7月份赤道太平洋平流层风场异常的复 EOF 诊断 及其与平流层准两年振荡的关系*

卢姁^{1,3},朱敏^{2,3},黄泓^{3*},张东凌⁴,盖泳铭⁵,张铭³

- 2 1 智能空间信息国家级重点实验室,北京 100029
- 3 2 中国人民解放军 93117 部队,南京 210018
- 4 3 大气环流与短期气候预测实验室,国防科技大学气象海洋学院,南京 211101
- 5 4 中国科学院大气物理研究所,北京 100029
- **6** 5 自然资源部宣教中心,北京 100830

摘 要 本文利用 NCAR/NCEP 提供的 7 月份 10、20、30、50、70、100hPa 上 73 年的月平均风场资料, 对赤道太平洋的平流层 8 9 风场异常做了复 EOF (经验正交函数)诊断,并讨论了诊断结果与平流层准两年振荡 (Quasi Biennial Oscillation, QBO) 的关系;得到了以下主要结论:该诊断前三模态的方差贡献依次为60.9%、24.0%、4.4%,前两模态累积方差贡献达84.9%, 10 基本能概括 QB0 的性质特点。由第一、二模态的空间场可见,在 50hPa 及之上明显的风场异常均以纬向风为主,两者的区别 11 12 是前者的风向上下保持一致,而后者出现上下相反的现象。两者的时间系数分别有 2.25、2.47 年的年际变化周期,前者周期 与 QBO 的平均周期相同,后者也落在 QBO 的周期 1.75-2.5 年间,两者的年代际变化都不明显。在风场异常的强度变化上,两 13 者都有 8 年左右的年际变化周期,而两者风场强度的年代际变化也都不明显。两者的风场异常典型值在 50hPa 以下都减小得 14 15 很快,至 100hPa 该值均已很小,这些都与 QBO 的情况相当一致;两者该典型值的最大处分别位于 20、10hPa 上,前者也与 QBO 的最强位置相差不远。两者风场 QBO 强度变化的最明显时段分别从 1995、1990 年始而都至 2020 年终,另外后者的风场 16 QB0 强度还有一个线性增长趋势,2010年后该趋势则有所加大,这些可能与全球明显增暖有关。第一、二模态的物理性质分 17 别对应为正、斜压 Kelvin 波;这说明 Kelvin 波对 QBO 的形成非常重要,是产生 QBO 的重要因素之一,其中正压 Kelvin 波对 18 19 QB0 的贡献更为突出。

20 关键词 平流层 QBO 风场异常 复 EOF 诊断 赤道太平洋

21 文章编号 2024137B 中图分类号 P732

22 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2505.24137

23

1

7

CEOF Diagnosis of Stratospheric Wind Anomalies over the Equatorial Pacific in July and the Relationship with QBO

文献标识码 A

24

LU Xu^{1,3}, ZHU Min^{2,3}, HUANG Hong^{3*}, ZHANG Dongling⁴, GAI Yongming⁵, ZHANG Ming³,

- 25 1 National Key Laboratory of Intelligent Spatial Information, Beijing 100029
- 26 2 Unit 93117, Nanjing 210018
- 27 3 Laboratory of Atmospheric Circulation and Short-Term Climate Prediction, College of Meteorology and Oceanography, National
- 28 University of Defense Technology, Nanjing 211101
- 29 4 Institute of Atmosphere ic Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
- 30 5 Publicity and Education Center of the Ministry of Natural Resources, Beijing 100830

收稿日期: 2024-12-13

网络预出版日期:

作者简介: 卢姁, 女, 1982年出生, 高工, 主要从事天气与气候动力学研究, Email: xlu2006918@163.com 通讯作者: 黄泓, 女, 1977年出生, 教授, 主要从事天气与气候动力学研究, Email: 172504290@qq.com 资助项目: 国家自然科学基金项目(42075053)

32 Abstract In this study, complex empirical orthogonal function (CEOF) analysis was applied to the 73-year stratospheric wind fields in 33 July of NCAR/NCEP at pressure levels of 10, 20, 30, 50, 70, and 100 hPa over the equatorial Pacific. The relationship between the 34 diagnostic results and the Quasi Biennial Oscillation (QBO) was discussed. The main conclusions were as follows: The variance 35 contributions of the first three modes were 60.9%, 24.0% and 4.4%, respectively. The cumulative variance contribution of the first two 36 modes was 84.9%, which could basically summarize the nature and characteristics of QBO. The obvious wind anomalies of the first 37 and second modes above 50hPa were dominated by the partial latitudinal winds. The difference was that the former exhibited vertically 38 consistent wind direction, while the latter was opposite wind direction. The time coefficients of the two modes had inter-annual 39 variations of 2.25 and 2.47 years, respectively. The former period had the same period as the average period of QBO, while the latter 40 period located within the period range of 1.75-2.5 years of QBO. The inter-decadal variations of both modes were not significant. In 41 terms of the intensity variation of wind anomalies, both had an inter-annual variation of about 8 years, and the decadal variations of 42 both were also not significant. The typical values of wind anomalies in both modes decreased rapidly below 50 hPa and were very small at 100 hPa, which is quite consistent with the situation of QBO. The maximum anomalies of the two modes were located at 20 43 44 and 10 hPa, respectively, with the former closely matching the QBO's peak altitude. The most obvious QBO intensity variations of the 45 two modes initiated from 1995 and 1990, respectively, and continued until the end of 2020. In addition, there was a linear 46 intensification trend in the strength of the wind field in the latter, which had accelerated since 2010. It might be related to the 47 significant global warming. The physical properties of the first and second modes corresponded to barotropic and baroclinic Kelvin 48 waves, respectively. This indicated that the Kelvin wave was crucial for the formation of QBO and was one of the important factors for 49 the generation of QBO. Notably, barotropic Kelvin wave contributed more prominently to the QBO.

50 Key words stratosphere, Quasi Biennial Oscillation, wind field anomalies, Complex Empirical Orthogonal Function analysis,
 51 Equatorial Pacific

52 53

54 1 引言

热带平流层大气风场的准两年振荡(QBO, Quasi Biennial Oscillation)为热带平流层风场约为两年周期 55 的振荡。该振荡东西风之间的周期变化为 21-30 个月, 即 1.75-2.5 年之间, 平均为 26-27 个月也即 2.17-2.25 56 年: 其振幅极大值出现在赤道上空 30hPa 处,向下方和向极地该振幅减小。从 50hPa 向下,振幅减小得很 57 58 快,以至于在平均的热带对流层顶即平流层底的高度 100hPa 处,该振荡已几乎不见(李崇银等,1990)。 Reed et al (1961)最先发现赤道平流层风场的这种风向反向现象, Angell (1988)还发现平流层温度、对流 59 层顶高度以及臭氧量等也有着准两年的周期变化。Belmont and Dartt(1969)则首先将这种准两年周期变化 60 称之为 OBO。通常将 OBO 的产生机制和传播特征归结为行星波的垂直传播,即热带对流层大气中的 Kelvin 61 波和混合 Rossby-重力波垂直上传,并与平流层的基本气流非线性相互作用的结果(Lindzen et al., 1968; 62 63 Holton et al., 1972)。为具体细致了解这种非线性相互作用,利用模型进行数值试验研究是重要和不可或缺 64 的。García-Franco et al. (2023)通过使用英国气象局哈德莱中心(Hadley Centre)的统一模型,研究了 QBO 对热带对流和降水的影响,发现了 QBO 与热带降水和环流之间的紧密联系。 65

66 近年来学者发现对流层大气现象及气候变化也有准两年周期变化情况(李崇银等,1992,1997,2010),
 67 并把对流层的这种准两年周期振荡称为 TBO (Tropospheric Biennial Oscillation)。在 TBO 的形成中,平流层
 68 QBO 以及热带海洋(主要是印度洋和太平洋)都起着重要作用(Liu et al., 2013)。

69 以上研究可见,QBO 是大气环流和气象要素变化进程中一种极其重要的变化规律,它的存在对于全球
70 及我国的气候、天气变化有着深远的影响,是仅次于 ENSO (El Niño-Southern Oscillation)的气候强信号 (Cai
71 et al., 2022; Gao et al., 2023; 刘秦玉等,2006; 黄荣辉等,2018)。目前对 QBO 研究的广度和深度与 ENSO
72 相较仍有所欠缺,不过当今学者们已经意识到此问题,QBO 的研究也在逐步加强之中,且成为当代气候研
73 究的热点之一 (黄荣辉等,2018)。

如上所述,现认为 QBO 的形成机制与赤道 Kelvin 波和混合 Rossby-重力波的垂直上传密切有关;但当 74 前对冬季此方面的讨论较多而夏季则较少:并且以上两个赤道波动在夏季究竟以谁为主?各所占的比例如 75 何?它们自身的特点及表现又怎样?对这些问题至今讨论的还不详备,也未给出具体公认准确的结果。为 76 回答和解决以上问题,本文对7月份赤道太平洋范围上空的平流层风场做了复EOF诊断,分析了所得空间 77 场的特点和性质,及其年际、年代际变化;并讨论了该诊断结果与 QBO 的关系。因太平洋区域是赤道地区 78 79 最宽广的区域,且该范围的 TBO 对我国天气、气候有着重要影响,故本文复 EOF 诊断的区域取为赤道太平 洋; 而 7 月份太阳已几乎直射至北回归线上, 此月份太阳向北半球的辐射量达到最大, 通常是北半球夏季 80 最热的月份;如此本文将7月份作为夏季的代表,这大致也是公认的看法,并为很多文献所采用。 81

82 2 复 EOF 诊断的数据方法

本文复 EOF 诊断所用的平流层资料是 NCAR/NCEP 的 1948-2020 年共 73 年在 10、20、30、50、70、
100hPa 6 个标准等压面上 7 月份的月平均风场资料;该资料在对各种来源的观测资料进行质量控制和同化
处理后所获得,并由美国国家大气研究中心(NCAR, National Center for Atmospheric Research)和美国气象
环境预报中心(NCEP, National Centers for Environmental Prediction)联合制作和发布。该资料的水平范围
取赤道太平洋区域,即(20°S-20°N, 120°E-180°-120°W)中的经纬网格点;网格距为 2.5°×2.5°。

88 本文使用的方法是,将上述区域平流层的 6 个等压面上的风场看作一个整体,做平流层赤道区域风场
89 异常的动力统计分析,即对该风场异常进行复 EOF 诊断(张东凌,2006;张东凌等,2007),并对其主要模
90 态做出分析。具体方法为:求取平流层上各层的 73 年平均,计算各层与此平均的偏差(异常),将上述 6
91 层的偏差风场作为整体来进行统计动力分析(卢姁等,2010;张东凌等,2017,2018),得到分解的风场
92 异常各模态在平流层6层上的二维空间场和时间系数,进而分析风场异常各 EOF 模态的三维结构及其年际、
93 年代际变化。

本文采用复 EOF 诊断,其时间系数是复数,时间系数的模反映了空间场强度,辐角表示空间场的流型 94 状态。这里将平流层 6 层作统一处理, 故该 6 层有统一的时间系数, 这样便于考察平流层中各层的耦合关 95 系。平流层中的 10、30、70、100hPa 层分别可作为平流层的中高部、中部、低部和平流层底的代表。为方 96 便,下文直接称其为中高部、中部、低部和底部。本文复 EOF 分解表明,前三模态方差贡献依次为 60.9%, 97 24.0%, 4.4%, 都通过了显著性检验(North et al., 1982)。前两模态累积方差贡献达 84.9%, 故前两模态 98 基本能涵盖赤道太平洋区域平流层风场异常的性质特点。因第三模态方差贡献不大,本文仅给出前两模态 99 的诊断结果。此外,本文复 EOF 分解各模态的空间场都是指偏差场,即平流层各层的风场异常:以下为方 100 101 便,在不会混淆时则都略去"偏差"或"异常"的称谓。

102 3 复 EOF 分解结果

103 图 1a、b、c和d分别给出了7月份平流层底部、低部、中部和中高部,即上赤道太平洋区域73年的平均风场。该风场可视为风场的气候态,其不随年份变化,而各年风场异常则随年份而改变,并体现在时间系数上。平流层风场的气候态中,较显著的风场均呈纬向风,即东风或西风,在赤道上及其附近均为东风。
106 随着高度的增加,由底部到中高部,东风范围扩大且强度增加,在50hPa以上直至中高部10hPa,赤道太平洋已经全为东风所控制,最大东风位于平流层中高层 10hPa上;此外该风场并非关于赤道对称,这是因7
108 月份属北半球夏季,阳光直射点位于北回归线附近而不在赤道上的缘故。

109 本文复 EOF 各模态的风场异常应主要反映平流层 7 月太平洋赤道波系,即 Matsuno 波系(Matsuno T, 1966)的异常上,它们随年份而变,且不表现在上述不随年份而变的风场气候态上。





122 图 1 1948-2020 年 7 月份热带太平洋的平均风场, (a) 100hPa、(b) 70hPa、(c) 30hPa、(d) 10hPa, 单位 m/s。
 123 Fig.1 Average wind field over the tropical Pacific in July from 1948 to 2020, (a) 100hPa, (b) 70hPa, (c) 30hPa and (d) 10hPa, units:
 124 m/s.

125 3.1 第一模态

126 3.1.1 空间场

120

121

127 图 2a、b、c和d分别给出了复 EOF分解第一模态在平流层底部、低部、中部和中高部,即 100、70、
128 30、10hPa上的风场异常空间场分布。在底部,在 5°S 至 5°N 的赤道范围有一致的东风;在该赤道范围南侧,
129 在 160°E 以西和 150°W 以东则有较大的偏北风,在 160°E-180°-150°W 范围则维持东风;该赤道范围北侧,
130 在 140°E 至 165°E 有较大偏南风,在 140°W 以东风场微弱,在 165°E 至 140°W 有东风,在 140°E 以西则有
131 偏西风(见图 2a)。

132 在低部,原来在底部 5°S 至 5°N 一致的东风在 140°W 以东收缩至赤道南侧,且强度减弱,140°W 以西则仍维持;在 15°S 处,出现了横跨整个太平洋一致的偏西风,以上东、西风之间在 150°E 左右,风场出现
134 逆时针旋转;在上述收缩的东风范围的北侧,在 140°E 至 165°E 有偏南风,在 170°W 至 140°W 有偏北风,
135 在这两者之间为东风;而在 140°E 以西则有西风;此外在 145°W 以东的 5°N 至 15°N 范围也有明显的西风(见 图 2b)。

137 从 50hPa 直至中高部的 10hPa,第一模态空间场的分布基本相同,在整个赤道太平洋范围,均为经向138 风非常小的一致西风,在南、北纬 15°以外,西风有所减弱(见图 2c、图 2d)。

139





图 2 1948-2020 年 7 月份第一模态空间场(a)100hPa、(b)70hPa、(c)30hPa、(d)10hPa,单位 m/s。

Fig.2 The space field of the first mode in July from 1948 to 2020, (a) 100hPa, (b) 70hPa, (c) 30hPa and (d) 10hPa, units: m/s.
由第一、二模态复时间系数的辐角值和模值可知,辐角值几乎全处在 0°和±180°附近(图略),而模值
的年际变化十分明显(图 3a、b)。采用张东凌等(2023)的做法,将这两模态的复时间系数转化为相应等
价的实时间系数序列,其见图 4a、b。由图 4a 可见,第一模态的实时间系数序列有明显的年际变化;从该
序列的小波全谱图(图 5a)上可见:在该图横坐标格点序号 2、3 处小波全谱数值很高,并在序号 3 处出现
非常显著的尖峰;从小波序号与其相应的变化周期的关系可知,序号2、3 处其相应的变化周期分别为2.054、
2.443 年,其算术平均值为 2.25 年,这与平流层 QBO 的平均周期 2.25 年相同,故第一模态存在准两年周期

156 振荡。由图 5a 还可见,该模态振荡周期基本无年代际变化。从第一模态实时间系数局地功率谱可知,该 QBO
157 的周期贯穿了 1950 至 2020 年的始终,但 QBO 强度各年份有所不同(图略)。总之,第一模态仅有准两年周
158 期变化而无年代际变化。





Fig.5 Wavelet full spectrum of real time coefficient (a) the first mode and (b) the second mode, abscissa: values corresponding to the period, ordinate: wavelet full spectrum values.

173 3.2 第二模态

171

174 3.2.1 空间场

175 图 6 给出了第二模态各层上的空间场。在底部 100hPa(图 6a)上的主要流型为:赤道及其附近从 155
176 °E 至 175°E 有较强的越赤道西北风,在该处西北 7.5°N 至 20°N,有风向逆时针旋转并开口向东的半环状环
177 流。该支较强的越赤道西北风向南增强,并一直延续到 20°S 上的 175°W 至 130°W 处。在 150°E 以西,从
10°S 经赤道至 7.5°N 范围有西风。在 140°W 赤道周围还有一支较弱的越赤道偏东风,向西北延伸到 180°
179 附近的 10°N,分别向北和向南做顺时针和逆时针旋转;在赤道周围这支偏东风的南北两侧,分别有风向逆、
180 顺时针旋转的环流。

181 从低部 70hPa 上直至中高部 10hPa 上,流型均表现为纬向风即东、西风。其中从低部 70hPa 到中部 30hPa
182 上,赤道太平洋上有一致的西风;赤道处西风最大,在南、北纬 10°以外,风速有所减弱(见图 6b、c)。
183 在中高部 10hPa (图 6d),流型发生了反转,整个赤道太平洋表现出一致的东风,在赤道处东风最大,在南
184 北纬 10°以外,风速也有所减弱。

185 由图 2 和图 6 可见,第一、二模态空间场的区别主要体现在平流层各层上纬向风异常的分布范围以及186 强度的不同,下文中将详细论述及分析,并探讨其与赤道波动的联系。



188 189

187



192

193

195

196

图 6 1948-2020 年 7 月份第二模态空间场, (a) 100hPa、(b) 30hPa、(c) 20hPa、(d) 10hPa, 单位 m/s。

Fig. 6 The space field of the second mode in July from 1948 to 2020 (a) 100hPa, (b) 70hPa, (c) 30hPa and (d) 10hPa, units: m/s. **3.2.2 时间系数**

由第二模态的实时间系数序列图(图4b)和其小波全谱图(图5b)可见:与第一模态类似,该序列也 199 有明显的年际变化,且在图 5 格点序号 2、3、4 处的小波全谱值也较高,并在 3 处也有非常明显的尖峰; 200 与该 2、3、4 处相应的年际变化周期分别为 2.054、2.443、2.905 年,其算术平均值为 2.47 年,也落在平流 201 层 QBO 的周期 1.75-2.5 年之间, 且尖峰 3 处对应的周期 2.443 年与 QBO 的平均周期 2.25 年也十分接近, 202 故第二模态也有准两年周期振荡,且该周期比第一模态的周期 2.25 年稍长。此外图 5b 上还有两个微弱的峰 203 值出现在格点序号 18-19 及 23-24 处。前者相应的变化周期为 33-39 年,后者为 78-93 年;但因这两个峰值 204 都很微弱且本文资料样本长度仅73年,故这些周期的年代际变化不可信。从第二模态小波局地功率谱可知, 205 其 QBO 周期从 1963 年大体延续到 2020 年,这与第一模态有所差异;第二模态 QBO 强度各年份也有所不 206 同,这倒与第一模态类似(图略)。 207

208 总之,第二模态也仅有准两年周期的年际变化而年代际变化不明显,这点与第一模态一样;但其准两
 209 年变化周期较第一模态稍长,且在整个年份中的贯穿情况与第一模态有所差异。

210 4 各模态与 QBO 关系的讨论

211 4.1 风场随高度变化与 QBO 的关系

212 由各模态各层空间场图右下角箭头下方所示的数值(见图 2, 6),来考察各模态风场异常的强度及其随
213 高度层次的变化。在 100、70、50、30、20、10hPa 上,第一以及第二模态该数值分别为 0.002, 0.002, 0.005,
214 0.02, 0.04, 0.02 以及 0.004, 0.01, 0.03, 0.02, 0.009, 0.04 (单位 m/s),将该数值乘以各年复时间系数

215 模的平均值即是异常的风速强度代表(单位 m/s),而第一、二模态复时间系数模的平均值则分别为 394、

216 226。表1分别给出了第一、二模态平流层各层上与其上述该数值相对应的异常风速强度代表(单位 m/s),
217 其可视为该层上风场异常的典型值。

218 由表1可见,第一模态的风场异常典型值由20hPa向下减小,从中部30hPa以下衰减很快,在低部70hPa
219 和底部100hPa该值已很小,且变化不大,而这与平流层QBO振荡强度向下衰减的情况十分一致;从中高
220 部10hPa至20hPa该典型值增大了约1倍,在20hPa处风速异常最大,这也与QBO振荡强度在30hPa上达
221 到最大相去不远。

第二模态的风场异常典型值较第一模态复杂,在中高部 10hPa上,有最大的风速异常,而向下则急剧
减小至 20hPa上的 2.03m/s,再向下又开始增加,至中部 50hPa上达到次大值 6.78m/s,从该处继续向下值又
减小,直至底部 100hPa上的 0.9m/s。注意到该模态空间场上由中部 30hPa 经 20hPa 直至中高部 10hPa上,
风向异常由西风反转为东风;若以西风定义为正,则东风就为负,故而中高部 10hPa上的该数值可记为
-9.04m/s;再注意到 20hPa上值为 2.03m/s,其值不大;于是可认为风速异常典型值在平流层这 6 层上呈波
状变化,其半波长大致可视为 10hPa 至 50hPa 两层之间的距离,大约为 9km。

表1 第一、二模态各层上相应于空间场图箭头下数值的异常风速典型值

Table 1. Typical anomalous wind speed values at vertical levels corresponding to the values marked by the lower-right arrow in the spatial field maps for the first and second modes

231 232	层次(hPa)	100	70	50	30	20	10	10.	
233	第一模态	0.79	0.79	1.97	7.88	15.8	7.88	(m/s)	
234	第二模态	0.90	2.26	6.78	4.52	2.03	9.04	(m/s)	

236 **4.2 风场 QBO 强度年际和年代际变化**

228

现讨论风场强度的年际和年代际变化,这属于 OBO 强度的变化。当前对这方面的研究尚不很多见,本 237 文则对此做了诊断和分析。由图 3 可见,第一、二模态复时间系数的模值在各年都有所不同,为考察这些 238 模值的年际、年代际变化规律,也即以上模态风场 OBO 强度的年际及年代际变化情况,现对相应模态复时 239 间系数的模值序列做了小波分析,并在图 7a、b 上分别给出了第一、二模态该模值序列的小波全谱;在图 7 240 上, 表示周期的格点序号最大仅取至 18, 其相应的周期为 32.9 年; 因本文资料长度年份仅为 73 年, 故接 241 近和超过该资料长度一半的年代际变化周期均不可信,不宜采用;如此本文最大格点序号取 18 就已足够。 242 图 5 是实时间系数的小波全谱,其给出了风场异常的位相周期和异常强度的年际和年代际变化情况,而图 7 243 则是剔除了该风场异常的位相周期后,而仅考虑该异常强度的年际和年代际变化。 244

245 对第一模态的风场强度异常,在图 7a 上的格点序号 10-11 处有一峰值,这相当于 8.22-9.77 年的周期变
246 化,这表明 QBO 的风场异常强度有着约 9 年的年际变化。此外在该图上格点序号 18 处或以后还有一个高
247 峰,上面已指出,因本文样本资料长度的限制,接近和达到该高峰的年代际变化周期则都不可信,而不采
248 用。如此可知,QBO 风场异常强度变化仅有约 9 年的年际变化,而年代际变化则不明显。由该模值序列的
249 小波局地功率可知,这约 9 年年际变化的最明显时段出现在 1995 年至 2020 年 (图略)。

对风场强度异常的第二模态,由图 3b 可见,复时间系数的模值序列除有年际变化外,其还存在一个明显的线性增长趋势,在 2010 年之后该线性趋势有所加大;这种 QBO 强度变化趋势或许与全球明显增暖有关(黄荣辉等,2018; Rao et al., 2023)。从图 7b 上可见,第二模态在格点序号 10 处出现峰值高点,这相应于该模态的模值序列有 8.22 年的周期变化,故第二模态 QBO 的风场异常强度有约 8 年的年际变化,而年代变化也不明显。由该模值序列的小波局地功率可知,约 8 年的年际变化表现最明显的时段出现在 1990 年至 2020 年(图略)。

256 总之,第一、二模态准两年变化周期的风场异常强度变化,体现了各模态 QBO 强度的变化,两模态都

257 有 8 年左右的年际变化周期,而年代际变化都不明显;此外第二模态的 QBO 强度还有明显的线性增长趋势,258 目近年来该趋势明显加大。



259 260

261 图 7 复时间系数模的小波全谱(a)第一模态和(b)第二模态,横坐标:与周期对应的值,纵坐标:小波全谱值。
 262 Fig.7 Wavelet full spectrum of complex time coefficient mode (a) the first mode and (b) the second mode, abscissa: values
 263 corresponding to the period, ordinate: wavelet full spectrum values.

264 4.3 各模态 QBO 与赤道波动的联系

265 因本文是对赤道太平洋的平流层风场做的诊断,故而赤道波系在此起着重要的作用,而 QBO 的特点性
266 质也与该波系密切相关。赤道波包括 Kelvin 波、Rossby-重力混合波,Rossby 波以及惯性一重力波(Matsuno,
267 1966)。其中 Kelvin 波、Rossby-重力混合波分别是向东、向西传播最慢的非平衡波动(张铭等,2006,2008)。
268 以下讨论风场 QBO 第一、二模态的特点性质与 Kelvin 波和 Rossby-重力混合波的关系。

269 4.3.1 第一模态

270 由第一模态的空间场(图 2)可知其有如下特点,在平流层底 100hPa 和低部 70hPa,赤道上及附近为
271 经向风不大的东风所控制;随着高度增加至 50hPa 层及之上,整个赤道太平洋区域上空已全部转为经向风
272 非常小、并向极地衰减的西风控制,该西风在 20hPa 上达到最大,再向上该西风的风速又有所减小。

273 赤道波动中的 Kelvin 波风场理论上有以下特征: 纬向风场的振幅最大都位于赤道地区,且与赤道大体
274 呈对称分布,它们都随纬度的增高呈指数衰减,而经向风几乎为零。从上面第一模态风场异常的特点可见,
275 该风场异常具备上述 Kelvin 波的风场特征;在平流层 50hPa 层及之上,其风速增强而风向不变,且 Kelvin
276 波的特征表现得更加鲜明和突出。在 70hPa 及之下的平流层底和低部,因该模态异常风速以及平流层 QBO
277 的振幅都较小,且该处受对流层顶高度变化的影响较大,故该处风场异常对该模态性质判断的参考价值不
278 大。由此可认为,该第一模态的物理性质应是 Kelvin 波。

279 4.3.2 第二模态

280 由第二模态空间场(图 6)可知其有如下特点,在平流层底 100hPa 上的赤道两侧,位于赤道上的 155°
281 E-175°E 区间,有明显的西北风越过赤道到达南半球,在该区间外东、西两侧的赤道及附近,分别存在东风
282 和西风,在临近赤道北侧的 175°W 处,有一个风向逆时针旋转的中心。在 140°W 赤道周围还有另一支越赤
283 道偏东风,在该支偏东风的南、北两侧,分别存在风向的逆、顺时针旋转的环流。

284 赤道波动中的 Rossby-重力混合波的风场理论上有以下特征:风场最大振幅出现在赤道两侧的热带,关
 285 于赤道大体呈反对称状态,并在赤道两侧分别呈逆、顺时针环流,在赤道上有越赤道的最大经向风。第二
 286 模态平流层底 100hPa 上的空间场在一定程度上具有上述 Rossby-重力混合波风场的理论特征。

287 在平流层低部 70hPa 及之上的整个热带地区,风场均表现为向极地衰减经向度很小的一致西风或东风,
288 在赤道及附近也无越赤道气流。这种风场异常流型与以上的 Rossby-重力混合波有明显不同,反而与上述
289 Kelvin 波的特征类似;不过这里风场异常在中高部 10hPa 上为东风而在低部 70hPa 至中部 30 hPa 上则为西
290 风,这两者风向正相反。这种风向上下相反的情况与 Kelvin 波的斜压模态很相像(张铭等, 2008)。

291 因 100hPa 为平流层底即对流层顶,故该层的状况难以准确反映本文平流层的整个状态和性质。故而则
292 可认为:第二模态的物理性质应为斜压 Kelvin 波。第二模态与第一模态明显不同的是,在平流层风速异常
293 明显的层次上,第一模态纬向风的风向保持一致没有改变;而第二模态则出现了上下风向相反的特征。由
294 此更准确而言,第一模态的物理性质应为 Kelvin 波的正压模态(张铭等, 2006)。

295 之所以第二模态在 70hPa 处及之上 Rossby-重力混合波的特征消失是因为在该处赤道上及周边,风场的
296 气候态已是明显的东风,该东风会阻止 Rossby 波向上传播(黄荣辉等,2018),致使 Rossby-重力混合波无
297 法体现,但 Kelvin 波仍可向上传播,故而 Rossby-重力混合波则表现在底层,即对流层顶的 100hPa 上,而
298 之上仅表现为斜压 Kelvin 波。

299 综上,风场 QBO 第一、二模态的物理性质分别为正、斜压 Kelvin 波,这说明 Kelvin 波其上传对平流
300 层 QBO 的形成非常重要,是产生 QBO 的重要原因之一;其中因第一模态的方差贡献占全部方差贡献的 60.9%,
301 即占一大半,这说明正压 Kelvin 波上传其对 QBO 的贡献更加突出,故今后更应加强该波对 QBO 生成具体机
302 制的研究。

303 5 结语

304 本文为揭示夏季赤道平流层 QBO 的性质特点,利用 NCAR/NCEP 提供的 7 月份 1948-2020 年在 10、20、
 30、50、70、100hPa 上的月平均风场资料,对赤道太平洋上空的平流层风场异常做了复 EOF 诊断,并讨论
 306 了诊断结果与 QBO 的关系。得到以下主要结论:

- 307 1. 该诊断前三模态的方贡献依次为 60.9%、24.0%、4.4%,前两模态累积方差贡献达 84.9%;这表明前
 308 两模态基本能概括赤道太平洋区域夏季平流层 QB0 的性质和特点。
- 309 2. 由第一、二模态前后两者的空间场可见,在 70hPa 处及以上,明显的风场异常均为经向度很小的纬向风,310 两者的区别是前者的风向保持上下一致,而后者则出现上下相反现象。
- 31 3. 以上两者的风场异常典型值在 50hPa 以下都减小得很快,至 100hPa 该值均已很小,这些与 QBO 的情况
 312 相当一致;该值的最大处分别位于 20、10hPa,前者也与 QBO 的最强位置相差不远。
- 313 4. 以上两者的时间系数分别具有 2.25、2.47 年的年际变化周期,前者周期与 QBO 的平均周期相同,后者
 314 也落在 QBO 的周期(1.75-2.5 年)之间,且与前者接近,两者周期的年代际变化都不明显;在风场异
 315 常强度的变化上,两者则都有 8 年左右的年际变化,而年代际变化也都不明显。
- 316 5. 以上前、后两者风场 QBO 强度变化的最明显时段分别从 1995、1990 年始而都至 2020 年终,在此 2020
 317 年是本文所用资料的下限,另外后者的风场 QBO 强度还有一个线性增长趋势,2010 年后该趋势还有所
 318 加大,以上这些或许与全球明显增暖有关。
- 319 6. 第一、二模态的物理性质应分别为正、斜压 Kelvin 波;这说明 Kelvin 波的上传其对平流层 QBO 的形成
 320 非常重要,是产生 QBO 的重要因素之一,而正压 Kelvin 波对 QBO 的贡献更为突出,值得深入研究。

321 最后要说明的是,因本文是诊断分析,故着重在于揭示 7 月份赤道太平洋平流层风场异常的特点和性
322 质,发现该异常与 QBO 相像,并指出正、斜压 Kelvin 波及其上传则对 QBO 的形成十分重要,特别是正压 Kelvin
323 波。然而在 QBO 形成的动力学机制的探讨上,本文尚不够,这也是诊断分析工作的局限所在。通过动力学
324 理论分析和数值模拟研究则是弥补以上欠缺的重要手段,也是我们今后工作的方向。

325

326 参考文献(References)

- Angell J K. 1988. Variations and Trends in Tropospheric and Stratospheric Global Temperatures, 1958-87[J]. J. Clim., 1: 1296-1313.
 DOI:10.1175/1520-0442(1988)001<1296:vatita>2.0.co;2
- Belmont A D, Dartt D G. 1968. Variation with longitude of the Quasi-Biennial Oscillation[J]. Mon. Wea. Rev., 96: 767-777.
- Cai Q, Chen W, Chen S, et al. 2022. Influence of the Quasi-Biennial Oscillation on the Spatial Structure of the Wintertime Arctic
 Oscillation[J]. J. Geophys. Res. Atmos., 8:127. DOI:10.1029/2021JD035564

Gao X, Hu J G, Ren R C, et al. 2023. Impacts of the stratospheric quasi-biennial oscillation on the tropospheric circulation and climate
 in the Northeast Asia–North Pacific region in early summer[J]. Atmos. Ocean. Sci. Lett., 16(3): 100319.
 DOI:10.1016/j.aosl.2022.100319

- García-Franco J L, Gray L J, Osprey S, et al. 2023. Understanding the mechanisms for tropical surface impacts of the quasi-biennial
 oscillation (QBO)[J]. J. Geophys. Res. Atmos., 128(12): e2023JD038474. DOI:10.1029/2023JD038474
- Holton J R, Lindzen R S. 1972. An updated theory for the quasi-biennial cycle of the tropical stratosphere[J]. J. Atmos. Sci., 29(6):
 1076-1080. DOI:10.1175/1520-0469(1972)029<1076:AUTFTQ>2.0.CO;2
- James W A.1971. Long-period variations in seasonal sea-level pressure over the Northern Hemisphere[J]. Mon. Wea. Rev., 99(1):
 4-12.
- Lindzen R S, Holton J R. 1968. A theory of the quasi-biennial oscillation[J]. J. Atmos. Sci., 25(6): 1095-1107. DOI: 10.1175/1520-0469(1968)025<1095:ATOTQB>2.0.CO;2
- Liu Y Y, Ding Y H, Gao H, et al. 2013. Tropospheric biennial oscillation of the western Pacific subtropical high and its relationships
 with the tropical SST and atmospheric circulation anomalies[J]. Chin. Sci. Bull., 58(30): 3664-3672. DOI: 10.1007/s11434-013-5854-7
- 346 Matsuno T. 1966. Quasi-geostrophic motions in the equatorial area[J]. J. Meteor. Soc. Japan, 44(1): 25-43. DOI:
- **347** 10.2151/jmsj1965.44.1
- 348 North G R, Gerald R, Bell T L, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions[J]. Mon. Wea. Rev.,
- 349 110(7): 699-706. DOI: 10.1175/1520-0493(1982)110<0699:SEITEO>2.0.CO;2
- Rao J, Garfinkel C I, Ren R, et al. 2023. Projected strengthening impact of the quasi-biennial oscillation on the Southern Hemisphere
 by CMIP5/6 Models[J]. J. Clim., 36(16): 5461-5476. DOI: 10.1175/JCLI-D-22-0801.1
- Reed R J, Campbell W J, Rasmusson L A, et al. 1961. Evidence of a downward propagating annual wind reversal in the equatorial
 stratosphere[J]. J. Geophys. Res., 66: 813-818. DOI: 10.1029/JZ066i003p00813
- 354 黄荣辉,陈文,魏科,等. 2018. 平流层大气动力学及其与对流层大气相互作用的研究:进展与问题[J]. 大气科学, 42 (3):
 355 463-487. Huang R H, Chen W, Wei K, et al. 2018. Atmospheric dynamics in the stratosphere and its interaction with tropospheric
 356 processes: Progress and problems[J]. Chin. J. Atmos. Sci. (in Chinese), 42(3): 463-487. DOI: 103878/j.issn.1006-9895.1802.17250
- 357 李崇银,龙振夏. 1992. 准两年振荡及其对东亚大气环流和气候的影响[J]. 大气科学, 16 (2):167-175. Li C Y, Long Z X. 1992.
 358 QBO and its influence on the general atmospheric circulation and the climate in East Asia [J]. Chin. J. Atmos. Sci. (in Chinese), 16(2):167-176. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1992.02.05
- 360 李崇银,龙振夏. 1997. 西太平洋副高活动与平流层 QBO 关系的研究[J]. 大气科学, 21 (6): 670-678. Li C Y, Long Z X. 1997.
 361 Study on subtropical high activity over the western Pacific and QBO in the stratosphere [J]. Chin. J. Atmos. Sci. (in Chinese), 21(6):
 362 670-678. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1997.06.04
- 363 李崇银, 阙志萍, 潘静. 2010. 东亚季风演变与对流层准两年振荡. 科学通报, 55 (29): 2863–2868. Li C Y, Que Z P, Pan J. 2010.
 364 Evolution of East Asian Monsoon and quasi biennial oscillation of troposphere[J]. Sci. Bull. (in Chinese), 55(29): 2863-2868. DOI: 10.1007/s11434-010-4200-6
- 366 刘秦玉, LIU Zhengyu, 潘爱军. 2006. 厄尔尼诺/南方涛动与赤道远西太平洋准两年周期振荡之间相互作用的概念模式[J]. 中国
 367 科学 D 辑, 36 (1): 90-97. Liu Q Y, Liu Z Y, Pan A J. 2006. Conceptual model of the interaction between El Niño/Southern
 368 Oscillation and equatorial far western Pacific quasi biennial oscillation[J]. Sci. Sinica Ser. D (in Chinese), 36(1): 90-97.
- 声姁,张东凌. 2010. 10 月份热带印度洋海气耦合的统计动力诊断[J]. 大气科学, 34 (2): 351-360. Lu X, Zhang D L. 2010.
 Dynamic statistic analysis of coupled circulation of atmosphere and ocean in the tropical Indian Ocean in October[J]. Chin. J. Atmos.
 Sci. (in Chinese), 34(2): 351-360. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2010.02.09
- 372 张东凌. 2006. 亚洲夏季风空间结构与时间演变的动力统计分析[D].中国科学院大气物理研究所. Zhang D L. 2006. Dynamic
- statistical analysis of spatial structure and temporal evolution of Asian summer monsoon[D]. Inst. Atmos. Phys., Chin. Acad. Sci (in
 Chinese).
- 375 张东凌,曾庆存. 2007. 5 月热带印度洋大气大洋耦合环流的统计动力分析[J]. 中国科学 D 辑, 37 (12):1693-1699. Zhang D L,
- Zeng Q C. 2007. Statistical dynamics analysis of atmospheric-ocean coupled circulation in the tropical Indian Ocean in May[J]. Sci.
 Sinica Ser. D (in Chinese), 37(12): 1693-1699. DOI: 10.1360/zd2007-37-12-1693
- 378 张东凌, 卢姁, 张铭. 2018. 春季 WYRTKI 急流异常及其与亚洲热带夏季风的关系[J]. 海洋学研究, 36(1): 16-26. Zhang D L, Lu
 379 X, Zhang M. 2018. Wyrtki Jet anomaly in May and its relationship with Asian tropical summer monsoon[J]. J. Mar. Sci. (in
 380 Chinese), 36(1): 16-26. DOI: 10.3969/j.issn.1001-909X.2018.01.002
- 381 张东凌, 卢姁. 2017. 冬季热带印度洋上层流场异常模态分析[J]. 气候与环境研究, 22(4): 463-472. Zhang D L, Lu X. 2017.
 382 Analysis of Abnormal Upper Circulation over the Tropical Indian Ocean in Winter[J]. Clim. Environ. Res. (in Chinese), 22(4):
- **383** 463-472. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15011.
- 384 张东凌, 卢姁, 张铭, 等, 2023, 气候模式 CAS-ESM-C 对 1 月热带太平洋流场模态的模拟评估[J]. 大气科学, 47 (3): 725-738.
- 385 Zhang D L, Lu X, Zhang M, et al. 2023. Simulation and Evaluation of Climate Model CAS-ESM-C for Flow Field Modes

- in the Tropical Pacific Ocean in January [J]. Chin. J. Atmos. Sci. (in Chinese), 47 (3): 725-738. DOI: 10.3878/j.issn.
 1006-9895 2205.21016.
- 388 张铭, 张立凤, 朱敏. 2008. 大气波谱分析及其不稳定性.第二卷,球面大气上的扰动和亚洲夏季风爆发动力机制探讨[M]. 气象
- 389 出版社, 第六章球面两层正压原始方程的波谱分析: 67-80. Zhang M, Zhang L F, Zhu M. 2008. Atmospheric spectral analysis
- and its instability. Volume II, Disturbance in the spherical atmosphere and the dynamic mechanism of the Asian summer monsoon
- burst[M]. China Meteorological Press (in Chinese), Chapter 6 Spectral analysis of two-level barotropic primitive equations on Earth:
 67-80.
- 393 张铭, 张立凤. 2006. 球面正压大气的波谱分析[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 21 (1):130-138. Zhang M, Zhang L F. 2006. Wave
 394 spectra analysis in spherical barotropic atmosphere[J]. J. Hydrodyn. Ser. A (in Chinese), 21(1): 130-138.
- 395