科学通报 2010 年 第 55 卷 第 19 期：1932 ~ 1936
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

近千年的大气涛动

黄建斌[①], 王绍武[①], 龚道溢[②], 周天军[③], 闻新宇[①], 张自银[②], 朱锦红[①]

① 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871;
② 北京师范大学资源学院, 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875;
③ 中国科学院大气物理研究所, 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029
E-mail: hjb@pku.edu.cn

2009-11-11 收稿, 2010-03-17 接受
财政部/科技部公益类行业专项(GYHY200706010)、“十一五”国家科技支撑计划(2006BAC03B03)和中国博士后科学基金(4131482-051)资助项目

摘要 总结了近千年大气涛动的变化, 即北大西洋涛动(NAO)、北太平洋涛动(NPO)或太平洋年代振荡(PDO)、南方涛动(SO)、南极涛动(AAO). 首先利用观测资料比较研究了近百年(1900~2000年)涛动的变化. 指数相关系数表明, AAO 与 NAO 或 NPO 有相对的独立性, 但是 20 世纪的低频变化则有某种程度的一致性: 1920~1940 年和 1980~2000 年各涛动均以正位相为主, 1940~1980 年负位相占优势. 根据代用资料建立的 1000~2000 年涛动序列表明, 涛动变化随时间各有不同: NAO 的正位相出现在前期, PDO 和 ENSO 的正位相在中、后期, AAO 的正位相主要在后期. 此外, 近 500 年 ENSO 的变率有增强的趋势, 同时 ENSO 增强, AAO 增强.

关键词
大气涛动
气候变率
ENSO 变率
中世纪暖期
小冰期

大气涛动是大气环流在海平面气压图上的表现. 20 世纪 30 年代, 沃克总结了前人的研究, 提出“世界天气”的概念, 给出北大西洋涛动(NAO)、北太平洋涛动(NPO)及南方涛动(SO)的定义. 每个涛动均由两个大气活动中心, 即一个高压与一个低压中心组成. 两个大气活动中心的气压此起彼伏, 呈跷跷板式变化.

大气涛动的研究在 20 世纪后期及 21 世纪初有了蓬勃的发展[1]. 先是把涛动变化与区域气候变化联系起来. 最著名的是 Bjerknes[2]把 SO 与 El Niño 联系起来, 成为近 40 年大气科学与海洋科学交叉的结合点 ENSO; 另一个例子就是太平洋/北美型(PNA)[3]. 然后, 把大气涛动研究推向对流层乃至平流层并且提出北极涛动(AO)[4]. 四大涛动覆盖了全球大部分海洋面积, 并且对邻近陆地的气候有重要的影响.

大气涛动研究的一个新的发展就是用各种代用资料重建过去几百年到千年的大气涛动序列. 这方面的研究有以下几个重要意义: (1) 由于大气涛动是控制一个地区, 例如北大西洋气候的主要环流机制, 因此大气涛动的变化反映了一个地区的气候变化的宏观特征. (2) 由于大气涛动是造成气候异常的直接原因, 如 NAO 强时北欧气候暖湿, 因此研究大气涛动变化有助于认识局地或区域气候变化的特征和规律. (3) 研究千年大气涛动变化有助于认识自然气候变率的形成机制与原因.

本文的目的是综合研究近千年四大涛动的变化. 首先, 利用观测资料分析了 20 世纪四大涛动的变化; 然后以此为基础, 对四大涛动近千年的变化, 特别是在中世纪暖期与小冰期的表现进行了着重讨论.

1 20 世纪的大气涛动

1.1 资料

NAO: 用葡萄牙的 Lisbon 与冰岛 Stykkish-omur/Reykjavik 的标准化海平面气压差表征 NAO[5].

NPO: 用 30°~65°N, 160°E~140°W 范围内平均海平面气压作为 NPO 的指数, 称为 NPI[6]. 为了与 PDO 一致, 本文取负 NPI.

PDO(太平洋年代际振荡): 用 20°N 以北太平洋 SST(海表面温度)的 EOF1 时间系数[7]来表示.

英文版见: Huang J B, Wang S W, Gong D Y, et al. Atmospheric oscillations over the last millennium. Chinese Sci Bull, 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-010-3210-8

ENSO: 用 ENSO 级别序列, 自 3~–3 共 7 级. El Niño 强、中、弱分别用 3, 2, 1 表示, La Niña 强、中、弱分别用–3, –2, –1 表示, 0 表示正常[8].

SOI: 用 Tahiti 与 Darwin 两次标准化的气压差[9], 从当年 5 月到下一年 4 月平均代表当年. 为了与 ENSO 一致, 取负 SOI.

AAO: Gong 和 Wang[10]用 40°~65°S 气压差来定义 AAO. 现在有两个百年以上的序列: 一个是 Marshall[11]用 40°S 及 65°S 附近各 6 个站的平均海平面气压差建立的; 另一个是由 Visbeck[12]用南极(AN)20 个站、南非(AF)6 个站、澳大利亚-新西兰(AU)10 个站及南美(SA)7 个站求区域平均. 副热带平均 ST=(SA+AF+AU)/3. AAO=ST–AN. 早期 AN 资料不足, 用 58°S 以南的平均海平面气压乘以–1 代表 AN. 这里用 Visbeck 的序列.

1.2 近百年涛动变化

为了比较, 对上述 6 个序列, 各自先对 1900~2000 年标准化. 距平见图 1. 表 1 给出了 6 个序列之间的交叉相关系数.

由图 1 及表 1 可以得到如下结论: (1) NPO 与 PDO 有较高的相关(0.58), ENSO 与 SOI 的相关更高(0.81); (2) 四大涛动之间仅 ENSO 与 NPO 有一定正相关(0.17), ENSO 与 AAO 有一定负相关(–0.24), 其余相关均较弱, 表现出四大涛动之间的相对独立性; (3) 近百年四大涛动的变化不一致. 但是低频变化, 1920~1940 年及 1980~2000 年各大涛动以正位相为主, 1940~1980 年以负位相为主. 此变化与全球气候变暖有没有联系值得进一步研究.

1.3 四大涛动的相对独立性

图 2 给出了四大涛动所分别能解释的海平面气压方差[13]. 可以看出, 每个涛动影响的地理范围基本不重合. 这与 20 世纪 30 年代 Walker 最早提出涛动定义时的概念是一致的. Walker“世界天气”研究的目的就是要找到控制一个地区气候的环流机制, 而且很明确地指出, NAO 与 NPO 基本上是彼此独立的.

2 近千年的大气涛动

2.1 资料

近来有不少大气涛动的重建序列发表, 有的长度达到千年. 这里仅采用 4 个达到千年的序列.

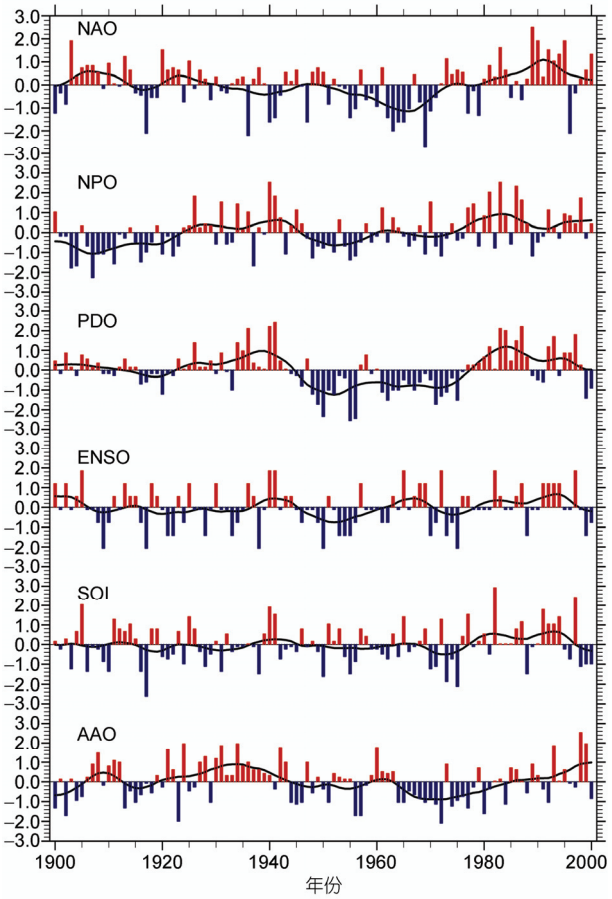

图 1 1900~2000 年经标准化的涛动指数的年距平序列
实曲线为 11 点滤波曲线

表 1 1900~2000 年大气涛动年距平之间的交叉相关系数 a)

	NAO	NPO	PDO	ENSO	SOI	AAO
NAO	1.00	–0.11	0.00	–0.10	–0.05	0.09
NPO		1.00	0.58	0.17	0.17	–0.01
PDO			1.00	0.45	0.38	0.08
ENSO				1.00	0.81	–0.24
SOI					1.00	–0.23
AAO						1.00

a) 置信度 95%, 99%及 99.9%的相关系数绝对值为 0.197, 0.256 及 0.324

NAO: NAO 与摩洛哥降水负相关, 与苏格兰降水正相关. 因此, 利用摩洛哥树木年轮及苏格兰石笋重建了 1050 年以来的 NAO 序列[14].

PDO: PDO 与北美西南部的降水正相关, 与美国西北到加拿大降水负相关. 因此, 用这两个地区的树木年轮重建 993~1996 年的 PDO 序列[15].

ENSO: 前期根据尼罗河干旱, 后期根据南美降水建立的 El Niño 序列. Diaz 等人[16]对这个序列做奇

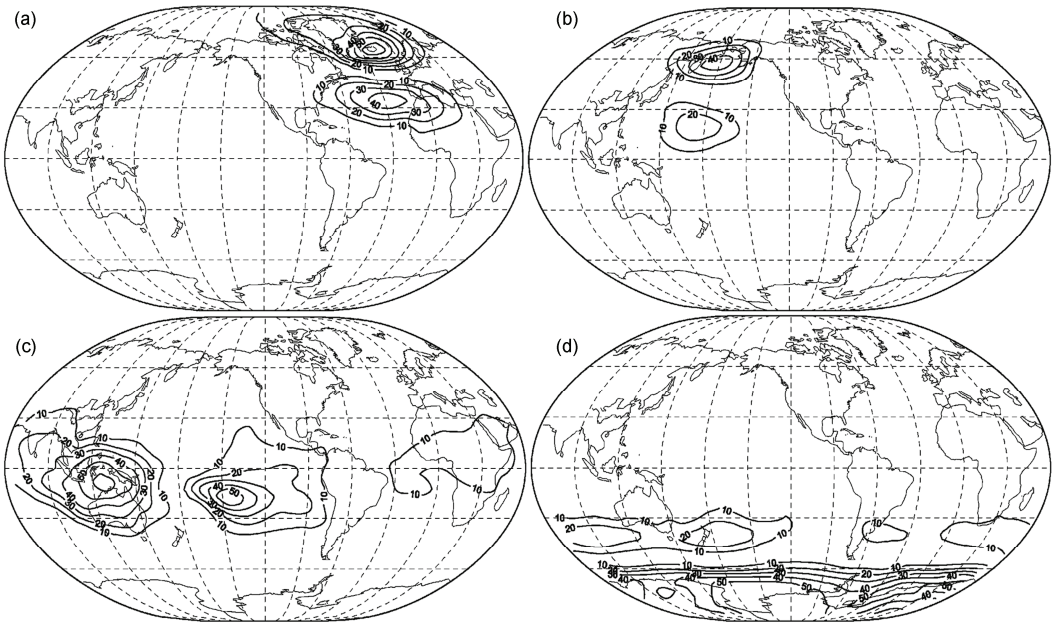

图 2 四大涛动每个涛动所能解释的海平面气压方差(%)
(a) NAO; (b) NPO; (c) SO; (d) AAO

异谱分析, 这里把 25~150 及 11~25 a 两个波段的奇异谱系数合起来, 代表 ENSO. 由于目前还没有建立长达千年的 SOI 序列, 所以用这个序列.

AAO: 环南极的西风带与南美南部的降水有很高的正相关[17,18]. 因此, 利用安第斯山东侧巴塔哥尼亚干旱草原湖泊沉积的δ^{13}C 重建近千年降水量序列. 由于西风强时降水量大, 西风弱时降水量小, 所以可以用来表征西风强度, 即反映了 AAO[19].

同样对上述 4 个序列分别对 1000~2000 年标准化. 所有序列均已做低频滤波, 每 10 年(即 1000, 1010, 1020, …)取一个值, 绘为图 3.

2.2 近千年涛动变化

显然, 近千年四大涛动的变化也表示出相当大的独立性. 表 2 显示, NAO 与 PDO 有弱的负相关, ENSO 与 PDO 有正相关, 与 AAO 也有正相关. AAO 与 NAO 或 PDO 则没有任何关系. 图 3 显示, 四大涛动正位相出现时期不同, NAO 在前期, PDO 及 ENSO 在中、后期, 而 AAO 在后期.

表 2 1000~2000 年大气涛动之间的交叉相关数 a)

	NAO	PDO	ENSO	AAO
NAO	1.00	–0.22	–0.10	–0.01
PDO		1.00	0.39	0.03
ENSO			1.00	0.31
AAO				1.00

a) 数据量相同, 所以信度标准与表 1 相同

2.3 中世纪暖期与小冰期

一般认为 900~1300 年为中世纪暖期(Medieval Warm Period, MWP), 但是也有不少作者宁肯采用中世纪气候异常(Medieval Climate Anomaly)这个名词[14]. 对起讫时间也有不同见解. 从图 3 和表 3 可见, 在 MWP 期间 AAO 基本上处于中间状态, NAO 强, PDO 弱, ENSO 呈类 La Niña 状态; 而在 LIA 期间, NAO 弱, PDO 强, AAO 也弱, ENSO 呈类 El Niño 状态. 这与 MWP 太阳辐射增加多出现类似 La Niña 状态, LIA 太阳辐射减少多出现类似 El Niño 状态的观点是一致的[20].

2.4 ENSO 变率

Fowler 和 Boswuk[21]研究了近 500 年 ENSO 的变率. 发生 El Niño 时, 新西兰树轮宽, 发生 La Niña 时树轮窄. 所以, 树轮可以很好地反映 ENSO 的变率. 近百年根据树轮建立的 31 a 年标准差序列与 SOI 序列的标准差变化趋势十分一致, 20 世纪中前期有一个变率谷值, 20 世纪初及后期变率最高. Wang 等人[8]曾重建了近 500 年 ENSO 序列. 根据这个序列所做的 31 a 标准差与 Fowler 和 Boswnk 的结果相似. 两者之间的

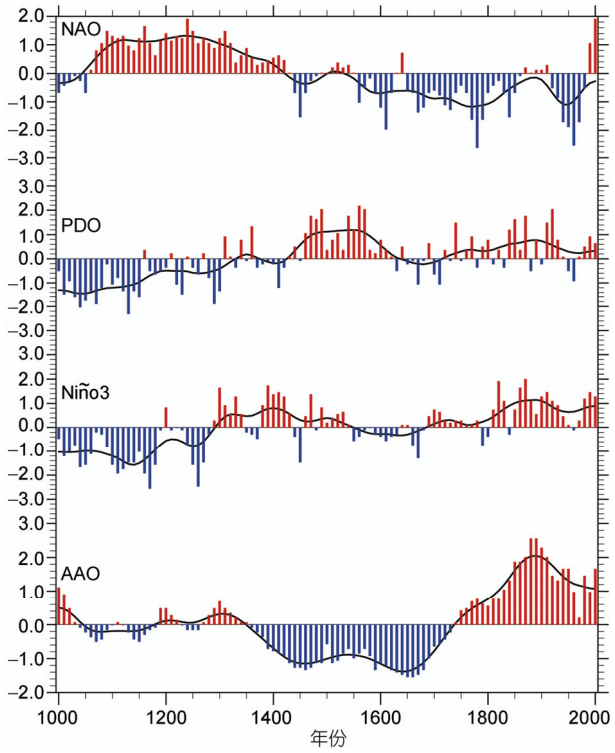

图 3　1000~2000 年标准化大气涛动 10 a 距平序列

实曲线为 11 点滤波曲线

表 3　MWP 和 LIA 期间的大气涛动状况

编号	大气涛动	MWP	LIA	作者
1	NAO	强	弱	Trouet 等人[14]
2	PDO	弱	强	MacDonald 等人[15]
3	ENSO	类 La Nina	类 El Niño	Diaz 等人[16]
4	AAO	中间状态	弱	Moreno 等人[18]

相关系数达到 0.55(表 4). 图 4(a)和(b)为两个 ENSO 变率序列. 可以看出, 自 1500~2000 年变率有上升趋势, 16~17 世纪 ENSO 相对平静. 图 4(c)和(d)为 Villalba[22] 建立的 AAO 序列和 Diaz 等人[16]建立的 ENSO 序列. 可见近 500 年 ENSO 变率增加的趋势与 AAO 和 ENSO 加强的趋势一致. 类似 El Niño 状态时 ENSO 变率高, 这同 Mann 等人[20]的结论一致.

3　结论

本文首先利用观测资料对近百年来的大气涛动活动进行了研究, 并以此为基础, 对代用资料重建的近千年大气涛动进行了比较分析, 着重讨论了 MWP 和 LIA 期间涛动的活动状况, 得到以下主要结果.

(ⅰ) 从交叉相关系数来看, 20 世纪四大涛动年际变率有相对的独立性, 特别是 AAO 与 NAO 或 PDO 之间的相关性很小.

(ⅱ) 尽管 20 世纪每个涛动的时间变化均有自己的特征, 但是在 1920~1940 年及 1980~2000 年期间正位相占优势, 1960~1980 年期间负位相占优势. 这是否与全球变暖的趋势有关值得注意和研究.

(ⅲ) NAO 与 PDO 的变化在千年尺度上呈一定相反趋势. 在 MWP 期间, NAO 强, PDO 弱; 在 LIA 期间, NAO 弱, PDO 强.

(ⅳ) MWP 期间盛行类 La Niña 状态, LIA 期间盛行类 El Niño 状态, 15, 17, 19 世纪最明显.

(ⅴ) 近 500 年 ENSO 的变率与 AAO 及 ENSO 均有增长的趋势.

表 4　1500~2000 年 SOI, ENSO 变率(SOISTD, ENSOSTD) 和 AAO 与 ENSO 的相关系数

	SOISTD	ENSOSTD	AAO	ENSO
SOISTD	1.00	0.55	0.61	0.29
ENSOSTD		1.00	0.30	–0.06
AAO			1.00	0.36
ENSO				1.00

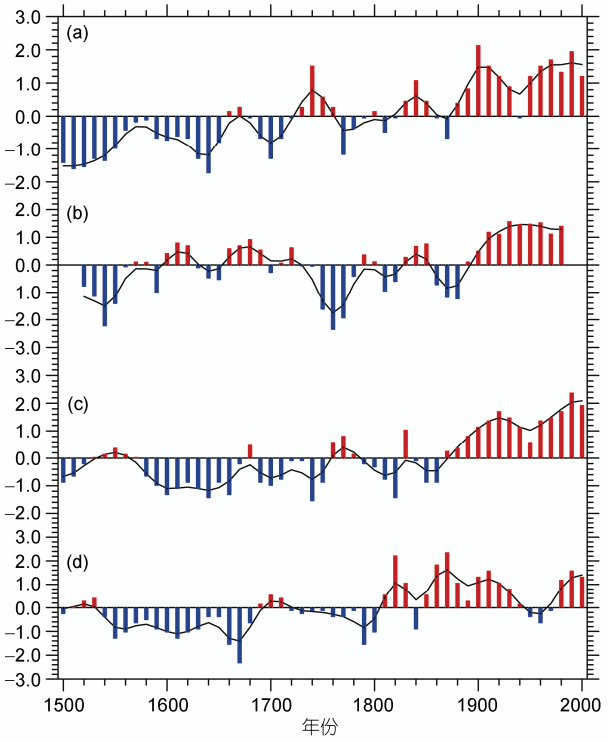

图 4　1500~2000 年 SOI (a)与 ENSO (b)变率、AAO (c) 与 ENSO (d) 10 a 平均值的变化

实曲线为 5 点滤波曲线

参考文献

1 Trenberth K E, Jones P D, Ambenje P, et al. Observations: Surface and atmospheric climate change. In: Solomon S, Qin D, Manning M, et al, eds. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2007. 235—335

2 Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. Mon Wea Rev, 1969, 97: 163—172

3 Wallace J M, Gutzler D S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. Mon Wea Rev, 1981, 109: 784—812

4 David W J Thompson, Wallace J M. The arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. Geophys Res Lett, 1998, 25: 1297—1300

5 Hurrell J W, Kushnir Y, Ottersen G, et al. An overview of the North Atlantic Oscillation. In: Hurrell J W, ed. The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact. Washington D C: American Geophysical Union, 2003, 134. 1—35

6 Deser C, Phillips A S, Hurrell J W. Pacific interdecadal climate variability: Linkages between the tropics and the north Pacific during boreal winter since 1900. J Clim, 2004, 17: 3109—3124

7 Mantua N J, Hare S R. The pacific decadal oscillation. J Oceanogr, 2002, 58: 35—44

8 Wang S W, Zhu J H, Cai J N, et al. Reconstruction and analysis of time series of ENSO for the last 500 years. Prog Nat Sci, 2004, 14: 1074—1079

9 Trenberth K E, Caron J M. The Southern Oscillation revisited: Sea level pressures, surface temperatures and precipitation. J Clim, 2000, 13: 4358—4365

10 Gong D Y, Wang S W. Definition of Antarctic oscillation index. Geophys Res Lett, 1999, 26: 459—462

11 Marshall G J. Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalysis. J Clim, 2003, 16: 4134—4143

12 Visbeck M. A station-based Southern Annular Mode Index from 1884 to 2005. J Clim, 2009, 22: 940—950

13 龚道溢, 王绍武. 大气涛动对全球低层大气环流的贡献. 高原气象, 2000, 16: 148—154

14 Trouet V, Esper J, Graham N E, et al. Persistent positive North Atlantic Oscillation mode dominated the Medieval Climate Anomaly. Science, 2009, 324: 78—80

15 MacDonald G M, Case R A. Variations in the Pacific Decadal Oscillation over the past millennium. Geophys Res Lett, 2005, 32: L08703

16 Diaz H F, Pulwarty R S. An analysis of the time scales of variability in centuries-long ENSO-sensitive records in the last 1000 years. Clim Change, 1994, 26: 317—342

17 Mayr C, Wille M, Haberzettl T, et al. Holocene variability of the Southern Hemisphere westerlies in Argentinean Patagonia (52°S). Quat Sci Rev, 2007, 26: 579—584

18 Moreno P I, Françsois J P, Villa-Martínez R P, et al. Millennial-scale variability in Southern Hemisphere westerly wind activity over the last 5000 years in S W Patagonia. Quat Sci Rev, 2009, 28: 25—38

19 Mayr C, Fey M, Haberzettl T, et al. Palaeoenvironmental changes in southern Patagonia during the last millennium recorded in lake sediments from Laguna Azul (Argentina). Palaeogeogr Palaeoclim Palaeoecol, 2005, 228: 203—227

20 Mann M E, Cane M A, Zebiak S E, et al. Volcanic and solar forcing of the tropical Pacific over the past 1000 years. J Clim, 2005, 18: 447—456

21 Fowler A, Boswuk G. Five centuries of ENSO history recorded in Agathis australis (kauri) tree rings. PAGES News, 2007, 15: 20—21

22 Villalba R. Tree-ring evidence for tropical-extra tropical influences on climate variability along the Andes in South America. PAGES News, 2007, 15: 23—25