

ENSO 和北极涛动对东亚冬季气候异常的综合影响

陈文*, 兰晓青, 王林, 马音

中国科学院大气物理研究所, 季风系统研究中心, 北京 100190

* 联系人, E-mail: cw@post.iap.ac.cn

2012-10-26 收稿, 2012-12-27 接受, 2013-02-21 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2009CB421405)和国家自然科学基金(41025017, 41230527)资助

摘要 利用 NCEP/DOE 再分析资料以及我国温度和降水台站资料, 以厄尔尼诺和南方涛动 (El Niño and Southern Oscillation, ENSO) 冷、暖位相的冬季作为背景, 结合北极涛动 (Arctic Oscillation, AO) 的月际异常, 对两者影响东亚冬季气候异常的综合作用进行了研究. 结果表明, 当 El Niño 和 AO 负异常或者 La Niña 和 AO 正异常相互配置时, 我国北方气候异常主要受 AO 影响, 南方气候异常主要受 ENSO 影响, 并且该气候异常与已经认识到的 AO 和 ENSO 影响东亚气候异常的机理相一致. 然而, 当 El Niño 和 AO 正异常或者 La Niña 和 AO 负异常相互配置时, 尽管我国北方气温仍主要受 AO 影响, 但我国大部分地区, 特别是南方的气候异常呈现出与已有认识很不一样的变化模态. 进一步的分析认为出现这种差异的原因可能在于平流层和对流层相互作用以及东亚地区中低纬相互作用的不同, 这会导致在前者的冬季, 大气环流主要表现为纬向对称性, 中低纬相互作用偏弱, ENSO 和 AO 对东亚的影响表现出线性的作用; 而在后者的冬季, 则不利于大气环流模态的维持, 导致东亚地区中低纬相互作用偏强, ENSO 和 AO 对东亚的影响呈现出非线性的相互叠加.

关键词

厄尔尼诺和南方
涛动
北极涛动
东亚冬季气候
气温与降水异常
平流层与对流层
相互作用

东亚冬季气候异常主要受冬季风影响^[1-3]. 在低层冬季风表现为欧亚大陆上的西伯利亚高压、北太平洋上的阿留申低压以及西伯利亚高压东侧的强西北风. 西北风在日本南部分成两支, 一支向东吹向副热带中西太平洋, 另一支沿着东亚海岸并折向我国南海^[4]. 在对流层中层是中心位于日本上空的东亚大槽, 高层则是强的东亚急流. 与此相联系的是较强的斜压不稳定和冷空气平流^[5-7]. 东亚冬季风的异常会导致持续低温、暴雪和冰冻灾害, 使这些地区遭受重大人员伤亡和经济损失, 因此关于东亚冬季风变化的机理越来越受到研究人员的重视^[8,9].

厄尔尼诺和南方涛动 (El Niño and Southern Oscillation, ENSO) 是热带太平洋海-气耦合系统年际变率的主要模态^[10], 有关其与东亚冬季气候异常已有不少研究. 比如, 在 ENSO 暖位相时会有西北太平洋

的异常反气旋环流维持, 导致东亚冬季风偏弱, 气温偏高, 我国南方地区降水偏多^[11-14]. 近年来, 一些研究发现北极涛动 (Arctic Oscillation, AO) 对东亚冬季气候也有显著影响^[15-19]. AO 是北半球热带外大气低频变率的主要模态, 表现为极区和中纬度地区气压的反相变化^[20,21]. AO 正位相时, 东亚冬季风往往偏弱, 我国东北、华北偏暖^[22,23]. 只是 AO 影响东亚气候的机理还不是很清楚, 比如: Gong 等人^[15]认为, AO 可以通过作用于西伯利亚高压进而影响到东亚冬季风; 而 Wu 和 Wang^[16]认为 AO 可以直接影响东亚冬季风, 并不需要通过西伯利亚高压; Chen 等人^[18,24]则认为行星波活动在其中起重要作用. 事实上对现有东亚冬季风指数的分析研究也表明, ENSO 和 AO 是影响东亚冬季风强度的最重要影响因子^[25].

然而, 目前的研究大多强调 ENSO 或 AO 单方面

引用格式: 陈文, 兰晓青, 王林, 等. ENSO 和北极涛动对东亚冬季气候异常的综合影响. 科学通报, 2013, 58: 634-641

英文版见: Chen W, Lan X Q, Wang L, et al. The combined effects of the ENSO and the Arctic Oscillation on the winter climate anomalies in East Asia. Chin Sci Bull, 2013, 58, doi: 10.1007/s11434-012-5654-5

的影响. 它们结合在一起的综合影响很可能产生与单一因子不一样的结果. 比如, 2008 年 1 月我国南方遭受严重的低温雨雪冰冻灾害, 就是在 La Niña 背景下主要由 AO 异常所引起的^[26]. 2009/2010 年冬季, 我国北方地区又遭受极端低温和暴雪影响, 一些分析认为 AO 的极端负位相的维持是导致该事件的主要原因, El Niño 起着次要作用^[27]. 因此, 对于东亚地区冬季气候异常的研究, 有必要同时考虑 ENSO 和 AO 这两个关键的因子.

1 数据和方法

本文分别使用了由美国环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)和美国能源部(Department of Energy, DOE)发布的全球逐月再分析数据第二版(NCEP/DOE Reanalysis2)和由中国气象局提供的全国 160 个台站的逐月平均的温度和降水资料. NCEP/DOE Reanalysis2 数据从 1979 年开始, 水平网格距为 2.5°×2.5°, 垂直方向上自 1000 hPa 到 10 hPa 共有 17 层, 是对 NCEP/NCAR 再分析资料的改进, 修正了其中已知的错误并对一些物理过程的参数化做了优化^[28]. 逐月的 AO 指数和 Niño3 指数由美国国家海洋和大气管理局网站提供(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>).

本文考虑 1979/1980~2009/2010 这 31 个冬季中的逐月异常. 由于 ENSO 的冷暖位相在一个冬季往往持续, 可以作为背景, 而 AO 的正负位相具有相对高频特征, 在冬季的不同月份会发生显著变化. 因此, 首先将冬季平均的 Niño3 指数超过±0.7 倍标准差的年份定义为 El Niño 和 La Niña 年, 这样可以得到 7 个 El Niño 年和 8 个 La Niña 年. 对这选出的 15 个典型年, 将前一年 11 月至次年 3 月定义为冬季, 把每年冬季的 5 个月按照 AO 指数的正负位相进行分组, 其中大于±0.75 倍标准差则分别认为是 AO 正异常月份和负异常月份, 于是得到 4 组典型的月份. 之所以选择冬半年的 5 个月代表冬季, 是为了增加样本数, 并且考虑到 AO 在冬季前期和后期常有较强的异常信号出现, 而 ENSO 在冬季则具有持续性. 按照此方法选出的异常月份的个例数可见表 1. 然后利用这些组合对 Niño3 指数和 AO 指数的不同配置做了月平均异常的合成分析, 并对合成结果做了 Student's *t* 检验. 考虑月平均异常一方面是因为 AO 具有明显的月际变化, 使用月资料可以更准确地反映 AO 的这种变化,

表 1 根据 Niño3 和 AO 指数划分的异常月份个例数

	AO 正异常月份数	AO 负异常月份数
	10	11
El Niño 冬季	198212, 198301, 198611, 199112, 199202, 199203, 200303, 200612, 200701, 200703	198302, 198701, 198702, 198703, 199801, 200211, 200212, 200702, 200912, 201001, 201002
	13	11
La Niña 冬季	198812, 198901, 198902, 198903, 199702, 199703, 199812, 199912, 200001, 200002, 200712, 200801, 200802	198411, 198501, 198502, 199512, 199601, 199603, 199612, 199811, 199903, 200512, 200603

避免季节平均带来的信息损失; 另一方面, 可以得到更多的样本数, 从而更符合统计检验的假设.

2 ENSO 和 AO 的综合影响

由于东亚冬季风的特征是偏北风带来干冷空气, 因此东亚大部分地区在冬季主要表现为干冷的气候特征. 图 1 给出了合成的 El Niño 和 La Niña 冬季 AO 不同位相月份东亚地区 850 hPa 气温的异常分布. 仅仅考虑所有 El Niño 冬季时, 850 hPa 气温在我国南海至华南上空以及东部沿海到日本南部地区表现为正异常, 并且通过了显著性检验(图 1(c)); 而在仅考虑 La Niña 时, 我国冬季气温的响应比较弱, 没有显著的异常(图 1(f)). 很显然, 如果同时出现了 AO 的正负异常位相之后, 就不存在所谓的 ENSO 暖位相对应东亚气温高或 ENSO 冷位相对应东亚气温低的关系, 而是东亚气温异常表现出南北反位相变化的特征. 在 ENSO 循环处于暖位相的冬季, AO 正异常的月份会在 45°N 以北的西伯利亚出现显著的正异常, 温度偏暖超过 2°C, 而我国中部是弱的偏冷(图 1(a)); AO 负异常的月份则会在 45°N 以北的西伯利亚出现显著的负异常, 温度偏冷也超过 2°C, 而我国南方地区表现为显著的暖异常, 温度偏暖超过 1°C(图 1(b)). 需要说明的是, 上述主要异常都通过了 95% 的显著性检验. 与此相类似的是, 在 ENSO 循环处于冷位相的冬季, AO 正异常的月份同样会在 45°N 以北的西伯利亚出现显著的正异常, 温度偏暖超过 2°C, 但我国中部的冷异常明显减弱(图 1(d)); AO 负异常的月份也是在 45°N 以北的西伯利亚出现显著的负异常, 温度偏冷超过 2.5°C, 但我国南方地区为冷暖相间, 温度异常弱(图 1(e)). 由此可见, 东亚冬季的温度异常显著的依赖于 ENSO 和 AO 的不同位相配置, 而不是仅仅

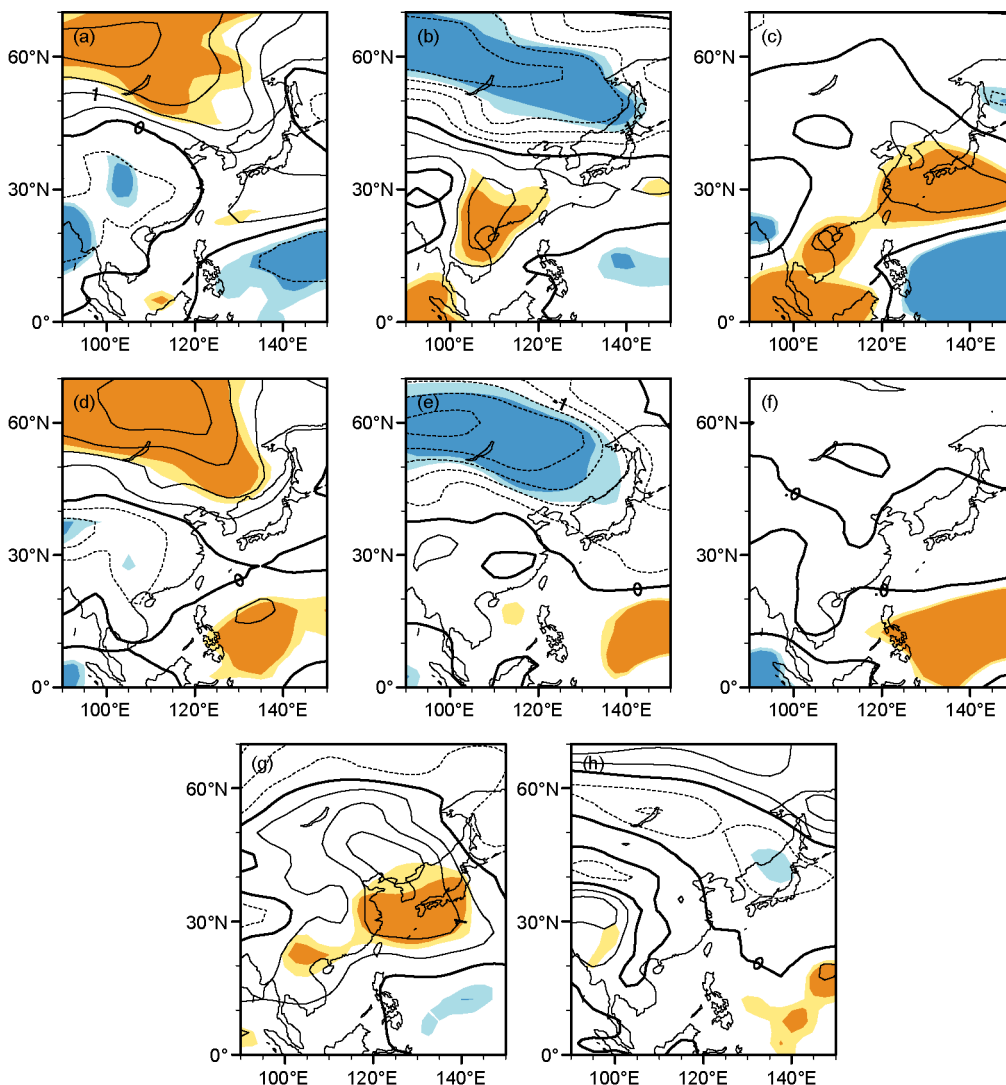


图1 合成的 El Niño 和 La Niña 冬季, AO 不同位相月份东亚地区 850 hPa 气温异常分布

(a) El Niño 冬季 AO 正异常月; (b) El Niño 冬季 AO 负异常月; (c) 所有 El Niño 冬季月; (d) La Niña 冬季 AO 正异常月; (e) La Niña 冬季 AO 负异常月; (f) 所有 La Niña 冬季月; (g) El Niño 冬季 AO 无异常月; (h) La Niña 冬季无 AO 异常月. 实线为正值, 虚线表示负值, 深浅阴影分别为通过 95% 和 90% 显著性检验的区域, 等值线间隔 0.5°C

由其中一个因子而决定. 图 1(g) 和 (h) 分别给出了 El Niño 和 La Niña 冬季中没有 AO 异常月份的合成结果, 进一步证实了 AO 可以对我们以往关于 ENSO 和我国冬季气候关系的认识产生重要影响.

上述由再分析资料所得结果可以由中国 160 个台站的月平均温度资料证实. 对应于不同的 ENSO 和 AO 位相配置, 冬季我国气温也主要表现出南北反相变化的特征(图 2). 具体结果为: 在 ENSO 循环处于暖位相的冬季, AO 正异常的月份对应着北暖南冷(图 2(a)), AO 负异常的月份对应着北冷南暖(图 2(b));

而在 ENSO 循环处于冷位相的冬季, AO 正异常的月份同样对应着北暖南冷(图 2(c)), 但 AO 负异常的月份全国主要为冷异常(图 2(d)). 因此, 我国北方(大致 40°N 以北)的气温异常主要依赖于 AO 的异常, AO 正位相的月份, 北方偏暖, 反之亦然. 而我国南方及西部的广大地区的气温异常并不完全取决于 ENSO 的冷暖状态, 通常所讲的 El Niño 偏暖和 La Niña 偏冷必须考虑 AO 的正、负异常位相的叠加影响; AO 正位相月份即使是 El Niño 年, 我国南方并不偏暖而是偏冷(图 2(a)), AO 负位相月份即使是 La Niña 年, 我

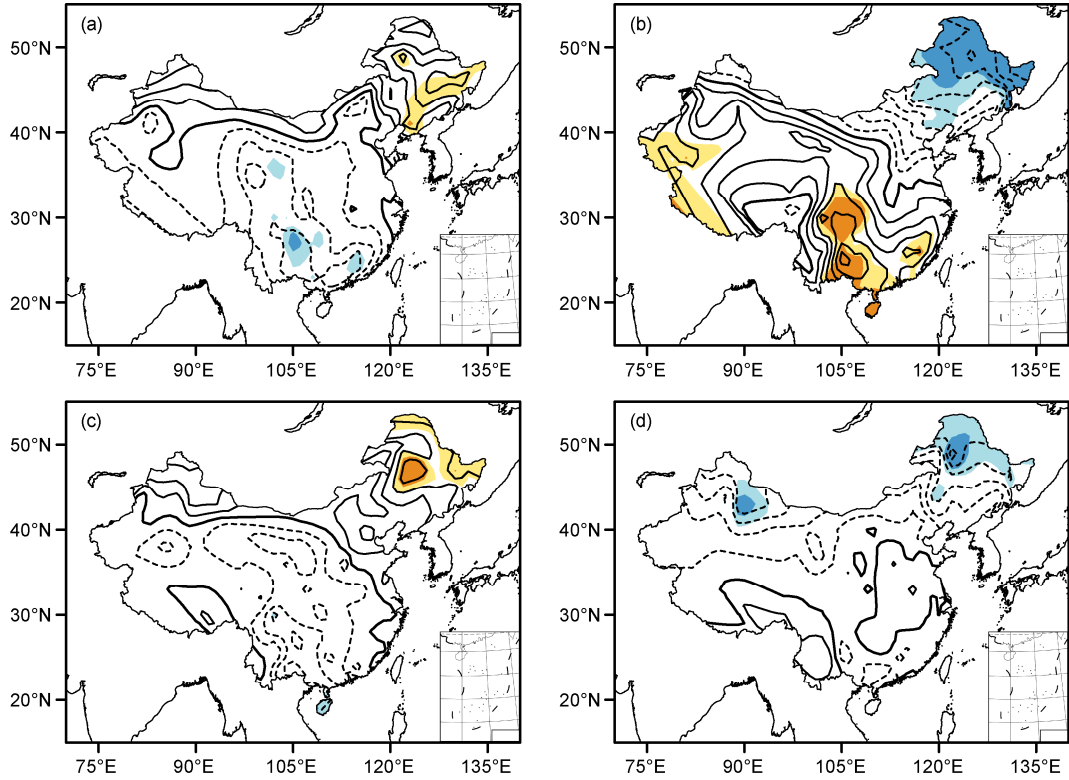


图2 合成的 El Niño 和 La Niña 冬季, AO 不同位相月份中国地面气温异常分布

(a) El Niño 冬季 AO 正异常月; (b) El Niño 冬季 AO 负异常月; (c) La Niña 冬季 AO 正异常月; (d) La Niña 冬季 AO 负异常月. 粗实线为零值, 虚线表示负值, 深浅阴影分别为通过 95% 和 90% 显著性检验的区域, 等值线间隔 0.25℃

国南方也不明显偏冷(图 2(d)).

尽管冬季我国降水很少并主要集中在长江以南^[18], 但一些研究表明 ENSO 对华南冬季降水有重要影响^[29-31]. 图 3 给出了合成的 El Niño 和 La Niña 冬季 AO 不同位相月份中国 160 个台站月平均降水的异常分布. 很显然, 主要的降水异常也是出现在长江以南地区. 对应着 El Niño 年冬季, 我国华南及东南沿海有异常多的降水(图 3(a)和(b)); 对应着 La Niña 年冬季, AO 正位相月份我国华南及东南沿海降水偏少(图 3(c)), 而 AO 负位相月份我国华南及东南沿海降水略偏多, 少雨区北移, 出现在长江流域及其以南地区(图 3(d)). 需要说明的是降水异常的统计显著性不高, 很可能与我国降水的区域差异有关, 比如图 3(d)中降水负异常大值区位于长江中下游, 但该区域降水异常的方差也较大, 所以并没有通过显著性检验. 由此可见, 与温度变化相一致的是, 通常讲的 ENSO 与华南冬季降水关系在 El Niño 和 La Niña 分别与 AO 的负位相和正位相结合在一起时是成立的, 并且这两

种情况下我国降水异常分布几乎完全相反, 呈现出线性变化的关系(图 3(b)和(c)); 但 El Niño 和 La Niña 分别与 AO 的正位相和负位相结合在一起时就没有这样相反的关系(图 3(a)和(d)), 特别是后者表现出与通常讲的与 ENSO 关系的不一致(图 3(d)).

3 可能的机理

一个很重要的问题是, 为什么当 ENSO 不同的冷、暖背景与 AO 的正、负位相月份叠加时会在东亚地区出现上述不同的气候异常. 以往的研究表明, 对应于冬季 ENSO 的暖(冷)位相, 西太平洋有反气旋(气旋)环流异常, 与环流异常相联系的南风(北风)异常会导致我国偏暖(冷)^[12,13]. 冬季平均的 850 hPa 风场对 Niño3 指数的线性回归清楚地表现出显著的西太平洋反气旋异常(图 4(a)), 证实 ENSO 对东亚冬季气候异常有重要影响. AO 对东亚冬季气候异常的影响也有不少研究. 图 4(b)给出了冬季平均的 200 hPa 纬向风场对 AO 指数的线性回归. 很显然对应 AO 的

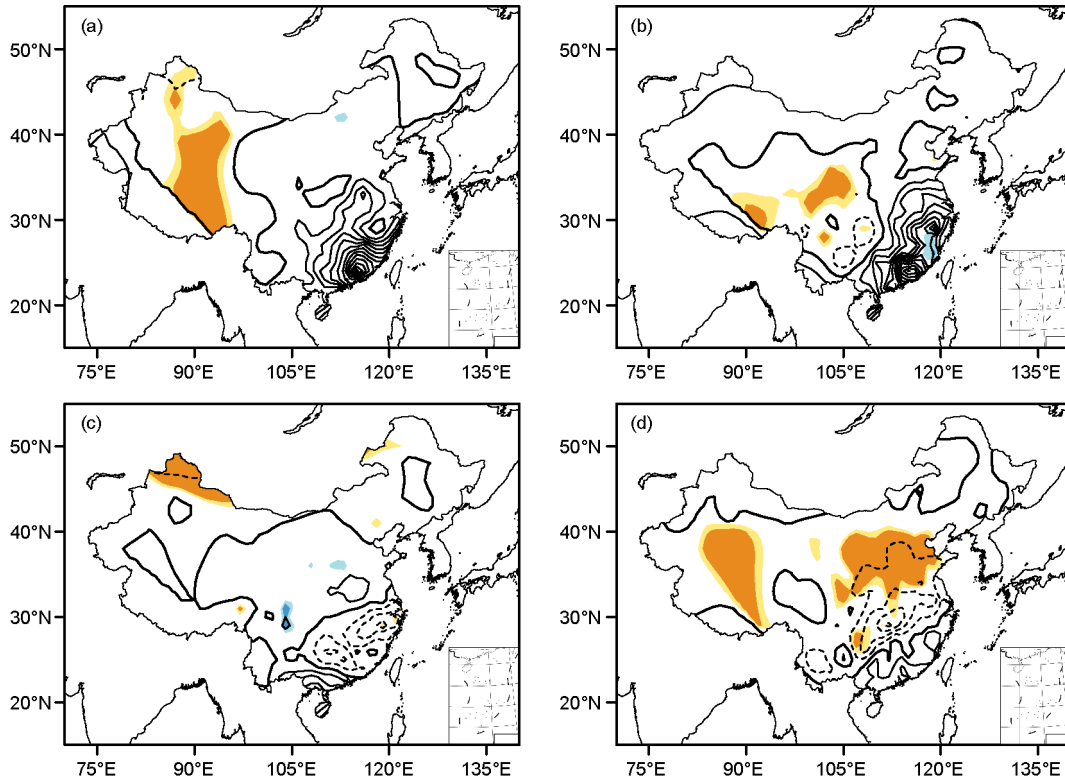


图3 合成的 El Niño 和 La Niña 冬季, AO 不同位相月份中国 160 站降水异常分布

(a) El Niño 冬季 AO 正异常月; (b) El Niño 冬季 AO 负异常月; (c) La Niña 冬季 AO 正异常月; (d) La Niña 冬季 AO 负异常月. 粗实线为零值, 虚线表示负值, 深浅阴影分别为通过 95% 和 90% 显著性检验的区域, 等值线间隔为 5 mm/月

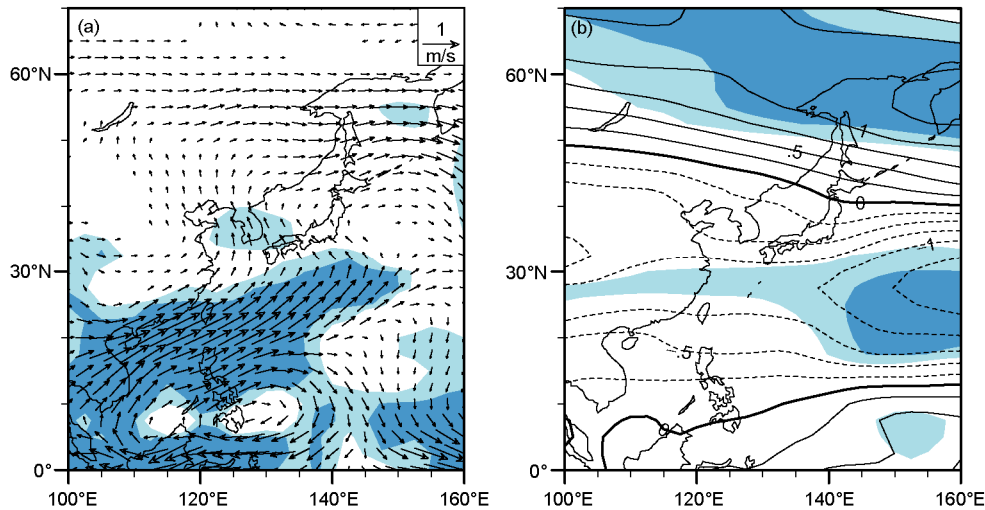


图4 冬季平均的 850 hPa 风场对 Niño3 指数的线性回归分布(a)和冬季平均的 200 hPa 纬向风场对 AO 指数的线性回归分布(b)

(a)中单位为 m/s; (b)中等值线间隔为 0.25 m/s, 深浅阴影分别为通过 95% 和 90% 显著性检验的区域

正异常, 东亚急流显著减弱, 从而斜压性也减弱, 导致冷空气爆发减少, 我国北方偏暖; 对应 AO 的负异常, 则有相反的结果. ENSO 冷、暖背景与 AO 的正、

负位相线性叠加可以很好地解释 El Niño 年 AO 负位相月份和 La Niña 年 AO 正位相月份我国冬季气温和降水异常分布, 但不能解释 El Niño 年 AO 正位相月

份和 La Niña 年 AO 负位相月份我国冬季气温和降水异常分布。

图 5 是合成的 El Niño 和 La Niña 冬季, AO 不同位相月份时 500 hPa 位势高度异常分布及其纬向平均。从图 5(b)和(c)中可见, 当 El Niño 和 AO 负异常或者 La Niña 和 AO 正异常相互配置时, 中纬度地区(如 45°N 附近)的位势高度异常分布有较好的纬向一致性, 此时中纬度扰动较弱, 纬向平均图显示热带和中纬度表现出反号的特点, 说明中低纬相互作用也偏弱。因此, 热带(中高纬)信号的影响不易到达中高纬度(热带)地区, ENSO 和 AO 的影响在东亚呈现出线性叠加的特征, 即南方主要受 ENSO 影响, 而北方主要受 AO 的影响。但是, 当 El Niño 和 AO 正异常或者 La Niña 和 AO 负异常相互配置时(图 5(a)和(d)), 中纬度地区(如 45°N 附近)位势高度异常分布的纬向对称性明显减弱, 正负位势高度异常在中纬度交替分布, 表明中纬度地区扰动偏强, 大气环流在中纬地区主要表现为波动型。此时, 纬向平均图上可见热带和中纬度表现出同号的特点(图 5(a)和(d)), 尤其在东亚地区上空的位势高度异常向热带延伸, 并呈现出与热带一致的异常。这说明此时的中低纬相互作用比较强, 从而 ENSO 和 AO 对东亚气候的影响存在相互作用, 产生非线性的叠加, 呈现出不同于 El Niño 和 AO 负

异常或者 La Niña 和 AO 正异常相互配置时影响效果。具体来说, 在 El Niño 事件冬季的 AO 正异常月份, 我国北方受 AO 影响为暖异常, 南方并不由 El Niño 主导偏暖, 反而偏冷; 在 La Niña 事件冬季的 AO 负异常月份, 我国北方同样由 AO 主导而偏冷, 南方受 La Niña 和 AO 的共同影响并不一致偏冷, 我国中东部和西南甚至为弱的暖异常。

ENSO 和 AO 的不同位相的综合影响为什么会出这样明显的差异? 之前的研究发现, El Niño 年的冬季, 往往在平流层行星波更多的向极区和向上传播, 导致平流层有 AO 的负位相; La Niña 年的冬季, 则往往导致平流层有 AO 的正位相^[32,33]。这样如果 El Niño 年的冬季对流层出现 AO 负位相月份, 或者 La Niña 年的冬季对流层出现 AO 正位相月份, ENSO 在平流层的响应可能更有利于这种环形模态的维持, 从而导致东亚地区中低纬相互作用弱, 东亚气候异常表现为 ENSO 和 AO 的线性影响的叠加。但是, 如果 El Niño 年的冬季对流层出现 AO 正位相月份, 或者 La Niña 年的冬季对流层出现 AO 负位相月份, ENSO 在平流层的响应可能会不利于这种环形模态的维持, 使得东亚地区中低纬相互作用增强, 东亚气候异常表现为 ENSO 和 AO 的非线性影响。当然, 详细的物理过程还需要利用高分辨率的并能较好模

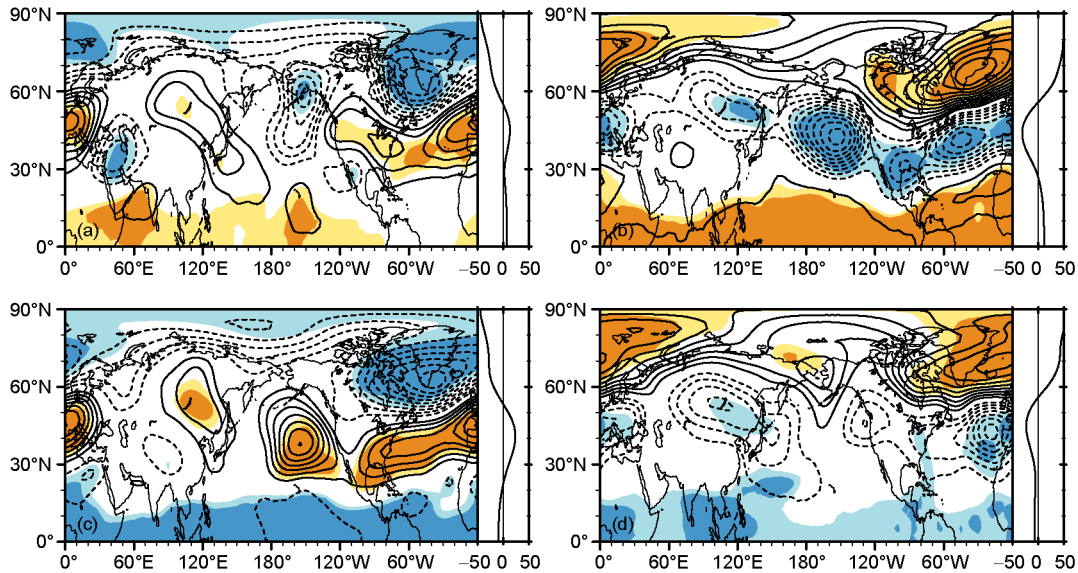


图 5 合成的 El Niño 和 La Niña 冬季, AO 不同位相月份北半球 500 hPa 位势高度场异常分布及其纬向平均

(a) El Niño 冬季 AO 正异常月; (b) El Niño 冬季 AO 负异常月; (c) La Niña 冬季 AO 正异常月; (d) La Niña 冬季 AO 负异常月。等值线间隔为 10 gpm, 零线未显示, 虚线表示负值, 深浅阴影分别为通过 95%和 90%显著性检验的区域

拟平流层过程的大气环流模式进行数值试验来进一步加以研究.

4 讨论和结论

本文利用 NCEP/DOE Reanalysis2 再分析资料和中国 160 个台站的温度和降水资料, 分析了 1979/1980~2009/2010 共 31 个冬季 ENSO 和 AO 对东亚冬季气候异常的综合影响. 其中 ENSO 冷、暖位相的冬季作为背景, 考虑 AO 的月际变化. 由于东亚冬季风的干冷特征, 文中主要考虑了温度异常, 也涉及到降水异常. 结果表明, 东亚冬季温度和降水异常显著的依赖于 ENSO 和 AO 的不同位相配置, 并不仅由其中一个因子决定.

当 El Niño 和 AO 负异常或者 La Niña 和 AO 正异常相互配置时, 我国冬季气候异常表现为北方气温主要受 AO 影响, 南方气温和降水主要受 ENSO 影响. 即 El Niño 年冬季 AO 负异常的月份对应着北冷南暖, 同时华南及东南沿海地区降水偏多; La Niña 年冬季 AO 正异常的月份对应着北暖南冷, 同时华南及东南沿海地区降水偏少. 这两种情形下的我国气候异常可以很好地用已知的 AO 和 ENSO 影响东亚气候异常的机理来解释. 前者 AO 负异常对应着东亚高空急流增强, 导致寒潮活动频繁, 我国北方偏冷; El Niño 引起西太平洋反气旋异常, 我国南方沿海地区出现南风异常, 导致气温偏高和降水偏多. 而 La Niña 年冬季 AO 正异常的月份与此相反. 然而, 当 El Niño 和 AO 正异常或者 La Niña 和 AO 负异常相互配置时, 尽管我国北方气温仍主要受 AO 影响, 但我国大部分地区特别是南方的气候异常并不能用现有的 ENSO 和 AO 影响我国气候的机理加以解释. El Niño 年 AO 正异常月份我国南方并不偏暖而是偏冷, 但降水仍偏多; La Niña 年 AO 负异常月份我国南方也不明显偏冷, 同时华南及东南沿海降水也不偏少.

造成 ENSO 和 AO 对东亚冬季气候异常的综合影响在两者不同位相配置下的显著差异, 可能来自于

平流层和对流层相互作用的不同以及东亚地区中低纬相互作用的不同. El Niño(La Niña)年的冬季, 由于平流层行星波传播的异常, 往往对应着平流层 AO 的负(正)位相; 如果对流层 AO 也是负(正)位相时, 会有利于这种环状模态的维持, 因而大气环流主要表现为纬向对称性, 导致中低纬相互作用偏弱. 这种情况下, 来自热带 ENSO 和中高纬 AO 的影响在东亚呈现出线性叠加的特征, 即南方主要受 El Niño(La Niña)影响偏暖(冷)且降水偏多(少), 而北方主要受 AO 的影响温度偏低(高). 但是, 如果 El Niño(La Niña)年的冬季对流层出现 AO 正(负)位相月份, ENSO 在平流层的响应可能会不利于大气环流模态的维持, 导致东亚地区中低纬相互作用增强. 这种情况下, 热带 ENSO 和中高纬 AO 会对东亚冬季气候产生非线性的影响: 即在 El Niño 事件冬季的 AO 正异常月份, 我国北方主要受 AO 影响为暖异常, 南方受 AO 和 El Niño 共同影响反而偏冷, 降水偏多; 在 La Niña 事件冬季的 AO 负异常月份, 尽管我国北方仍主要受 AO 影响偏冷, 但是南方受 La Niña 和 AO 的共同影响并不表现为一致偏冷, 我国中东部和西南甚至为弱的暖异常, 降水异常则出现华南和东南沿海多而长江流域及其以南地区少的偶极型分布.

应该说明的是, 尽管 ENSO 事件的定义存在一些不同的标准^[13,34] (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml), 但本文的结果并不太受 ENSO 定义影响. 例如, 我们曾使用 5 个月滑动平均的 Niño3 指数连续 6 个月大于 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 为标准来选择 ENSO 暖事件和冷事件, 挑选出的年份与目前接近, 对以上结论也几乎没有影响. 同时, 我们也利用第一版的 NCEP/NCAR 再分析资料^[35]对更长时间段(1968~2010年)进行了分析, 得到的结论也基本一致. 此外, 本文提出的机理仅由观测资料的诊断分析所得, 还有待于今后利用可以比较好的模拟平流层大气环流过程的数值模式的模拟加以验证和完善.

参考文献

- 1 Ding Y H. Monsoon Over China. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1994. 1-432
- 2 Huang R H, Zhou L T, Chen W. The progresses of recent studies on the variabilities of the East Asian monsoon and their causes. Adv Atmos Sci, 2003, 20: 55-69
- 3 Chan J C L, Li C Y. The East Asia winter monsoon. In: Chang C P, ed. East Asian Monsoon. Singapore: World Scientific Publishing Company Incorporated, 2004. 54-106

- 4 Chen W, Graf H F, Huang R H. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon. *Adv Atmos Sci*, 2000, 17: 48–60
- 5 Lau K M, Chang C P. Planetary scale aspects of the winter monsoon and atmospheric teleconnections. In: Chang C P, Krishnamurti T N, eds. *Monsoon Meteorology*. New York: Oxford University Press, 1987. 161–202
- 6 Wang L, Chen W, Zhou W. Interannual variations of 500 hPa East Asian trough axis and its influence on the pathway of the East Asian winter monsoon. *J Clim*, 2009, 22: 600–614
- 7 Chen W, Li T. Modulation of northern hemisphere wintertime stationary planetary wave activity: East Asian climate relationships by the Quasi-Biennial Oscillation. *J Geophys Res*, 2007, 112: D20120
- 8 康丽华, 陈文, 魏科. 我国冬季气温年代际变化及其与大气环流异常变化的关系. *气候与环境研究*, 2006, 11: 330–339
- 9 陈文, 顾雷, 魏科, 等. 东亚季风系统的动力过程和准定常行星波活动的研究进展. *大气科学*, 2008, 32: 950–966
- 10 Rasmusson E M, Wallace J M. Meteorological aspects of the El Niño/southern oscillation. *Science*, 1983, 222: 1195–1202
- 11 Li C Y. Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño events. *Adv Atmos Sci*, 1990, 7: 36–46
- 12 Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. Impact of El Niño on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the 86/87 and 91/92 events. *J Meteorol Soc Jpn*, 1996, 74: 49–62
- 13 Wang B, Wu R G, Fu X H. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect east Asian climate? *J Clim*, 2000, 13: 1517–1536
- 14 陈文. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响. *大气科学*, 2002, 26: 595–610
- 15 Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. East Asian winter monsoon and Arctic oscillation. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 2073–2076
- 16 Wu B Y, Wang J. Winter Arctic Oscillation, Siberian High and East Asian winter monsoon. *Geophys Res Lett*, 2002, 29: 1897
- 17 Jeong J H, Ho C H. Changes in occurrence of cold surges over East Asia in association with Arctic Oscillation. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L14704
- 18 Chen W, Yang S, Huang R H. Relationship between stationary planetary wave activity and the East Asian winter monsoon. *J Geophys Res*, 2005, 110: D14110
- 19 龚道溢, 朱锦红, 王绍武. 长江流域夏季降水与前期北极涛动的显著相关. *科学通报*, 2002, 47: 546–549
- 20 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
- 21 Baldwin M P, Dunkerton T J. Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere. *J Geophys Res*, 1999, 104: 30937–30946
- 22 Suo L L, Tan B K, Huang J Y. Further exploration on causes of temperature anomalies associated with the abnormal northern annular mode. *Chin Sci Bull*, 2009, 54: 2101–2106
- 23 陈文, 康丽华. 北极涛动与东亚冬季气候在年际尺度上的联系: 准定常行星波的作用. *大气科学*, 2006, 30: 863–870
- 24 Chen W, Zhou Q. Modulation of the Arctic Oscillation and the East Asian winter climate relationships by the 11-year solar cycle. *Adv Atmos Sci*, 2012, 29: 217–226
- 25 Wang L, Chen W. How well do existing indices measure the strength of the East Asian winter monsoon? *Adv Atmos Sci*, 2010, 27: 855–870
- 26 Wen M, Yang S, Kumar A, et al. An analysis of the large-scale climate anomalies associated with the snowstorms affecting China in January 2008. *Mon Weather Rev*, 2009, 137: 1111–1131
- 27 Wang L, Chen W. Downward Arctic Oscillation signal associated with moderate weak stratospheric polar vortex and the cold December 2009. *Geophys Res Lett*, 2010, 37: L09707
- 28 Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. NCEP-DEO AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull Amer Meteorol Soc*, 2002, 83: 1631–1644
- 29 Feng J, Wang L, Chen W, et al. Different impacts of two types of Pacific Ocean warming on Southeast Asian rainfall during boreal winter. *J Geophys Res*, 2010, 115: D24122
- 30 Zhou L T, Tam C, Zhou W, et al. Influence of South China Sea SST and ENSO on winter rainfall over south China. *Adv Atmos Sci*, 2010, 27: 832–844
- 31 王林, 冯娟. 我国冬季降水年际变化的主模态分析. *大气科学*, 2011, 35: 1105–1116
- 32 Chen W, Graf H F, Takahashi M. Observed interannual oscillations of planetary wave forcing in the Northern Hemisphere winter. *Geophys Res Lett*, 2002, 29: 2073
- 33 Lan X Q, Chen W, Wang L. Quasi-stationary planetary wave-mean flow interactions in the Northern Hemisphere stratosphere and their responses to ENSO events. *Sci China Earth Sci*, 2012, 55: 405–417
- 34 Trenberth K. The definition of El Niño. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1997, 78: 2771–2777
- 35 Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1996, 77: 437–471