

杨秋明, 宋娟, 李熠, 等. 全球大气季节内振荡对长江流域持续暴雨影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2012, 27(8): 876-884. [Yang Qiuming, Song Juan, Li Yi, et al. Review of impacts of the global atmospheric intraseasonal oscillation on the continuous heavy rainfall over Yangtze River Valley [J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(8): 876-884.]

全球大气季节内振荡对长江流域 持续暴雨影响的研究进展*

杨秋明, 宋娟, 李熠, 谢志清, 黄世成, 钱玮
(江苏省气象科学研究所, 江苏 南京 210008)

摘要:在引证论述大气季节内振荡(ISO)对暴雨(强降水)重要作用的基础上,概括性地回顾影响长江流域持续暴雨的大气 ISO 基本特征及其形成机制的主要成果。重点针对全球热带内外不同时间尺度的大气 ISO 的空间变化和年际变化与长江流域持续暴雨之间联系的研究工作进行总结评述,较为完整地总结长江流域夏季降水季节内变化的气候特征和全球不同空间和时间尺度的 ISO 对东亚副热带地区持续暴雨影响的已有认识,并结合 2 个半球的 ISO 与长江流域持续暴雨关系的研究现状,对未来暴雨(强降水)与不同时尺度 ISO 相互作用及其在 10~30 d 延伸期预报中的应用中有价值的科学问题和研究热点进行探讨,以期强调南半球 ISO 变化在全球和东亚副热带气候系统中的重要地位,提高夏季长江流域持续暴雨 10~30 d 延伸期预报和旱涝气候预测准确率。

关键词:大气季节内振荡;不同时间尺度变化;长江流域持续暴雨;南北半球环流相互作用
中图分类号:P425.4⁺2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-8166(2012)08-0876-09

1 引言

长江中下游地区人口密集、经济和科技文化发达,是我国重要的工农业生产基地;同时,受东亚季风影响,也是我国降水量多,洪涝灾害较为严重的地区之一,长江流域洪涝灾害主要由暴雨造成。因此,研究这个区域暴雨等极端事件的形成机制和变化规律既是科学发展的需要,也是社会的迫切要求。

关于暴雨的发生机理以及预报理论和方法的研究一直是我国大气科学的重要研究课题之一^[1~5]。过去的研究表明长江流域持续性暴雨的预报因子,包括副热带高压的偏南偏西、阻塞高压形势维持而乌山阻高崩溃或减弱、东亚夏季风环流偏弱、邻近海域海温异常、高低空急流、征兆环流模型等,但需要

明确的是虽然在长江流域持续性暴雨的气候异常事件(来自于多次暴雨天气过程的积累)发生前期或当时均出现了以上一个或多个特征,但并不意味着出现以上特征就一定会发生长江流域持续性暴雨甚至是洪涝灾害,长江流域持续性暴雨的预报因子仍需深入研究。由于季节内振荡(Intraseasonal Oscillation, ISO)具有动力学机制^[6~12],根据研究结论可知其所产生的能量频散可能是导致长江流域持续性暴雨的主要激发机制之一,同时也和长江流域水汽输送、低压系统维持等有重要关系。但 ISO 是大气本身所固有的一种现象(时间尺度是 10~90 d),其强度和传播途径有明显的年际变化,同时海气和陆气相互作用伴随的大气加热异常对 ISO 的产生和变化也有一定影响,所以 ISO、加热场分布和长江流域

* 收稿日期:2012-02-26;修回日期:2012-06-15.

* 基金项目:国家自然科学基金项目“SCGT 与夏季东亚 ISO 相互作用研究及其在长江下游强降水延伸期预报中的应用”(编号:41175082)资助.

作者简介:杨秋明(1963-),男,江苏武进人,高级工程师,主要从事天气气候预测研究. E-mail: yqm0305@263.net

持续性暴雨的复杂相互关系的研究还有待深入。

另外,全球气候系统是一个整体,南北半球之间 ISO 的相互作用十分明显,它们与长江流域地区降水 ISO 和强降水的关系密切。需要在全球环流 ISO 作用的框架下,探讨东亚地区不同时间尺度和区域 ISO 与长江流域持续暴雨(强降水)变化的联系,才能深入了解强降水等极端事件的变化规律。此外,影响长江流域 ISO 时空变化的研究对于长江流域暴雨的 10~30 d 延伸期预报准确率的提高也有重要意义,其强度的年际变化也为长江流域洪涝的气候预测提供了重要预报信号。

本文根据长江流域夏季降水季节内变化的气候特征,重点综述了全球热带内外不同时间尺度的大气 ISO 的空间变化和年际变化与长江流域持续暴雨之间联系的研究进展,并对其进行分析和评述,最后讨论了不同时间尺度 ISO 相互关系对夏季东亚副热带系统的影响及其在长江流域持续暴雨(强降水)过程 10~30 d 延伸期预报中的应用中存在的主要问题。

2 长江流域夏季降水季节内变化的气候特征

我国长江流域受东亚夏季风的显著影响,旱涝灾害频发。长江中下游旱涝作为一种年际背景,与 ISO 强度(时间尺度为 10~90 d)的变化有密切关系,不同时间尺度(10~20, 20~30, 30~40, 40~50, 50~60 d 等)的 ISO 对这个区域雨季的活跃和中断具有重要的调制作用。

王遵娅等^[13]利用 1951—2004 年我国 740 站逐日降水资料对夏季长江中下游典型旱涝年季节内振荡周期、强度和位相等特征进行合成对比分析发现:长江中下游涝年降水季节内振荡周期较早年长,涝年以 30~60 d 周期为主,而早年以 10~30 d 周期为主。旱涝年长江中下游地区夏季降水的 10~30 d 振荡整体上均强于 30~60 d 振荡;10~30 及 30~60 d 振荡,涝年的强度都大于早年。季节内振荡在早年的北传较涝年强,能达到 50°N 附近;而涝年不仅有明显的季节内振荡从低纬度地区向北传播,同时还有弱的振荡从中高纬度地区向南传播,两者汇合于长江流域形成强的振荡中心。影响我国低频降水的低频异常环流分布模态在旱涝年是一致的,但涝年的低频环流强于早年,而这种低频环流场的差异正是造成涝年的低频降水强于早年的原因之一。黄菲等^[14]利用谐波分析、功率谱分析的方法,对全

国 730 个站点 1951—2000 年逐日降水资料进行气候平均分析,研究全国降水季节内振荡的分布特征。研究结果表明,中国大部分地区的降水主要以季节变化为主,而在长江中下游流域主要以季节内振荡为主。气候平均下降水的准双周振荡和马登—朱利安振荡(Madden and Julian Oscillation, MJO)^[8,9]的振幅都在 4 月开始加强,在 11 月开始减弱,而 MJO 全年表现都很显著,准双周振荡主要在夏季显著;MJO 主要分布在 36°N 以南的长江中下游地区,准双周振荡主要分布在 115°E 以西的内陆。杨秋明^[15]利用 1961—2005 年长江下游地区 25 个站(江苏南部地区)逐日降水资料,采用非整数波功率谱分析和相关分析研究了 45 年 5~8 月长江下游降水 ISO、强降水过程(暴雨)的变化特征。结果表明,5~8 月长江下游逐日降水主要有 10~20, 20~30 和 60~70 d 的周期振荡,长江下游降水的 20~30, 10~20 d 振荡强度年际变化和强降水(区域平均日降水量大于等于 25 mm)频数之间有显著的正相关,其中与 28 d 振荡强度的正相关最强,相关系数是 0.452,显著性为 0.01,是引起夏季长江下游洪涝的最主要因素之一。

3 热带环流 ISO 对长江流域持续暴雨的影响

众所周知,Madden 等^[8,9]最早发现了赤道地区存在周期为 30~60 d 的振荡(MJO),以后又发现副热带、甚至中高纬度也存在这类低频振荡,并且可以影响印度和澳大利亚季风爆发和季风活跃与中断。热带大气季节内振荡主要表现为对流层上、下呈反相的“斜压”结构,主要表现为纬向东传和经向北传的活动特征。但在赤道以外的热带,尤其是在副热带地区,大气 ISO 的西传也十分明显。赤道地区大气 ISO 东传在冬半年一般更显著,而西传在夏季比较容易看到。在赤道之外,热带 ISO 的纬向移动兼有东传和西传的特征,而西传相对更明显。这主要是因为动力学理论研究已表明,在那里 ISO 既受到 CISK-Kelvin 波的影响,还受到 CISK-Rossby 波的影响,而且后者往往更为重要^[10]。这些热带 ISO 在一定条件下,对长江流域强降水(暴雨)有重要影响。

Chen 等^[16]指出起源于西太平洋西部的 MJO 气旋向西传播到南海然后向北传播和来自北方的 ISO 汇合于长江中下游,可以引起梅雨并形成长江洪涝。进一步研究表明,无论是近赤道区还是西南季风区,总动能有 3 个中心,即阿拉伯海西部、孟加拉湾以及

南海地区,其中以孟加拉湾的最强。对于南海地区,总动能几乎全部是由西太平洋自东向西经南海传播到孟加拉湾东部(约 100°E)的,几乎没有看到来自印度季风区的总动能经孟加拉湾传播到南海^[17]。杨秋明^[18]通过对1991年初夏亚洲季风区逐日500 hPa环流的时空分布特征分析得出,各个季风系统活动的时间系数存在显著的12~22 d准周期振荡和28~31, 43~65 d的低频振荡周期,它们与长江下游暴雨形成有密切联系,其中最显著的周期是22 d左右;而亚洲副热带海洋加热异常和海陆热力差异产生的不均匀加热分布激发的各种低频波及其相互作用导致向热带外能量频散的差异,是引起长江下游持续暴雨的主要原因。陈丽臻等^[19]则通过对1980年和1985年大气30~60 d低频流场的分析,发现长江流域典型旱涝年在低频流场的配置和低频波的传播方向上均有明显差异。涝年(1980年)低频振荡明显,其传播特征与正常年份相同,而旱年(1985年)则呈相反趋势。这也反过来表明了MJO对长江流域降水的作用。Zhu等^[20]进一步研究了1998年长江中下游洪涝,指出该年夏季西北太平洋季风槽和副热带气旋出现反时针旋转的传播,出现30~60 d振荡式的对流异常加强和抑制,使长江中下游得到更多降水,形成洪涝。此外,研究还表明^[21],长江中下游地区和淮河流域分别出现涝年时,都伴有很显著的季风涌向北传播的特征。季风涌的北传实质就是季风中来自热带地区ISO的向北传播。季风涌北传过程中,得到来自东西两侧纬向传播的ISO补充。纬向传播的ISO在 $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 附近汇合后增强自热带地区向北传的季风涌,使得季风涌在经向上可以继续向北传播,并对我国东部地区夏季大尺度降水过程产生一定的影响。纬向补充的ISO特征差异对我国东部大尺度降水位置会产生一定的差异。

近年来,采用多年观测和再分析资料,中国学者进一步研究了MJO对长江流域降水ISO的影响。Zhang等^[22]分析了MJO对夏季中国东南部降水的影响。这些影响主要通过对应的30~60 d时间尺度的对流从热带印度洋向热带西太平洋移动过程中西太平洋副热带高压,水汽输送和垂直运动的变化,引起长江流域和华南地区低频降水的变化。其主要物理过程有2种:一种是与热带印度洋对流加热激发的沿与热带印度洋到中国东南部的底层西风气流中的Rossby波的能量频散;另一种是与MJO伴随的东亚和西太平洋地区经圈环流上升区域的南北移的西

太平洋副热带高压北侧的水汽输送强弱变化的作用。Mao等^[23]的研究结果表明,江淮流域夏季降水低频振荡的特征周期是20~50 d,而10~20 d特征周期主要出现在6~7月。合成分析发现,江淮流域夏季降水的20~50 d低频振荡的发生是对于西北太平洋和南海地区副热带高压季节内变化的响应,而副高又受到一种自赤道向西北传播的对流—环流耦合的Rossby波列的调制。当这种波列的异常气旋性环流到达南海和菲律宾海时,由于局地气压的下降,西北太平洋副高向东北撤退。于是,西南季风气流主要流向南海和菲律宾海,而江淮流域出现干旱的环流形势,低空存在显著的辐散环流。相反,异常反气旋进入到南海和菲律宾海则导致西北太平洋向西南伸展,结果西南季风气流在南海地区向东北转向并且在江淮流域辐合,形成多雨的条件。所以江淮流域降水的20~50 d低频振荡又表现为江淮流域与南海—菲律宾海地区降水异常的反相变化(Seesaw)。同时发现西北太平洋副高纬向的大幅度变化与江淮流域极端干旱(洪涝)阶段密切关联。副高的突然东撤(西进)一般超前于江淮流域极端干旱(洪涝)的发生约3/8周期。这一发现有助于江淮流域延伸期预报的改进。另外,薛峰等^[24]还发现南半球马斯克林高压(马高)的低频振荡可引起澳大利亚高压(澳高)及越赤道气流的振荡,并通过平流过程进一步影响到副高。马高增强后,副高增强西伸,而澳高增强后,副高减弱东退,从而造成副高的东西振荡。此外,马高和澳高的变化超前于副高10~25 d,这对于副高和相关的梅雨预报有重要的应用价值。

关于不同时间尺度ISO强度年际变化的影响,也是需要研究的另一个重要问题。贾燕等^[25]发现江淮流域夏季降水异常与台湾海峡地区及西北太平洋低频能量变化相关显著,对30~60 d ISO强度指数高低年夏季低频降水以及低频环流的位相合成表明:高指数年主要通过存在于南海—西北太平洋地区的低频气旋、反气旋系统的交替活动来影响副热带高压的进退,从而引起江淮流域夏季降水异常;低指数年江淮流域夏季降水主要受西太平洋副热带高压位置及强度变化的影响,降水异常区主要位于江南地区。进一步研究表明,非30~60 d低频降水扰动与热带低频振荡强度也有很好的相关,低频环流对双周以及天气时间尺度环流变化可能存在调制作用,这种作用对江淮流域夏季降水的年际异常起到非常重要的作用。

4 热带外环流 ISO 对长江流域持续暴雨的影响

我国东部地区处于东亚季风影响范围之内,东亚副热带季风系统的异常变化是这个区域灾害性天气气候(特别是降水)异常的主要影响因子。研究表明,我国东部(特别是长江流域)洪涝灾害很大程度上与热带外大气 ISO(尤其是南半球热带外大气 ISO^[15,32,36])也有十分密切的联系。毛江玉等^[26]研究了1991年梅雨期间江淮洪涝区降水的 ISO 及其环流特征,指出低频振荡对1991年江淮流域洪涝的形成有重要贡献,江淮流域降水的低频振荡与500 hPa 北太平洋副高的低频变化及其传播密切相关,但这种低频振荡可能起源于北太平洋中部夏威夷群岛附近,然后沿着副热带高压脊线附近向西传播到中国东南沿海。陆尔等^[27]研究这一年江淮流域特大暴雨时发现,东亚季风以15~25 d的振荡方式向北传播,并与北侧的低频冷空气(也以15~25 d振荡向南侵入梅雨区)相互作用,产生了低频形式的大暴雨。另外,观测资料分析表明,1998年长江中下游2次大暴雨均与低频气旋系统自热带向北传播、中高纬向西南传播并于长江中下游汇合有关,中国中东部地区低频降水经向传播都与南海季风和印度季风的变化相对应^[28]。值得注意的是中国中部区域不同时间低频降水的纬向传播方向有明显差别,初步认为造成这种现象的可能机制是纬向风气流的变化^[29],同时低频降水在经向传播中存在不连续现象。张瑛等^[30]则发现1998年夏季长江中下游降水存在2次明显的30~60 d ISO 循环,结果表明:来自西伯利亚向南传播和来自孟加拉湾及南海向北传播的 ISO 气旋(降水谷值期)和反气旋(降水峰值期)形成了高原东部上空 ISO 气旋(降水谷值期)和反气旋(降水峰值期)以及来自中纬度西太平洋南下西移经日本、黄海到达中国大陆东部海洋上空的 ISO 反气旋(降水谷值期)和气旋(降水峰值期)的共同作用造成了长江中下游地区强烈的下沉(降水谷值期)和上升(降水峰值期),形成长江中下游降水 ISO 谷值期和峰值期。

另外,采用较长时间的资料,韩荣青等^[31]的分析发现,经向风30~60 d ISO 的纬向传播对应着大气经向型环流系统的移动。西传影响东亚夏季季风区降水的 ISO 有来自低纬中东太平洋东风流中的低频气旋(如副热带东风带中 ISO 的演变);也有来自中高纬度阿拉斯加湾及鄂霍次克海带低频低压(如洋

中槽)和高压(如阻塞高压和东北太平洋高压)的向南向西频散。无论当年东亚夏季季风强弱与否,在东亚副热带季风区所有涝(旱)的年份里,太平洋同一纬带上大气 ISO 向西传播都明显较强(弱),表明太平洋上 ISO 向西传播的强或弱,是东亚夏季季风区降水偏多或偏少的重要条件。Tang 等^[32]详细研究了长江流域持续暴雨事件发生前1~30 d 的全球 OLR 和环流场进行了相关与合成分析相结合的天气学统计普查,揭示了与此类过程显著相关的前期环流信号的时空分布特征,并初步探讨了主要信号对暴雨过程形成可能的影响和联系。

陶诗言等^[33]的研究表明:夏季我国东部暴雨带位置的变动,受西太平洋副热带高压西伸北跳(南撤东退)的调节。当副热带高压西伸北跳(南撤东退)时,暴雨带向北(向南)移动。副热带高压西伸北跳是由于欧亚大陆上空存在静止 Rossby 波列,波的能量沿着高空副热带急流向东传播到我国沿海海岸(115°~130°E)时,在该地区激发出一个长波脊的影响。他对近几年和历史上著名的深槽型暴雨及台风暴雨的分析表明^[34],欧亚高空急流中 Rossby 波能量频散而产生的下游发展效应,对东亚高空槽的形成与发展、登陆台风的路径与长生命史有重要的影响。这种沿中纬度急流传播的 Rossby 波活动的时间尺度是10~30 d。张小玲等^[35]分析了发生在20世纪长江流域的3次全流域性洪水的气象成因(1998年、1954年和1931年),这3年梅雨期开始前(3~5月),长江流域降水比常年偏多。进入梅雨季以后,先后出现两场持续性暴雨:第1场出现在6月中旬至7月上旬,持续暴雨产生的时间间隔20~25 d;这些年份的长江全流域性大洪水与东亚中高纬地区大气环流和东亚夏季季风活动异常也有密切联系。此外,由于观测资料的限制,南半球热带外30~60 d ISO 对长江流域旱涝影响的研究较少。黄静等^[36]通过对梅雨前后全球低频风场和速度势场(时间尺度是30~60 d)的分析,发现全球低频风场不仅在长江流域的早年(1981年、1985年和1988年)及涝年(1980年和1983年)表现出显著的不同,而且在同一年的夏季降水变化的不同位相中也表现出明显相反的环流分布。1980年降水与东亚季风区内低频振荡的北传以及南半球高纬的涡旋列不断东移相联系,可能与全球冷热源分布以及沃克环流的低频变化有关。而1988年降水变化则是与源于热带太平洋中部的小低频涡旋北进发展有关。

亚洲—太平洋季风区各季风子系统间的相互作

用对季风区(特别是东亚副热带季风区)甚至全球的气候变化都有非常显著的影响。丁一汇等^[37]研究了在亚洲—太平洋季风区中4种季节内时间尺度的遥相关关系,他们发现:①在亚洲季风爆发初期,形成从印度西南部经孟加拉湾到达中国长江流域及日本南部的“南支”遥相关型^[38];②在季风盛行期间,长江流域降水明显受热带西北太平洋夏季风的影响,与西北太平洋夏季风降水呈反相关关系;③华北雨季(7月第4候至8月第3候)华北降水则与西北太平洋夏季风降水呈正相关关系;④华北夏季降水同时还与印度夏季风呈正相关关系,即“北支”遥相关型。上述4种遥相关关系,反映了亚洲夏季风季节北推过程中,印度夏季风、东亚夏季风和西北太平洋夏季风子系统之间的关联。

张庆云等^[2]研究指出,东亚夏季风环流偏弱是夏季长江流域发生严重暴雨洪涝灾害的气候特征;天气特征是东亚地区东、西、南、北天气尺度系统的最佳配合以及东亚大气环流出现较显著的20~30 d低频振荡;东亚中高纬大气环流出现20~30 d低频振荡,有利于青藏高原上空的低压系统沿着中纬度东传到115°~125°E附近,造成长江流域梅雨锋低压扰动加强;东亚低纬大气环流出现20~30 d的低频振荡,有利于印度洋、南海和热带西太平洋的水汽输送到长江流域,为长江流域暴雨提供持续充足的水汽来源。夏季西太平洋副热带高压西伸出现20~30 d的低频振荡,有利于低压系统在长江流域(115°~125°E)再生和维持。杨秋明^[15]发现了影响北半球夏季长江下游强降水的2个全球大气20~30 d振荡模态:南半球中纬度地区东移的绕球波列(Southern Circumglobal Teleconnection wave Train, SCGT)和西太平洋热带地区南移的季节内振荡型(Tropical Western Pacific, TWP)。这2个季节内振荡对长江下游强降水过程的作用大体相当,分别由南北半球热带内外地区大气环流之间的相互作用和亚洲季风区热源强迫异常与东亚大气内部相互作用激发的20~30 d低频振荡有关。所以,长江下游强降水不仅仅与亚洲夏季风系统内部分量有关,而且南半球中高纬度地区绕球波列(SCGT)与南亚和东亚地区环流变化之间的相互作用也十分显著。这2个20~30 d振荡模态的循环过程表明了夏季东亚副热带地区强降雨带伴随的热源异常对南半球热带外环流和气候产生的重要影响。同时,基于这2个全球ISO型,分别建立了5~8月长江下游有(无)强降水过程的全球大气环流模型,能较好地预测未

来10~30 d内夏季长江下游强降水发生的概率,对提高长江下游10~30 d延伸期预报精度有重要作用。Yang等^[39]利用一套新的高分辨率日降水资料,发现了位于长江中下游地区夏季的2个主要的ISO模态,分别被称为准2周模态和21~30 d模态。这2个不同时间尺度的模态的强度相当,并能共同解释该地区夏季总季节内振荡方差的57%。尽管这2个模态结构上相似,但是它们的产生和演变过程是完全不同的。这2个季节内变率的周期存在于它们可能的源地大气中。在2个模态极端湿位相,准双周模态的产生主要源于从中纬度向东南方向移动来的高空急流涡旋,而21~30 d模态的产生主要与低纬度的低空反气旋西移有关,而该反气旋的西移正是反映了西太副高的西伸过程。2个模态的发展也受到不同因子的影响。准双周模态的发展和增强与从菲律宾海向西北方向移动的低空反气旋异常有关,而该反气旋的西北向移动又是西太副高与中高纬度瞬变扰动相作用的结果。与此不同的是,21~30 d的模态发展和加强与从贝加尔湖向远东地区东移的高空槽有关。

杨秋明^[40]还研究了欧亚地区30~60 d低频振荡的时空变化及其与长江下游夏季旱涝和暴雨频数年际变化的关系。结果表明:6~10月欧亚型(EU)低频振荡强度与长江下游暴雨频数成显著负相关;同时,发现当5~8月西太平洋型(WP)低频流型偏强时,长江下游暴雨频数增加,容易发生洪涝;反之,无明显影响。仅当前期3~5月南亚大陆型(SA)偏强时长江下游降水量偏少,而3~5月南亚大陆型偏弱时暴雨频数明显增加。因此,长江下游旱涝与低频流型异常之间同时存在线性和非线性相关。另外,对于长江下游暴雨频繁发生的2011年6~8月,与延伸期暴雨形成过程密切相关的是20~30 d时间尺度的东亚地区向北太平洋中部地区传播的波列^[41],它是文献[37,42]中指出的夏季东京—芝加哥“快车”(从日本和中国东北地区向东经北太平洋到达加拿大西部、大平原北部及美国中西部地区)或上海—堪萨斯“快车”(从中国长江中下游地区向东经北太平洋到达美国北部)对应遥相关波列的一部分。所以,长江中下游地区降水异常发生规律极为复杂,制约因素众多,且随着资料的逐年积累,部分规律也在变化;影响这个地区降水的低频波列较多(时间尺度也不同,如10~20,20~30,30~40,40~50,50~60 d等),因而共同作用规律非常复杂,各个因子并不完全独立。长江中下游

地区强降水与不同周期(10~70 d)振荡强度之间的关系也随这个地区的不同位置而变化,仅长江下游(区域118.0°~122.5°E, 30.5°~32.0°N,即江苏的苏南地区)强降水与东亚地区副热带地区20~30 d振荡强度相关显著^[15]。如果周期变长(大于30 d)和变短(小于20 d),长江下游(118.0°~122.5°E, 30.5°~32.0°N)强降水发生频率将显著减小。对于长江流域的其他地区,如浙江北部,江西北部和湖北中部等地区,也属于长江中下游地区,但上述地区暴雨(强降水)变化与20~30 d的振荡的正相关并不太显著,其他ISO型(如MJO, 10~20 d ISO等)的作用更显著,同时年际变化也十分显著,而且不同时间尺度的ISO之间可能还有相互作用,存在一定程度的不确定性。

5 结论与讨论

随着观测资料不断的完善,有关长江流域持续暴雨成因机理的研究有了新的进展。全球热带内外大气ISO与东亚副热带季风系统的演变和长江流域持续暴雨(强降水)的发生有显著的关联,这些不同时间尺度(10~20, 20~30, 30~60 d等)的ISO的传播特征具有多样性,通过主要振荡周期,传播方向,振荡强度等多种量化表征可以研究它们的年际变化机理。

长江流域出现暴雨洪涝灾害的主要因素是东亚环流演变过程呈现显著的20~30 d低频振荡^[2,15,18],且这种与长江下游暴雨密切相关的20~30 d振荡和大气环流的相互作用具有全球性。正确预报长江流域暴雨洪涝灾害除了考虑如西太平洋副热带高压、东亚季风活动异常、西风带异常, AO, AAO和El Niño, El Niño Modoki^[43], IOD、西太平洋暖池、欧亚雪盖、青藏高原的热力和动力作用、陆面强迫等因子^[44~47]的综合作用外,还必需考虑主要由大气内部过程决定的不同时间尺度季节内变化(10~20, 20~30, 30~60 d振荡)的作用和相互关系,特别是全球环流20~30 d振荡的变化和强度的年际变化,其中与南半球SCGT有关的南北半球环流之间的相互作用尤其重要。因此,全球环流20~30 d主要振荡型强度年际变化特征的研究有助于长江流域旱涝年际预报准确率的进一步提高。

大气多变量在空间上随时间的变化和相互作用构成了大气运动的复杂形式。通过对观测资料的合理处理和分解,客观分离资料中的不同时间尺度的天气变化和气候变化分量,可直接从观测资料中提

取与长江流域持续暴雨过程密切相关的不同时间尺度的主要大气ISO型。在分别研究制约这些不同的ISO型演变的因子和时间变化规律的基础上,建立不同的统计学模型和动力学模型,研究其可预报性的差异,能有效延长与长江流域地区不同时间尺度(10~20, 20~30, 30~60 d)的ISO有密切联系的各种持续暴雨过程10~30 d延伸期预报的时效^[48,49]。

对于20~30 d时间尺度,全球主要20~30 d ISO型(如SCGT, TWP等)反映了东亚副热带环流和南北半球热带外环流之间的相互作用,从而产生长江下游强降水(或暴雨)过程,时间尺度大约在30 d左右,正是暴雨延伸期预报所需要的。因而,通过预测这些主要ISO循环的时空变化,不仅可以预测夏季长江下游未来2~4周降水发生的低频背景,而且可以预测在不同的低频传播过程中,有几次强降水(暴雨)过程的可能发生。

与MJO一样,目前20~30 d振荡的物理机制尚不完全清楚,现在的数值天气预报模式对这种20~30 d时间尺度的各种振荡模态变化的预报技巧仍然十分有限,可能是由于大气运动的复杂性(非线性相互作用),大气变量的球谐函数展开中的许多无物理意义的波作为初始值进入计算机运算,可产生出新的虚假波的传播,导致几天到10天后数值天气预报模式结果逐步失去预报意义(当前ECMWF的中期数值模式T1279L91可用时效已达10 d,对10~15 d振荡预报能力有较大提高,更长时间尺度振荡型的预报需进一步改进)。

因此,统计学模式仍是研究20~30 d振荡可预报性的较好途径(直接从观测资料中提取20~30 d时间尺度的与长江流域持续暴雨关系密切的各种主振荡型,研究其不同的传播特征和强度的年际变化规律)。初步的预测研究表明,与长江下游地区暴雨有密切联系的东亚到太平洋地区环流20~30 d经向风低频波列(全球ISO作用框架下东亚副热带地区低频变化的表现)向东传播的预报时效可达20 d左右^[41]。所以,利用20~30 d时间尺度的全球SCGT, TWP等环流型的低频分量与持续性强降水过程的对应关系,采用各种统计方法,结合ECMWF中期和延伸期数值预报产品,建立具有物理意义的夏季长江下游暴雨延伸期客观预报模型,能使预报技巧有明显提高,同时也能进一步理解全球季风和东亚副热带季风的变化机制。

参考文献(References):

[1] Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Peng Jingbei. The studies of meteor-

- ological disasters over China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 815-825. [张庆云, 陶诗言, 彭京备. 我国灾害性天气气候事件成因机理的研究进展 [J]. 大气科学, 2008, 32(4): 815-825.]
- [2] Zhang Qingyun, Tao Shiyun, Zhang Shunli. The persistent heavy rainfall over the Yangtze River Valley and its associations with the circulations over East Asian during Summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(6): 1 018-1 030. [张庆云, 陶诗言, 张顺利. 夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天气气候条件 [J]. 大气科学, 2003, 27(6): 1 018-1 030.]
- [3] Tao Shiyun. Rainstorms in China [M]. Beijing: Science Press, 1980. [陶诗言. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 1980.]
- [4] He Fangfang, Zhao Bingke. The characteristics of climate change of torrential rains in Shanghai region in recent 30 years [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(11): 1 260-1 267. [贺芳芳, 赵兵科. 近30年上海地区暴雨的气候变化特征 [J]. 地球科学进展, 2009, 24(11): 1 260-1 267.]
- [5] He Jinhai, Ju Jianhua, Wen Zhiping, et al. A review of recent advances in research on Asian monsoon in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 24(6): 972-992.
- [6] Wang Huijun, Han Jinping, Zhang Qingyun, et al. Brief review of some CLIVAR-related studies in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 24(6): 1 037-1 048.
- [7] Wang Bin. Thrusts and prospects on understanding and predicting Asian Monsoon climate [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 22(4): 383-403. [王斌. 认识和预报亚洲季风气候: 前沿突破点和展望 [J]. 气象学报, 2008, 66(5): 653-669.]
- [8] Madden R A, Julian P R. Detection of a 40 ~ 50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1971, 28: 702-708.
- [9] Madden R A, Julian P R. Observation of the 40 ~ 50-day tropical oscillation—A review [J]. *Monthly Weather Review*, 1994, 122: 814-837.
- [10] Li Chongyin. Recent progress in atmospheric intraseasonal oscillation research [J]. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(7): 734-741. [李崇银. 大气季节内振荡研究的新进展 [J]. 自然科学进展, 2004, 14(7): 734-741.]
- [11] Waliser D E, Lau K M, Stern W, et al. Potential predictability of the Madden-Julian oscillation [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, 84(1): 33-50.
- [12] Ju Jianhua, Qian Cheng, Cao Jie. The intraseasonal oscillation of East Asian Summer Monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2005, 29(2): 187-194. [琚建华, 钱诚, 曹杰. 东亚夏季风季节内振荡研究 [J]. 大气科学, 2005, 29(2): 187-194.]
- [13] Wang Zunya, Ding Yihui. Climatic features of intraseasonal oscillations of summer rainfalls over mid-lower reaches of the Yangtze River in the flood and drought years [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2008, 19(6): 710-715. [王遵娅, 丁一汇. 夏季长江中下游旱涝年季节内振荡气候特征 [J]. 应用气象学报, 2008, 19(6): 710-715.]
- [14] Huang Fei, Huang Shaoni, Zhang Xu. Study on the climatological intra sea sonal oscillation of Chinese rainfall [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2008, 38(2): 173-177. [黄菲, 黄少妮, 张旭. 中国降水季节内振荡的气候特征分析 [J]. 中国海洋大学学报, 2008, 38(2): 173-177.]
- [15] Yang Qiuming. The 20-30-day oscillation of the global circulation and heavy precipitation over the lower reaches of the Yangtze River Valley [J]. *Science in China (Series D)*, 2009, 52(10): 1 485-1 501, doi: 10. 1007/s11430-009-0156-2. [杨秋明. 全球环流 20 ~ 30d 振荡与长江下游强降水 [J]. 中国科学: D 辑, 2009, 39(11): 1 515-1 529.]
- [16] Chen Longxun, Zhu Congwen, Wang Wen, et al. Analysis of the characteristics of 30-60 day low frequency oscillation over Asia during 1998 SCSMEX [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, 18: 623-638.
- [17] Chen Longxun, Gao Hui, He Jinhai, et al. Zonal propagation of kinetic energy and convection in the South China Sea and Indian monsoon regions in boreal summer [J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 47(12): 1 076-1 084.
- [18] Yang Qiuming. The relationship between low frequency oscillation over asia monsoon region and continuous heavy rain in the lower reaches of Yangtze River Valley [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 1993, 4(3): 320-326. [杨秋明. 初夏亚洲季风区环流低频振荡与长江下游持续暴雨 [J]. 应用气象学报, 1993, 4(3): 320-326.]
- [19] Chen Lizhen, Zhang Xiangong, Chen Longxun. A study of the difference of low-frequency oscillation between the typical flood/drought years in Changjiang Valley [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 1994, 5(4): 483-488. [陈丽臻, 张先恭, 陈隆勋. 长江流域两个典型旱涝年大气 30 ~ 60 天低频波差异的初步分析 [J]. 应用气象学报, 1994, 5(4): 483-488.]
- [20] Zhu C W, Nakazawa T, Li J P, et al. The 30-60 day intraseasonal oscillation over the western North Pacific Ocean and its impacts on summer flooding in China during 1998 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(18): 1 952, doi: 10. 1029/2003GL017817.
- [21] Ju Jianhua, Sun Dan, Lü Junmei. The influence of the East Asian monsoon stream on the large-scale precipitation course in eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, 31(6): 1 129-1 139. [琚建华, 孙丹, 吕俊梅. 东亚季风涌对我国东部大尺度降水过程的影响分析 [J]. 大气科学, 2007, 31(6): 1 129-1 139.]
- [22] Zhang Lina, Wang Bizheng, Zeng Qingcun. Impact of the Madden-Julian oscillation on summer rainfall in southeast China [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(2): 201-216.
- [23] Mao Jiangyu, Zhang Sun, Wu Guoxiong. 20-50-day oscillation of summer Yangtze rainfall in response to intraseasonal variations in the subtropical high over the western North Pacific and South China Sea [J]. *Climate Dynamics*, 2010, 34: 747-761.
- [24] Xue Feng, He Juanxiong. Influence of the Southern Hemisphere circulation on east-west oscillation of the western Pacific subtropical high [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(14): 1 532-1 536. [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[J]. 科学通报, 2005, 50(15): 1 660-1 662.]
- [25] Jia Yan, Guan Zhaoyong. Associations of summertime rainfall anomalies over the Changjiang-Huaihe River Valley with the interannual variability of 30-60-day oscillation intensity in the northwestern Pacific [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, 34(4): 691-702. [贾燕, 管兆勇. 江淮流域夏季降水异常与西北太平洋副热带 30~60 天振荡强度年际变化的联系[J]. 大气科学, 2010, 34(4): 691-702.]
- [26] Mao Jianguy, Wu Guoxiong. Intraseasonal variability in the Yangtze-Huaihe River rainfall and subtropical high during the 1991 Meiyu period[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(5): 762-770. [毛江玉, 吴国雄. 1991 年江淮梅雨与副热带高压的低频振荡[J]. 气象学报, 2005, 63(5): 762-770.]
- [27] Lu Er, Ding Yihui. Low frequency oscillation in east Asia during the 1991 excessively heavy rain over Changjiang-Huaihe River Basin[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1996, 54(6): 730-736. [陆尔, 丁一汇. 1991 年江淮特大暴雨与东亚大气低频振荡[J]. 气象学报, 1996, 54(6): 730-736.]
- [28] Chen Guixing, Li Weibiao, Yuan Zhuojian, et al. Evolution mechanisms of the intraseasonal oscillation associated with the Yangtze River Basin flood in 1998[J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(7): 957-967. [陈桂兴, 黎伟标, 袁卓建, 等. 1998 年长江流域洪水期大气季节内振荡特征及机理研究[J]. 中国科学: D 辑, 2005, 34(6): 562-572.]
- [29] Xu Guoqiang, Zhu Qian'gen, Xue Jishan, et al. A pilot study of propagation mechanisms of precipitation low-frequency variation over China in 1998[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2004, 28(5): 736-746. [徐国强, 朱乾根, 薛纪善, 等. 1998 年中国区域降水低频变化的传播机制的初步分析[J]. 大气科学, 2004, 28(5): 736-746.]
- [30] Zhang Ying, Chen Longxun, He Jinhai, et al. A study of the characteristics of the low-frequency circulation on Tibetan Plateau and its association with precipitation over the Yangtze Valley in 1998[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 66(4): 577-591. [张瑛, 陈隆勋, 何金海, 等. 1998 年夏季亚洲地区低频大气环流的特征及其与长江中下游降水的关系[J]. 气象学报, 2008, 66(4): 577-591.]
- [31] Han Rongqing, Li Weijing, Dong Min. Impacts of 30-60-day oscillations over the subtropical Pacific on the East Asian summer rainfall[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006, 20(4): 459-474. [韩荣青, 李维京, 董敏. 北半球副热带—中纬度太平洋大气季节内振荡的纬向传播与东亚夏季旱涝[J]. 气象学报, 2006, 64(2): 149-163.]
- [32] Tang Y B, Zhao L, Gao K. Correlation analysis of persistent heavy rainfall events in the vicinity of the Yangtze River Valley and global outgoing longwave radiation in the preceding month [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26(6): 1 169-1 180.
- [33] Tao Shiyan, Wei Jie. The westward northward advance of the subtropical high over the West Pacific in summer[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17(5): 513-525. [陶诗言, 卫捷. 再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳[J]. 应
- 用气象学报, 2006, 17(5): 513-525.]
- [34] Tao Shiyan, Wei Jie, Liang Feng, et al. Analysis of high impact weather induced by the downstream effect of Rossby waves [J]. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(7): 81-93. [陶诗言, 卫捷, 梁丰, 等. Rossby 波的下游效应引发我国高影响天气的分析[J]. 气象, 2010, 36(7): 81-93.]
- [35] Zhang Xiaoling, Tao Shiyan, Wei Jie. An analysis on the basin wide catastrophic floods in the Yangtze River during the 20th century [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2006, 11(6): 669-682. [张小玲, 陶诗言, 卫捷. 20 世纪长江流域 3 次全流域洪水事件的气象成因分析[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(6): 669-682.]
- [36] Huang Jing, Zhu Qian'gen, Li Aiwu. The characters of low-frequency circulation around the globe and its relationship with flood/drough in the Changjiang River Valley [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 1997, 13(2): 146-157. [黄静, 朱乾根, 李爱武. 与长江流域旱涝相联系的全球低频环流场[J]. 热带气象学报, 1997, 13(2): 146-157.]
- [37] Ding Yihui, Liu Yunyun. A study of the teleconnection in the Asian-Pacific monsoon region [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 66(5): 670-682. [丁一汇, 刘芸芸. 亚洲—太平洋季风区的遥相关研究[J]. 气象学报, 2008, 66(5): 670-682.]
- [38] Liu Yunyun, Ding Yihui. Teleconnection between the Indian summer monsoon onset and the Meiyu over the Yangtze River Valley [J]. *Science in China (Series D)*, 2008, 51(7): 1 021-1 035. [刘芸芸, 丁一汇. 印度夏季风的爆发与中国长江流域梅雨的遥相关分析[J]. 中国科学: D 辑, 2008, 38(6): 763-775.]
- [39] Yang J, Wang B, Wang B, et al. Biweekly and 21-30-day variations of the subtropical summer monsoon rainfall over the lower reach of the Yangtze River Basin [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23: 1 146-1 159.
- [40] Yang Qiuming. The drought/flood in the low reaches of Yangtze River and the interannual variations of the 30-60 day oscillation of eurasian circulation during summer half year [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, 59(3): 318-326. [杨秋明. 长江下游旱涝与夏半年欧亚环流 30~60 天振荡的年际变化[J]. 气象学报, 2001, 59(3): 318-326.]
- [41] Yang Qiuming. Extended range forecast experiments of the low frequency circulation for the period of the heavy precipitation over the lower reaches of the Yangtze River Valley in Mid-July 2011 [J]. *Science and Technology Review*, 2011, 29(32): 60-66. [杨秋明. 2011 年 7 月中下旬长江下游地区强降水期间低频环流延伸期预报试验[J]. 科技导报, 2011, 29(32): 60-66.]
- [42] Lau K M, Weng H Y. Recurrent teleconnection patterns linking summertime precipitation variability over East Asia and North America [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2002, 80: 1 309-1 324.
- [43] Ashok K, Behera S K, Rao S A, et al. El Niño Modoki and its teleconnection [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: C11007, doi:10.1029/2006JC003798.
- [44] Xue Feng, Wang Huijun, He Jinhai. Interannual variability of

- Mascarene high and Australian high and their influences on East Asian summer monsoon[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2004, 82(4): 1 173-1 186.
- [45] Sun J Q, Wang H J, Yuan W. A possible mechanism for the co-variability of the boreal spring Antarctic Oscillation and the Yangtze River Valley summer rainfall [J]. *International Journal of Climatology*, 2008, 29(9): 1 276-1 284.
- [46] Mu Songning, Zhou Guangqing. Relationship between winter northern Eurasian fresh snow extent and summer climate anomalies in China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, 34(1): 213-226, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.01.20. [穆松宁, 周广庆. 冬季欧亚大陆北部新增雪盖面积变化与中国夏季气候异常的关系[J]. *大气科学*, 2010, 34(1): 213-226.]
- [47] Liu Yimin, Bao Qing, Duan Anmin, *et al.* Recent progress in the impact of the Tibetan Plateau on climate in China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 27: 518-528.
- [48] Ding Yihui, Liang Ping. Extend range forecast basing on MJO [J]. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(7): 111-122. [丁一汇, 梁萍. 基于 MJO 的延伸预报[J]. *气象*, 2010, 36(7): 111-122.]
- [49] Yang Qiuming. 10 ~ 30 days extended-range forecast and trends [J]. *China New Technologies and Products*, 2008, 7: 96-97. [杨秋明. 10 ~ 30 天延伸期天气预报及发展趋势[J]. *中国新技术新产品*, 2008, 7: 96-97.]

Review of Impacts of the Global Atmospheric Intraseasonal Oscillation on the Continuous Heavy Rainfall over Yangtze River Valley

Yang Qiuming, Song Juan, Li Yi, Xie Zhiqing, Huang Shicheng, Qian Wei
(*Jiangsu Meteorological Institute, Nanjing 210008, China*)

Abstract: Based on citations of important impacts of the atmospheric Intraseasonal Oscillation (ISO) on heavy rainfall, the main characteristics and mechanisms of atmospheric ISO associated with the continuous heavy rainfall over the Yangtze River Valley (YRV) in China are reviewed in summary. Research on the spatial and interannual variations of the global atmospheric ISO patterns and their relationships to the continuous heavy rainfall over YRV are emphatically discussed and comments are given. We try to completely summarize the understanding of the climate characteristics of the rain ISO over YRV and the influences of the different tropical and extratropical ISO patterns on persistent heavy rains over East Asia subtropical region. Moreover, combined with the research level of the connections between ISO of both hemispheres and continuous heavy rainfall over YRV, some valuable scientific issue and potential research topics in future studies for the interactions between the different time scales ISO and persistent heavy rains and the extended-range forecast of the strong precipitation over YRV are also discussed in order to emphasize the roles of the ISO in Southern Hemisphere on the climate system of the global and East Asia subtropical region. These studies might therefore provide valuable information for the extended-range forecast of the heavy precipitation process during the 10 ~ 30 days and climate predictions of drought and flood over YRV.

Key words: Atmospheric intraseasonal oscillation; Variation on different time scales; Persistent heavy rainfall over the Yangtze River valley; Interaction between both hemispheres circulation.