

潘婕, 纪立人, 布和朝鲁. 2009. 夏季欧亚中高纬持续流型的季节内气候特征 [J]. 大气科学, 33 (2): 300–312. Pan Jie, Ji Liren, Bueh Cholaw. 2009. Intraseasonal climate characteristics of the summertime persistent anomalous circulation over Eurasian middle and high latitudes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (2): 300–312.

夏季欧亚中高纬持续流型的季节内气候特征

潘婕^{1, 2} 纪立人^{1, 3} 布和朝鲁^{1, 3}

1 中国科学院大气物理研究所灾害性气候研究与预测中心, 北京 100029

2 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081

3 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

摘 要 利用合成、EOF 分析、数值模拟等方法, 研究了夏季欧亚中高纬两类典型持续流型: E 型 (主要特点是乌拉尔山、贝加尔湖、鄂霍次克海地区分别为长波脊、槽、脊) 和 C 型 (槽脊位置与 E 型相反) 的季节内气候特征, 得到以下主要结论: (1) 流型指数实际分布频数与正态分布理论概率的差值呈现双峰特征, E、C 型异常环流实际发生频数较理论值偏多; (2) 气候平均的夏季欧亚环流型呈现明显的季内阶段性演变特征, 经历着与西太平洋副高北跳、我国夏季雨带北移类似的阶段性变化, 数值模拟再现了这种特征; (3) E、C 型过程期间不仅欧亚中高纬区环流有明显差异, 在北半球的其他地区也有明显差异。E、C 型持续流型的出现和变化, 与东亚太平洋 (EAP) 型的正负位相、南亚高压的两种模态以及西太平洋副高都有明显的相关性, 是了解欧亚不同纬度带系统相互作用及其成因的一个新的着眼点。

关键词 欧亚中高纬 持续异常 季节内演变 数值模拟

文章编号 1006-9895 (2009) 02-0300-13

中图分类号 P434

文献标识码 A

Intraseasonal Climate Characteristics of the Summertime Persistent Anomalous Circulation over Eurasian Middle and High Latitudes

PAN Jie^{1, 2}, JI Liren^{1, 3}, and Bueh Cholaw^{1, 3}

1 Center for Disastrous Climate Research and Prediction, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081

3 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract By using synthesis, EOF analysis, numerical simulation and the other methods, this paper investigate the intraseasonal climate characteristics of two typical persistent flow patterns, pattern E (there are a longwave ridge, trough, ridge over the Ural Mountains, Lake Baikal, the Sea of Okhotsk, respectively) and pattern C (the positions of trough and ridge is opposite to pattern E's), over Eurasian middle and high latitudes in summer. The main conclusions are as follows: (1) The deviation of the actual frequency from the theoretic normal distribution probability of the circulation pattern index shows a bimodal feature, i. e., the actual frequency of patterns E and C is more than the theoretical value. (2) The indices averaged over 1959–2000 presents obviously an intraseasonal staggered varia-

收稿日期 2007-08-30, 2008-01-02 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40523001、40575024, 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403601

作者简介 潘婕, 女, 1975 年出生, 博士, 从事短期气候预测及气候变化的情景预测研究。E-mail: panjie75@ami.ac.cn

tion in resemblance to the northward advance of the subtropical high over the western Pacific and summertime rain belt in China. The result of numerical simulation shows this feature too. (3) The obvious contrast between pattern E and pattern C exists not only over Eurasian middle and high latitudes but also over the other areas of the Northern Hemisphere. The occurrence and change of these persistent anomalous circulations are closely correlated with the positive and negative phases of the East Asia - Pacific (EAP) pattern, as well as the two modes of the South Asia high and the western Pacific subtropical high. It is a new focus for understanding the interaction of the systems over different latitudes of Eurasia and its cause of formation.

Key words Eurasian middle and high latitudes, persistent anomaly, intraseasonal variation, numerical simulation

1 引言

我国是一个气候灾害多发国家, 干旱和洪涝是对我国国民经济尤其是农业生产影响最大的两种气候灾害。实际天气演变活动充分表明, 我国的夏季旱涝总是同一定的持续异常环流相联系。大范围的持续性异常天气往往同环流持续异常有关, 比如中低纬系统的西太平洋副高、南亚高压等, 长期以来这方面的研究已有很多, 而北半球中高纬系统也对我国夏季旱涝有重要影响, 如 1954 年夏季江淮特大洪水, 鄂霍次克海上空维持稳定的阻塞形势, 陈汉耀 (1957) 对此做过研究; 1962 年叶笃正等 (1962) 第一次系统地研究了阻高与我国天气气候的关系, 后来在较长时间里人们主要把注意力投向中低纬系统, 对中高纬的关注相对较少, 直到 1990 年代以后它的重要作用又重新引起我国气象工作者的关注。

热带外大气环流也是国际气候变化研究的一个独特部分, 由于它具有更多的混沌特征, 对其月、季、年际尺度演变规律的认识和预报就更加困难, 更具有挑战性。而北半球欧亚中高纬环流的持续异常往往同我国的持续性天气灾害有关, 如 1954 年、1991 年夏季发生在江淮流域的特大洪水, 鄂霍次克海上空维持稳定的阻塞形势 (陈汉耀, 1957; 丁一汇, 1993); 陶诗言等 (1998) 指出, 1998 年长江流域的梅雨异常及由此产生的近 50 年来最严重的洪水, 最直接原因是欧亚大范围环流持续异常北半球中高纬大气环流对我国夏季旱涝有重要影响, 等等。因此, 夏季欧亚中高纬持续异常环流值得我们密切关注。

虽然近年来对于北半球中高纬环流形势也给予了较多重视, 但相关研究 (丁一汇, 1993; 陶诗言等, 1998; 陆日宇等, 1999; 陈希等, 2001; 黄昌兴等, 2001; 李双林等, 2001a; 李双林等, 2001b;

Li, 2004; 姚秀萍等, 2005) 很多都是从单个系统或者短时期的系统发展来研究其特征和成因, 我们认为, 为了揭示中高纬环流持续异常的特征, 不但要分析其异常发展、短期变化, 还应从整体、长期的角度来研究。实际上, 欧亚中高纬系统之间是相互联系的, 可以看成是相互关联的几个环流系统构成的持续异常环流型, 将其整体联合起来考察也有助于认识它们的整体特征, 往往可以从中期、月甚至更长的时间尺度对其加以研究。

本文在 1959~2000 年这一段时期里, 选择乌拉尔山、贝加尔湖、鄂霍次克海 (简称乌山、贝湖、鄂海) 三个关键区, 将三个关键区的环流形势结合起来考察夏季欧亚中高纬持续流型的整体特征。

另外, 东亚夏季大气环流发生阶段性的变化, 对应的雨带也阶段性地北跳 (Tao et al., 1987; 周曾奎, 1996; 徐海明等, 2001), 过去通常将我国夏季雨带的季节内变化与西太平洋副高的阶段性北进相联系, 那么, 我国夏季雨带这种变化与欧亚中高纬大气环流是否有关联? 本文也将初步探讨这个问题。

第 2 节将给出 E、C 两类持续流型的界定和环流指数的定义; 第 3 节给出两类环流型在夏季以及 6、7、8 各月的频数特征, 并由气候平均的逐日环流指数揭示环流型季内阶段性演变特征, 讨论它与西太平洋副高活动和我国东部雨带季节性北移的关联; 第 4 节给出用数值模式的集合模拟检验的结果; 最后一节是结论。

2 夏季欧亚中高纬持续流型的界定

2.1 资料

本文所使用的资料包括: NCEP/NCAR 再分析大气环流资料的逐日 500 hPa 位势高度场, 200 hPa、500 hPa、850 hPa 风场。其覆盖时段为 1959~2000 年 6~8 月, 总年数 $n_y=42$, 每年选取日数 $n_d=92$;

全球经、纬度格点网格距为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 纬向格点序数 $i=1 \sim 144$, 经向格点序数 $j=1 \sim 73$ 。

2.2 界定方法

合理的、有代表性、典型性的环流分型是研究环流持续异常的基础, 本文以指数化的方法来界定夏季欧亚中高纬 500 hPa 典型持续流型。

过去用指数的方法研究大气环流异常的工作已有不少, 如最早由 Rossby 提出的西风指数 (章基嘉等, 1983), Dole et al. (1983) 定义的环流持续异常指数, 黄嘉佑等 (2004) 使用的北半球极涡指数等。其中, 持续异常的界定方法是由 Dole 最早提出的, 另外还有其他的持续异常界定方法, 但也多是考虑某一关键点的异常情况, 专门针对欧亚中高纬区的较少见。这里所说的持续流型指的是那些持续时间长 (时间尺度属于中间时间尺度或季内尺度, 即 10~30 天之间), 中间可能会间歇 1、2 天然后又继续持续、反复出现的环流异常过程。由于乌山、贝湖、鄂海这三个地方是阻塞高压发生频次较高的地区, 夏季有阻塞高压建立和维持, 对我国夏季降水、旱涝影响较大 (赵振国, 1999), 确切地说, 这三个区域是夏季高度场方差的大值区, 既是正异常也是负异常的多发区 (李金龙等, 1994), 因此选择这三个地方作为本文研究的关键区, 具体范围为: (1) 乌山关键区: ($40^{\circ}\text{N} \sim 50^{\circ}\text{N}$, $40^{\circ}\text{E} \sim 70^{\circ}\text{E}$); (2) 贝湖关键区: ($50^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$, $80^{\circ}\text{E} \sim 110^{\circ}\text{E}$); (3) 鄂海关键区: ($50^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E} \sim 150^{\circ}\text{E}$)。据此, 潘婕等 (2004) 定义了一个流型指数, 有针对性地从整体描述欧亚中高纬区的特定环流型。方法是将各个格点上 5 天时间平滑后的 500 hPa 位势高度场求其标准化纬偏 $\bar{H}^*$ (纬偏: 格点要素值减去格点所在纬度的纬圈平均), 并分别计算三个关键区之和 $h = h_u - h_b + h_o$, h 在全时域上的标准化距平即为 I 值。

利用 I 指数可以界定出 1959~2000 年夏季 E、C 型环流异常持续过程 (简称 E、C 型过程): 当 $I \geq 0.9$ ($I \leq -0.9$) 且持续时间 ≥ 10 天为 E (C) 型过程 [详细信息, 例如各个持续过程的日期、天数见潘婕等 (2004) 的表 2]。其中, E 型环流的主要特点是乌山、贝湖、鄂海地区分别为长波脊、槽、脊, 或者是乌山 (或鄂海) 地区为强脊, 其他两个地区为弱的槽脊; C 型环流的槽脊位置与 E 型相反。本文将基于这些持续异常过程 (也就是持续流

型) 进行分析。

为了了解夏季欧亚中高纬持续异常环流基本特征, 对 E 型过程 (17 例)、C 型过程 (18 例) (潘婕等, 2004) 分别进行合成。合成的方法是先计算各型每一次过程的平均 (即先合成每一次过程), 再分别对各型求该型的所有过程平均, 得到各型相应的合成图。图 1 为 E、C 持续流型合成图 (引自潘婕等, 2008), 可以看到, 对于 E 型过程, 乌山地区为一高压脊控制, 贝湖及鄂海分别为槽、脊区; C 型过程则大致相反, 只是槽脊强度略弱于 E 型。另外还可看到, 在西太平洋上, 对应于 E 型过程, 副热带高压 (588 线) 位置偏东, 面积较小, 而 C 型过程则相反。

由此来看, E、C 持续流型的合成图环流特征清楚, 表征了 E、C 型持续过程的环流特征, 符合我们对夏季欧亚中高纬 500 hPa 高度场典型持续流型的划分。

3 观测结果分析

3.1 合成分析

图 2 为 E、C 持续流型的流场差值合成图, 从图上可看到, 在北半球中高纬度沿纬圈均呈现波列状结构, 值得注意的是, 上述波列除在乌山、贝湖、鄂海关键区出现外, 更可上溯到大西洋东岸, 波列由西向东略呈弧状结构, 在欧亚大陆东岸折向东南方向, 特别是高低层环流位相基本一致, 呈现相当正压的结构。Hoskins et al. (1993) 在波状基流下进行强迫响应的数值试验, 源自大西洋的强迫可导致与图 2 相似的弧状波列。可以推想, E(C) 型持续环流的形成、维持应有来自大西洋的影响。

在 850 hPa 流场差值合成图上 (图 2a), 乌山、鄂海地区均为反气旋性环流, 贝湖地区为气旋性环流, 中太平洋北部有一气旋性环流且环流区向西南伸展接近我国东岸, 它的存在使 E 型过程西太平洋副高位置偏东偏南。另外, 亚洲大陆东岸更清楚地显示出自北向南的反气旋-气旋-反气旋分布, 可见 E、C 型持续环流对应着不同位相的东亚太平洋 (EAP) 型 (Huang et al., 1987)。这一点在图 1 上同样可以看出: 图 1 中阴影区为超过 99% 信度水平的 t 检验显著区域, 根据 t 值的计算公式可知, 阴影区也表征了环流型的高度距平分布特征, 在东亚沿岸地区, 对应 E 型自南向北出现一十—的高度距

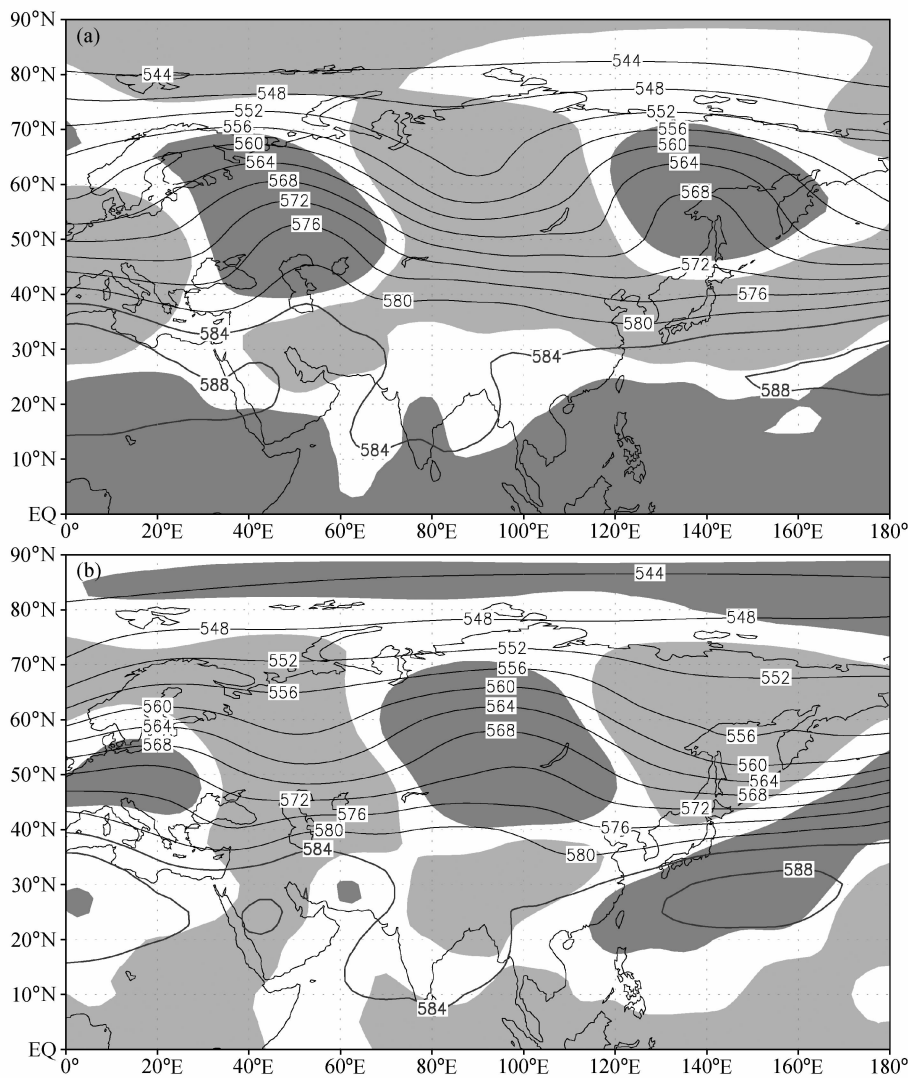


图1 持续流型合成图(单位: dagpm): (a) E型; (b) C型。阴影区为通过99%信度检验的显著性区域

Fig.1 Composites of persistent circulation patterns (a) E and (b) C (units: dagpm). The regions with 99% significance level are shaded

平分布,而C型相反,这正是EAP型的典型结构。关于EAP的形成,广为引用的观点是它与菲律宾邻近区域和暖池区的热力强迫密切相关,而上述对应关系表明,来自欧亚中高纬环流的影响,可能是EAP型形成的另一个因子,这是值得注意的。图上同样反映了西太平洋副高在E型过程中偏南,C型过程中偏西偏北,由此我们可设想,E型过程的流场配置有利于夏季雨带维持在江淮流域,而C型过程在西太平洋副高作用下使来自孟加拉湾的西南暖湿气流到达我国北方,与高纬南下的冷空气相交绥,为华北降雨提供了有利的环流条件。我们合成了1959~1994年期间出现的E、C型持续流型相应的月降水量距平场[潘婕等(2004)的图7],当夏

季欧亚中高纬环流为E型过程时,江淮流域月降水量为正距平,华北为负距平;反之,夏季欧亚中高纬环流为C型过程时,江淮流域和华北的月降水量分别为负距平和正距平,可见实际观测结果与我们的设想是一致的。以1998年为例,该年6月8~27日的正异常过程(E型)为1959~2000年间持续时间最长的一次,且异常强度强,从6月13日至6月25日流型指数值均超过1.5,最大值达2.9,而该年6月份长江中下游各大支流先后发生暴雨洪水,尤其是6月11~26日强降雨带稳定维持在长江中下游区域,其维持时间与E型过程的时间基本相合,该典型个例从另一方面印证了上述结果。

还可看到,200 hPa上(图2b)欧亚大陆沿30°N

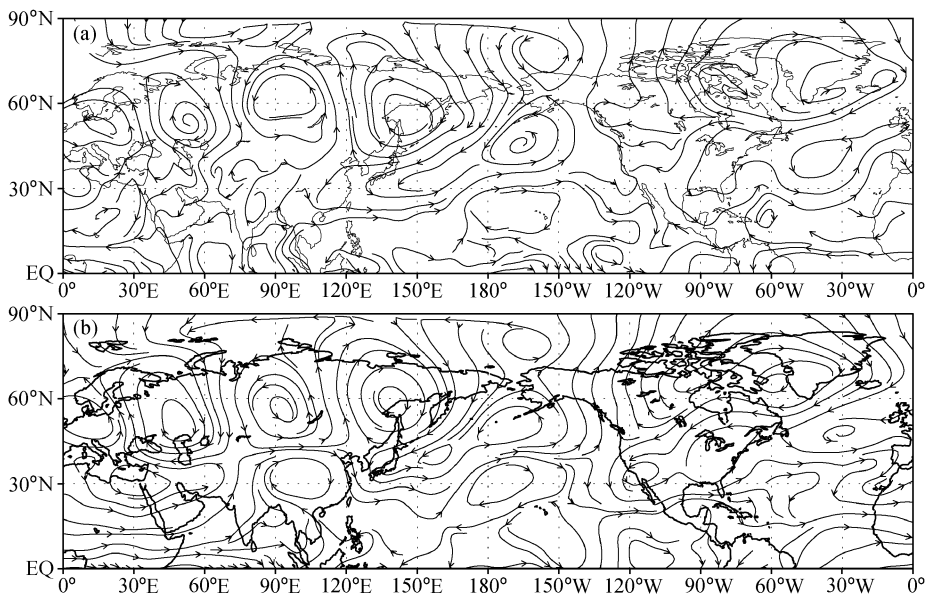


图2 850 hPa (a) 和 200 hPa (b) 流场 E、C 型过程差值 (E-C) 合成图

Fig. 2 Streamline fields of pattern E minus pattern C; (a) 850 hPa; (b) 200 hPa

纬度带呈东西相反的环流分布,在青藏高原东部呈反气旋环流,这表明 E 型环流与南亚高压的东部型(陶诗言等,1964)或青藏高压型(张琼等,2001)相联系。南亚高压这种形势也有利于长江流域多雨。高、中纬度典型流型的这种联系还需要进一步确证,但这至少表明,夏季欧亚中高纬持续流型的发生与北半球其他区域的环流是存在关联的。

以上分析表明, E、C 型持续流型有明确的天文学意义。

3.2 夏季欧亚中高纬 500 hPa 位势高度纬偏场的 EOF 分析

在 ($40^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $40^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 区域内,对 1959~2000 年 6 月 1 日~8 月 31 日逐日 500 hPa 位势高度纬偏序列作 EOF 展开。图 3 给出了 EOF 分析前 8 个模态,这 8 个主分量的解释方差累积贡献率已超过 82%,代表了原始场的大部分信息。

用 1959~2000 年夏季逐日流型指数序列分别与 EOF 1~8 的时间系数求相关,得到的相关系数如图 4 所示。可以看到,前 8 个相关系数都通过了 99% 的信度检验,说明流型指数与各模态之间的相关性是显著的。相关系数最高的 5 个分量为 EOF 1、2、4、6、7,其解释方差之和为 58.76,表明由它们表征的环流型在夏季异常环流变化中占有不小的比重。其中 EOF 2、4、6 为正相关, EOF 1、7 为负相关,而由图 3 可以看出,在乌山、贝湖、鄂海三

个关键区, EOF 2、4、6 模态大致为正、负、负或正、负、正结构,属于 E 型环流; EOF 1、7 模态的分布形势大致为负、正、负结构,符合 C 型环流的定义。

我们取 E 型过程 500 hPa 纬偏合成场的 ($40^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $40^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 区域计算其与 EOF 1~8 典型场的相关系数,其中正相关系数最大的是 EOF 2,其次是 EOF 3 和 EOF 6,说明这几个模态与 E 型过程合成场比较相似。而负相关系数最大的是 EOF1,说明其分布形势与 E 型过程合成场大部分是相反的。这进一步验证了前述分析。

以上结果均表明, 500 hPa 位势高度场分解确实能得到 E、C 型典型场,而且 E、C 型模态是典型场中的主要模态,其时间系数与流型指数的相关也很好,说明 E、C 型模态是实际环流场中较常见的环流型,因此这种持续流型的界定方法具有合理性、代表性,可用于实际分析。

3.3 流型指数和持续流型统计特征

我们分别对夏季(即将 6~8 月一起考虑,例如当计算均值时取 6 月 1 日~8 月 31 日的逐日值进行平均。如无特殊说明,后文均采用同样说法)、6 月(单独考虑 6 月,以此类推)、7 月、8 月的流型指数计算其分布频率和正态分布概率(组间距为 0.1)并作图(图 5)。

可见,流型指数的实际分布并不完全服从正态

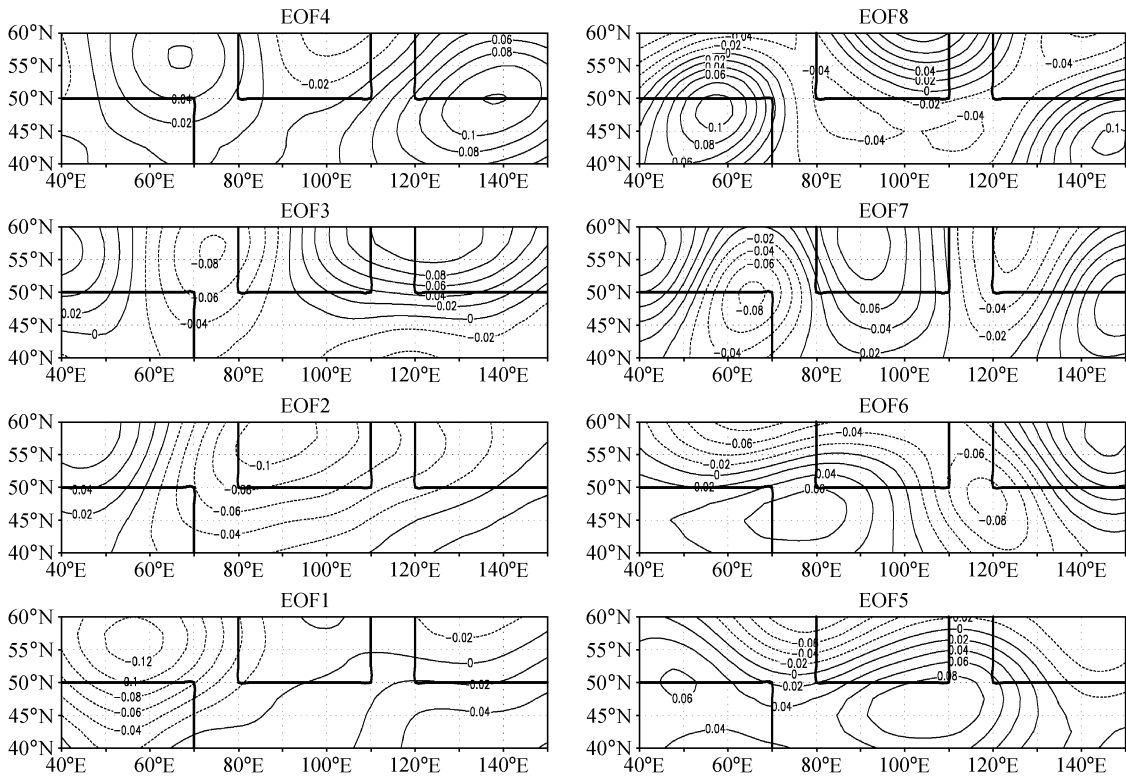


图3 500 hPa 位势高度纬偏场 EOF 1~8。小方框从左至右依次为乌山、贝湖、鄂海关键区

Fig. 3 EOF1 – EOF8 of 500-hPa geopotential height. Small rectangles represent key zones Urals, Baikal, Okhotsk, respectively

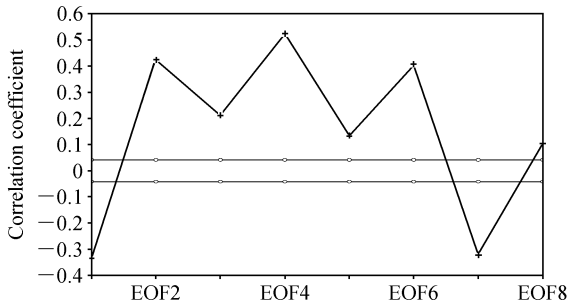


图4 流型指数与 EOF 1~8 主分量的相关系数。空心圆实线：99% 信度检验值

Fig. 4 Correlation coefficient between the circulation pattern indices and principal components of EOF1 – EOF8. Line marked with hollow circle; the value of 99% significance level

分布，6 月在均值（夏季、6 月、7 月、8 月的指数均值都接近于 0）附近的 $-0.4 \sim 0.4$ 区间内实际频率基本比正态分布概率偏少，绝对值 $0.4 \sim 0.9$ 之间实际频率与正态分布概率相比有多有少，大于 0.9 和小于 -0.9 的指数分布也如此；7 月属于分布相对均匀形势，但从阴影区面积看， $-0.4 \sim 0.4$ 范围内实际频率仍然偏少，指数绝对值大于 0.9 的频

率则偏多；8 月的分布则似乎与 6 月相反。夏季分布与 6 月比较相似。

为了更清楚地进行比较，我们根据指数值大小分 6 组统计其分布概率。由服从 $N(0, 1)$ 的标准正态分布概率可知，由均值 0 出发，0 到 0.4、0.5 之间的值大约占 1/6 概率，而占 2/6 概率的值则大约分布在 0 到 0.9、1.0 之间，因此我们取以下分组： < -0.9 ， $-0.9 \sim -0.4$ ， $-0.4 \sim 0$ ， $0 \sim 0.4$ ， $0.4 \sim 0.9$ ， > 0.9 ，计算其实际分布频率与正态分布概率的差值（如图 6 所示）。

显然，夏季、6 月、7 月的差值分布都呈现了双峰特征，均值附近偏少，大值区偏多，正的大值 (> 0.9) 又多于负的大值 (< -0.9)，6、7 月（图 6b、c）尤其明显，均值附近皆最为偏少，越往大值区则越偏多。

也就是说，与正态分布相比，流型指数更趋向于出现大值，而在正态分布理论概率较高的均值附近反而出现频率偏少，特别是 6 月。从图 5b 也可看出，实际最大频率不是出现在均值附近，而是 0.8 左右。

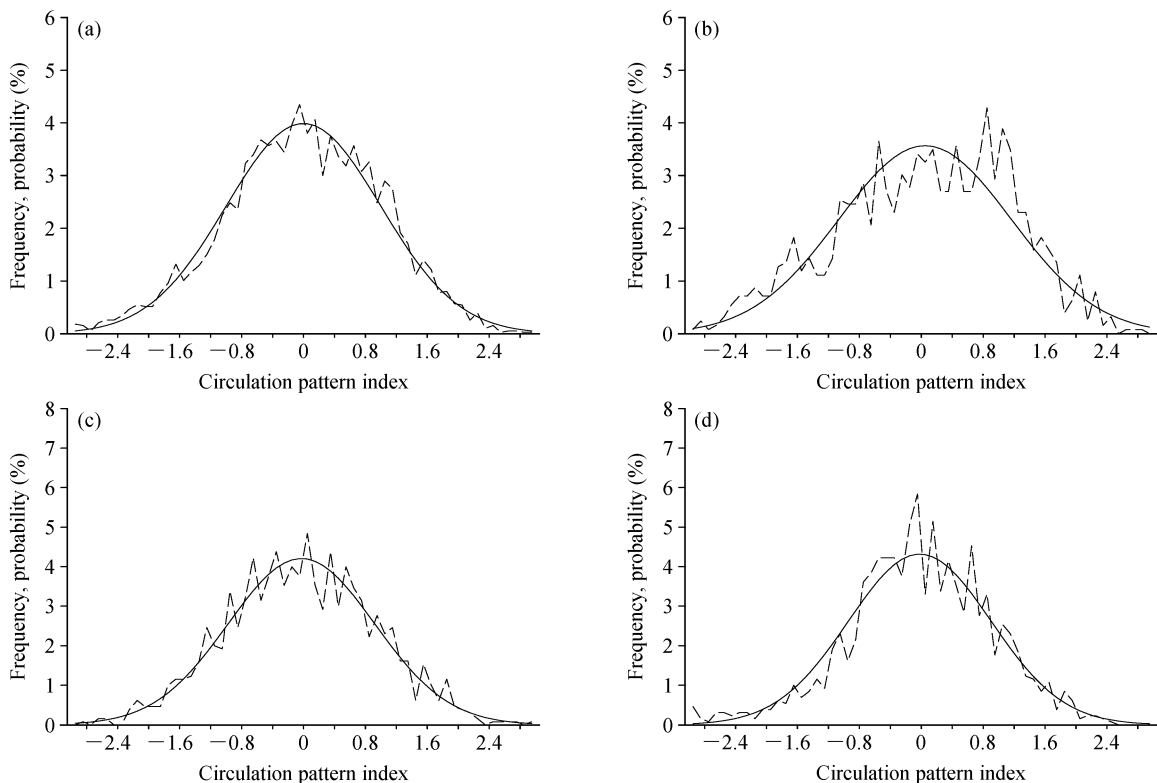


图5 流型指数实际频率(虚线)与正态分布概率(实线): (a) 夏季; (b) 6月; (c) 7月; (d) 8月。

Fig. 5 The actual frequency distribution (dashed line) and the normal distribution probability (solid line) of the circulation pattern index: (a) Summer; (b) Jun; (c) Jul; (d) Aug

8月则不同, $-0.4 \sim 0$ 区间内偏多, 大值偏少, < -0.9 的值尤为偏少。

总之, 夏季欧亚流型指数频率分布呈现了典型的非对称的双峰态, 主要是6月和7月。Sutera (1986) 根据北半球热带外行星尺度波振幅的概率密度分布, 提出了双模态的概念。张琼等 (1997) 在陶诗言等 (1964) 工作的基础上对夏季南亚高压也概括出双模态的特征。上面的分析表明, 欧亚中高纬环流也存在类似的双模态, 即近于反相的两类流型, 它们的持续异常同长江流域的旱涝密切相关, 这一点在潘婕等的文章 (2004) 中已有讨论。

Sutera (1986) 计算了冬季北半球环流超长波 (波数 $2 \sim 4$) 部分不同振幅出现的概率分布, 得出两个频数峰值区, 对应两类环流型。其结果表明, 大气系统在一定的外强迫 (海陆差异、地形) 及大气内部动力学的非线性共同作用下, 可能出现两个或更多平衡态, 表现为具有持续性、多发性异常环流型。这是对 Charney et al. (1979) 提出的大气多年平衡态理论的一个支持。他们的结果都是针对整

个北半球环流的, 而我们的结果则表明在夏季欧亚范围中也存在两类相对多发、持续以及一定地理特征的环流型。

3.4 流型指数的季节内变化

由初夏到盛夏, 随着“入梅”、“出梅”到华北雨季开始, 西太平洋副高经历几次明显北跳, 呈现出阶段性的特征, 期间欧亚中高纬环流变化有何特点, 是否也存在阶段性的特征, 这是值得关注的问题。

图7给出逐日流型指数的多年 (1959~2000年) 平均值, 它清楚地显示了气候平均意义上的E、C流型循环转换的阶段特征, 尤其是6、7月更为明显。

理论上, 夏季某一天E、C型的发生带有一定的随机性, 如果假定在某一天E、C型出现概率相当, 那么其流型指数的多年平均值应当接近于零, 但图7上却显示出了明显的正、负大值区, 且在统计上是显著的: 对指数均值检验其与0值的差别, 6、7月的峰值大部分都达到了90%信度水平, 7月

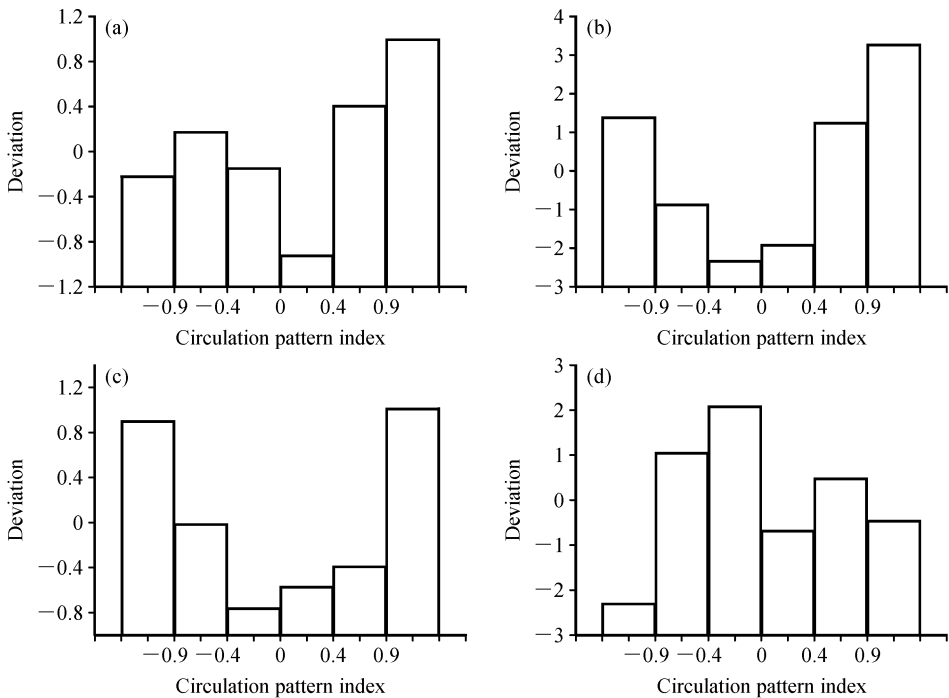


图 6 流型指数频率与正态分布概率分组差值：(a) 夏季；(b) 6 月；(c) 7 月；(d) 8 月

Fig. 6 Deviation of the actual frequency of circulation pattern index from the normal distribution probability: (a) Summer; (b) Jun; (c) Jul; (d) Aug

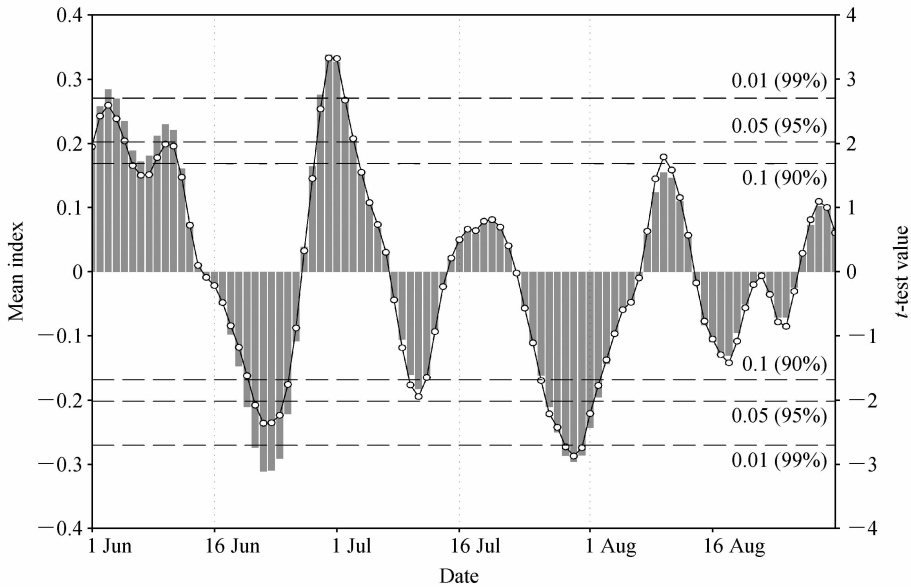


图 7 逐日流型指数多年平均值(直方图)和 t 检验值(曲线)。长虚线分别为 0.01、0.05、0.1 信度检验临界值

Fig. 7 Mean of daily circulation pattern index (bar) and t -test value (curve) during 1959–2000. Long dashed; the values of 99%, 95%, 90% significance levels

1 日前后甚至达到了 99% 信度水平。因此，可以认为图 7 显示了夏季欧亚中高纬环流季节内演变也存在明显的阶段性。

6 月上旬、6 月下旬后期至 7 月上旬这两个时

段是 E 型环流出现的高概率时段，而 6 月中旬至下旬前期、7 月下旬至 8 月上旬则是 C 型环流出现的高概率时段。在长江中下游平均入梅期（6 月 20 日前后）附近出现大的负值区，其后逐渐向正值转

换; 7 月 1 日前后(梅雨中后期)有一个大的正值时段,而经验告诉我们,双阻型(通常认为的“梅雨标准型”)往往也出现在梅雨的中后期,因此我们的统计与经验是一致的;到了 7 月上旬后期(即长江中下游平均出梅时期),E 型环流的频数(或强度)明显减少;7 月下旬至 8 月上旬(华北雨季)又出现了 C 型的多发期。还可注意,C 型的频发期与西太平洋副高阶段性向北突进是相互关联的,图 7 上 6 月中、下旬和 7 月下旬是 C 型环流气候上最显著的两段频发期,对照多年平均的逐候副高活动[吴国雄等(2002)的图 3.19],西太平洋副高脊线或其北界(“588 线”)在这两段时期都迅速北进,特别是自 7 月第 4 候起副高脊线平均从 26°N 北进到 35°N ,10 天北跳了 9 个纬度,同 C 型环流出现的高频期很为对应。注意到 C 型的环流特征(图 1b),这种对应关系并不是偶然的。我们选取了夏季长江流域典型涝年 1998 年进行比较,发现该年 6 月份的流型指数演变(图略)与多年平均明显不同:在图 7 上 6 月 15~26 日是 C 型环流出现的高频期,而 1998 年的这个时段却是整个 6 月份里正异常最强的时期,流型指数均达到了 1.5 以上。在这个典型涝年的个例中,当中高纬大气环流型的阶段性演变与常年明显不同时,中国夏季的旱涝也相应地出现了显著异常。

上述结果意味着类似西太平洋副高的季节性北进,在气候平均意义上,中高纬大气环流型也经历阶段性的变化,而且两者是密切相关的,这里定义的环流指数或许可用作夏季欧亚中高纬环流阶段性转换的标识。这当然还需要更多的实践来检验。

潘婕等(2004)曾对 1959~2000 年夏季所有 E、C 型持续流型进行统计分析,发现 E、C 型过程在 6 月出现频数最高,均占夏季总数 53%,7、8 月 E 型过程占其自身总次数的 29%、18%,而 C 型过程则是 21%、26%。可见,E、C 型过程均在 6 月发生频次最高,明显高于 7、8 月份。这与赵振国(1999)关于阻高出现频数的天气学研究结论一致。另外,E 型过程多半开始于 6 月上旬或 6 月下旬和 7 月上旬,而 C 型过程约一半开始于 6 月中旬或 7 月下旬,与图 7 一致。

上述结果表明:(1)我们在前人工作基础上界定的环流型和流型指数是有典型性和代表性的,流型指数 I 可以用来描写夏季欧亚中高纬的环流及其

持续流型的特征。(2)流型指数的实际分布频数与正态分布的理论概率相比,在均值附近偏少,而大值则偏多,其中正的大值又多于负的。两者的差值(实际-理论)呈现双峰特征。(3)以流型指数表征的夏季欧亚环流型呈现明显的季内阶段性特征,在气候平均意义上,夏季欧亚中高纬环流型也经历着与我国雨带北移、西太平洋副高北跳类似的阶段性变化。

4 数值模拟

为了检验所概括的夏季中高纬环流型演变的阶段性特征(图 7)不是个别年份的偶然现象,我们已采用较多个例和统计检验,另一个可行途径是采用数值模拟方法。一个比较完善的大气环流模式以及合理的试验设计能够再现观测环流特征,其意义是双重的:既是对模式模拟能力的肯定,也是对由观测概括的环流演变规律的代表性和可信度的肯定。在观测样本还不够多时,更是如此。

这一节,我们利用 IAP T42L9 全球大气环流谱模式(Ji et al., 1989)对气候平均意义下的欧亚中高纬环流由春入夏的演变规律进行模拟分析。

4.1 模式介绍

IAP T42L9 全球大气环流谱模式引进了标准层结近似(或称静力扣除法),水平方向采用三角形截断 42 波,垂直方向采用仿地形 σ 坐标,共分为 9 层。包括的主要物理过程有辐射、垂直湍流输送、表面过程、大尺度凝结和积云对流、水平扩散、次网格尺度地形重力波拖曳等,模式调整时间为 4~5 天,即模式积分 4~5 天后,全球均方根涡度、总动能、总位能等统计量的变化已经比较平稳。该模式经过大量实例预报检验(Zhang et al., 1995; 张道民等, 1996, 1997, 2001),计算稳定,在月尺度的动力延伸预报上有一定的预报能力,可以作为月尺度数值模拟的基本手段。

4.2 试验方案

试验包含完整的物理过程;初始场采用 1961~2000 年逐年 5 月 21 日 1200UTC 的 NCEP/NCAR 再分析资料(h 、 u 、 v 、 r),它代表 40 个独立的初始场,积分结果形成含 40 个成员的集合;海表温度场采用 NCAR 全球 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ 区域海温格点场月平均资料的 5、6 月气候平均结果(1959~2000 年平均);由于 E、C 型过程在 6 月发生频次最高,因此

我们主要模拟 6 月份的情况, 同时为了更好体现天气意义, 考虑到我国长江中下游地区平均出梅日期为 7 月 8 日左右 (Tao et al., 1987), 试验从 5 月 22 日积分到 7 月 10 日。

对积分结果进行以下分析:

(1) 对 40 个成员的 5 月 22 日~7 月 10 日内逐日积分结果计算其欧亚中高纬流型指数, 根据指数值统计 E、C 型逐日环流及持续过程频数分布情况。考虑到模式模拟结果所得指数值可能偏弱, 且每个成员的统计时段只有 50 天, 远少于前面诊断分析中的每年 92 天, 这也削弱了其持续性, 为使持续过程能达到一定的频数以便能更清楚地分析, 我们将模拟结果的 E、C 型过程指数阈值略为降低, 取 0.8, 持续时间阈值仍为 10 天。

(2) 将 40 个成员集合得到逐日的 500 hPa 位势高度集合场, 计算相应的每日集合流型指数, 并给出 6 月 1 日~7 月 10 日的流型指数直方图, 它体现了试验模拟的流型指数总体分布情况。

(3) 取 6 月 11 日~7 月 10 日的 500 hPa 位势高度集合场平均来进行集成, 得到该试验模拟的月平均环流整体特征 (即哪种环流型占主体优势)。

4.3 结果分析

统计结果表明, 模拟结果中大于 0.8 的指数有 431 天, 小于 -0.8 的指数有 443 天, 两者频数相近; E 型过程 11 次共 202 天, C 型过程 10 次共 136 天, 两种类型的持续过程出现次数相近, 但是累积天数 E 型过程明显多于 C 型过程, 说明数值模拟的入夏初期“气候状态”虽然 E、C 型环流异常的出现频数接近, 但从持续异常的角度看还是 E 型过程要略为占优。

图 8 是对应于逐日 500 hPa 位势高度集合结果的流型指数, 每天的指数值对应的 500 hPa 位势高度场为该日的 40 个成员平均。可见, 经 40 个成员集合后, 指数正位相占优的情况更为明显了, 这也说明虽然 E、C 型异常出现频数相当, 但是有可能 E 型环流的异常形势较强 (即异常值较大), 从而使平均结果明显倾向正位相。

图 9a 给出了 6 月 11 日~7 月 10 日的 500 hPa 位势高度集合场平均结果, 乌山、贝湖、鄂海分别为脊、浅槽、脊的分布形势, 说明这段时期流型总体分布是趋向于 E 型的。利用 NCEP/NCAR 再分析资料计算了 1959~2000 年 6 月 11 日~7 月 10

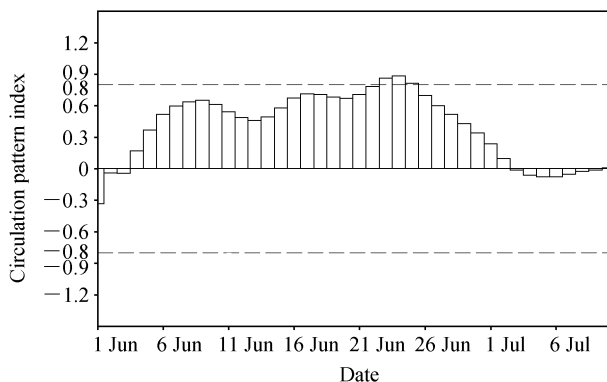


图 8 试验模拟的逐日流型指数直方图

Fig. 8 Simulated daily circulation pattern index (bar)

日 500 hPa 位势高度气候平均场并作图 (图 9b)。与图 9b 相比较, 我们发现模拟试验较成功地再现了北半球中高纬度的气候环流形势, 只是槽脊形势略强于实际结果; 另外, 北半球中高纬度其他区域的槽脊形势也模拟得相当好: 180°E 附近的洋中槽、北美洲大陆西部的脊和东部的槽以及北大西洋中部的脊区均被成功地模拟出来。这进一步说明了 IAP T42L9 谱模式的良好模拟能力。

以上结果表明, 在由春入夏后的近一个月内, 数值模拟的欧亚中高纬的环流形势 E、C 型异常出现频数相当, 而从环流异常的持续情况看是 E 型过程占优, 由平均情况看更是如此, 说明流型指数正位相的中、大值要多于负位相同级别的值, 这个结果支持前面诊断分析的结论, 即流型指数的分布频率是正的中、大值多于负的。

另外我们还可注意到, 图 8 中 6 月上旬和 6 月下旬初有两个相对峰值 (6 月 9 日和 6 月 24 日), 6 月下旬末指数指迅速下降, 而气候平均意义上的实际演变 (图 7) 是在 6 月上旬和 7 月上旬初有两个正指数峰值, 而后迅速下降。两者有一些差异, 模拟结果中并未出现 6 月中旬的负峰值, 由初夏到盛夏 E 型频数 (或强度) 迅速减少的转折期也比实际提前约一周, 但指数季内演变的阶段性特征在定性上是相似的。

综上所述, 前文诊断分析得到的夏季欧亚中高纬实际环流型出现频数的气候特征及正、负指数持续期的交替, 是在气候平均外源强迫下通过大气内部动力学作用的结果。在讨论 E、C 型的形成及其变化时, 需要考虑异常强迫, 还要顾及“正常强迫”。需要指出的是, 这里所指的气候背景, 不仅

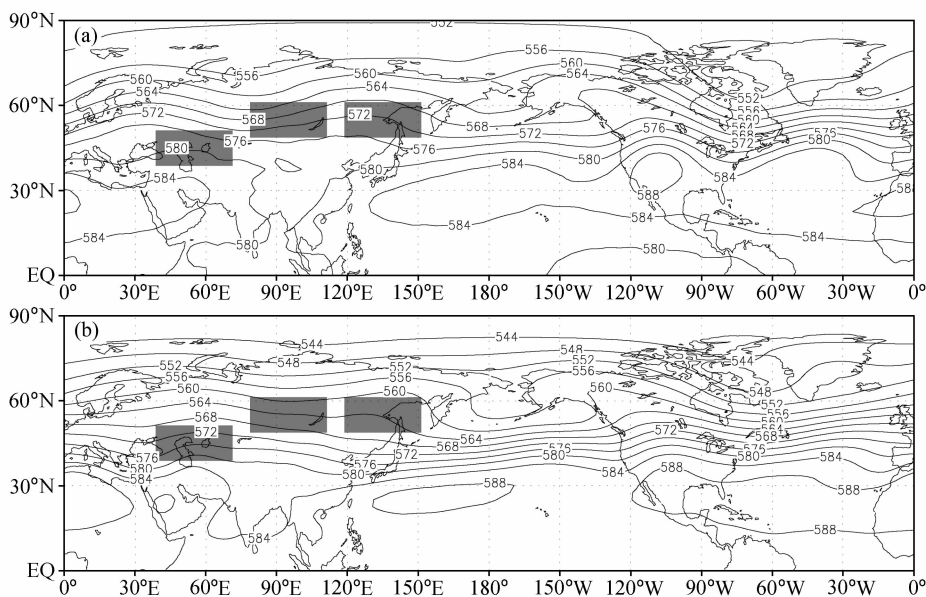


图9 6月11日~7月10日平均500 hPa位势高度场(单位: dagpm): (a) 试验模拟; (b) NCEP/NCAR再分析资料。阴影: 从左至右为乌山、贝湖、鄂海关键区

Fig. 9 Average 500-hPa geopotential height (dagpm) from 11 Jun to 10 Jul for (a) simulation and (b) NCEP/NCAR reanalysis data. The shaded zones are key areas Urals, Baikal, Okhotsk, respectively

仅是 SST 的气候分布, 模式中实际包含了海陆之间、高低纬度之间以及高原平原之间的热力差异和热力强迫。

实际大气过程还包含了逐年实际海温(包括异常)的影响。关于这一点, 我们在对各个海域海温异常强迫的敏感性试验中(将另文讨论), 发现对于 E(C) 型环流, 北大西洋是一个关键地区, 特定的 SSTA(海温异常)型可能使 E(C) 型的频数或振幅增加, 而且其影响是非线性的。图 8 的模拟结果得出梅雨期(特别是后期) E 型环流占优的平均特征, 但 C 型出现频数比实际少, 特别是 6 月 15~26 日的指数负值区。模拟中没有考虑逐年海温异常的影响, 可能是原因之一。

5 结论和讨论

本文通过对夏季欧亚中高纬持续时间长、反复出现的持续流型的统计分析, 总结了这些流型指数和持续流型发生频数的气候特征, 主要结论如下:

(1) 流型指数的实际分布频数与正态分布的理论概率相比, 均值附近偏少, 而大值则偏多, 其中正的大值又多于负的。两者的差值(实际-理论)呈现双峰特征。以流型指数表征的夏季欧亚环流型呈现明显的季内阶段性特征, 6 月上旬为正的大值

时段, 6 月中下旬(长江中下游入梅期)为负的大值时段, 在梅雨中后期(6 月下旬至 7 月上旬)又转为大的正值, 出梅后为较小的正负值交替, 至华北雨季又出现负的大值, 因此, 在气候平均意义上, 夏季欧亚中高纬环流型也经历着与我国雨带北移、西太平洋副高北跳类似的阶段性变化。

(2) E、C 型过程期间, 不仅欧亚中高纬度环流有明显差异, 在北半球的其他地区也有明显差异。E、C 型持续流型的出现和变化, 与东亚 EAP 型的正负位相、南亚高压的两种模态以及西太平洋副高都有明显的相关性, 是了解欧亚不同纬度带系统相互作用及其成因的一个新的着眼点。

(3) 以气候海温作为外强迫的数值模拟, 再现了 6 月份欧亚中高纬实际环流的月平均环流场分布特征及流型指数季节内阶段性演变特征, 特别是由初夏到盛夏 E 型环流频数(或强度)迅速减少的特征, 部分支持了观测诊断分析的结果。可见实际流型的气候特征是在气候平均外源强迫下, 通过大气内部动力学作用的结果。

前述研究所揭示的是欧亚中高纬持续环流季节内演变的平均状况, 随之而来的问题, 是其年际变化、可能原因及其对我国旱涝的影响。夏季西太平洋副高的阶段性北进和南撤的规律及其年际变化,

已是预测我国夏季旱涝的重要依据, 对于欧亚中高纬环流的类似问题值得进一步研究。

致谢 本文为第一作者博士论文工作的一部分, 在完成论文期间导师陶诗言院士给予了诸多指导, 在此深表感谢!

参考文献 (References)

- Charney J G., Devore J G. 1979. Multiple flow equilibria in the atmosphere and blocking [J]. *J. Atmos. Sci.*, 36: 1205–1216.
- 陈汉耀. 1957. 1954 年长江淮河流域洪水时期的环流特征 [J]. *气象学报*, 28 (1): 1–12. Chen Hanyao. 1957. The characteristics of atmospheric circulation during the 1954 severe flood periods over the Yangtze River and the Huaihe River reaches [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 28 (1): 1–12.
- 陈希, 孙照渤. 2001. 阻塞高压对我国降水影响的诊断分析研究 [J]. *南京气象学院学报*, 24 (3): 330–337. Chen Xi, Sun Zhaobo. 2001. Diagnostic analysis for the effect of blocking high position in East Asia on the rainfall in China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 24 (3): 330–337.
- 丁一汇. 1993. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究 [M]. 北京: 气象出版社, 255pp. Ding Yihui. 1993. Study of Strong Heavy Rainfall in the Yangtze-Huaihe River Valley in 1991 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 255pp.
- Dole R M., Gordon N D. 1983. Persistent anomalies of the extratropical Northern Hemisphere wintertime circulation: Geographical distribution and regional persistent characteristics [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 111: 1567–1586.
- Hoskins B J., Ambrizzi T. 1993. Rossby wave propagation on a realistic longitudinally varying flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 50: 1661–1671.
- Huang Ronghui, Li Weijing. 1987. Influence of heat source anomaly over the western tropical Pacific on the subtropical high over East Asia [C]. *Proceedings of International Conference on the General Circulation of East Asia*, Chengdu, China, 10–15 April 1987, 40–45.
- 黄昌兴, 周伟灿. 2001. 鄂霍次克海阻高发展过程的正斜压涡度和涡度拟能的演变特征 [J]. *南京气象学院学报*, 24 (3): 356–363. Huang Changxing, Zhou Weican. 2001. Features of barotropic/baroclinic vorticity and enstrophy during Okhotsk blocking development [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 24 (3): 356–363.
- 黄嘉佑, 刘舸, 赵昕奕. 2004. 副高、极涡因子对我国夏季降水的影响 [J]. *大气科学*, 28 (4): 517–526. Huang Jiayou, Liu Ge, Zhao Xinyi. 2004. The influence of subtropical high indexes and polar vortex indexes on the summertime precipitation in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28 (4): 517–526.
- Ji Liren, Chen Jiabin, Zhang Daomin, et al. 1989. A spectral model

for medium range weather forecast and it's performance [M]. *East Asia and Western Pacific Meteorology and Climate*. Sham P, Chang C P, Eds. World Scientific, 474–483.

- 李金龙, 纪立人. 1994. 夏季北半球 500 hPa 位势高度持续性异常的地理分布及区域特征 [J]. *大气科学*, 22 (4): 491–502. 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 (in Chinese)*, 22 (4): 491–502.
- 李双林, 纪立人. 2001a. 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. 2001a. 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. 2001b. 夏季乌拉尔地区大气环流持续异常 [J]. *科学通报*, 48 (9): 753–757. Li Shuanglin, Ji Liren, Ni Yunqi. 2001b. Study on the persistent anomaly of summertime circulation over Ural Mountains [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 48 (9): 753–757.
- Li Shuanglin. 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.
- 陆日宇, 黄荣辉. 1999. 夏季西风带定常扰动对东北亚阻塞高压的影响 [J]. *大气科学*, 23 (5): 533–542. Lu Riyu, Huang Ronghui. 1999. Influence of the stationary disturbance in the westerlies on the blocking highs over the northeastern Asia in summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 23 (5): 533–542.
- 潘婕, 王盘兴, 纪立人. 2004. 夏季欧亚中高纬持续流型特征 I: 流型指数与持续流型 [J]. *气象科学*, 24 (2): 127–136. Pan Jie, Wang Panxing, Ji Liren. 2004. On the summertime persistent circulation pattern features over the mid-high latitude Eurasia. Part I: Circulation pattern index and persistent circulation pattern [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 24 (2): 127–136.
- 潘婕, 布和朝鲁, 纪立人, 等. 2008. 夏季欧亚中高纬环流持续异常事件的 Rossby 波传播特征 [J]. *大气科学*, 32 (3): 615–628. Pan Jie, Bueh Cholaw, Ji Liren, et al. 2008. Characteristics of Rossby wave propagation associated with the summertime persistent anomaly events of mid- and high-latitude Eurasia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (3): 615–628.
- Sutera A. 1986. Probability density distribution of large-scale atmospheric flow [J]. *Adv. Geophys.*, 29: 227–249.
- 陶诗言, 朱福康. 1964. 夏季亚洲南部 100 毫巴流型的变化及其与西太平洋副热带高压进退的关系 [J]. *气象学报*, 34: 385–395. Tao Shiyao, Zhu Fukang. 1964. The 100-mb flow patterns in southern Asia in summer and its relation to the advance and retreat of the west-Pacific subtropical anticyclone over the Far East [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 34: 385–395.
- Tao S, Chen L. 1987. A review of recent research on the East Asian

- summer monsoon in China [M]. Monsoon Meteorology, Chang C-P, Krishnamurti T N, Eds. Oxford University Press, 60–92.
- 陶诗言, 张庆云, 张顺利. 1998. 1998 年长江流域洪涝灾害的气候背景和大尺度环流条件 [J]. 气候与环境研究, 3 (4): 290–299.
- Tao Shiyun, Zhang Qingyun, Zhang Shunli. 1998. The great floods in the Changjiang River valley in 1998 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 3 (4): 290–299.
- 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 等. 2002. 副热带高压形成和变异的动力学问题 [M]. 北京: 科学出版社, 314pp.
- Wu Guoxiong, Chou Jifan, Liu Yimin, et al. 2002. Dynamics of the Formation and Variation of Subtropical Anticyclone (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 314pp.
- 徐海明, 何金海, 周兵. 2001. 江淮入梅前后大气环流的演变特征和西太平洋副高北跳西伸的可能机制 [J]. 应用气象学报, 12 (2): 150–158.
- Xu Haiming, He Jinhai, Zhou Bin. 2001. The features of atmospheric circulation before and during the Meiyu onset and possible mechanisms for the westward extension and northward shift of the western Pacific subtropical high [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 12 (2): 150–158.
- 姚秀萍, 于玉斌. 2005. 2003 年梅雨期干冷空气的活动及其对梅雨降水的作用 [J]. 大气科学, 29 (6): 973–985.
- Yao Xiuping, Yu Yubin. 2005. Activity of dry cold air and its impacts on Meiyu rain during 2003 Meiyu period [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (6): 973–985.
- 叶笃正, 陶诗言, 朱抱真, 等. 1962. 北半球冬季阻塞形势的研究 [M]. 北京: 科学出版社, 135pp.
- Ye Duzheng, Tao Shiyun, Zhu Baozhen, et al. 1962. Study on the Blocking High over the Northern Hemisphere in Winter (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 135pp.
- 章基嘉, 葛玲. 1983. 中长期天气预报基础 [M]. 北京: 气象出版社, 445pp.
- Zhang Jijia, Ge Ling. 1983. The Basis of the Medium- and Long-Range Weather Forecast (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 445pp.
- Zhang Daomin, Li Jinlong, Ji Liren. 1995. A global spectral model and test of its performance [J]. Adv. Atmos. Sci., 12 (1): 67–78.
- 张道民, 纪立人, 李金龙. 1996. 月数值天气预报的试验研究 [J]. 大气科学, 20 (4): 429–438.
- Zhang Daomin, Ji Liren, Li Jinlong. 1996. An experimental study on monthly numerical weather prediction [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 20 (4): 429–438.
- 张道民, 纪立人, 李金龙. 1997. 动力延伸(月)预报的季节变化和误差分析 [J]. 大气科学, 21 (2): 141–150.
- Zhang Daomin, Ji Liren, Li Jinlong. 1997. Seasonal variability and systematical error in dynamical extended range forecast experiments with the IAP global spectral model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 21 (2): 141–150.
- 张道民, 纪立人. 2001. 动力延伸(月)数值天气预报中的信息提取和减小误差试验 [J]. 大气科学, 25 (6): 778–786.
- Zhang Daomin, Ji Liren. 2001. A study of information on the extraction to reduce errors in dynamic extended (monthly) numerical weather prediction [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (6): 778–786.
- 张琼, 钱正安, 陈敏连. 1997. 关于夏季南亚高压的进一步研究 I. 与我国西北地区降水关系的统计分析 [J]. 高原气象, 16 (1): 52–62.
- Zhang Qiong, Qian Zhengang, Chen Minlian. 1997. The further study about South Asia high in summer. I: Statistic analyses of relationship between it and precipitation distribution over Northwest China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 16 (1): 52–62.
- 张琼, 吴国雄. 2001. 长江流域大范围旱涝与南亚高压的关系 [J]. 气象学报, 59 (5): 569–577.
- Zhang Qiong, Wu Guoxiong. 2001. The large area flood and drought over Yangtze River valley and its relation to the South Asia high [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 59 (5): 569–577.
- 赵振国. 1999. 中国夏季旱涝及环境场 [M]. 北京: 气象出版社, 297pp.
- Zhao Zhenguo. 1999. Summer Drought and Flooding in China and the Background Fields (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 297pp.
- 周曾奎. 1996. 江淮梅雨 [M]. 北京: 气象出版社, 210pp.
- Zhou Zengkui. 1996. Meiyu over the Yangtze-Huaihe River (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 210pp.