李忠燕, 罗德海. 2013. 热带季节内振荡与北大西洋涛动年际变化的关系 [J]. 气候与环境研究, 18 (4): 436-450, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012. 11212. Li Zhongyan, Luo Dehai. 2013. Relationship between Madden-Julian oscillation and interannual variability of the North Atlantic Oscillation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (4): 436-450.

热带季节内振荡与北大西洋涛动年际变化的关系

李忠燕^{1,2} 罗德海³

1 贵州省气候中心,贵阳 550002

2 中国海洋大学海洋环境学院,青岛 266100

3 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候一环境重点实验室,北京 100029

摘 要 运用 K 均值聚类法将冬季北大西洋及欧洲地区的天气流型分为 4 种不同的 流型。研究了不同阶段 8 种不同位相的热带季节内振荡(MJO)与这 4 种流型的年际变化的关系。通过一系列的对比试验发现, K 均值聚类法划分得到的不同位相的北大西洋涛动(NAO)的天数能很好地反映 NAO 指数;无论是在 1978~1990 年(简称为 P1 阶段)还是在 1991~2010 年(简称为 P2 阶段), MJO 第 3(6)位相影响 NAO 正(负)位相;但在 P1 阶段存在 NAO 的位相转换,当 MJO 处于第 1 位相时,NAO 由弱的负位相转换为正位相,当 MJO 处于第 6 位相时,NAO 由正位相转换为负位相;而在 P2 阶段 NAO 并没有明显的位相转换,当 MJO 处于第 1 位相时,NAO 由偶极子结构转换为波列结构。

关键词 北大西洋涛动 (NAO) 热带大气季节内振荡 (MJO) K均值聚类 年际变化
文章编号 1006-9585 (2013) 04-0436-15 中图分类号 P434 文献标识码 A doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11212

Relationship between Madden–Julian Oscillation and Interannual Variability of the North Atlantic Oscillation

LI Zhongyan^{1, 2} and LUO Dehai³

1 Guizhou Climate Center, Guiyang 550002

2 College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100

3 Key Laboratory of Regional Climate–Environment for East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Using K-means clustering algorithms, four weather regimes over the North Atlantic–European region are obtained. Moreover, the relationship between the Madden–Julian Oscillation (MJO) in the tropics and the four weather regimes over the North Atlantic–European region is investigated. It is found that the winter mean North Atlantic Oscillation (NAO) index can be characterized by the number of days of NAO events calculated by K-means clustering algorithms. During two periods, 1978–1990 (P1) and 1991–2010 (P2), phase 3 (6) of the MJO leads to a positive (negative) NAO regime. In particular, the MJO is found to be very important for the NAO transition during P1, but unimportant during P2. When the MJO is within the first (sixth) phase during P1, the NAO event can transit from the weak negative (positive) phase to the positive (negative) phase. However, only the transition between dipole and wave train patterns is evident during P2, when the MJO is in the first phase.

Keywords North Atlantic Oscillation (NAO), Madden-Julian Oscillation (MJO), K-means clustering algorithms, Interannual variability

收稿日期 2011-12-31 收到, 2012-07-04 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 41075042,中国科学院百人计划项目 y163011,贵州省科学技术基金项目(黔科合 J 字[2010]2058 号)

作者简介 李忠燕,女,1986年出生,硕士,主要从事北大西洋涛动研究。E-mail: 523257762@qq.com

1 引言

热带大气季节内振荡(Madder-Julian Oscillation, MJO)通常是指近赤道地区向东传播,纬向为一个 波数,热带风场表现出斜压结构的大气 30~60 d 周 期的低频振荡现象(Madden and Julian, 1971, 1972; 李崇银等,2003)。MJO 是大气环流的一个重要组 成部分,它对全球短期气候和长期天气的变化有着 极其重要的作用(李崇银,1990)。北大西洋涛动

(North Atlantic Oscillation, NAO) 是指北大西洋上 冰岛低压与亚速尔高压的气压变化之间存在的一 种南北向"跷跷板"现象,即当亚速尔地区气压偏高 时,冰岛地区的气压偏低,反之当冰岛地区气压偏 高时,亚速尔地区的气压偏低。在全球气候系统中, NAO 占有重要的位置。它不仅直接影响北大西洋及 附近地区的气候,甚至对整个北半球的气候都有重 要影响。Wu et al. (2009)通过观测和数值试验指 出春季异常的 NAO 对东亚夏季风有重要影响,且 NAO 对近 30 年东亚夏季风与 ENSO (El Niño-Southern Oscillation)之间的关系的加强有重要作用

(Wu et al., 2011)。通常当 NAO 强时,格陵兰岛 以西及南欧偏冷,欧洲北部和美国东部偏暖,欧洲 降水偏多,而地中海地区则降水偏少,反之亦然 (Hurrell, 1995)。此外,康杜鹃和王会军(2005) 在研究我国北方沙尘气候形势的变化时发现 NAO 指数以及前冬的北半球西风指数与中国北方沙尘 活动的频次存在显著的负相关关系。

Michelangeli et al. (1995)利用动 K 均值聚类 分析法指出北大西洋地区的天气流型的聚类指数 为 4,即北大西洋地区的天气流型分为 4 种。Cassou (2008)将这 4 种流型分别定义为 NAO 正位相型、 NAO 负位相型、大西洋高脊型以及斯堪的纳维亚阻 塞高压型。同时 Cassou (2008)基于波破碎理论指 出 MJO 超前于并控制部分 NAO 位相,并对 NAO 位相的分布有一定的影响。Lin and Brunet (2009) 指出与 MJO 相关的对流异常到达赤道印度洋和西 太平洋地区 5~15 d 后,NAO 的振幅会增加并且 MJO 的某些特定位相超前于 NAO 事件。Li et al. (2006)研究海气耦合对热带印度洋增暖的响应时 发现热带印度洋增暖会加剧 NAO 的正位相强度。

Archambault et al. (2010)研究表明,当 NAO 由正位相转换为负位相时,美国东北地区降水显著

增加,而当 NAO 由负位相转换为正位相时,美国 东北地区降水减少。由此可见,NAO 位相转变时会 对天气造成重大的影响。因此,探索 NAO 位相转 换事件的影响因子对于理解与 NAO 事件有关的天 气、气候变化,以及对理解 NAO 变率的情况都有 很重要的意义。Luo et al. (2012a, 2012b)利用 NAO 日指数资料对 NAO 位相转换事件在不同阶段 的特征进行了诊断分析,指出大尺度异常环流场的 西退是 NAO 位相转换的主要原因。李忠燕和罗德 海(2012)利用一个非线性正压模型数值研究了基 本西风气流、大尺度双波地型以及天气尺度波这 3 个局地因子对 NAO 位相转换的影响,但外强迫因 子(如 MJO)会对 NAO 位相转换有着怎么样的影 响,这值得我们去探讨。

观测研究(Luo et al., 2011)表明: NAO 冬季 平均指数在 1978~1990 年(简称为 P1 阶段)呈现 上升趋势,而在1991~2010年(简称为P2阶段) 呈现下降趋势。Luo et al. (2011) 通过推广 Luo et al. (2007)的弱非线性 NAO 模式指出在 P2 阶段 NAO 正位相频繁转换为负位相,并指出 NAO 的位相转 换可能是由于风暴轴(storm-track)增强,欧洲大 陆阻塞西退使 NAO 位相发生转换,导致在 P2 阶 段 NAO 冬季指数呈现下降趋势, 但在 P1 阶段风暴 轴很弱,所以我们猜测是其他因子如热带 MJO 可 能与 NAO 的位相转换有关。为了证实我们的猜 测,我们研究在这两个不同的阶段热带 MJO 与 NAO 的年际变化的关系。所以本文采用聚类分析法 将两个阶段冬季5个月的位势高度异常场进行聚类 分类, 然后讨论不同阶段 4 种流型以及 MJO 不同 位相的特征。同时讨论了不同位相的 MJO 与 NAO 位相转换的关系。

2 资料和方法

本文使用的资料为: NCEP/NCAR 高度场的逐 日再分析资料[2.5°(纬度)×2.5°(经度)](Kalnay et al., 1996)和 NOAA 逐日向外长波辐射(OLR) 资料[2.5°(纬度)×2.5°(经度)](Gruber and Krueger, 1984),以及热带地区大气季节内振荡双变指数 (RMM)(Wheeler and Hendon, 2004)和 NCAR 用来指示 NAO 变化的指数 (Barnston and Livezey, 1987),此数据是对 700 hPa 高度场进行旋转经验正 交函数(REOF)分解得到的,它对应第一主分量 的时间系数。

为了证实热带 MJO 与 NAO 的年际变化的关 系,使用 K 均值聚类分析法(Michelangeli et al., 1995)进行分析。另外,本文还使用了合成分析等 常用资料统计与分析方法。

3 结果与分析

3.1 北大西洋地区 4 种天气流型的特征

K 均值聚类算法运行前必须先指定聚类数目 和迭代次数或收敛条件,根据指定的初始聚类中 心,根据一定的相似性度量准则,将每一事件分配 到最近或"相似"的聚类中心,形成类,然后以第 一类的平均量作为这一类的聚类中心,再将资料重 新分配,反复迭代直到类收敛或达到最大迭代次 数。K 均值聚类分析法对初始聚类中心的依赖性比 较大。Michelangeli et al. (1995)利用动 K 均值聚 类分析法指出北大西洋地区的天气流型的聚类指数 为4,即北大西洋地区的天气流型分为4种。Cassou (2008)将这4 种流型定义分别为 NAO 正位相 型、NAO 负位相型、大西洋高脊型以及斯堪的纳 维亚阻塞高压型。

基于这种分类方法,将 P1、P2 两个阶段冬季 5 个月的高度异常场进行聚类处理并统计出每个月 4 种流型的天数,将天数与 NAO 月指数进行对比, 得到图 1 和图 2。从两幅图中可以看出,无论是 P1 阶段还是 P2 阶段, NAO 正位相型的比例始终大于 NAO 负位相型,这一结果与 Hurrell(1995)发现 的 NAO 指数在 1980 年后由 NAO 负位相为主转换 为以 NAO 正位相为主这一结论相同。从 P1 阶段到 P2 阶段, NAO 负(正) 位相型出现的频率基本没 有大的变化,但 NAO 正、负位相型的活动中心位 置以及高低压中心值有所变化。表现为相对于 P1、 P2 阶段 NAO 正位相型中的异常低压下降明显,并 且异常低压中心明显东移;同时 P2 阶段 NAO 正位 相型异常低压中心值略有下降,但异常高压中心位 置有所东移。这是因为年代际尺度上, NAO 冬季 平均指数在 P1 阶段呈现上升趋势, 而在 P2 阶段 呈现下降趋势而且 NAO 高纬度的距平中心有东移 的特征。Luo et al. (2010a, 2010b)认为这可能与 急流位置和风暴轴的年代际东移有关。P2 阶段大 西洋高脊型出现的频率虽略有下降,但异常高压值 明显上升并且位置偏东; P2 阶段斯堪的纳维亚阻

塞型的异常高压中心值明显上升且位置较 P1 阶段 偏西,以及异常低压中心值明显下降。这些条件都 有利于 NAO 由正位相转换为负位相。从图 1e 和图 2e 来看,K均值聚类法产生的 NAO 正、负位相型的 天数与 NAO 的月指数匹配得很好,说明 K 均值聚 类法产生的 NAO 正、负位相型的天数在一定程度上 可以反映出 NAO 月指数的大小以及 NAO 的位相。

3.2 MJO 8 种位相及其特征

热带地区大气季节内振荡双变指数(RMM1、 RMM2)(Wheeler and Hendon, 2004)在相空间坐标中可以反映 MJO的位相,而 $\sqrt{\text{RMM1}^2 + \text{RMM2}^2}$ 可以反映 MJO 振幅的大小。除去弱的 MJO 个例,也就是其振幅值小于 1 的个例,我们根据 P1、P2 阶段 RMM 值的大小,统计出 MJO 不同位相的个数 及振幅的平均值,得到表 1、表 2。

表 1 P1 阶段 MJO(热带季节内振荡)不同位相的天数、 频率及其振幅的平均值

Table 1Number of days and averaged amplitude for eachphase of the MJO (Madder-Julian Oscillation) during theperiod of P1 (1979–1990)

位相	天数 (d)	频率	平均振幅
1	128	11%	1.79
2	159	13.7%	1.78
3	169	14.6%	1.95
4	112	9.6%	1.95
5	98	8.4%	1.83
6	148	12.8%	1.60
7	195	17.1%	1.59
8	148	12.8%	1.64

表 2 与表 1 相同,但是为 P2 阶段的结果

Table 2Same as table 1, but during the period of P2(1991-2010)

()			
位相	天数 (d)	频率	平均振幅
1	169	8.7%	1.67
2	223	11.4%	1.67
3	298	15.3%	1.82
4	265	13.6%	1.65
5	253	13%	1.67
6	270	13.9%	1.75
7	251	12.9%	1.82
8	218	11.2%	1.76

从表 1、表 2 中可以看出在 P1 阶段, MJO 第 2~3 位相以及第 6~8 位相出现的频率很高, 而 MJO 振幅最大出现在第 3~4 位相, 这与位于印度 洋和印度尼西亚岛屿间暖池上空的对流增强有关。而 在 P2 阶段, MJO 第 3~7 位相出现的频率很高, 而



图 1 P1阶段冬季 5 个月(11~3月)4 种流型北大西洋地区 300 hPa 位势高度异常(单位:gpm)场,百分数表示每种流型所占的比例:(a) NAO (北大西洋涛动)正位相型(NAO+);(b) NAO 负位相型(NAO-);(c)大西洋高脊型;(d)斯堪的纳维亚阻塞高压型。P1阶段每个月(e) NAO 指数和 NAO+与 NAO-两种流型天数的时间序列以及(f)斯堪的纳维亚型阻塞型与大西洋脊型天数的时间序列

Fig. 1 The 300-hPa geopotential height anomalies (gpm) over the North Atlantic during the period of P1 (November to March), the percentage at the top right of each panel gives the global population of a given cluster over the whole period: (a) Positive phase of NAO (North Atlantic Oscillation) (NAO+); (b) negative phase of NAO (NAO-); (c) Atlantic ridge; (d) Scandinavian blocking. (e) Time series of the days of NAO+ and NAO-, the NAO index, and (f) the days of the Scandinavian blocking pattern and Atlantic ridge pattern during the period of P1

MJO 振幅最大出现在第3位相和第7位相。

NOAA逐日长波辐射(OLR)资料(Gruber and Krueger, 1984)为卫星观测地气系统向外长波辐射 资料,由于OLR可精确描述地(海)表观测记录 稀少的热带天气系统,也可以反映对流发展的强

弱、大尺度垂直运动的信息等,在现代气候分析和 预测中已得到广泛的运用。蒋尚城和温士顿(1989) 认为,在低纬地区OLR低于225 W/m²所包围的区域 常为对流活跃区和降水区,对应ITCZ(赤道辐合带) 区域;而OLR高于250 W/m²所包围的区域为大规模



图 2 同图 1,但为 P2 阶段 Fig. 2 Same as Fig.1, but during the period of P2

下沉干区,对应副热带高压区域。

根据强 MJO 指数 RMM,将 300 hPa OLR 异常 场分阶段分位相进行统计,得到图 3、图 4。从两 幅图中均可以看出,从位相 1 开始,对流活跃区和 降水区在非洲与印度洋西部地区开始发展,随后, 对流活跃区和降水区沿着赤道向东移动并不断发 展。当 MJO 位于第 3~4 位相时即对流活跃区和降 水位于印度洋与印度尼西亚地区时,对流活跃区和 降水区最大最强。当 MJO 位于第 5 位相时即对流 活跃区和降水区位于西太平洋地区时,一个下沉干 区开始在非洲与印度洋西部地区形成。当 MJO 位 于第 6~8 位相(2~4 位相)时,位于太平洋中部 的对流活跃区和降水区增强(减弱)。但 P1 阶段 MJO 位于第 1~5 位相时,对流活跃区略大于 P2 阶 段所对应的强度。这可能是因为 P1 阶段 MJO 的平 均指数较大所造成的。



图 3 P1阶段(缺省 1978年资料)冬季5个月强 MJO(MJO 指数>1)的各阶段 300 hPa OLR 异常场(单位: W/m²)合成图 Fig. 3 Composite of OLR anomalies (W/m²) at 300 hPa for the eight phases of strong MJO (MJO index>1) in winter during the period of P1 (lack the data of

1978)



图 4 同图 3,但为 P2 阶段(缺省 2010 年)资料 Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the period P2 (lack the data of 2010) 4期 李忠燕等:热带季节内振荡与北大西洋涛动年际变化的关系

No. 4 LI Zhongyan et al. Relationship between Madden–Julian Oscillation and Interannual Variability of the North ... 443

3.3 MJO 的 8 种位相与北大西洋—欧洲地区 4 种 天气流型的关系

根据 K 均值聚类分析得到的冬季 5 个月 4 种流型序列表以及 MJO 的 8 种位相的序列表,统计出 MJO 的 8 种位相(MJO 超前于 NAO)滞后 15 d 内 4

种流型天数,并求其异常频率,得到图 5、图 6。异 常频率为负是没有意义的,并且我们主要关注异常频 率随滞后时间的推移有增长趋势变化的 MJO 位相。

从图 5 中可以看出在 P1 阶段, MJO 的第 1 位 相开始影响 NAO 正位相,并且这种影响作用随着





Fig. 5 Lagged relationships between the eight phases of MJO and the four weather regimes over the North Atlantic-European region during the period of P1



图 6 同图 5, 但为 P2 阶段

Fig. 6 Same as Fig.5, but during the period of P2

1 位相影响 NAO 正位相,但这种影响作用并不强,

只有当 MJO 为第 3 位相时,这种影响作用才有所 增强。而 MJO 的第 6~7 位相影响 NAO 的负位相。

3.4 MJO 位相与 300 hPa 位势高度异常场的关系

段,异常频率随滞后时间的推移有增长趋势变化的

MJO 位相主要集中在 MJO 的第1、3、6 位相。因

异常频率分析表明,无论是 P1 阶段还是 P2 阶

滞后时间的推移而增长;当 MJO 为第 3 位相时, 这种影响作用与第 1 位相时类似,但强度更强。当 MJO 为第 6 位相时影响 MJO 的负位相,并影响作 用随着滞后时间的推移而增长;当 MJO 为第 7 位 相时,这种影响作用是随着滞后时间的推移有一个 先增长后减弱的过程。

从图 6 中可以看出在 P2 阶段,虽然 MJO 的第



图 7 P1 阶段 MJO 第 1 位相滞后 0~15 d 300 hPa 位势高度异常场(单位: gpm)合成图

Fig. 7 Composites of 15-day lagged daily geopotential height anomalies (gpm) at 300 hPa for phase 1 of MJO during the period of P1

此我们猜测,是不是 MJO 的第 1、第 3 位相影响 NAO 的正位相,而 MJO 第 6 位相 NAO 的负位相, 而在 P1、P2 不同阶段, MJO 的位相会不会对 NAO 位相转换产生影响。基于这个猜测,我们合成了 MJO 不同位相滞后 15 d内 300 hPa 位势高度异常 场。得到了图 7~12。

从合成结果中发现,在 P1 阶段,当 MJO 为第 1 位相时,随着滞后时间的推移,NAO 由弱的负位 相换为正位相,并且强度增强;当 MJO 为第 2 位 相时(图略),NAO 一直为正位相,并随着滞后时 间的推移强度增强;当 MJO 为第 3 位相时,情况 跟第 2 位相时类似,都一直为 NAO 的正位相,但



图 8 同图 7,但为第 3 位相 Fig. 8 Same as Fig. 7, but for the third phase of MJO



图 9 同图 7,但为第 6 位相 Fig. 9 Same as Fig. 7, but for the sixth phase of MJO

强度却强于第 2 位相;当 MJO 为第 6 位相时,随 着滞后时间的推移,NAO 由正位相转换为 NAO 的 负位相。

而在 P2 阶段,当 MJO 为第 1、2 位相时,虽 然随着滞后时间的推移 NAO 一直为正位相,但却 没有 NAO 的位相转换,只是由偶极子结构转换为 波列结构;而当 MJO 为第 3 位相时,随着滞后时 间的推移,NAO 由弱的波列结构转换为偶极子态 的 NAO 正位相;而当 MJO 为第 6 位相时,NAO 先为负位相,并随着滞后时间的推移强度先增强



图 10 同图 7, 但为 P2 阶段 Fig. 10 Same as Fig. 7, but during the period of P2

再减弱。

4 结论

本文主要运用 K 均值聚类分析法将冬季北

大西洋及欧洲地区的天气流型分为 4 种不同的流型,并研究了不同阶段内 8 种不同位相的 MJO 与 NAO 的年际变化的关系。得到以下的主要结论:

(1)利用 K 均值聚类分析法得到的 NAO 正负 位相的时间序列能很好的反映 NAO 月指数的大小



图 11 同图 8, 但为 P2 阶段 Fig. 11 Same as Fig. 8, but during the period of P2

及 NAO 的位相。说明这种 K 均值聚类分析法的合理性;

(2) 无论是 P1 阶段还是 P2 阶段, 热带 MJO 第 3 (6) 位相影响 NAO 正(负) 位相;

(3) 但在 P1 阶段,当 MJO 处于第1(6) 位相

时,NAO 由弱的负(正) 位相转换为 NAO 正(负) 位相,而在 P2 阶段并没有 NAO 的位相转换,当 MJO 处于第1位相时,NAO 由偶极子结构转换为 波列结构;当 MJO 处于第3位相时,NAO 由弱的 波列结构转换为偶极子态的 NAO 正位相。



图 12 同图 9, 但为 P2 阶段



需要指出:本文只是尝试性地探讨了 MJO 与 NAO 位相转换的影响,其物理成因的探讨仍需要进 一步的研究。

参考文献 (References)

Archambault H M, Keyser D, Bosart L F. 2010. Relationships between large-scale regime transitions and major cool-season precipitation events

in the Northeastern United States [J]. Mon. Wea. Rev., 138: 3454–3473. Barnston A G, Livezey R E. 1987. Classification, seasonality, and persistence of low frequency atmospheric circulation patterns [J]. Mon. Wea. Rev., 105: 1083–1126.

Cassou C. 2008. Intraseasonal interaction between the Madden-Julian Oscillation and the North Atlantic Oscillation [J]. Nature, 455: 523–527.

Gruber A, Krueger A F. 1984. The status of the NOAA outgoing longwave radiation data set [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 65: 958–962.

- Hurrell J W. 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation [J]. Science, 269: 676–679.
- 蒋尚城, 温士顿. 1989. 长江流域旱涝的 OLR 特征 [J]. 气象学报, 47 (4): 479–483. Jiang Shangcheng, Winston J S. 1989. The characteristics of outgoing long wave radiation related to flood and drought over the Yangtze River basin [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 47 (4): 479–483.
- 康杜鹃, 王会军. 2005. 我国北方沙尘暴气候形势的年代际变化 [J]. 中 国科学 (D 辑), 35 (11): 1096–1102. Kang Dujuan, Wang Huijun. 2005. The interannual variability of the sand-dust storm climate trend in north of China [J]. Science in China (Ser D) (in Chinese), 35 (11); 1096–1102.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77: 437–471.
- 李崇银. 1990. 大气中的季节内振荡 [J]. 大气科学, 14 (1): 32-45. Li Chongyin. 1990. Intraseasonal oscillation in the atmosphere [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 14 (1): 32-45.
- 李崇银, 龙振夏, 穆明权. 2003. 大气季节内振荡及其重要作用 [J]. 大 气 科 学, 27 (4): 518–535. Li Chongyin, Long Zhenxia, Mu Mingquan. 2003. Atmospheric intraseasonal oscillation and its important effect [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 518–535.
- Li S L, Hoerling M P, Peng S L. 2006. Coupled ocean-atmosphere response to Indian Ocean warmth [J]. Geophys. Res. Lett., 33 (7), L07713, 10.1029/2005GL025558.
- 李忠燕, 罗德海. 2012. 北大西洋涛动位相转换的数值研究 [J]. 大气科 学, 36 (2): 374–384. Li Zhongyan, Luo Dehai. 2012. A numerical study of the phase transition of the North Atlantic oscillation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (2): 374–384.
- Lin H, Brunet G. 2009. An observed connection between the North Atlantic Oscillation and the Madden-Julian Oscillation [J]. J. Climate, 22: 364–380.
- Luo D H, Lupo A, Wan H. 2007. Dynamics of eddy-driven low-frequency dipole modes. Part I: A simple model of North Atlantic Oscillations [J]. J. Atmos. Sci., 64: 3–28.

- Luo D H, Zhu Z H, Ren R C, et al. 2010a. Spatial pattern and zonal shift of the North Atlantic Oscillation. Part I: A dynamical interpretation [J]. J. Atmos. Sci., 67: 2805–2826.
- Luo D H, Zhong L H, Ren R C, et al. 2010b. Spatial pattern and zonal shift of the North Atlantic Oscillation. Part II: Numerical experiments [J]. J. Atmos. Sci., 67: 2827–2853.
- Luo D H, Diao Y, Feldstein B S. 2011. The variability of the Atlantic storm track and the North Atlantic Oscillation: A link between intraseasonal and interannual variability [J]. J. Atmos. Sci., 68: 577–601.
- Luo D H, Cha J, Feldstein S B. 2012a. Weather regime transitions and the interannual variability of the North Atlantic Oscillation. Part II: Dynamical processes [J]. J. Atmos. Sci., 69: 2347–2363, doi:10.1175/ JAS-D-11–0290.1.
- Luo D H, Cha J, Feldstein S B. 2012b. Weather regime transitions and the interannual variability of the North Atlantic Oscillation. Part I: A likely connection [J]. J. Atmos. Sci., 69: 2329–2346, doi:10.1175/JAS-D-11–0289.1.
- Madden R A, Julian P R. 1971. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific [J]. J. Atmos. Sci., 28 (5): 702–708.
- Madden R A, Julian P R. 1972. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period [J]. J. Atmos. Sci., 29 (6): 1109– 1123.
- Michelangeli P, Vautard R, Legras B. 1995. Weather regime: Recurrence and quasi stationarity [J]. J. Atmos. Sci., 52: 1237–1256.
- Wheeler M C, Hendon H H. 2004. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction [J]. Mon. Wea. Rev., 132: 1917–1932.
- Wu Z W, Wang B, Li J P, et al. 2009. An empirical seasonal prediction model of the East Asian summer monsoon using ENSO and NAO [J]. J. Geophys. Res., 114, D18120, doi:10.1029/2009JD011733.
- Wu Z W, Li J P, Jiang Z H, et al. 2011. Possible effects of the North Atlantic Oscillation on the strengthening relationship between the East Asian summer monsoon and ENSO [J]. International Journal of Climatology, 31: 794–800, doi:10.1002/joc.2309.