

北半球准定常行星波经向结构及特征尺度分析^{*}

孙 诚^{1)†} 张 静¹⁾ 宫湛秋¹⁾ 李建平^{1,2)}

(1)北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院,100875,北京;

2)青岛海洋科学与技术国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室,266237,山东青岛)

摘要 准定常行星波对于热带外地区的天气和气候有着举足轻重的影响. 以往对于准定常行星波的研究主要针对某一纬度或多纬度平均的纬向波动进行分析,因此准定常行星波的经向结构及特征尺度尚不清楚. 利用经典的 Rossby 波的频散关系,对传统定常波的水平全波数的计算方法进行了改进,将纬向和经向波数进行分离,得到了描述准定常行星波运动学特征的纬向和经向特征波数,从理论上给出了准定常行星波空间尺度的动力约束条件,进而对北半球行星波动的经向结构及特征空间尺度进行了分析. 结果表明,在北半球热带外地区,冬季准定常行星波的经向尺度以 1 波为主,表明准定常行星波的经向结构多为偶极子型;而纬向波数随纬度的增高而减小,表明大尺度的准定常波可以在高纬度传播,而较小尺度的准定常波只能在较低纬度传播. 进一步利用大气环流观测资料分析冬季不同纬度间准定常行星波(纬向 1~3 波)的位相关系,发现不同纬度间的准定常行星波以反位相关系为主,且行星波的经向活动区域随着纬向波数的减小而向极地延伸. 观测得到的冬季准定常行星波的纬向和经向结构特征,与理论推导的纬向和经向特征波数的时空分布特征基本对应.

关键词 准定常行星波; 经向波动; 纬向波动; 定常波数

中图分类号 P43

DOI: 10.16360/j.cnki.jbnuns.2019.01.001

行星波是普遍存在于行星大气中的一类波动. 在地球上,中高纬大气环流变化的重要表现形式是行星波的活动,它的传播直接关系到天气系统的移动和发展,对天气预报有重要的指导作用. Rossby^[1-2] 最早提出了行星波的纬向传播理论,被认为是大气动力学最重要的经典理论之一. 后人为了纪念他所建立的理论,将行星波也称为罗斯贝波. 之后, Yeh^[3] 首次将群速度的概念引入到大气行星波演变的研究中,并详细地讨论了行星波的相速度、群速度和波频率之间的关系,从而提出行星波能量频散理论,为行星波理论研究奠定基础. 在热带外地区,对流层的行星波活动对角动量和热量等的经向和垂直输送有重要作用^[4],北半球对流层的行星波活动与东亚区域气候有着紧密联系,尤其是东亚冬季风^[5-9]. 因此,对流层行星波变率对于热带外地区的天气和气候有着举足轻重的影响.

大气行星波的研究最先开始于理论研究. Rossby^[1-2] 和 Yeh^[3] 的研究为行星波理论研究奠定了基础. 此后行星波理论研究引起大量学者的兴趣,这方面的研究由正压模型发展到斜压模型,由波的纬向传播发展到经向和垂直方向的传播,已形成系统的理论

体系,是现代大气环流动力学的重要组成部分. 我国学者做出了很多有成效的研究工作,极大推动了行星波理论的发展^[10-23]. 叶笃正^[10] 指出地形和非绝热加热都是准定常行星波的形成条件. 巢纪平等^[11] 建立正压大气中的螺旋行星波的理论模型. 伍荣生^[12] 研究基本气流和地形对行星波传播的作用. Huang 等^[14-15] 利用斜压模型理论研究地形和热源对行星波三维传播的影响. Zeng^[16] 引入波包的概念揭示非均匀基本气流中行星波的演化规律. 陆维松^[19-20] 较为系统地研究行星波的稳定性问题. 谭本旭等^[22-23] 将罗斯贝波从线性问题推广到非线性问题,研究罗斯贝波的非线性动力学.

随着高空资料的增多,对大气行星波变率的诊断研究逐步开展起来. 利用沿纬圈的傅里叶展开,可以对行星波气候学特征及变率进行研究. 一些结果表明,在热带外地区,尺度较小的纬向波动(纬向 5 波以上)以东传为主,而尺度较大的波动则主要表现出驻波的特征^[24-25]. 利用沿纬圈的傅里叶展开,一些学者还研究不同纬向尺度准定常行星波的振幅和位相的特征. Loon 等^[26-27] 最早研究准定常行星波的振幅和位相,发现在平流层纬向 1 波的振幅最大,然而在对流层纬向

^{*} 国家自然科学基金资助项目(41775038,41790474)

[†] 通信作者, e-mail: scheng@bnu.edu.cn

收稿日期:2018-11-26

1~3 波的振幅相当. Trenberth^[28] 分析了南半球对流层纬向 1 波和 2 波的变化特征,指出厄尔尼诺南方涛动(ENSO)和纬向西风的变化对准定常行星波的振幅和位相有重要影响. Hu 等^[29-30] 研究了北半球准定常行星波振幅的年际和年代际变化. 杨蕾等^[31] 比较分析了再分析资料和大气环流模式输出资料中的准定常行星波气候学特征的差异. Lin 等^[9] 指出北半球对流层纬向 2 波的年代际变化对东亚东季风的年代际转型有重要影响.

上述诸多工作利用沿纬圈的傅里叶展开对行星波气候学特征及变率进行了一系列的研究,然而,传统的一维傅里叶波分解方法只能对某一纬度或多个纬度平均的纬向波动进行分析,对球面大气行星波的经向结构考虑不足. 理论和资料诊断研究都表明正压大气罗斯贝波在球面上的频散,本质上是空间二维的现象. 在理论方面, Hoskins^[32] 将 Yeh^[3] 的频散理论推广到球面坐标系中,提出罗斯贝波的经向频散,认为热带扰源激发的大尺度扰动波列可以沿着大圆路径传播到中高纬度,奠定了行星波经向传播的理论基础. Karoly^[33] 将 Hoskins 理论推广到水平非均匀的纬向基本气流的情况,利用波射线方法研究非均匀的纬向基流中定常波在经向上的频散现象. 此外,很多研究表明,经向基本气流的存在对行星波穿越东风带起到关键作用^[34-36]. 李艳杰等^[37] 从理论上系统研究了水平非均匀基流中球面定常波的传播特征,发现考虑经向流后,定常波可以穿越东风带在经上传播. 在资料诊断方面, Wallace 等^[38] 在前人工作的基础上,提出大气遥相关型的概念,系统揭示了北半球热带外地区主导的遥相关型(例如太平洋北美遥相关型, PNA),指出这些遥相关型在水平结构上均不同程度地表现出罗斯贝波经向波列的特征,且以南北向的偶极子型居多. PNA 等遥相关型的发现很有力地证实 Hoskins 的罗斯贝波经向频散理论. Mo^[39] 发现南半球也存在类似经向波列结构的大气遥相关型. Nitta^[40] 及 Huang^[41] 几乎同时指出,夏季西北太平洋地区的对流活动通过太平洋日本型(PJ)或东亚太平洋型(EAP)经向波列,可以影响东亚地区甚至北美洲的气候. 苗秋菊等^[42] 发现西太平洋地区的经向波列对长江中下游地区降水有重要影响. 李建平等^[43] 的研究表明,热带印度洋地区的对流活动可以通过印度洋亚洲太平洋(IAP)型影响东亚地区. 黎伟标等^[44-46] 指出亚洲夏季风活动是激发北半球经向波列的重要因子之一. 经向型的波列(如 EAP 和 PNA 型等)对区域气候的影响也多以经向型为主^[47-48]. 已有的研究表明,行星波的空间结构尤其是经向结构对于对流层的水汽和角动量的经向输送有着

重要的影响^[49-50]. 由此可见,要深入认识热带外地区行星波的时空变率,就有必要从球面二维波动的角度进行分析,而已有的研究缺乏对行星波水平结构尤其是波动经向结构方面的认识. 此外,以往对行星波位相的研究主要针对某一纬度或多纬度平均的波动场,不同纬度间行星波的位相关系目前也尚不清楚.

孙诚等^[51]、Sun 等^[52-53] 利用球面二维傅里叶级数的方法对逐日资料和月季平均资料进行诊断分析,将南北半球热带外地区的位势高度场展开成不同的谐波,在二维波数空间里讨论热带外低频环流主导的水平结构. 结果表明,热带外低频环流变率具有经向偶极型的特征,这与实际观测中的主导低频环流型(如 PNA 和北大西洋涛动 NAO 等)的经向结构是对应的. 以往的研究表明热带外低频环流与准定常行星波活动存在着密切联系,因此,从大气行星波动力学的角度深入研究,可以为理解大气环流变化的空间尺度提供理论依据,并且可以深入探讨准定常行星波经向尺度和纬向尺度的关系. 本文从经典的 Rossby 波的频散关系入手,对传统定常波水平全波数的计算方法进行了改进,将纬向和经向波数进行分离,得到描述准定常行星波运动学特征的纬向和经向特征波数,并进一步通过分析再分析资料进行验证.

1 资料和方法

本章使用的数据来自 NCEP/NCAR 的再分析数据集,水平分辨率为 $2.5^\circ(\text{纬度}) \times 2.5^\circ(\text{经度})$,资料的时段从 1950 年 1 月 1 日到 2007 年 12 月 31 日. 为验证结果的可靠性,利用 ERA-40 的再分析资料对基于 NCEP/NCAR 的结果进行对比分析. 根据 NCEP/NCAR 和 ERA-40 这 2 种资料的长度,选取 1961—2000 年这 40 a 作为气候平均态. 选取 Nino3 区的海温异常作为 ENSO 时间的表征指数. ENSO 指数均取自美国气候预测中心(CPC)发布的月指数.

利用谐波分析对不同尺度的波动分析,分别沿各个纬圈 φ 将高度值对经度 λ 展成傅里叶级数,对不同时间的等压面高度场进行谐波分析,得到

$$H(\lambda, \varphi, t) = \sum A_k(\varphi, t) \cos(k\lambda) + B_k(\varphi, t) \sin(k\lambda), \quad (1)$$

式中 $H(\lambda, \varphi, t)$ 为位势高度场沿纬圈的波动分量, k 为纬向波数, $A_k(\varphi, t)$ 和 $B_k(\varphi, t)$ 分别表示余弦和正弦波的展开系数. 这里 $A_k(\varphi, t)$ 和 $B_k(\varphi, t)$ 是纬度和时间的函数.

利用逐年冬季的 500 hPa 位势高度场资料进行纬向的谐波展开,进而得到 $A_k(\varphi, t)$ 和 $B_k(\varphi, t)$. 为了描

述不同纬度间行星波的位相关系,分别对 $A_k(\varphi, t)$ 和 $B_k(\varphi, t)$ 做沿纬度的交叉相关. 在某 2 个纬度间, 只有当 $A_k(\varphi, t)$ 和 $B_k(\varphi, t)$ 均出现强的相关系数时, 表明这 2 个纬度上的波存在明显的位相关系. 因此最终分析 $A_k(\varphi, t)$ 和 $B_k(\varphi, t)$ 沿纬度交叉相关的平均相关系数. 文中使用的主要统计方法有相关分析和线性回归, 并采用 t 检验来验证其显著性.

2 北半球准定常行星波的纬向和经向特征波数

2.1 理论推导 从麦卡托投影下球面正压无辐散涡度方程^[32]

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u}_M \frac{\partial}{\partial x}\right) \nabla^2 \psi' + \beta_M \frac{\partial \psi'}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

出发(这里只考虑纬向基本气流), 式中 $\bar{u}$ 为基本量, ψ' 为扰动量, $\bar{u}_M = \bar{u} / \cos \varphi$ 为麦卡托投影下的纬向基本气流, $\beta_M = \frac{2\Omega \cos^2 \varphi}{R} - \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{\cos^2 \varphi} \frac{\partial}{\partial y} (\bar{u}_M \cos^2 \varphi) \right]$ 为绝对涡度的经向梯度. 将波解代入方程(2), 得到频散关系

$$\omega = \frac{k}{R} \bar{u}_M - \beta_M \frac{k}{R} / \left(\frac{K}{R}\right)^2, \quad (3)$$

式中 k 为纬向波数, K 为水平全波数, R 为地球半径, 这里作为特征长度. 当 $\omega = 0, k \neq 0$ 时, $K = R(\frac{\beta_M}{u_M})^{1/2}$.

由于经向基本气流相比纬向基本气流较小, Hoskins 等^[54]将水平非均匀基本气流下的水平全波数^[33]进行简化, 得到纬向基本气流中定常波数的空间分布, 定常波数值在中纬度地区为 5 左右, 靠近赤道时, 定常波数值增大, 且超过 10. 传统方法计算的定常波数值较大, 不能与大气中一些典型的遥相关型(如 NAO 和 NPO)的空间尺度相对应, 并且, 传统方法没

有将纬向和经向波数进行分离, 不能体现波动的二维空间结构. 为了克服传统的计算水平波数的局限性, 这里引入麦卡托投影下纬向空间长度 L_x 和经向空间长度 L_y , 式(3)改写为

$$\omega = \frac{2\pi k}{L_x} \bar{u}_M - \frac{\beta_M \frac{2\pi k}{L_x}}{\left(\frac{2\pi k}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{2\pi l}{L_y}\right)^2}, \quad (4)$$

式中 l 为经向波数. 利用投影公式可得

$$x = R\lambda, \quad y = R \ln \frac{1 + \sin \varphi}{\cos \varphi},$$

λ 和 φ 分别为经度和纬度. 考虑北半球热带外地区 (20°N 以北), 式中 $\lambda \in (0, 2\pi)$, $\varphi \in (20^\circ, 80^\circ)\text{N}$, 则有 $L_x = 2\pi R, L_y = 2R$, 代入到式(4), 并考虑 $\omega \rightarrow 0^+, k \neq 0, l \neq 0$ 的情况, 得到

$$k^2 + (\pi l)^2 \rightarrow R^2 \frac{\beta_M}{u_M}. \quad (5),$$

式中 k 和 l 为正整数. 由于整数和小数不可能相等, 因此不存在 2 组不同的 (k, l) 使得 $k_1^2 + (\pi l_1)^2 = k_2^2 + (\pi l_2)^2$. 故只存在唯一的一组 (k, l) 使得式(5)成立. 定义 (k, l) 分别为准定常行星波的纬向和经向特征波数. 采用 Hoskins 等^[54]的近似方法, 根据纬向基本气流的空间分布, 即可确定特征波数的水平分布型.

2.2 特征波数的空间分布 图 1 分别给出了利用冬季平均的 300 hPa 纬向风和绝对涡度的经向梯度计算的经向和纬向特征波数.

图 1 白色无值区, 表明 β_M / u_{ij} 的值小于或等于 0, 无法计算波数. 从图 1-a 可以看出, 在北半球热带外地区 (20°N 以北), 冬季准定常行星波的经向特征波数以 1 波为主, 靠近赤道地区 (20°N 以南), 行星波的经向尺度减小. 在欧亚大陆、东北太平洋、北美大陆及北大

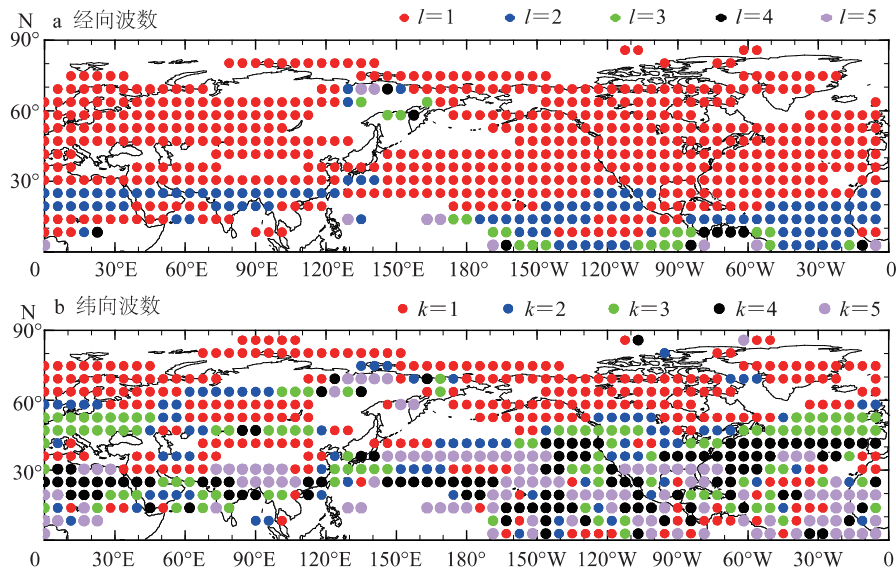


图 1 冬季 300 hPa 纬向风计算的特征经向(a)和纬向波数的空间分布(b)

西洋地区, 准定常波的经向尺度多为经向 1 波, 表明这些地区易出现经向尺度较大的低频扰动, 并且扰动的经向结构多为偶极子型. 而在中东太平洋、热带大西洋和北印度洋等近赤道地区, 准定常波的经向波数较大, 说明这些地区易出现经向尺度较小的低频扰动, 如冬季的季节内振荡(ISO). 图 1-b 给出北半球冬季准定常行星波纬向特征波数的空间分布. 从图 1-b 可以看出, 纬向特征波数基本呈现出南北纬向带状的分布. 热带和副热带地区纬向特征波数较大, 随着纬度的增加, 纬向特征波数减小. 这表明, 不同尺度的准定常波经向传播能力不同, 尺度较大的波可以在高纬度传播, 而尺度小的波只能在较低纬度间传播.

为了进一步考察特征波数随纬度的变化, 对纬向风和绝对涡度的经向梯度取纬向平均值来计算特征波数. 图 2 分别给出了纬向平均的特征波数的分布. 从图 2 可以看到, 北半球热带外地区, 准定常波的经向特征尺度(图 2-a)以 1 波为主, 而纬向特征波数(图 2-b)随纬度的变化明显, 高纬度以纬向 1 波为主而低纬度行星波的尺度则较小. Hoskins^[32]利用波射线理论, 计算了纬向基本气流下定常波的波射线, 不同尺度的行星波经向传播能力不同, 纬向 1 波可以传播到高纬度, 而随着纬向波数的增加, 行星波的经向传播能力减弱, 小尺度波只能在较低纬度间传播. 这说明, 将纬向和经向波数分离的方法计算的准定常行星波的特征波数符合行星波的经向传播规律, 并且, 新方法得到了准定常行星波的经向特征波数, 能够反映准定常行星波的经向结构. 图 3 和 4 分别给出了利用年和夏季平均的 300 hPa 纬向风和绝对涡度的经向梯度计算的经向和纬向特征波数.

全年的计算结果与冬季的基本一致, 热带外地区(20°N 以北)准定常波的经向波数基本为 1, 而靠近赤道地区(20°N 以南)准定常波的经向尺度较小, 纬向特征波数符合准定常波的经向传播规律, 而夏季的情况有所不同. 首先, 在经向特征波数方面, 夏季热带外地区经向波数并不完全为 1, 也有较大的经向波数存在. 这说明夏季环流主导的经向结构并不单一, 这与孙诚等^[51]的结果吻合, 并且与夏季低频环流复杂的经向结构(如 EAP 和 IAP 型等)是对应的. 夏季环流主导的经向结构除了偶极型外, 经向 2 和 3 波也对环流变率有一定的方差贡献. 夏季纬向特征波数依然符合准定常波的经向传播规律.

从经典的 Rossby 波频散关系出发, 采用合理的近似, 计算了准定常波的特征经向和纬向波数. 在经向特征波数方面, 利用全年和冬季平均基本气流的计算结果表明, 热带外地区准定常波的经向结构单一为经向 1 波, 验证了经向偶极型环流在冬季环流变率中的主导地位. 夏季的计算结果表明, 夏季环流的经向结构不单一, 这也与观测事实是相吻合的. 在纬向特征波数方面, 全年、冬季和夏季平均的基本气流计算结果较为一致, 不同尺度的准定常波经向传播能力不同, 尺度较大的波可以在高纬度传播, 而尺度小的波只能在较低纬度间传播, 这符合传统理论中的定常波经向传播规律.

3 不同纬度间准定常波的位相关系

利用谐波分解的方法, 将各纬圈的冬季平均 500 hPa 位势高度展开成傅里叶级数的形式, 分析不同尺度的准定常波在纬度间的位相关系. 图 5 给出了不同

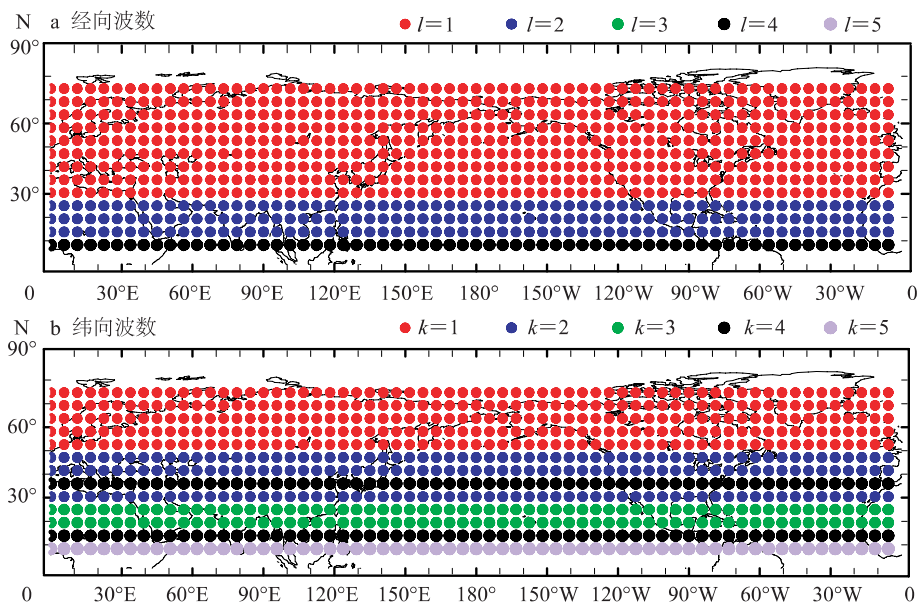


图 2 冬季 300 hPa 纬向平均的纬向风计算的特征经向(a)和纬向波数的空间分布(b)

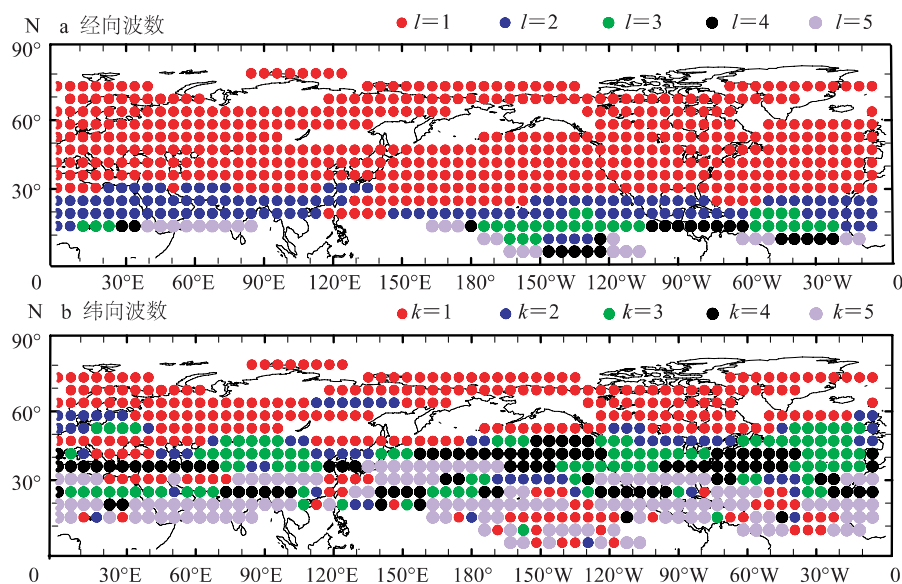


图 3 年平均的 300 hPa 纬向风计算的特征经向(a)和纬向波数的空间分布(b)

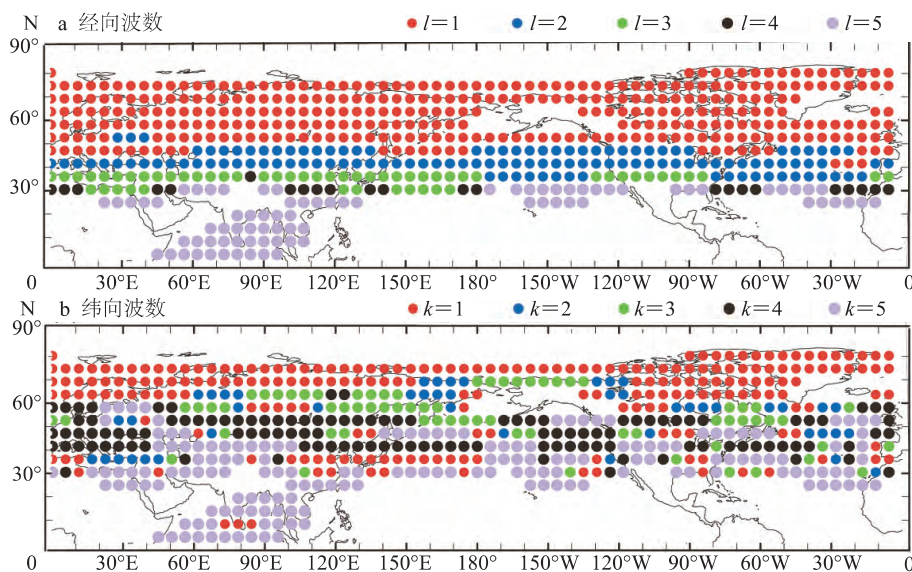


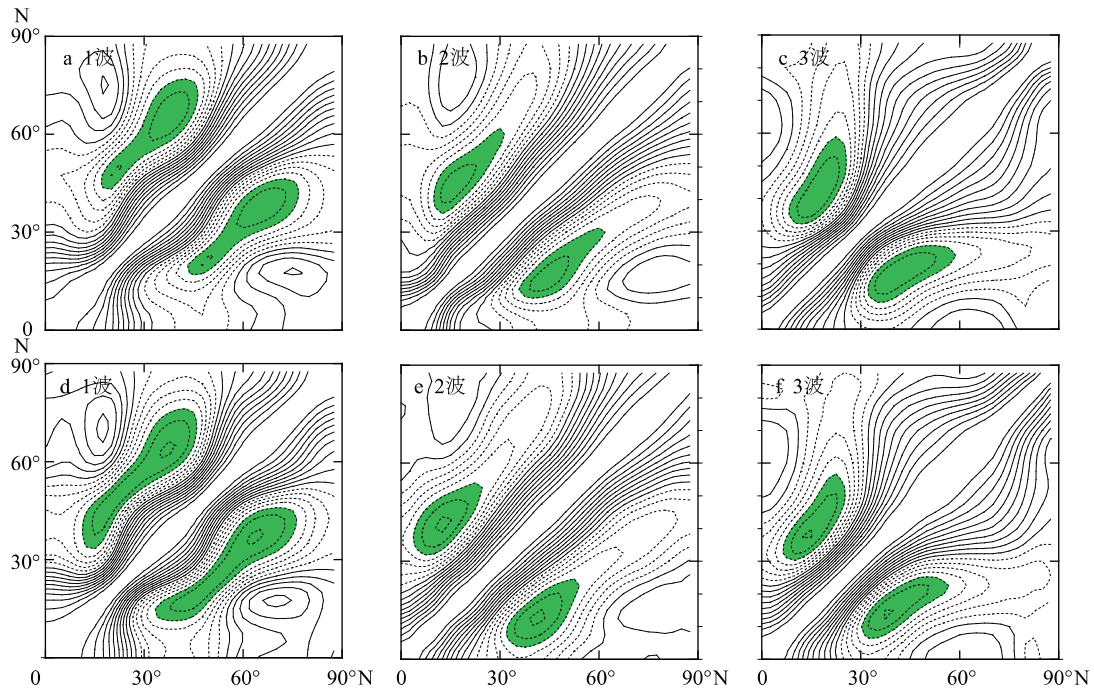
图 4 夏季 300 hPa 纬向风计算的特征经向(a)和纬向波数的空间分布(b)

纬度上谐波展开系数的交叉相关系数。

从 NCEP/NCAR 再分析资料的计算结果(图 5-a~c)可以看到,不同尺度的行星波均存在显著的负相关区,表明行星波在不同纬度间存在着“跷跷板”似的位相关联,即反位相的关系。然而,不同尺度行星波反位相活动带的中心纬度有所不同。在纬向 1 波方面(图 5-a),反位相活动带一个位于副热带和中纬度地区,一个位于高纬度地区,它们的中心分别位于 40°N 和 65°N 。纬向 2 波和 3 波(图 5-b、c)的反位相活动带的位置则偏南,其中,2 波的反位相活动中心分别位于 20°N 和 40°N ,而 3 波的反位相活动中心分别位于 15°N 和 40°N 。行星波的这种反位相变化,表明经向波数不为零,存在经向的传播特征。在活动带的经向范围方面,各尺度准定常波也略有不同。其中,纬向 1 波的

经向活动区域向北延伸得最远,接近 80°N ,而纬向 2 和 3 波的经向活动区域则向北延伸至 60°N 附近。利用 ERA-40 的资料分析的结果(图 5-d~f),与 NCEP/NCAR 的结果基本一致,表明诊断结果的可靠性。为了进一步探讨不同纬度间行星波的关系,图 6 给出了不同尺度的行星波在其南北活动中心的振幅和位相差。

从图 6-a~c 可以看到,对于不同尺度的波动,其北侧活动中心的振幅要比南侧大 $5\sim 10$ gpm。当 2 个活动中心的位相差维持在 $180^{\circ}\pm 30^{\circ}$ 时,认为这 2 个纬圈上波动存在较明显的反位相关系。对 60 个冬季进行统计(图 6-d~f),可以发现,纬向 1 波在其南北活动带上有 28 个冬季表现出明显的反位相分布特征,纬向 2 波有 32 个冬季而纬向 3 波有 27 个冬季,这说明准定



a. 1 波; b. 2 波; c. 3 波; d~f 同 a~c 但为 1958—2002 年 ERA 再分析资料的结果.

图 5 1949—2008 年冬季 NCEP 再分析资料计算的纬向波的位势高度场沿纬度的平均交叉相关系数

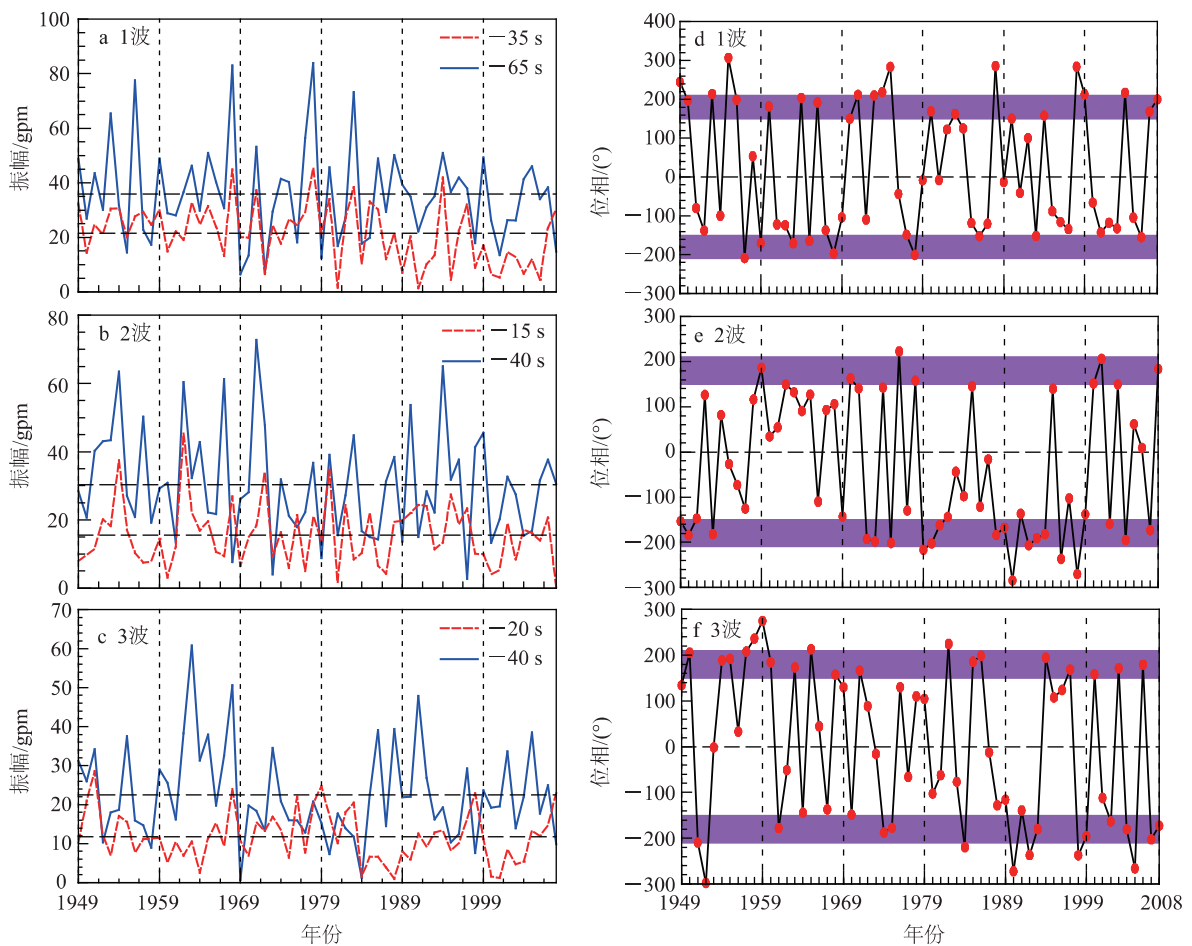


图 6 NCEP 再分析资料计算的纬向 1 波(a、d)、2 波(b、e)和 3 波(c、f)位势高度场南北活动中心的振幅(a~c)和位相差(d~f)

常行星波出现南北“跷跷板”似的分布型是北半球冬季行星波的一种常有的水平分布特征。

对北半球冬季准定常行星波的空间分布结构的诊断分析与准定常行星波特征波数的理论分析是对应的(图 1、2)。行星波在不同纬度间呈现出反位相的变化,尤其是纬向 1 波在中纬度带和高纬度带之间反位相的分布特征验证了热带外地区冬季准定常波经向特征波数的分布,即经向偶极子型。而纬向 1 波的经向活动范围向北延伸得最远,与不同尺度行星波经向传播能力不同的理论也是一致的。

4 个例分析

ENSO 作为热带海温的主导模态,其对热带外大气的影响已成为共识。图 7 给出了用 1950—2009 年 ENSO 指数回归的冬季 500 hPa 位势高度场。

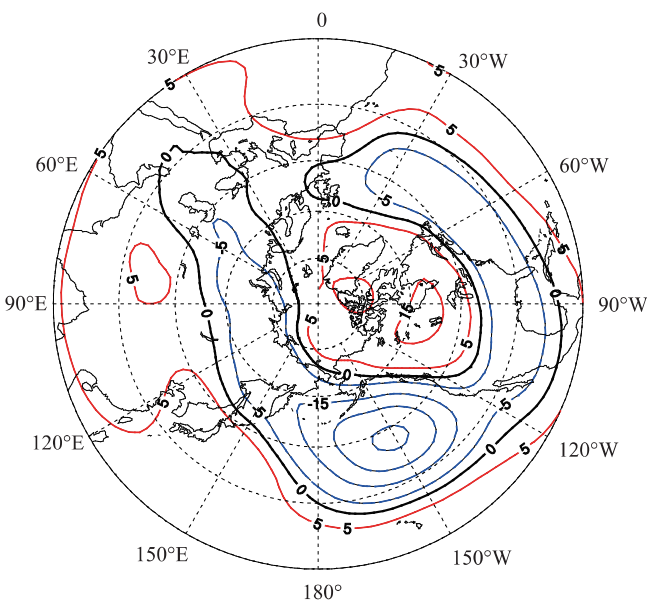


图 7 1950—2009 年 ENSO 指数回归的冬季北半球 500 hPa 位势高度场

ENSO 遥相关型与 PNA 遥相关型有些相似,也有学者将其称为热带——北半球遥相关型(TNH)。可以清楚地看到,TNH 遥相关型的经向结构也表现为经向偶极子型(对应经向波数为 1)。对 ENSO 个例的分析再次说明,冬季热带外准定常的环流型的经向结构多为经向偶极子结构。

ENSO 作为热带地区的信号,其能量通过波动的形式向热带外地区传播。Eliassen-Palm(EP)通量由于与波的群速度方向平行,因此可以用来诊断波动能量传播^[55-56]。EP 通量的计算式为: $F_y = -\rho R \cos \varphi \cdot \overline{u'v'}$, $F_z = \rho R \cos \varphi \frac{rf}{HN^2} \overline{v't'}$, 式中 F_y 和 F_z 分别为 EP 通量的经向和垂直方向的分量, f 是科氏参数, ρ

是大气密度, R 是地球半径, φ 是纬度, r 是干空气系数, H 是大气相当高度(7 km), N 是浮力频率, u 和 v 分别是纬向和经向风, t 是大气温度, “ $'$ ”代表纬向非对称分量, 而“ $-$ ”代表纬向平均。这里主要分析准定常波的情况, 因此 u 、 v 和 t 均取季节平均值。

图 8 分别给出了冬季 ENSO 指数回归的利用纬向 1~3 波及各分量行星波计算的 EP 通量。从图 8 可以看到, 波能量从赤道向高纬度地区传播。其中, 纬向 1 波对于能量的经向传播起到了主要的作用, 并且可以在较高纬度传播, 向北可达到 80°N。而纬向 2 波和 3 波在高纬度没有明显的经向传播特征, 它们的经向传播主要是在 60°N。ENSO 事件中的不同尺度行星波的经向传播特征与理论分析的基本吻合, 即准定常波的经向传播能力随着波数的增大而减小, 这说明准定常波特征波数理论可以用来解释热带外的准定常环流的空间特征。

5 结论与讨论

利用经典的 Rossby 波的频散关系, 对传统定常波的水平全波数的计算方法进行了改进, 将纬向和经向波数进行分离, 得到了描述准定常行星波运动学特征的纬向和经向特征波数。主要结论如下:

1) 在北半球热带外地区(20°N 以北), 冬季准定常行星波的经向尺度以 1 波为主, 表明准定常行星波的经向结构多为偶极子型。而纬向波数随纬度的增高而减小, 表明大尺度的准定常波可以在高纬度传播而较小尺度的准定常波只能在较低纬度传播。夏季热带外地区准定常波动经向尺度不单一, 存在较大的经向波数, 年平均的情况与冬季基本一致。

2) 分析冬季不同纬度间准定常行星波(纬向 1~3 波)的位相关系, 发现不同纬度间的准定常行星波以反位相关系为主。并且, 行星波的经向活动区域随着纬向波数的减小而向极地延伸, 这与冬季准定常行星波的纬向和经向特征波数的时空分布特征基本一致。

3) 冬季热带外地区大气对 ENSO 的响应也表现出经向偶极子的特征, 这与冬季准定常行星波的特征经向波数是对应的。不同尺度响应的经向传播特征有所不同, 主要表现为纬向 1 波可以向高纬度传播而较小尺度的波则只能在中纬度传播, 验证了不同尺度行星波的经向传播规律。

尽管对热带外地区准定常行星波的特征波数分析结果与观测得到的低频环流的空间谱特征是基本吻合的, 但是也存在局限性。首先, 使用的理论模型较为简单, 并没有考虑经向风和耗散的作用; 其次, 对理论模型设波解来求解, 只考虑了周期振荡, 而忽略了由于基

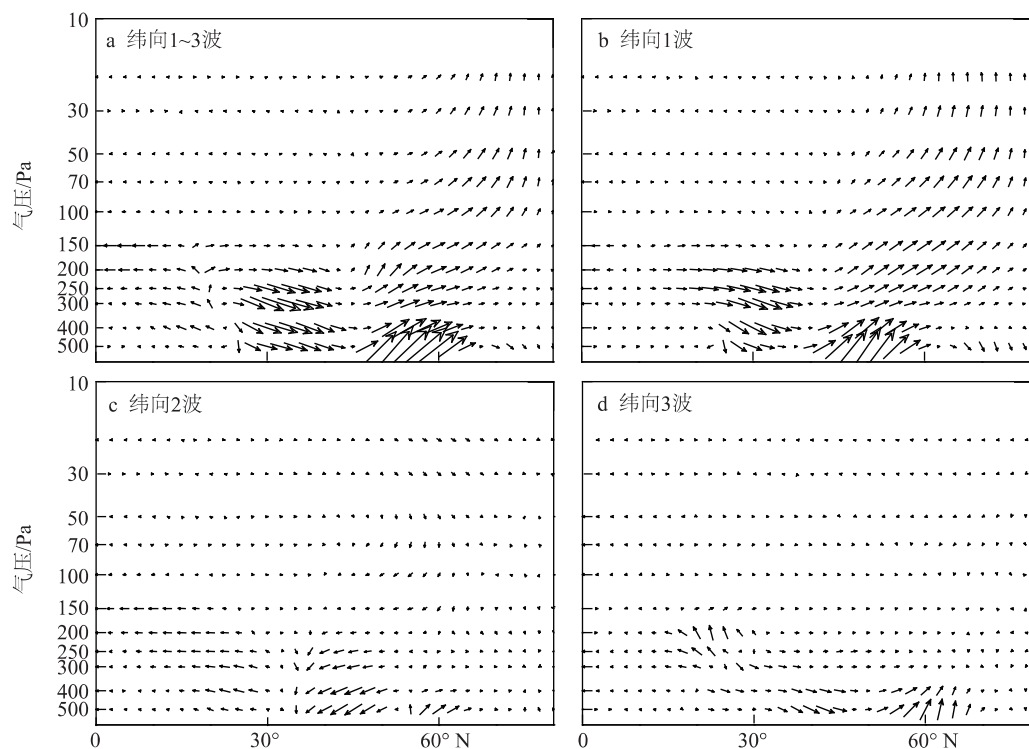


图 8 1950—2009 年冬季 ENSO 指数回归的利用纬向 1~3 波(a)、纬向 1 波(b)、
纬向 2 波(c)和纬向 3 波(d)分量计算的 EP 通量

本气流切变所引起的不稳定增长的情况,因此不能回答冬夏季环流强度上差异的原因.因此,为了进一步从理论上解析热带外低频环流的时空特点,有必要建立更为复杂的模型进行研究.

6 参考文献

- [1] ROSSBY C G. Relations between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action [J]. *Journal of Marine Research*, 1939, 2(1):38
- [2] ROSSBY C G. On the propagation of frequencies and energy in certain types of oceanic and atmospheric waves [J]. *J Meteor*, 1945, 2(4):187
- [3] YEH T C. On energy dispersion in the atmosphere [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, 6(1):1
- [4] 吴国雄, 陈彪. 原始方程系统中的无加速定理 II: 纬向平均温度的变化[J]. *大气科学*, 1990, 15(2):143
- [5] CHEN W, YANG S, HUANG R. Relationship between stationary planetary wave activity and the East Asian winter monsoon [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2005, 110 (14). DOI:10.1029/2004JD005669
- [6] 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[J]. *大气科学*, 2006, 31 (5):863
- [7] 黄荣辉, 魏科, 陈际龙, 等. 东亚 2005 年和 2006 年冬季风异常及其与准定常行星波活动的关系[J]. *大气科学*, 2007, 32(6):1033
- [8] 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[J]. *大气科学*, 2008, 33 (4):950
- [9] LIN W, HUANG R H, LEI G, et al. Interdecadal variations of the East Asian winter monsoon and their association with quasi-stationary planetary wave activity [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(18):4860
- [10] 叶笃正. 大气环流的若干基本问题[M]. 北京: 科学出版社, 1958:159
- [11] 巢纪平, 叶笃正. 正压大气中的螺旋行星波[J]. *大气科学*, 1977, 2(2):81
- [12] 伍荣生. 基本气流和大地形对于正压波动的作用[J]. *气象学报*, 1982, 40(2):129
- [13] 伍荣生. Rossby 波的能量、能量通量与 Lagrange 函数 [J]. *气象学报*, 1986, 44(2):158
- [14] HUANG R H, GAMBO K. The response of a hemispheric multi-level model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources Part I forcing by topography [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1982, 60(1):78
- [15] HUANG R H, GAMBO K. The response of a hemispheric multi-level model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1982, 60(1):93
- [16] ZENG Q C. The evolution of a Rossby-wave packet in a

- three-dimensional baroclinic atmosphere[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1983, 40(1):73
- [17] 刘式适, 刘式达. 斜压 Rossby 波稳定性的线性与非线性问题[J]. *中国科学: 化学*, 1985, 15(11):1055
- [18] 刘式适, 谭本旭. 地形作用下的非线性 Rossby 波[J]. *应用数学和力学*, 1988, 9(3):229
- [19] 陆维松. 摩擦耗散和非线性正压不稳定[J]. *中国科学: 化学*, 1989, 19(8):888
- [20] 陆维松. 纬向基流的非线性正压不稳定[J]. *气象科学*, 1989, 83(1):16
- [21] 谭本旭. 非线性 Rossby 波及其相互作用 II. 周期波动解及其稳定性[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1993, 29(3):378
- [22] 谭本旭, 刘式适. 地球流体中的非线性 Rossby 波[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1988, 24(3):87
- [23] 谭本旭, 伍荣生. 非线性 Rossby 波及其相互作用: I. Rossby 包络孤立波的碰撞[J]. *中国科学: 化学*, 1993, 23(4):437
- [24] DELL'AQUILA A, LUCARINI V, RUTI P M, et al. Hayashi spectra of the northern hemisphere mid-latitude atmospheric variability in the NCEP-NCAR and ECMWF reanalyses[J]. *Climate Dynamics*, 2005, 25(6):639
- [25] DELL'AQUILA A, RUTI P M, CALMANTI S, et al. Southern Hemisphere midlatitude atmospheric variability of the NCEP-NCAR and ECMWF reanalyses [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(8). DOI:10.1029/2006JD007376
- [26] LOON H V, JENNE R L. The zonal harmonic standing waves in the Southern Hemisphere [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, 77(6):992
- [27] LOON H V, JENNE R L, LABITZKE K. Zonal harmonic standing waves [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, 78(21):4463
- [28] TRENBERTH K E. Planetary-waves at 500 mb in the southern-hemisphere [J]. *Mon Wea Rev*, 1980, 108(9):1378
- [29] HU Y, TUNG K K. Interannual and decadal variations of planetary wave activity, stratospheric cooling, and Northern Hemisphere Annular Mode [J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(13):1659
- [30] HU Y, TUNG K K. Tropospheric and equatorial influences on planetary-wave amplitude in the stratosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(2):6
- [31] 杨蕾, 陈文, 黄荣辉. 北半球准定常行星波气候平均态的资料分析和数值模拟 [J]. *大气科学*, 2006, 31(3):361
- [32] HOSKINS B J. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing [J]. *J Atmos Sci*, 1981, 38(6):1179
- [33] KAROLY D J. Rossby-wave propagation in a barotropic atmosphere[J]. *Dynamics of Atmospheres & Oceans*, 1983, 7(2):111
- [34] SCHNEIDER E K, WATTERSON I G. Stationary Rossby-wave propagation through easterly layers [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1984, 41(13):2069
- [35] 季劲钧. 大气经圈环流对波动和能量传输的影响 [J]. *大气科学*, 1990, 15(4):413
- [36] 宋燕, 缪锦海. 经圈环流对定常波传播的影响 [J]. *气象学报*, 1994, 52(4):424
- [37] 李艳杰, 李建平. 水平非均匀基流中行星波的传播 [J]. *地球物理学报*, 2012, 55(2):361
- [38] WALLACE J M, GUTZLER D S. Teleconnections in the geopotential height field during the northern hemisphere winter [J]. *Monthly Weather Review*, 1981, 109(4):784
- [39] MO K C. Teleconnections in the southern hemisphere [J]. *Mon Wea Rev*, 1985, 113(1):22
- [40] NITTA T. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the northern hemisphere summer circulation [J]. *J Meteor Soc Japan*, 1987, 65(3):373
- [41] HUANG R H. Influence of the heat source anomaly over the tropical western Pacific on the subtropical high over East Asia [C] // *Proceedings of the International Conference on the General Circulation of East Asia*. Chengdu: [s. n.], 1987
- [42] 苗秋菊, 徐祥德, 张雪金. 长江中下游旱涝的环流型与赤道东太平洋海温遥相关波列特征 [J]. *气象学报*, 2002, 60(6):688
- [43] 李建平, 吴国雄, 胡敦欣. 亚印太交汇区海气相互作用及其对我国短期气候的影响 [M]. 北京: 气象出版社, 2011:516
- [44] 黎伟标, 纪立人. 亚洲夏季风活动激发的北半球大气环流遥相关型 [J]. *大气科学*, 1997, 22(3):283
- [45] 黎伟标, 纪立人. 亚洲夏季风活动激发北半球大气遥相关的物理机制探讨 I: 正规模及有限时间不稳定奇异矢量分析 [J]. *大气科学*, 1999, 24(4):477
- [46] 黎伟标, 纪立人. 亚洲夏季风活动激发北半球大气遥相关的物理机制探讨 II: 最优强迫模及其响应 [J]. *大气科学*, 1999, 24(4):477
- [47] LEATHERS D J, YARNAL B, PALECKI M A. The Pacific North American teleconnection pattern and United States climate. Part I: regional temperature and precipitation associations [J]. *Journal of Climate*, 1991, 4(5):517

- [48] HUANG G. An index measuring the interannual variation of the East Asian summer monsoon :the EAP index[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21 (1):41
- [49] BOER G J, FOUREST S, YU B. The signature of the annular modes in the moisture budget[J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(17):3655
- [50] KIMOTO M, JIN F F, WATANABE M, et al. Zonal-eddy coupling and a neutral mode theory for the Arctic Oscillation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28 (4):737
- [51] 孙诚, 李建平. 北半球 500 hPa 位势高度场时空频谱特征分析[J]. *大气科学*, 2011, 36(6):1079
- [52] SUN C, LI J. Space-time spectral analysis of the southern hemisphere daily 500 hPa geopotential height [J]. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(12):3844
- [53] SUN C, LI J, JIN F F, et al. Contrasting meridional structures of stratospheric and tropospheric planetary wave variability in the Northern Hemisphere[J]. *Tellus Series A: Dynamic Meteorology & Oceanography*, 2014, 66(1):25303
- [54] HOSKINS B J, AMBRIZZI T. Rossby wave propagation on a realistic longitudinally varying flow[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1993, 50 (12):1661
- [55] EDMON H J J, HOSKINS B J, MCINTYRE M E. Eliassen-Palm cross sections for the troposphere[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1980, 37(12):2600
- [56] CHEN W, TAKAHASHI M, GRAF H F. Interannual variations of stationary planetary wave activity in the northern winter troposphere and stratosphere and their relations to NAM and SST[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2003, 108(24):4797

Meridional structure and characteristic scale of quasi-stationary planetary waves in the Northern Hemisphere

SUN Cheng¹⁾ ZHANG Jing¹⁾ GONG Zhanqiu¹⁾ LI Jianping^{1,2)}

(1)College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

2) Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, 266237, Qingdao, Shandong, China)

Abstract Quasi-stationary planetary waves have significant impact on weather and climate in both tropical and extra-tropical regions. Previous studies mainly focused on latitudinal fluctuations, but meridional structure and characteristic scale were unclear. Classical Rossby wave dispersion relation was used to improve calculation of horizontal full wave number in conventional steady wave, with separated zonal wave number and meridional wave number. Latitudinal and meridional characteristics describing kinematics of quasi-stationary planetary wave were obtained, characteristic spatial scales of planetary waves in the Northern Hemisphere were analyzed. In extra-tropical regions in the northern hemisphere, meridional scale of quasi-stationary planetary waves in winter was dominated by 1 wave, indicating that meridional structure of quasi-stationary planetary waves was mostly of the dipole type. Latitudinal wave number was found to decrease with increasing latitude, indicating that large-scale quasi-steady waves could propagate at high latitudes while smaller scale quasi-steady waves could only propagate at lower latitudes. Analyzing phase relations of quasi-stationary planetary waves (1-3 waves in latitude) between different latitudes in winter found that quasi-stationary planetary waves between different latitudes were mainly inversely related. Further, meridional region of planetary waves was found to extend to the poles as zonal wave number decreased. Observed characteristics of latitudinal and meridional structures of quasi-stationary planetary waves in winter basically corresponded to space-time distribution characteristics of characteristic wave number in zonal and meridional directions.

Keywords quasi-stationary planetary wave; meridional fluctuation; latitude fluctuation; stationary wave