

李子仪, 李双林, 李国平. 2013. 夏季乌拉尔长阻塞过程及其与热带热力异常关系个例分析 [J]. 大气科学, 37 (3): 731–744, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12006. LI Ziyi, LI Shuanglin, LI Guoping. 2013. Analysis of longstanding summer blocking highs over the Ural Mountains and their relationship with tropical thermal anomalies [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (3): 731–744.

夏季乌拉尔长阻塞过程及其与热带热力异常 关系个例分析

李子仪^{1,2,3} 李双林² 李国平¹

¹ 成都信息工程学院大气科学学院, 成都 6102252

² 中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029

³ 中国民用航空华东地区空中交通管理局浙江分局, 杭州 311207

摘 要 2010 和 1998 年均均为长江洪涝年, 这两年大气环流的一个共同特征是乌拉尔阻塞的频繁发生和异常维持。利用 NCEP/NCAR 逐日再分析的大气环流资料和向上射出长波辐射资料, 对比分析了 2010 和 1998 年夏季乌拉尔地区环流持续异常的特征、大尺度环流形势、热带加热背景及其可能影响。结果显示: (1) 2010 年夏季乌拉尔发生了一次持续正异常过程, 该过程是自 1948 年以来持续时间第二长 (共 37 天) 的, 其最大异常中心在乌拉尔略偏西, 持续时间比 1998 年的那次过程长 (1998 年的那次过程持续时间为 22 天); (2) 异常过程期间存在行星波活动异常, 2010 年的过程行星波活动以 2、4 波的贡献为主, 而 1998 年为 1、2 波的贡献为主; (3) 异常过程期间, 热带对流活动存在显著差异。这可能是它们行星波活动不同的原因; (4) 两次异常过程期间, 一个共同特点是在苏门答腊西侧的热带印度洋区域存在明显的对流增强。该区域强对流可能激发了类似东亚—太平洋遥相关型的波列向中高纬传播, 从而调制行星波活动, 再影响乌拉尔位势高度异常的形成和持续维持。

关键词 乌拉尔持续异常 行星波 热带对流

文章编号 1006-9895(2013)03-0731-14

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12006

Analysis of Longstanding Summer Blocking Highs over the Ural Mountains and Their Relationship with Tropical Thermal Anomalies

LI Ziyi^{1,2,3}, LI Shuanglin², and LI Guoping¹

¹ College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 6102252

² Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029

³ Zhejiang Sub-bureau of East China Regional Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation Administration of China, Hangzhou 311207

Abstract Severe floods occurred in the Yangtze River valley in 1998 and 2010. The atmospheric circulation patterns responsible for the disastrous events share a common feature: frequent occurrence and persistent presence of the blocking high over the Ural Mountains. To understand the formation and longstanding presence of the Ural blocking high, a comparative analysis was conducted by utilizing the daily data from the NCEP/NCAR reanalysis. The results suggest that (1) a significant positive persistent anomaly event occurred over the Ural in the summer of 2010, which was the second longest (37 days) since 1948 with the peak of the anomaly located slightly west of the Ural, whereas the 1998 event was shorter (22 days). (2) Significant abnormal planetary wave activities were seen in both cases. The planetary wave components with wavenumbers 2 and 4 played a dominant role in the 2010 case, but those with wavenumbers 1 and 2

收稿日期 2012-01-11, 2012-08-08 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 (973 计划) 2009CB421401

作者简介 李子仪, 男, 1987 年出生, 硕士, 主要研究方向为热带外大气环流异常。E-mail: zi_yi_li@163.com

were more important in the 1998 case. (3) Significant abnormal convections occurred over the tropics, which may have modulated the planetary wave activity and were responsible for the difference between the cases. (4) An intensified convection pattern emerged in the east tropical Indian Ocean region west of Sumatra in both cases. It might have significantly contributed to the geopotential height anomaly chain originating from the tropical Indian-Pacific Ocean and propagating toward the middle and high latitudinal Pacific; thus, the anomalous planetary wave activities excited a wave-train similar to the well-known East-Asian Pacific pattern.

Keywords Persistent anomaly over the Ural Mountains, Planetary wave, Tropical convection

1 引言

2010 年夏季长江流域发生了自 1998 年以来最强的、流域性的洪涝灾害。两湖水系、下游干流附近、上游嘉陵江和岷江流域、汉江上中游先后出现几次强降雨过程,致使 7~8 月长江上游出现 3 次较大洪峰,最大洪峰流量达到 $70000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$,使防汛形势一度异常紧张(沈浒英等, 2010)。同时东北地区南部遭受洪灾,国家和人民生命财产蒙受了很大损失。分析该年的环流形势,其重要特征是乌拉尔阻塞的频繁发生和很长的异常维持时间。2010 年的这一情况与 1998 年类似。1998 年夏季长江流域发生了 50 年一遇的特大洪水,东北嫩江、松花江流域发生了百年一遇的特大洪水。王钦等(2011)的研究具体分析比较了这两年我国东部降水的差异及其成因。

乌拉尔阻塞的频繁发生与持续维持是导致 1998 年夏季降水异常大气环流形势的一个重要方面(Li et al., 2001b)。2010 年,我国洪水期间乌拉尔也发生了一次阻塞事件。这两年的阻塞事件其维持时间都较长,2010 年尤其突出,甚至超过 1998 年十多天。如此长的异常维持自 1948 年以来都是少见的。

从洪涝发生的热带海温背景来看,这两年都属于 El Niño 事件盛期的次年。所不同的是,1997/98 的 El Niño 事件最大 SSTA 异常出现在热带中东太平洋,属于典型的(传统型) El Niño 事件;2009/10 的 El Niño 事件最大 SSTA 异常出现在热带中太平洋,属于中部型(暖池型,或 Modoki 型) El Niño 事件。王钦等(2011)的研究发现两种不同风格的 El Niño 事件能够部分解释相应的热带环流差异。大家知道引起夏季降水异常的大气环流形势,除了热带环流系统外,中高纬系统特别是乌拉尔阻塞高压的异常活动,也起着十分重要的作用。因此,很自然的问题是:2010 年乌拉尔阻塞活动有什么特点,相比 1998 年有不同?它们不同的热带 SSTA 背景是

否对乌拉尔阻塞活动差异起了调制作用?物理机制如何?这些问题的回答不仅有利于认识这两年异常环流形势的形成与维持,了解夏季长江洪涝的物理成因,还对改善短期气候预测都有重要意义。这些问题构成了本研究的基本出发点。故我们以与 1998 年的比较作为切入点,对 2010 阻塞过程作个例研究,回答上问题。

关于阻塞的研究由来已久(叶笃正等, 1962; 吴国雄等, 1994; 李金龙和纪立人, 1994; 李金龙等, 1998; 李峰和丁一汇, 2004; 李崇银和顾薇, 2010),其形成主要决定于大气内部过程。海陆热力差异引起的大气基本气流的不稳定,基本气流与行星波、天气尺度波的相互作用等多种因素均对阻塞活动有重要的影响(Hansen and Chen, 1982; Benzi et al., 1986; Dole, 1986; 刘辉等, 1995a, 1995b; 陆日宇和黄荣辉, 1996a; 高守亭等, 1998; 罗德海, 1999; Luo et al., 2002; Li, 2004; 刁一娜等, 2004)。然而,仅用大气内部过程则难以解释阻塞活动有的年特别频繁,另外的年特别弱的观测现象。近些年的研究表明,阻塞活动可能受到热带加热异常所调制。机制上热带加热可以通过激发向热带外传播的 Rossby 波列影响行星波活动,进而联系到阻塞。例如,陆日宇和黄荣辉(1996b, 1998)发现,夏季西太平洋暖池的热力状况异常可以通过激发东亚—太平洋型(EAP 型)遥相关波列,对东北亚地区(鄂霍次克海)阻塞高压发生显著的影响。事实上,热带海温对热带外环流的影响已经得到了广泛的研究,夏季西太平洋暖池的热力状况通过东亚—太平洋型遥相关波列对东亚地区的环流产生很大影响(Huang, 1992; Huang and Sun, 1992; Huang and Li, 1987)。李双林等(2001)发现,夏季乌拉尔阻塞活动异常也往往对应西太平洋地区的加热异常,并用模式试验证明后者对前者有强迫影响。MJO(Madden-Julian Oscillation)是热带大气活动的一个重要部分,能较好地表征热带对流加热情况,近年来有研究发现 MJO 与北大西洋涛动(NAO)存

在联系 (Cassou, 2008)。考虑 NAO 与欧亚大陆阻塞高压之间的密切联系 (Luo et al., 2010), 为了认识热带加热对乌拉尔持续异常过程形成和维持的可能影响, 有必要分析与异常过程有关的 MJO 的演变情况。而两年的热带热状况是否与两次异常事件存在联系? 这无疑是本研究要考虑的一个问题。

基于以上考虑, 本文将从大气环流持续异常事件的角度, 首先识别 2010 年乌拉尔阻塞异常活动过程, 并与 1998 年进行对比。随后, 在比较这两年行星波活动的基础上, 对比分析热带热力异常、MJO 的差异, 进而探讨热带热力异常对乌拉尔持续异常过程的可能影响及其机制。论文最后给出了本文的结论。

2 2010 年乌拉尔持续异常过程的历史地位及与 1998 年对比

所用大气环流资料为美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 提供的 1948~2010 年夏季 (6 月 1 日至 8 月 31 日) 逐日再分析资料。流函数由 u 、 v 风场计算得到。该资料水平网格距为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 气候态选取为 1948~2010 年 (共 63 年) 的多年逐日夏季平均。所用向上射出长波辐射 (OLR) 资料, 为美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 提供的 1974~2010 年夏季逐日插值资料, 网格距 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 气候态为 1974~2010 年 (共 37 年) 的多年逐日夏季平均。海温为 NOAA 提供的 1981~2010 年夏季逐日高分辨率混合分析资料 (High-resolution Blended Analysis), 水平网格距为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 气候态为 1981~2010 年 (共 30 年) 夏季的多年逐日平均。

首先采用持续异常界定方法 (李双林和纪立人, 2001) 来识别乌拉尔地区的持续异常过程。即在 500 hPa 位势高度场上, 选取 (60°N , 60°E) 作为乌拉尔关键点, 计算出相对于日气候演变的距平 (即去掉季节循环), 把 0.9 倍纬向平均均方差作为阈值, 当关键点距平大于或等于阈值且持续时间大于 10 天时, 便选为一次持续异常过程。为了将受天气尺度波影响而间断的异常过程包括在一起, 对距平场进行了 5 d 的滑动滤波处理。可以看到, 2010 年乌拉尔发生一次正持续异常过程, 时间是 7 月 10 日到 8 月 14 日, 持续 37 天。1998 年乌拉尔发生了两次正持续异常过程, 6 月 12 日至 21 日为一次, 持续 10 天; 7 月 16 日至 8 月 5 日为另一次, 持续时间为 22

天。考虑到 1998 年的第二次持续正异常过程持续时间较长, 与洪水灾害主要发生的时期 7 月对应, 且与 2010 年的那次事件发生时间有相对较好的对应性, 故我们用它来与 2010 年进行对比。后文提到的 1998 年的乌拉尔持续异常过程, 指的就是此次过程。

图 1 为 2010 年和 1998 年正持续异常过程的 500 hPa 位势高度距平成。可以看到, 2010 年的最大异常中心在乌拉尔偏西, (60°N , 50°E) 附近, 强度大于 160 位势米。除乌拉尔正距平中心外, 鄂霍次克海北部的切尔斯基山脉附近也存在一正异常中心, 强度较弱, 仅 50 位势米左右。从我国东北侧的锡霍特山到北美的温尼伯湖存在类似波列传播正负相间的分布, 正负中心分别在锡霍特山、日本东部、阿留申群岛西侧、阿拉斯加湾和温尼伯湖。1998 年正持续异常过程位势高度的高值中心在 (60°N , 60°E), 中心强度超过 120 位势米。鄂霍次克海西侧也有一个正异常中心, 位置较 2010 年偏西偏南, 强度超过 100 位势米, 反映鄂霍次克海阻塞高压增强, 贝加尔湖地区则为负的距平中心。此特征代表“两槽一脊”的双阻型环流形势盛行。此外, 与 2010 年相似, 从南海到北美的太平洋区域也表现存在类似波列传播的距平形势, 中心从东南亚和我国南海到渤海和日本南部、北太平洋中部、阿留申和阿拉斯加湾、温哥华地区, 最后在芝加哥附近。对比这两次异常事件的合成, 容易看到二者在中高纬的环流差异是明显的, 这点在后文的行星波活动分析中将看得更为清楚。就西太平洋副高而言, 2010 年位置较气候态为偏北西伸, 而 1998 年则偏南, 已有工作对比分析了成因 (王钦等, 2011), 因此本文不予讨论。

为了解这两个异常过程在历史资料中所处位置, 我们统计了 1948~2010 年间夏季发生的所有正异常事件, 得到异常事件共 55 次 (表 1), 其中持续时间超过 20 天的 14 次。2010 年的异常事件持续时间是其中第二长的。同时我们计算了 55 次异常事件乌拉尔地区 ($55^{\circ} \sim 65^{\circ}\text{N}$, $55^{\circ} \sim 65^{\circ}\text{E}$) 的合成位势高度强度, 发现 2010、1998 年这两次的强度均属中等; 1953 年的异常持续时间最长, 为 40 天, 强度与 2010 年接近。至此, 我们知道 2010 年异常过程最突出的特征是其强度中等, 持续时间很长, 它对整个中高纬环流有持续的影响。而众所周知, 阻塞的持续时间长相比其强度是更重要的。

下面对 2010 年和 1998 年两次异常事件的乌拉

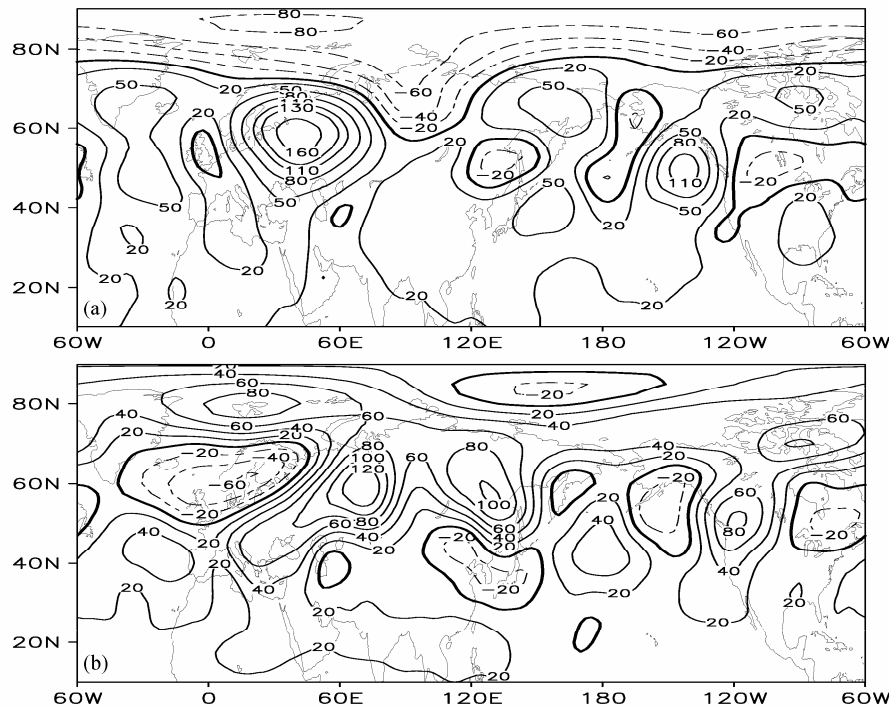


图1 (a) 2010 与 (b) 1998 年正持续异常过程 500 hPa 位势高度距平场合成 (单位: gpm)
Fig. 1 The composites of geopotential height anomalies (units: gpm) at 500 hPa in the duration of (a) 2010 and (b) 1998

表 1 1948~2010 年间夏季乌拉尔正异常事件
Table 1 The positive abnormal cases over Ural Mountains in summer from 1948 to 2010

序号	发生时间	持续天数	序号	发生日期	持续天数	序号	发生时间	持续天数
1	1951-08-09~08-28	20 天	20	1974-07-15~07-28	14 天	39	1996-07-11~07-25	14 天
2	1952-06-26~07-12	17 天	21	1976-07-30~08-08	10 天	40	1998-06-12~06-21	10 天
3	1952-07-17~08-01	16 天	22	1977-06-02~06-15	14 天	41	1998-07-16~08-07	22 天
4	1953-07-13~08-21	40 天	23	1977-07-28~08-09	13 天	42	1999-06-22~07-08	17 天
5	1954-06-28~07-26	29 天	24	1981-06-13~07-02	20 天	43	1999-07-22~07-31	10 天
6	1958-06-12~06-26	15 天	25	1981-07-16~08-10	26 天	44	2000-06-21~07-02	12 天
7	1962-07-06~07-26	21 天	26	1982-07-04~07-13	10 天	45	2000-07-13~08-03	22 天
8	1963-06-22~07-03	12 天	27	1983-06-29~07-16	18 天	46	2002-07-01~07-11	11 天
9	1965-07-06~07-17	12 天	28	1987-06-19~08-04	16 天	47	2003-06-26~07-05	10 天
10	1966-07-09~07-22	14 天	29	1987-07-28~08-06	10 天	48	2003-07-24~08-14	22 天
11	1966-08-03~08-12	10 天	30	1988-06-29~07-21	22 天	49	2004-06-26~07-09	14 天
12	1967-07-06~07-15	10 天	31	1989-06-03~06-23	21 天	50	2004-07-16~07-27	12 天
13	1967-07-27~08-07	12 天	32	1989-06-25~07-25	31 天	51	2005-07-18~08-15	29 天
14	1967-08-16~08-31	16 天	33	1990-07-06~07-21	16 天	52	2006-07-11~07-20	10 天
15	1968-08-17~08-31	11 天	34	1990-08-07~08-16	10 天	53	2007-06-30~07-19	19 天
16	1970-07-18~08-05	18 天	35	1991-06-22~06-05	13 天	54	2008-07-11~07-26	16 天
17	1971-07-17~07-29	13 天	36	1993-07-10~07-19	10 天	55	2010-07-10~08-15	37 天
18	1972-06-02~07-19	18 天	37	1993-07-29~08-07	10 天			
19	1974-06-30~07-10	10 天	38	1995-07-22~08-01	10 天			

尔高度演变进行比较。首先,对 500 hPa 位势高度异常进行标准化,将乌拉尔山附近的位势高度异常的区域平均定义为正异常强度指数。考虑到该两年异常过程发生时间的差异,我们对比分析了 7、8 月(涵盖两次过程时间)的逐日正异常强度指数的演变。从图 2a, b 看出,2010 年 7 月 17 日以后强度开

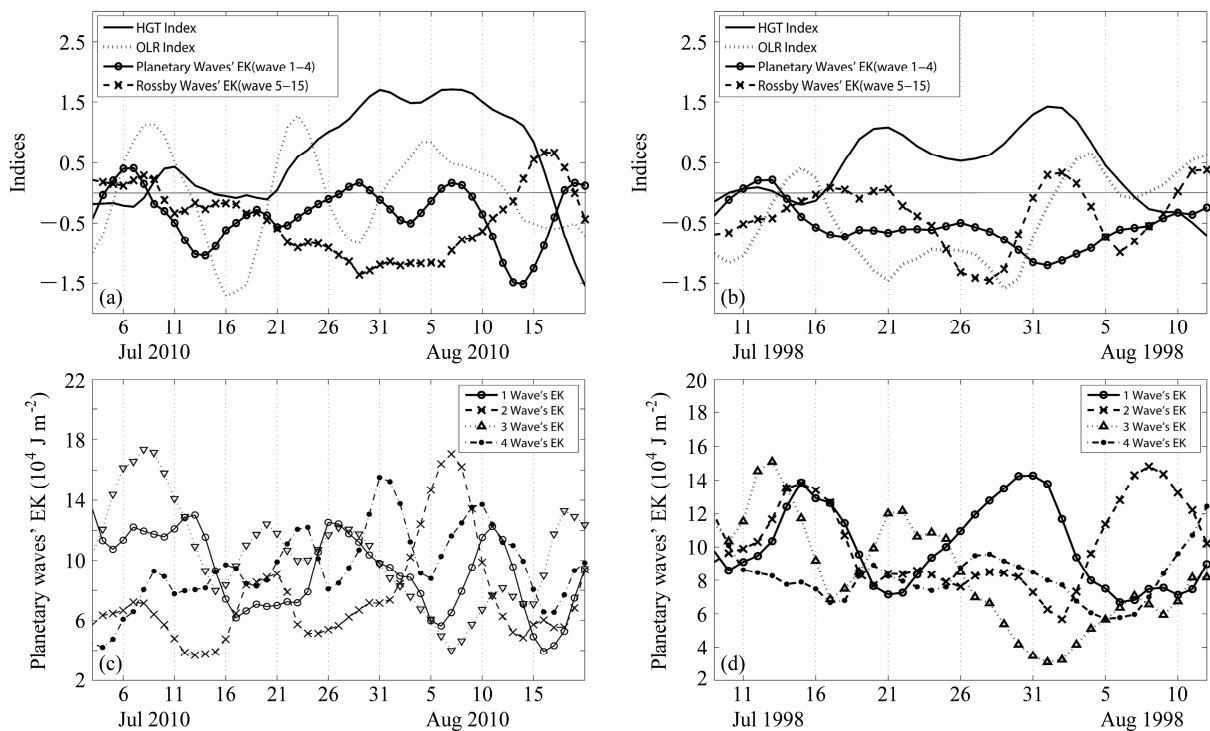


图2 (a, b) 标准化的高度异常强度、OLR 异常与行星波、气旋波动能对比; (c, d) 各行星波动能对比 (单位: 10^4 J m^{-2})。 (a, c) 2010 年; (b, d) 1998 年

Fig. 2 (a, b) Indices of geopotential height anomalies and OLR anomalies, planetary and cyclonic waves' EK (Kinetic Energy) indices, and (c, d) planetary waves' EK (unit: 10^4 J m^{-2}) during (a, c) 2010 and (b, d) 1998 summers

始上升, 在 8 月 5 日附近达到最大值, 后迅速下降; 1998 年异常开始前, 其强度指数自 7 月 11 日后强度指数逐渐增强, 后强度有所起伏, 8 月 1 日达最大, 结束后逐渐减弱。可见两次过程存在差异。

3 与两次乌拉尔持续正异常有关的波动

影响乌拉尔持续正异常形成与维持的因素有许多, 但总的来说主要为大气内部动力过程, 其中行星波活动十分重要。行星波不仅与瞬变波之间存在着非线性相互作用从而对异常的形成和维持起着关键作用外, 更重要的是它对瞬变波活动起着调制作用 (李双林和纪立人, 2001)。前面提到, 对应乌拉尔异常热带外环流的大尺度分布表现出不同的特征, 这可能与行星波的活动差异有关。为了明晰这点, 下面进行定量分析。

把 500 hPa 位势高度合成场进行纬向 Fourier 分解, 这里先计算了乌拉尔阻塞所处纬度带 ($50^{\circ} \sim 70^{\circ} \text{N}$) 上位势高度异常的 1~4 波波数的方差贡献率。从表 2 可见, 2010 年的 1~4 波方差贡献率较为均匀, 均占总解释方差率的 20~24%。而 1998

年中高纬带的 1、2 波起主要作用, 特别是 2 波, 其占总方差解释率的 38%。两次事件过程中行星波都有重要作用, 其总贡献都约为 85%; 2010 年 1~4 波的贡献较为平均 (约 20%), 而 1998 年 1、2 波的贡献较突出 (约在 30%左右), 4 波贡献几乎减半 (15%), 3 波贡献最小 (接近零)。为更好体现各行星波的贡献, 我们对纬带 ($50^{\circ} \sim 70^{\circ} \text{N}$) 上的高度异常进行经向平均后做功率谱分析, 结果可见图 3。图 3 中 2010 年行星波的贡献以 2、4 波最为明显, 方差贡献相当, 其中 4 波贡献通过 95%信度水平; 1998 年则最主要是 2 波。由此可见两年的 2 波均有主要贡献, 2010 年为 2、4 波, 1998 年为 2 波, 与表 2 结论相符。

表 2 1~4 波波数方差贡献率
Table 2 Variance contribution rate of planetary wave components with wavenumbers 1-4

发生时间	1 波	2 波	3 波	4 波	1+2+3+4 波
2010-07-10~08-15	20.13%	21.77%	23.68%	20.44%	86.02%
1998-07-16~08-07	29.12%	37.98%	1.87%	15.60%	84.58%

Fourier 分解结果如图 4 所示, 与图 1 对比可看

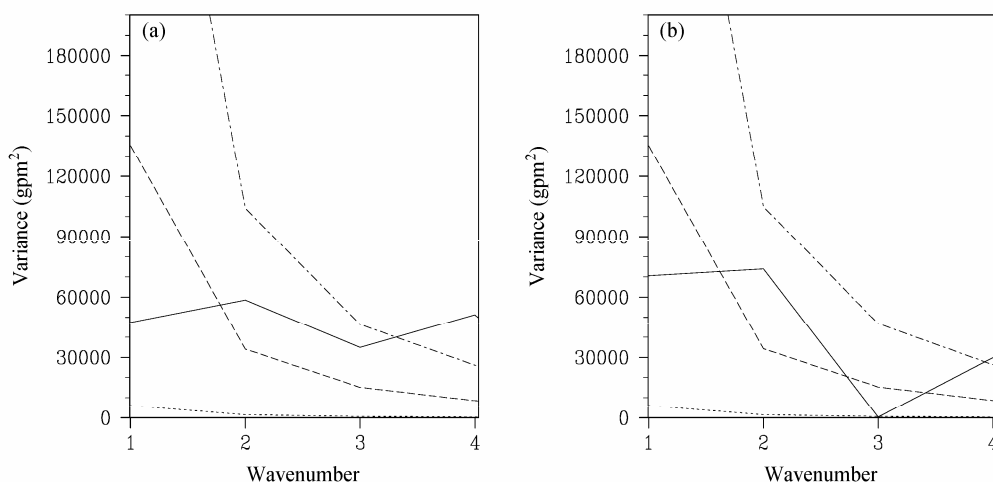


图3 (a) 2010 年与 (b) 1998 年 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{N}$ 纬带上的功率谱分析。点虚线: 0.05 显著性水平上界; 虚线: 红噪声曲线; 点线: 0.95 显著性水平下界; 实线: 方差

Fig. 3 The spectrum analysis of 500-hPa geopotential height anomalies over $50^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{N}$ latitude zone during persistent anomalies of (a) 2010 and (b) 1998 summers. Dash-dotted lines: the upper confidence bound; dashed lines: the “red noise” curve; dotted lines: the lower confidence bound; full lines: the variance of planetary waves

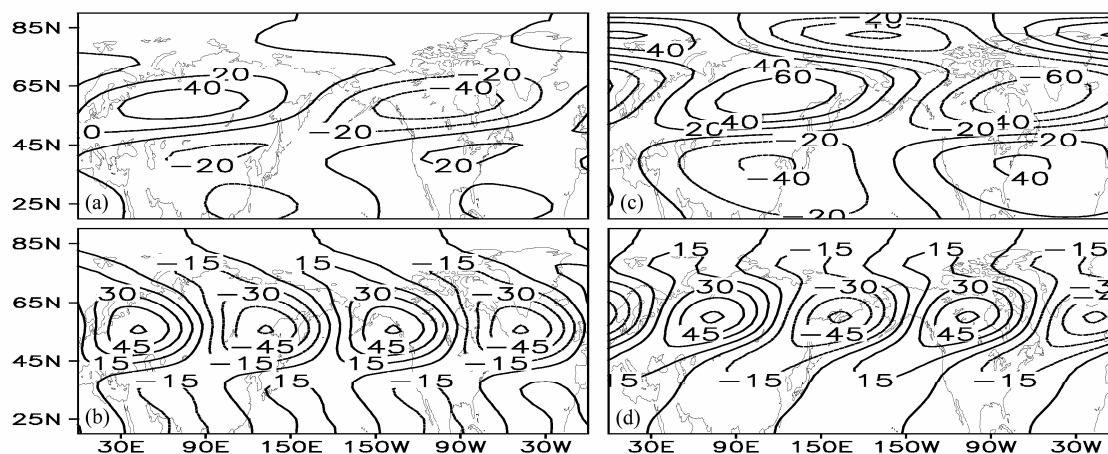


图4 (a, b) 2010 年和 (c, d) 1998 年 500 hPa 位势高度场上行星波 (a, c) 1 波与 (b, d) 2 波的分布 (单位: gpm)

Fig. 4 The distribution of planetary wave components of 500-hPa geopotential height in (a, b) 2010 and (c, d) 1998 (unit: gpm): (a, c) wavenumber 1; (b, d) wavenumber 2

到: 2010 年 1、2 波在乌拉尔地区一致为正值分布, 2 波的正值中心与正异常的中心对应较好; 而 1998 年异常期间 1 波和 2 波在乌拉尔地区为一致的正值分布, 其中 2 波的中心位置与乌拉尔持续异常的中心位置对应较好。而 3 波在正异常中心区域附近是个负值中心, 这可能是 1998 年乌拉尔异常强度相比 2010 年较小的原因之一 (图略)。两年行星波的 2 波形势相似, 说明 2 波对两次乌拉尔正异常发生与维持的作用是相同的, 3 波作用对 2010、1998 年的乌拉尔正异常作用相反。

就波数 1 (1 波) 而言, 两次事件波脊的中心位置存在明显的差异。2010 年脊的位置相对偏西, 强

度也较弱, 这与图 1 中合成高度上的差异一致, 说明 1 波活动在乌拉尔异常形成中也占有重要地位。

人们曾用波动能 (陆日宇和黄荣辉, 1996a) 和波波相互作用量 (Hayashi, 1991) 研究行星波活动对阻塞形成与维持的贡献。为能更好地了解行星波在两次异常过程中的作用, 这里计算了 ($50^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{N}$) 纬带上的平均行星波 (1~4 波) 和气旋波 (5~15 波) 的波动能, EK_n 即为 n 波动能。

为便于比较, 我们把行星波和气旋波动能进行了标准化, 与乌拉尔异常强度指数放在一张图上。图 3 中, 2010 年 7 月 10 日正异常开始后, 行星波动能明显上升, 异常末期动能迅速减弱, 到 8 月 15

日异常结束时达最低。行星波活动的两次高峰对应着乌拉尔异常强度的两次高峰。1998 年 7 月 1 日后行星波能量有明显的上升, 到 7 月 13 日达最高, 之后开始减弱。

从 1~4 波的贡献来看 (图 2c, d), 2010 年的正异常过程开始后 1、3 波动能增强, 到 7 月 25 日达到最大, 之后 4 波和 2 波动能相继增加, 到异常过程的后期各波 EK 均下降, 随之过程结束。2、4 波动能的高峰值对应着异常强度系数的两次高值。1998 年从 7 月 16 日开始, 3 波 EK 有所增强, 到 7 月 21 日后 3 波 EK 下降而 1 波动能增强, 到 7 月 30 日达到最大, 其后 2 波 EK 迅速增强, 到 8 月 7 日达最大, 正异常结束。4 波动能在异常过程中一直处于较低的状态; 1 波的动能在持续过程中较为突出, 与表 2 结果一致。1、3 波的两个高峰值分别对应着强度指数的两个高点。这种 1~4 波 EK 在异常过程开始后出现此消彼长的分布形式说明各行星波之间可能存在能量的相互输送, 使波动能集中流向某一个行星波, 使整个纬带上更容易出现与那一行星波相似的分布形势。如 2010 年异常过程的 2 波占主导地位, 且 2 波的中心在 40°E 附近, 与图 1 对应。可见异常期间纬圈上的行星波内部的能量传输与位势高度联系密切。

图 2 给出了气旋波 (5~15 波) 波动动能。无

论 2010 年还是 1998 年, 气旋波的 EK 都几乎与行星波呈相反的分布形式。2010 年的气旋波 EK 在 7 月 30 日达到最低点, 此时行星波 EK 则是最高点, 4 波 EK 也为最大值。1998 年气旋波 EK 于 7 月 29 日达到最低点, 此时行星波 EK 也处在一个较高位置, 更为重要的是此时的 1 波 EK 也达最高点。可见, 两年乌拉尔持续异常期间可能存在气旋波向行星波的动能量转换; 而气旋波 EK 可能会选择性地流向行星波的某一个或两个波, 使得其中的一或两个波表现得更加明显, 间接地与异常持续时间相关联。

4 两年正异常期间热带热力异常

热带热力异常对中高纬大气环流异常的影响不可忽视。对比研究热带热状况异常, 有助于解释热带外持续异常在有些年强且容易发生, 而另些年不易于发生的观测事实。以前的工作发现, 在热带异常热源的驱动下, 瞬变和准定常行星波之间的双向相互作用是乌拉尔持续正异常发生与维持的一个重要机制 (Li et al., 2001a)。上面我们发现对应乌拉尔异常, 存在显著的行星波活动异常。考虑到行星波活动很可能受到热带热力异常调制 (Hu, 2005; Chen et al., 2003), 有必要分析热带热力异常及其可能影响。

图 5 为 2010、1998 年持续异常期间合成的海表温度异常 (SSTA) 分布。2010 年的 SSTA 已从 El Niño

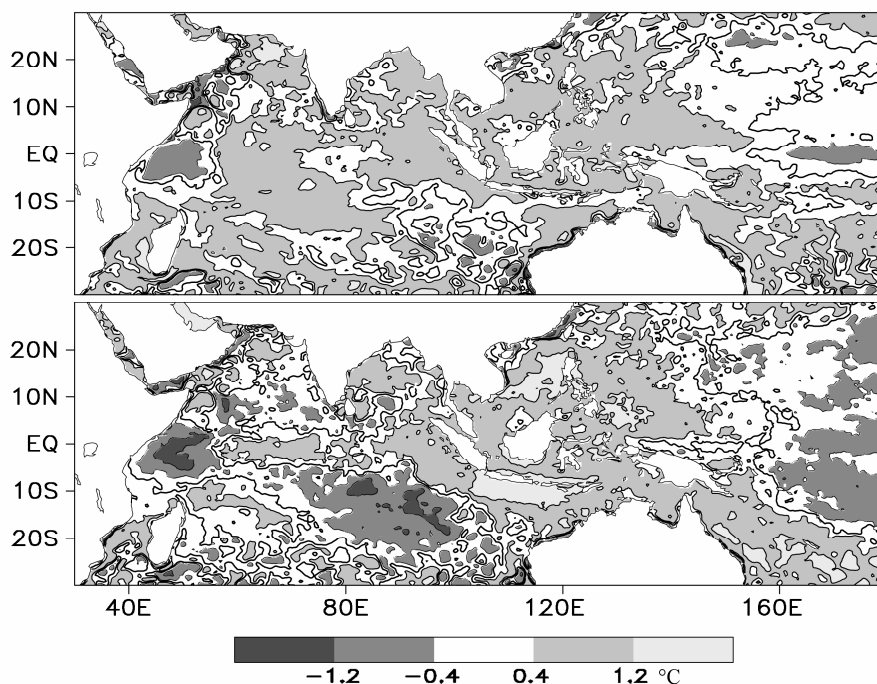


图 5 (a) 2010 年与 (b) 1998 年夏季乌拉尔异常期间的热带 SSTA 合成 (单位: °C)

Fig. 5 The composites of tropical SST anomalies during the cases of (a) 2010 and (b) 1998

衰退位相向 La Niña 发展, 在南海、印度尼西亚以北为暖异常, 强度超过 0.6°C ; 赤道太平洋中部为冷异常, 最低值达 -1.2°C ; 在赤道印度洋, 基本是正异常分布。而 1998 年的 SSTa 场表现为典型的 El Niño 衰退位相, 从北印度洋到西太平洋海温呈现暖异常, 赤道印度洋中部 (10°S , 85°E) 附近则为负异常。相比而言, 2010 年热带海温的暖异常面积大于 1998 年, 但强度比 1998 年弱。

有关 1998 年的研究表明, 热带热力异常有利于乌拉尔地区形成位势高度正异常(李双林等, 2001)。机制上, 赤道印度洋至阿拉伯海的 OLR 异常, 特别地在苏门答腊岛西侧的印度洋区域存在明显的对流活跃区 (OLR 负异常), 能提供瞬变活动与时间平均流不断发生相互作用、相互反馈的背景, 使得正

高度异常得以长时间维持。是否 2010 年是类似情况, 值得研究。

图 6 为 2010 年与 1998 年乌拉尔持续异常期间合成 OLR 异常分布的对比。可以看出, 2010 年的 OLR 在南海、孟加拉湾南部、印度尼西亚和阿拉伯海至巴基斯坦等区域为负异常, 而在赤道太平洋中部为正异常。而 1998 年从赤道太平洋到阿拉伯海北部, 经西太平洋、南海及中南半岛到孟加拉湾以北为 OLR 正异常, 中心在海南及中南半岛东部附近, 日本南部到我国东海、江淮流域都为 OLR 负异常。尽管存在这些差异, 两次过程一个共同的特征是在苏门答腊以西及印度尼西亚等区域为 OLR 负异常。

为进一步说明, 我们选取该区域内 ($5^{\circ}\text{S} \sim 15^{\circ}\text{S}$, $90^{\circ}\text{E} \sim 110^{\circ}\text{E}$) 的 OLR 异常进行区域平均, 用标准

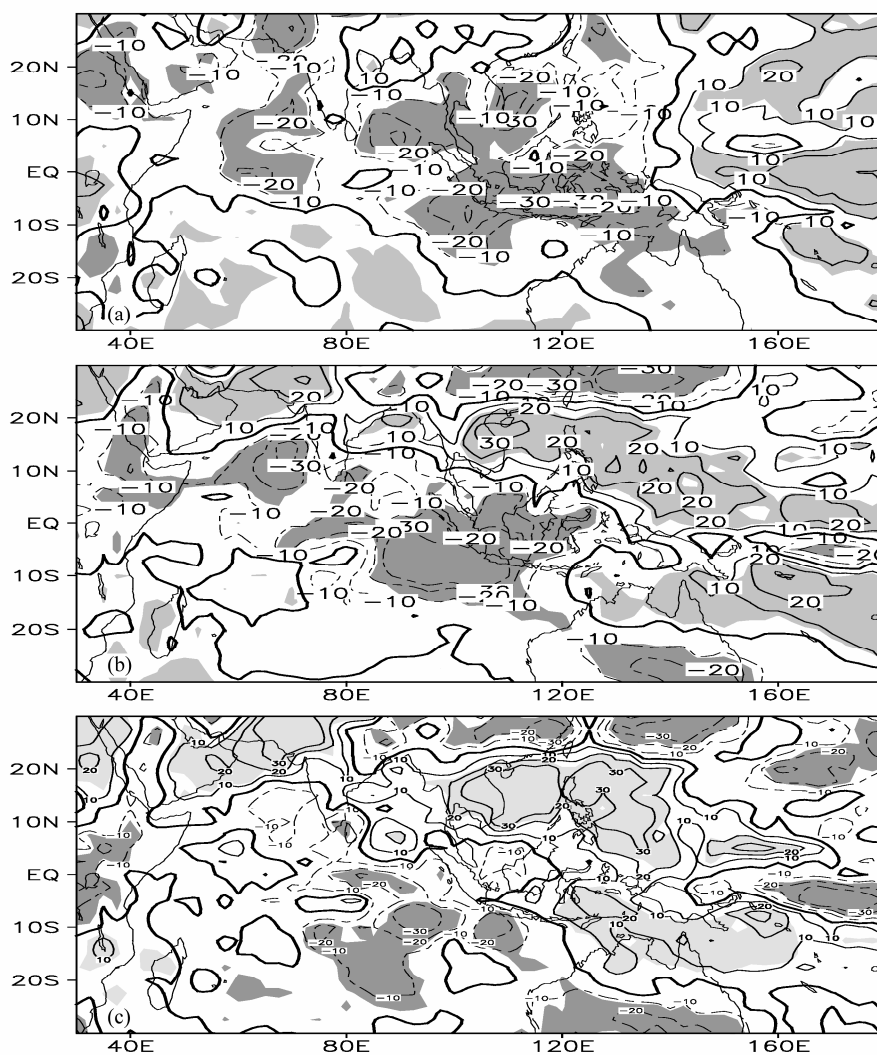


图 6 (a) 2010 年、(b) 1998 年乌拉尔正异常期间的 OLR 异常合成以及 (c) 两次异常事件的 OLR 异常差 (1998 年减去 2010 年)。单位: W m^{-2} ; 阴影: 通过 0.05 显著性水平检验

Fig. 6 The composites of OLR anomalies during cases of (a) 2010 and (b) 1998, and (c) their difference (1998 minus 2010). Units: W m^{-2} ; shaded areas: 0.05 significance level

化的 OLR 距平指数表征对流活动 (称为 OLR 指数)。从两年的比较来看 (图 2), 2010 年在乌拉尔异常开始 (7 月 10 日) 后 OLR 开始下降, 到 16 日达到极小值, 之后上升到 23 日达到最大, 到 28 日时又到达极小值; 此时的行星波 EK 达极大值, 气旋波 EK 达极小值; 此 OLR 指数极小值对应着 3 天之后 (即 31 日) 乌拉尔位势高度极大值。其中 7 月 31 日到 8 月 13 日 OLR 为正异常, 8 月 4 日达极大值。而 1998 年在异常开始 (7 月 16 日) 后 OLR 一直下降, 到 7 月 21 日达到极小值, 同时高度异常和 3 波 EK 也为极大值。OLR 另一极小值出现在 7 月 29 日, 与 1 波 EK 最大值对应, 此 4 天后 (8 月 2 日) 位势高度达到极大。可见 OLR 负异常和两次异常过程有较好对应。但两年 OLR 异常均提前异常过程的开始或结束 1~2 天, 这可能与两事件维持时间有联系; 其热带热力差异可能是行星波活动存在差异的一个原因。

热带 OLR 表现出显著的季节内振荡 (MJO) 特征。以前人们发现, 冬季 MJO 的第 3、4 位相与北大西洋涛动 (NAO) 和大西洋脊存在显著的滞后 6 天左右的相关关系, 而 MJO 的第 3、4 位相对应苏门答腊西侧和印度尼西亚附近 OLR 的负中心 (Cassou, 2008)。因此, 有必要比较这两次过程 MJO 的活动情况。我们计算了能较好地表现 MJO 特征的实时多变量 MJO 指数 (Real-Time Multivariate MJO Index, 简称 RMM 指数) (Wheeler and Hendon, 2004; 章丽娜等, 2011), 图 7 为 2010 年与 1998 年夏季乌拉尔异常事件期间的 RMM1、RMM2 指数 (实际上 RMM 指数总是成对出现, 对应 MJO 的不同模态, 故文中记作 RMM1 和 RMM2)。可见, 2010 年的

MJO 指数主要分布在第 3、4 位相, 平均 RMM1 为 3.797, 比 1998 年 RMM2 (-5.126, 属第三位相) 绝对值小, 解释了 2010 年 OLR 与位势高度的对应程度不如 1998 年。1998 年夏季乌拉尔异常事件过程多对应 MJO 的第三位相。1998 年异常期间的平均 RMM1 为 1.176, RMM2 为 -4.070 (属第三位相)。此也表明苏门答腊岛西侧以及印度尼西亚区域对流活动与乌拉尔异常的密切联系。

5 讨论——苏门答腊岛西侧与印度尼西亚区域的对流活动对乌拉尔异常的可能影响

前面我们发现, 苏门答腊岛西侧与印度尼西亚区域的对流活动与乌拉尔异常存在很好的对应关系。一个自然的问题是: 是否该地区的热力异常能对乌拉尔异常的维持发挥一定的作用呢? 最近 Shi and Lu (2010) 发现, 孟加拉湾的对流活动能激发类似 EAP 型向热带外传播的波列影响东北亚。这说明上述问题的肯定回答是存在一定可能性的。为此, 我们计算区域 ($5^{\circ}\text{S}\sim 15^{\circ}\text{S}$, $90^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$) OLR 异常与北半球位势高度异常场的同期相关。从图 8 中可以看出, 无论是 2010 年还是 1998 年, 在乌拉尔存在明显的负相关。此外, 从东南亚到北太平洋, 存在一个“正—负—正”间隔的、类似 EAP 传播的相关系数大值区。这种链状分布在异常期间的合成图上也有表现 (图 1), 1998 年的异常事件尤为明显。

是否上述波列状结构是热带印度洋区域对流活跃期大气内部的一个模态? 我们把上面区域内日 OLR 负异常强度超过多年 (共 37 年) 夏季平均日序列 1 倍标准差, 并且异常持续时间超过 10 天

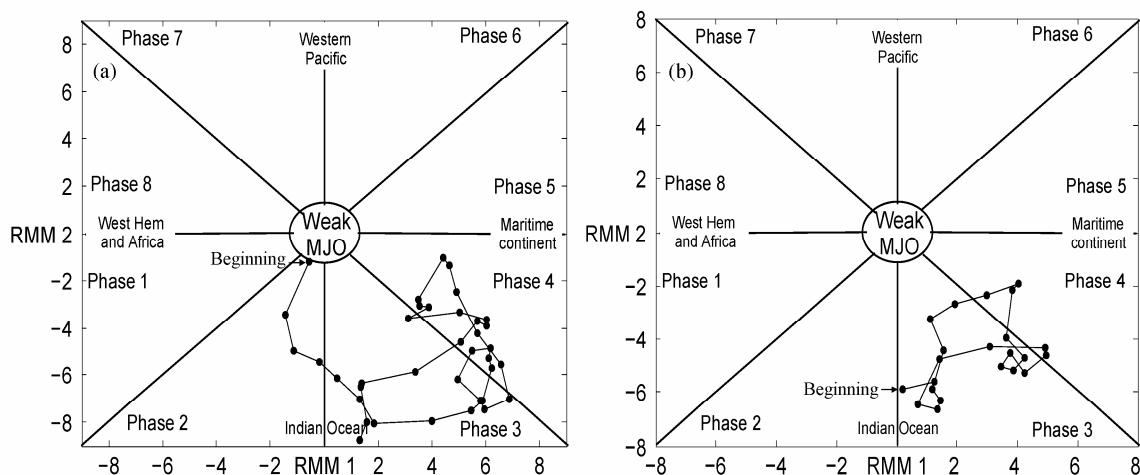


图 7 (a) 2010 年与 (b) 1998 年夏季乌拉尔异常事件的 RMM1 与 RMM2 指数分布

Fig. 7 The distributions of RMM1 and RMM2 indices during the cases of (a) 2010 and (b) 1998 summers

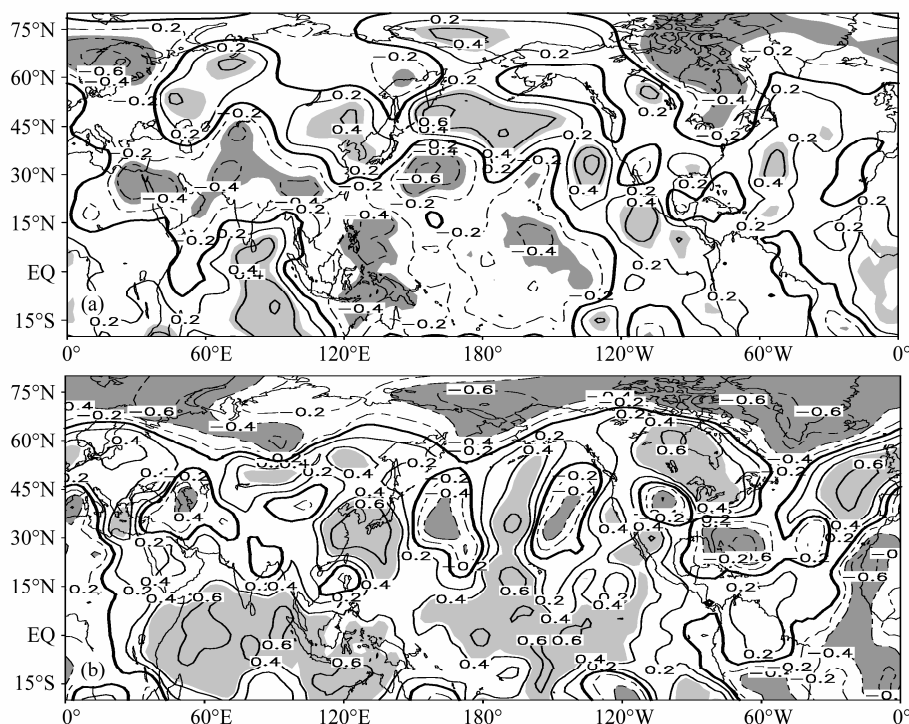


图8 (a) 2010 年与 (b) 1998 年乌拉尔异常期间热带印度洋区域 OLR 异常与 500 hPa 位势高度场异常同期相关分布。阴影区域通过 0.05 显著性水平检验

Fig. 8 The distributions of simultaneous correlation coefficients between OLR anomalies and geopotential height anomalies at 500 hPa over the tropical Indian Ocean area during (a) 2010 and (b) 1998. Shadings indicate 95% confidence level

的个例选取出来, 共获得 68 次负 OLR 持续过程。把上述 68 次个例的热带外 ($20^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{N}$) 500 hPa 位势高度异常场进行 EOF 分析, 选取出第一、二特征向量 (解释方差分别为 13.0% 和 12.1%), 把高于 1 倍 EOF 时间系数方差的个例的流函数异常进行合成。合成图上, 苏门答腊西侧为正中心, 对应下层对流加热; 其分布与 2010、1998 年相似, 在乌拉尔附近有正异常中心分布, 尽管中心强度较弱、偏南, 可看到一个从东南亚到北太平洋、类似 EAP 波列传播的分布形势 (图 9), 其正负中心分别在东海、日本东部的北太平洋区域、阿留申群岛、阿拉斯加湾东部以及北美密歇根湖南部区域。该形势与 Shi and Lu (2010) 提到的波列有大致一致性, 这说明苏门答腊岛以西区域的对流异常可以通过该波列影响热带外, 且有利于激发乌拉尔区域正异常。

为验证以上统计结果, 我们用线性斜压模式 (Linear Baroclinic Model, 简称 LBM) 进行试验研究, 积分 40 天。在苏门答腊岛西侧 (5°S , 100°E) 附近设置一个理想的热源, 垂直加热在 300 hPa 最大 (如图 10a, b), 模式中的气候态为 1948~2010 年 7 月平均。图 10c 是 LBM 模式对理想加热场在

550 hPa 的相应结果。图 10c 中, 热带苏门答腊西侧 (10°S , 90°E) 附近为最强负中心, 从热带印度洋沿北太平洋西岸到北美内陆甚至北大西洋, 存在一个类似波列传播的“正—负相间”的位势高度相应。其正值中心分别在中南半岛、鞑靼海峡、阿拉斯加湾、北美东部、北欧西岸等; 负中心在华北到内蒙古高原东部、堪察加半岛东部、哥伦比亚高原东部还有北美东部的北大西洋上。在 250 hPa 上, 苏门答腊西侧的负中心变成了正, 且此中心面积较大延伸到中南半岛和南海一带, 其他的正负中心都与 550 hPa 的相同 (图略)。对比图 9b 发现, 图 10c 中的正负中心较图 9b 的普遍偏西 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$, 但线性响应结果出现了类似 EAP 波列传播的特征, 两图正负中心也有大致对应, 如此我们认为热带苏门答腊西侧印度洋附近的对流加热可以激发此类 EAP 波列的形式传播到中高纬。

同时, 我们注意到图 10c 中的乌拉尔区域没有出现正异常中心。已有工作指出夏季乌拉尔正异常事件不是直接由热带激发的遥相关响应结果 (李双林等, 2001), 中高纬风暴轴、平均流和行星波之间的相互作用是夏季乌拉尔正异常事件发生与维持

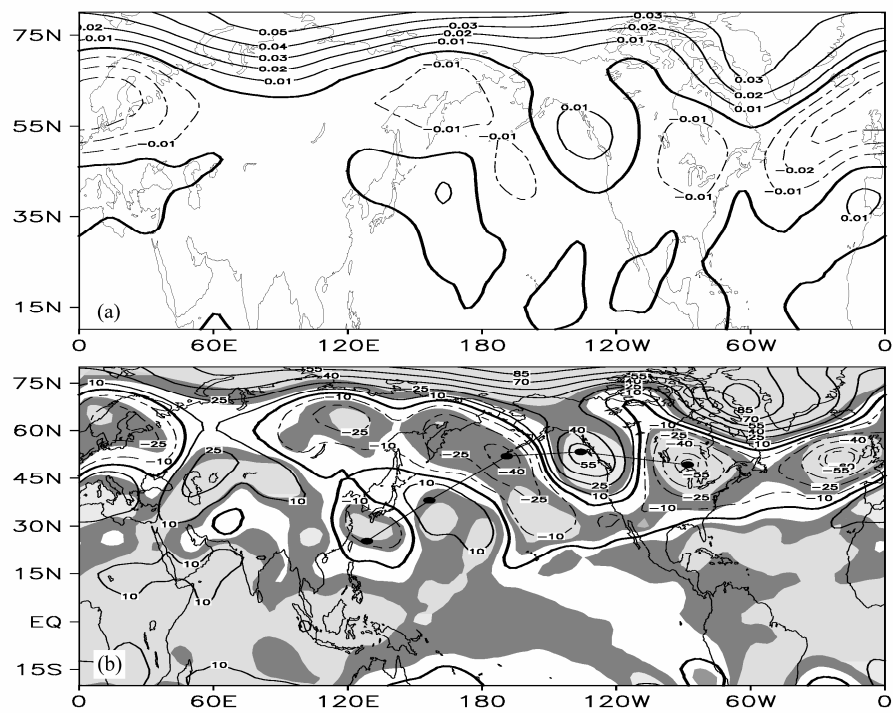


图 9 苏门答腊西侧区域对流异常事件的 (a) 500 hPa 高度异常场 EOF 1 及其 (b) 流函数合成 (单位: $10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)。浅、深阴影区域分别通过 0.10 和 0.05 显著性水平检验

Fig. 9 (a) The leading empirical orthogonal function of 500-hPa geopotential height anomaly and (b) the composite of stream function anomaly ($10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) in the cases of convection anomalies over the region to the west of Sumatra. Light and dark shadings indicate 90 % and 95 % confidence levels, respectively

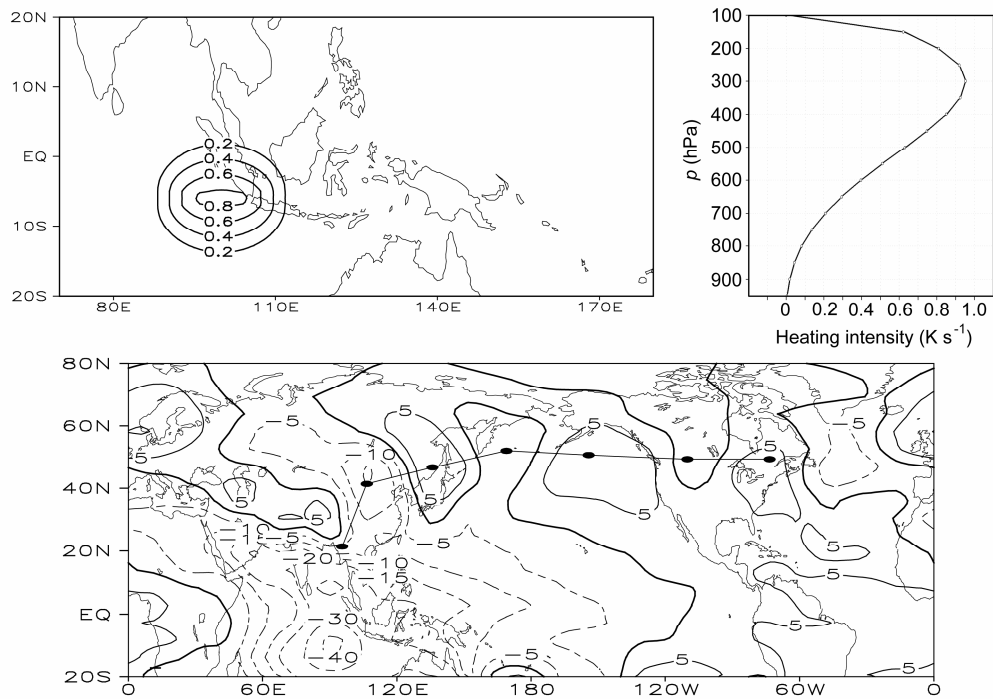


图 10 (a) 理想热源的强度分布 (单位: K s^{-1}); (b) 加热源中心强度的垂直廓线分布 (单位: K s^{-1}); (c) 550 hPa 上对理想热源的位势高度响应 (单位: gpm)

Fig. 10 (a) The distribution of idealized heat source intensity (K s^{-1}); (b) the vertical profile of intensity at heating center; (c) LBM 550-hPa geopotential height response to the idealized heating (unit: gpm)

的重要机制 (Li et al., 2001a), 故这样的结果是可理解的。从热带来的波列对中高纬行星波进行调制, 并不是直接激发了乌拉尔异常事件。行星波、风暴轴和平均流之间的相互作用过程复杂, 本文中暂不

讨论。

6 结论

本文利用以前提出的持续异常界定方法,研究了长江洪涝年 2010 年夏季乌拉尔地区持续异常过程情况,分析了该年持续异常过程在历史上所处位置,并从行星波和气旋波相互作用、热带热源发挥调制影响的角度,通过与 1998 年的乌拉尔持续异常过程进行对比,探讨了乌拉尔异常的维持机制。得到如下结论:

(1) 2010 年发生了一次乌拉尔持续异常过程,持续时间为 7 月 10 日至 8 月 15 日,累计 37 天,是自 1948 年以来持续时间第二长的(持续时间最长的为 1953-07-13~08-21,持续时间 40 天)。两年异常过程中间的行星波活动是重要的,两年的行星波活动表现出不同特征。其中,2010 年 2、4 波贡献显著,1998 年则为 1、2 波;可一定程度上解释乌拉尔异常强度的变化过程。

(2) 两年的热带海温在苏门答腊岛附近为暖异常,2010 年印度洋的暖异常面积大于 1998 年,但强度为 1998 年较强。两年热带热力异常在苏门答腊以西区域表现最为一致,与乌拉尔异常强度的演变有较好的对应性,也存在差异。这两年的热带热力异常与行星波活动、乌拉尔异常之间有一定对应,其联系密切。

(3) 两次异常期间 MJO 指数均表示苏门答腊以西区域附近的对流活动与异常事件关系甚密,说明两年热带热状况与乌拉尔异常之间的联系是存在的。

通过统计和数值试验的方法发现苏门答腊以西的对流异常可能通过激发类似 EAP 向热带外传播的波列,调制中高纬度的行星波活动进而影响乌拉尔异常。具体说来:苏门答腊西侧区域印度洋附近为暖异常,有利于附近区域上空的对流加强,异常强的对流活动激发了类似 EAP 波列向中高纬的北太平洋区域传播,这样的波列对中高纬行星波起到了调制作用,使位势高度异常场表现出相对应的形式。异常后期行星波动能向气旋波传输,行星波 EK 下降,最后乌拉尔异常结束。

2010 年相比 1998 年,乌拉尔正高度距平中心较 1998 年偏西,且从东南亚到北太平洋区域类似 EAP 波列的异常形势也存在差异。后者可能使得气旋波对行星波的调制作用出现差异。从热带热力异

常上看,两次过程期间 OLR 异常差异的最大值在南海与菲律宾附近区域。这些差异是如何影响热带外环流形势的差异,其机制又如何,还不清楚。对行星波的对比分析中发现,行星波 2 波对两次异常的维持都起到了重要作用,两年的 2 波形式都与异常中心对应最好,多年正异常位势高度场合成的 2 波形式也是如此。说明行星波 2 波形式可能对乌拉尔异常持续贡献很重要。以往的一些研究也指出 2 波对中高纬的重要性(杨蕾等, 2006)。了解夏季乌拉尔持续性异常发生的规律与物理机制,将有助于提高我国夏季短期预报的准确性。本文只是从两次个例的对比出发,粗浅分析了行星波的贡献及热带热力异常的可能影响,所提出的物理机制尚不完善,需今后进一步深入研究。

参考文献 (References)

- Benzi R, Saltzman B, Wiin-Nielsen A. 1986. Anomalous Atmospheric Flows and Blocking [M]. Florida: Academic Press, 459 pp.
- Cassou C. 2008. Intraseasonal interaction between the Madden-Julian Oscillation and the North Atlantic Oscillation [J]. *Nature*, 455: 523-527.
- Chen W, Takahashi M, Graf H F. 2003. Interannual variations of stationary planetary wave activity in the northern winter troposphere and stratosphere and their relations to NAM and SST [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D24): 4797, doi: 10.1029/2003JD003834.
- 刁一娜, 李建平, 罗德海. 2004. 阻塞流场与瞬变涡动相互作用的动力学研究 [J]. *大气科学*, 28 (6): 901-924.
- Diao Yina, Li Jianping, Luo Dehai. 2004. A dynamic study of the interaction between transient eddies and blocking [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28 (6): 901-924.
- Dole R M. 1986. The life cycles of persistent anomalies and blocking over the North Pacific [J]. *Advances in Geophysics*, 29: 31-69.
- Dole R M, Gordon N D. 1983. Persistent anomalies of the extratropical Northern Hemisphere wintertime circulation: Geographical distribution and regional persistence characteristics [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 111 (8): 1567-1586.
- 高守亭, 朱文妹, 董敏. 1998. 大气低频变异中的波流相互作用(阻塞形势) [J]. *气象学报*, 56 (6): 665-679.
- Gao Shouting, Zhu Wenmei, Dong Min. 1998. On the wave-flow interaction in the low frequency atmospheric variation: Blocking pattern [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 56 (6): 665-679.
- Hansen A R, Chen T C. 1982. A spectral energetics analysis of atmospheric blocking [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110: 1146-1165.
- Hayashi H L. 1991. A numerical simulation of amplification of low-frequency planetary waves and blocking formations by the upscale energy cascade [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 119: 2919-2935.
- Hu Y Y. 2005. A closer comparison of early and late-winter atmospheric trends in the Northern Hemisphere [J]. *J. Climate*, 18 (16): 3204-3216.
- Huang R H. 1992. The East Asia-Pacific pattern teleconnection of summer

- circulation and climate anomaly in East Asia [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 6: 25–371.
- Huang R H, Li W J. 1987. Influence of the heat source anomaly over the western tropical Pacific on the subtropical high over East Asia [C]// *Proceeding International Conference on the General Circulation of East Asia*. Chengdu: 40–51.
- Huang R H, Sun F Y. 1992. Impacts of the tropical western Pacific on the East Asia summer monsoon [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 70 (1B): 243–256.
- 李崇银, 顾薇. 2010. 2008 年 1 月乌拉尔阻塞高压异常活动的分析研究 [J]. *大气科学*, 34 (5): 865–874. Li Chongyin, Gu Wei. 2010. An analyzing study of the anomalous activity of blocking high over the Ural Mountains in January 2008 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34 (5): 865–874.
- 李峰, 丁一汇. 2004. 近 30 年夏季亚欧大陆中高纬度阻塞高压的统计特征 [J]. *气象学报*, 62 (3): 865–874. Li Feng, Ding Yihui. 2004. Statistical characteristic of atmospheric blocking in the Eurasia high-mid latitudes based on recent 30-year summers [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 62 (3): 865–874.
- 李金龙, 纪立人. 1994. 夏季北半球 500 hPa 位势高度场持续性异常的地理分布及区域特征 [J]. *大气科学*, 18 (2): 163–172. Li Jinlong, Ji Liren. 1994. Geographical distribution and regional characteristics of 500 hPa height persistent anomalies during Northern Hemisphere summertime [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 18 (2): 163–172.
- 李金龙, 李志锦, 纪立人. 1998. 北半球夏季环流持续性异常及其发展特征 [J]. *大气科学*, 22 (1): 58–67. Li Jinlong, Li Zhijin, Ji Liren. 1998. Persistent anomalies in the Northern Hemisphere during summertime and characteristics of their development [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 22 (1): 57–68.
- Li S L. 2004. Impact of northwest Atlantic SST anomalies on the circulation over the Ural Mountains during early winter [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82 (4): 971–988.
- 李双林, 纪立人. 2001. 夏季乌拉尔地区环流持续异常及其背景流特征 [J]. *气象学报*, 59 (3): 280–293. Li Shuanglin, Ji Liren. 2001. Persistent anomaly in Ural area in summer and its background circulation characteristics [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 59 (3): 280–293.
- 李双林, 纪立人, 倪允琪. 2001. 夏季乌拉尔地区大气环流持续异常 [J]. *科学通报*, 46 (9): 753–757. Li Shuanglin, Ji Liren, Ni Yunqi. 2001. The persistent anomaly of atmospheric circulation in Ural area in summer [J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 46 (9): 753–757.
- Li S L, Ji L R, Lin W T. 2001a. On the formation and maintenance of the persistent anomalies of summertime circulation over the Ural Mountains [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 18(5): 819–830.
- Li S L, Ji L R, Lin W T, et al. 2001b. The maintenance of the blocking over the Ural Mountains during the second Meiyu period in the summer of 1998 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 18 (1): 87–104.
- 刘辉, 吴国雄, 曾庆存. 1995a. 北半球阻塞高压的维持 I: 准地转和 Ertel 位涡分析 [J]. *气象学报*, 53 (2): 177–185. Liu Hui, Wu Guoxiong, Zeng Qingcun. 1995a. On maintenance of blocking anticyclones of Northern Hemisphere. Part 1: Quasi-strophic and Ertel potential Vorticity analysis [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 53 (2): 177–185.
- 刘辉, 吴国雄, 曾庆存. 1995b. 北半球阻塞高压的维持 II: 瞬变扰动强迫和平均流位涡平流的形成 [J]. *气象学报*, 53 (3): 337–348. Liu Hui, Wu Guoxiong, Zeng Qingcun. 1995b. On maintenance of blocking anticyclones of Northern Hemisphere. Part 2: Mechanism of eddy forcing and PV advection by mean flow [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 53 (3): 337–348.
- 陆日宇, 黄荣辉. 1996a. 关于阻塞形势演变过程中波数域能量的诊断分析 [J]. *大气科学*, 20 (3): 269–278. Lu Riyu, Huang Ronghui. 1996a. Energetics examination of the blocking episodes in the Northern Hemisphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Science* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 20 (3): 269–278.
- 陆日宇, 黄荣辉. 1996b. 热带西太平洋海温异常对东北亚阻塞形势影响的数值模拟 [J]. *气候与环境研究*, 1 (2): 134–142. Lu Riyu, Huang Ronghui. 1996b. Effects of the SSTA in the tropical western Pacific on the blocking highs over northeastern Asia [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1 (2): 134–142.
- 陆日宇, 黄荣辉. 1998. 东亚—太平洋遥相关型波列对夏季东北亚阻塞高压年际变化的影响 [J]. *大气科学*, 22 (5): 727–734. Lu Riyu, Huang Ronghui. 1998. Influence of East Asia/Pacific teleconnection pattern on the interannual variations of the blocking highs over the northeastern Asia in summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 22 (5): 727–734.
- 罗德海. 1999. 大气中大尺度包络孤立子理论与阻塞环流 [M]. 北京: 气象出版社, 113 pp. Luo Dehai. 1999. The Large-Scale Envelope Solitary Theory and the Blocking Situation (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 113 pp.
- Luo D H, Li J P, Huang F. 2002. Life cycles of blocking flows associated with synoptic-scale eddies: Observed results and numerical experiment [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 19 (4): 596–618.
- Luo D H, Zhu Z H, Ren R C, et al. 2010. Spatial pattern and zonal shift of the North Atlantic oscillation. Part I: A dynamical interpretation [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 67: 2805–2826.
- 沈浒英, 匡奕煜, 瞿丽. 2011. 2010 年长江暴雨洪水成因及与 1998 年洪水比较 [J]. *人民长江*, 42 (6): 11–14. Shen Huiying, Kuang Yiyu, Zi Li. 2011. Genesis of 2010 storm-flood in Yangtze River basin and its comparison with 1998 flood [J]. *Yangtze River* (in Chinese), 42 (6): 11–14.
- Shi S F, Lu R Y. 2010. Teleconnection patterns along the Asian Jet associated with different combinations of convection oscillations over the Indian continent and western North Pacific during summer [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 3 (1): 14–18.
- 王钦, 李双林, 付建建, 等. 2012. 1998 和 2010 年夏季降水异常成因的对比分析: 兼论两类不同厄尔尼诺事件的影响. *气象学报*, 70 (6): 1207–1222. Wang Qin, Li Shuanglin, Fu Jianjian, et al. 2012. On the formation of anomalous summer precipitation in the years of 2010 and 1998: A comparison of the El Niño's impact between Modoki and typical El Niño cases [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 70 (6): 1207–1222.
- Wheeler M C, Hendon H H. 2004. An all-season real-time multivariate MJO Index: Development of an index for monitoring and prediction [J]. *Mon.*

- Wea. Rev., 132 (8): 1917–1932.
- 吴国雄, 刘辉, 陈飞, 等. 1994. 时变涡动输送和阻高形成——1980 年夏中国的持续异常天气 [J]. 气象学报, 52 (3): 308–320. Wu Guoxiong, Liu Hui, Chen Fei, et al. 1994. Transient eddy transfer and formation of blocking high—On the persistently abnormal weather in the summer of 1980 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 52 (3): 308–320.
- 杨蕾, 陈文, 黄荣辉. 2006. 北半球准定常行星波气候平均态的资料分析和数值模拟 [J]. 大气科学, 30 (3): 362–372. Yang Lei, Chen Wen, Huang Ronghui. 2006. The data analysis and numerical simulation of the climatology of quasi-stationary planetary waves in the Northern Hemisphere [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (3): 362–372.
- 叶笃正, 陶诗言, 朱抱真. 1962. 北半球冬季阻塞形势的研究 [M]. 北京: 科学出版社. Ye Duzheng, Tao Shiyan, Zhu Baozhen. 1962. Studies on the Blocking Situation in the Northern Hemisphere (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.
- 章丽娜, 林鹏飞, 熊喆, 等. 2011. 热带大气季节内振荡对华南前汛期降水的影响 [J]. 大气科学, 35 (3): 560–570. Zhang Li'na, Lin Pengfei, Xiong Zhe, et al. 2011. Impact of the Madden-Julian oscillation on pre-flood season precipitation in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (3): 560–570.