

黄荣辉, 皇甫静亮, 刘永, 等. 2016. 从 Rossby 波能量频散理论到准定常行星波动力学研究的发展 [J]. 大气科学, 40 (1): 3–21. Huang Ronghui, Huangfu Jingliang, Liu Yong, et al. 2016. Development from the theory of energy dispersion of Rossby waves to studies on the dynamics of quasi-stationary planetary waves [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (1): 3–21, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14298.

# 从 Rossby 波能量频散理论到准定常行星 波动力学研究的发展

黄荣辉<sup>1,2</sup> 皇甫静亮<sup>1</sup> 刘永<sup>1</sup> 杜振彩<sup>1</sup> 陈国森<sup>1</sup>  
陈文<sup>1</sup> 陆日宇<sup>2</sup>

1 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100190

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学国家重点实验室, 北京 100029

**摘 要** 本文是为纪念叶笃正院士诞辰百周年和他对大气动力学发展的重大贡献而撰写的。叶先生在 20 世纪 40 年代所提出的罗斯贝波能量频散理论不仅至今仍广泛应用于天气预报, 而且开创了准定常行星波动力学研究。在罗斯贝波频散理论的启迪和引领下, 行星波动力学和大气环流异常遥相关的研究取得重要进展。特别是关于准定常行星波在二维和三维球面大气的传播特征以及北半球夏季大气环流异常的 EAP (East Asia–Pacific) 型和“丝绸之路 (Silk Road)”型遥相关及其机理已做出系统的研究, 本文简要地回顾这些研究。并且, 本文还回顾了叶先生所提出罗斯贝波能量频散理论的引领下, 近年来我们关于东亚冬、夏季风和我国气候灾害的年际和年代际变化的内动力学机理研究所取得的进展。

**关键词** 罗斯贝波 能量频散 准定常行星波 动力学

文章编号 1006-9895(2016)01-0003-19

中图分类号 P461

文章标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14298

## Development from the Theory of Energy Dispersion of Rossby Waves to Studies on the Dynamics of Quasi-Stationary Planetary Waves

HUANG Ronghui<sup>1,2</sup>, HUANGFU Jingliang<sup>1</sup>, LIU Yong<sup>1</sup>, DU Zhencai<sup>1</sup>, CHEN Guosen<sup>1</sup>,  
CHEN Wen<sup>1</sup>, and LU Riyu<sup>2</sup>

1 Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

**Abstract** This paper commemorates the 100th anniversary of academician Ye Duzheng's birth and his great contributions to the development of atmospheric dynamics. The theory of energy dispersion of Rossby waves proposed by Prof. Ye Duzheng (or Yeh T. C.) in the 1940s has not only been widely applied in weather forecasting, but also initiated research on the dynamics of quasi-stationary planetary waves. Under the enlightenment and guidance of the theory of energy dispersion of Rossby waves, important advances in the study of planetary wave dynamics and the teleconnection of atmospheric circulation anomalies have been obtained. In particular, the characteristics of two- and three-dimensional propagations of quasi-stationary planetary waves in the spherical atmosphere, as well as the East

收稿日期 2014-10-22; 网络预出版日期 2015-07-07

作者简介 黄荣辉, 男, 1942 年出生, 中国科学院院士, 主要从事季风和气候动力学及灾害气候研究。E-mail: hrh@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41375065、41230527、41461164005

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41375065, 41230527, and 41461164005)

Asia-Pacific (EAP) and “Silk Road” pattern teleconnections of atmospheric circulation anomalies in the Northern Hemisphere during boreal summer and the associated physical mechanisms, have been systematically studied. These studies are briefly reviewed in this paper. Recent advances in authors’ understanding of the internal dynamical mechanisms of the interannual and interdecadal variations of the East Asian winter and summer monsoons and climate disasters in China, under the guidance of the theory of energy dispersion of Rossby waves put forward by Prof. Ye, are also reviewed.

**Keywords** Rossby wave, Energy dispersion, Quasi-stationary planetary waves, Dynamics

## 1 引言

2013年10月16日下午,当我在参加海峡两岸台风合作研究成果交流研讨会之时,惊悉恩师叶笃正院士仙逝的噩耗,我与我的同行们万分悲痛。先师的逝世不仅是我国大气科学界的重大损失,也是国际大气科学界的重大损失。为纪念恩师诞辰一百周年特撰写此文,以缅怀他对大气动力学发展的重大贡献。

叶笃正先生是我国现代大气科学奠基人之一,也是国际著名的气象学家、气候学家、全球变化研究的专家。先生在国际上首先创立了大气频散和东亚大气环流理论,提出大气适应过程的尺度理论,为全球中高纬度和我国天气预报奠定了理论基础;在国际上率先提出了青藏高原对亚洲季风气候的热力、动力作用,奠定了青藏高原气象学的基础,开辟了研究青藏高原气象之路。从上世纪80年代开始,他就倡导开展气候和全球变化方面的研究,并提出了全球变化的适应理论,使我国在全球气候变化和短期气候变化的研究一直保持在国际前沿水平。世界气象组织WMO奖和国家最高科学技术奖让先生一生举世瞩目的科学成就更让普通民众铭记。

我(黄荣辉)有幸从1965年起师从于叶先生,在先生的指导下不断成长。先生对科学永无止境地追求精神和做学问严谨认真的态度一直是我们学习的楷模。先生九十岁高龄仍召集学生认真地讨论大气科学和全球变化的重大科学问题,即便在病床上还时刻关心着我国大气科学和全球气候变化的研究进展,并思考存在的问题。正是在先生的指导下,中国科学院大气物理研究所在国际大气科学和全球气候变化研究的前沿领域取得一个又一个研究成果。今天,我和我的学生们从事的行星波动力学、东亚季风与灾害气候、西北太平洋台风等研究都是在先生的教诲下对先生研究的继承和发展。

叶先生时刻感召我们的不仅是他在科学上的大

师风范,更是先生执着的爱国情怀。1950年,他刚刚发表了今日成为动力气象教科书中基本内容之一的大气 Rossby 波频散理论,毅然放弃了美国给予的优厚待遇回到祖国。他开辟了我国现代大气科学的研究,培养了一代又一代大气科学的人才。先生用他上善若水的高尚品德像泉水一样滋养着我们成长,对学生们的工作、生活等方面异常关照,亦师亦父。斯人已去,精神永存,文章永在。我们要永远沿着先生开辟的道路前进,继承发扬先生孜孜不倦追求科学真理的精神和爱国情怀。

众所周知,叶笃正先生早在60多年前提出了 Rossby 波的频散理论(Yeh, 1949),他指出在西风带上罗斯贝(Rossby, 1939)所提出的大气长波(或称 Rossby 波)可能有比它的相速度大的群速度,因此,在中高纬度西风带上大气长波的能量可能早于扰动本身向西风气流的下游传播。这可以很好说明了在中高纬度某地区上空西风带上游有一波槽存在,此扰动的群速度  $c_g$  有可能比它的相速度  $c$  大,即  $c_g > c$ ,因此,此扰动的能量有可能早于此扰动本身传播到此地区的下游上空,这样在该地区的下游上空就会产生新的扰动。因此,在此地区的扰动尚未到来之前,在它的下游地区上空就有新的小扰动出现,这就是天气学或动力气象学上的“上游效应”。

叶笃正先生所提出的大气长波的频散理论不仅广泛应用于天气预报,而且推动了行星波动力学研究的发展。为了缅怀叶笃正先生对大气动力学发展的重大贡献,本文试图回顾他所提出的 Rossby 波能量频散理论对准定常行星波动力学研究发展的推动作用,特别是准定常行星波在球面大气的二维和三维的传播动力机理及全球大尺度大气环流动力学的启迪作用。在叶笃正先生所提出的能量频散理论的启迪和引领下,我和我的学生们从观测事实、动力理论研究了北半球冬、夏季球面大气准定常波的二维和三维传播特征及其对东亚冬、夏季风环流系统的影响。由于我们对叶笃正先生所提

出的 Rossby 波能量频散理论及其发展认识有限, 本论文主要回顾和综述在叶笃正先生所提出关于 Rossby 波能量频散经典理论的启迪和推动下, 关于北半球冬、夏季准定常行星波的二维和三维传播特征和东亚上空夏季大气环流异常的 EAP (East Asia-Pacific) 型和“丝绸之路”型遥相关及其机理的研究进展, 特别是我们研究组近年来关于东亚冬、夏季风年际和年代际变异内动力学成因的研究以及部分国内外相关研究。

## 2 Rossby 波能量频散理论对准定常行星波在球面二维大气传播及大气环流异常遥相关研究的推动作用

叶先生所提出的 Rossby 波能量频散理论对于准定常行星波在球面大气的二维传播及大气环流异常遥相关机理的研究有很大的推动作用, 特别对于 EAP 型遥相关的研究起着重要的启迪作用。

### 2.1 关于准定常行星波在球面大气的二维传播及大气环流异常机理研究

在叶笃正提出 Rossby 波能量频散理论之后, 从 50 年代起许多科学家研究 Rossby 波在  $\beta$  平面和球面的传播特征, 特别是 Longuet-Higgins (1964a, 1964b, 1965) 系统地研究了 Rossby 波的二维传播。他认为无论在经圈方向伸展或是在纬圈方向伸展的强迫源都会在经向激起一波列, 并且他还指出此波列能量都会沿大圆传播。然而, 当时他没有发现 Rossby 波在球面大气二维传播的观测事实。到了 20 世纪 80 年代, 由于全球气象观测资料比较充足, 使气象学家有可能研究全球大气环流异常的特征, 因此大气科学在关于全球大气环流变异过程及其机理方面的研究取得重大进展。Wallace and Gutzler (1981) 首先从全球海平面气压和 500 hPa 大气环流异常发现大气环流异常存在遥相关 (Teleconnection) 现象, 即在某地区上空大气环流发生异常可能引起另外一些地区上空大气环流的异常。他们指出: 在北半球冬季, 从大西洋经西北欧、西伯利亚到东亚上空 500 hPa 大气环流异常的分布存在一列遥相关波列分布, 即所谓的欧亚 (EU) 型遥相关; 并且从副热带太平洋地区经北太平洋、加拿大西北部到美国中部和东南部上空 500 hPa 大气环流异常的分布同样也存在一列遥相关波列, 即所谓的太平洋—北美 (Pacific North-America, PNA)

型遥相关波列。

是什么原因引起全球大气环流异常存在着遥相关? 它的机理是什么? 这些立即引起了气象学家的关注。Hoskins and Karoly (1981) 在 Hoskins et al. (1977) 研究的基础上首先讨论了准定常行星波在球面大气的能量频散特征, 并从理论上和数值模拟研究了准定常行星波的传播路径, 从而很好地解释全球大气环流异常的遥相关现象。依据 Hoskins and Karoly (1981) 的研究, 大气环流异常遥相关是一种 Rossby 波列的分布, 这种波列的形成是由于某一地区强迫源强迫所产生准定常行星波在球面大气能量频散的结果。后来一些大气环流模式试验研究表明, 遥相关型的产生不仅依赖于外源强迫, 而且还依赖于基本流的结构, 即波在传播过程中能否从基本气流中获取能量并发展, 因而遥相关型的产生是大气能量频散和大气不稳定性相结合的产物 (Simmons et al., 1983; Li and Ji, 1997)。总之, 叶笃正先生所提出的 Rossby 波能量频散理论被广泛应用到全球大气环流异常遥相关机理的研究, 研究的时间尺度从数天延伸到数月, 空间尺度从区域扩展到全球范围。至今, 大气环流异常遥相关不仅被广泛用来解释短期气候变异的机理, 而且也经常应用于短期气候变化的预测。

### 2.2 关于东亚/太平洋 (EAP) 型遥相关的研究

继 Wallace and Gutzler (1981) 的研究, 许多学者研究了北半球冬季大气环流异常遥相关及其准定常行星波的传播。然而, 对于北半球夏季大气环流异常遥相关及其准定常行星波的传播特征研究不多, Huang and Gambo (1983) 研究了北半球夏季准定常行星波在球面三维大气的传播特征, 指出了在北半球夏季, 准定常行星波能够准水平地从副热带地区上空传播到中高纬度地区上空。

研究表明东亚夏季风的季节内和年际变异受西太平洋暖池海—气相互作用的严重影响。Nitta (1987) 从观测事实首先提出菲律宾周围热带西太平洋上空与日本周围大气环流异常存在着反相振荡, 即 P-J 振荡; 与此同时, Huang and Li (1987)、黄荣辉和李维京 (1988)、Huang (1992) 和 Huang and Sun (1992) 不仅从观测事实分析了从菲律宾周围经东亚和鄂霍次克海上空到阿拉斯加和北美西海岸上空这一遥相关的波列分布, 而且根据 Hoskins and Karoly (1981) 所提出的球面大气 Rossby 波传播路径公式计算了北半球夏季菲律宾周围热源强

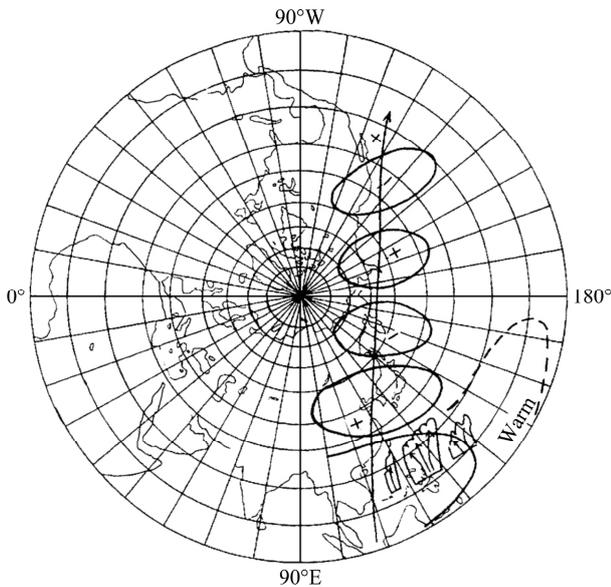


图1 北半球夏季由菲律宾周围强对流活动所激发的东亚/太平洋 (EAP) 型遥相关示意图

Fig. 1 Schematic map of the EAP teleconnection pattern excited by strong convective activities around the Philippines during boreal summer

迫所产生的准定常行星波在北半球的传播路径, 并利用一个 34 层简单数值模式模拟了夏季菲律宾周围热源所产生的北半球大气环流的异常分布, 把此遥相关波列称之为东亚/太平洋型 (EAP 型) 遥相关波列 (图 1)。

正如图 2a 所示, 当西太平洋暖池处于暖状态, 菲律宾周围热带西太平洋上空对流活动强, 则在菲律宾周围热带西太平洋上空有一气旋式环流异常, 而在我国长江、淮河流域、日本上空有一反气旋式环流异常, 即西太平洋副热带高压位置偏北, 从我国华北经东北到鄂霍次克海上空有一气旋式环流异常, 这种情况, 我国长江、淮河流域梅雨弱; 相反, 当西太平洋暖池处于冷状态, 菲律宾周围热带西太平洋上空对流活动弱, 如图 2b 所示, 则在菲律宾周围热带西太平洋上空有反气旋式环流异常, 而在我国长江、淮河流域、日本上空有一气旋式环流异常, 即西太平洋副热带高压偏南, 这种情况, 我国长江、淮河流域梅雨强, 并经常发生洪涝灾害。因此, 我国东部夏季季风降水异常经常呈现“+ - +”或“- + -”的三极子型的波列分布。

为什么东亚夏季风环流系统和降水异常经常呈现出“+ - +”或“- + -”的波列分布? 在 Rossby 波能量频散理论的启迪下, 并应用 Hoskins and

Karoly (1981) 关于 Rossby 波在球面大气传播路径公式, Huang and Li (1987) 以及黄荣辉和李维京 (1988) 计算了北半球夏季菲律宾周围热源强迫所产生的准定常行星波在北半球的传播路径 (图 3)。从图 3 可以看到: 在北半球夏季, 由菲律宾周围热源强迫所产生的纬向波数 1~3 准定常行星波从菲律宾周围经东亚和东北亚向大西洋传播, 而纬向波数 4~6 准定常行星波从菲律宾周围经东亚和北太平洋向北美和落基山脉传播。若把图 3 和图 1 对比, 我们可以看到, EAP 型遥相关是由于夏季菲律宾周围强对流活动生成的热源强迫所产生的准定常行星波在北半球传播的结果。

在北半球夏季沿东亚经向传播的 EAP 型遥相关不仅可以从上述理论上所求的准定常行星波传播路径得到证明, 而且还可以从数值模拟得到证实。图 4 是用一个简单 34 层准地转模式 (Huang and Gambo, 1982a) 对菲律宾周围热源异常强迫所响应的北半球夏季 500 hPa 高度距平分布图。从图 4 可以看到, 菲律宾周围加热异常可以强迫产生如图 1 所示的 EAP 型大气环流异常遥相关分布。为了更好地验证北半球夏季 EAP 型遥相关是菲律宾周围热源异常所引起, Huang and Lu (1989) 还应用 Zeng et al. (1986) 所设计的 2 层原始方程大气环流数值模型 [General Circulation Model of Institute of Atmospheric Physics (IAP-GCM)] 研究了位于菲律宾周围热带西太平洋海表面温度 (SST) 偏暖所引起北半球 500 hPa 高度场距平分布 (图 5)。从图 5 可以看到, 当菲律宾周围的 SST 偏高, 即菲律宾周围对流活动偏强, 则它可以引起一系列与图 1 相似的遥相关波列分布, 即负高度场距平区出现在中印半岛和南海上空, 而正高度场距平区位于我国华北; 并且, 另一个负高度场距平区分布在鄂霍茨克海和堪察加半岛上空, 而另一个正高度场距平区位于阿拉斯加上空; 此外, 一个负高度场距平位于美国西海岸。因此, 应用大气环流数值模式得到的菲律宾周围加热所引起北半球夏季大气环流异常的分布与 EAP 型遥相关波列分布相近。

最近, 我们利用 IPCC-AR5 (The Fifth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change) 35 个全球海—气耦合模式资料就这些模式对北半球夏季大气环流异常和东亚夏季风系统的模拟能力进行评估, 结果表明了 IPCC-AR5 35 个全球海—气耦合模式都能够模拟出

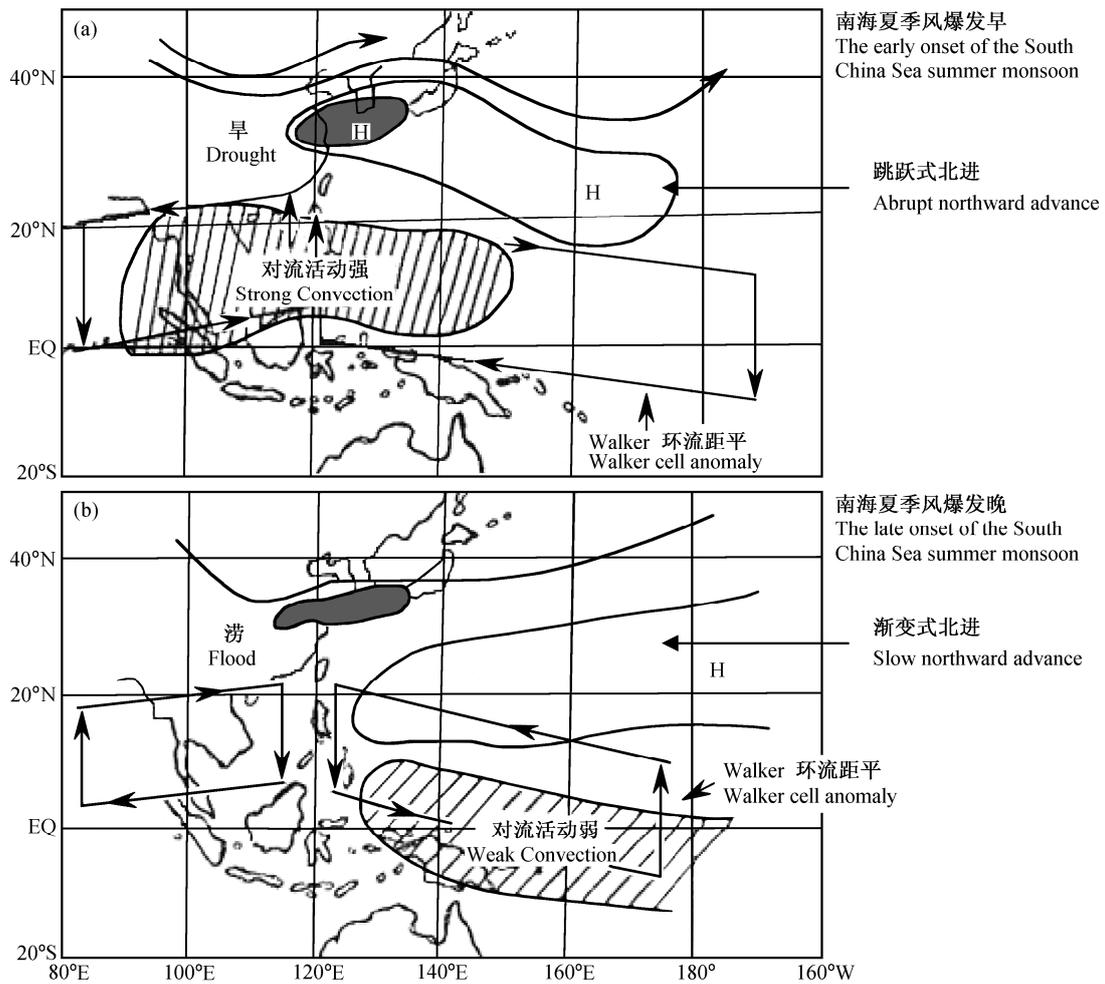


图 2 北半球夏季西太平洋暖池 (0°~14°N, 130°~150°E) 的热力状态、菲律宾周围的对流活动、西太平洋副热带高压位置与长江、淮河流域夏季风降水异常分布之间的关系示意图：(a) 暖池处于暖状态；(b) 暖池处于冷状态

Fig. 2 Schematic map of the relationships among the thermal state of the West Pacific warm pool (0°–14°N, 130°–150°E), the convective activities around the Philippines, the West Pacific subtropical high, and the summer monsoon rainfall anomaly in the Yangtze River and Huai River valleys in the (a) warm and (b) cooling states of the West Pacific warm pool

EAP 型遥相关分布特征，只是各模式模拟的 EAP 型的位置和强度与观测存在个别差异，这与环流场对模式依赖性有关 (图 6)。但各模式模拟结果都能够说明 EAP 型遥相关是北半球夏季大气环流异常分布的主要特征之一。

上述研究表明了叶先生提出的 Rossby 波能量频散理论 (Yeh, 1949) 对于我们开展 EAP 型遥相关波列的形成机理研究有重要启迪作用。此遥相关波列对于东亚夏季风的变异起到重要作用。

### 2.3 关于 EAP 型遥相关模态性质的研究

关于 EAP 型遥相关模态的性质，近年来已吸引一些学者的关注。黄荣辉和李维京 (1988)、Huang and Sun (1992) 从 EAP 型遥相关的激发和维持机

制出发，提出了北半球夏季沿东亚经向传播的 EAP 型遥相关是菲律宾周围热源强迫产生的准定常行星波在北半球传播的结果，这表明了 EAP 型遥相关波列是由菲律宾周围对流活动异常所激发，它可能是一种热力模态 (Huang et al., 2012)。然而，Kosaka and Nakamura (2006) 指出，夏季沿东亚经向传播的遥相关波列能够从东亚和西北太平洋上空的基本气流得到动能和从基本态得到有效位能，因此，EAP 型遥相关波列不仅是一种热力模态，而且也是一种动力模态。这正如 Lu et al. (2006) 所指出的夏季东亚和西北太平洋上空环流异常包含了两个主要模态：第一模态是与热带热力强迫所产生的环流变异有关；第二模态是与大气内动力有关的环流变

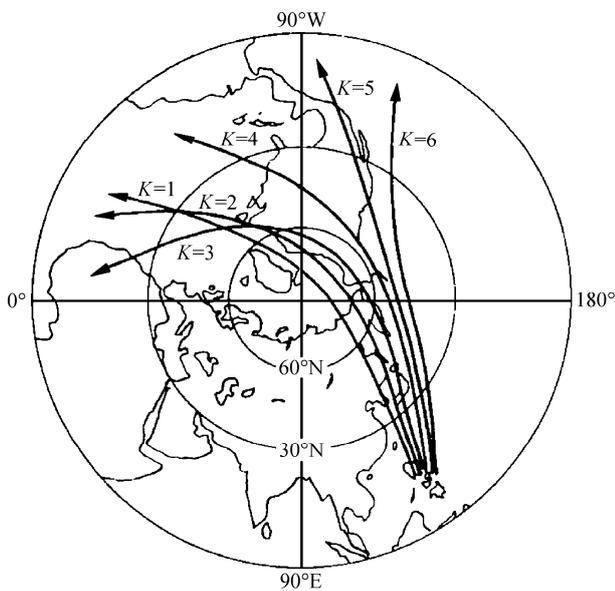


图3 应用 Hoskins and Karoly (1981) 所提出的行星波传播路径公式计算得到的北半球夏季菲律宾周围热源强迫所产生的准定常行星波在北半球上空的传播路径。 $k$  表示准定常行星波的波数

Fig. 3 The propagating ray paths of quasi-stationary planetary waves forced by a heating source around the Philippines in boreal summer, calculated using the formula of the propagating ray path of planetary waves proposed by Hoskins and Karoly (1981).  $k$  represents the number of quasi-stationary planetary waves

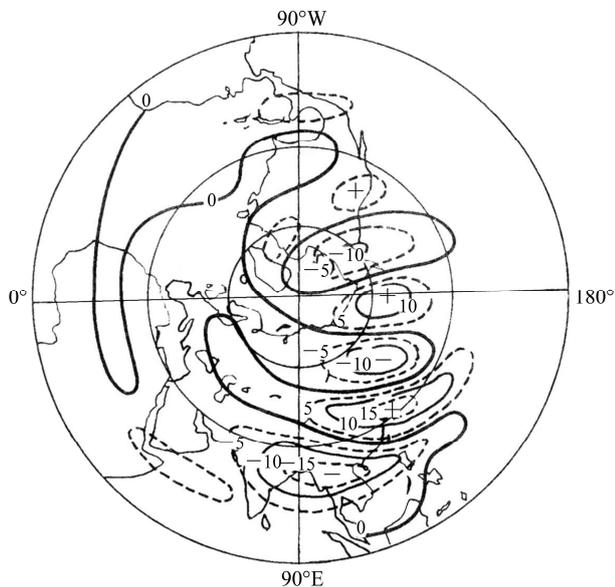


图4 由简单 34 层准地转数值模式 (Huang and Gambo, 1982a) 计算得到的北半球夏季对菲律宾周围理想热源异常所响应的 500 hPa 高度场距平 (单位: gpm) 分布

Fig. 4 Distribution of the 500-hPa height anomalies (units: gpm) over the Northern Hemisphere in response to an idealized heating source around the Philippines, calculated using a simple 34-layer quasi-geostrophic model (Huang and Gambo, 1982a)

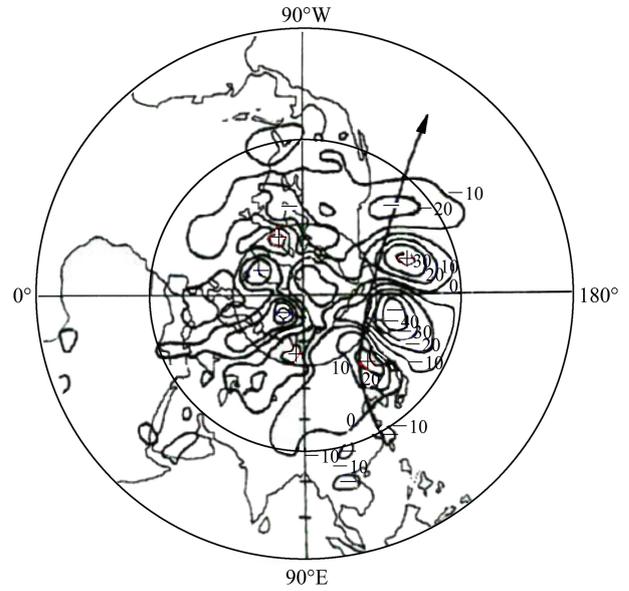


图5 由 IAP-GCM 模式 (Zeng et al., 1986) 积分 30 天做平均得到的菲律宾周围 SST 偏高所引起的 7 月份北半球 500 hPa 高度距平 (单位: gpm) 分布

Fig. 5 Distribution of the 500-hPa height anomalies (units: gpm) in July due to the positive SST anomalies in the tropical western Pacific around the Philippines, averaged for 30 days of integration of the GCM of Institute of Atmospheric Physics (Zeng et al, 1986)

异有关。最近, Kosaka and Nakamura (2010) 进一步研究结果表明了 P-J 振荡还是一种湿动力模态, 它不仅通过干大气的能量转换来维持, 而且还通过与大气的湿过程相互作用来维持。

### 3 Rossby 波能量频散理论对“丝绸之路 (Silk Road)”型遥相关研究的引领作用

叶先生提出的 Rossby 波能量频散理论 (Yeh, 1949) 对“Silk Road”型遥相关的研究也起着重要的引领作用。

#### 3.1 关于“Silk Road”型遥相关及其激发和维持机制的研究

夏季东亚季风系统和降水的异常呈现经向三极子型分布或经向偶极子型分布, 它不仅受 EAP 型遥相关的影响, 而且也受沿欧亚大陆对流层上层副热带急流传播的“丝绸之路 (Silk Road)”型遥相关的影响。在 Rossby 波能量频散理论的启迪下, Lu et al. (2002) 分析了夏季北半球对流层上层经向风的变化。他们的分析结果表明了沿从里海附近到东亚对流层上层副热带急流分布的经向风变异存

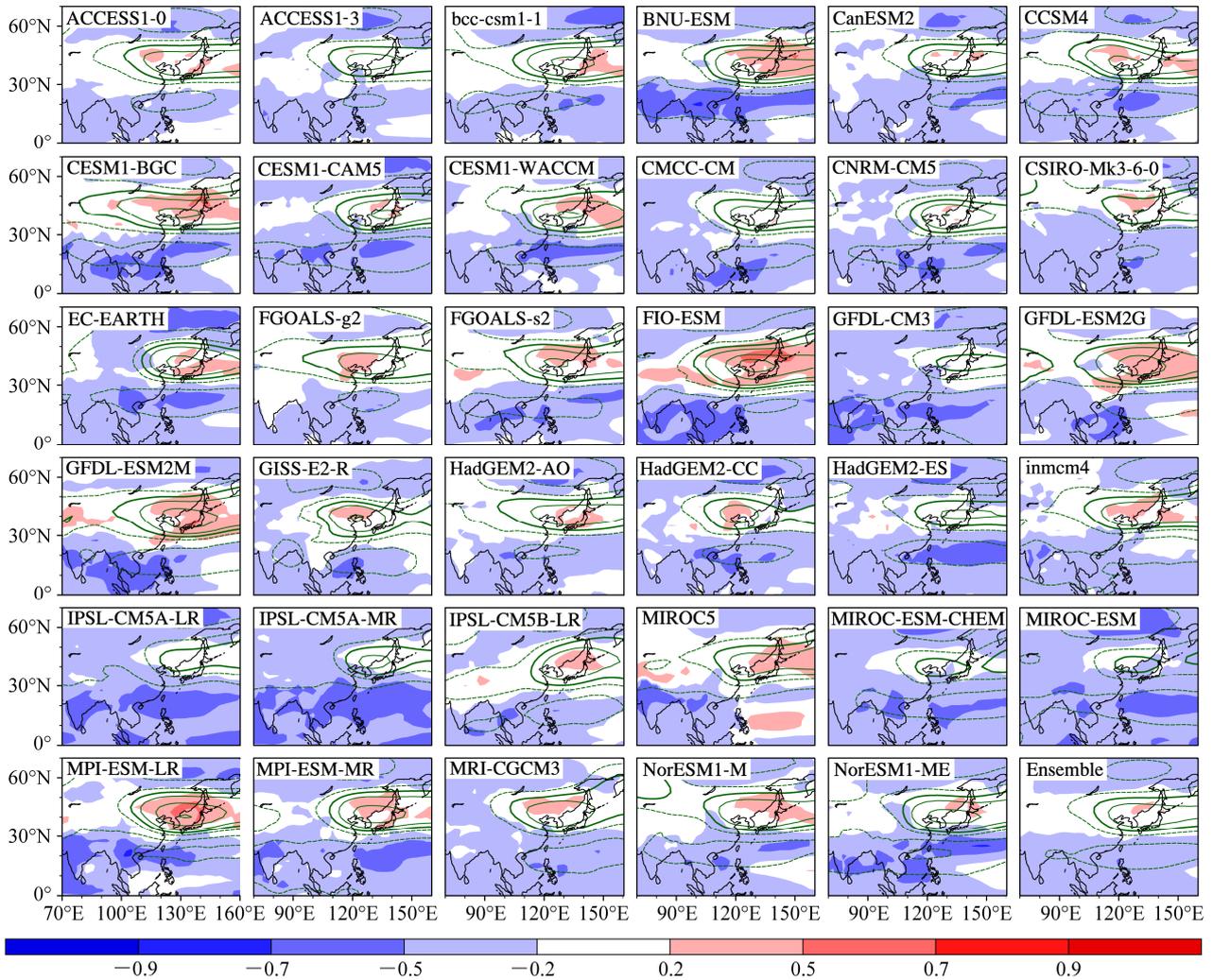


图6 IPCC-AR5 35个海—气耦合模式所模拟的1979~1999年6~8月平均的北半球夏季500 hPa高度场(等值线)和地表温度(阴影)与EAP指数(Huang, 2004)的相关系数分布。实线(红色阴影)和虚线(蓝色阴影)分别表示正相关和负相关。CMIP5资料来自<http://pcmdi-cmp5.llnl.gov/cmip5/availability.html> [2015-09-02]

Fig. 6 Distributions of the correlation coefficients between EAP index defined by Huang (2004) and the 500-hPa height anomalies (contour) and surface temperature (shaded) averaged for June–August during the period 1979–1999 [the results are from 35 IPCC-AR5 (the Fifth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change) air–sea coupled climate models]. The solid lines (red area) and dashed lines (blue area) denote positive correlation and negative correlation, and the color bar shows the correlation coefficients. Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 data are available at <http://pcmdi-cmp5.llnl.gov/cmip5/availability.html> [2015-09-02]

在着一遥相关波列。之后 Enomoto et al. (2003) 提出这个遥相关波列是准定常 Rossby 波沿亚洲对流层上层副热带急流传播的结果，并把此遥相关称为“丝绸之路 (Silk Road)”型遥相关。这可能是因为引起此遥相关的准定常 Rossby 波列是沿古代“丝绸之路”传播的。而且，在北半球冬季也存在从西亚到东亚的纬向遥相关型，对应着沿急流波导东传的 Rossby 波列 (Hsu and Lin, 1992)。

“Silk Road”型遥相关对于东亚夏季风系统变

异有重要影响。陶诗言和卫捷 (2006) 从再分析资料的分析提出了“Silk Road”型遥相关对于西太平洋副热带高压和东亚夏季风降水的雨带北进或南撤有重要影响。Hsu and Lin (2007) 也同样指出东亚夏季降水异常三极子型分布不仅与 EAP 型遥相关有关，而且与沿亚洲副热带急流传播的“Silk Road”型遥相关有关。

关于“Silk Road”型遥相关的激发机制，由于此 Rossby 波列的波源位于西亚，而西亚并没有强

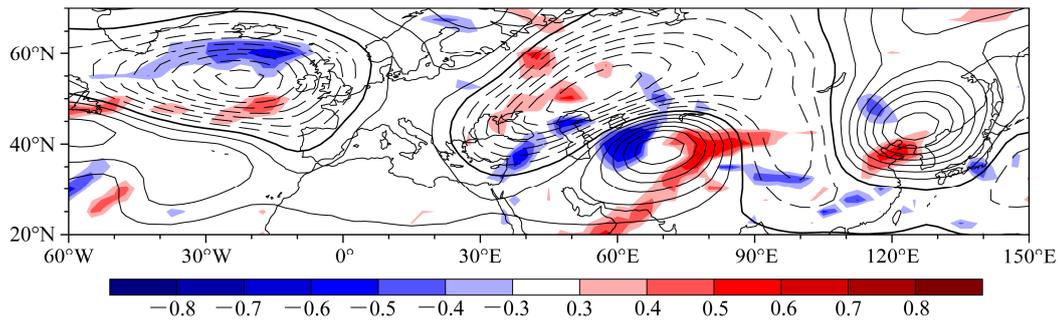


图 7 1958~2002 年 7 月欧亚大陆上空 200 hPa 经向风场 SVD 第一模态时间系数序列与 Rossby 波源的相关系数（红和蓝色分别表示正和负值）及该时间序列与 200 hPa 高度场相关系数（实、虚线分别表示正、负值）。风场和高度场资料取自 ERA-40 再分析资料（Uppala et al., 2005）

Fig. 7 Distributions of the correlation coefficients between the corresponding time series of the first mode of SVD (singular value decomposition) analysis of meridional wind fields at 200 hPa and the wave source for Rossby waves (red and blue colors indicate positive and negative values, respectively) and the correlation coefficients between this corresponding time series and 200 hPa height fields (solid and dashed lines indicate positive and negative values, respectively) over the Eurasian continent in July 1958–2002. The wind and geopotential height field data are from ERA-40 (The European Center for Medium-Range Weather Forecasts 40-year Reanalysis data) (Uppala et al., 2005)

的地形和热源强迫，为什么却产生此准定常 Rossby 波波列，这一直吸引许多气象学家的关注。最近，Chen and Huang (2012) 在上述研究的基础上进一步分析研究了“Silk Road”型遥相关的激发和维持机制，分析结果表明了“Silk Road”型遥相关是北半球夏季欧亚大陆对流层上层经向风的第一主模态（图 7），是亚洲副热带急流上的低频 Rossby 外波模态，它在季节内、年际和年代际时间尺度上都存在显著信号；并且，分析结果还表明，“Silk Road”型遥相关是热带西印度洋对流活动引起的加热在对流层上层产生的辐散流场所激发，此对流层上层辐散流场引起的涡度平流可能是此 Rossby 波列的波源。图 7 是热带印度洋加热所产生的欧亚大陆 Rossby 波源（Sardeshmukh and Hoskins, 1988）与 200 hPa 经向风场 SVD（singular value decomposition）第一主模态时间序列的相关系数以及 200 hPa 经向风场 SVD 第一主模态时间序列与 200 hPa 高度场的相关系数分布。从图 7 可以看到，里海附近的辐散风引起的涡度平流是“Silk Road”型遥相关的波源。这表明了热带印度洋的对流活动激发了对流层上层的辐散风，而在西亚辐散风对涡度的平流作用激发了“Silk Road”型遥相关。

Chen et al. (2013) 的研究还表明了维持此遥相关的内动力学机制有大气内部的正压过程和斜压过程：一方面，由于亚洲副热带急流的波导作用，“Silk Road”型遥相关通过正压能量转换过程从基本气流获得能量；另一方面，“Silk Road”型遥相

关能够通过斜压能量转换过程从基本态获得位能，而热力耗散所激发的 Rossby 外波的斜压不稳定则是这种斜压能量转换过程的主要机制。这可能是由于热力耗散的作用，扰动位相随高度倾斜，从而扰动可以从平均流获得有效位能。因此，斜压能量转换过程对于“Silk Road”型遥相关的自维持起着重要作用。

从上述的研究结果可以看到，在北半球夏季从西亚到东亚对流层上层大气环流异常存在着一个明显的纬向遥相关波列，即“Silk Road”型遥相关，它是西亚上空辐散风涡度平流激发的准定常 Rossby 波沿亚洲副热带急流传播所形成。这些研究都是叶笃正先生所提出的 Rossby 波能量频散理论的应用与发展。

### 3.2 关于“Silk Road”型遥相关波列与 EAP 型遥相关波列相互作用的研究

影响东亚夏季气候变异最重要的两个遥相关型是沿亚洲副热带急流纬向传播的“Silk Road”型遥相关和沿东亚经向传播的 EAP 型遥相关，他们并不是没有关联的，而是存在着相互作用。按照 Lu (2004) 的研究，EAP 型遥相关有明显的季节内变化，一般 EAP 型遥相关在 6 月份偏弱，而在 7、8 月份偏强。这一方面可能是由于 6 月份西太平洋气流垂直切变小，不利于热带西太平洋加热对东亚和西北太平洋大气波动内、外模态的激发，而 7~8 月西太平洋气流的垂直切变强，这利于热带西太平洋加热对大气波动内、外模态的激发；另一方面可

能是由于东亚副热带急流在 7 月下旬从  $40^{\circ}\text{N}$  北跳到  $45^{\circ}\text{N}$  附近 (Lin and Lu, 2008), 急流轴位置偏北, 垂直切变更有利于内模态和外模态的耦合 (Kosaka and Nakamura, 2010; Ye and Lu, 2011), 因而无论在东亚上空对流层低层或者对流层上层环流异常都比较强, 这就引起沿东亚经向传播的 EAP 遥相关波列的加强。

上述研究都表明沿东亚经向传播的 EAP 型遥相关受沿亚洲对流层上层副热带急流纬向传播的“Silk Road”型遥相关的调制和影响。这说明两列 Rossby 波波列是会产生非线性相互作用, 因此, Rossby 波能量频散的非线性相互作用应进一步深入研究。

#### 4 Rossby 波能量频散理论对北半球夏季东亚上空大气环流遥相关变化及其机理研究的引领作用

在 Rossby 波能量频散理论的引领下, 近年来

我们开展了 EAP 型和“Silk Road”型遥相关波列的年际和年代际变化及其对我国东部夏季风降水的年际和年代际变化的影响机理研究 (Huang et al., 2012)。

##### 4.1 关于东亚上空 EAP 型遥相关波列的年际变化及其对我国东部夏季风降水变化影响的研究

东亚夏季盛行夏季风, 由于季风的年际变化, 我国东部夏季降水有很明显的年际变化。图 8a、b 和图 8c、d 分别是我国东部夏季风降水的两个主模态的空间分布和相应的时间系数序列。从图 8a、b 和图 8c、d 可以看到我国东部夏季风降水异常存在着经向三极子型与经向偶极子型分布, 并且, 第一主模态 (经向三极子型) 的时间变化呈现 2~3 a 周期的年际变化。黄荣辉等 (2006) 指出, 我国东部夏季降水第一主模态呈现经向三极子结构与夏季东亚纬向水汽输送第一主模态呈现经向三极子型分布关系密切 (图略), 夏季东亚水汽输送 EOF 第一模态 (EOF1) 的空间分布也呈现经向三极子结构,

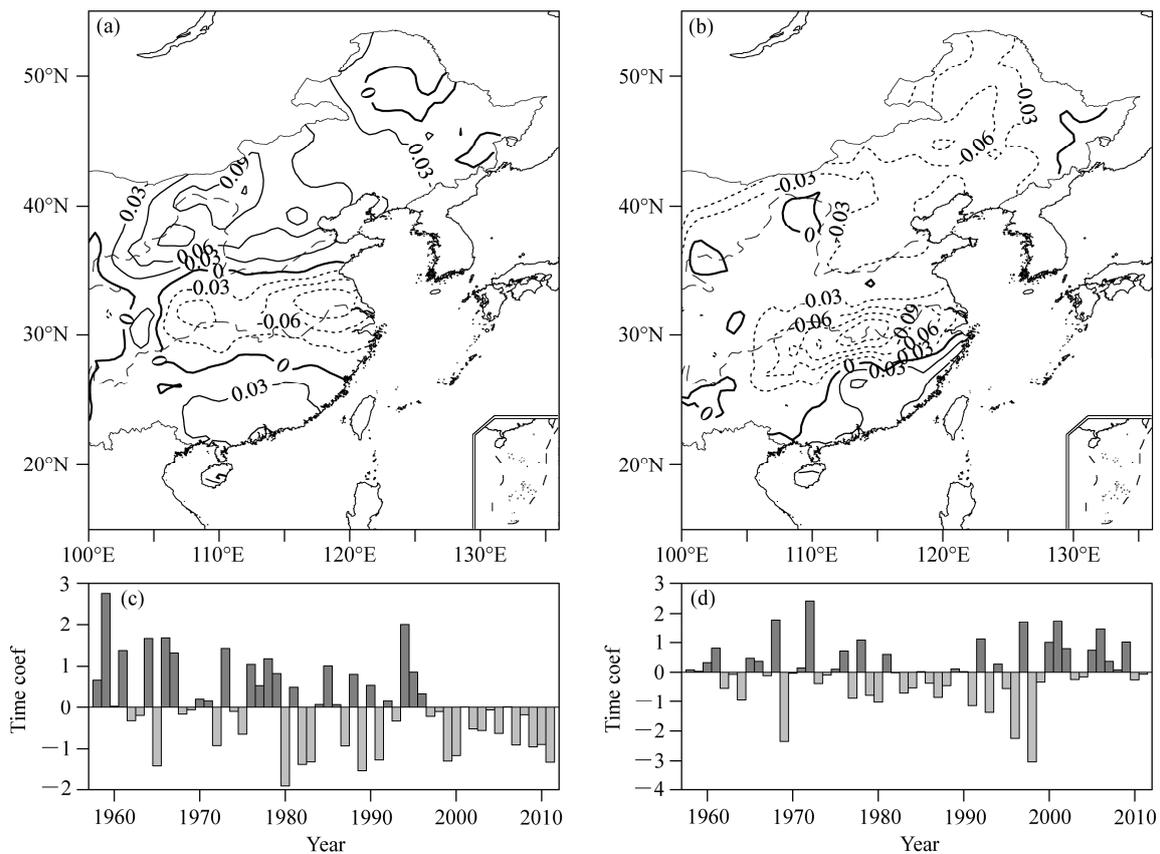


图 8 我国东部 1958~2011 年夏季降水 EOF 分析 (a) 第一模态 (EOF1) 和 (b) 第二主模态 (EOF2) 的空间分布和 (c)、(d) 相应的时间系数序列。图 (a) 和 (b) 中实、虚分别表示正、负值; EOF1 和 EOF2 对方差的贡献分别为 12.2% 和 8.9%

Fig. 8 (a, b) Spatial distributions and (c, d) corresponding time coefficient series of the first and second modes of EOF analysis (EOF1 and EOF2) of summertime (June–July–August, JJA) rainfall in eastern China for 1958–2011. The solid and dashed lines in (a, b) indicate positive and negative values, respectively; EOF1 and EOF2 explain 12.2% and 8.9% of the total variance, respectively

并具有准两年周期的年际变化特征,它与西太平洋暖池热力的年际变化有很好的关联。

为什么我国东部夏季降水和东亚夏季水汽输送呈现明显的三极子型分布,黄荣辉等(Huang et al., 2007)利用 EAP 型遥相关进一步解释了我国东部夏

季降水异常型及其年际变化成因,指出:我国东部夏季降水和东亚夏季水汽输送异常在空间分布呈现三极子型分布并具有准两年周期的年际变化是由于西太平洋暖池上空热源强迫所产生的 Rossby 波列(即 EAP 型遥相关)所产生。图 9 是由 1958~2011 年夏季东亚上空 500 hPa 高度场的 EOF1 时间系数所回归的 500 hPa 高度场距平分布。从图 9 可以看到,东亚和热带西太平洋上空夏季风环流异常呈现出一个经向三极子型结构,这个分布型似如 EAP 型遥相关。

为了能够反映 EAP 型遥相关的年际变化及其对长江、淮河流域夏季风降水的影响, Huang (2004) 从 EAP 型遥相关波列的分布定义了一个 EAP 型指数。这个指数不仅与我国长江、淮河流域夏季风降水有很好的负相关,而且与韩国夏季降水也有很好的对应关系;并且,这个指数与华北和华南夏季降水有正相关。这表明了这个指数可以描述东亚夏季风降水的年际变化。图 10 是利用 Huang (2004) 的定义和 NCEP/NCAR 再分析资料所计算的夏季(6~8 月) EAP 指数的小波分析。从图 10 可以看到,在 20 世纪 90 年代末以前这个指数呈现 2~3 a 周期的年际变化,这说明 EAP 型遥相关的年际变化与东亚夏季风降水的 2~3 a 周期的年际变化有密切关系。Hsu and Lin (2007) 以及 Kosaka et al. (2011) 也指出东亚夏季风降水异常的经向三极子型分布是与沿东亚经向分布的 EAP 型遥相关及沿对流层上层副热带急流传播的“Silk Road”型遥相关有密切关

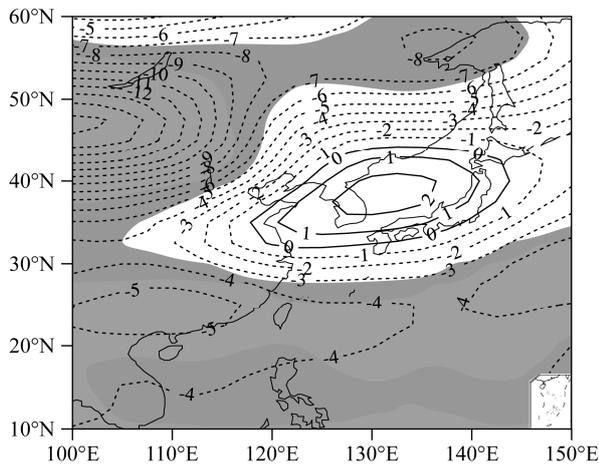


图 9 由 1958~2011 年 500 hPa 高度场的 EOF1 时间系数所回归的东亚上空夏季 500 hPa 高度距平场(单位: gpm) 的分布。实、虚线分别表示正、负高度距平,阴影区表示信度超过 95%;高度场资料取自 NCEP/NCAR 再分析资料 (Kalnay et al., 1996)

Fig. 9 Distribution of summertime 500-hPa height anomalies (units: gpm) over East Asia regressed by the time coefficients of EOF1 of summertime 500 hPa height for 1958–2011. Solid and dashed lines indicate positive and negative height anomalies, respectively; areas above 95% confidence level are shaded; geopotential height field data are from the NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) reanalysis dataset (Kalnay et al., 1996)

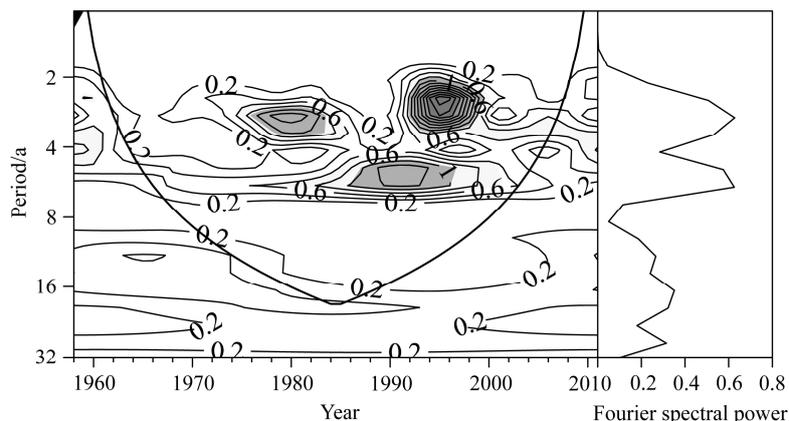


图 10 利用 Huang (2004) 的定义和 NCEP/NCAR 再分析资料高度场 (Kalnay et al., 1996) 计算的 EAP 指数的小波分析结果。左图中等值线为小波谱能量,阴影表征显著性区域;右图中横坐标为傅里叶谱能量

Fig. 10 Wavelet analysis of the EAP index calculated using the 500 hPa height from NCEP–NCAR reanalysis data (Kalnay et al., 1996), based on definition of Huang (2004). The contour in the left panel is wavelet spectral power and the areas beyond 95% confidence level are shaded; the horizontal coordinate in right panel represents Fourier spectral power

系。同时，从 EAP 指数的小波分析结果可以看出，从 1970 年代初到 1990 年代末，EAP 指数 2~3 a 变率较为显著，表明该时段 EAP 型模态占主导模态，而其他时段不明显。这说明 EAP 型遥相关也存在年代际的变化，这可能与外强迫和基本气流不同有关。

#### 4.2 关于东亚上空 EAP 型遥相关的年代际变化及其对我国夏季季风降水变化影响的研究

由于受东亚夏季风年代际变化的影响，我国东部夏季降水有明显的年代际变化。黄荣辉等(2013)研究表明：从 20 世纪 70 年代到 21 世纪初我国东部夏季季风降水经历了三次明显的年代际跃变。如图 11 所示，在 1958~1977 年期间，中国东部夏季降水异常从南到北呈现“+ - +”的经向三极子型分布，即华南和华北地区降水偏多，而长江流域降水偏少；在 1978~1992 年期间，我国东部夏季降水异常出现了与 1958~1977 年相反的经向三极子型分布，即呈现“- + -”的经向三极子型分布；在 1993~1998 年期间，由于我国东部夏季降水的第二模态（即经向偶极子型）开始增强，因此，出现了从南到北经向三极子型与经向偶极子型的叠加，使得华南夏季降水明显增加；然而，在 1999~2011 年期间，我国东部夏季季风降水异常由经向三极子型分布转变为经向偶极子型分布，即呈现南涝北旱的特征。

上述夏季降水的年代际变化是与东亚上空夏季大气环流异常遥相关的年代际变化密切相关（黄荣辉等，2013）。图 12a-d 分别是 1958~1977 年、1978~1992 年、1993~1998 年和 1999~2011 年期间平均的夏季 1000~300 hPa 整层水汽输送通量的距平分布。从图 12a 可以看到：在 1958~1977 年期间，沿东亚上空夏季水汽输送通量距平在经向出现“反气旋—气旋—反气旋”三极子型异常分布，他们似如 EAP 型遥相关的波列分布；并且，从里海到我国东部夏季水汽输送通量距平在纬向出现“气旋—反气旋—气旋—反气旋”异常分布，他们似如“Silk Road”型遥相关的波列分布。此外，从图 12a 还可以看到，在我国东部有很强的向北水汽输送通量的异常，这表明此时期东亚夏季风偏强。把图 12b 与图 12a 相比较，可以看到：在 1978~1992 年期间，东亚上空水汽输送通量距平“气旋—反气旋—气旋—反气旋”三极子型异常分布，出现一列与图 12a 相反的 EAP 型遥相关波列分布；并且，从里海周围经中

亚到华北上空水汽输送通量距平呈现“反气旋—气旋—反气旋—气旋—反气旋”的异常分布，也出现一列与图 12a 所示的“Silk Road”型相反的波列分布。此外，从图 12b 还可以看到，此时期我国东部有较强的向南水汽输送异常，这表明东亚夏季风显著变弱。如图 12c 所示，1993~1998 年期间欧亚上空夏季水汽输送通量距平出现了与图 12a 和 12b 有一些不同的分布，沿东亚上空水汽输送异常呈现“反气旋—气旋”的偶极子型异常分布；并且，在欧亚大陆上空从里海周围经中亚到我国东部呈现“反气旋—气旋—反气旋—气旋”类似“Silk Road”型遥相关的波列分布。此外，从图 12c 还可以看到，东亚上空有较强向北水汽输送异常，这表明此时期东亚夏季风又变得较强。然而，把图 12d 与图 12a-c 相比较，可以明显看到，在 1999~2011 年期间，无论沿东亚上空经向分布的水汽输送通量距平还是沿东亚上空纬向分布的水汽输送通量距平都发生了明显的变化，从东亚上空水汽输送通量距平的经向分布看，在我国南方有气旋性水汽输送异常分布，而在北方有反气旋性水汽输送异常分布，这表明此时期东亚上空水汽输送通量距平呈现经向偶极子型分布；并且，从欧亚上空水汽输送通量距平的纬向分布看，从里海周围经中亚到我国华中和华东地区上空出现“反气旋—气旋—反气旋—气旋”类似“Silk Road”型遥相关的波列分布。此外，从图 12d 还可以看到：从我国东北到西南地区上空出现向南的水汽输送通量异常，这表明此时期东亚夏季风又变得偏弱，使得到达东北、华北地区的水汽输送偏弱，因此，在上述地区夏季发生了不同程度的持续干旱，而从华南到淮河流域东部有很强的向北水汽输送通量异常，这引起此时期上述地区夏季降水明显增多，并发生了严重的洪涝灾害。

从上述欧亚大陆上空夏季整层水汽输送通量距平分布年代际变化的分析结果可以看到：我国东部夏季季风降水从 20 世纪 70 年代后发生的三次年代际变化不仅与沿东亚经向传播的 EAP 型遥相关波列分布的年代际变化有密切关系，而且与沿欧亚上空对流层上层副热带急流传播的“Silk Road”遥相关波列的年代际变化有关。这两列 Rossby 波列都是准定常 Rossby 波在球面大气的传播所形成，因此，Rossby 波能量频散理论不仅为天气预报提供重要的科学依据，而且为夏季短期气候预测也提供了新的思路。

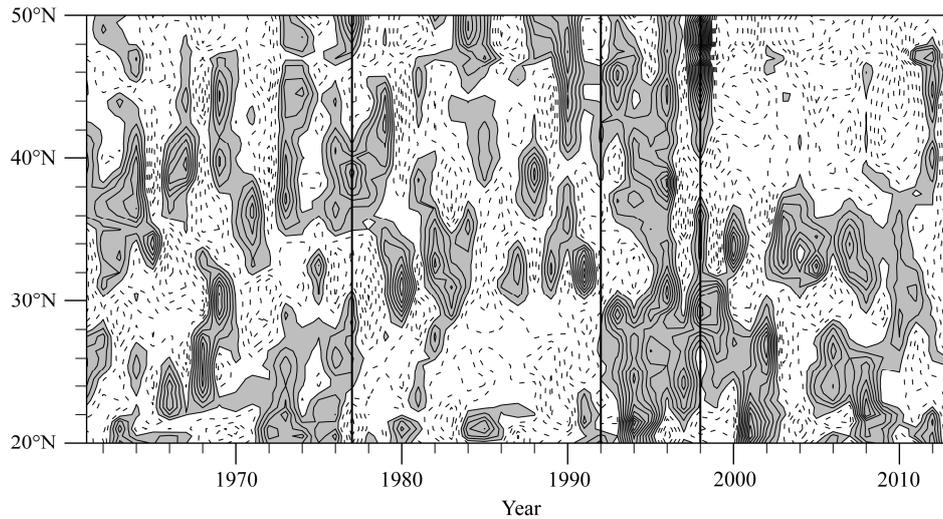


图 11 我国东部沿  $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$  平均的夏季降水距平百分率随纬度和时间的分布。图中实、虚线分别表示正、负距平，等值线间隔为 0.1；降水资料取自我国 756 观测站降水资料集

Fig. 11 Distribution of summertime (JJA) rainfall anomalies (percentage) averaged for  $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$  in eastern China with latitude and time. The solid and dashed lines indicate positive and negative anomalies with interval 0.1, respectively. The precipitation data are from the datasets of 756 observational stations in China

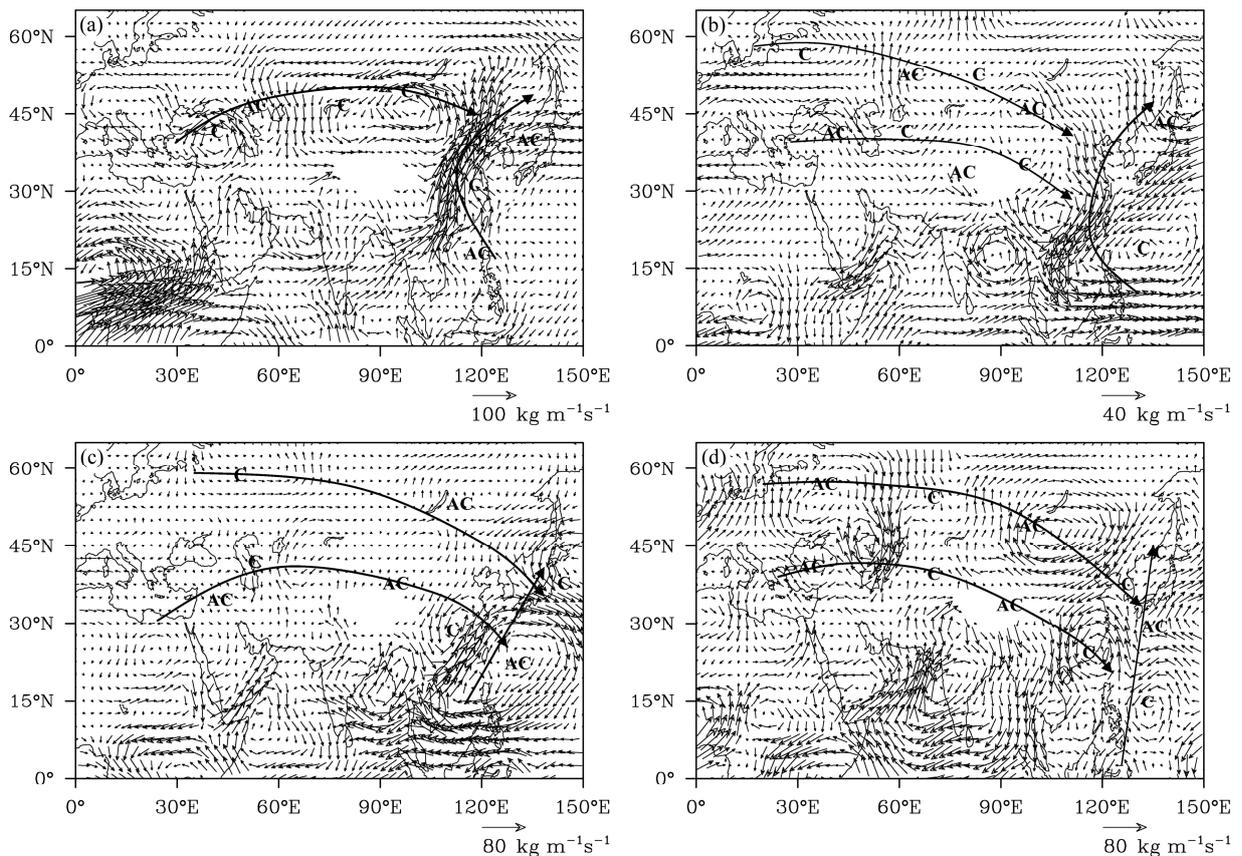


图 12 欧亚大陆上空 (a) 1958~1977 年、(b) 1978~1992 年、(c) 1993~1998 年和 (d) 1999~2011 年期间平均的夏季 1000~300 hPa 整层水汽输送通量的距平 (单位:  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) 分布。水汽和风场资料取自 NCEP/NCAR 再分析资料 (Kalnay et al., 1996)

Fig. 12 Anomalous distributions of summertime (JJA) water vapor transport fluxes (units:  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) integrated from 1000 hPa to 300 hPa over the Eurasian continent, averaged for (a) 1958–1977, (b) 1978–1992, (c) 1993–1998, and (d) 1999–2011. Water vapor and wind field data are from the NCEP/NCAR reanalysis dataset (Kalnay et al., 1996)

## 5 Rossby 波能量频散理论对北半球冬季准定常行星波在球面三维大气传播研究的推动作用

叶先生所提出的 Rossby 波频散理论不仅推动了准定常行星波在球面大气二维传播的研究，而且对于北半球冬季准定常行星波在球面大气三维传播的研究也起了启迪作用。

### 5.1 关于北半球冬季准定常行星波在大气中垂直传播的研究

在叶笃正先生提出 Rossby 波能量频散理论之后，许多气象学家关注行星波在大气垂直方向的能量频散。Charney and Drazin (1961) 和 Eliassen and Palm (1961) 分别应用波的折射指数和能量的概念研究了准定常行星波在有垂直切变的基本气流中的垂直传播特征。之后，Dickinson (1968) 应用波导概念研究了准定常行星波在北半球冬季理想基本气流中的垂直传播特征，提出了准定常行星波能够在高纬度地区上空从对流层传播到平流层，并称之为极地波导。之后，Matsuno (1970, 1971) 研究了准定常行星波在北半球冬季实际的基本气流中从对流层向平流层的垂直传播特征，并提出平流层爆发性增温的动力机制。他指出了对流层准定常行星波往平流层传播并与平流层基本气流相互作用导致了冬季北半球平流层发生爆发性增温。因此，Rossby 波能量频散理论的提出首先推动了关于准定常行星波在大气中从对流层向平流层传播特征的研究，从而为对流层与平流层相互作用机理的研究奠定了理论基础。

### 5.2 Rossby 波频散理论对准定常行星波在三维球面大气传播特征研究的启迪作用

受叶笃正先生所提出的 Rossby 波能量频散理论的启迪，并在 Matsuno (1970, 1971) 研究的基础上，Huang and Gambo (1982a, 1982b)，黄荣辉和岸保勘三郎 (1983) 利用波的折射指数和 E-P 通量 (Eliassen-Palm flux) 系统地研究了北半球冬季准定常行星在球面大气的三维传播特征。

#### 5.2.1 从折射指数来研究准定常行星波在三维大气的传播特征

黄荣辉和岸保勘三郎 (1983) 从波的折射指数研究了北半球冬季准定常行星波在实际基流上的三维传播特征，他们指出：当波数为  $k$  的准定常行星波折射指数平方  $Q_k > 0$  时，波在球面三维大气中

总是由小的  $Q_0$  ( $Q_0 = Q_k + k^2 / \cos^2 \varphi$ ,  $\varphi$  表示纬度) 向着大的  $Q_0$  方向折射，即沿  $\nabla Q_0$  方向折射。而  $Q_0$  依赖于气流的经向和垂直切变以及气流本身。从图 13 的虚线可以看到，北半球冬季  $Q_0$  最小值分别位于中纬度地区上空的平流层下层和高纬度上空平流层上层，而在低纬度和高纬度上空是相对大的  $Q_0$  的区域。由于波只能沿  $Q_0$  梯度方向折射，故波不能在中纬度上空从对流层向平流层传播，波应被折射到  $Q_0$  较大的高纬度上空，并被极地所反射，因而波被聚焦到高纬度  $Q_0$  大的区域，从而在高纬度地区上空从对流层传播到平流层。这表明高纬度地区是准定常行星波从对流层传播到平流层的波导，即称为极地波导 (Dickinson, 1968)。同样，从图 13 还可以看到，准定常行星波还能从中纬度对流层低层传播到低纬度对流层上层，因此，在低纬度上空也是类似于上述准定常行星波的传播波导，称之为“低纬波导”或“另一支波导” (Huang and Gambo, 1982b; 黄荣辉和岸保勘三郎, 1983)。这表明了在北半球冬季准定常行星波在球面三维大气中的传播并不是只有极地波导，而是有两支波导，即如图 13 所

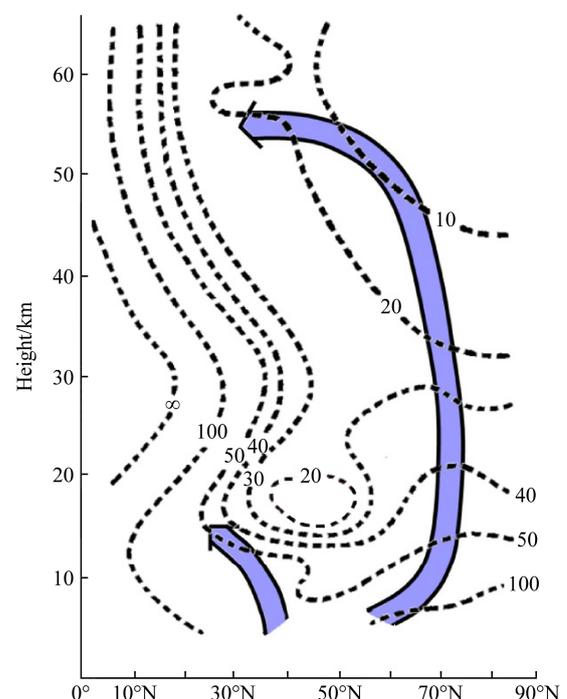


图 13 北半球冬季  $Q_0$  垂直分布 (虚线) 和准定常行星波三维传播波导示意图

Fig. 13 The vertical distribution of  $Q_0$  (refraction index, dashed lines) and a schematic diagram of the wave guides of the three-dimensional propagations of quasi-stationary planetary waves in boreal winter

示的极地波导和低纬波导。

从上述结果可以看到, 北半球冬季准定常行星波在三维大气中传播有两支波导。如图 13 所示, 若在低纬度地区或中纬度地区有一强迫源所产生的准定常行星波, 它不能直接从中纬度的对流层传播到平流层, 而是从低纬度或中纬度地区对流层准水平地传播到高纬度, 再通过极地波导传播到平流层, 并且它还能通过低纬波导传播到低纬对流层上层。

### 5.2.2 从 E-P 通量来研究准定常行星波在三维大气的传播特征

Eliassen and Palm (1961) 运用能量通量概念研究了波的垂直传播, 这个概念在 20 世纪 70 年代被 Andrews and McIntyre (1976) 所推广, 并提出了  $\beta$  平面近似的 E-P 通量。之后, Edmon et al. (1980) 在  $\Delta f / f$  是小的假设下把它推广到球面上。

由于准定常行星波的 E-P 通量是平行于波的群速度, 因此可以利用 E-P 通量形象地表征准定常行星波在球面三维大气的传播特征。图 14 是利用 NCEP/NCAR 再分析资料计算的 40 个冬季平均的

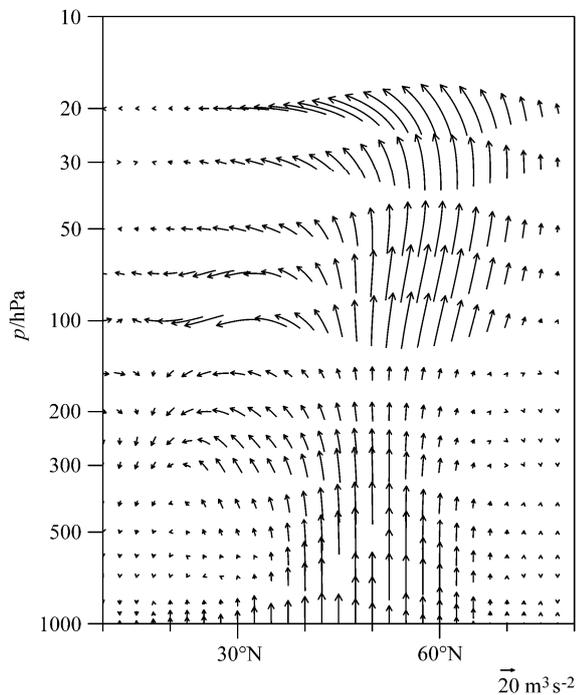


图 14 利用 NCEP/NCAR 再分析资料 (Kalnay et al., 1996) 计算的 40 个冬季 (1982~2001 年) 平均的准定常行星波 E-P 通量 (单位:  $\text{m}^3 \text{s}^{-2}$ ) 分布 (陈文和黄荣辉, 2005)

Fig. 14 E-P flux (units:  $\text{m}^3 \text{s}^{-2}$ ) cross sections of quasi-stationary planetary waves, averaged for 40 winters (1982–2001), from NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996) reanalysis data (Chen and Huang, 2005)

准定常行星波 E-P 通量的分布, 可以清楚地看到, 北半球冬季准定常行星波在球面三维大气中传播有两支波导: 一支是波通过极地波导从高纬度对流层传播到平流层; 另一支是波从中纬度地区上空通过低纬波导传播到低纬度地区对流层上层。

把图 14 与图 13 相比较, 可以看到: 在图 14 所示的北半球冬季准定常行星波在球面三维大气中的传播特征与前面利用波折射指数所分析的结果是一致的。

## 6 Rossby 波能量频散理论对东亚冬季风变化的内动力学机理研究的引领作用

在 Rossby 波能量频散理论的引领下, 我们开展了北半球冬季准定常行星波在三维球面大气传播波导的年际和年代际变化及其对东亚冬季风和我国冬季低温雨雪冰冻灾害年际和年代际变化影响的研究。

### 6.1 关于北半球冬季准定常行星波三维传播的年际变化及其对东亚冬季风变异影响的研究

东亚冬季盛行冬季风, 由于冬季风的年际变化, 我国冬季温度和降水呈现明显的年际变化, 并且有的年份冬季发生低温雨雪冰冻灾害, 如 2008 年 1 月, 由于东亚冬季风异常, 我国西南、华中和华南地区发生了严重的低温雨雪冰冻灾害, 造成了 1500 多亿元的经济损失 (黄荣辉等, 2014)。

东亚冬季风的年际变化是与北半球冬季准定常行星波在三维大气传播两支波导的年际振荡密切相关。Chen et al. (2003, 2005), 陈文和黄荣辉 (2005) 提出北半球冬季准定常行星波在三维大气传播的两支波导在年际时间尺度上存在着反相振荡的变化, 并对东亚冬季风年际变异有重要影响。他们指出: 当极地波导增强, 则低纬波导就减弱, 对流层有异常强的准定常行星波将通过极地波导传播到平流层, 而通过低纬波导向低纬度地区对流层顶附近传播将减弱; 相反, 当极地波导减弱, 则低纬波导就增强, 在对流层有异常强的准定常行星波通过低纬波导从中高纬度地区向低纬度地区上空对流层顶附近传播, 而通过极地波导向平流层的传播明显减弱。

黄荣辉等 (2007) 研究了北半球冬季准定常行星波在三维大气传播的年际变化对东亚冬季风年际变化的影响, 特别是分析了 2005 年冬季 (2005

年 12 月至 2006 年 2 月) 和 2006 年冬季 (2006 年 12 月至 2007 年 2 月) 东亚气候异常与北半球准定常行星波活动的关系。2005 年冬季北半球从西欧经乌拉尔地区到西伯利亚和东亚地区气温比常年偏低, 特别是在乌拉尔山东侧、蒙古高原的西北侧气温比常年偏低  $2^{\circ}\text{C}$  多, 出现了寒冬, 我国寒潮爆发频繁, 并导致了我国西北、东北地区以及长江流域冬季降水比常年偏多; 而 2006 年冬季, 从西欧经乌拉尔地区到西伯利亚和东亚地区气温比常年偏高, 特别是从欧洲经乌拉尔地区到贝加尔湖, 气温比常年偏高  $2^{\circ}\text{C}$  多, 出现了暖冬, 我国西北和华北地区降雪量比常年偏少 50% 以上, 胶东半岛和长江下游地区降水量也偏少。

2005 年冬季与 2006 年冬季欧亚大陆冬季气候的明显差异是与这两年冬季北半球准定常行星波的活动差异密切相关。图 15a 和 15b 分别是 2005 年和 2006 年冬季北半球准定常行星波的 E-P 通量及其散度分布。正如图 15a 所示, 2005 年冬季北半球准定常行星波活动为低指数, 即准定常行星波沿极地波导传播到平流层增强, 其结果导致了行星波 E-P 通量在高纬度对流层中、上层辐合加强, 而在副热带地区对流层中、上层行星波 E-P 通量辐合减弱, 即辐散加强, 这引起了北半球极锋急流减弱, 而副热带急流加强, 从而利于西伯利亚高压的发展, 并带来东亚冬季风的增强。而如图 15b 所示, 2006 年冬季北半球准定常行星波活动为高指数, 即准定常行星波沿低纬波导传播到低纬度地区对流层上层增强, 其结果导致了行星波 E-P 通量在副热带地区对流层中、上层辐合加强, 而在高纬度地区对流层中、上层行星波 E-P 通量辐合减弱, 即辐散加强, 这引起了北半球极锋急流加强, 而副热带急流减弱, 从而不利于西伯利亚高压的发展, 并带来东亚冬季风的减弱。这两年冬季北半球准定常行星波活动的差异也可以从图 15c 明显看到。

## 6.2 关于北半球冬季准定常行星波三维传播的年代际变化及其对东亚冬季风影响的研究

Huang and Wang (2006)、Wang et al. (2009) 的研究表明了东亚冬季风不仅有明显的年际变化, 而且有显著的年代际变化。从 20 世纪 70 年代到 21 世纪初, 我国冬季气温经历了两次明显的年代际跃变。在 1976~1987 年期间, 东亚冬季风偏强, 我国冬季气温普遍偏低, 我国冬季寒潮爆发频次偏多; 而在 1988~1998 年期间, 东亚冬季风偏弱,

我国冬季气温普遍偏高, 寒潮爆发频次明显偏少, 出现暖冬。但是, 在 1999~2012 年期间, 东亚冬季风又从弱变成强弱相间, 我国冬季气温又发生了明显的变化, 北方偏冷、南方偏暖, 气温从全国一致变化型变成南北振荡型, 冬季气温年际变化从 3~4 a 周期变成 2~8 a 周期 (黄荣辉等, 2014)。

黄荣辉等 (2014) 研究表明: 发生在 20 世纪 80 年代中后期和 90 年代末东亚冬季风的年代际变化是与北半球冬季准定常行星波活动的年代际变化密切相关。图 16a-c 分别是 1976~1987 年、1988~1998 年和 1999~2012 年期间平均的冬季北半球 1~3 波合成的准定常行星波及其散度分布。从图 16a 可以看到: 在 1976~1987 年期间, 北半球冬季准定常行星波在  $60^{\circ}\text{N}$  附近上空沿极地波导上传到平流层偏强, 而沿低纬波导传播到低纬度对流层上层偏弱, 这引起了北半球高纬度地区上空对流层和平流层行星波的 E-P 通量辐合很强, 而在副热带地区上空对流层中、上层行星波的 E-P 通量辐散很强; 并且, 从图 16b 可以看到: 在 1988~1998 年期间, 北半球冬季准定常行星波传播发生了变化, 与图 16a 相比较, 1988~1998 年期间, 北半球冬季准定常行星波在高纬度地区上空沿极地波导传播到平流层比 1976~1987 年期间冬季的传播变弱, 而在副热带地区上空沿低纬波导传播到低纬度地区上空对流层上层比 1976~1987 年期间的传播却变强, 这引起了 1988~1998 年期间冬季准定常行星波 E-P 通量在高纬度地区上空的辐合比 1976~1987 年期间的辐合变弱, 即有正的散度差, 而在副热带地区上空对流层上层准定常行星波 E-P 通量的辐散也比 1976~1987 年期间的辐散变弱, 即有负的散度差。此外, 正如图 16c 所示, 在 1999~2012 年期间平均的冬季, 北半球准定常行星波在高纬度地区沿极地波导上传到平流层又变强, 而在副热带地区通过低纬波导传播到低纬度地区对流层上层又变弱, 这引起了北半球高纬度地区上空对流层和平流层行星波 E-P 通量的辐合比 1988~1998 年期间冬季变强, 而在副热带地区对流层中、上层行星波 E-P 通量的辐散也变强, 这造成了在高纬度地区上空有负的 E-P 通量散度差, 而在副热带地区上空有正的 E-P 通量散度差。

上述结果表明了 20 世纪 70 年代以来北半球冬季准定常行星波的传播发生了两次明显的年代际变化, 并引起了准定常行星波 E-P 通量的辐散或辐

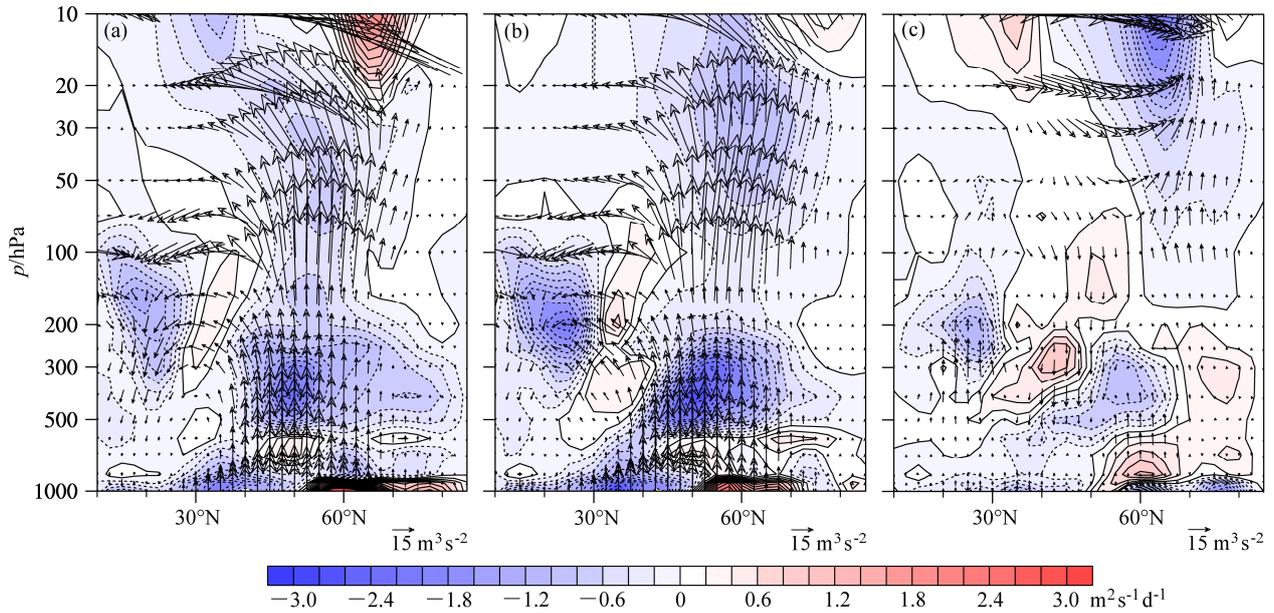


图 15 北半球 (a) 2005 年冬季和 (b) 2006 年冬季准定常行星波 1~3 波合成的 E-P 通量 ( $\times \rho^{-1}$ ) (矢量, 单位:  $\text{m}^3 \text{s}^{-2}$ ) 及其散度 (阴影, 单位:  $\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{d}^{-1}$ ) 分布以及 (c) 他们之差 (2006 年冬季减去 2005 年冬季)。图中实、虚线分别表示正值 (辐散) 和负值 (辐合); 红色 (蓝色) 阴影区表示辐散 (辐合); 资料取自 NCEP/NCAR 再分析资料 (Kalnay et al., 1996)

Fig. 15 The distributions of the E-P fluxes (multiplied by  $\times \rho^{-1}$  for displaying purpose) (vectors, units:  $\text{m}^3 \text{s}^{-2}$ ) of quasi-stationary planetary waves for wavenumbers 1-3 and their divergences (shaded, units:  $\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{d}^{-1}$ ) over the Northern Hemisphere in the winters of (a) 2005 (December 2005 to February 2006) and (b) 2006 (December 2006 to February 2007), and (c) the difference between them. Solid and dashed lines indicate positive (divergence) and negative (convergence) of planetary wave E-P fluxes, respectively. And the divergence/convergence regions of the E-P flux are shaded with red/blue colors. The datasets are from the NCEP/NCAR reanalysis dataset (Kalnay et al., 1996)

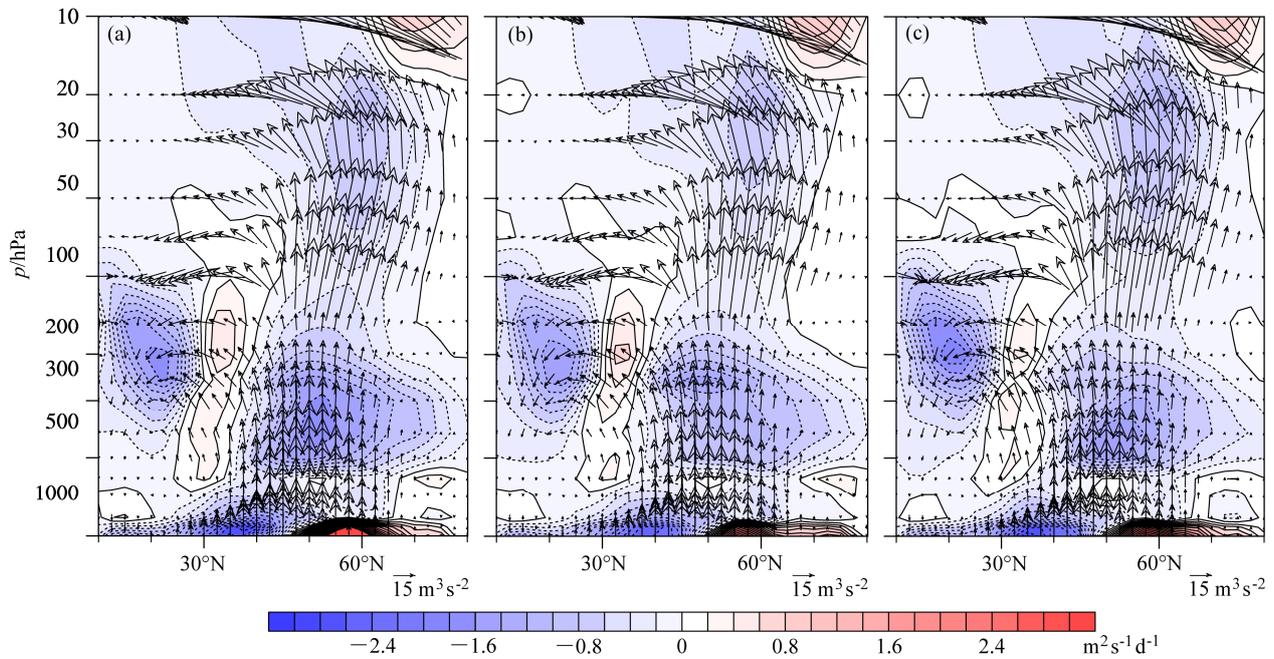


图 16 同图 15, 但为北半球 (a) 1976~1987 年、(b) 1988~1998 年和 (c) 1999~2012 年平均的冬季准定常行星波 1~3 波合成的 E-P 通量 ( $\times \rho^{-1}$ ) 分布

Fig. 16 Same as Fig.15, but for the composite distributions of E-P fluxes ( $\times \rho^{-1}$ ) of quasi-stationary planetary waves for wavenumbers 1-3 and their divergences

合的变化。而依据波—流相互作用, 准定常行星波 E-P 通量散度的变化将引起北半球冬季纬向平均气流的变化。1988~1998 年期间的冬季高纬度地区上空准定常行星波 E-P 通量辐散的加强引起了平均西风的加强, 而在副热带地区上空准定常行星波 E-P 通量辐合的加强引起了平均西风的减弱, 这使得 1988~1998 年期间冬季的北极涛动(AO)从 1976~1987 年期间的负位相变为正位相。然而, 1999~2012 年期间的高纬度地区上空准定常行星波 E-P 通量辐合的加强引起了平均西风的减弱, 而在副热带地区上空准定常行星波 E-P 通量辐散的加强引起了平均西风的加强, 这使得 1999~2012 年期间冬季的 AO 从 1988~1998 年期间的正位相又变成负位相。AO 位相的改变对于东亚冬季风的强弱有很大影响, 依据 Gong et al. (2001) 和 Wu and Wang (2002) 的研究, 若冬季 AO 指数为负, 则该年冬季东亚冬季风偏强; 反之, 若冬季 AO 指数为正, 则该年冬季东亚冬季风偏弱。因此, 东亚冬季风在 1976~1987 年期间很强, 在 1988~1998 年期间变弱, 而在 1999~2012 年期间东亚冬季风又从弱变强, 但此时期冬季风强度远不如 1976~1987 年冬季风强。

## 7 结论和讨论

本文综述和回顾了叶先生所提出的 Rossby 波能量频散理论对准定常行星波在球面大气的二维和三维传播特征研究的推动作用以及对东亚夏、冬季风年际和年代际变化内动力学机理研究的启迪和引领作用。文中指出: 叶先生在 20 世纪 40 年代所提出的 Rossby 波能量频散理论不仅推动了准定常行星波在球面大气的二维传播特征的研究, 为解释大气环流异常遥相关的机理研究提供了科学基础, 而且推动了准定常行星波在球面大气的三维传播规律的研究, 为对流层与平流层相互作用过程及其机理的研究奠定了理论基础。并且, 文中还回顾了叶先生所提出的 Rossby 波能量频散理论的引领下, 我们在东亚夏、冬季风和我国夏、冬季气候灾害年际和年代际变化的内动力学机理研究所取得的进展, 特别是关于夏季沿东亚经向传播的 EAP 型遥相关和沿东亚纬向传播的“Silk Road”型遥相关的年际和年代际变化以及冬季准定常行星波三维传播波导的年际和年代际变化及其对东亚冬季风变化影响的研究。

波的能量频散是流体动力学中一个重要的理

论问题, 叶先生首先把它应用到大气环流变化机理的研究, 从而推动和启迪了准定常行星波的二维和三维球面传播动力学研究以及引领了东亚冬、夏季风变化内动力学的研究。当前, 这个理论正在不断发展和深入, 它将进一步应用到大气科学的更多领域, 不仅在中高纬度大气环流动力学研究中有广泛的应用, 而且在热带地区台风的生成和演变动力过程也有很广阔的应用前景, 如西北太平洋强台风通过能量频散从而在它的东南方向可以引起一串热带低压型(TD型)波列。并且, 大气 Rossby 波能量频散的非线性效应, 不同 Rossby 波列的非线性相互作用等问题也有待于进一步深入研究。

## 参考文献 (References)

- Andrews D G, McIntyre M E. 1976. Planetary waves in horizontal and vertical shear: The generalized Eliassen-Palm relation and the mean zonal acceleration [J]. *J. Atmos. Sci.*, 33: 2031–2048.
- Charney J G, Drazin P G. 1961. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 66: 83–109.
- Chen Guosen, Huang Ronghui. 2012. Excitation mechanisms of the teleconnection patterns affecting the July precipitation in Northwest China [J]. *J. Climate*, 25: 7834–7851.
- Chen Guosen, Huang Ronghui, Zhou Liantong. 2013. Baroclinic instability of the Silk Road pattern induced by thermal damping [J]. *J. Atmos. Sci.*, 70: 2875–2893.
- Chen W, Takahashi M, Graf H F. 2003. Interannual variations of stationary planetary wave activity in the northern winter troposphere and stratosphere and their relations to NAM and SST [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D24): 4797, doi:10.1029/2003JD003834.
- Chen W, Yang S, Huang R H. 2005. Relationship between stationary planetary wave activity and the East Asian winter monsoon [J]. *J. Geophys. Res.*, 110: D14110, doi:10.1029/12004JD005669.
- 陈文, 黄荣辉. 2005. 北半球冬季准定常行星波的三维传播及其年际变化 [J]. *大气科学*, 29: 137–146. Chen Wen, Huang Ronghui. 2005. The three-dimensional propagation of quasi-stationary planetary waves in the Northern Hemisphere winter and its interannual variations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29: 139–146.
- Dickinson R E. 1968. Planetary Rossby waves propagating vertically through weak westerly wind wave guides [J]. *J. Atmos. Sci.*, 25: 981–1002.
- Edmon M J Jr, Hoskins B J, McIntyre M E. 1980. Eliassen-Palm cross sections for the troposphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 37: 2600–2617.
- Eliassen A, Palm E. 1961. On the transfer of energy in stationary mountain waves [J]. *Geophys. Publ.*, 22: 1–23.
- Enomoto T, Hoskins B J, Matsuda Y. 2003. The formation mechanism of the Bonin high in August [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 129: 157–178.
- Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. 2001. East Asian winter monsoon and Arctic oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28: 2073–2076.

- Hoskins B J, Karoly D J. 1981. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing [J]. *J. Atmos. Sci.*, 38: 1179–1196.
- Hoskins B J, Simmons A H, Andrews D G. 1977. Energy dispersion in a barotropic atmosphere [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 103: 553–567.
- Hsu H H, Lin S H. 1992. Global teleconnections in the 250-mb streamfunction field during the Northern Hemisphere winter [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 120: 1169–1190.
- Hsu H H, Lin S M. 2007. Asymmetry of the tripole rainfall pattern during the East Asian summer [J]. *J. Climate*, 20: 4443–4458.
- Huang Gang. 2004. An index measuring the interannual variation of the East Asian summer monsoon—The EAP index [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 21: 41–52.
- Huang R H, Gambo K. 1982a. The response of a hemispheric multi-level model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources. Part I. Forcing by topography [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 60: 78–92.
- Huang R H, Gambo K. 1982b. The response of a hemispheric multi-level model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources. Part II. Forcing by stationary heat source and forcing by topography and stationary heat sources [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 60: 93–108.
- Huang R H, Gambo K. 1983. The response of a hemispheric multi-level model atmosphere to forcing by topography and stationary heat sources in summer [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 61: 495–509.
- 黄荣辉, 岸保勘三郎. 1983. 关于冬季北半球定常行星波传播另一波导的研究 [J]. *中国科学 B 辑*, 26: 940–950. Huang Ronghui, Gambo K. 1983. On other wave guide in stationary planetary wave propagations in the winter Northern Hemisphere [J]. *Science in China (in Chinese)*, 26: 940–950.
- Huang R H, Li W J. 1987. Influence of the heat source anomaly over the western tropical Pacific on the subtropical high over East Asia [C]// *Proc. International Conference on the General Circulation of East Asia. Chengdu, China*, 40–45.
- 黄荣辉, 李维京. 1988. 夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空的副热带高压的影响及其物理机制 [J]. *大气科学*, 12 (s1): 107–116.
- Huang Ronghui, Li Weijing. 1988. Influence of heat source anomaly over the western tropical Pacific on the subtropical high over East Asia and its physical mechanism [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 12 (s1): 107–116.
- Huang R H, Lu L. 1989. Numerical simulation of the relationship between the anomaly of subtropical high over East Asia and the convective activities in the western tropical Pacific [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 6: 202–214.
- Huang R H, Sun F Y. 1992. Impacts of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 70 (1B): 243–256.
- Huang Ronghui. 1992. The East Asia/Pacific pattern teleconnection of summer circulation and climate anomaly in East Asia [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 6: 25–37.
- Huang Ronghui, Wang Lin. 2006. Interdecadal variation of Asian winter monsoon and its association with the planetary wave activity [C]// *Proc. International Symposium on Asian Monsoon, Kuala Lumpur*, 126.
- Huang Ronghui, Chen Jilong, Huang Gang. 2007. Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 24: 993–1023.
- Huang Ronghui, Chen Jilong, Wang Lin, et al. 2012. Characteristics, processes, and causes of the spatio-temporal variabilities of the East Asian monsoon system [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 29: 910–942.
- 黄荣辉, 刘永, 冯涛. 2013. 20 世纪 90 年代末中国东部夏季降水和环流的年代际变化特征及其内动力成因 [J]. *科学通报*. 58: 617–628.
- Huang Ronghui, Liu Yong, Feng Tao. 2013. Interdecadal change of summer precipitation over eastern China around the late 1990s and associated circulation anomalies, internal dynamical causes [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 58: 1339–1349.
- 黄荣辉, 魏科, 陈际龙, 等. 2007. 东亚 2005 年和 2006 年冬季风异常及其与准定常行星波活动关系的分析研究 [J]. *大气科学*, 31: 1033–1048. Huang Ronghui, Wei Ke, Chen Jilong, et al. 2007. The East Asian winter monsoon anomalies in the winters of 2005 and 2006 and their relations to the quasi-stationary planetary wave activity in the Northern Hemisphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31: 1033–1048.
- 黄荣辉, 陈际龙, 黄刚, 等. 2006. 中国东部夏季降水的准两年周期振荡及其成因 [J]. *大气科学*, 30: 545–560. Huang Ronghui, Chen Jilong, Huang Gang, et al. 2006. The quasi-biennial oscillation of summer monsoon rainfall in China and its cause [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30: 545–560.
- 黄荣辉, 刘永, 皇甫静亮, 等. 2014. 20 世纪 90 年代末东亚冬季风年代际变化特征及其内动力成因 [J]. *大气科学*, 38: 627–644. Huang Ronghui, Liu Yong, Huangfu Jingliang, et al. 2014. Characteristics and internal dynamical causes of the interdecadal variability of East Asian winter monsoon near the late 1990s [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38: 627–644.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437–472.
- Kosaka Y, Nakamura H. 2006. Structure and dynamics of the summertime Pacific–Japan teleconnection pattern [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 132: 2009–2030.
- Kosaka Y, Nakamura H. 2010. Mechanisms of meridional teleconnection observed between a summer monsoon system and a subtropical anticyclone. Part I: The Pacific–Japan pattern [J]. *J. Climate*, 23: 5085–5108.
- Kosaka Y, Xie S P, Nakamura H. 2011. Dynamics of interannual variability in summer precipitation over East Asia [J]. *J. Climate*, 24: 5435–5453.
- Li Z J, Ji L. 1997. Efficient forcing and atmospheric teleconnections [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 123: 2401–2423.
- Lin Z D, Lu R Y. 2008. Abrupt northward jump of the East Asian upper-tropospheric jet stream in mid-summer [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86: 857–866.
- Longuet-Higgins M S. 1964a. On group velocity and energy flux in planetary wave motions [J]. *Deep-Sea Res. Oceanogr. Abstr.*, 11: 35–42.
- Longuet-Higgins M S. 1964b. Planetary waves on a rotating sphere [J]. *Proc. Roy. Soc. London*, 279: 446–473.
- Longuet-Higgins M S. 1965. Planetary waves on a rotating sphere. Part II [J]. *Proc. Roy. Soc. London*, 284: 40–68.
- Lu R Y, Oh J H, Kim B J. 2002. A teleconnection pattern in upper-level meridional wind over the North African and Eurasian continent in

- summer [J]. *Tellus*, 54: 44–55.
- Lu R. 2004. Associations among the components of the East Asian summer monsoon system in the meridional direction [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82, 155–165.
- Lu R, Li Y, and Dong B. 2006. External and internal summer atmospheric variability in the western North Pacific and East Asia [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 447–462.
- Matsuno T. 1970. Vertical propagation of stationary planetary waves in the winter Northern Hemisphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 27: 871–883.
- Matsuno T. 1971. A dynamical model of the stratospheric sudden warming [J]. *J. Atmos. Sci.*, 28: 1479–1494.
- Nitta T S. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 65: 373–390.
- Sardeshmukh P D, Hoskins B J. 1988. The generation of global rotationally flow by steady idealized tropical divergence [J]. *J. Atmos. Sci.*, 45: 1228–1251.
- Simmons A J, Wallace J M, Rranstator G W. 1983. Barotropic wave propagation and instability and atmospheric teleconnection patterns [J]. *J. Atmos. Sci.*, 40: 1363–1392.
- Rossby C G. 1939. Relation between variations in the intensity of the zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semi-permanent centers of action [J]. *J. Mar. Res.*, 2: 38–55.
- 陶诗言, 卫捷. 2006. 再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳 [J]. *应用气象学报*, 17: 513–525. Tao Shiyan, Wei Jie. 2006. The westward, northward advance of the subtropical high over the west Pacific in summer [J]. *J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 17: 513–525.
- Uppala S M, Kållberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 re-analysis [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131: 2961–3012.
- Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 109: 748–812.
- Wang Lin, Huang Ronghui, Gu Lei, et al. 2009. Interdecadal variations of the East Asian winter monsoon and their association with quasi-stationary planetary wave activity [J]. *J. Climate*, 22: 4850–4872.
- Wu B Y, Wang J. 2002. Winter Arctic oscillation, Siberian high and East Asian winter monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29: 3134, doi:10.1029/2002GL015373.
- Ye H, and Lu R. 2011. Subseasonal variation in ENSO-related East Asian rainfall anomalies during summer and its role in weakening the relationship between the ENSO and summer rainfall in eastern China since the late 1970s [J]. *J. Climate*, 24, 2271–2284, doi:10.1175/2010JCLI3747.1.
- Yeh T C. 1949. On energy dispersion in the atmosphere [J]. *J. Meteor.*, 6: 1–16.
- Zeng Q C, Yuan C G, Zhang X H, et al. 1986. A global grid point general circulation model, short- and medium-range numerical weather prediction [C]// *The WMO/IUGG NWP Symposium, Tokyo*, 424–430.