

高丽, 李建平. 扰动位能与大气环流异常的耦合关系及机理研究. 地球物理学报, 2012, 55(3): 768-780, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 03. 006.

Gao L., Li J. P. Relationship and mechanism between perturbation potential energy and atmospheric general circulation anomalies. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(3): 768-780, doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 03. 006.

# 扰动位能与大气环流异常的耦合关系及机理研究

高 丽<sup>1</sup>, 李建平<sup>2</sup>

1 中国气象局国家气象中心数值预报中心, 北京 100081

2 中科院大气物理研究所 LASG, 北京 100029

**摘 要** 本文在前期局地扰动位能理论工作基础上, 进一步着眼于扰动位能与大气环流异常的关系和机理问题, 采用奇异值分解(SVD)方法分析了扰动位能与高、中、低层大气动能的耦合相关模态以及年际变率情况, 同时考察它与作为大气质量分布的海平面气压之间的相关关系, 并从物理上初步探讨了扰动位能与大气动能以及质量的相关机理问题. 结果表明, 扰动位能自身变率的第一模态同时也是与大气环流异常场耦合变化的主要模态, 与之相对应的大气动能和质量场的主模态也是其自身变率的支配模态, 说明它们之间存在相互制约的物理机制. 而且, 热带外地区大气环流主模态特征的形成, 与扰动位能兼具全球尺度纬向对称结构和局地尺度纬向非对称性密不可分. 另外, 冬季南北半球环状模指数与扰动位能的前两阶矩存在非常好的相关关系, 而在夏季这种关系明显削弱, 仅存在于南半球.

**关键词** 扰动位能, 大气环流异常, 动能, 环状模, 奇异值分解

doi:10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 03. 006

中图分类号 P433

收稿日期 2011-08-25, 2011-09-29 收修定稿

## Relationship and mechanism between perturbation potential energy and atmospheric general circulation anomalies

GAO Li<sup>1</sup>, LI Jian-Ping<sup>2</sup>

1 Numerical Prediction Center, National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics,

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

**Abstract** Based on previous theoretical studies for local perturbed potential energy (PPE), in this study, we further focus on the relationship and mechanism between the PPE and atmospheric general circulation (AGC) anomalies, and analyze the coupled correlation modes between the PPE and upper, middle and lower-level atmospheric kinetic energy (AKE) and their interannual variability. Meanwhile, we also examine the relationships between the PPE and sea surface pressure as the measure of atmospheric mass and further discuss physical mechanisms involved in the relationships between the PPE and the AKE as well as mass. Analysis results show that the first mode in the variability of the PPE is also the leading mode in the coupled variation of the PPE and AGC anomalies, and the corresponding primary modes in the AKE and mass fields are also the dominant modes in their own variability, which indicates a possible interrelated physical mechanism between them. Furthermore, it is demonstrated that the formation of the prevailing mode of the extratropical AGC is closely associated with the feature that the PPE has both zonal

symmetry at global scale and zonal asymmetry at local scale. Moreover, there is a significant correlation between the first two orders of moments of the PPE and the southern/northern annular mode indices in the wintertime, but such a relationship is apparently weakened in the summertime and exists in the southern hemisphere only.

**Keywords** Perturbation potential energy, Atmospheric general circulation anomaly, Kinetic energy, Annular mode, SVD

## 1 引言

大气能量学一直在大气动力学研究中占有重要地位.按照经典大气能量学,大气全位能分解为可以释放转化成动能的有效部分和不可释放的无效部分<sup>[1-3]</sup>,这便是能量有效性问题.关于能量有效性问题的研究,人们通常使用大气有效位能的概念来探讨全位能和动能的转换、能量循环以及大气环流运动的维持,并拓展到海洋能量学研究和应用中<sup>[4-14]</sup>.但以往研究中所采用的有效位能概念大多是针对全球平均而言的,反映的是大气系统的整体能量有效性,因而,这种能量有效性理论框架无法适用到愈受关注的局地能量学研究中.

事实上,天气气候系统特征及其异常的发生往往具有明显局地性<sup>[15-17]</sup>.局地大气运动发展变化与局地能量有效性关系密切.大气能量的收支、分布和转化具有明显的局地特征,而且,天气气候现象的发生发展往往与大气系统内部存在的局地能量源(汇)密切相关,局地能量的异常变化必然会对局地大气环流的变化产生重要影响.因此,考察区域性能量转化效率及机制对于了解局地大气环流的变动非常重要,这就是局地能量有效性的问题.我们在前面工作中提出了适用于反映局地能量有效性问题的扰动位能概念<sup>[17-18]</sup>,以此来研究局地全位能与动能转化的相关问题.在已有的工作<sup>[17-20]</sup>中,我们考察了扰动位能的时空分布特征和年际异常变率,使我们更好地认识了扰动位能的基本概念.

本文将在前面研究的基础上,运用奇异值分解(SVD)的分析工具,考察扰动位能与不同大气运动和状态变量场之间的耦合相关关系,目的是揭示扰动位能的首要耦合相关分布型及其对大气环流异常等诸多方面的影响机理,即利用SVD来分析扰动位能与高、中、低层大气动能的耦合相关模态以及年际变率情况,同时也将考察它与作为大气质量分布的海平面气压之间的相关关系,并初步探讨扰动位能与大气动能以及质量场的相关机理问题.

## 2 资料和方法

本文采用NCEP/NCAR再分析资料<sup>[21]</sup>,所用资料时段为1948—2004年,每年取冬季(11月—次年3月)作为研究对象;格点资料分辨率取为 $5^\circ \times 5^\circ$ ,主要针对北半球热带外地区( $20^\circ\text{N}$ 以北到极区)进行分析.所用变量分别为计算得到的整层积分的扰动位能(PPE)和200 hPa、500 hPa以及850 hPa大气动能,使用的数据集有美国NCEP/NCAR再分析资料中的海平面气压(SLP)资料、NOAA气候资料中心(NCDC)提供的扩展重构的海表温度(ERSST)资料.扰动位能与大气动能以及海平面气压异常之间耦合关系通过SVD分析技术加以实现,有关这一方法的说明详见附录.

## 3 扰动位能与大气动能的耦合相关关系

在以前工作<sup>[17-20]</sup>中,我们分析了扰动位能各个分量的时空特征,发现其与大气动能之间在多方面存在明显联系.为此,这里将首先以冬季北半球热带外地区的500 hPa动能为左场,整层扰动位能为右场进行SVD分析.

在表1中,我们给出了前5对SVD模态的主要数据信息.可以看到,解释协方差平方和百分比在第一和第二以及第三和第四模态之间存在明显“间断”,而且,前三个SVD模态的累计解释两个场之间的总协方差平方和超过了60%,可以代表两个场耦合变化型的主要特征.第一模态解释两个场之间的总协方差平方和的30.3%,分别解释了500 hPa动能方差的8.4%和整层扰动位能方差的12.83%.这表明两场的主耦合变化型在整层扰动位能场中占较大的方差比例,在动能变率中占相对较小比例,从侧面反映出动能的变化具有比扰动位能更为复杂的特征.另一方面,大部分模态左、右场展开系数之间的相关系数达到0.8~0.9,且通过99.9%的信度检验.

表 1 500 hPa 动能(左场)与扰动位能(右场)前 5 个 SVD 模态信息

Table 1 Information of the first 5 SVDs of 500 hPa kinetic energy (left) and PPE (right)

序号	奇异值	解释协方差 平方和百分比/(%)	累计解释协方差 平方和百分比/(%)	展开系数之间的 相关系数	解释左场的 方差百分比/(%)	解释右场的 方差百分比/(%)
1	92.1	30.30	30.30	0.908	8.40	12.83
2	67.6	16.32	46.61	0.898	6.78	8.77
3	62.6	14.00	60.61	0.849	6.41	9.33
4	52.6	9.90	70.51	0.799	4.99	10.63
5	41.2	6.07	76.58	0.858	5.78	4.80

需要说明的是,由于寻找 SVD 模态的原则是尽可能多地反映两个场的相互联系,而不是尽可能多地反映单个场的自我变率,所以尽管前 10 个模态所对应的奇异值按照由大到小的顺序排列(且都大于零),但他们各自解释单个场的方差并不一定满足这样的下降顺序.相比之下,第一耦合模态所解释的 3 个方差百分比都是最大的.因此,下面我们进一步考察了这一模态的时空特征.

图 1 给出的是 SVD 第一模态左右场的同类相关、异类相关以及展开系数的时间序列图.第一模态解释了 30.3% 的总协方差,这反映其在耦合关系中的支配地位,当然,对应于左、右场分别解释的方差贡献要低一些,而且这样的一对支配耦合模态在各自场中所扮演的角色并不相同,扰动位能中的贡献显然要大一些.分析发现,左异类相关图与动能标准化距平 EOF 分析的第一特征向量图很相似(图略),而右异类相关图相似于 PPE 的第一特征向量.在左场同类相关图上,显著的特征是位于北美—北大西洋区域以及北非—南亚区域的正相关区,显著负相关区主要位于副热带区域,呈现近似环状分布.在右场同类相关图上,显著正相关区主要位于北美洲南部、西欧以及北太平洋区域,负相关区主要位于北美洲北部以及副热带大西洋—北非区域.除极点附近外,北半球 50°N 以北的高纬地区出现正的相关区,中纬度为负相关.从图 1 中还看到,左、右场的

异类相关分布与同类相关分布如出一辙,这充分说明第一耦合模态不但是首要相关主模态,也是各自场的主要空间模态.

从图 1e 中可以看出,左、右场展开时间系数序列具有非常好的变化一致性,二者相关系数可达到 0.908,表明这对模态具有非常好的耦合相关关系.因此,就平均而言左右场时间系数是同符号的,意味着动能的变化与扰动位能的变化是一致的.

下面进一步考察高层和低层的大气动能变化特征,分析扰动动能与 200 hPa 和 850 hPa 动能之间的场耦合相关关系.以冬季北半球 20°N 以北的热带外地区的 200 hPa 和 850 hPa 大气动能为左场,整层局地扰动位能为右场进行 SVD 分析.

对于 200 hPa 层大气动能与扰动位能的场相关关系,表 2 是 200 hPa 动能为左场、整层扰动位能为右场的前 5 个 SVD 模态的主要数据信息.大致情形与 500 hPa 相似,第一对模态解释两个场之间的总协方差平方和达到约 32%,解释动能和整层局地扰动位能的方差分别为 11.04% 和 13.49%.与 500 hPa 左、右场的解释方差分别为 8.4% 和 12.83% 相比较,可以看出两个场的耦合变化型在其自身变率中的相对重要性随着高度增加变得越来越重要.此外,前三个 SVD 模态的累计解释两个场之间的总协方差平方和基本上达到 63%,体现出其能够代表两个场耦合变化型的主要特征.大部分模态左、右场展开

表 2 200 hPa 动能(左场)与扰动位能(右场)前 5 个 SVD 模态信息

Table 2 Information of the first 5 SVDs of 500 hPa kinetic energy (left) and PPE (right)

序号	奇异值	解释协方差 平方和百分比/(%)	累计解释协方差 平方和百分比/(%)	展开系数之间的 相关系数	解释左场的 方差百分比/(%)	解释右场的 方差百分比/(%)
1	107.8	31.57	31.57	0.904	11.04	13.49
2	79.4	17.13	48.70	0.882	8.86	9.93
3	72.1	14.10	62.79	0.918	7.64	8.38
4	57.9	9.09	71.89	0.835	5.26	10.56
5	44.4	5.36	77.24	0.897	5.30	5.32

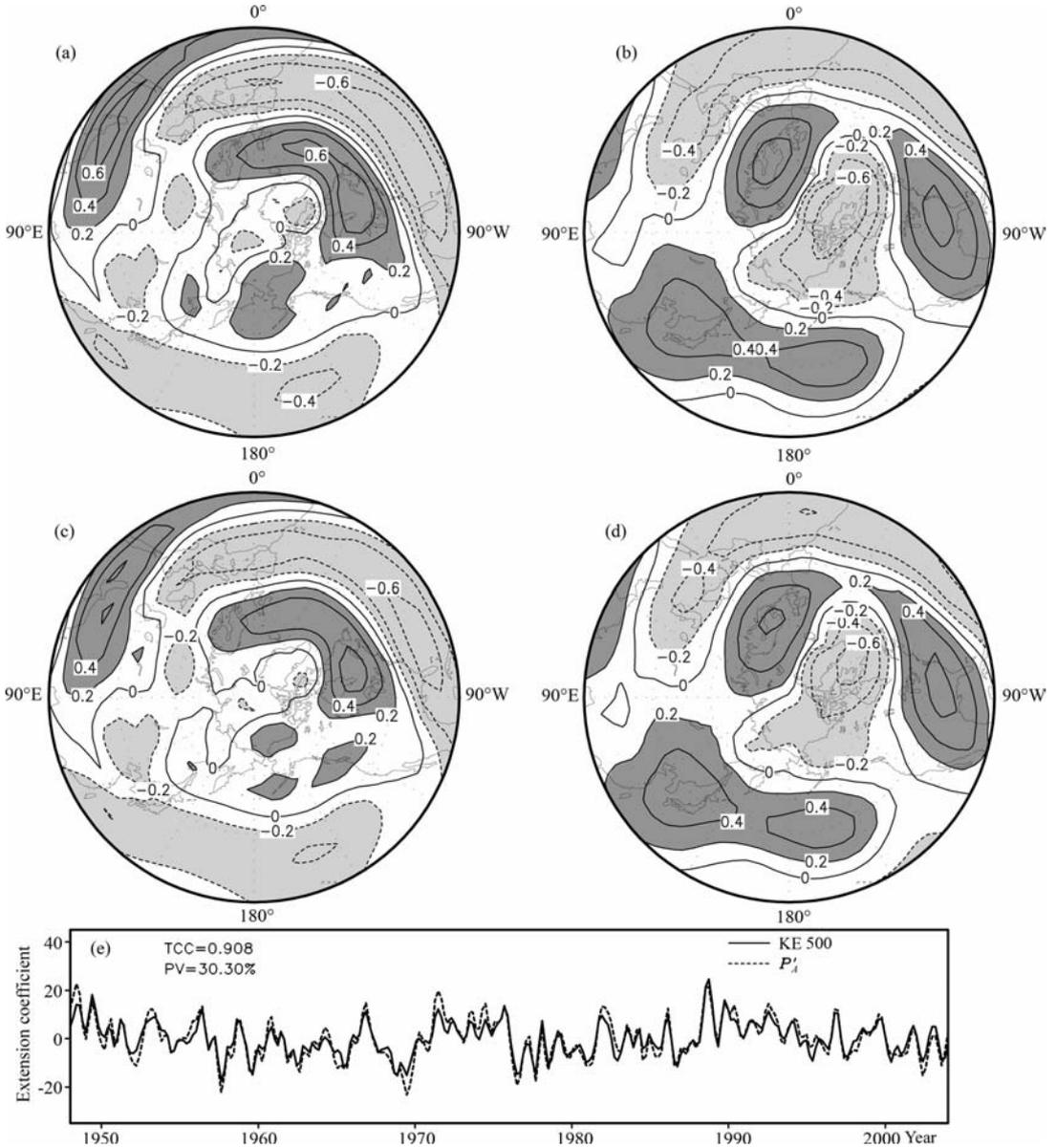


图 1 冬季 500 hPa 动能(KE500)为左场、整层局地扰动位能( $P'_i$ )为右场 SVD 第一模态 (a)和(b)分别是左、右同类相关图;(c)和(d)是左、右异类相关图;(e)为左右场的扩展系数经过 3 点平滑的时间序列。(a)–(d)中深色(或浅色)阴影表示达到 95% 信度检验的显著正(或负)相关区域。最外围纬圈是 20°N, 经向网格线间隔 20°。等值线间隔为 0.2。TCC 为时间相关系数, PV 为方差百分比。

Fig. 1 The first SVD of winter 500 hPa kinetic energy (left) and PPE (right)

Panels (a) and (b) are the left and right homogeneous correlation maps, (c) and (d) the left and right heterogeneous correlation maps, (e) the extension coefficient series of the left and right fields with a 3-point running mean. The dark (or light) shadings denote the significant positive (or negative) correlation areas at the 95% confidence level. The outmost latitude is at 20°N and longitudinal interval is 20°.

Contour interval is 0.2. TCC: temporal correlation coefficient; PV: percentage of variance.

系数之间的相关系数达到 0.8~0.9, 且通过 99.9% 的信度检验。

图 2 给出了 SVD 第一对模态对应的各种相关系数。可以清楚地看到, 200 hPa 动能与扰动位能的奇异向量空间分布与 500 hPa 几乎完全相反, 而且, 时间系数序列的演变形态也几乎是完全相反。这很容易理解, 因为从已有研究可知<sup>[14-15]</sup>, 扰动位能在

200 hPa 以上与大气中低层的正负状况正好相反, 使得在 SVD 分析中也呈现相反特征, 但这并不影响最终结论, 只要在奇异向量和时间系数上同时乘上 -1, 就与 500 hPa 的结果正负分布一致了。对于右场的同类和异类相关图, 不仅与 500 hPa 对应的非常接近, 而且彼此之间也相当一致。相比之下, 左场相关图彼此之间也很接近, 并且比 500 hPa

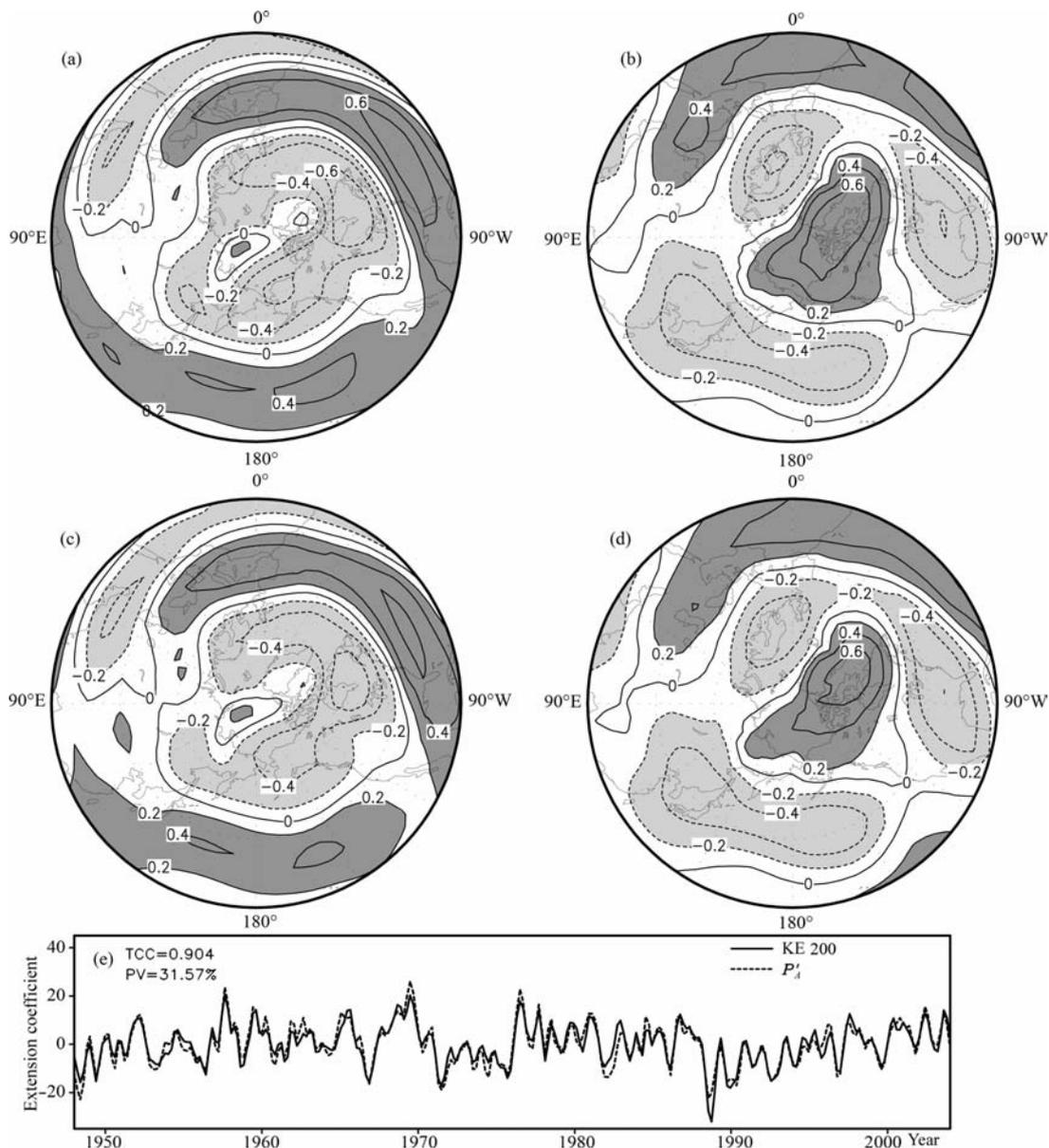


图 2 冬季 200 hPa 动能(KE200)为左场、整层局地扰动位能为右场 SVD 第一模态,其他说明同图 1

Fig. 2 The same as Fig. 1, but for the 200 hPa kinetic energy as the left field

相关图的特征更为规则、光滑和更具纬向对称性。另外,两个时间展开系数序列呈现高相关,达到约 0.904。

表 3 进一步给出了 850 hPa 大气动能为左场、整层局地扰动位能为右场的前 5 个 SVD 模态的主要信息。大致情形与 500 hPa 很相似,第一模态解释两个场之间的总协方差平方和达到约 34%,解释动能和整层局地扰动位能的方差分别为 7.09% 和 12.87%。而且,前三个 SVD 模态的累计解释两个场之间的总协方差平方和基本上达到 60%,表明其能够代表两个场耦合变化型的主要特征。当然,如果从解释协方差贡献百分比的“间断”来看,第二和第三以及第四和第五模态之间都可以作为诊断分析中自然存在的尺度截断。另外,可以看到,大部分模态左

右场展开系数之间的相关系数达到 0.8~0.9,且通过 99.9% 的信度检验。

图 3 给出了 SVD 第一模态对应的各种相关系数。可以清楚地看到,850 hPa 动能与扰动位能的奇异向量空间分布与 500 hPa 几乎是一致的,特别是右场的同类和异类相关图,不仅与 500 hPa 对应的非常接近,而且彼此之间也相当一致。相比之下,左场的相关图彼此也很接近,与 500 hPa 相关图仅仅是在北太平洋区域略有差异,从而说明两个变量场的耦合模态在中低层大气基本一致。两个时间展开系数序列呈现高相关,达到约 0.88,略低于 500 hPa 情形,但时间序列的演变形势则几乎完全一样。

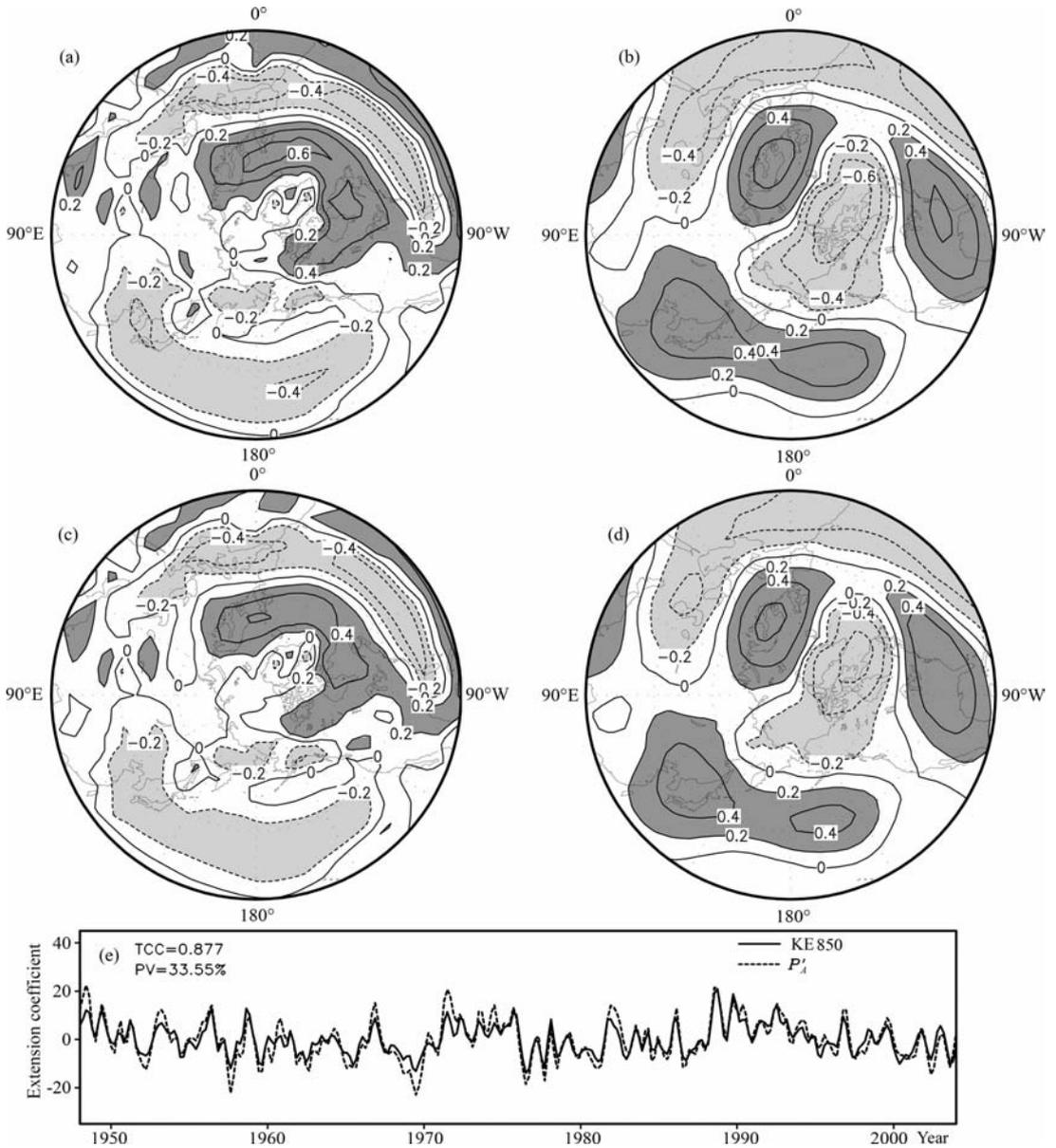


图 3 冬季 850 hPa 动能(KE850)为左场、整层局地扰动位能为右场 SVD 第一模态,其他说明同图 1

Fig. 3 The same as Fig. 1, but for the 850 hPa kinetic energy as the left field

表 3 850 hPa 动能(左场)与扰动位能(右场)前 5 个 SVD 模态信息

Table 3 Information of the first 5 SVDs of 850 hPa kinetic energy (left) and PPE (right)

序号	奇异值	解释协方差平方和百分比/(%)	累计解释协方差平方和百分比/(%)	展开系数之间的相关系数	解释左场的方差百分比/(%)	解释右场的方差百分比/(%)
1	81.2	33.55	33.55	0.877	7.09	12.87
2	54.3	15.03	48.57	0.858	4.68	9.46
3	46.9	11.21	59.78	0.822	4.28	8.55
4	45.1	10.34	70.12	0.760	4.28	10.79
5	33.5	5.72	75.84	0.817	4.15	4.91

#### 4 扰动位能与海平面气压的耦合关系

我们知道,由于大气运动异常变化必然导致大气质量分布发生变化,进而在海平面气压(SLP)异

常场上表现出来,因此,为了衡量扰动位能与大气质量变化之间的异常联系,我们这里将考察扰动位能与 SLP 之间的场相关关系.下面以冬季北半球 20°N 以北的热带外地区的海平面气压为左场,整层局地扰动位能为右场进行 SVD 分析,这一研究有助于深

人认识大气能量有效性与大气环流动力学变率特征之间的关系问题。

表 4 给出的是中高纬 SLP 与扰动位能 SVD 前 5 个模态的数据信息. 第一模态解释两个场之间的总协方差平方和的 44.69%, 解释 SLP 方差的 21.93%, 解释整层扰动位能方差的 13.08%. 由此可见, 两个场的第一耦合相关型是具有支配性的, 并在海平面气压场中占较大的方差比例, 这在前面关于大气动

能的分析中是无法看到的, 反映出在已知扰动位能的主空间分布型的情况下, 其所对应的时间系数能够很好地被用来表示 SLP 场的空间典型分布. 此外, 前三个 SVD 模态的累计解释两个场之间的总协方差平方和达到 72.42%, 体现出其能够代表两个场耦合变化型的大部分特征. 多数模态左右场展开系数之间的相关系数超过 0.8, 并通过 99.9% 的统计信度检验.

表 4 中高纬 SLP(左场)与扰动位能(右场)前 5 个 SVD 模态信息

Table 4 Information of the first 5 SVDs of mid-high-latitude SLP (left) and PPE (right)

序号	奇异值	解释协方差平方和百分比/(%)	累计解释协方差平方和百分比/(%)	展开系数之间的相关系数	解释左场的方差百分比/(%)	解释右场的方差百分比/(%)
1	131.90	44.69	44.69	0.816	21.93	13.08
2	75.09	14.49	59.18	0.832	9.29	9.73
3	71.81	13.25	72.42	0.861	8.80	9.09
4	55.84	8.01	80.43	0.841	5.97	8.49
5	41.94	4.52	84.95	0.867	5.39	5.13

图 4 是 SVD 第一模态左、右场的同类相关、异类相关以及展开系数的时间序列图. 第一模态解释了约 45% 的总协方差平方和. 通过分析对比发现, 左异类相关图与 SLP 标准化距平 EOF 分析的第一特征向量图很相似(图略), 而右异类相关图相似于 PPE 一阶矩的第一特征向量<sup>[17]</sup>. 从图 4 中可以看出, 一方面, 左场的同类与异类相关图非常相似, 即在极区呈现显著负相关, 而在副热带地区特别是太平洋和大西洋区域呈现显著正相关. 另一方面, 右场的两个相关图具有几乎完全相似的空间分布特征, 并且更为重要的是, 它们与前面大气动能中析离出的耦合模态对应相关图的特征也非常一致. 这充分说明扰动位能自身变率的第一模态同时也是与大气环流异常场耦合变化的主要模态, 与之相对应的大气动能和质量场的主要模态也是其自身变率的支配模态, 从而表明二者之间存在相互制约的物理机制.

当然, 在右场异类相关图上有一个略微不同于其他类似相关图的特征, 就是位于极区的负相关区倾向于呈现两个独立中心, 即分别位于北极圈中的太平洋一侧和大西洋一侧, 这在同类相关图上是存在的. 此时, 注意到左场相关图上的分别位于北太平洋和北大西洋上的正相关区, 并考虑到扰动位能对于局地或区域性环流的支配作用, 我们有理由推断: 在扰动位能图上可以沿 60E—120W 作为分界线, 位于大西洋区的正负中心为左场大西洋部分提供有效能量, 而位于太平洋区的正负中心为左场太

平洋部分提供有效能量. 这一现象还有待于进一步分析加以验证. 另外, 左、右场展开时间系数序列的相关系数达到约 0.82, 这比前面已提到的几个类似相关系数略偏低.

## 5 扰动位能与大气动能相关关系的综合分析讨论

从上面扰动位能与高、中、低层大气动能的相关分析结果可以看出, 对于二者耦合相关的主模态而言, 都存在中高纬度与副热带地区的反相变化, 且呈现环状分布, 特别在 200 hPa 图上更为明显. 相比之下, 动能的环状或者纬向对称结构更为规则, 而扰动位能则倾向于存在 3 个活动中心, 即主要位于北美洲南部、西欧以及北太平洋区域, 纬向非对称性增加. 进一步对比扰动位能与 SLP 的 SVD 分析结果可知, 大气质量场的主模态也是呈现中高纬度与副热带之间的反相结构, 这事实上与著名的北极或南极涛动特征一致<sup>[22-26]</sup>, 即呈现半球尺度的纬向环状活动带, 并分别在北大西洋和北太平洋区域存在两个显著的活动中心. 上述分析的意义在于, 如果从大气热力动力角度来看, 热带外地区大气环流主模态特征的形成, 与扰动位能兼具全球尺度纬向对称结构和局地尺度纬向非对称性是密不可分的, 从而为我们从能量有效性角度探讨大气环流变率中的极地涛动问题提供了新视角.

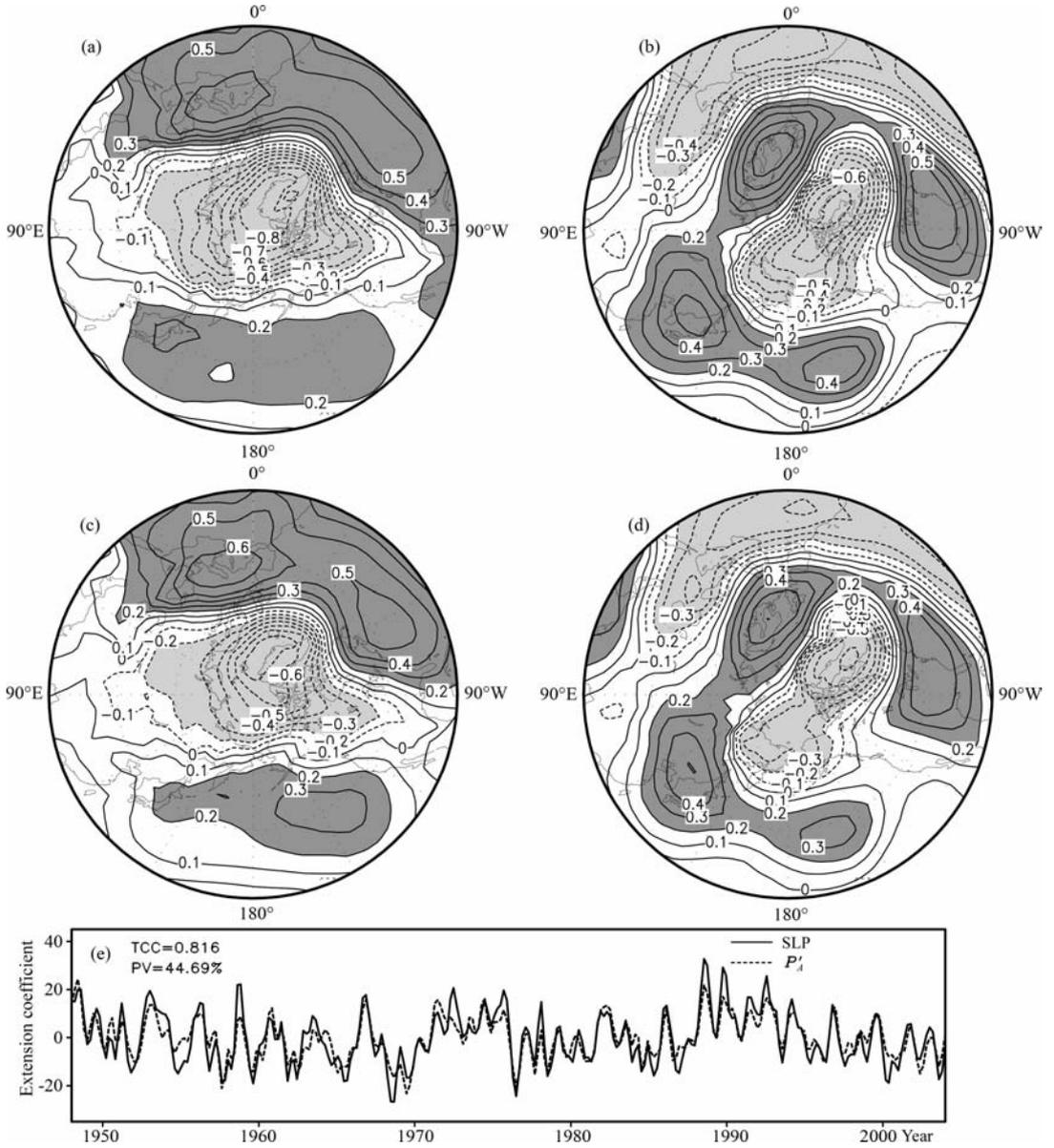


图 4 冬季海平面气压(SLP)为左场、整层局地扰动位能为右场 SVD 第一模态

(a)–(d)等值线间隔 0.1,其他说明同图 1.

Fig. 4 The same as Fig. 1, but for the SLP as the left field, where contour interval is 0.1

一方面,由于扰动位能是整层的,它在与不同层次大气动能之间、以及与 SLP 之间的相关型都表现出相当一致的特征,并且非对称性和局地化明显,这反映出作为直接受热作用影响的能量有效性,可能是极赤温差和海陆热力对比共同作用的结果,前者倾向于形成纬向对称的环状结构,而后者则增加了纬向非对称性.可以设想,在单纯的极赤加热情况下,第一耦合模态应该表现出完全纬向对称的环状分布特征,正因为客观上存在海陆等不规则分布的热力状况,导致实际的耦合模态既具有相对规则的环状特征,也表现出一定程度的纬向非对称性.

另一方面,扰动位能对于大气动能在物理上起

到制造源的作用,这在经典有效位能框架下已有很多研究,通过前面分析不难发现,全球意义下的有效位能是以在局地差别很大的扰动位能形式综合起来发挥作用的.由于本文的分析讨论并未区分扰动位能中的各个分量,而第一阶矩项的全球平均贡献为 0,因此,对全球意义的有效位能起作用的主要是第二阶矩项的扰动位能(可能还有表面扰动位能的贡献<sup>[17]</sup>),那么,考虑到本文主耦合相关型所具有的显著的局地特征来看,第一阶矩项扰动位能必然会对局地 and 全球的大气动能产生重要贡献,此时其对全球意义的动能贡献显然不为 0,当然,这还要考虑到第二阶矩项的贡献问题,有待于分别对这两阶矩项

与动能的 SVD 分析加以证实. 而且, 在同一支配性扰动位能模态作用下, 大气动能在不同层次上表现出略有差异的相关形态, 即随着高度的增加, 动能主要耦合模态的纬向对称性增强.

此外, 一个很值得关注的现象是, 扰动位能的显著正负异常区(这里要注意的是, 异类相关系数图其实与 SVD 的奇异向量空间模态完全一致, 仅在数量上存在差别而已)的 0 线与各层大气动能正负异常区的脊槽线位置似乎存在对应关系. 为此, 如果将整层扰动位能的 0 线叠加在动能的同类、异类相关图上(参见图 1—3)可以看出, 扰动位能主模态的 0 线位置基本上都与动能模态的异常极值中心相对应, 之所以考察 0 线的原因在于, 正的扰动位能异常区很可能对应于外源加热异常, 这使得温度上升、局地位能高于全球平均值, 而负异常区则有可能对应的是外源冷却, 局地位能低于全球平均值. 由此可见, 0 线实质上介于相对的加热和冷却之间, 按照热成风法则, 这里应出现风速的极大值区. 当然, 另一个可以讨论的观点是, 根据动能与局地扰动位能之间的相互转化关系, 当局地扰动位能异常等于零时, 相对转化最为完全, 此时对应着动能异常达到极大.

## 6 中高纬环状模指数与扰动位能的相关分析

对于表征中高纬大气环流变化特征的南北半球环状模指数, 当指数为高值时, 表示副热带高压增强、副极地低压带加深、中纬西风带偏强、呈纬向环流型, 反之, 当指数为低值时, 表示副热带高压减弱、副极地低压带变浅、中纬西风带偏弱、呈经向环流型. 按照前面的分析, 探讨在中高纬环流这一全球尺度变化中局地扰动位能的相关特征, 将是很有意义的. 由于前面 SVD 分析使用的是扰动位能的前两个阶矩之和, 这里将使用 1 月和 7 月资料分别作为冬季和夏季的典型代表月, 针对扰动位能的第一( $P'_{A1}$ )和第二阶( $P'_{A2}$ )矩进行相关分析, 同时也可以为下一步细致的 SVD 场分析提供借鉴.

图 5 和 6 首先给出了冬季代表月的半球环状模指数(NAMI 和 SAMI)分别与  $P'_{A1}$  和  $P'_{A2}$  的相关分布, 可以清楚地看到, 与北半球冬季 NAMI 存在显著相关的扰动位能变化大体呈现纬向对称的环状分布, 而且,  $P'_{A1}$  和  $P'_{A2}$  之间的相关分布在热带外地区正好反相, 这在纬向平均相关曲线图上可以更为直观看到. 对于 SAMI, 情况是类似的, 只不过此时南

半球正处于夏季, 环状分布结构不如北半球清晰, 而且, 扰动位能两个阶矩之间的反相分布特征很明显, 并与各自北半球处于同位相, 这从图 9 的纬向平均相关系数图上也可以清晰看到. 由此可见, 对于北半球热带外而言, 中高纬的纬向环流型对应于副热带偏高的  $P'_{A1}$  和偏低的  $P'_{A2}$ , 以及极地副极地偏低的  $P'_{A1}$  和偏高的  $P'_{A2}$ , 这完全是由热带外地区的扰动温度  $T'$  的异常变化造成的.

图 7 和 8 进一步给出了 7 月份半球环状模指数分别与  $P'_{A1}$  和  $P'_{A2}$  的相关情况. 可以看到, 与 1 月大不相同的是, 北半球中高纬度并未出现强有力的环状相关分布, 仅存在几个孤立的中心, 两阶矩的情况差不多. 南半球的情况要好得多, 不但南极大陆呈现显著相关区, 而且其周边也存在明显的反相相关区, 只不过比 1 月份情况逊色一些, 当然, 这也是值得关注的问题, 因为一般认为冬半年环流比夏半年更为规则, 这里的结果似乎表现出相反情形, 而且, 从图 8 中看到, 无论 NAMI 还是 SAMI 都与  $P'_{A1}$  有比  $P'_{A2}$  更好的相关特征, 特别是前者居然与南半球扰动位能一阶矩项关系好于北半球, 对此我们仍无法给出合理解释, 有待于深入分析研究. 冬季 NAMI 存在显著相关的扰动位能变化大体呈现环状分布, 而且,  $P'_{A1}$  和  $P'_{A2}$  之间的相关分布在热带外地区正好反相, 对于 SAMI 情况是类似的, 这从图 6 的纬向平均相关系数图上也可以清晰看到.

## 7 结 论

本文着眼于局地大气能量有效性研究中扰动位能与大气运动异常的相关关系和机理问题, 采用 SVD 方法分析了扰动位能与高、中、低层大气动能的耦合相关模态以及年际变率情况, 同时也进一步考察了扰动位能与作为大气质量分布的海平面气压之间的相关关系, 并从物理上初步探讨了扰动位能与大气动能以及质量的相关机理问题.

分析表明, 扰动位能自身变率的第一模态同时也是与大气环流异常场耦合变化的主要模态, 与之相对应的大气动能和质量场的主要模态也是其自身变率的支配模态, 这表明可能存在相互制约的物理机制. 而且, 热带外地区大气环流主模态特征的形成, 与扰动位能兼具全球尺度纬向对称结构和局地尺度纬向非对称性是密不可分. 另外, 冬季南北半球环状模指数与扰动位能的前两阶矩存在非常好的相关关系, 而在夏季这种关系明显削弱, 仅存在于南半球.

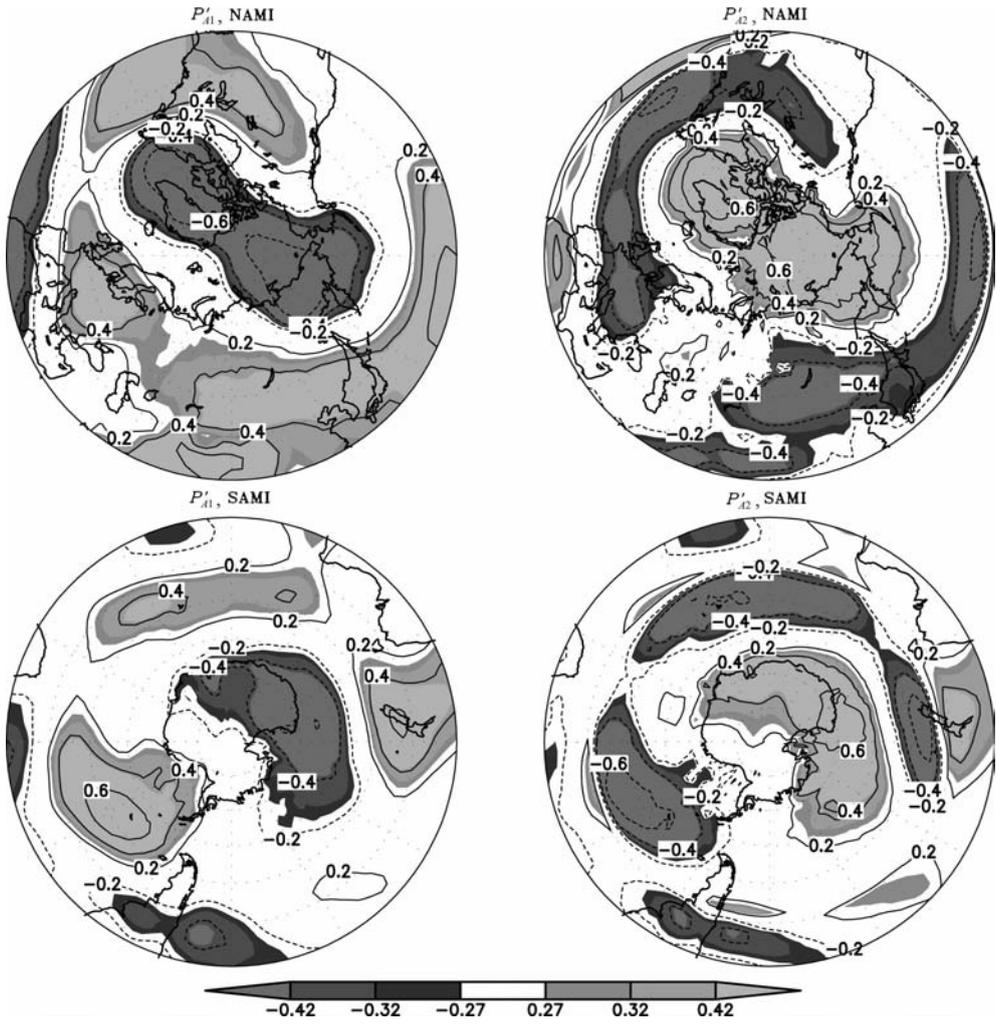


图 5 1 月份半球环状模指数(NAMI 和 SAMI)分别与  $P'_{A1}$  和  $P'_{A2}$  的相关分布

Fig. 5 Correlations between January NAMI/SAMI and  $P'_{A1}/P'_{A2}$

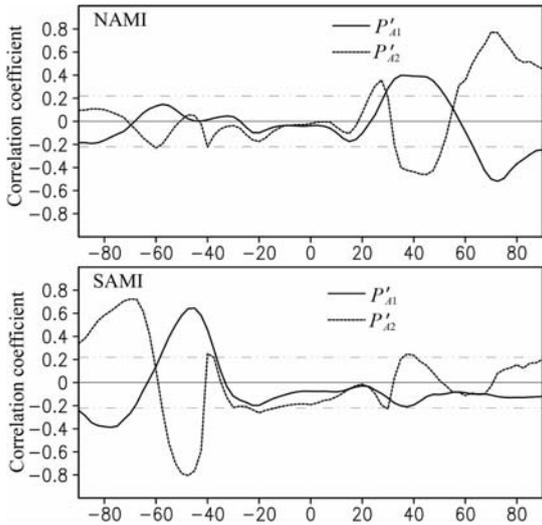


图 6 1 月份半球环状模指数(NAMI 和 SAMI)分别与  $P'_{A1}$  和  $P'_{A2}$  的纬向平均相关系数

Fig. 6 Zonal-mean correlations between January NAMI/SAMI and  $P'_{A1}/P'_{A2}$

当然,这里的分析大部分是以扰动位能整体为主,并未区分各个分量,仅是在考察中高纬环流指数与扰动位能关系时加以考虑,目的是简化过程和突出重点,在进一步的工作中将要分别对前两阶矩项和表面扰动位能进行与大气运动异常的相关机理分析,以期得到更为细致清晰的耦合变化物理图象.此外,鉴于大气湿过程在气候变异中的重要作用<sup>[27-28]</sup>,我们也将关注湿扰动位能的研究.

### 附录 奇异值分解

奇异值分解(SVD)方法在气象研究中已经得到广泛应用.它是从两个场中分离出耦合型的最好的方法之一,既简便,又容易解释,而且不需要用户自定义参数,几乎没有系统误差.其原理及应用在许多文献和教科书中都可在查到,为了便于后文分析,以下对这一方法作一简单介绍.

对任意两个标量场:

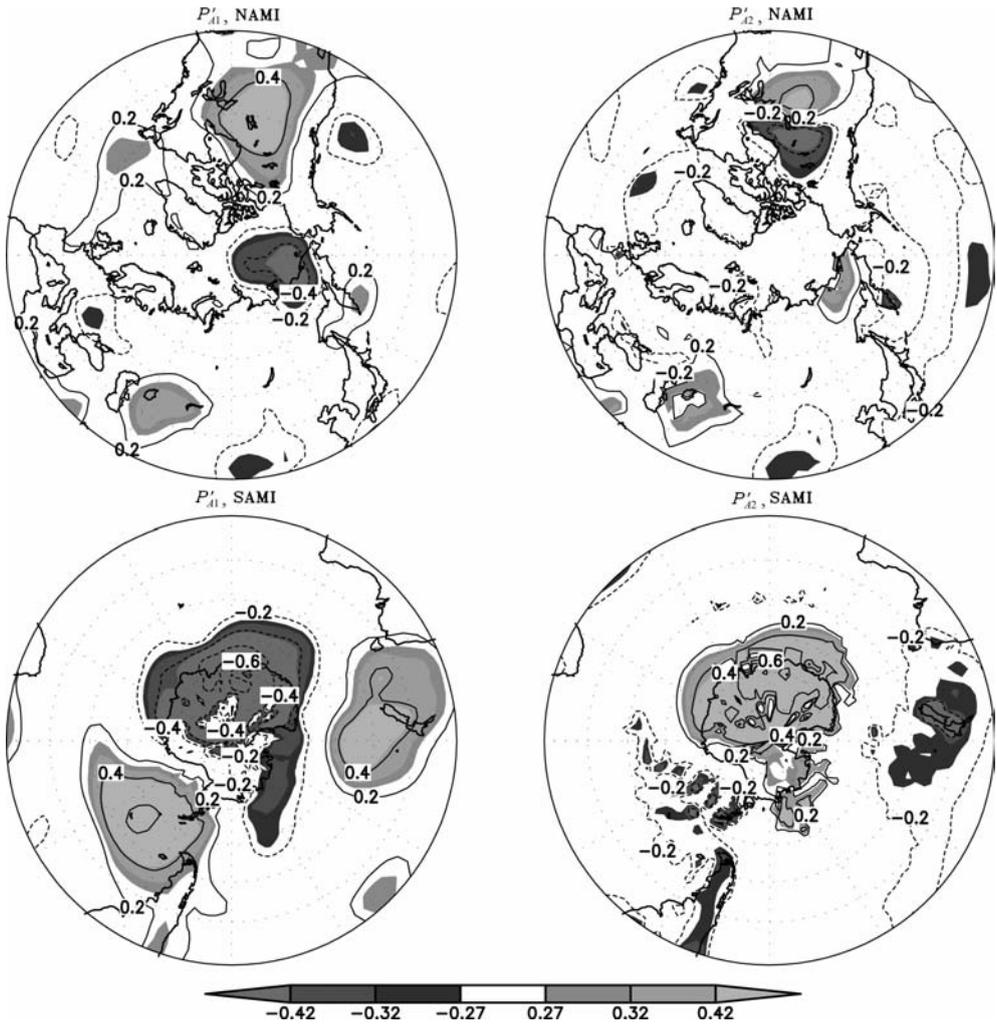


图 7 7 月份半球环状模指数(NAMI 和 SAMI)分别与  $P'_{A1}$  和  $P'_{A2}$  的相关分布

Fig. 7 The same as Fig. 5, but for July

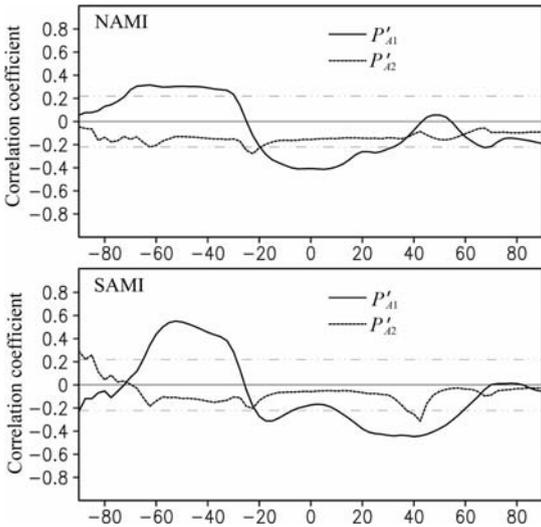


图 8 7 月份半球环状模指数(NAMI 和 SAMI)

分别与  $P'_{A1}$  和  $P'_{A2}$  的纬向平均相关系数

Fig. 8 The same as Fig. 6, but for July

$S_i(t)$  表示  $t$  时刻在第  $i$  空间点上某要素观测值,通常称为左场.  $Z_j(t)$  表示  $t$  时刻在第  $j$  空间点上某要素观测值,通常称为右场. 其中  $i = 1, 2, \dots, N_s; j = 1, 2, \dots, N_z; t = 1, 2, \dots, T$ . 一般的,空间点  $N_s$  可以不等于  $N_z$ .

设两要素场的协方差矩阵为  $C_{SZ}$ ,  $C_{SZ} = S_i(t)Z_j^T(t)$  是一个  $N_s \times N_z$  的实矩阵. 当  $S_i(t)$  与  $Z_j(t)$  为标准资料时,  $C_{SZ}$  又是两要素的相关矩阵.  $C_{SZ}$  的奇异值分解为

$$C_{SZ} = \sum_{k=1}^R \sigma_k p_k q_k^T, R \leq \min(N_s, N_z), \quad (A1)$$

其中  $p_k$  是  $C_{SZ}$  的  $R$  个相互正交的左奇异向量之一,  $q_k$  是  $C_{SZ}$  的  $R$  个相互正交的右奇异向量之一,它们分别表示了左场和右场的空间典型分布.  $\sigma_k$  是  $C_{SZ}$  的奇异值,且有  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_k \geq \dots \geq \sigma_R > 0$ .

根据奇异量的正交性,可以用下式计算出空间典

型分布所对应的时间系数(即展开系数或主成分):

$$a_k(t) = P_k^T S(t) = \sum_{i=1}^{N_S} p_{ki} S_i(t), \quad (\text{A2})$$

$$b_k(t) = Q_k^T Z(t) = \sum_{j=1}^{N_Z} q_{kj} Z_j(t), \quad (\text{A3})$$

$a_k(t)$  和  $b_k(t)$  分别为要素场  $S_i(t)$  和  $Z_j(t)$  的第  $k$  对奇异向量所对应的时间系数,由 SVD 性质易得它们的协方差就是奇异值  $\sigma_k$ , 因此它们之间的相关系数为

$$r_k = \frac{\sigma_k}{\frac{1}{T} \sqrt{\sum_{t=1}^T a_k^2(t) \sum_{t=1}^T b_k^2(t)}}, \quad (\text{A4})$$

第  $k$  对空间典型分布所解释的协方差平方的百分比为

$$\text{SCF}_k = \frac{\sigma_k^2}{\sum_{k=1}^R \sigma_k^2} \times 100\%, \quad (\text{A5})$$

若取前  $N(N \leq R)$  对空间典型分布的话,则所解释的累积协方差平方的百分比为

$$\text{SCF}_k = \frac{\sum_{k=1}^N \sigma_k^2}{\sum_{k=1}^R \sigma_k^2} \times 100\%, \quad (\text{A6})$$

在得到时间系数  $a_k(t)$  和  $b_k(t)$  之后,一般可以直接分析左、右奇异向量,获得两个场之间耦合的空间典型分布型.但是更通常的做法是分析两类相关图,分别称为同类相关图和异类相关图.若令  $r[f(t), g(t)]$  表示两个时间序列  $f(t)$  和  $g(t)$  的相关的话,那么第  $k$  个左(右)同类相关图(分别用向量  $r[S_i(t), a_k(t)]$  和  $r[Z_j(t), b_k(t)]$  表示)是由左(右)场和第  $k$  个左(右)场时间系数求相关得到的.同理,可得到第  $k$  个左异类相关图  $r[S_i(t), b_k(t)]$  和第  $k$  个右异类相关图  $r[Z_j(t), a_k(t)]$ .

对同类相关图而言,第  $k$  对时间系数所解释的各自场的方差百分比分别为

$$\begin{aligned} \text{VFL}_k &= \frac{\sum_{t=1}^T a_k^2(t)}{\sum_{k=1}^R \sum_{t=1}^T a_k^2(t)} \times 100\% \\ &= \frac{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T a_k^2(t)}{N_S} \times 100\%, \end{aligned} \quad (\text{A7})$$

$$\text{VFR}_k = \frac{\sum_{t=1}^T b_k^2(t)}{\sum_{k=1}^R \sum_{t=1}^T b_k^2(t)} \times 100\%$$

$$= \frac{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T b_k^2(t)}{N_Z} \times 100\%, \quad (\text{A8})$$

若取  $N$  对时间系数的话,则它们所解释的各自场的累积方差的百分比为

$$\begin{aligned} \text{VFL}_N &= \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{t=1}^T a_k^2(t)}{\sum_{k=1}^R \sum_{t=1}^T a_k^2(t)} \times 100\% \\ &= \frac{\sum_{k=1}^N \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T a_k^2(t)}{N_S} \times 100\%, \end{aligned} \quad (\text{A9})$$

$$\begin{aligned} \text{VFR}_N &= \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{t=1}^T b_k^2(t)}{\sum_{k=1}^R \sum_{t=1}^T b_k^2(t)} \times 100\% \\ &= \frac{\sum_{k=1}^N \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T b_k^2(t)}{N_Z} \times 100\%. \end{aligned} \quad (\text{A10})$$

对异类相关而言,第  $k$  对时间系数所解释的各自场的方差百分比分别为

$$\text{VFL}_k = \frac{\sum_{i=1}^{N_S} r^2[b_k(t), S_i(t)]}{N_S} \times 100\%, \quad (\text{A11})$$

$$\text{VFR}_k = \frac{\sum_{j=1}^{N_Z} r^2[a_k(t), Z_j(t)]}{N_Z} \times 100\%. \quad (\text{A12})$$

若取  $N$  对时间系数的话,则它们所解释的各自场的累积方差的百分比为

$$\text{VFL}_N = \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{N_S} r^2[b_k(t), S_i(t)]}{N_S} \times 100\%, \quad (\text{A13})$$

$$\text{VFR}_N = \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{N_Z} r^2[a_k(t), Z_j(t)]}{N_Z} \times 100\%, \quad (\text{A14})$$

值得注意的是,在求这两类相关图时,左场和右场也可以不拘泥于 SVD 分析时各自选取的空间点数,范围可以扩大.一般而言,同类相关图与所对应的奇异向量不成比例,而异类相关图与所对应的奇异向量成正比例,但同类相关图可以很好地反映时间系数所对应的空间型的极性和振幅,而异类相关图反映的是在已知一个场的空间分布型的情况下,其所对应的时间系数表示另一个场的空间分布型的好坏程度.可以预计,异类相关一般比同类相关要弱,但倘若两者之间差异显著的话,从一定程度上也可以用来揭示两个场的因果关系.

## 参考文献(References)

- [1] Lorenz E N. The Nature and Theory of the General Circulation of the Atmosphere. Geneva: World Meteorological Organization Publication, 1967: 97-107.
- [2] 杨大升, 刘余滨, 刘式适. 动力气象学. 北京: 气象出版社, 1983: 303-304.  
Yang D S, Liu Y B, Liu S S. Dynamical Meteorology (in Chinese). Beijing, Beijing Meteorological Press, 1983: 303-304.
- [3] Peixoto J P, Oort A H. Physics of Climate. New York: Springer-Verlag, American Institute of Physics Press, 1992: 520.
- [4] Zhang P Q, Yang S, Kousky V E. South Asian high and Asian-Pacific-American climate teleconnection. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2005, 22(6): 915-923.
- [5] 廖清海, 陶诗言, 王会军. 东亚地区夏季7~8月大气环流季节演变异常的内部动力学过程. 地球物理学报, 2006, 49(1): 28-36.  
Liao Q H, Tao S Y, Wang H J. Internal dynamics related to anomalies of seasonal evolution of summer circulations in East Asia during July-August. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(1): 28-36.
- [6] 赵平, 蒋品平, 周秀骥等. 春季东亚海-陆热力差异对我国东部西南风降水影响数值试验. 科学通报, 2009, 54(16): 2372-2378.  
Zhao P, Jiang P P, Zhou X J, et al. Modeling impacts of East Asian ocean-land thermal contrast on spring southwesterly winds and rainfall in eastern China. *Chinese Sci. Bull.*, 2009, 54(24), 4733-4741, doi: 10. 1007/s11434-009-0229-9.
- [7] Lorenz E N. Available potential energy and the maintenance of the general circulation. *Tellus*, 1955, 7(2): 157-167.
- [8] Dutton J A, Johnson D R. The theory of available potential energy and a variational approach to atmospheric energetics. *Advances in Geophysics*, 1967, 12: 333-436.
- [9] Boer G J. Zonal and eddy forms of the available potential energy equations in pressure coordinates. *Tellus*, 1975, 27(5): 433-442.
- [10] Lorenz E N. Available energy and the maintenance of a moist circulation. *Tellus*, 1978, 30(1): 15-31.
- [11] Taylor K E. Formulas for calculating available potential energy over uneven topography. *Tellus*, 1979, 31(3): 236-245.
- [12] Oort A H, Asher S C, Levitus S, et al. New estimates of the available potential energy in the world ocean. *J. Geophys. Res.*, 1989, 94(C3): 3187-3200.
- [13] Shepherd T G. A unified theory of available potential energy. *Atmosphere-Ocean*, 1993, 31(1): 1-26.
- [14] Winn-Nielsen A, Chen T-C. Fundamentals of Atmospheric Energetics. New York: Oxford University Press, 1993: 376.
- [15] Siegmund P. The generation of available potential energy, according to Lorenz' exact and approximate equations. *Tellus*, 1994, 46A(5): 566-582.
- [16] Huang R X. Available potential energy in the world's oceans. *J. Mar. Res.*, 2005, 63(1): 141-158.
- [17] 高丽. 扰动位能的理论研究和诊断分析[博士论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006: 138.  
Gao L. Theoretical studies and diagnostic analyses of perturbation potential energy [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2006: 138.
- [18] 李建平, 高丽. 扰动位能理论及其应用——扰动位能的概念、表达及其时空结构. 大气科学, 2006, 30(5): 834-848.  
Li J P, Gao L. Theory on perturbation potential energy and its applications-concept, expression and spatio-temporal structures of perturbation potential energy. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, 30(5): 834-848.
- [19] 高丽, 李建平, 任宏利. 绝热大气过程的若干性质. 自然科学进展, 2006, 16(2): 243-247.  
Gao L, Li J P, Ren H L. Some characteristics of the atmosphere during an adiabatic process. *Progress in Natural Science*, 2006, 16(6): 644-648.
- [20] 高丽, 李建平. 局地大气能量有效性中的表面扰动位能特征. 气象学报, 2011, 69(4): 664-671.  
Gao L, Li J P. Characteristics of the surface perturbation potential energy in the local atmospheric energetic efficiency. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2011, 69(4): 664-671.
- [21] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, 77(3): 437-471.
- [22] Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25(9): 1297-1300.
- [23] Thompson D W J, Wallace J M. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *J. Climate*, 2000, 13(5): 1000-1016.
- [24] 龚道溢, 王绍武. 南极涛动. 科学通报, 1998, 43(3): 296-301.  
Gong D Y, Wang S W. Antarctic oscillation: concept and application. *Chinese Sci. Bull.*, 1998, 43(9): 734-738.
- [25] Gong D Y, Wang S W. Definition of antarctic oscillation index. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, 26(4): 459-462.
- [26] Li J P, Wang J X L. A modified zonal index and its physical sense. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, 30(12): 1632, doi: 10. 1029/2003GL017441.
- [27] 平凡, 罗哲贤. 热带对流热量与水汽收支的数值模拟研究. 地球物理学报, 2007, 50(5) 1351-1361.  
Ping F, Luo Z X. The numerical simulated study of convective heat and moisture budget in the tropical. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(5): 1351-1361.
- [28] 左金清, 任宏利, 李维京等. 我国南方夏季低频雨型的季节内水汽输送特征. 地球物理学报, 2009, 52(9): 2210-2221.  
Zuo J Q, Ren H L, Li W J, et al. Intraseasonal characteristics of the water vapor transport associated with the low-frequency rainfall regimes over Southern China in summer. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(9): 2210-2221.