0577-6619/2010/68(4)-0584-89 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

有关 OKJ 波列研究及展望*

王亚非
WANG Yafei

中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室，北京，100081
State Key Laboratory of Severe Weather, *Chinese A cademy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*
2008-05-13 收稿，2008-06-18 改回.

Wang Yafei. 2010. The study of the OKJ wave pattern and its outlook: A review. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(4):584-589

Abstract This article is a short review for a series of studies of a Rossby wave pattern (OKJ wave pattern) that frequently occurs in Eurasia in summer (especially in early summer). The features, the impact scope and the status of the OKJ wave train in summer were discussed. This paper pointed out that the OKJ wave train was characterized by a steadily quasi－stationary state and quite long decorrelation time scale. Its influence was able to spread to Eurasia directly and to North America indirectly. Sometimes, the OKJ wave train will interacts with another famous wave train (P-J), which plays a key role in affecting the large scale atmospheric circulation in East Asia. In addition, it is shown that the OKJ wave pattern is an important index for climate prediction and, the further study directions are suggested in this paper as well.
Key words Wave train, Wave dispersion, Ray tracing, Waveguide

摘　要　文中对夏季特别是初夏时节频繁发生在欧亚地区的一种罗斯贝波列(OKJ)的系列研究进行了阶段性总结，分别阐述了 OKJ 波列的性质、影响范围以及在夏季波动中的地位。指出 OKJ 具有稳定的准定常波性质，相对较长的相干时间尺度，直接影响范围在欧亚，间接可波及北美，在夏季还可以和另一著名波列(P-J)产生相互作用，从而对东亚夏季的大气环流变化产生关键性作用，对气候预测也有指示意义。文中并提出当前存在的问题和需要进一步研究的方向。
关键词　波列，波频散，射线追踪，波导
中图法分类号　P434^{+}.4

1　引　言

20 世纪 80 年代可谓是罗斯贝波理论从飞速发展到广泛应用的年代，Wallace (1981)利用 500 hPa 高度场资料发现并定义了北半球冬季 5 个遥相关类型，Hoskin 等 (1981)证明其中的遥相关类型可以用定常罗斯贝波的能量频散来解释。很多科学家将其落实到对著名的太平洋—北美(PNA)相关类型的经典解释。种种证据表明，当厄尔尼诺事件发生并在冬季达到成熟阶段时正位相 PNA 的类型会得到发展，成为一种热带对流激发出来的定常波传播现象。2008 年初中国南方雪灾也涉及到了冬季遥相关波列的传播(王亚非等，2008)。而夏季的遥相关类型的时间尺度就相对小得多。Nitta (1987)、Kurihara 等 (1987)、黄荣辉(1990)相继发现了在夏季相对来说最强的 P-J 波列(也称 EAP 波列)，即当热带地区菲律宾附近有强对流发生时能够激发定常罗斯贝波向东北方向传播，从而影响东亚地区的天气、气候变化。最初涉及到 OKJ 波列的存在是在一个日本非正式出版物上的一小段描述(Tsuyuki, 1990)，他们发现梅雨期内中高纬度鄂霍次克海附近有一串不太清晰的波列状相关中心，限于资料缺乏

* 资助课题：中国气象科学研究院灾害性天气重点实验室资助项目(2009LASWZF04) JICA 中日政府间合作项目及科技部 2009DFB20540。
作者简介：王亚非，主要从事东亚范围大尺度环流机理研究。E-mail: yfwang@cams.cma.gov.cn

没能给出任何物理解释。对其进行一系列深入研究的主要是 Wang 等(1992,1994, 2007)。Kato(1995)在其总结性论文中指出 OKJ 波列的发现对日本地区夏季长期预报有一定的指示意义。所谓 OKJ 波列是指夏季特别是初夏在欧亚大陆高纬度非常活跃的一种准定常波列。按照 Wang (1992) 和 Wang 等(2007,以下为 WYF07)的定义,此波列通常起源于里海,向东北方向传播,经贝加尔湖、鄂霍次克海转向东南至日本东部海域,继续向东南传播消失在副热带地区,由于贝加尔湖以东的波列信号较强而得名。从 1979—1998 年 6 月(第 31—36 候)在(30°N, 150°E)的 OLR 和 500 hPa 高度场的同时相关(图1,修改自WYF07的图3)可以看到,连续的

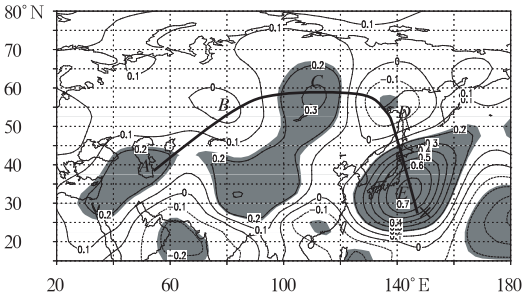

图 1 1979—1998 年第 31—36 候在(30°N, 150°E,符号×处)OLR 和 500 hPa 高度场的同时相关(阴影区表示超过 95%的信度检验。连接相关中心 A—E 的弧线近似为大圆路径;引自 WYF07,有所改动)

Fig. 1 The one-point correlation coefficient between $Z_{500\ \mathrm{hPa}}$ and the OLR at (30°N, 150°E) marked by a cross during the period of Pentads 31—36 of 1979-1998 Shaded areas indicate the regions over the 95% confidence level. The arc line linking the positive and negative correlation centers (A-E) is an approximation to the great circle track (from WYF07 but modified)

相关显著区中心在鄂霍次克海、日本以东洋面和其东南部副热带地区。OKJ 波列正位相的传播可以导致鄂霍次克海阻塞高压(阻高)的加强、梅雨锋东段的南移,并且抑制副热带高压北上。值得提出的是当时由于资料所限,Wang(1992)的图 9 只用了 6 年资料 36 个样本,而这张图用了 20 年资料 120 个样本,不但两张图的类型一样,相关中心的位置几乎没有一点偏移,且现在这张图的相关中心的信度明显增强,显示出 OKJ 波列在大气中的信号确实达到了相当的强度。

2 OKJ 波列的性质

OKJ 波列已经被证明是在夏季特别是初夏所能出现的最明显的波列之一。它的波源在哪是最有争议的一点。从图 1 中可以看到,虽然类似大圆路径的各个相关中心组织化的排列整齐,但在 B 点附近可以看到相关中心并不显著,也就是说 OKJ 波列东段存在传播,相当多的时候不是从 OKJ 路径的西段传来的波动。Wang 等 (1994)撰文指出在 1982 年 6 月 OKJ 波列传播的个例中贝加尔湖附近发现了新的波源,这是一种由海陆热力对比产生的波源,它加强了 OKJ 波列东段的传播。Wang 等(1994)给出了 1982 年 6 月 20—29 日波活动通量沿 140°E 和 55°N 的传播剖面(图 2),由图 2 可以看到在(50—65°N, 120—130°E)附近存在着由地面至 250 hPa的强烈向东和向上的波活动通量,他们还发现在贝加尔湖到鄂霍次克海之间存在很强的波活动通量的纯粹垂直分量的上升支并伴随波活动通量的

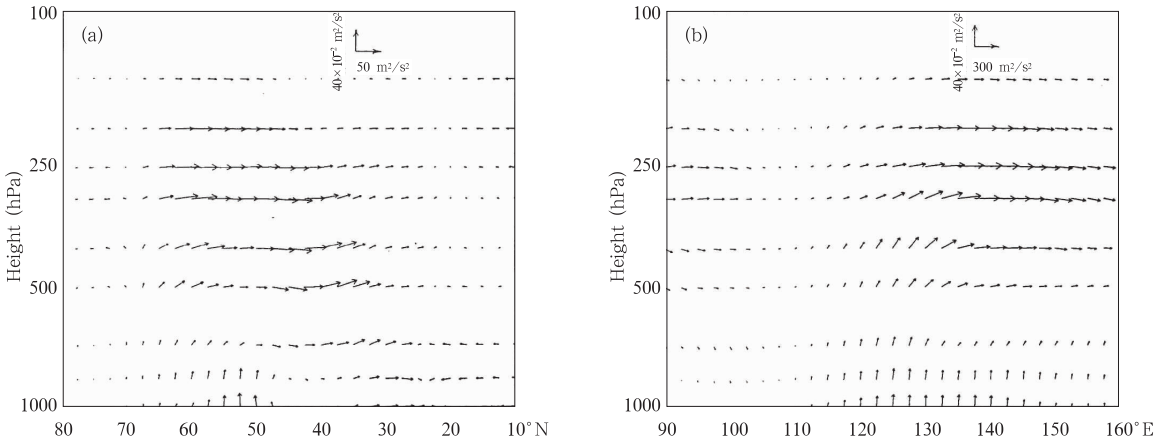

图 2 1982 年 6 月 20-29 日波活动通量的沿 140°E (a)和 55°N (b)的传播剖面(Wang, et al, 1994)

Fig. 2 Latitude-height cross section of the wave activity flux along 140°E (a) and longitude-height cross section of the wave activity flux along 55°N (b) for 20-29 June 1982 (from Fig. 7 of Wang, et al, 1994)

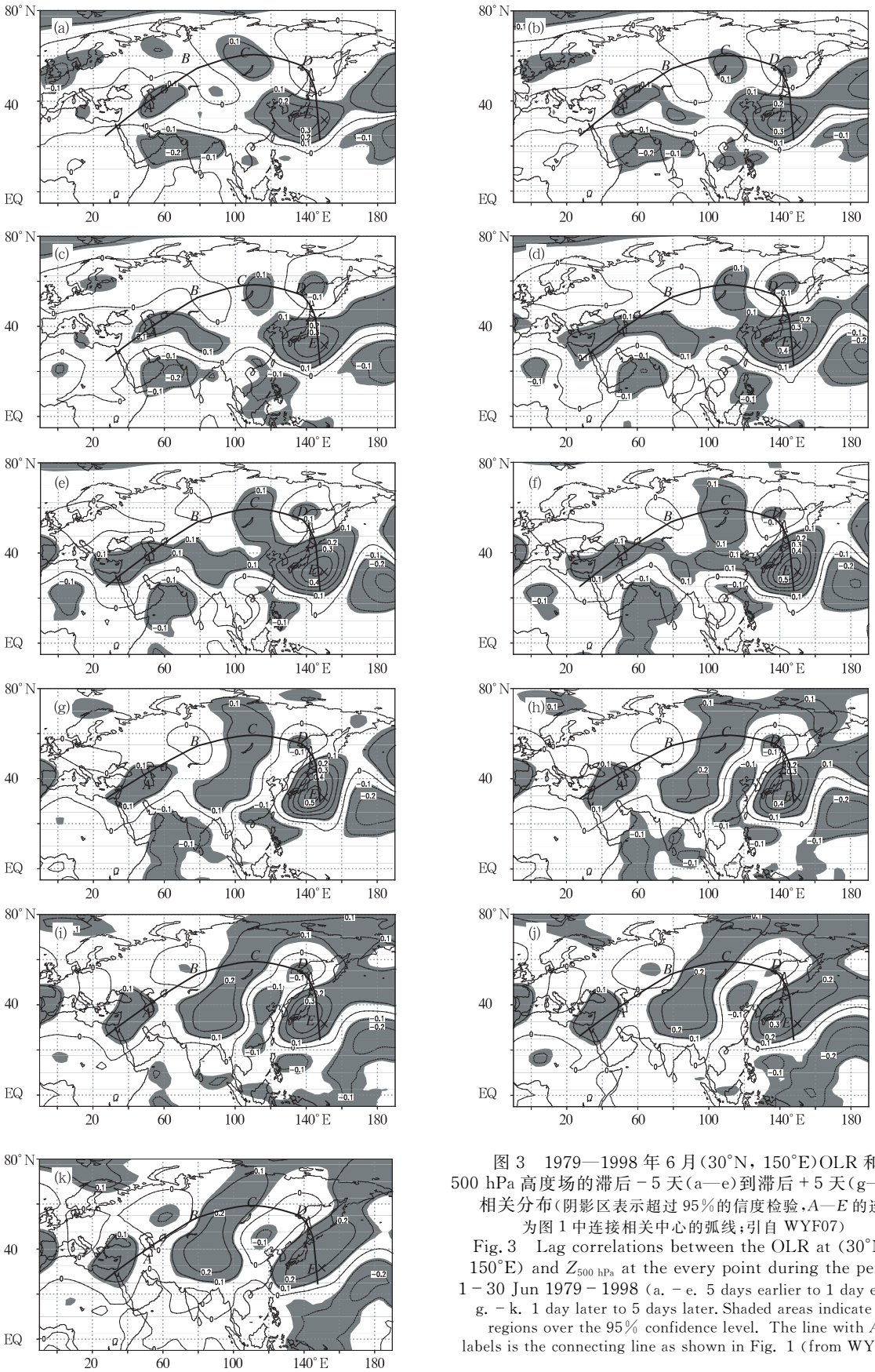

图 3 1979—1998 年 6 月(30°N, 150°E)OLR 和 500 hPa 高度场的滞后 −5 天(a—e)到滞后 +5 天(g—k)的相关分布(阴影区表示超过 95%的信度检验,*A*—*E* 的连线为图 1 中连接相关中心的弧线;引自 WYF07)

Fig. 3 Lag correlations between the OLR at (30°N, 150°E) and $Z_{500\ \mathrm{hPa}}$ at the every point during the period 1 − 30 Jun 1979 − 1998 (a. − e. 5 days earlier to 1 day earlier, g. − k. 1 day later to 5 days later. Shaded areas indicate the regions over the 95% confidence level. The line with *A* − *E* labels is the connecting line as shown in Fig. 1 (from WYF07))

强辐散分布场,这就有充分理由说明在此附近有新的波源存在,他们的这个发现还解释了为什么 OKJ 波列的东段信号总是比西段强,也即波在从里海等上游传播到这里时由于地形的原因被当地产生的新波源强化了。另一方面,Ogi 等(2004)认为 OKJ 波列的波源可能存在于巴伦支海附近,其海冰效应是激发波列传播的机制。为了对 OKJ 波列有更详细的了解,WYF07 用日平均资料做了滞后相关。图 3 为 1979—1998 年 6 月(30°N, 150°E)OLR 和 500 hPa高度场的滞后 -5 天到滞后 +5 天的相关分布。由图可见滞后相关 -2 到 +2 天时 OKJ 类型没有太大的变化,这说明 OKJ 类型的波列至少在 5 天时间尺度上保持准定常,位相速度几乎为零,但是它属于季节内的变化因为时间尺度加长会导致波动变形。而且当关键点的 OLR 滞后500 hPa高度场 2 天时从贝加尔湖经鄂霍次克海到日本东部海面的相关中心的形状拉长呈东北—西南向,说明确实波动能量的频散在鄂霍次克海附近的方向指向东南从而也证明 OLR 的变化是对大气罗斯贝波的响应。我们还对 OKJ 类型在节点上的 OLR 取为关键点来做类似于图 1 的相关,结果发现 OKJ 类型没有出现,这就进一步证明了 OKJ 波列属于定常波列。

3 OKJ 波列的影响范围

一般来说,一个波列传播的时间尺度和空间范围决定了其对大气环流的影响,当然持续的时间尺度越长有可能影响的空间尺度更大。单纯从波动理论上来表述的话从热带或者副热带产生的波的热源越强大越持久其波动对大气环流的影响就越大。另一方面,波动的空间尺度决定了其传播路线,一般来说,OKJ 类型的波列属于天气尺度扰动。图 4 为 WYF07 利用射线追踪理论来推断在里海放置波源的波动路径,这里只给出了纬向波数为 4、5、6 的 3 条射线以及 OKJ 的路径。二维射线方程为

$$u_g = \frac{2\beta_M k^2}{(k^2+l^2)^2} \quad (1)$$

$$v_g = \frac{2\beta_M kl}{(k^2+l^2)^2} \quad (2)$$

这里

$$\beta_M = \frac{2\Omega}{a}\cos^2\phi - \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}y}\frac{1}{\cos^2\phi}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}y}(\cos^2\phi\bar{u}_M) \quad (3)$$

正比于径向绝对涡度梯度,地球角速度为 $\Omega = 7.292 \times 10^{-5}$ rad/s ,地球半径为 $a = 6.37 \times 10^6$ m 我们在这设 x 方向波数 k 是常数,y 方向波数 l 随射线变化。$\bar{u} = \bar{u}_M \cos\phi$ 是 1969—1998 年 6 月的纬向风速的平均被当作西风基本态。需要说明的是 WYF07 基本遵循 Hoskins 等 (1981)的假定,没有像 Karoly (1983)采用的将 x 方向波数 k 也取为变量。笔者认为前者的追踪路线更加接近于理想化的大圆路径。

从图 4 可以看出纬向波数为 5 的射线路径与 OKJ 路径最为接近,它由里海经鄂霍次克海传播到西风基本态为零的副热带地区停止继续传播,所需时间大约 14.8 天,传播到日本以东洋面则只需 8—10 天。至于为什么纬向波数为 5 的射线会与实际的 OKJ 路径在鄂霍次克海附近存在一些差异,可看作是山脉和地形的影响。这是因为初夏鄂霍次克海上游地区由于海陆温差导致新的波源加强鄂霍次克海阻塞高压强度迫使 OKJ 波列路径经过鄂霍次克海从而导致两者之间的差异(WYF07)。所以由图 1 可大致判断其路径是 OKJ 波列主要涉及范围,此波列在这个范围内可对途经地区的大气环流有较大影响。其实 OKJ 波列的影响范围不只如此,根据 WYF07 所述,OKJ 波列可以与别的波列例如 P-J 波列有相互作用。P-J 波列是指起源于热带菲律宾或者附近副热带地区向东北传播的一种定常波列,它在夏季非常活跃并且可以跨越北太平洋传到北美(Nitta,1987)。WYF07 向我们展示了传播到日本东部海面的 OKJ 波列可以在那里产生强烈对流从而激发出 P-J 波列,即两类波列存在着相互作用。所以从这个角度说 OKJ 的影响范围几乎可以绕地球一周。

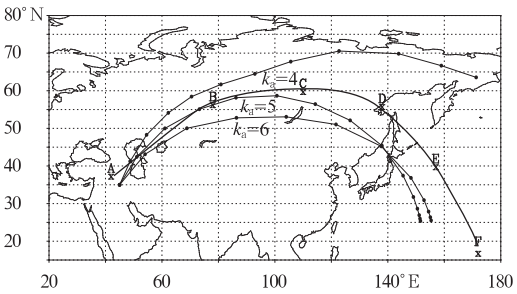

图 4 WYF07 利用射线追踪理论来推断在里海放置波源的波动路径,给出了纬向波数为 4、5、6 的 3 条射线以及 OKJ 路径线(射线上黑点表示时间间隔)

Fig. 4 WYF07 uses the ray tracing theory and deduces the wave paths originating from the Caspian Sea. The ray lines with zonal wavenumbers 4,5,6 and the OKJ wave path are shown. The black circles on the ray lines indicate daily positions

4 OKJ 波列在夏季的地位和作用

一般而言,OKJ 波列在 6 月最为明显,作为一点相关图的图 1 是经过多次计算才得出的结果,OKJ 类型在 7—9 月都不能用同样方法得以再现。但是在夏季的其他月份是不是完全看不到 OKJ 波列的踪影呢? 使用经验正交函数(EOF)分析来寻找它在夏季各个时期的踪迹。我们使用的资料为 5 天平均的 500 hPa 高度场,时间尺度和图 1 的计算保持一致。为了简单起见把资料分为 6—7 月和 7—8 月分别进行分析,另外因为是针对定常波所以这里的原始资料都被减去了纬向平均值只体现扰动值。同时也计算了 6—7 月 500 hPa 高度场第 1—3 主成分特征向量分布类型(图略),其图中的类型很接近图 1 的 OKJ 类型。以 6—7 月的第一特征向量为例,其中的负的相关区中心分布在俄罗斯的图拉(62.5°N、100°E)和日本东部(42.5°N,170°E),正的相关区中心分别在鄂霍次克海附近 (57.5°N,147.5°E)及乌拉尔山以西 (57.5°N,55°E)。对比图 1 可以看出,虽然相关区中心的位置有一些漂移,第一特征向量 OKJ 波列形式十分明显。必须注意到一点相关图和经验正交函数所代表的物理意义的差别。前者是表示对对流活跃地区(日本以东海域)的 500 hPa 高度场的响应,后者是表示高度场自身的主要振荡成分。所以我们可以看出一点相关所描述的空间尺度系统要稍微小一点,表示两者有些差别。在此还可以看到另一差异,那就是在第一主成分中的一个负的相关中心区域(57°N,50°E 以西),即在图 1 的 OKJ 波源区(里海)以北。显然西部地区的波列路经也有些差别。但是相关中心连线东段却都惊人的类似。所以说在整个夏季都可以发现 OKJ 波列的影子。

Wang (1992)指出来自鄂霍次克海上游 OKJ 波列的传播可以导致鄂霍次克海阻塞高压的发展,随着波动的一次次传播,梅雨锋东段的日本附近有南移加强的趋势,并且中国地区的长江中下游梅雨期偏长,王亚非等(1998)通过对 1991 年江淮暴雨的分析指出,OKJ 波列的传播使阻塞高压发展导致江淮梅雨期、梅雨量都增大。Nakamura 等 (2004) 通过针对鄂霍次克海阻塞高压发展机制的个例分析也证实了 OKJ 波列所起的积极作用并指出了其与日本冷夏有很大关系。由此可见,某一年 OKJ 波列的传播如果有着长期稳定的表现的话,这一年东亚天气形势会稳定的呈现上述研究结论的趋势,形成夏季气候异常。

5 总结和讨论

综上所述,OKJ 波列是夏季特别是初夏东亚地区唯一可以与 P-J 波列媲美的主要定常波列之一,它对东亚地区大气环流的重要影响是勿庸置疑的,对 OKJ 波列的认识可以归纳为:

(1) OKJ 波列的基本路径为从里海开始向东北传播经贝加尔湖、鄂霍次克海、日本东部海面继续向东南传播消失在副热带地区。但是 OKJ 波列的东段即从贝加尔湖、鄂霍次克海到日本东部的传播最为稳定持久,目前调查结果证明 OKJ 波列的波源主要在里海,但是还可能出现在巴伦支海或者贝加尔湖到鄂霍次克海之间的区域。

(2) OKJ 波列最经常出现在 6 月,7 月和 8 月也能见到但是随时间拖后出现概率逐渐减小。

(3) OKJ 波列是准定常波列,相干时间尺度(decorrelation time scale)至少为 5 天,属于季节内变动的较低频波列。

(4) OKJ 波列的正位相出现次数较多,它的传播经常伴随鄂霍次克海高压增强、日本以东洋面气旋性环流增强,并且抑制副热带高压北抬,使整个梅雨带特别是日本附近的东段偏南。

(5) OKJ 波列可以和 P-J 波列产生相互作用,当正位相的 OKJ 波列传播到日本东部海面时,会在那里产生新的波源,导致 P-J 波列的传播。

但是夏季大气中波列的传播远不是那么简单,存在问题如下:

(1) 波源问题始终是一个疑问,因为迄今为止由于各种原因还没有人对此进行详细的数值模拟。从图 1 的相关中心的分布来看,在 A 点较低层放置热源或者气旋性扰动源比较好理解,因为 A 点附近和关键点的 OLR 相关为正值,这意味着关键点 OLR 很低时对流层中层以下的 A 点附近应该是负的距平即气旋性环流。波射线追踪结果表明,理想射线路径与实际路径在鄂霍次克海有一定的差异,这种差异可看作是地形的作用,但还应该通过数值模拟进行确认。另外,巴伦支海和贝加尔湖附近的波源到底起什么作用也应该通过数值实验来考察。从以上分析结果来看,OKJ 波列东段很稳定,与其

说是准定常波不如说更象是一种驻波,它的围绕平衡点的回复力除了各种波源的作用还有大气内部本身的力量在起作用(Lau,1996),这种非线性作用应该予以充分的考虑。

(2) 波动与波动的相互作用也是一个很重要并需要全面调查的方面。对于 WYF07 所发现的正位相 OKJ 波列在日本东部海面激发出新的 P-J 波列还需要进一步的研究,包括这一现象的发生频率以及数值模拟再现。另外对负位相的 OKJ 波列与 P-J 波列的相互作用也应进行调查。除此之外,还应该考察更高频的波列与 OKJ 波列的相互作用。

(3) 需要进一步考察 OKJ 波列的传播与西风急流强弱摆动的关系。Hoskins 等(1993)提出了波导的概念,认为西风急流可以吸引罗斯贝波靠近自己,西风急流也就成了波导。Enomoto 等 (2003)提出了 Silk-road 波列类型存在的概念,也即波列在夏季会嵌入在沿 40°N 附近存在的副热带急流里,途经中国西部新疆、日本向东传播。但正如 Ogasawara 等(2007)提出的那样,它是属于一种较高频的波列。笔者曾经对夏季欧亚至太平洋区域对流层中层进行了大规模寻踪觅影式的调查,却没能发现可以等同于 OKJ 及 P-J 类型强度的其他类型波列,由此推断 Silk-road 类型波列的相干时间尺度较小。丁一汇等(2008)也提出了不同但类似的波列路径。另一方面,很显然 OKJ 波列的欧亚区域一长段路径在副热带西风急流以北,虽然 WYF07 认为是由于地形的作用导致此结果,在 6 月欧亚大陆上副热带西风急流偏弱的时候其波导作用会被弱化其他因素会起主要引导作用。但到底是为什么还有待于通过数值模拟等进行进一步研究证实。

致谢:感谢审稿专家提出的建设性意见,也感谢在读博士李琰同学在校对绘图方面的辅助性帮助。

参考文献

丁一汇,刘芸芸. 2008. 亚洲-太平洋季风区的遥相关研究. 气象学报,66(5):670-682

黄荣辉. 1990. 引起我国夏季旱涝的东亚大气环流异常遥相关及其物理机制的研究. 大气科学,14(1): 107-116

王亚非,宋永加. 1998. 1991 年夏东亚阻塞高压形成的诊断分析. 气象学报,56(2): 221-225

王亚非,李琰,李萍云等. 2008. 2008 年初中国南方雪灾大尺度环流背景分析. 气象学报,66(5):826-835

Enomoto T, Hoskins B J, Matsuda Y. 2003. The formation mechanism of the Bonin high in August. Quart J Roy Meteor Soc, 129: 157-178

Hoskins B J, Karoly D J. 1981. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. J Atmos Sci, 38(6): 1179-1196

Hoskins B J, Ambrizzi T. 1993. Rossby wave propagation on a realistic longitudinally varying flow. J Atmos Sci, 50: 1661-1671

Karoly D J. 1983. Rossby wave propagation in a baroclinic atmosphere. Dyn Atmos Oceans, 7: 111-125

Kato K. 1995. The synoptic features about the Okhotsk high related to Yamasei. Kishou-Kenkyu Note (in Japanese), 183 :67-90

Kurihara K, Tsuyuki T. 1987. Development of the barotropic high around Japan and its association with Rossby wavelike propagation over the North Pacific: An observational study of August 1984. J Meter Soc Japan, 65: 237-246

Lau K M, Yang Song. 1996. Seasonal variation, abrupt transition and intraseasonal variablility associatede with the Asian summer monsoon in the GLA GCM. J Clim, 9: 965-985

Nakamura H, Fukamachi T. 2004. Evolution and dynamics of summertime blocking over the Far East and the associated surface Okhotsk High. Quart J Roy Meteor Soc, 130: 1213-1233

Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the northern hemisphere summer circulation. J Meteor Soc Japan, 65: 373-390

Ogasawar T, Kawamura R. 2007. Combined effects of teleconnection patterns on anomalous summer weather in Japan. J Meteor Soc Japan, 85: 11-24

Ogi M, Tachibana Y, Yamazaki K. 2004. The connectivity of the winter North Atlantic oscillation (NAO) and the summer Okhotsk High. J Meteor Soc Japan, 82: 905-913

Tsuyuki T. 1990. The intraseasonal variation of tropical convective activity and the atmospheric circulation around Japan (I). Kishyo-Kenkyu Note (in Japanese), 168: 51-72

Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. Mon Wea Rev, 109(4): 784-812

Wang Y. 1992. Impact of blocking anticyclones in Eurasia in the rainy season (Meiyu/Baiu season). J Meteor Soc Japan, 70: 929-951

Wang Y, Yasunari T. 1994. A diagnostic analysis of the wave train propagating from high-latitudes to low-latitudes in early summer. J Meteor Soc Japan, 72(2): 269-279

Wang Y, Koji Yamazki, Fujiyoshi Y. 2007. The interaction between two separate propagations of rossby waves. Mon Wea Rev, 135: 3521-3540