科学通报 2013 年 第 58 卷 第 4 期：365 ~ 371
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

夏季北半球平流层环流的模态特征及变化

李崇银[①②], 李琳[①*], 潘静[②]

① 解放军理工大学气象学院, 南京 211101;
② 中国科学院大气物理研究所, LASG 国家重点实验室, 北京 100029
* 联系人, E-mail: llen1983@163.com

2012-04-25 收稿, 2012-09-07 接受
国家重点基础研究发展计划(2010CB950401)资助

摘要 通过资料分析研究了夏季平流层大气环流的基本时空特征, 并探讨了不同时间尺度变化的主要影响因素. 发现夏季北半球平流层位势高度场主要存在着半球一致型模(EOF1)和环状模(EOF2)两个典型模态. 而第一主模态(半球一致模)在近半个世纪里存在减弱趋势; 全球增暖可能对这种演变趋势有重要的作用. 进一步分析表明, 北半球平流层夏季的第一模态还主要存在年代际准周期变化特征, 其周期分别约为 11 和 22 a, 而第二模态(EOF2)主要存在 3 和 40 a 左右的准周期变化特征. 50 hPa 第一模态时间系数与太阳活动指数的相关系数达到 0.425(通过 99%信度检验), 可以认为北半球平流层夏季 50 hPa 半球一致模(EOF1)的年代际变化主要是由太阳活动所引起的. 关于 50 hPa 第二模态年际(准 3 a)变化的分析表明其与 ENSO 事件没有直接关系; 但是夏季 50 hPa 第二模态时间系数与欧亚大陆 10 月雪盖面积指数间的相关系数达到 0.633(通过 99%信度检验), 说明北半球平流层夏季 50 hPa 环状模(EOF2)的年际变化主要可能是由于欧亚大陆前一年 10 月份的雪盖变化所引起的大气环流异常的持续影响造成的.

关键词
北半球
夏季平流层
主模态
时间变化
影响因子

平流层是指对流层顶以上到离地面大约 55 km 高度的大气层. 随着科学技术的进步, 尤其是火箭和卫星技术的发展, 以及人类活动范围的扩展, 平流层的问题已引起科学界和公众的广泛注意. 不仅因为人们对保护地球生物的平流层臭氧层有所担心, 在关心全球变化的同时, 人们对平流层过程对全球气候的影响也十分关注. 正是由于科学家们意识到平流层在全球气候系统中的重要作用, 1992 年开始便在《世界气候研究计划》(WCRP)中专门设立了一个名为《平流层过程及其在气候中的作用》的子计划(SPARC), 其主要研究内容除平流层臭氧的耗损外, 还包括平流层对气候变化的影响及气候变化的反馈作用.

由于平流层中的热力和动力学过程, 以及大气环流和变化都与对流层大气有明显差异, 但因资料原因过去的研究相对还不多. 随着人类在平流层活动的日益频繁, 特别是近年来临近空间飞行器的问世及活动, 大家更是迫切需要知道作为临近空间重要部分的平流层的大气环流状况及其时空变化特征. 另外, 过去人们一般不太关注夏季平流层的情况, 认为那里主要盛行一致的东风, 形势相对较为简单, 一些研究主要也是有关平流层低层南亚高压活动的分析. 随着资料的逐渐丰富和对流层研究的逐渐扩展, 以及夏季天气气候研究和预报的需要, 夏季平流层环流的形势及其变化也已开始引起大家的注意.

在过去的研究中, 人们往往将对流层的一些结果扩展到平流层大气, 特别是关于北半球环状模(NAM)的概念[1,2]. 因为在冬季时, 平流层与对流层有很强的动力耦合, NAM 在垂直方向呈准正压的结构, 因而可以用 NAM 来描述平流层与对流层之间的相互作用过程[3~7]. 而 Lee 等人[8]的研究发现夏季平流层与对流层具有不同的第一模态, 夏季平流层的

引用格式: 李崇银, 李琳, 潘静. 夏季北半球平流层环流的模态特征及变化. 科学通报, 2013, 58: 365–371
英文版见: Li C Y, Li L, Pan J. Spatial and temporal variations of the stratospheric atmospheric circulation in the Northern Hemisphere during the boreal summer. Chin Sci Bull, 2013, 58, doi: 10.1007/s11434-012-5606-0

第一模态主要表现为全区域的一致性变化, 并且平流层的第一模态与太阳活动有很好的关系. 最近我们用冬季(12 月, 1 月, 2 月)平均的 10.7 cm 太阳射电通量资料表征太阳活动的强度, 研究了太阳活动对平流层环流及我国夏季梅雨的影响[9,10], 虽然未对大气环流作 EOF 分解, 但结果表明太阳活动的变化可以引起平流层大气环流, 尤其是平流层 AO 的明显异常, 而且平流层 AO 很类似 Lee 等人[8]得到的第一模态, 也就确实表明平流层的第一模态极有可能更多地与太阳活动的影响有关. 但是如果单独对夏季不同月份 40°N 以北的对流层位势高度场进行 EOF 分解, 第一模态也将表现出南北反向振荡的特征, Ogi 等人[11,12]将其定义为夏季 NAM. 实际上, Ogi 等人[11,12]提出的夏季 NAM 与 Lee 等人揭示的夏季第二模态是一致的. 但是 Ogi 等人[11,12]只讨论了对流层的情况, 没有讨论平流层夏季的 NAM, 而 Lee 等人[8]只研究了夏季平流层第一模态及其与太阳活动的关系.

平流层夏季大气环流存在什么样的主要模态, 这些主要模态又有怎样的时间变化特征, 目前还都研究的不多. 本文将通过对半个多世纪以来资料的分析, 研究揭示夏季平流层大气环流的基本时空特征, 并初步探讨不同时间尺度变化的主要影响因素.

1 资料

本文研究采用的大气资料为美国气象环境预报中心和美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)的逐月再分析资料, 该资料共 63 年(1948 年 1 月~2010 年 12 月), 水平分辨率为 2.5°×2.5°, 资料在垂直方向有 17 层, 最高层次为 10 hPa. 本研究还用了北半球雪盖面积指数资料, 它由美国 Rutgers 大学整理提供(http://climate.rutgers.edu/snowcover/index.php), 该指数从 1966 年 11 月到 2011 年 4 月, 由于初冬雪盖面积指数在 1971 年前有部分数据缺测, 所以我们只使用 1971 之后的资料. 另外, 研究中还使用了美国国家大气与海洋局(NOAA)的太阳活动指数资料(http://www.ngdc.noaa.gov/stp/).

2 夏季平流层环流的主要模态

平流层夏季环流随高度的变化不是很大, 因此以 50 hPa 代表整个平流层的形势. 近些年人们习惯于用经验正交分解(EOF)来揭示对流层和平流层大气环流的基本模态特征, 这里也用 EOF 分析北半球夏季平流层环流的主要模态. 表 1 给出的是夏季北半球 50 hPa 高度场 EOF 分析得到的 5 个主要模态的方差贡献率情况, 很显然, 其 EOF1 和 EOF2 两个主分量的方差贡献率已经达到约 85%, 其余分量的贡献都比较小. 也就是说, 夏季北半球平流层环流的演变, 基本上可以用 EOF1 和 EOF2 这两个主要模态的变化来描述.

图 1 给出的是夏季北半球 20°N 以北 50 hPa 位势高度场的 EOF1(a)和 EOF2(b)两个主要模态的形势. EOF1 所表示的是整个北半球符号一致的变化特征, 而 EOF2 所表示的是北半球高纬度与中低纬度地区符号相反的跷跷板式变化特征, 也被称之为平流层环状模[11]. 换句话说, 夏季北半球平流层环流的变化基本上可以认为存在着半球一致型模和环状模两个典型模态. 为了进一步揭示上述两个主模态的存在和特征, 分别计算了北半球位势高度场对第一(EOF1)和第二(EOF2)模态时间序列的回归系数, 其纬度-高度剖面分布如图 2 所示. 由图 2 可以看到, 对于 EOF1 其回归系数在 150 hPa 以上的各个高度层均为相同的符号, 但数值随高度增加; 对于 EOF2 的回归系数在 55°N 纬度附近各个高度层均为符号相反(北正南负)的形势, 尤其是在 150 hPa 以上的各层. 可以认为夏季北半球平流层既存在一致型模(EOF1), 也存在极其明显的环状模 (EOF2).

从近半个世纪平流层夏季 EOF1 和 EOF2 模态的时间系数的时间演变可以看到, 在 20 世纪 50 年代到 21 世纪初, EOF1 模的系数有随时间从正值逐渐变到负值的趋势, 也就可以认为平流层夏季一致型模(EOF1)的正模态有减弱趋势, 如图 3 中虚线所示. 而 EOF2 模的系数随时间变化没有特别明显的趋势(图略), 这里就不讨论半球环状模(EOF2)的变化趋势了.

是什么原因导致夏季北半球平流层位势高度场的两个主模态在近半个世纪里存在着这样的不同演

表 1 夏季北半球平流层环流几个主要 EOF 分量的方差贡献率

模态	方差贡献率(%)	累积方差贡献率(%)
1	65.46745	65.46745
2	19.18242	84.64987
3	4.884863	89.53474
4	3.219114	92.75385
5	1.683387	94.43724

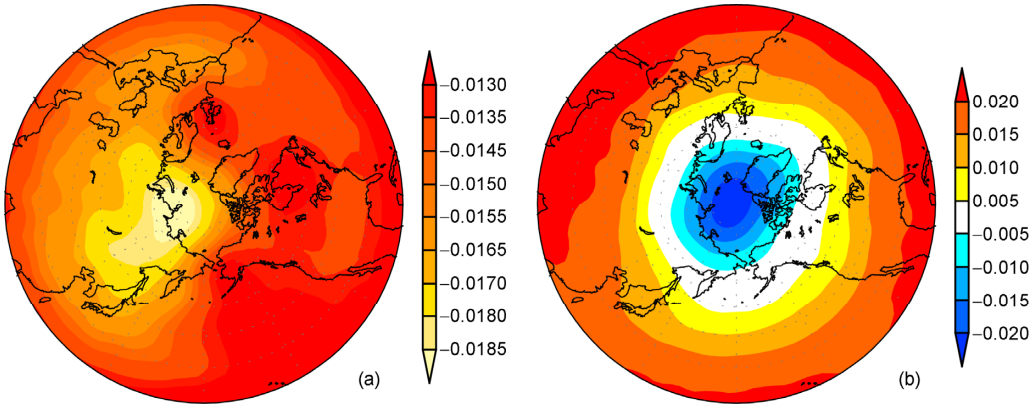


图 1　1948~2009 年夏季北半球 20°N 以北 50 hPa 位势高度场的 EOF1(a)和 EOF2(b)模态分布特征

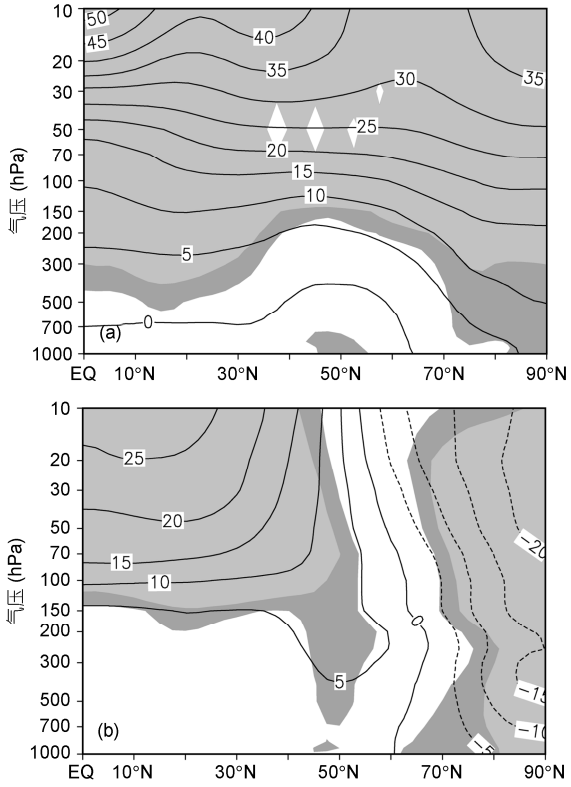


图 2　北半球位势高度场对第一(EOF1, (a))和第二(EOF2, (b)) 模态时间序列的回归系数分布

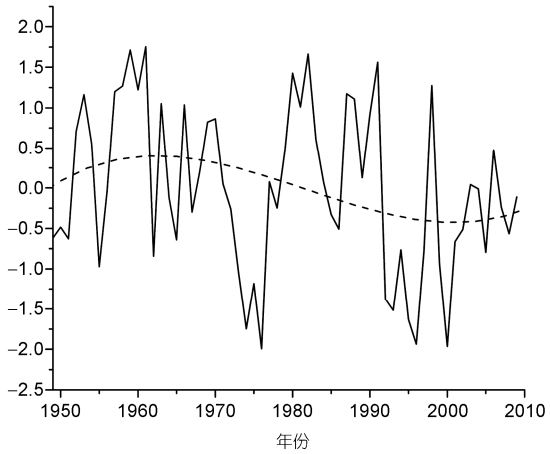


图 3　夏季北半球 50 hPa 位势高度场 EOF1 模态的时间系数演变特征

虚线为四阶多项式拟合结果

变趋势呢？大家知道，近百年来地球表面温度有极其显著的增暖，而在对流层大气持续增暖的同时平流层温度在降低[13]．这也就提示我们，是不是全球增暖现象会造成北半球平流层夏季两个主要模态的演变趋势，这里需要进行对比分析．图 4 分别给出的是 20 世纪 50 年代(1951~1960 年)与 21 世纪初(2001~2010 年)平均的夏季(6~8 月)50 hPa 位势高度及温度场的差值分布．图中清楚地表明，整个北半球 50 hPa 的温度半世纪来是明显降低的，而且低纬度平均降温要大于高纬度平均．同时，50 hPa 的位势高度整层也是降低的，中纬度地区平均降低最显著，而赤道和极区的降低不明显．

上面的分析清楚表明，平流层 50 hPa 位势高度场第一模态的近 50 年变化趋势在相当程度上受到全球增暖的重要影响．当然，已有研究表明，平流层臭氧的损耗作用也会对平流层的变冷有一定的影响[13]，尤其是在 20 世纪 70 年代末到 90 年代末期间．

3　夏季平流层主模态的年际和年代际变化特征及可能原因

为进一步研究北半球平流层夏季主模态的时间

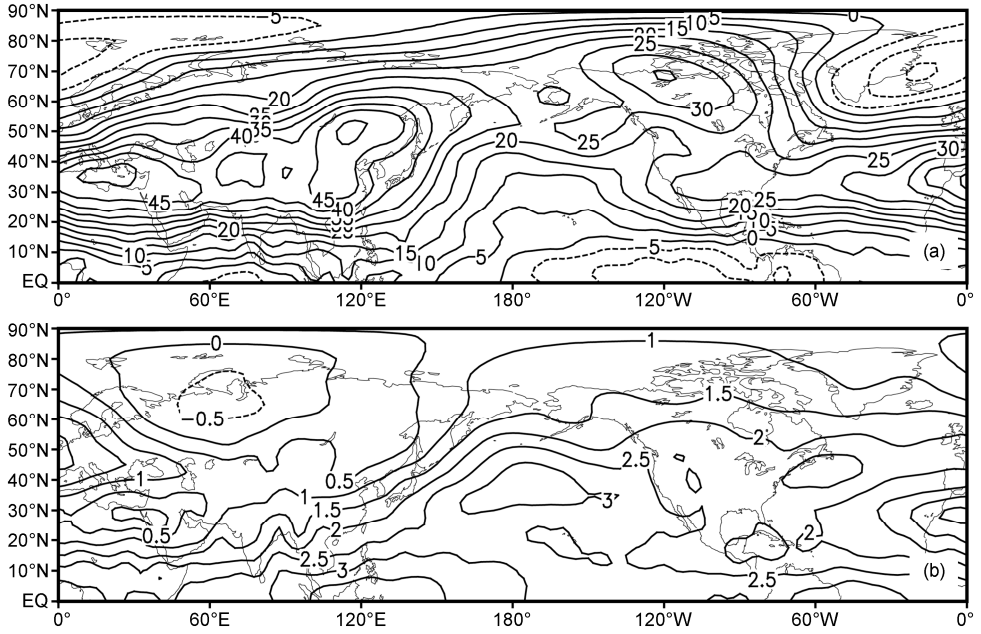


图 4　1951~1960 年与 2001~2010 年夏季(6~8 月)平均的 50 hPa 位势高度(a)及温度(b)场的差值分布

变化特征, 分别计算了 EOF1 和 EOF2 两个模态时间序列的功率谱和小波谱, 其结果如图 5 和 6 所示. 从图 5 可以看到, EOF1 主要在 11 和 22 a 附近有明显的谱峰, 可以认为北半球平流层夏季的第一模态(EOF1)主要存在年代际的准周期变化特征, 其周期分别约为 11 和 22 a; 虽然第一模态(EOF1)也存在年际变化谱, 但相对不显著. 从图 6 可以看到, EOF2 主要在 3 和 40 a 附近有明显的谱峰, 可以认为北半球平流层夏季的第二模态(EOF2)存在着年际和年代际两类准周期变化特征, 其周期分别约为 3 和 40 a 左右.

介于 50 hPa 夏季第一模态主要准周期在 11 a 左右和 22 a 左右, 因此关于它年代际变化的可能原因就不得不考虑到太阳活动的影响, 因为太阳活动的主要周期也在 11 和 22 a 左右[14,15]. 通过对 50 hPa 第一模态时间系数与太阳活动指数相关系数的计算结果表明, 两者的相关系数达到 0.425, 通过 99%信度检验. 因此可以认为, 北半球平流层夏季 50 hPa 一致模(EOF1)的年代际变化主要是由于太阳活动所引起的. 因为在一个 11 a 的太阳活动周期中紫外线的变化幅度可以达到 5%, 而紫外线的变化, 必然会影响到平流层的臭氧浓度和温度, 进而影响平流层的位势高度场.

关于 50 hPa 夏季第二模态的准周期变化, 因为资料的时间长度有限, 无法很好地讨论其准 40 a 的

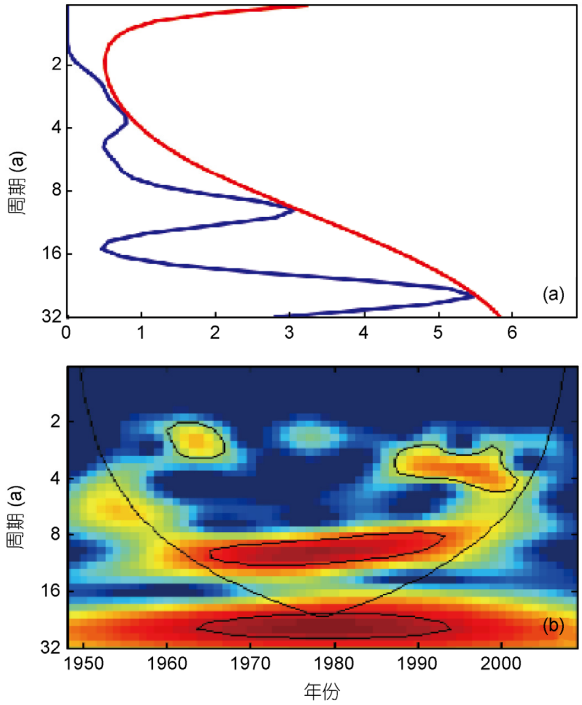


图 5　北半球 50 hPa 夏季第一模态时间序列的功率谱(a)和小波(b)分析结果

年代际变化, 这里主要分析准 3 a 的年际变化. 由于 ENSO 的周期是 3~7 a, 而它对对流层和平流层的大气环流都有明显影响, 因此首先进行了 50 hPa 第二

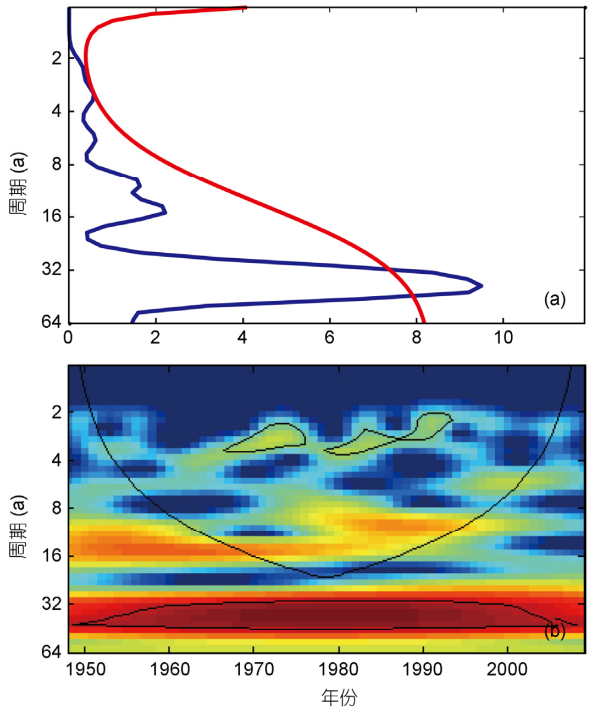


图 6　北半球 50 hPa 夏季第二模态时间序列的功率谱 (a) 和小波(b)分析结果

模态时间系数与全球 SSTA 间相关系数的计算，其相关系数分布如图 7 所示. 但从相关系数的分布图上看不到在赤道太平洋有显著的相关，说明 50 hPa 第二模态(EOF2)与 ENSO 没有明显关系. 但是，在相关图上北半球存在两个值得注意的系统性相关区，其一是在北太平洋中纬度“IP”[16,17]区域，另一个是在北大西洋. 前者虽由其年代际特征而得名，但我们的进一步研究已指出该通道也存在明显的年际变化特征[18]，与 50 hPa 第二模态存在明显关系也就可以理解了，但是还需要对它们进行深入研究. 相关系数在北大西

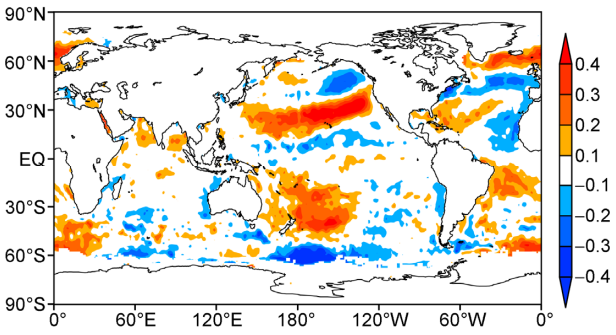


图 7　平流层 50 hPa 第二模态时间系数与同期海表温度的相关系数分布

洋呈现出“三极子”分布特征，已有研究表明这种“三极子”海温异常对其下游欧亚大陆上空的大气环流、例如对乌拉尔阻塞高压有明显的影响[19]，也必然会对那里的气候变化起一定作用.

Ogi 等人[11]的研究指出冬春季北半球雪盖面积的变化能够造成夏季对流层环状模(NAM)的不同模态. 那么夏季平流层的对流层环状模的变化是否也与冬季雪盖有关系呢？这里计算了 50 hPa 第二模态(EOF2)时间系数与欧亚大陆 10 月雪盖面积指数间的相关系数，两者的相关系数达到 0.633，通过 99%信度检验. 因此可以认为，北半球平流层夏季 50 hPa 环状模(EOF2)的年际变化，主要可能是由于欧亚大陆前一年 10 月份雪盖面积变化所引起的大气环流异常所造成的.

Cohen 等人[20]的研究指出，10 月是雪盖面积变化最强的月份，同时也是西伯利亚高压建立的月份，因此 10 月的雪盖面积异常对冬季平流层环流的变化有重要的影响. 为了检验前期北半球 10 月雪盖面积与平流层夏季环状模相关的可靠性，我们还分别计算了北半球雪盖面积指数与 6, 7, 8 月夏季环状模指数的超前相关，其相关系数分别为：–0.48，–0.49 和–0.59，也都超过了 99%的信度检验. 而前期其他月份的雪盖面积与平流层夏季环状模指数的相关性都不高. 我们的这些结果，同 Cohen 等人[20]使用的 10 月份西伯利亚雪盖面积指数(1949~2004 年)与平流层夏季环状模指数进行超前相关分析所得到的结果基本一致.

为进一步说明北半球平流层(50 hPa)环状模的这种跨季度持续性特征，还进行了 50 hPa 位势高度场对其冬季环状模的超前、滞后回归，其结果如图 8 所示. 从图中回归系数的演变来看，在同期的冬季 1 和 2 月，高纬度地区和中低纬度地区分别为负的和正的位势高度，形成了环状模的南北向振荡型；春季位势高度对冬季环状模的响应明显减弱；而夏季时，高纬度地区又出现了明显的负的位势高度，与其相对应在中纬度为较弱的正位势高度，再次形成环状模的振荡型特征. 但对于北半球平流层(50 hPa)环状模所存在的这种跨季度持续性特征的动力学机制现在还不清楚，它是否与平流层较为显著的半年振荡有关也有待进一步研究.

4　结语及讨论

夏季北半球平流层位势高度场的变化可以认为

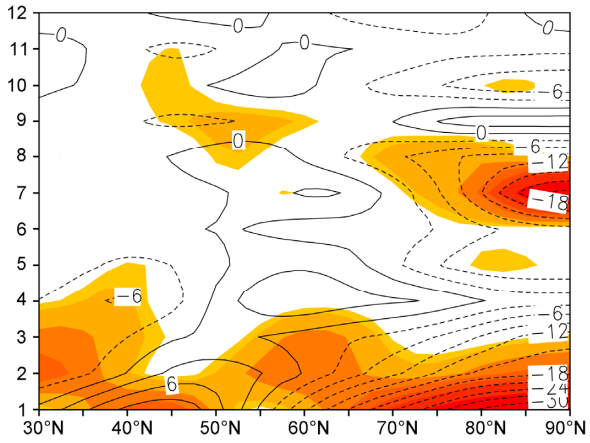


图 8 对前期冬季 NAM 指数进行超前、滞后回归的 50 hPa 位势高度场的纬度-时间分布

阴影表示通过 90%的信度检验

基本上存在着半球一致型模和环状模两个典型模态. 而且分析表明, 平流层夏季环流的半球一致模(EOF1)在近半个世纪里其正模态有随时间减弱的趋势; 对于第一主模态(半球一致模)的这种演变趋势, 可以认为全球增暖在其中起到了重要作用. 当然, 除了全球变暖之外, 平流层臭氧含量的变化也对平流层温度的变化有重要影响.

进一步分析表明, 北半球平流层夏季的第一模态(EOF1)主要存在年代际准周期变化特征, 其周期分别约为 11 和 22 a; 而第二模态(EOF2)主要存在 3 和 40 a 左右的谱峰, 即它既存在年际又存在年代际的准周期变化特征.

从 50 hPa 第一模态时间系数与太阳活动指数间相关系数的计算表明, 两者的相关系数达到 0.425, 通过 99%信度检验. 因此可以认为, 北半球平流层夏季 50 hPa 一致模(EOF1)的年代际变化主要是由于太阳活动所引起的. 关于 50 hPa 第二模态年际(准 3 a)变化的分析表明, 它与 ENSO 事件没有直接关系. 但是, 夏季 50 hPa 第二模态时间系数与欧亚大陆 10 月雪盖面积指数间的相关系数计算表明, 两者的相关系数达到 0.633, 通过 99%信度检验. 因此可以认为, 北半球平流层夏季 50 hPa 环状模(EOF2)的年际变化, 主要可能是由于欧亚大陆前一年 10 月份的雪盖变化所引起的大气环流异常造成的.

关于 10 月雪盖的影响问题, Ogi 等人[11]的研究认为, 冬春季北半球雪盖面积的变化, 会改变经向热力对比, 进一步使得涡动活动发生变化, 最终造成不同的夏季对流层环状模(NAM)模态. 从上面的分析, 再结合 Cohen 等人[20]的研究结果, 我们认为前期 10 月的雪盖面积异常能够对后期冬季的平流层环流及冬季平流层环状模产生影响; 而随后的平流层夏季环状模可能是通过某种途径延续了冬季环状模的异常模态, 从而使得前期 10 月雪盖面积异常的影响延续到了夏季, 使夏季环状模出现异常. 因为, 考虑到夏季行星波难以进入平流层并对平流层产生影响, 也就难以用 Ogi 等人[21]关于对流层冬季 NAO/ AO 对夏季对流层环状模影响的理论假设来解释平流层夏季 NAM 如何延续平流层冬季的 NAM 异常. 可以初步认为, 要回答冬季对流层异常如何影响夏季平流层的问题, 还需要更多考虑平流层自身过程的作用, 尽管这还有待深入研究.

参考文献

1 Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. Geophys Res Lett, 1998, 25: 1297–1300

2 Thompson D W J, Wallace J M. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. J Clim, 2000, 13: 1000–1016

3 Baldwin M P, Dunkerton T J. Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere. J Geophys Res, 1999, 104: 937–946

4 Baldwin M P, Stephenson D B, Thompson D W J, et al. Stratospheric memory and skill of extended-range weather forecasts. Science, 2003, 301: 636–639

5 Thompson D W J, Baldwin M P, Wallace J M. Stratospheric connection to northern hemisphere wintertime weather: Implications for prediction. J Clim, 2002, 15: 1421–1428

6 Coughlin K, Tung K K. Tropospheric wave response to decelerated stratosphere seen as downward propagation in northern annular mode. J Geophys Res, 2005, 110: D01103, doi: 10.1029/2004JD004661

7 Chen W, Takahashi M, Graf Hans-F. Interannual variation of stationary planetary wave activity in the northern winter troposphere and stratosphere and their relation to NAM and SST. J Geophys Res, 2003, 108: 4797, doi: 10.1029/2003JD003834
8 Lee J N, Hameed S. Northern Hemisphere annular mode in summer: Its physical significance and its relation to solar activity variations. J Geophys Res, 2007, 112: D15111, doi: 10.1029/2007JD008394
9 李崇银, 顾薇, 潘静. 梅雨与北极涛动及平流层环流异常的关联. 地球物理学报, 2008, 51: 1632–1641
10 潘静, 李崇银, 顾薇. 太阳活动对中国东部夏季降水异常的可能影响. 气象科学, 2010, 30: 566–578
11 Ogi M, Yamazaki K, Tachibana Y. The summertime annular mode in the Northern Hemisphere and its linkage to the winter mode. J Geophys Res, 2004, 109: D20114, doi: 10.1029/2004JD004514
12 Ogi M, Yamazaki K, Tachibana Y. The summer northern annular mode and abnormal summer weather in 2003. Geophys Res Lett, 2005, 32: L04706, doi: 10.1029/2004GL021528
13 胡永云, 丁峰, 夏炎. 全球变化条件下的平流层大气长期变化趋势. 地球科学进展, 2009, 24: 242–251
14 Friis-Christensen E, Lassen K. Length of the solar cycle: An indicator of solar activity closely associated with climate. Science, 1991, 254: 698–700
15 Frieman A. National Research Council: Solar Influences on Global Change. Washington DC: National Academy Press, 1994. 163
16 王东晓, 刘征宇. 太平洋年代际海洋变率的信号通道. 科学通报, 2000, 45: 808–815
17 Zhou W, Li C Y, Wang X. Possible connection between Pacific Oceanic interdecadal pathway and East Asian Winter Monsoon. Geophys Res Lett, 2006, 34: L01701, doi: 10.1029/2006GL027809
18 李崇银, 王力群, 顾薇. 冬季蒙古高压与北太平洋海温异常的年际尺度关系. 大气科学, 2011, 35: 193–200
19 李崇银, 顾薇. 2008 年一月乌拉尔阻塞高压异常活动的分析研究. 大气科学, 2010, 34: 865–874
20 Cohen J, Barlow M, Kushner P, et al. Stratosphere-troposphere coupling and links with Eurasian land surface variability. J Clim, 2007, 20: 5335–5343
21 Ogi M, Tachibana Y, Yamazaki K. Impact of the wintertime North Atlantic Oscillation (NAO) on the summertime atmospheric circulation. Geophys Res Lett, 2003, 30: 1704, doi: 10.1029/2003GL017280