 Tao S Y, Chen L. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China. In: Chang C P, Krishnamurti T N, eds. *Monsoon Meteorology*. Oxford: Oxford University Press, 1987. 60–92
- 3 Li Z Z, Lou G P. A study on the passages of cross-equatorial current during the southern monsoon (in Chinese). *Sci Atmos Sin*, 1987, 11: 313–319 [李曾中, 楼光平. 北半球夏季风时期东半球越赤道气流通道研究. *大气科学*, 1987, 11: 313–319]
- 4 Shi N, Shi D P, Yan M L. The effects of cross-equatorial current on South China Sea monsoon onset and drought/flood in east China (in Chinese). *J Trop Meteorol*, 2001, 17: 405–414 [施宁, 施丹平, 严明良. 夏季越赤道气流对南海季风及华东旱涝的影响. *热带气象学报*, 2001, 17: 405–414]
- 5 Peng W G, Jiang S C. The climatic characteristics of global cross-equatorial flow and its interannual variation in east hemisphere (in Chinese). *J Trop Meteorol*, 2003, 19: 87–93 [彭维耿, 蒋尚城. 越赤道气流特征及其年际变化特征初探. *热带气象学报*, 2003, 19: 87–93]
- 6 Shi N, Feng G L, Gu J Q, et al. The climatological variation of global cross-equatorial flow for the period of 1948–2004 (in Chinese). *J Trop Meteorol*, 2007, 23: 326–332 [施能, 封国林, 顾骏强, 等. 1948–2004 年全球越赤道气流气候变化. *热带气象学报*, 2007, 23: 326–332]
- 7 Li C, Li S L. Interannual seesaw between the Somali and the Australian cross-equatorial flow and its connection to East Asian summer monsoon. *J Clim*, 2014, 27: 3966–3981
- 8 Findlater J. Cross-equatorial jet streams at low levels over Kenya. *Meteorol Mag*, 1966, 95: 353–364
- 9 Findlater J. A major low-level air current near the Indian Ocean during the northern summer. *Q J R Meteorol Soc*, 1969, 95: 362–380
- 10 Joseph P V, Sijikumar S. Intraseasonal variability of the low-level jet stream of the Asian summer monsoon. *J Clim*, 2004, 17: 1449–1458
- 11 Halpern D, Freilich M H, Weller R A. Arabian Sea surface winds and ocean transports determined from ERS-1 scatterometer. *J Geophys Res*, 1998, 103: 7799–7805
- 12 Halpern D, Woiceshyn P M. Onset of the Somali jet in the Arabian Sea during June 1997. *J Geophys Res*, 1999, 104: 18041–18046
- 13 Li C Y, Wu J B. Important role of the Somalian cross-equator flow in the onset of the South China Sea Summer Monsoon (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2002, 26: 185–192 [李崇银, 吴静波. 索马里跨赤道气流对南海夏季风爆发的重要作用. *大气科学*, 2002, 26: 185–192]
- 14 Gao H, Xue F. Seasonal variation of the cross equatorial flows and their influences on the onset of South China Sea summer monsoon (in Chinese). *Clim Environ Res*, 2006, 11: 57–68 [高辉, 薛峰. 越赤道气流的季节变化及其对南海夏季风爆发的影响. *气候与环境研究*, 2006, 11: 57–68]
- 15 Xue F, Wang H J, He J H. Interannual variability of Mascarene high and Australian high and their influences on summer rainfall over East Asia. *Chin Sci Bull*, 2003, 48: 492–497 [薛峰, 王会军, 何金海. 马斯克林高压和澳大利亚高压的年际变化及其对东亚夏季风降水的影响. *科学通报*, 2003, 48: 287–291]
- 16 Wang H J, Xue F. Interannual variability of Somali jet and its influences on the inter-hemispheric water vapor transport and on the east Asian summer rainfall (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2003, 46: 18–25 [王会军, 薛峰. 索马里急流的年际变化及其对半球间水汽输送和东亚夏季降水的影响. *地球物理学报*, 2003, 46: 18–25]
- 17 Huang R H, Sun F Y. Impacts of the thermal state and the convective activities on the tropical western warm pool on the summer climate anomalies in east Asia (in Chinese). *Sci Atmos Sin*, 1994, 18: 141–151 [黄荣辉, 孙凤英. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响. *大气科学*, 1994, 18: 141–151]
- 18 Wang W P, Yang Q X. Variation of Somali jet and its impact on east Asian summer monsoon and associated China rainfall anomalies (in Chinese). *Sci Meteorol Sin*, 2008, 28: 139–146 [汪卫平, 杨修群. 索马里急流变异及其对东亚夏季风和中国降水异常的关系. *气象科学*, 2008, 28: 139–146]
- 19 Chen Y X. The spectral analysis of the low-level cross-equator air flow over the western Pacific during the northern summer (in Chinese). *Sci Atmos Sin*, 1980, 4: 363–368 [陈于湘. 夏季西太平洋越赤道气流的谱分析. *大气科学*, 1980, 4: 363–368]
- 20 Wang J Z, Li M C. Cross-equator flow from Australia and monsoon over China (in Chinese). *Sci Atmos Sin*, 1982, 6: 1–10 [王继志, 李麦村. 源于澳洲过赤道气流与中国季风环流和降水. *大气科学*, 1982, 6: 1–10]

- 21 Wang S X, Liu Q Y, Xu Q C. 105°E CEF variation and corresponding circulation system in summer (in Chinese). *J Ocean Univ Qingdao*, 2000, 30: 22–28 [王韶霞, 刘秦玉, 徐启春. 夏季影响 105°E 越赤道气流变化的环流系统. 青岛海洋大学学报, 2000, 30: 22–28]
- 22 Li X H, Xu H M, He J H. The study on the relationship between the west cross-equatorial flow and the heavy rain in South China (in Chinese). *Sci Meteorol Sin*, 2004, 24: 161–167 [李向红, 徐海明, 何金海. 对亚洲两支越赤道气流与华南暴雨的关系探讨. 气象科学, 2004, 24: 161–167]
- 23 Simmonds I, Bi D, Hope P. Atmospheric water vapor flux and its association with rainfall over China in summer. *J Clim*, 1999, 12: 1353–1367
- 24 Liu X W, Sun Z B, Ni D H, et al. Connection of 105°E and 125°E cross-equatorial flow with the southern and northern hemispheric circulations (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2009, 33: 443–458 [刘向文, 孙照渤, 倪东鸿, 等. 105°E 和 125°E 越赤道气流与南、北半球环流变化的关系. 大气科学, 2009, 33: 443–458]
- 25 Han S Y. The Time-space variation characteristics of cross-equatorial air flow and the relation to China summer rainfall and to tropical cyclone frequency in the Northwest Pacific (in Chinese). Master Disscrtation. Nanjing: Nanjing Institute of Meteorology, 2002. 36–39 [韩慎友. 越赤道气流时空变化特征及其与我国夏季降水和西北太平洋热带气旋发生频数的关系. 硕士学位论文. 南京: 南京气象学院, 2002. 36–39]
- 26 Cong J, Guan Z Y, Wang L J. Interannual (interdecadal) variabilities of two cross-equatorial flows in association with the Asian summer monsoon variations (in Chinese). *J Nanjing Inst Meteorol*, 2007, 30: 779–785 [丛菁, 管兆勇, 王黎娟. 夏季亚澳季风区内两支越赤道气流年(代)际变化及其与夏季风活动的联系. 南京气象学院学报, 2007, 30: 779–785]
- 27 Zhu Y L. Variations of the summer Somali and Australia cross-equatorial flows and the implications for the Asian summer monsoon. *Adv Atmos Sci*, 2012, 29: 509–518
- 28 Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Am Meteorol Soc*, 1996, 77: 437–471
- 29 Huang R H, Chen J L, Liu Y. Interdecadal variation of the leading Modes of summertime precipitation anomalies over Eastern China and its associated with water vapor transport over East Asia (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2011, 35: 589–606 [黄荣辉, 陈际龙, 刘永. 我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系. 大气科学, 2011, 35: 589–606]
- 30 Shi N, Yang Y S, Chen H. A study on the features of East-China summer rainfall pattern on the multi-time scale in the past 98 years (in Chinese). *Sci Meteorol Sin*, 2001, 21: 316–325 [施能, 杨永胜, 陈辉. 我国东部夏季降水百年雨型的多时间尺度变化特征研究. 气象科学, 2001, 21: 316–325]
- 31 Sun L H, Zhao Z G, Xu L, et al. Study of summer rain pattern in monsoon region of East China and its circulation cause (in Chinese). *J Appl Meteorol Sci*, 2005, 16: 56–62 [孙林海, 赵政国, 许力, 等. 中国东部季风区夏季雨型的划分及其环流成因分析. 应用气象学报, 2005, 16: 56–62]
- 32 Xue F, He J X. Influence of the Southern Hemispheric circulation on east-west oscillation of the Western Pacific Subtropical High. *Chin Sci Bull*, 2005, 50: 1532–1536 [薛峰, 何卷雄. 南半球环流变化对西太平洋副高东西振荡的影响. 科学通报, 2005, 50: 1660–1662]

Connection of the interannual seesaw of the Somali-Australian cross-equatorial flows with China summer rainfall

LI Chen & LI ShuangLin

Climate Change Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

The low-level Cross-Equatorial Flows (CEFs) over the Indian Ocean and western Pacific regions have been recognized as essential components of the Asian-Australian monsoon systems. The variations of the CEFs play a key role in the year-to-year monsoon rainfall anomalies. Recently, several studies have illustrated that the changes of the two CEFs are not independent with each other. A negative (seesaw) correlation at interannual timescale between the Somali CEF and the Australian CEF during boreal summer (Jun-July-August) has been noticed. In contrast to the Indian summer monsoon (ISM), for which the Somali CEF plays a dominant role in the moisture transport, both the Somali and Australian CEFs show significant contributions to the East Asian summer monsoon (EASM). Thus, it may be more useful to consider the effect of the combined CEFs on the EASM. To describe the opposite interannual variability between the Somali and Australian CEFs, our previous study has proposed a CEF-seesaw index which is defined by the difference between the standardized Somali and Australian CEFs. A higher (lower) CEF-seesaw index represents an intensified (weakened) Somali CEF but a weakened (intensified) Australian CEF. The CEF-seesaw index shows a closer correlation with EASM than the individual CEF does. In addition, the seesaw-EASM connection is even closer than the ENSO-EASM connection. Thus, the CEF-seesaw and its close connection to Asian summer monsoon may represent an intrinsic variability within the Asian-Australian monsoon system. This contributes to better understanding of the interannual variability of summer rainfall in the Asian-Australian monsoonal region.

In the present study, we further analyze the relation of the CEF-seesaw to the China summer rainfall anomaly patterns during 1970–2012 using the NCEP/NCAR reanalysis data and the mainland China 160-station precipitation. Since we focus on the interannual time scale, a linear detrend is first removed. Then the fast Fourier transform (FFT) filter is used to remove the components beyond the interannual time scale (greater than 10 years). The basic methods used here include Empirical Orthogonal Function (EOF), correlation, and composite analyses. A student's *t* test is applied for checking the significance of the results. Our results indicate that the CEF-seesaw is related to a southwest-northeast oriented rainfall anomaly pattern, which is identified by the second leading Empirical Orthogonal EOF mode (EOF2) of the China summer rainfall. A high (low) CEF-seesaw index, which is characterized by a strengthened (weakened) Somali CEF and a weakened (strengthened) Australian CEF, is related to more (less) rainfall in the upper and middle streams of the Yangtze River, the Yellow River valley and northern China. This rainfall anomaly pattern is related to the anomalous migration of the Western Pacific Subtropical High (WPSH). The WPSH shows distinct changes in different months. During the high (low) CEF-seesaw index years, the WPSH displays an apparent westward (eastward) propagation in July and shift to north (south) in August. This explains the formation of the above-mentioned southwest-northeast oriented rainfall anomaly.

Since the CEF-seesaw starts to appear in early summer (May) and has a high persistence throughout the whole summer, this may provide a useful predictor to the China summer rainfall. It should be pointed out that the frequency of southwest-northeast oriented rainfall anomaly pattern is increasing in recent decades. More comprehensive studies are warranted to explore the physical mechanism and its connection to other rainfall anomaly patterns in the Asian-Australian monsoon areas.

cross-equatorial flow, seesaw index, summer rainfall anomaly pattern in China, southwest-northeast oriented, interannual variability

doi: 10.1360/N972015-00807