

文章编号: 1001-8166(2001)03-0413-08

北大西洋涛动变率研究进展*

龚道溢¹, 周天军², 王绍武³

- (1. 北京师范大学资源科学研究所, 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875;
2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 3. 北京大学地球物理系, 北京 100871)

摘要: 介绍了近年来北大西洋涛动研究的最新进展。NAO 指数序列的建立取得了许多成果, 包括一些观测气象记录的序列以及利用树木年轮、冰芯等代用资料建立的近 300 多年的序列, 这些长的序列显示 NAO 不仅有突出的年际变率, 也有显著的年代际变率。总结了 NAO 对地面温度、降水、北大西洋飓风和北半球臭氧等影响的一些研究成果。NAO 的低频变率可能与气候系统内部的相互作用以及外部强迫有关。许多模拟研究发现 NAO 与温盐环流有密切的联系, 但是这种关系还有待观测资料的证实。全球气候变暖也可能是影响 NAO 变率的一个不可忽视的因素。

关键词: 北大西洋涛动 (NAO); 变率; NAO 序列

中图分类号: P467 **文献标识码:** A

北大西洋涛动 (NAO) 指亚速尔高压和冰岛低压之间气压的反向变化关系, 即当亚速尔地区气压偏高时, 冰岛地区气压偏低, 反之亦然。NAO 是北大西洋地区大气最显著的模式。其气候影响最突出的主要是北美及欧洲, 但也可能对其它地区如亚洲的气候有一定影响^[1-3]。Thompson 等^[4]基于北半球大气环流的分析, 提出了北极涛动 (AO) 的概念, 根据计算 1900—1995 年 11~4 月的 NAO 和 AO 相关达 0.69。Wallace^[5]最近指出, AO 与 NAO 二者本质上是一致的, 是同一事物在不同侧面的两种表现, 实际上反映的都是中纬西风的强弱; 只不过 AO 尺度更大, 而 NAO 是其在北大西洋区域的表现^[6-8]。NAO 变率的研究也是国际“气候变率及可预报性研究 (CLVAR)”计划的一个重点对象^[9], 也是目前的热门问题。本文主要介绍 NAO 序列的建立、气候影响及其变率的机制等方面的研究现状和进展。

1 北大西洋涛动指数序列

要分析 NAO 的变率离不开长的 NAO 指数序

列。目前公开发表的 NAO 指数有很多种, 根据资料来源可分为两类: 一类是用观测资料建立的序列; 另一类是代用资料建立的序列。

1.1 观测序列

从 80 年代开始, 人们摒弃 Walker 和 Bliss 的复杂定义, 多用两个测站, 即亚速尔地区和冰岛地区各取一个, 用其气压的差来建立 NAO 序列。用单个测站的气压来定义 NAO 虽然从形式上简洁, 而且方便使用, 但还是存在一定的不足。因为伴随 NAO 强弱的变化, 相应的海平面气压的年际差异非常大, 这其中必然包含局地的和小尺度的因素, 而且大气活动中心随季节其位置也会发生变化, 只用两个固定的测站肯定会有误差, 并不能完全反映 NAO。所以 Hurrell 等^[10]曾使用信噪比来判断 NAO 的信号是否显著。为克服上述弊端, 可以使用气压场或高度场进行经验正交函数展开 (或主分量分析), 以获取稳定的 NAO 模式, 取其中与 NAO 模式相对应的时间系数作为 NAO 指数^[11,12]。美国气候预测中心每个月在其“气候诊断公报”上发布的 NAO 指数, 就是

收稿日期: 2000-09-18; 修回日期: 2000-11-06.

* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目“我国重大气候灾害的形成机理和预测理论研究”(编号: G1998040900); 国家自然科学基金重点项目“20 世纪中国与全球气候变率研究”(编号: 49635190) 资助。

作者简介: 龚道溢(1969-), 男, 湖南石门人, 博士, 主要从事气候诊断分析与全球变化研究. E-mail: gdy@pku.edu.cn.

© 1995-2003 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

700 hPa 高度场旋转主分量分析的时间系数^[12]。文献[13]则是利用格点海平面气压场资料,对不同季节进行经验正交函数分析,确定NAO在不同季节的中心位置,取中心多个格点平均气压来建立NAO指数。表1中列出了一些近来有代表性的几种基于观测资料的NAO指数序列。

这些观测序列的分析表明NAO存在显著的年际变率,主要集中在2~3a及7~8a左右^[10],而年代际变率不突出,这可能与资料长度偏短有关。最近的30多年间,冬季NAO一直呈强烈的增强趋势,这是否与低频的年代际或更长尺度的变化有关呢?因为观测序列最长的也就170多年,并不足以说明60年代以来的变化是否异常(表1)。

表1 基于观测资料的NAO指数序列

Table 1 NAO indices based on the instrumental records

指 标	起始年	作 者	文献
Ponta Delgada- Akureyri, SLP	1879	Rogers	[14]
Ponta Delgada-Stykkishoimur, SLP	1867	Moses, <i>et al</i>	[15]
Lisbon-Stykkishoimur, SLP	1864	Hurrell	[2]
Gibraltar-Reykjavik, SLP	1825	Jone, <i>et al</i>	[16]
700 hPa 高度场, RPCA	1950	Barnston & Livezey	[12]
Jakobshavn-Osb, 气温	1860	van Loon & Rogers	[17]
SST	1856	Cullen & Deser	[18]
海平面气压(SLP)场, RPCA	1950	Barnston & He	[11]
SLP, 格点平均	1873	龚道溢和王绍武	[13]

1.2 代用资料序列

因此,近几年人们投入了很大力量利用各种代用资料,尽可能地往前延长NAO序列。表2中列出了几个有代表性的工作。使用的代用资料中用得最多的是树木年轮。Cook等^[19]从分布在北美及欧洲的102个年表中挑出了与NAO关系最好的10个序列,重建的冬季NAO指数往前延长到了1701年。瑞士伯尔尼大学地理研究所的Luterbacher等^[20]用典型相关(CCA)建立树木年轮与气压指标间的统计关系,然后,利用建立的关系重建了1675年以来的月分辨率的NAO序列。除了树木年轮外,格陵兰的冰芯资料也能提供大量的信息^[21]。Appenzeller等^[22]根据NASA-U 钻孔的冰雪累积量,将年平均NAO序列往前延长了近350年。

当然,任何一种代用资料都有其局限性。树木年轮受生长季气候变化的影响大,用它来反映冬季NAO可能是不恰当的,因此Cook等^[19]的重建从大量的年表中仅能挑出不到1/10的可用序列。此外,树木年轮还可能存在的问题是通常做了生长趋

表2 基于代用资料的NAO指数序列

Table 2 NAO indices based on the proxy or multiproxy reconstructions

代用资料	起始年	作 者	文献
冰 芯	1650	Appenzeller, <i>et al</i>	[22]
树轮	1675	Luterbacher, <i>et al</i>	[20]
冰芯+ 树轮+ 器测	1750	Cullen, <i>et al</i>	[26]
冰芯+ 树轮+ 器测	1701	Cullen, <i>et al</i>	[26]
树轮	1701	Cook, <i>et al</i>	[19]
冰芯+ 树轮	1429	Stockton & Glueck	[27]

势拟合后,有时很可能人为地把真正的气候长期变化或低频部分也消除了。一些纬度偏南的地区如地中海和北非,冬季树木生长受气候变化的影响较大,用这些地区的树木年轮来重建可望能得到更好的结果。冰芯资料的年际变化很大,这可能与降雪局地因素如风的作用等有关,此外冰芯定年也可能带来一定误差,所以冰芯反应低频变化应该更合适些。另外冰芯同位素记录虽然与大尺度的海平面气压变化关系很好,但是同时还与其他因素有更密切的关系,如降水的来源地、气旋活动的特点、高空环流的异常等,都能够影响格陵兰冰雪中同位素的含量^[23]。White等^[24]指出,NAO与格陵兰气温、海表温度、太阳辐射等5个要素的贡献加起来,才能解释同位素记录方差的50%。

因此,有时不同重建结果存在较明显的差异。例如虽然Luterbacher等^[20]的重建序列与观测序列有很好关系,能解释标定期冬季观测NAO方差的25%~40%,Cook等^[19]的序列能解释41%,Appenzeller等^[22]的序列能解释32%(年)及27%(冬季),但是Luterbacher等^[20]的重建序列与后两者关系却不太好。这可能是重建工作中普遍存在的一个问题,即重建的序列与观测序列都能有较高的相关,但代用资料重建的序列之间却不能保持稳定的显著相关^[25]。因此,考虑到不同代用资料的特点,将各个单独的代用资料的重建序列合成一个来代表NAO,可能代表性更好些,称“多代用资料重建”(Multiproxy reconstruction)。Cullen等^[26]同时将树木年轮、冰芯及海温重建的NAO指数进行滤波处理,将得到的低通和高通序列作主成分分析,提出最主要的分量对观测序列进行标定,得到回归关系后再将前面的时段转换得到NAO指数。结果发现效果有一定的改善,用多代用资料方法重建的NAO序列能解释56%的方差,比上述几种独立代用资料的效果都要好。图1中给出了几条重建序列,其中“L1”和“L2”

是Luterbach等^[20]树木年轮重建序列,“C”为Cook等^[19]的树木年轮重建序列,“A”为冰芯重建序列^[22],“SG”为Stockton等^[27]利用冰芯和树轮的重建序列。

分析表明,这些重建的NAO序列除了显著的年际变率之外,还有明显的年代际尺度变率,包括20 a左右的周期及50~70 a左右的周期,特别是后一个频率段的变化在其它的气候要素中也存在^[28,29],这可能是气候系统内部的普遍现象。

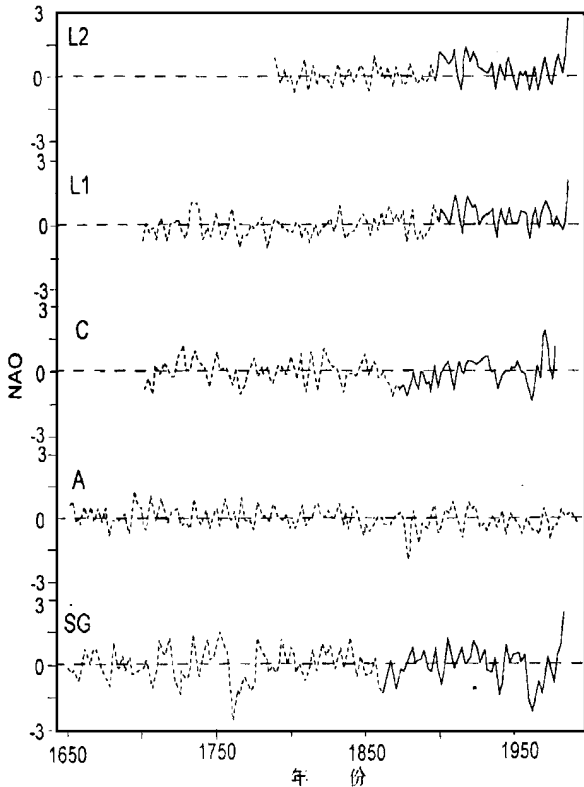


图1 重建的NAO指数,标注见文中说明^[25]

Fig. 1 NAO index reconstructions, see text for details^[25]

2 北大西洋涛动的气候影响

2.1 温度和降水

最近一段时期,NAO对地面气候要素的影响引起了人们密切关注。特别是最近30多年来全球温度与NAO都呈显著的上升趋势,北大西洋及邻近的北美东部,北非和欧洲地区的气温降水与NAO的年际尺度及年代际尺度上的变化也是非常显著的,通常NAO强,格陵兰以西及北美洲的东北部、北非和地中海地区偏冷,欧洲北部和美国东部偏暖;欧洲北部降水偏多,而地中海地区则降水偏少;反之亦然^[2]。其它要素如波罗的海、拉布拉多海和格陵兰海的海冰受NAO影响也很明显^[30,31],NAO指数与冬

季波罗的海海冰相关系数达-0.49(1879—1992年)^[30]。与此相对应,观测和模拟的通过弗拉姆(Fram)海峡进入大西洋的北极海冰近20多年都是增强的,与NAO的相关系数达0.7(1978—1997年),Hilmer等^[32]认为这与近20年NAO中心位置偏东造成的经向风异常有关。不仅是北大西洋地区,Hurrell^[3]还分析了NAO及南方涛动对北半球冬季气温变化的贡献,发现NAO能解释北半球热带外地区(20°N以北)1935—1996年62个冬季平均气温方差的34%。龚道溢等^[8]利用更长的资料(1873—1993年)分析,发现NAO对120年来热带外冬季气温贡献也是显著的,达17.0%,夏季较低仅为2.9%。

2.2 北大西洋飓风

佛罗里达大学Elsner等人的研究显示,NAO可能影响飓风的路径。根据150年来的飓风登陆资料统计,当NAO强时北大西洋高压强度加强,北大西洋中部为强的高压脊控制,向西移动的飓风容易沿高压脊线转向偏北,因此在美国东海岸登陆的个例多。反之NAO弱时,北大西洋高压强度减弱,中心位置偏西,因此,飓风多经过加勒比海地区进入墨西哥湾^[33]。当然,NAO还可能通过改变海洋表层温度(SST)影响飓风,例如对60年代墨西哥湾飓风增多的一个解释,就是因为弱NAO导致了北美发生冷冬,雪盖增加,海陆间的温度梯度增加,斜压效应增加。Cayan^[34]指出冬季北大西洋地区的海气相互作用,主要表现为大气对海洋的强迫,而且这种强迫作用在很大程度上受到NAO活动的影响,SST方差的10%~40%与NAO有关的风、感热和潜热通量的变化有关。

2.3 北半球臭氧

近年来北半球的臭氧损耗问题也逐渐引起人们的注意,90年代以来北极地区臭氧持续减少,多次出现类似南极上空的“臭氧洞”,1999—2000冬季北极上空(18 km)的臭氧含量下降60%左右。当NAO(或AO)强时,纬向环流加强,通常平流层极涡加深,气温降低,因此有利于臭氧的损耗。Appenzeller等^[35]最近发现欧洲臭氧总量与NAO有较好的关系,瑞士阿罗萨(Arosa)站观测显示,近几十年来12~3月臭氧的变化中的70%与人类排放的有害化学成分、火山喷发带来的气溶胶、NAO及太阳辐射等有关,其中NAO的贡献达23%,图2显示当NAO强时,阿罗萨臭氧总量低,自70年代以来NAO和臭氧都有非常突出的线性变化趋势。根据30年资料

的分析, Thompson 等^[7]也发现, 北极涛动(AO)能解释 3 月 40°N 以北臭氧总量 40% 的变化, 夏季为 50%。不过臭氧含量与气溶胶, 辐射, 大气成分等许多因素有关, 其变化是大气动力过程及光化学反应

等的非线性作用的综合结果, 大气环流如 NAO 或 AO 的作用还有待于观测与模拟的进一步的研究证实。

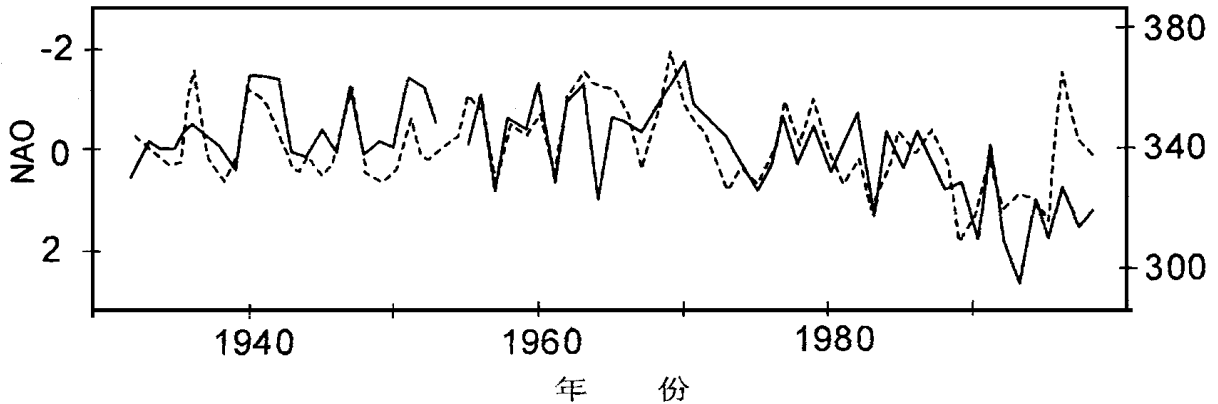


图 2 12~3 月瑞士阿罗萨站臭氧总量(实线)与 NAO 指数(虚线)^[35]

Fig. 2 Total ozone (solid line, DJFM mean, in Dobson units) over Arosa and normalized NAO index (dashed line)^[35]

3 NAO 低频变率的机制

目前 NAO 变率机制的研究主要涉及四个方面。一是大气内部的动力过程; 二是海洋的作用; 三是海洋-大气系统相互作用; 四是外部强迫。

3.1 气候系统的作用

许多大气环流模式^[36, 37]及耦合模式^[38, 39]都能较好地模拟出 NAO 及其空间结构特征, 不过如果仅仅揭示其空间形态, 只能说是从某些方面验证了 NAO 是气候系统固有的现象, 而我们更关心的是其时间特征上的变率。Stephenson 等^[40]认为即使是简单的随机模型也能表现出明显年代际或趋势变化, 观测到的 NAO 的低频趋势也可能是其自然变率的一种表现^[41]。Rodwell 等^[42]用观测的海温和海冰强迫大气环流模式, 很好地模拟出了 1947 年以来的 NAO 年际、年代际的变化, 特别是近 30 多年来的强烈增强趋势, 50% 都被模拟了出来。另外, 大陆雪盖对 NAO 年代际变化也可能有贡献^[43]。目前比较统一的观点认为, NAO 作为一种大气内部现象, 利用大气环流模式就可以较好地模拟出来, 但是要模拟出其细节特征及其变率特点, 还需要考虑气候系统的其他要素^[44]。

由于海洋的慢变性质, 因此许多研究把重点放在海洋上。利用海洋环流模式(O GCM)和海气耦合模式的数值模拟研究都表明, 在海洋内部, 海洋环流存在显著的年代际变率^[45-48]。

对于北大西洋表层海温与气候变率的联系, Bjerknes^[49]首先注意到了海气耦合系统在年际到年代际尺度上的相互作用。早期研究证实, 北大西洋高纬地区的年际变率, 表现为在 SST 和风速之间存在负相关。但是, 通过对 SST 和 SLP 变率的研究, Bjerknes 发现以 1920 年为中心, 50°N 以南的大西洋 SST 存在变暖的趋势, 同时在 30°N 处(即亚速尔高压处), SLP 出现正距平, 而 50°N 以北(冰岛低压处), 则出现负距平(这种气压型即经典的 NAO 图像)。这意味着 SST 的变暖, 伴有西风的加强, 它显然与年际变率特征不符。因此, Bjerknes 推测, 这可能是一种年代际的变率特征, 与洋流变化相联系。即由海洋过程决定的 SST 年代际变暖, 与伴随着亚速尔高压的增强、北大西洋暖流的缓慢增强相联系。年际变率是混合层海洋与大气发生局地热交换的结果, 由大气的扰动驱动。年代际的 SST 变暖伴有西风带的加强(该过程由海洋主导), 而年际的变暖则伴有西风带的减弱(该过程由大气主导)。一些研究发现不仅北大西洋的海温对 NAO 有显著影响, 热带大西洋海温也可能有重要作用^[50]。

近来的研究发现, 北大西洋海气相互作用存在至少两种不同的模式: 在年际尺度上, SST 距平与表层洋流局地相关性较强; 在年代际尺度上, SST 距平表现出一种动力性的、海盆宽尺度的特征, 预示着大尺度海洋环流的变化^[51]。周天军等^[52]利用海气耦合模式的模拟研究表明, 北大西洋 SST

的变化, 是受大气和海洋过程双重影响的结果, NAO 强度与 SST 的距平相关, 自北而南呈现出“ - + - ”的三核结构, 该特征在观测资料中得到证实^[52], 具体如图 3 所示; 而北大西洋温盐环流强度指数与 SST 的距平相关, 如图 4 所示, 则呈现出东、西反对称的偶极子结构。

因此, 关于温盐环流与 NAO 及气候变化的联系, 已引起高度重视^[53]。Osborn 等^[54]分析了 HadCM 2 耦合模式控制积分结果, 模式中的温盐环流也显示有年代际及世纪尺度的变化, 如模式 2680 年气候温盐环流差异明显, 之前与之后各取 150 a 平均, 强度由 20.7 Sv 增加到 22.3 Sv, 增强了 8%。伴随这种强烈变化, 拉布拉多海地区的对流更活跃, 而 Dickson 等^[55]曾指出 NAO 强时异常的北风会使拉布拉多海的对流加强, 同时格陵兰海的深对流减弱, 拉布拉多海和格陵兰海对流变化的这种反位相关系, 被人形象地称之为“海洋 NAO”。Timmermann

等^[56]的模拟研究也提出了一种温盐环流年代际变率的一种机制, 如果温盐环流强, 向北热量输送加强, 北大西洋 SST 为正距平, 大气的响应结果使 NAO 加强, 纽芬兰海和格陵兰海出现异常的淡水通量和埃克曼(Ekman)输送, 盐度下降, 对流减弱, 结果温盐环流减弱, 向北的热量输送随之减弱, 北大西洋 SST 出现负距平, 这有利于海洋中对流的发生, 其结果是再一次使 THC 加强。这样一个循环过程具有年代际时间尺度。周天军等^[52]利用海气耦合模式发现, 模式中北大西洋温盐环流存在着周期为 22 年左右的年代际振荡; 北大西洋涛动指数与北大西洋温盐环流下沉支的强度变化, 呈现出显著的负相关。Gray^[57]也强调温盐环流与 NAO 及其它气候要素的联系。不过, 有关温盐环流及其气候影响的工作, 大多是基于数值模式的, 这尚有待坚实的观测资料来证实。

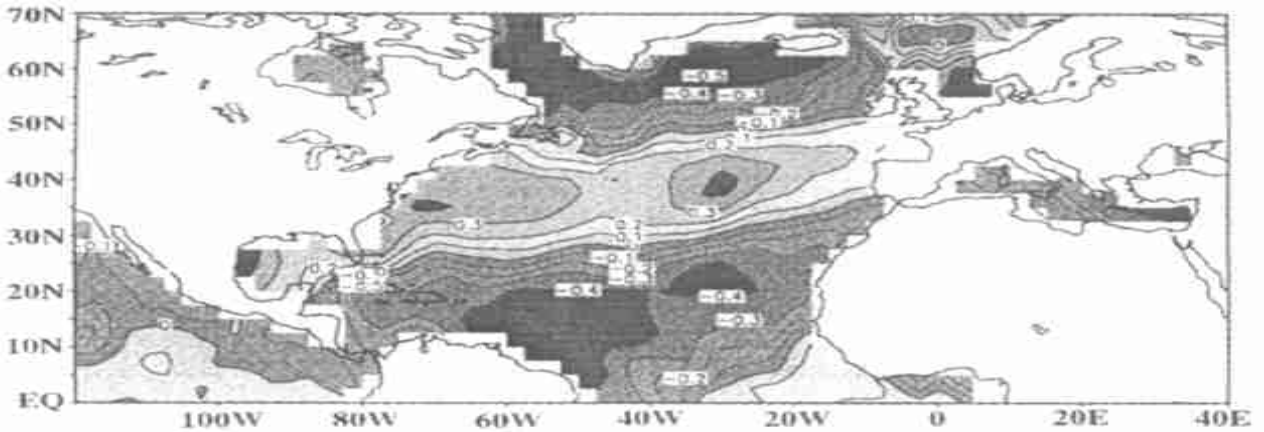


图 3 实际观测资料中 NAO 与 SST 距平的相关系数分布^[53]

Fig. 3 Correlation between the observed NAO and SST anomaly^[53].

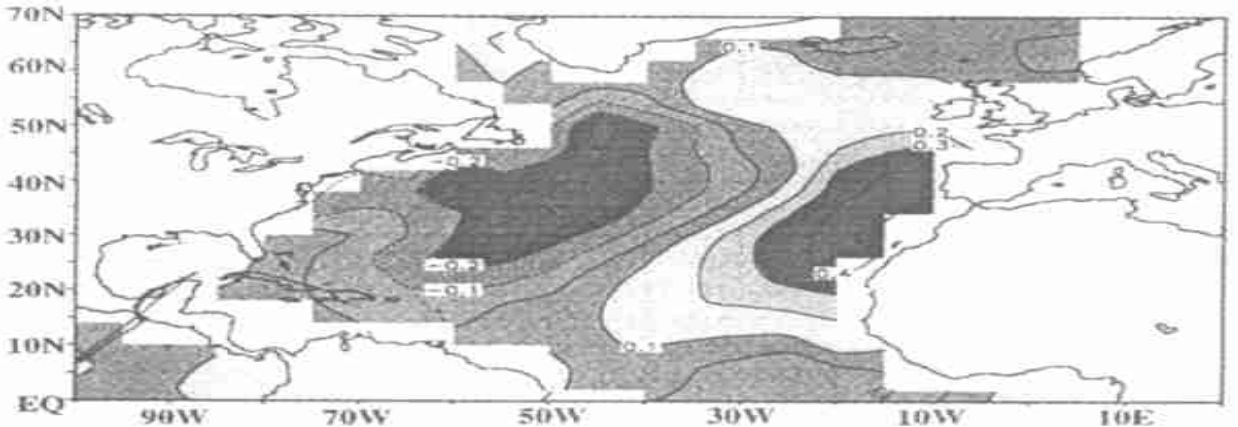


图 4 海气耦合模式模拟的北大西洋温盐环流强度指数与 SST 距平的相关分布

Fig. 4 Correlation between the thermohaline circulation index and SST anomaly in CGCM 1

3.2 外强迫

一些研究强调环流对地面气温和降水的影响,但热力状况的变化对环流的影响也是值得研究的问题。60 年代以来的NAO 增强是否与日益加强的温室效应有关呢? Hartmann 等^[58]指出,臭氧的损耗与温室变暖都有利于加强热带外地区对流层上层和平流层低层温度的经向梯度,大气环流也会有相应的变化。Osborn 等^[54]根据 1400 年模拟的结果发现,最近 30 年来NAO 的强烈增强趋势,的确是超出了自然变率(模拟变率)范围;他将其结果与Hurrell^[2]的结果相联系,认为全球变暖造成NAO 活动加强。Paeth 等^[59]用耦合模式(ECHAM-3/LSG)4 组试验集合,1985 年以前用观测CO₂ 浓度,以后采用IPCC (1990)的A 排放方案,结果发现70 年代以后CO₂ 的贡献占很大部分,达15%左右,1990—2010 年达20%左右。其它一些气候模式在温室气体强迫下也较好模拟出了近期观测到的海平面气压场上反应出的环流的增强变化,即大气环流纬向性更强,中纬西风加强。不过,不同模式对温室气体强迫下NAO 响应的趋势模拟,也还存在出入,总的看以增强结果居多^[60]。

冬季当平流层极涡增强时,NAO 和AO 的增强基本是同位相的,该事实意味着,对流层与平流层之间可能存在耦合作用,或是平流层能够向下影响到对流层^[61]。因此,除了温室效应外^[62],能够影响平流层极涡活动的一些因子,包括臭氧和热带火山爆发^[63,64]等都可能是近期NAO 或AO 变率的贡献因子。不过由于对流层和平流层大气质量差异悬殊,平流层如何影响对流层,以及影响程度有多大等问题都还需要深入研究。

参考文献(References):

- [1] Dugan S S, Kakade S B, Vema R K. Interannual and long-term variability in the North Atlantic Oscillation and Indian Summer monsoon rainfall[J]. *Theor Appl Climato*, 1997, 58 (1-2): 21-29
- [2] Hurrell J W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation [J]. *Science*, 1995, 269: 676-679
- [3] Hurrell J W. Influence of variations in extratropical wintertime teleconnections on Northern Hemisphere [J]. *Geophys Res Lett*, 1996, 23: 665-668
- [4] Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields[J]. *Geophysical Res Lett*, 1998, 25, 1 297-1 300
- [5] Wallace J M. North Atlantic Oscillation/Annular Mode: two paradigm stone phenomenon. *Quart [J]. J Royal Met Soc*, 2000, 126(564): 791-805
- [6] Thompson D W J, Wallace J M. Annular modes in the extratropical circulation, part I: month-to-month variability [J]. *J Climate*, 2000, 13(5): 1 000-1 016
- [7] Thompson D W J, Wallace J M. Annular modes in the extratropical circulation, part II: Trends [J]. *J Climate*, 2000, 13 (5): 1 018-1 036
- [8] Gong Daoyi, Wang Shaowu. Influence of the atmospheric circulation on the temperature over the northern hemisphere[J]. *Geographical Research*, 1999, 18(1): 31-38 [龚道溢,王绍武. 大气环流因子对北半球气温变化影响的研究[J]. *地理研究*, 1999, 18(1): 31-38]
- [9] WCRP (World Climate Research Program). CLIVAR Initial Implementation Plan[C]. WCRP, 1998, 103: p163-192
- [10] Hurrell J W, van Loon H. Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation [J]. *Climatic Change*, 1997, 36: 301-326
- [11] Barnston A G, He Y. Impacts of NAO on US and Canadian surface climate, implications for seasonal prediction[A]. In: *Proceedings of the 21st Annual Climate Diagnostics and Prediction Workshop*[C]. Alabama, USA, 1996. 34-37.
- [12] Barnston A G, Livezey R E. Classification, seasonality and persistence of low frequency atmospheric circulation patterns [J]. *Mon Wea Rev*, 1987, 105: 1 083-1 126
- [13] Gong Daoyi, Wang Shaowu. Comparison of the NAO indices and their interdecadal variability[J]. *Chinese J Atmospheric Sciences*, 2000, 24(2): 187-192 [龚道溢,王绍武. 北大西洋涛动(NAO)指数的比较及其年代际变率[J]. *大气科学*, 2000, 24(2): 187-192]
- [14] Rogers J C. The association between the North Atlantic oscillation and the southern Oscillation in the northern hemisphere[J]. *Mon Wea Rev*, 1984, 112: 1 999-2 015
- [15] Moses T, Kiladis G N, Diaz H F, *et al*. Characteristic and frequency of reversals in mean sea level pressure in the north Atlantic sector and their relationship to long-term temperature trends[J]. *J Climatol*, 1987, 7: 13-30
- [16] Jones P D, Jonsson T, Wheeler D. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and southwest Iceland[J]. *Int J Climatol*, 1997, 17: 1 433-1 450
- [17] van Loon H, Rogers J C. The seesaw in winter temperatures between Greenland and Northern Europe. Part I: General description[J]. *Mon Wea Rev*, 1978, 106: 296-310
- [18] Cullen H, deMenocal P. North Atlantic influence on Middle Eastern climate and water supply: an analysis using a SST-based NAO index[J]. *Climatic Change*, 2001, in press
- [19] Cook E R, D'Arrigo R D, Briffa K R. The North Atlantic Oscillation and its expression in circum-Antarctic tree-ring chronologies from North America and Europe [J]. *The Holocene*, 1998, 8(1): 9-17.
- [20] Luterbacher J, Schmutz C, Gyalistras, *et al*. Reconstruction

- of monthly NAO and EU indices back to AD 1675[J]. *Geophy Res Lett*, 1999, 26: 2 745-2 748
- [21] Barlow L K, White J W C, Barry R G, *et al*. The North Atlantic Oscillation signature in Deuterium and Deuterium excess signals in the Greenland Ice Sheet Project-2 Ice Core, 1840-1970 [J]. *Geophy Res Letters*, 1993, 20(24): 2 901-2 904
- [22] Appenzeller C, Stocker T F, Anklin M. North Atlantic Oscillation dynamics recorded in Greenland ice core[J]. *Science*, 1998, 282: 446-449
- [23] Barlow L K, Rogers J C, Serreze M C, *et al*. Aspects of climate variability in the North Atlantic sector: Discussion and relation to the Greenland Ice Sheet Project 2 high-resolution isotopic signal[J]. *J Geophy Res-Oceans*, 1997, 102(c12): 6 333-26 344
- [24] White J W C, Barlow L K, Fisher D, *et al*. The climate signal in the stable isotopes of snow from Summit, Greenland: Results of comparisons with modern climate observations[J]. *J Geophy Res-Oceans*, 1997, 102(C12): 26 425-26 439
- [25] Schmutz C, Luterbacher J, Gyalistras D, *et al*. Can we trust proxy-based NAO index reconstructions? [J]. *Geophy Res Lett*, 2000, 27(8): 1 135-1 138
- [26] Cullen H, D'Arrigo R, Cook E, *et al*. Multiproxy reconstructions of the Northern Atlantic Oscillation [J]. *Paleoceanography*, 2000, 16(1): 27-39
- [27] Stockton C W, Glueck M F. Long-term variability of the North Atlantic Oscillation (NAO) [A]. In: Preprint of the Am. Met. Soc. 10th Symposium on Global Change Studies [C]. 10-15 Jan 1999, Dallas, Texas, 1999. 290-293
- [28] Schlesinger M, Ramankutty N. An oscillation in the global climate system of period 65-70 years [J]. *Nature*, 1994, 367: 723-726
- [29] Mann M, Park J, Bradley R. Global interdecadal and century-scale oscillations during the past five centuries [J]. *Nature*, 1995, 378: 266-270
- [30] Koslowski G, Loewe P. The Western Baltic Sea ice season in terms of a mass-related severity index 1879-1992. Part I: Temporal variability and association with the North Atlantic Oscillation [J]. *Tellus*, 1994, 46A (1): 66-74
- [31] Deser C, Walsh J E, Timlin M S. Arctic sea ice variability in the context of recent wintertime atmospheric circulation trends [J]. *Journal of Climate*, 2000, 13: 617-633
- [32] Hilmer M, Jung T. Evidence for a recent change in the link between the North Atlantic Oscillation and Arctic sea ice export [J]. *Geophy Research Letter*, 2000, 27(7): 980-992
- [33] Irion R. How to steer a hurricane [J]. *Science*, 2000, 287(5 458): 1 580-1 583
- [34] Canyon D R. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans: the connection to monthly atmospheric circulation [J]. *J Climate*, 1992, 5: 354-369
- [35] Appenzeller C, Weiss A K, Staehelin J. North Atlantic Oscillation modulates total ozone winter trends [J]. *Geophy Res Lett*, 2000, 27(8): 1 131-1 134
- [36] Glowienka-Hense R. The North Atlantic Oscillation in the Atlantic-European SLP [J]. *Tellus*, 1990, 42A: 497-507
- [37] Pittakwala I I, Hameed S. Simulation of the North Atlantic oscillation in a general circulation model [J]. *Geophy Res Lett*, 1991, 18: 841-844
- [38] Shneider E K, Kinter III J L. An examination of internally generated variability in long climate simulations [J]. *Climate Dynamics*, 1994, 10: 181-204
- [39] Osborn T J, Briffa K R, Tett S F B, *et al*. Evaluation of the North Atlantic Oscillation as simulated by a coupled climate model [J]. *Climate Dynamics*, 1999, 15: 685-702
- [40] Stephenson D B, Pavan V, Bojariu R. Is the Atlantic Oscillation a random walk? [J]. *Int J Climatol*, 2000, 20(1): 1-18
- [41] Wunsch C. The interpretation of short climate records, with comments on the North Atlantic and southern oscillation [J]. *Bull Amer Met Soc*, 1999, 80: 257-270
- [42] Rodwell M J, Rowell D P, Folland C K. Oceanic forcing of the wintertime North Atlantic Oscillation and European climate [J]. *Nature*, 1999, 398: 320-323
- [43] Watanabe M, Nitta T. Decadal change in the atmospheric circulation and associated surface climate variations in the northern hemisphere winter [J]. *J Climate*, 1999, 12: 494-510
- [44] Christoph M, Ulbrich U, Oberhuber J M, *et al*. The role of ocean dynamics for low-frequency fluctuations of the NAO in a coupled ocean-atmosphere GCM [R]. Max-Planck-Institute for Meteorology. Report No. 285, 1998
- [45] Saravanan R, McWilliam S J C. Stochasticity and spatial resonance in interdecadal climate fluctuations [J]. *J Climate*, 1997, 10: 2 299-2 320
- [46] Visbeck M, Cullen H, Krahnemann G, *et al*. An ocean model's response to North Atlantic Oscillation-like wind forcing [J]. *Geophy Res Lett*, 1998, 25(24): 4 521-4 524
- [47] Delworth T L, Manabe S, Stouffer R J. Interdecadal variations of the thermohaline circulation in a coupled ocean-atmosphere model [J]. *J Climate*, 1993, 6: 993-2 011
- [48] Goodman J, Marshall J. A model of decadal middle-latitude atmosphere-ocean coupled modes [J]. *J Climate*, 1999, 12: 621-641
- [49] Bjerknes J. Atlantic air-sea interaction [J]. *Advance in Geophysics*, 1964, 10: 1-82
- [50] Trenberth K E, Branstator, Karoly D, *et al*. Ropelewski Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures [J]. *J Geophy Res*, 1998, 103: 14 291-14 324
- [51] Kushnir Y. Interdecadal variations in North Atlantic sea surface temperature and associated atmospheric conditions [J]. *J Climate*, 1994, 7: 141-157
- [52] Zhou T J, Zhang X H, Yu R C, *et al*. The North Atlantic Oscillation Simulated by Version 2 and 4 of IAP/LASG GOALS Model [J]. *Adv Atmos Sci*, 2000, 17(4): 601-616

- [53] Zhou T J, Zhang X H, Wang S W. Simulation study on the relationship between the thermohaline and climatic variability [J]. Chinese Sci Bull, 2000, 45(4): 421-425. [周天军, 张学洪, 王绍武 大洋温盐环流与气候变率的关系[J]. 科学通报, 2000, 45(4): 421-425.]
- [54] Osborn T J, Briffa K R, Jones P D, *et al* Relationships Between European Climate and the North Atlantic Oscillation: Observations, Models and Paleodata[M]. CRU/UEA GR9/02522, 1998. 1-8
- [55] Dickson R, Lazier J, Meincke J, *et al* Long-term coordinated changes in the convective activity of the North Atlantic[A]. In: Anderson D T, Willebrand J, eds Decadal Climate Variability-Dynamics and Predictability[C]. NATO ASI Series, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1996, 144: 211-261.
- [56] Timmermann A, Latif M, Voss R, *et al* Northern hemisphere interdecadal variability: a coupled air-sea mode[J]. J Climate, 1998, 11: 1906-1931.
- [57] Gray W M. Hypothesis on the cause of global multidecadal climate change[A]. In: Proceedings of the 22nd Annual Climate Diagnostics and Prediction Workshop[C]. US Department of Commerce, Berkeley, California, Oct 6-10, 1997.
- [58] Hartman D L, Wallace J M, Limpasuvan V, *et al* Can ozone depletion and global warming interact to produce rapid climate change? [J]. Proc Natl Acad Sci, 2000, 97(4): 1343-1346
- [59] Paeth H, Hense A. Climate change signals in the North Atlantic oscillation[J]. CLVAR Exchanges, 1999, 4(4): 25-29.
- [60] Fyfe J C, Boer G J, Flato G M. The Arctic and Antarctic oscillations and their projected changes under global warming [J]. Geophysical Res Lett, 1999, 26: 1601-1604
- [61] Baldwin M P, Dunkerton T J. Propagation of the Arctic oscillation from the stratosphere to the troposphere[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, 104, 30937-30946
- [62] Shindell D R, Miller R, Schmidt G A, Pandolfo L. Simulation of recent northern winter climate trends by greenhouse-gas forcing[J]. Nature, 1999, 399: 452-455
- [63] Kelly P M, Jones P D, Pengqun J. The spatial response of the climate system to explosive volcanic eruptions[J]. International Journal of Climatology, 1996, 16: 537-550
- [64] Kodera K. Influence of volcanic eruptions on the troposphere through stratospheric dynamical processes in the Northern Hemisphere winter [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 1273-1282

ADVANCE IN THE STUDIES ON NORTH ATLANTIC OSCILLATION (NAO)

GONG Dao-yi¹, ZHOU Tian-jun², WANG Shao-wu³

(1. Institute of Resources Science, Beijing Normal University, Beijing, 100875, China;

2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3. Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract The recent advances in the studies on the North Atlantic oscillation (NAO) are reviewed. Some long time series of NAO index are established using both the instrumental and proxy data. The instrumental series is now extended back to AD 1825. Proxy NAO indices reconstructed using tree ring data and/or ice core now attract more attention. Multiple-proxy reconstruction is now widely accepted for the purpose to reduce the uncertainty regarding of the individual proxy. As long as about three centuries' proxy NAO indices provide good representation of variability in natural context. The impacts of NAO on the climate are now studied in more details and have been connected to Arctic oscillation (AO). NAO and AO are the two paradigms of one phenomenon. Some model studies confirm that the thermohaline circulation (THC) may play very important role in the low frequency of NAO. Some other external forces such as ozone and greenhouse warming are also considered as potential contributor to the observed recent trends in NAO.

Key words North Atlantic Oscillations; NAO; Variability.