

北半球大气环流主模态时空分析

刘甜甜^{1,2*}, 王新³

¹山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东 济南

²泰安市气象局, 山东 泰安

³93161部队, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2023年7月20日; 录用日期: 2023年8月21日; 发布日期: 2023年8月29日

摘要

利用1948~2015年的NCEP/NCAR资料全球月平均再分析资料作经验正交分解(EOF), 获得北极涛动指数(AOI)和北极偶极子指数(DAI)并对EOF分析后的时间序列进行回归分析。我们主要总结极地涡旋的四个方面, 包括极地涡旋指数(极涡面积指数和极涡强度指数), 其变化特征, 以及对中国冬季气候的影响和极地涡旋影响因子。极地涡旋主要具有年际和年代际变化特征。此外, 在年际时间尺度上, 极地涡流区域在中国的温度和降水之间呈负相关, 在年代际时间尺度上, 极地涡流面积和中国温度呈现负相关。

关键词

极涡面积指数, 极涡强度指数, 气候

Spatio-Temporal Analysis of Main Modes of Atmospheric Circulation in the Northern Hemisphere

Tiantian Liu^{1,2*}, Xin Wang³

¹Key Laboratory Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong Province, Jinan Shandong

²Tai'an Meteorological Office, Tai'an Shandong

³93161 Army, Shenyang Liaoning

Received: Jul. 20th, 2023; accepted: Aug. 21st, 2023; published: Aug. 29th, 2023

Abstract

Based on the monthly mean reanalysis data of NCEP/NCAR data from 1948 to 2015, through the

*通讯作者。

文章引用: 刘甜甜, 王新. 北半球大气环流主模态时空分析[J]. 环境保护前沿, 2023, 13(4): 1041-1052.

DOI: 10.12677/aep.2023.134126

Empirical Orthogonal Function (EOF), the AO index and DA index were obtained and the time series after EOF analysis were analyzed. We mainly summarize four aspects of the polar vortex, concluding the polar vortex index (PVA and PVI), its variation characteristics, its impact on the winter climate in China and the polar vortex impact factors. Polar vortex mainly has interannual and interdecadal variation characteristics. Besides, in interannual timescale, the polar vortex area demonstrates a negative correlation between temperature and precipitation in China, and in interdecadal timescale, polar vortex area and the temperature in China show a negative correlation.

Keywords

Polar Vortex Area Index, Polar Vortex Intensity Index, Climate

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

北极作为地球的“冷源”，为全球的热量平衡扮演着十分重要的角色，特别在全球变暖背景下对气候的异常起着放大器的作用。近十几年来极端天气的不断上演，北极海冰的快速减少，因此对其研究有助于对未来气候进行预测。Thompson and Wallace 使用经验正交分解(EOF)将 20°N 以北海平面气压(SLP)分解，将 EOF 第一模态被定义为北极涛动(AO)，其中 AO 的时间序列被称为北极涛动指数(AOI) (Thompson and Wallace, 1998) [1]。北极涛动(AO)指北半球中纬度地区(约 45°N)与北极地区气压形势差别的变化。它是一个代表北极地区大气环流的重要气候指数，可分为正位相和负位相。EOF 分解后的第二模态称为北极偶极子(DA)，其主要表现为 70°N 以北表现为偶极子，其时间指数为北极偶极子指数(DAI)。DA 正位像表现为加拿大群岛附近为正异常，巴伦支海为负异常。AO 通过对北半球阻高形势的控制影响着北半球大部分地区的极端天气事件，影响西伯利亚高压和东亚季风从而对我国造成影响(Wang and Wu, 2001) [2]。DA 对北极海冰的运动有很大影响(Wang and Zhang, 2009; 樊婷婷和黄菲, 2012) [3] [4]。

综上所述，AO 和 DA 对北极及中高纬度有着不一样的影响。需要综合考虑两者的影响，有助与我们进一步了解大气环流变化及其产生的影响。

2. 资料和方法

本文主要采用美国 NCEP/NCAR 全球月平均再分析资料海平面气压场、850 hPa、500 hPa 和 300 hPa 位势高度场、950 hPa 温度场资料，水平分辨率 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ，时段为 1948~2015 年。Serreze [5] (2011)指出 925 hPa 的温度可以更好的反映出 2 m 的温度，因此本文使用 925 hPa 的温度来表示地表温度。

文中使用的方法主要是 EOF 分析，EOF 分析主要是对海平面气压场进行分析，从而获得 AO 指数和 DA 指数并对 EOF 分析后的时间序列进行回归分析和 5 点平滑。使用 SEOF 分析(Wang 和 An, 2005) [6]，获得 AO 的季节变化。合成分析是对不同特征指数年份各气象要素进行分析。学生 t 检验被用于相关性分析、回归分析和合成分析的检验，文中采用 95%和 99%两种置信度。

根据气候平均态下 SLP 的时空分布特征，本文给出新的相对客观的适应于中高纬度的季节划分(春：4~5 月(AM)，夏：6~9 月(JJAS)，秋：10~11 月(ON)，冬：12~次年 1~3 月(DJFM))。

3. 北极大气环流主模态的季节演变

为提取出大气环流主模态的季节演变特征, 本文使用前文论述的季节分类方法对原始 SLP 场进行 SEOF 分析(图 1)。SEOF 分解按照冬春夏秋的顺序进行分解, 对 67 年 804 个月(67×12)原始 SLP 数据进行季节平均并获得距平场, 1 年 4 季共 67 年(67×4)。对 67 年的 SLP 距平场进行 EOF 分析得到前两个模态, 其累计方差为 63.4%, 其中第一模态方差贡献率为 53.03%, 第二模态方差贡献率为 10.37%。可以看出第一模态的两个活动中心分别位于大西洋和太平洋, 一个闭合中心位于北极中心, 正位相时会有 1 个

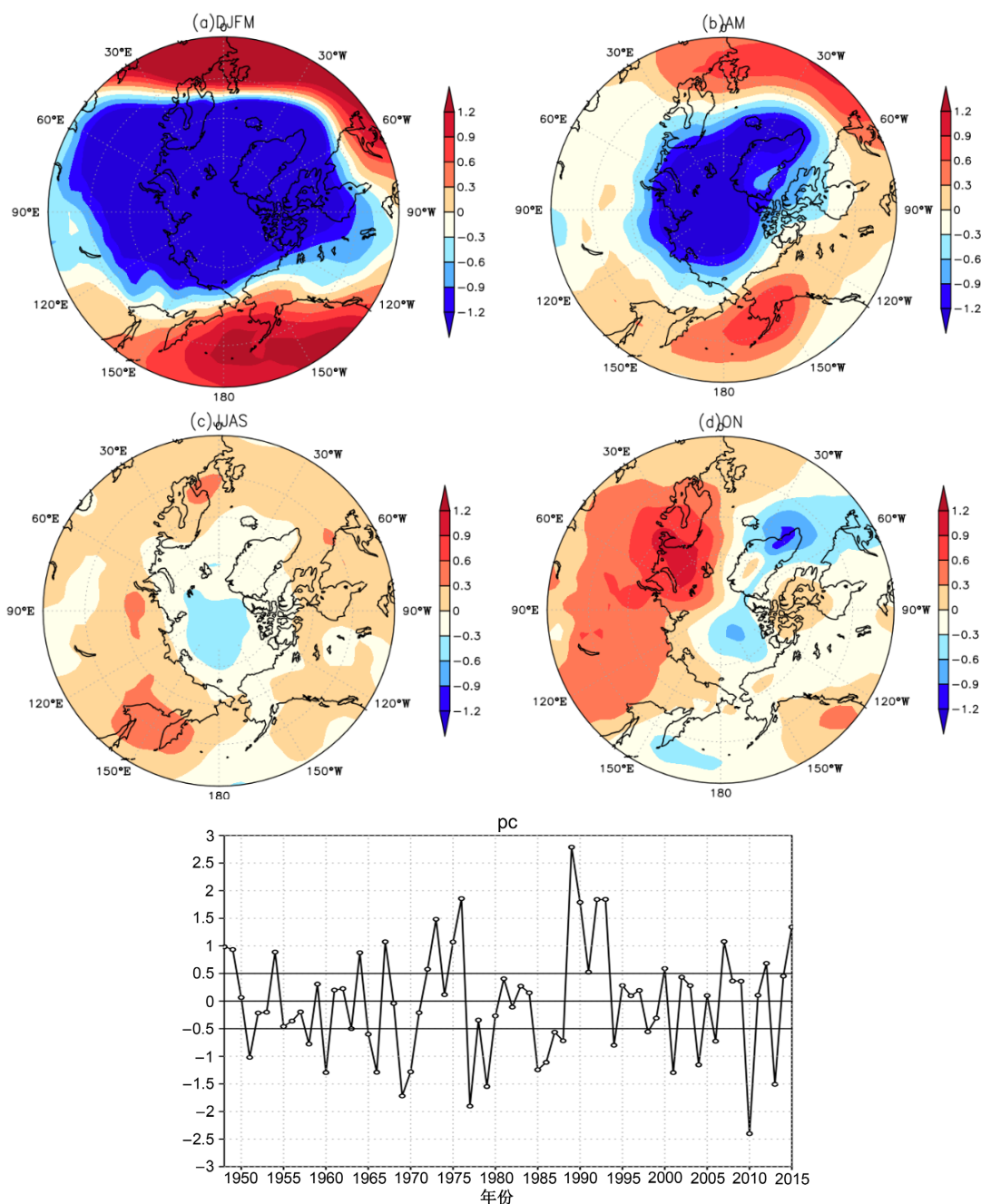
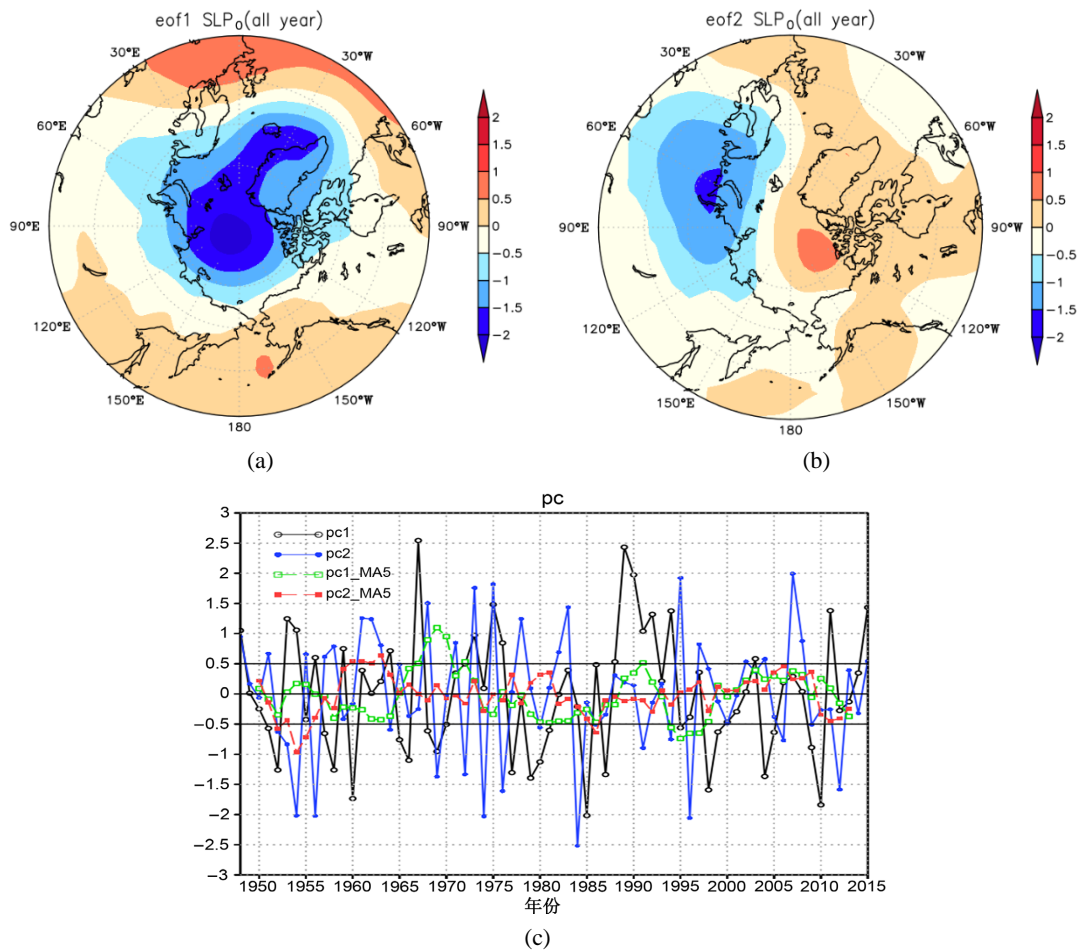


Figure 1. Spatial and temporal distribution of the first mode of Arctic sea level pressure SEOF from 1948 to 2015 (unit: hPa)
图 1. 1948~2015 年北极海平面气压 SEOF 第一模态时空分布(单位: hPa)

气旋式风异常, 相反, 对于 AO 负位相, 会有反气旋式风异常(图 2(a))。而对于 EOF 第二模态(DA)表现的主要是东西分布呈跷跷板式, 正位相时, 加拿大群岛附近为正异常, 新地岛附近为负异常, 有由西向东的风异常。负位相时, 加拿大群岛附近为负异常, 新地岛附近为正异常, 有由东向西的风异常(图 2(b))。DA 的出现会导致经向风异常, 因此 DA 的变化对海冰的离极输运有很大的影响(Wang and Zhang, 2009; 樊婷婷和黄菲, 2012) [3] [4]。



(a) 第一模态: AO; (b) 第二模态: DA; (c) 时间序列 PC1 表示 AO 时间序列(黑色实线), PC2 表示 DA 时间序列(蓝色实线), PC1_MA5 表示 AO 时间序列的 5 点平滑(绿色虚线), PC2_MA5 表示 DA 时间序列的 5 点平滑(红色虚线)

Figure 2. Space-time distribution of the first two modes of the Arctic SLP anomaly field EOF decomposition
图 2. 北极 SLP 距平场 EOF 分解前两个模态时空分布

分析时间场, 从图 2(c)中可以明显的看出 AO 的变化随着季节的演变其位相和振幅都发生变化, 其中冬季最强, 夏季最弱。其时间序列在 1948~2015 这 67 年来有着明显的年代际和年际变化特征。在 1985 年以前, 时间序列变化振幅较小, 直到 20 世纪 80 年代中期有所上升但不明显, 之后一直处于下降趋势, 这与全球变暖的大背景下, 极涡变化相符合。对 AOI 和 DAI 进行分析, 以 ± 0.5 为阈值, 超过+0.5的为强指数年, 低于-0.5的为弱指数年, 分别对各指数强年和弱年进行合成分析可以看出同 EOF 分解产生的空间模态相似。

使用第一模态的时间系数进行回归, 我们可以发现北极涛动呈现的跷跷板现象越来越明显, SLP 主要呈现北极中心主要为负异常(图 3(a)), 在北大西洋和北太平洋表现为正异常, 这种空间分布和 Zhao (2006)对 SLP 与 AOI 相关系数场分布相似, 但其未表现出北太平洋的正异常中心, 可能是因为相关系数

只画出了大于 0.5 的值, 而北太平洋异常中心相关系数与 AOI 相关性较小, 因此未变现出来(详见 Zhao, 2006 Fig. 1) [7]。850 hPa、500 hPa 和 300 hPa 均和 SLP 相似, 也反映了 AO 是准正压结构(图 3)。温度场主要表现为欧亚大陆为正异常中心, 戴维斯海峡为负异常中心。

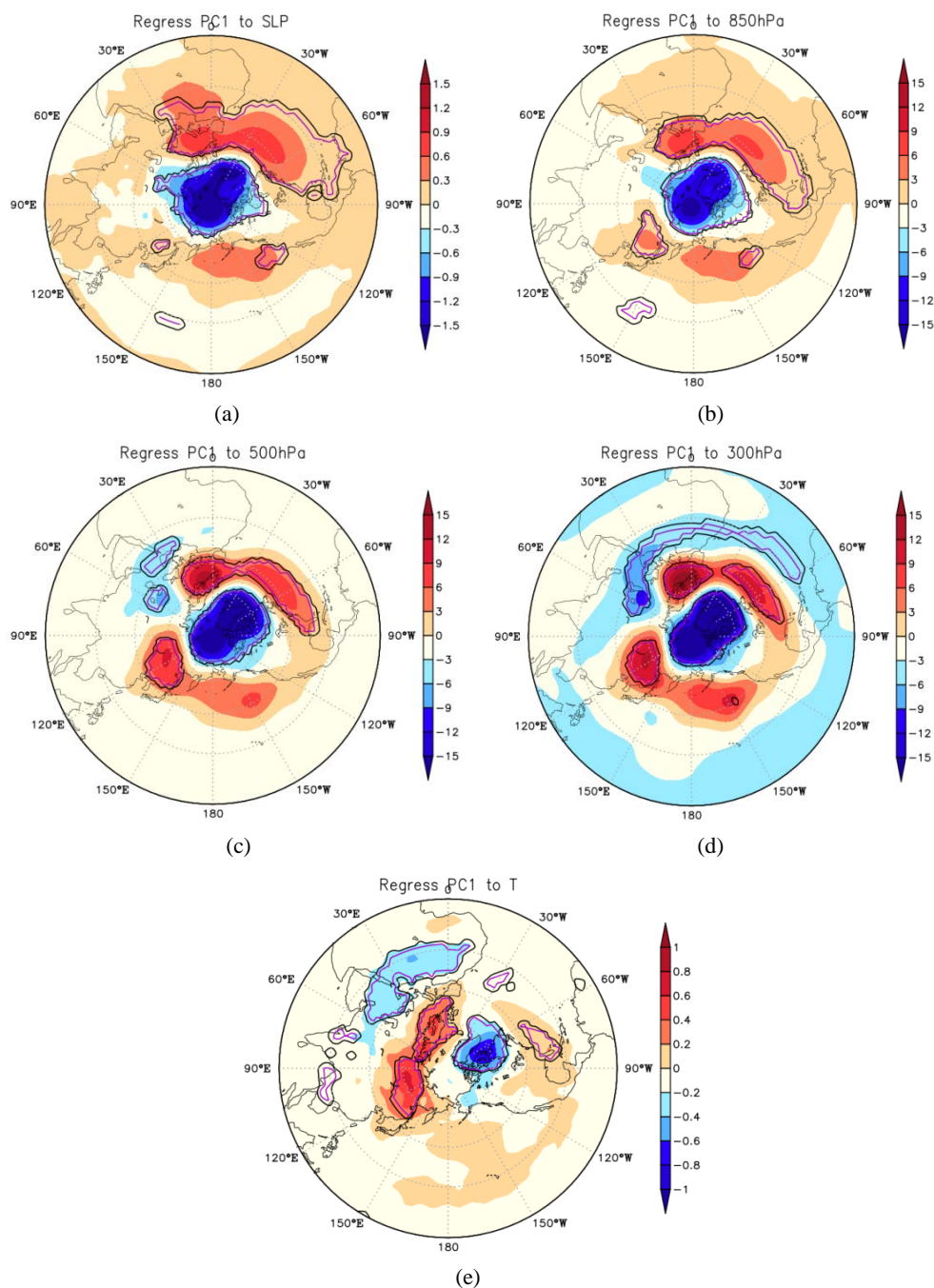


Figure 3. Sea level air pressure (a), 850 hPa (b), 500 hPa (c), 300 hPa (d) and 925 hPa temperature (e) obtained from regression analysis of AO time coefficient. (The black line in the figure indicates passing the test with a confidence level of 95%, and the purple line area indicates passing the 99% test) Unit: (a) hPa, (b) potential meter, (c) potential meter, (d) Potential m, (e) °C

图 3. AO 时间系数回归分析得到的海平面气压(a)、850 hPa (b)、500 hPa (c)、300 hPa (d)和 925 hPa 温度(e)。 (图中黑色线内表示通过置信度为 95% 的检验, 紫色线区域表示通过 99% 的检验)单位: (a) hPa、(b) 位势米、(c) 位势米、(d) 位势米、(e) °C

使用第二模态的时间系数进行回归, 在 SLP 和 850 hPa 中, 我们可以发现东西分布的跷跷板现象, 但是正异常分布不明显。在 500 hPa 和 300 hPa 中, 东西分布的跷跷板现象依旧存在, 同时正异常中心开始扩大, 从各层可以看出 DA 也表现为准正压结构。有意思的是在贝加尔湖以北有正异常值中心, 其变化可能影响冬季对流层中层的环流模式, 使西伯利亚高压减弱, 但使用的是年 DAI 指数这种现象出现的具体季节还不明显, 因此有待商榷。对于 925 hPa 的气温, 我们可以看出主要影响区域是在西伯利亚地区, 同上面 500 hPa 和 300 hPa 的异常场可能相关。

4. AO 和 DA 共同作用下北极大气环流模态

建立在两种指数标准化时间序列上, 可以将不同指数类型年分为 9 类(表 1)。这些不同类型指数年表示, 两个指数是否具有相同的变化, 或者一个指数变化强, 一个变化弱。不同指数年所对应的大气环流和气温也有所不同。这样有助于使我们了解不同北极指数出现的情况下, 大气环流和温度的变化情况。表中我们可以看出 AOI 指数和 DAI 指数均强或均弱的年主要集中在 1979 年前, 这可能跟 1979 年前 NCEP/NCAR 数据不够精确有关。

Table 1. The same type of index year

表 1. 同类型指数年

	个数	年份
AOI ≥ 0.5 & DAI ≥ 0.5	4	1948, 1973, 1975, 2015
AOI ≤ -0.5 & DAI ≤ -0.5	4	1952, 1969, 1980, 2009
AOI ~ 0 & DAI ≥ 0.5	12	1955, 1961, 1962, 1963, 1971, 1978, 1982, 1983, 1997, 2002, 2007, 2008
AOI ~ 0 & DAI ≤ -0.5	7	1972, 1974, 1984, 1986, 1996, 2006, 2012
AOI ≥ 0.5 & DAI ~ 0	8	1959, 1967, 1988, 1989, 1990, 1992, 2003, 2011
AOI ≤ -0.5 & DAI ~ 0	13	1960, 1965, 1966, 1970, 1977, 1979, 1981, 1985, 1987, 1998, 1999, 2005, 2010
AOI ≥ 0.5 & DAI ≤ -0.5	7	1953, 1954, 1956, 1964, 1976, 1991, 1994
AOI ≤ -0.5 & DAI ≥ 0.5	6	1951, 1957, 1958, 1968, 1995, 2004
AOI ~ 0 & DAI ~ 0	7	1949, 1950, 1993, 2000, 2001, 2013, 2014

合成两种指数均强年和均弱年((AOI ≥ 0.5 & DAI ≥ 0.5) - (AOI ≤ -0.5 & DAI ≤ -0.5)), 在 SLP 场中表现出与回归分析相似的情况(图 3(a)), 主要表现在极区为负异常中心, 在北大西洋和太平洋上的为正异常中心, 北大西洋的正异常可能与 NAO 有关, 而太平洋上正异常中心会使阿留申低压减弱(图 4(a))。在 850 hPa 呈现出与 SLP 相似的情况, 但是强度和范围均有所减弱(未给出)。在 500 hPa 上, 我们看到极区主要还是一个负值中心, 但是在亚洲东部、北美洲东部和欧洲西部均表现为正异常中心, 与冬季三槽位置相近(图 4(b))。300 hPa 同 500 hPa 相似, 只是各中心值有所增强(未给出)。200 hPa u 风场负异常中心同 500 hPa 三个正异常中心位置相似, 表现为东风异常(图 4(d))。温度场也主要表现为亚洲大陆为正异

常, 戴维斯海峡处为负异常(图 4(c)), 与 AOI 对温度的回归结果相似(图 3(e))。因此, 这种指数形态下主要表现的是 AO 环流模态。

合成 A0 强指数年和弱指数年((AOI ≥ 0.5 & DAI ~ 0) - (AOI ≤ -0.5 & DAI ~ 0)), 在 SLP 场中, 主要表现在极区为负异常中心, 在北大西洋和太平洋上的为正异常中心(图 5(a))。在 850 hPa 呈现出与 SLP 相似的情况, 但是强度和范围均有所减弱(未给出)。在 500 hPa 上, 但是在亚洲东部、北美洲东部和欧洲西部均表现为正异常中心(图 5(b))。300 hPa 同 500 hPa 相似, 只是各中心值有所增强(未给出)。200 hPa 纬向风场, 在中纬度亚洲大陆东部负异常中心为亚洲东部、北美洲东部和欧洲西部, 但亚洲东部西风比较弱。在 22.5°N 东风异常加强(图 5(d))。温度场也主要表现为亚洲大陆为正异常, 戴维斯海峡处为负异常(图 5(d)), 与图 4(c)相似。这种指数形态下主要表现的是 AO 环流模态, 但各环流场表现情况均比较弱。

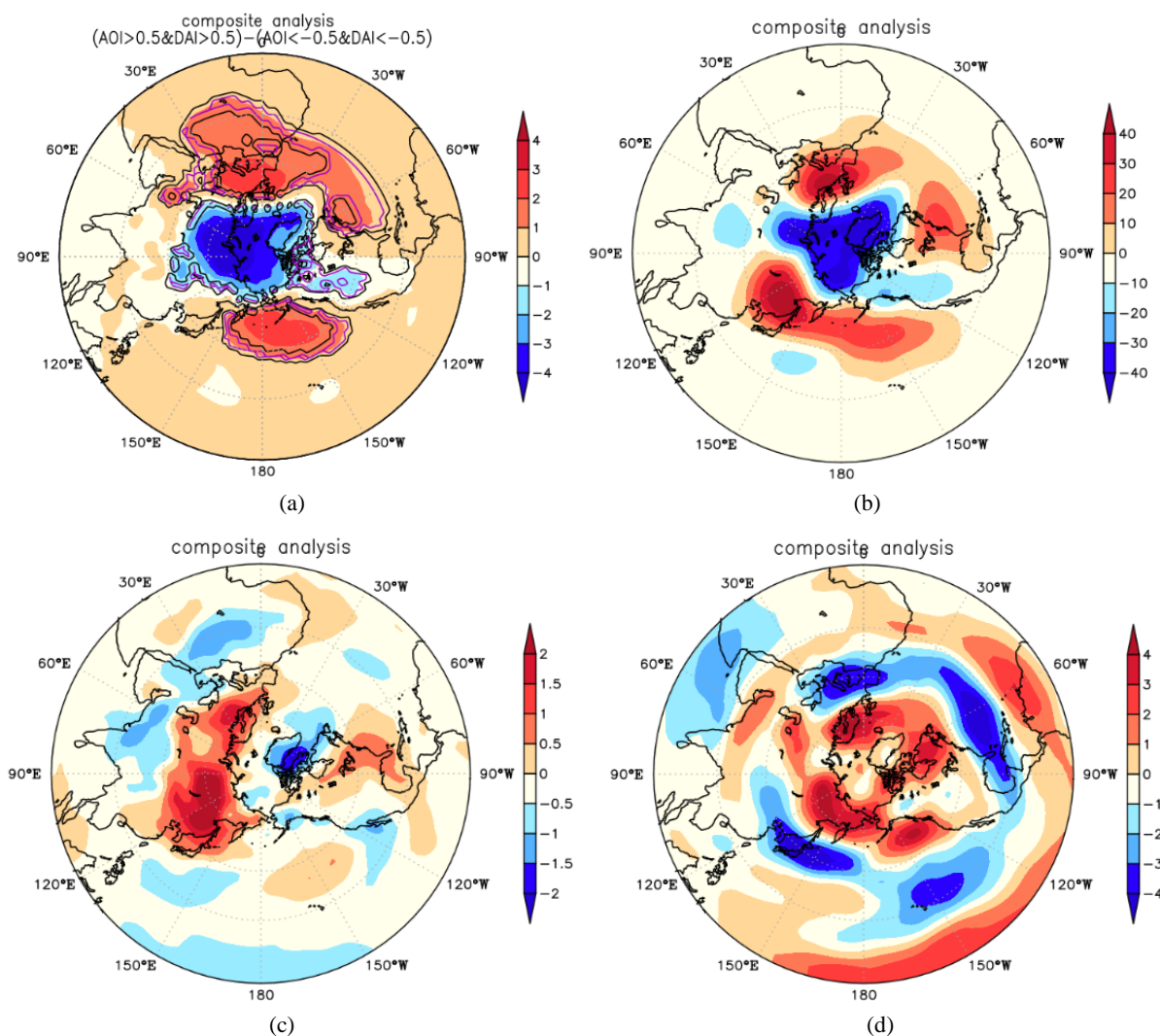


Figure 4. Synthetic analysis ((AOI ≥ 0.5 & DAI ≥ 0.5) - (AOI ≤ -0.5 & DAI ≤ -0.5)), SLP (a), 500 hPa (b), 925 hPa temperature (c) and 200 hPa u wind field (d). (The black line in the figure indicates passing the test with a confidence level of 95%, and the purple line area indicates passing the 99% test) Unit: (a) hPa, (b) potential meter, (c) °C, (d) m/s^{-1}

图 4. 合成分析((AOI ≥ 0.5 & DAI ≥ 0.5) - (AOI ≤ -0.5 & DAI ≤ -0.5)), SLP (a)、500 hPa (b)、925 hPa 温度(c)和 200 hPa u 风场(d)。 (图中黑色线内表示通过置信度为 95% 的检验, 紫色线区域表示通过 99% 的检验) 单位: (a) hPa、(b) 位势米、(c) °C、(d) m/s^{-1}

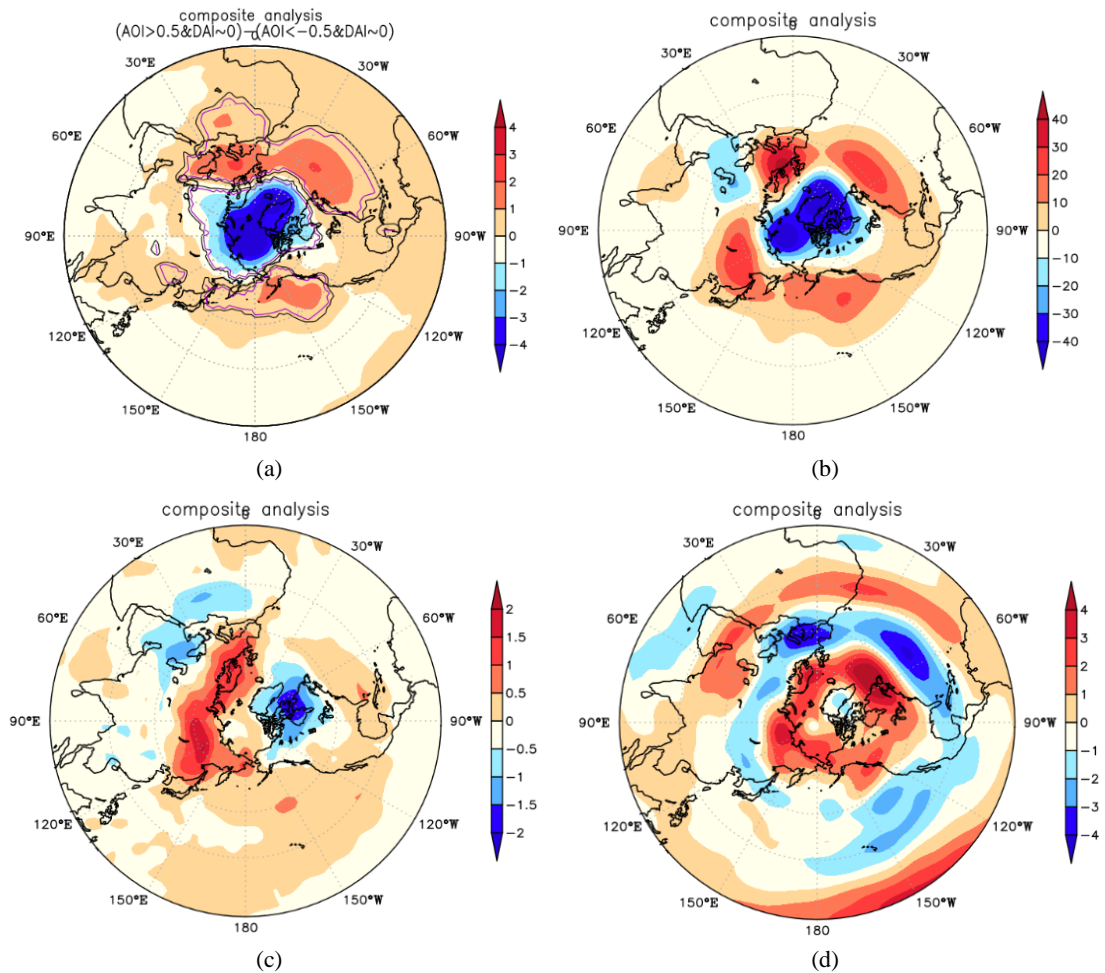


Figure 5. Synthetic analysis ((AOI~0 & DAI \geq 0.5) - (AOI~0 & DAI \leq -0.5)), SLP (a), 500 hPa (b), 925 hPa temperature (c) and 200 hPa u wind field (d). (The black line in the figure indicates passing the test with a confidence level of 95%, and the purple line area indicates passing the 99% test) Unit: (a) hPa, (b) potential meter, (c) $^{\circ}$ C, (d) m/s^{-1}

图 5. 合成分析((AOI~0 & DAI \geq 0.5) - (AOI~0 & DAI \leq -0.5)), SLP (a)、500 hPa (b)、925 hPa 温度(c)和 200 hPa u 风场(d)。 (图中黑色线内表示通过置信度为 95% 的检验, 紫色线区域表示通过 99% 的检验) 单位: (a) hPa、(b) 位势米、(c) $^{\circ}$ C、(d) m/s^{-1}

合成 DA 强指数年和弱指数年((AOI~0 & DAI \geq 0.5) - (AOI~0 & DAI \leq -0.5)), 在 SLP 场中表现出与回归分析相似的情况(图 6(a)), 主要表现在巴伦支海为负异常中心, 在加拿大群岛为正异常中心(图 7(a))。在 850 hPa 呈现出与 SLP 相似的情况, 但是强度和范围均有所减弱(未给出)。在 500 hPa 上, 呈现出与 SLP 相似的情况, 但在贝加尔湖处产生正异常中心, 北美大陆东部产生负异常中心(图 7(b))。300 hPa 同 500 hPa 相似, 只是各中心值有所增强(未给出)。200 hPa u 风场, 在中纬度亚洲大陆东部负异常中心, 西风带风速加强。在 22.5 $^{\circ}$ N 东风异常加强(图 7(d))。温度场也主要表现为亚洲大陆为正异常, 戴维斯海峡处为负异常(图 7(c)), 与图 4(c)相似。这种指数形态下主要表现为 DA 环流模态。

合成 DA 与 AO 相反指数变化年((AOI~0 & DAI \geq 0.5) - (AOI~0 & DAI \leq -0.5)), 在 SLP 场中, 主要表现在极区为负异常中心, 在北太平洋和贝加尔湖北部为正异常中心(图 7(a))。在 850 hPa 呈现出与 SLP 相似的情况, 但是强度和范围均有所减弱(未给出)。在 500 hPa 上, 呈现出与 SLP 相似的情况, 但范围和强度均有所扩大(图 7(b))。300 hPa 同 500 hPa 相似, 只是各中心值有所增强(未给出)。200 hPa u 风场, 在中纬度亚洲大陆东部负异常中心, 西风带风速加强。在 22.5 $^{\circ}$ N 东风异常加强(图 8(d))。温度场也主要表现为亚洲大

陆为正异常, 戴维斯海峡处为负异常(图 8(c)), 与图 4(c)相似。这种指数形态下主要表现的是 DA 环流模态。

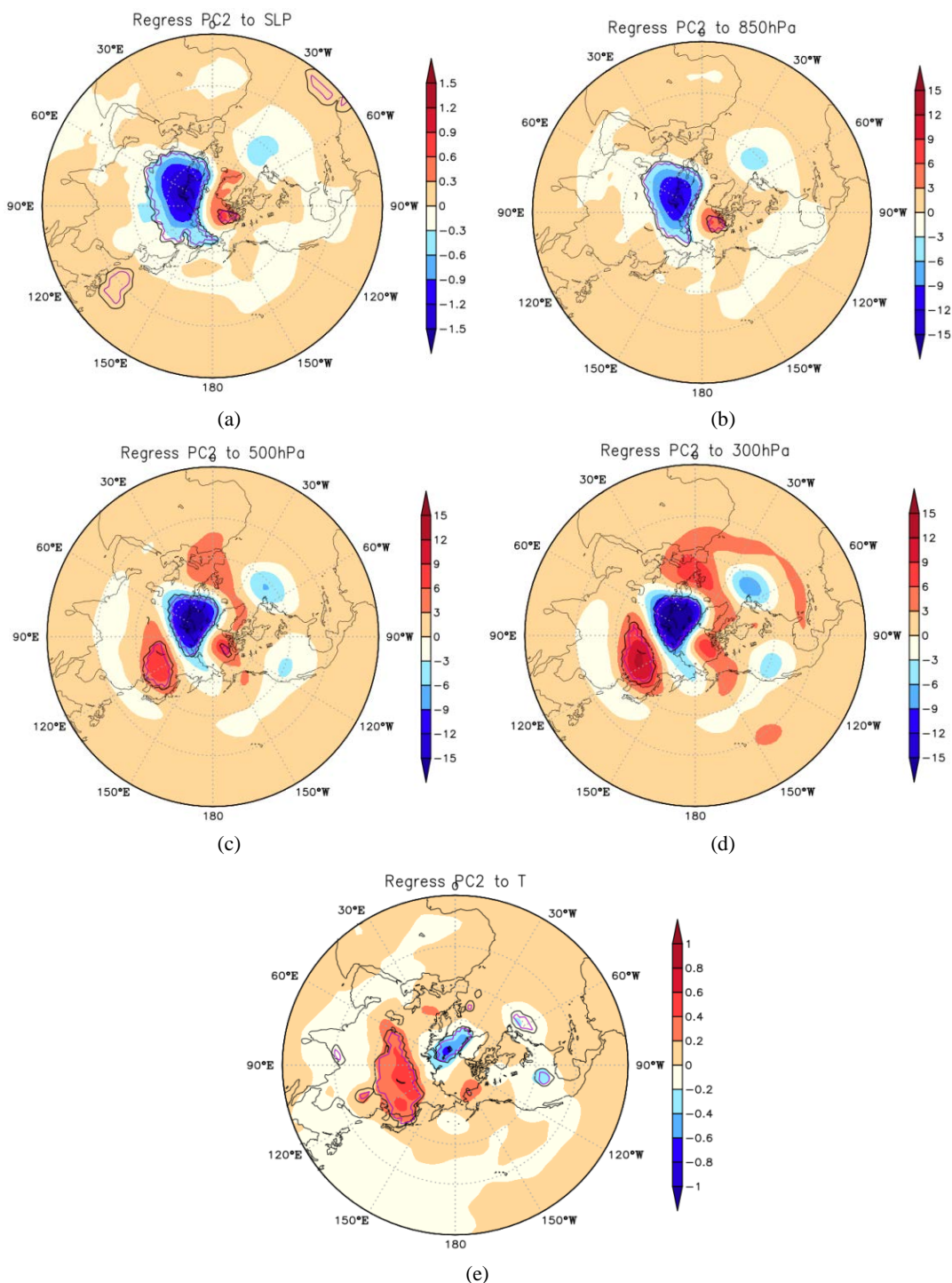


Figure 6. Sea level air pressure (a), 850 hPa (b), 500 hPa (c), 300hPa (d) and 925 hPa temperature (e) obtained from regression analysis of AO time coefficient. (The black line in the figure indicates passing the test with a confidence level of 95%, and the purple line area indicates passing the 99% test) Unit: (a) hPa, (b) potential meter, (c) potential meter, (d) Potential m, (e) °C

图 6. AO 时间系数回归分析得到的海平面气压 (a)、850 hPa (b)、500 hPa (c)、300 hPa (d) 和 925 hPa 温度 (e)。 (图中黑色线内表示通过置信度为 95% 的检验, 紫色线区域表示通过 99% 的检验) 单位: (a) hPa、(b) 位势米、(c) 位势米、(d) 位势米、(e) °C

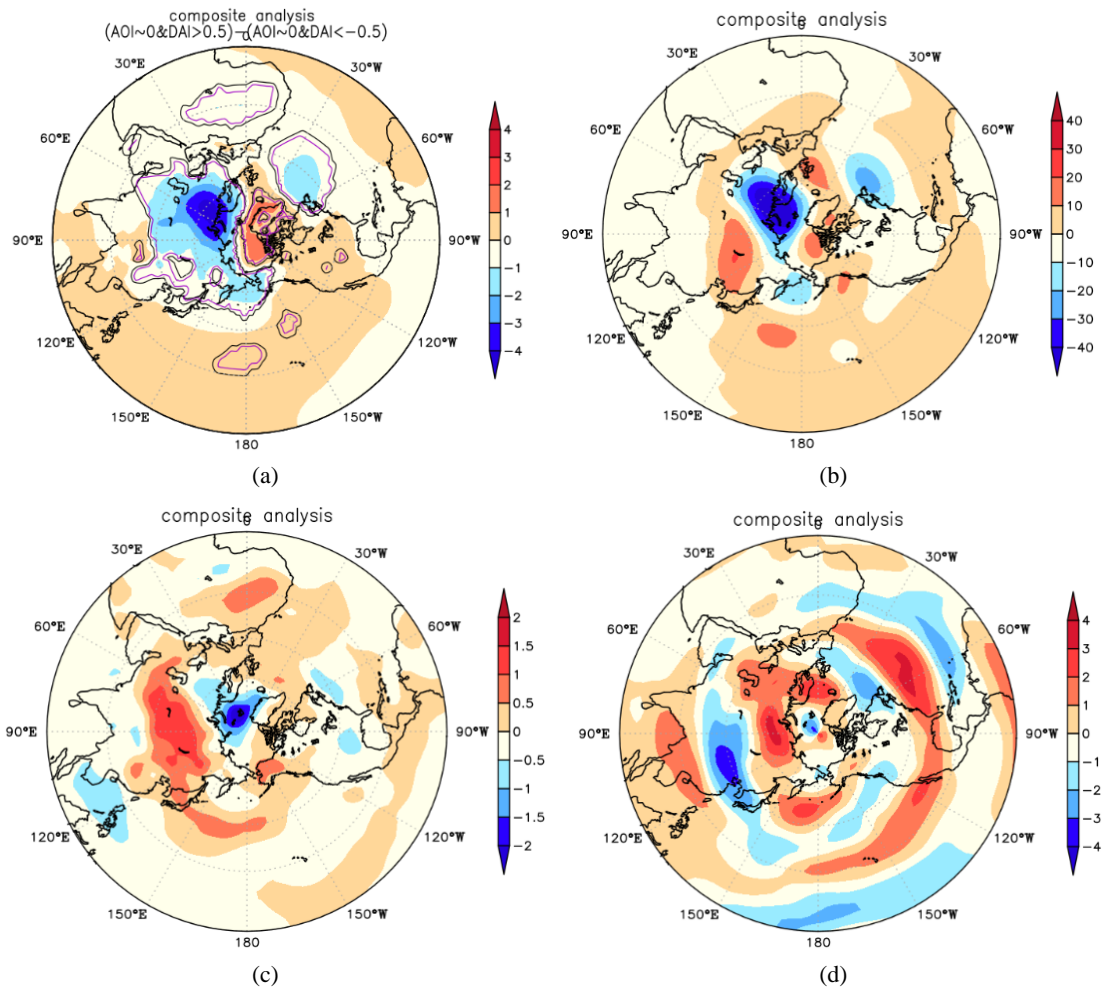
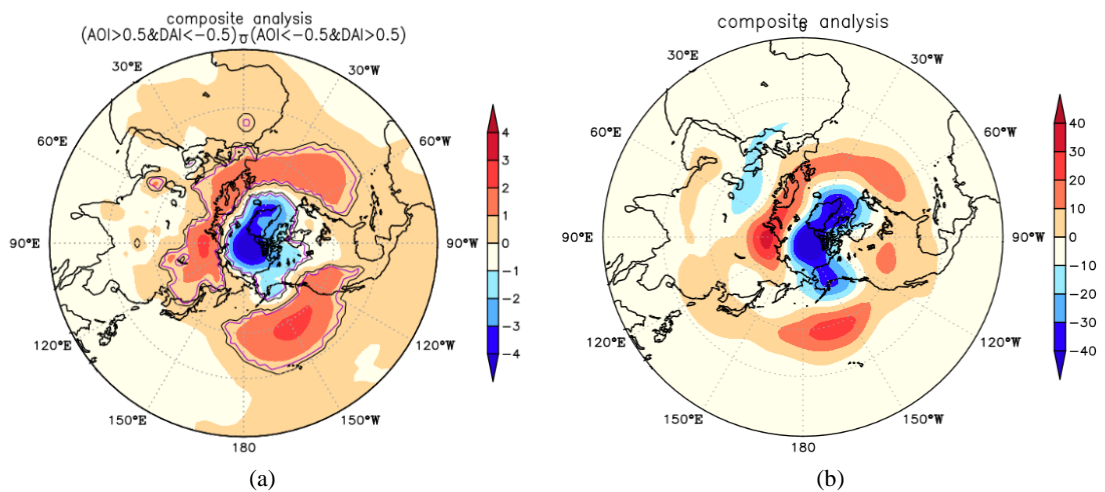


Figure 7. Synthetic analysis ((AOI~0 & DAI >= 0.5) - (AOI~0 & DAI <= -0.5)), SLP (a), 500 hPa (b), 925 hPa temperature (c) and 200 hPa u wind field (d). (The black line in the figure indicates passing the test with a confidence level of 95%, and the purple line area indicates passing the 99% test) Unit: (a) hPa, (b) potential meter, (c) °C, (d) m/s⁻¹

图 7. 合成分析((AOI~0 & DAI >= 0.5) - (AOI~0 & DAI <= -0.5)), SLP (a)、500 hPa (b)、925 hPa 温度(c)和 200 hPa u 风场(d)。 (图中黑色线内表示通过置信度为 95%的检验, 紫色线区域表示通过 99%的检验)单位: (a) hPa、(b)位势米、(c) °C、(d) m/s⁻¹



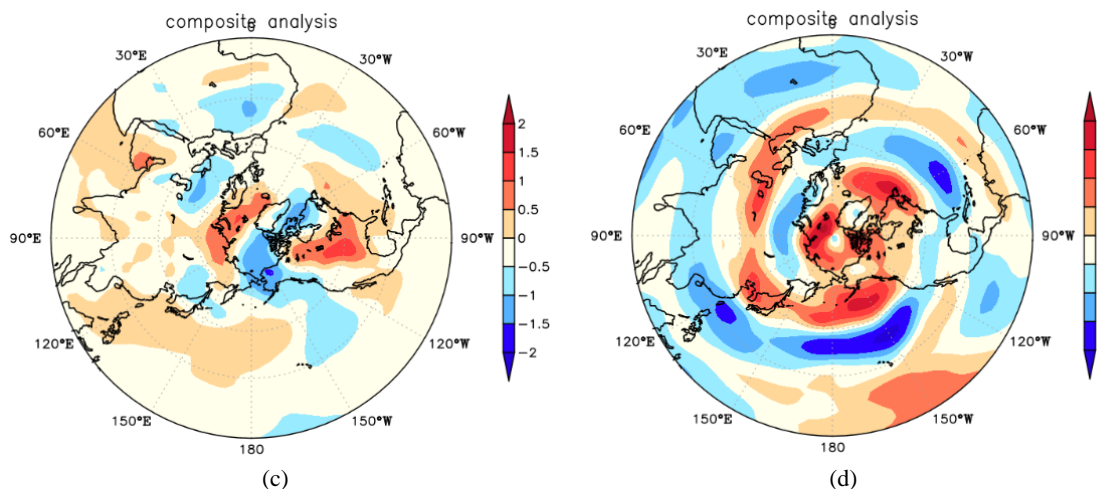


Figure 8. Synthetic analysis ((AOI ≥ 0.5 & DAI ≤ -0.5) - (AOI ≤ -0.5 & DAI ≥ 0.5)), SLP (a), 500 hPa (b), 925 hPa temperature (c) and 200 hPa u wind field (d). (The black line in the figure indicates passing the test with a confidence level of 95%, and the purple line area indicates passing the 99% test) Unit: (a) hPa, (b) potential meter, (c) $^{\circ}\text{C}$, (d) m/s^{-1}

图 8. 合成分析((AOI ≥ 0.5 & DAI ≤ -0.5) - (AOI ≤ -0.5 & DAI ≥ 0.5)), SLP (a)、500 hPa (b)、925 hPa 温度(c)和 200 hPa u 风场(d)。(图中黑色线内表示通过置信度为 95% 的检验, 紫色线区域表示通过 99% 的检验)单位: (a) hPa、(b)位势米、(c) $^{\circ}\text{C}$ 、(d) m/s^{-1}

5. 结论与讨论

本文的结论主要是, I区 PVA 指数和 PVI 指数两者可以作为独立的变量来描写极涡。PVA 指数在 20 世纪 70 年代前主要呈上升趋势, 之后主要为下降趋势, 但 PVI 指数变化不明显; 第一模态表现为 AO, 第二模态表现为 DA, 1967 年 AO 强, 1989 年次之。

各层回归场均表现出 AO 的影响。AO 呈季节变化冬季最强逐渐减弱, 并发现 AO 存在年际变化。当 DA 指数一致时, AO 变化随其指数减小(增大)呈递减(增)趋势, 但仍表现出负(正)位相的 DA 情况, DA 指数相似。

值得讨论的是, 滤除季节变化后的 EOF 主要呈现 AO 的正负位相的情况, 所以 DA 可能不存在年际变化, 有待进一步研究。

基金项目

山东省气象局青年专项项目(2022SDQN15)。

参考文献

- [1] Thompson, D.W.J. and Wallace, J.M. (1998) The Arctic Oscillation Signature in the Wintertime Geopotential Height and Temperature Fields. *Geophysical Research Letters*, **25**, 1297-1300. <https://doi.org/10.1029/98GL00950>
- [2] Wang, B., Wu, R.G., Lau, K.M. (2001) Interannual Variability of the Asian Summer Monsoon: Contrasts between the Indian and the Western North Pacific-East Asian Monsoon. *Journal of Climate*, **14**, 4073-4090. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<4073:IVOTAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<4073:IVOTAS>2.0.CO;2)
- [3] Wang, J., Zhang, J., Watanabe, E., et al. (2009) Is the Dipole Anomaly a Major Driver to Record Lows in Arctic Summer Sea Ice Extent? *Geophysical Research Letters*, **36**, 277-291. <https://doi.org/10.1029/2008GL036706>
- [4] 樊婷婷, 黄菲, 苏洁, 等. 北半球中高纬度大气环流主模态的季节演变及其与北极海冰变化的联系[J]. 中国海洋大学学报自然科学版, 2012, 42(7): 19-25.
- [5] Serreze, M.C. and Barrett, A.P. (2011) Characteristics of the Beaufort Sea High. *Journal of Climate*, **24**, 159-182. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3636.1>
- [6] Wang, B. and An, S. (2005) A Method for Detecting Season-Dependent Modes of Climate Variability: S-EOF Analy-

sis. *Geophysical Research Letters*, **32**, 291-310. <https://doi.org/10.1029/2005GL022709>

- [7] Zhao, J., Cao, Y. and Shi, J. (2006) Core Region of Arctic Oscillation and the Main Atmospheric Events Impact on the Arctic. *Geophysical Research Letters*, **33**. <https://doi.org/10.1029/2006GL027590>