



北京師範大學  
BEIJING NORMAL UNIVERSITY

# 大气中的低频振荡与遥相关

## ——气候动力学期末论文

学 号 202111030007  
姓 名 郑晓暘

## 摘要

本文以气候动力学<sup>[1]</sup>为背景,探讨了大气中的低频振荡和遥相关现象。首先,阐述了全球大气遥相关的特征及其与低频振荡的紧密联系,揭示了低频振荡作为遥相关重要驱动力的作用。其次,详细描述了季节内振荡(ISO)的全球特征,特别是 Madden-Julian 振荡(MJO)在全球气候系统中的重要性。接着,对几种重要的低频指数,如南方涛动指数(SOI)、厄尔尼诺 3 区指数(Nino3)、北极涛动(AO)和北大西洋涛动(NAO)的定义及其物理意义进行了梳理和解读。最后,从理论层面探讨了产生低频振荡的可能机制,包括斜压不稳定、正压不稳定、海气相互作用以及随机强迫等。本文旨在系统总结大气低频振荡和遥相关的基本概念、特征、指数定义以及产生机制,并结合个人的学习体会,对该领域的核心内容进行深入理解和阐释。

**关键词:** 低频振荡; 遥相关; 季节内振荡; 气候指数; 大气动力学

## 1 引言

大气环流并非静止不变,而是充满了各种时间尺度的波动。在高频的天气尺度扰动之外,存在着一系列持续时间更长、影响范围更广的低频变化,我们称之为低频振荡。这些低频振荡常常与大范围区域的天气气候异常联系在一起,表现为显著的遥相关现象。遥相关是指发生在地理上远隔两地的气象要素之间存在的统计相关关系。理解大气中的低频振荡及其与遥相关的联系,对于认识全球气候系统的内部变率、提高中长期天气预报能力具有重要的科学意义和应用价值。

本文旨在对大气中的低频振荡和遥相关进行系统性的论述,从全球遥相关特征、季节内振荡、关键低频指数以及产生机制等方面进行深入探讨,并结合学习心得,提升对气候动力学核心概念的理解。

## 2 全球大气遥相关特征及其与低频振荡的关系

全球大气遥相关是指地球上不同区域大气要素(如气压、温度、降水等)之间的长距离统计相关性。这些相关性通常表现为一种“跷跷板”式的变化,即当一个区域的气象要素呈现某种异常时,另一个遥远的区域往往出现相反的异常。一些著名的遥相关型包括:

- 太平洋-北美型(PNA): 主要影响北美地区冬季的天气,与阿留申低压的强度和位置变化密切相关。当阿留申低压加深时,北美西部常出现暖干,东南部则出现冷湿。
- 北大西洋涛动(NAO): 影响欧洲和北美东部冬季的天气,反映了冰岛低压和亚速尔高压之间的气压梯度变化。正位相时,这两个气压系统均增强,导致欧洲北部暖湿,南部冷干。
- 南半球涛动(SAM): 影响南半球中高纬度地区,与南极环极涡旋的强度变化有关。正位相时,极涡增强,中纬度地区气压升高。

低频振荡是驱动这些遥相关的重要因素。大气内部存在着各种时间尺度的波动,而低频振荡正是其中持续时间较长的成分。这些低频波动能够将能量和动量从一个区域传递到另一个区域,从而导致遥相关现象的发生。例如,热带地区的对流活动异常可以激发 Rossby 波列,沿着大圆路径传播,最终影响到中高纬度地区的天气气候。

可以用简化的罗斯贝波方程来理解这一过程:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial x}\right) \nabla^2 \psi' + \beta \frac{\partial \psi'}{\partial x} - \frac{f_0^2}{N^2} \frac{\partial^2}{\partial p^2} (\omega') = 0 \quad (2.1)$$

其中,  $\psi'$  是扰动流函数,  $U$  是基本气流速度,  $\beta$  是行星涡度梯度的  $\beta$  参数,  $f_0$  是科里奥利参数,  $N$  是浮力频率,  $\omega'$  是扰动垂直速度。这个方程描述了罗斯贝波的传播,而低频振荡可以看作是特定波长的罗斯贝波。

学习心得: 全球遥相关的存在体现了大气环流的整体性和相互联系。低频振荡就像是大气中的“发动机”,通过其自身的演变和传播,将不同区域的天气气候联系在一起。理解这种联系对于预测区域性的气候异常至关重要。

### 3 季节内振荡的全球特征

季节内振荡 (Intraseasonal Oscillation, ISO) 是指发生在季节尺度内部 (通常在 30-60 天) 的大气环流变化。其中最显著的例子是 **Madden-Julian 振荡 (MJO)**。

MJO 是一种起源于热带印度洋和西太平洋的行星尺度大气环流现象。其主要特征包括:

- 东传性: MJO 表现为伴随着增强和抑制对流活动的云团和环流异常的缓慢东传, 速度约为 5-10 m/s。
- 赤道对称性: MJO 的环流结构在赤道附近是对称的, 但在更高纬度也存在影响。
- 多尺度性: MJO 不仅表现为对流异常, 还伴随着显著的风场 (如低层西风和高层东风异常) 和气压场变化。
- 全球影响: MJO 可以通过激发罗斯贝波等机制, 影响到全球范围内的天气气候, 包括季风的爆发和撤退、热带气旋的活动以及中高纬度的环流异常。

MJO 的演变过程可以大致分为几个阶段, 通常用位相图来描述。每个位相对应着不同的对流活动中心和环流配置。例如, 当 MJO 的对流活跃位相位于印度洋时, 该地区降水增多, 而西太平洋则可能出现降水抑制。

学习心得: MJO 是热带地区最重要的季节内变率来源, 它的存在打破了我们对于热带气候的静态认知。MJO 的全球影响体现了热带和中高纬度之间的相互作用, 这对于理解全球气候系统的复杂性至关重要。

### 4 几种重要的低频指数的定义及其物理意义

为了量化和监测大气中的低频振荡, 科学家们定义了一系列重要的低频指数:

- 南方涛动指数 (**Southern Oscillation Index, SOI**):

- 定义: SOI 是塔希提 (Tahiti) 和达尔文 (Darwin) 两个站点海平面气压距平的标准化差值:

$$SOI = \frac{P'_{Tahiti} - P'_{Darwin}}{\sigma} \quad (4.1)$$

其中,  $P'$  代表海平面气压距平,  $\sigma$  是标准差。

- 物理意义: SOI 反映了热带太平洋东西向海平面气压梯度的变化, 是衡量厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO) 现象强度的重要指标。正的 SOI 通常与拉尼娜 (La Niña) 事件联系, 表明东太平洋气压升高, 西太平洋气压降低; 负的 SOI 通常与厄尔尼诺 (El Niño) 事件联系, 表明东太平洋气压降低, 西太平洋气压升高。
- 厄尔尼诺 3 区指数 (**Nino3**):
- 定义: Nino3 指数是热带太平洋特定区域 (5°S-5°N, 150°W-90°W) 海表温度距平的平均值。
- 物理意义: Nino3 指数直接反映了热带东太平洋海表温度的异常变化, 是 ENSO 现象的另一个重要指标。正的 Nino3 指数表明该区域海温偏高, 对应厄尔尼诺事件; 负的 Nino3 指数表明该区域海温偏低, 对应拉尼娜事件。
- 北极涛动 (**Arctic Oscillation, AO**):
- 定义: AO 通常通过对北半球海平面气压场进行经验正交函数 (EOF) 分析得到。第一模态定义为 AO 指数。

- 物理意义：AO 反映了北半球中高纬度地区的气压分布模态。正位相时，北极地区气压降低，中纬度地区气压升高，极地涡旋强盛，有利于冷空气被约束在极地，中纬度地区冬季往往偏暖。负位相时，情况相反，极地涡旋减弱，冷空气容易南下，导致中纬度地区冬季寒冷。

- 北大西洋涛动 (**North Atlantic Oscillation, NAO**):

- 定义：NAO 通常定义为冰岛低压和亚速尔高压之间标准化海平面气压差。
- 物理意义：NAO 主要影响北大西洋及其周边地区的天气气候。正位相时，冰岛低压更强，亚速尔高压也更强，导致西欧冬季温和多雨，南欧则较为干燥寒冷。负位相时，情况相反。

学习心得：这些低频指数是将复杂的大气环流模式进行量化和简化的一种有效手段。通过监测这些指数的变化，我们可以更好地了解和预测全球范围内的天气气候异常。理解这些指数的定义和物理意义，是深入研究气候变率的重要基础。

## 5 产生低频振荡的机制

产生大气低频振荡的机制是气候动力学研究的一个核心问题，目前尚未完全明确，但存在一些主要的理论解释：

- 斜压不稳定 (**Baroclinic Instability**): 大气中温度水平梯度 (斜压性) 是产生气旋性扰动的重要能量来源。当斜压性足够强时，微小的扰动会不断发展壮大，形成具有一定尺度的天气系统。一些低频振荡，例如阻塞高压的形成和维持，可能与斜压不稳定有关。

斜压不稳定可以用准地转方程组来描述，其中包含热力学方程和涡度方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\nabla^2 \psi) + J(\psi, \nabla^2 \psi + f) = f_0 \frac{\partial \omega}{\partial p} \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial p} \right) + J \left( \psi, \frac{\partial \Phi}{\partial p} \right) + \omega S = J_d \quad (5.2)$$

其中， $\psi$  是地转流函数， $\Phi$  是位势高度， $\omega$  是垂直速度， $S$  是静力稳定度， $J$  是雅可比算子， $J_d$  是摩擦耗散项。这些方程描述了能量从基本气流向扰动的转换过程。

- 正压不稳定 (**Barotropic Instability**): 大气中基本气流的水平切变也可能导致不稳定，产生扰动。这种不稳定称为正压不稳定。一些研究认为，行星尺度波的产生和传播可能与正压不稳定有关。
- 海气相互作用：海洋的热容量远大于大气，海洋的缓慢变化可以影响大气环流，反之亦然。例如，ENSO 现象的发生和发展是典型的海气相互作用的结果。热带太平洋海温的异常变化可以影响大气环流，进而改变全球的天气模式。MJO 的维持和传播也可能受到海气相互作用的影响。
- 波-平均流相互作用：大气中存在的各种波动 (如罗斯贝波、重力波) 可以与基本气流相互作用，传递能量和动量，改变基本气流的分布，进而影响低频振荡的演变。
- 随机强迫：一些研究认为，大气中存在着随机的扰动 (例如高频天气系统的影响)，这些随机扰动可以通过非线性作用，激发和维持低频振荡。

学习心得：产生低频振荡的机制是多样的，并且不同类型的低频振荡可能由不同的主导机制驱动。将各种理论模型和观测分析相结合，才能更深入地理解这些复杂的现象。海气相互作用在驱动一些重要的低频振荡中扮演着关键角色，这体现了地球系统的耦合性。

## 6 结论

本文对大气中的低频振荡和遥相关进行了详细的论述，包括全球遥相关特征与低频振荡的关系、季节内振荡的全球特征、重要低频指数的定义及物理意义以及产生低频振荡的机制。通过学习，我深刻认识到：

- 低频振荡是大气环流的重要组成部分，是驱动全球遥相关的关键因素。
- 季节内振荡，特别是 MJO，对全球天气气候具有显著影响。
- 诸如 SOI、Nino3、AO、NAO 等低频指数是量化和监测大气低频变化的重要工具。
- 产生低频振荡的机制复杂多样，涉及大气内部动力学和海气相互作用等多个方面。

对大气低频振荡和遥相关的深入研究，不仅有助于我们理解气候系统的内部变率，也为提高中长期天气预报能力提供了理论基础。作为一名气候动力学的本科生，我将继续努力学习，深入探索这一领域的奥秘。

## 7 参考文献

### 参考文献

- [1] 李崇银. 气候动力学引论[M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 2000.