

陈柏青, 刘毅, 刘靓珂, 等. 2018. 低纬地区平流层准零风层时空分布特征分析 [J]. 气候与环境研究, 23 (6): 657–669. Chen Baiqing, Liu Yi, Liu Liangke, et al. 2018. Characteristics of spatial-temporal distribution of the stratospheric quasi-zero wind layer in low-latitude regions [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (6): 657–669, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17086.

低纬地区平流层准零风层时空分布特征分析

陈柏青^{1,2} 刘毅² 刘靓珂¹ 沈新勇¹ 张玉李²

1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

2 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029

摘要 利用 ERA-Interim 逐日再分析资料, 使用 EOF (Empirical Orthogonal Function) 等统计方法, 分析了中国低纬地区平流层准零风层 (Quasi-Zero Wind Layer, QZWL) 的时空分布特征, 旨在为平流层飞艇寻找合适的运行区域及时段。低纬地区 QZWL 主要受到热带平流层大气环流季节性变化和平流层准两年振荡 (Quasi-Biennial Oscillation, QBO) 的影响。在二者共同作用下, 低纬地区 QZWL 高概率带可分为南北两支: “北支”出现在10月至次年4月间, QBO 东风位相时期, “北支”中心纬度基本维持在 20°N 附近, 西风位相时期, “北支”中心纬度随高度降低南移明显; “南支”仅出现在 QBO 西风位相期间, 5~11 月在 5°N 附近, 其余时段与“北支”合并, 可以认为是“北支”向南延伸。通过对比海口站和南沙站 Weibull 概率密度函数与风速资料的拟合结果, 表明 Weibull 分布可以很好拟合不同 QBO 位相下平流层逐月风速频率分布, 根据 Weibull 分布计算特定的累积概率风速值, 可以作为选取适宜平流层飞艇运行的低风速风场的判据。海口站 30~50 hPa 高度 11 月至次年4月、南沙站 50~70 hPa 高度 QBO 西风位相时期全年均较为适合平流层飞艇运行。

关键词 低纬地区 平流层准零风层 平流层飞艇 Weibull 分布

文章编号 1006-9585 (2018) 06-0657-13

中图分类号 P421.32

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17086

Characteristics of Spatial-Temporal Distribution of the Stratospheric Quasi-Zero Wind Layer in Low-Latitude Regions

CHEN Baiqing^{1,2}, LIU Yi², LIU Liangke¹, SHEN Xinyong¹, and ZHANG Yuli²

1 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education / Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change / Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract In order to find suitable airspace for the stratospheric airship, the characteristics of spatial-temporal distribution of the stratospheric Quasi-Zero Wind Layer (QZWL) in low-latitude regions are analyzed using the EOF

收稿日期 2017-06-14; 网络预出版日期 2018-01-04

作者简介 陈柏青, 男, 1992 年出生, 硕士, 主要从事中层大气方面的研究。E-mail: baiqing_chen@163.com

通讯作者 沈新勇, E-mail: shenxy@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41375035、4153042, 国家重点研发计划项目 2016YFC0203301, 国家重点基础研究发展计划项目 2015CB453201, 江苏省自然科学基金重点项目 BK20150062

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41375035 and 41530427), the National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFC0203301), National Program on Key Basic Research Project (Grant 2015CB453201), Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (Grant BK20150062)

(Empirical Orthogonal Function) method and based on the ERA-Interim daily reanalysis data. The QZWL is mainly influenced by the stratospheric seasonal transition and the Quasi-Biennial Oscillation (QBO), and can be classified into two categories. The northern type of QZWL occurs at 20°N from October to April, while the southern type of QZWL occurs all year round during the westerly QBO phase. The southern type of QZWL is located at around 5°N from May to November and merged with the northern type in the remaining time. Monthly statistical modeling studies in different QBO phases indicate that the probability density function of Weibull distribution fits well wind speed data collected at Haikou station and Nansha station. The specific probability distribution of wind speed predicted by the Weibull distribution and cumulative function can be used to determine suitable airspace for the stratospheric airship. As a result, the airspace at the height between 50 hPa and 30 hPa from October to April at Haikou station and at the height between 70 hPa and 50 hPa for the whole year in the westerly QBO phase at Nansha station are suitable for the stratospheric airship to make smooth flight.

Keywords Low-latitude regions, Stratosphere quasi-zero wind layer, Stratosphere airship, Weibull distributions

1 引言

平流层飞艇是能在临近空间(17~40 km)高度长期驻空(数月至数年)的准静止、有可观有效载荷的一种大型浮空器。作为一种新型的综合信息平台, 平流层飞艇在对地观测、战区预警、电子侦察与干扰、区域通讯导航、抢险救灾等诸多领域有着广阔的应用空间(王彦广等, 2007)。相较于卫星等其他观测平台, 平流层飞艇具有较高的对地分辨率、费效比, 以及可重复使用等优点, 吸引美、日、西欧各国以及中国都先后开展相关研发工作。平流层的风场环境对飞艇的飞行性能和有效载重都有很大影响。飞艇抗风消耗的能源与风速的三次方成正比(张礼学和王中伟, 2013), 大的环境风速直接降低了飞艇的有效载荷。为了实现平流层飞艇的长时间驻留, 除了要达到相应技术要求外, 为其运行选取一个低风速区域就显得十分必要。

早在1975年, Belmont et al. (1975)就指出, 在平流层冬夏季节转换期间, 纬向东西风区之间会存在低风速的纬向风转换层。吕达仁等(2002)针对临近空间飞行器的特点, 提出了准零风层(Quasi-Zero Wind Layer, QZWL)的概念, 一般是指平流层下层20 km高度附近的大气层, 上、下层纬向风风向相反, 同时南北风分量亦很小。准零风层这样一个长时间、大范围的低风速区域, 正是作为平流层飞艇运行的理想环境。

肖存英等(2008)利用ERA-40再分析风场资料, 首次分析了中国上空准零风层随季节和地理位置的分布特征, 根据准零风层在不同纬度出现的时间, 将中国上空的准零风层分为主要出现在冬季的

低纬地区、夏季的中高纬地区以及受热带平流层准两年振荡(Quasi-Biennial Oscillation, QBO)影响的中低纬过渡区。陶梦初等(2012)根据形成机制不同, 将准零风层划分为由各高度处于不同QBO位相期间形成的, 和由平流层低层经向温度梯度逆转形成的两类, 第一类准零风层主要出现在冬季赤道地区, 此外QBO西风位相年冬季20°N~40°N出现准零风层的概率要高于东风位相年。周昕家等(2011)、张玉李(2015)在分析北半球平流层中低层纬向风季节转化过程中, 指出热带外地区夏季准零风层起止时间与平流层中层的东风期有很好的对应关系, 但强东风带的出现也会使一些高度上的准零风层发生中断。

QBO作为热带平流层极为显著的年际变化信号, 由赤道对流层不断交替上传的混合罗斯贝—重力波与开尔文波以及其他各种尺度的重力波和基本气流之间的相互作用形成(Holton and Lindzen, 1972; Baldwin et al., 2001)。QBO平均周期约28个月, 振荡从5~7 hPa开始以1 km/month近似等振幅下传, 至约70 hPa振幅锐减。QBO沿赤道呈对称分布, 振幅由赤道向赤道外地区递减, 覆盖范围可至12°左右(Haynes, 1998)。Brewer(1949)在对热带平流层水汽的研究中发现, 平流层存在垂直方向上的经圈环流, 既Brewer-Dobson环流(BD环流)。尽管BD环流是由中高纬度波活动驱动产生, 但在热带平流层中下层, QBO引起的纬向风场和温度场的变化, 会使赤道上空形成异常的次级经向环流, 从而改变平流层的环流和大气成分(Randel et al., 2008)。Flury et al. (2013)也发现在热带平流层下层中的BD环流中存在着明显的QBO信号。ENSO、火山爆发等过程会引起平流层环流的年际变化(任荣彩等, 2014), 作为平流层重要成分臭

氧的变化, 也会引起平流层乃至对流层热力、动力的异常(张健恺等, 2014; 郑彬和施春华, 2015)。这些研究表明热带平流层低层的经向风在整个环流体系中起着很重要的角色, 特别是在准零风层这样低风速环境中, 经向风的比重更不容忽视。前人的研究更多通过纬向风对准零风层进行研究, 考虑到飞艇的实际应用需求, 本文将水平全风速场作为主要的研究要素。以往的研究更多的着眼于中高纬地区, 尽管指出低纬地区准零风层受到 QBO 等影响, 但还需要更深入的讨论。

因此, 本文在结合前人的研究成果上, 重点分析低纬地区平流层准零风层的时空分布特征, 旨在为平流层飞艇等临近空间飞行器在运行区域及时段的选择、运行期间的环境风速预测以及临近空间飞行器的快速响应提供一定的气象支持, 为今后临近空间飞行器的业务化运行, 临近空间科学观测的顺利开展奠定理论基础。

2 资料和方法

ERA-Interim 再分析数据集是在 ERA-40 的基础上, 使用欧洲中期天气预报中心积分预报模式和四维变量资料同化系统等, 对包括平流层质量环流等方面进行一定改进的新一套再分析数据集(Dee et al., 2011)。Iwasaki et al. (2009) 在对比多套再分析资料在 BD 环流研究中的应用中, 认为 ERA-Interim 资料在下平流层区域中表现更优; 高志刚等(2015)采用中国沿海台站观测数据对 ERA-Interim 数据进行质量评估, 结果表明两者吻合较好, 可以反映中国沿海地区的气候态变化特征。

因此, 本文使用 1985~2014 年 ERA-Interim 再分析格点风场数据集, 水平分辨率为 0.25° (纬度) $\times 0.25^\circ$ (经度), 垂直方向共计 37 个标准气压层(1000 hPa 至 1 hPa), 时间分辨率每 6 h 一次(协调世界时 00:00、06:00、12:00、18:00)。本文着眼于低纬地区, 选取($0^\circ\sim 30^\circ\text{N}$, $100^\circ\text{E}\sim 130^\circ\text{E}$)为主要研究区域, 若无特殊说明, 本文所提到的纬向平均均为 $100^\circ\text{E}\sim 130^\circ\text{E}$ 的平均, 气候态均为 1985~2014 年的平均。

风速概率分布是衡量平流层飞艇运行区域风场的重要指标之一。风速的分布通常为偏态分布, 符合偏态分布的双参数曲线威布尔(Weibull)分布

在大多数情况下是对风速统计描述中, 拟合效果最好、应用最为广泛的风速分布拟合模型之一, 特别适合拟合长周期风速分布(Wais, 2017)。双参数 Weibull 分布为一单峰函数簇, 其分布函数为

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right], \quad (1)$$

概率密度函数为

$$p(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right], \quad (2)$$

其中, v 为风速; k 为形状参数, 反映分布曲线的峰值情况; c 为尺度参数, 反映描述地区所选取时间段内平均风速状况。本文在考虑计算精度和复杂度的情况下, 选取最小二乘法得到 k 值和 c 值(李慧等, 2014; Wais, 2017)。

3 结果与分析

3.1 低纬地区准零风层分布特征

根据气候态月平均三维风场的分布(图 1), 平流层中下层低风速区域(水平风速 $< 5 \text{ m/s}$)按纬度可分为两部分, 偏北部分主要分布在副热带西风急流与热带平流层中上层东风环流之间。由于两支气流存在一定的纬度和高度差, 因此低风速区域的分布呈现随高度升高而北移的状态。受副热带西风急流和平流层东风环流的季节性变化, 该部分低风速区域也存在明显的季节变化, 主要表现为冬夏两个较长时间的分布态和春秋两个短暂的过渡态: 冬季副热带西风急流发展最为强盛, 平流层东风环流中心位于赤道以南, 此时低风速区域主要位于 $10^\circ\text{N}\sim 25^\circ\text{N}$ 的平流层中低层; 到了夏季, 西风急流减弱北退, 平流层东风加强北移并达到急流级别, 低风速区域北移至 30°N 以北, 仅出现在 20 km 左右高度; 过渡期间, 两支环流强度大致相当, 低风速区域分布范围相对较广, 在垂直方向上能达到 30 km 以上高度。偏南部分则基本固定在 5°N 上空的 70 hPa 高度上, 全年都有分布。这部分低风速区域也随季节有一定的变化, 但更多的表现在覆盖的范围上, 冬季几乎覆盖 $0^\circ\sim 10^\circ\text{N}$ 整个区域。

图 1 中赤道上空很大范围内风速都很低, 但低风速区域只出现在 70 hPa。为此, 我们分析了 1985~2014 年 5°N 地区纬向平均纬向风的时间—高度分布(图 2)。 $10\sim 100 \text{ hPa}$ 高度之间的纬向风

场有明显的准两年振荡特征，从 10 hPa 高度开始下传，至 70 hPa 信号迅速减弱，100 hPa 以下高度全年几乎均为东风，表现为夏强冬弱的季节振荡。零风速带主要出现在 10~70 hPa 高度间 QBO 位相转换期间，即整个高度上都有零风速线的分布。但在

QBO 东风位相下传过程中，30~50 hPa 高度上有明显的长达数月的滞后现象，使得 30~50 hPa 高度上有较长时间的零风速线的分布。此外对流层顶东风与之上的 QBO 西风之间的 70~100 hPa 间也存在长时间的零风速带。而气候态中仅 70 hPa 表现出低风

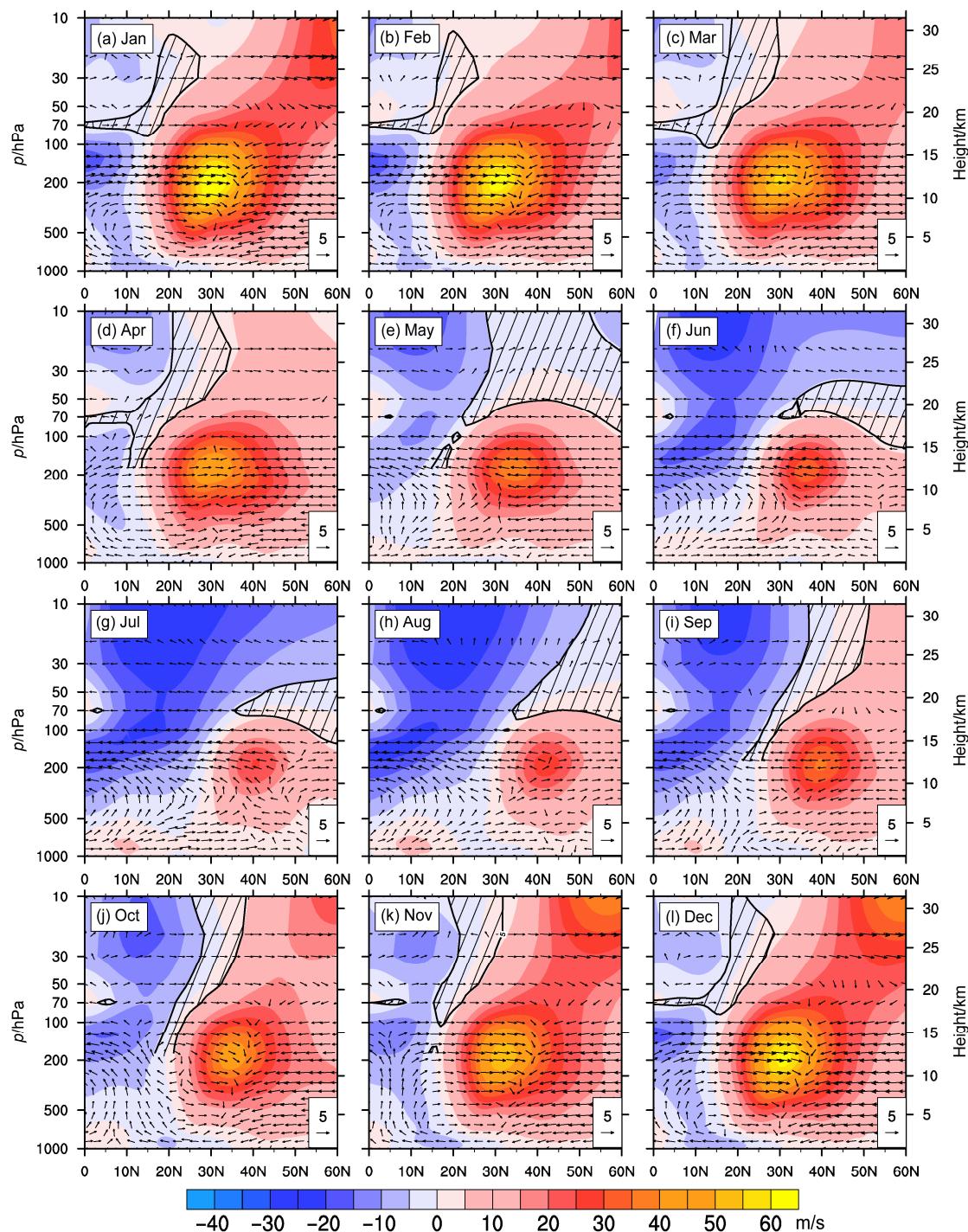


图 1 气候态各月纬向平均风场的纬度—高度分布。填色表示纬向风场，正值为西风；矢量图为经向风场和垂直风场（垂直风速已放大 100 倍）的合成；黑色斜线区表示 200 hPa 以上高度水平风速低于 5 m/s 区域

Fig. 1 Latitude-height cross sections of monthly mean zonal wind (color shaded), meridional and vertical winds (vectors, with the vertical velocity being multiplied by 100). The black slant lines indicate the horizontal wind less than 5 m/s (above 200 hPa)

速区域, 则说明我们在时空平均操作时, 需要充分考虑要素场的特征, 更加细致、谨慎地进行平均运算。

综合风场分布特征, 近赤道上空低风速区域存在于不同高度反向纬向风间的过渡区中, 副热带地区上空低风速区域则较多出现在水平方向上反向甚至同向纬向风间的过渡区中, 为了便于研究和叙述, 这里将平流层低层水平风速低于 5 m/s 的区域统称为“准零风层”区域。

3.2 低纬地区准零风层 EOF 分析

30~70 hPa 是准零风层持续时间最长、分布最广泛的高度, 也是目前平流层飞艇主要的试验高度, 为此我们对低纬地区 1985~2014 年 30、50、70 hPa 逐月准零风层出现天数分别进行了 EOF 分析, 旨在得到低纬地区准零风层在特定高度上的时

空分布特征、主要影响因子的权重及其作用范围。

30~70 hPa 各高度间 EOF 分析的前三个模态的累积方差贡献均在 80% 左右 (30 hPa: 80.4%, 50 hPa: 80.0%, 70 hPa: 78.1%), 且前三个模态均通过 North 显著性检验。鉴于 3 个高度的 EOF 分析结果大体相似, 而 70 hPa 又是准零风层出现相对较多的高度, 因此我们以 70 hPa 高度的 EOF 分析结果进行说明。

70 hPa 上 3 个模态的空间分布均体现出了很好的纬向一致性, EOF1 的方差贡献为 52.5%, 表现为低纬地区的整体一致性, 大值区主要位于 7°N~17°N, 11 月至 4 月大值区月平均准零风层出现天数增多, 夏季反之 (图 3a、4a)。EOF2 的方差贡献率为 13.3%, 大值区主要分布在 18°N~27°N, 春秋两季 (4~5 月、9~10 月) 大值区月平均准零风层出

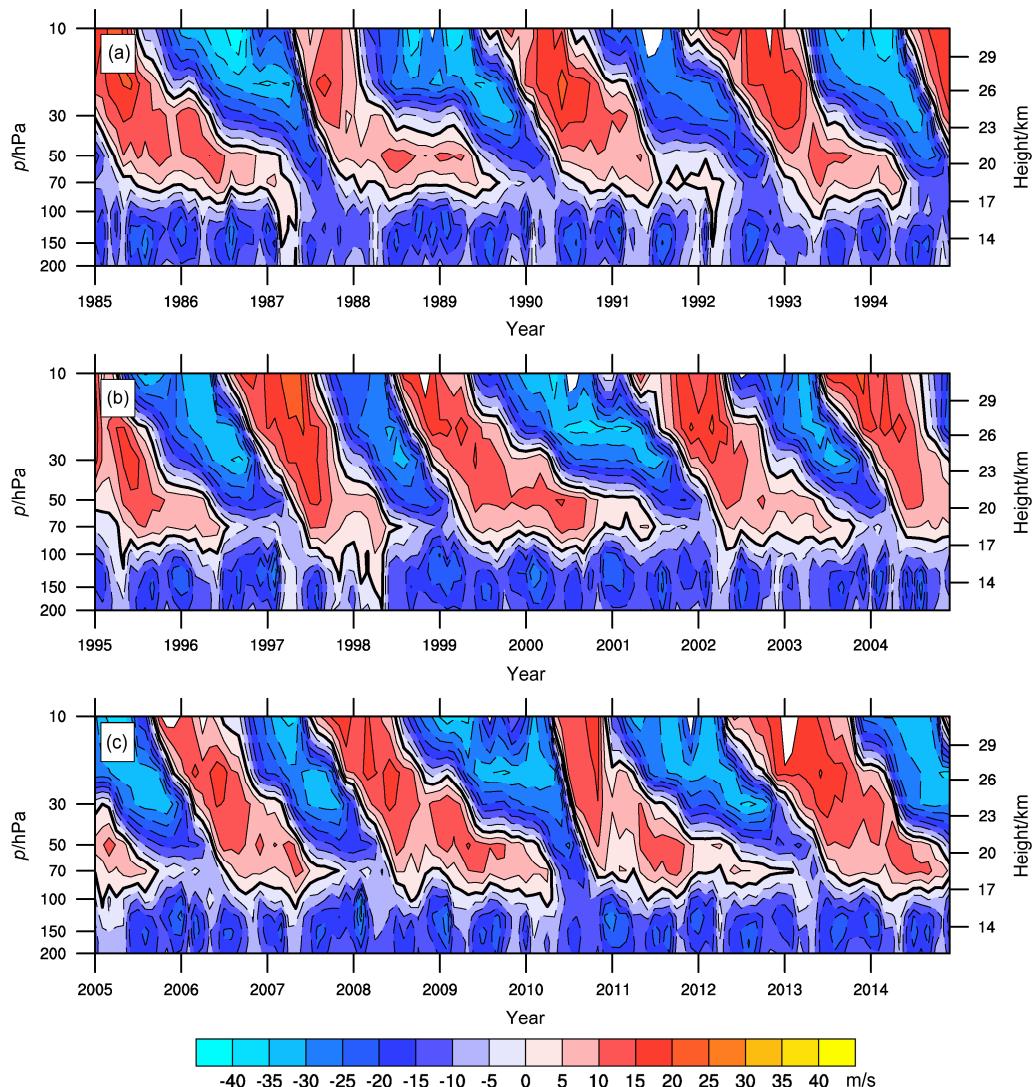


图 2 1985~2014 年 5°N 纬向平均纬向逐月风速的时间—高度分布 (正值为西风, 粗实线表示风速为零)

Fig. 2 Time-height cross sections of monthly zonal-mean zonal wind (shadings, units: m/s) at 5°N. The thick solid line indicates the contour of zero during 1985–2014

现天数增多, 冬夏两季减少(图 3b、4b)。前两个模态主要反映了准零风层出现天数主要受到季节变化的影响, 冬季是准零风层主要的出现时段, 大值区位于 $7^{\circ}\text{N} \sim 17^{\circ}\text{N}$, 春秋两季大值区北移, 夏季准零风层出现相对较少。

EOF3 的方差贡献为 12.3% (图 3c), 与 EOF2 的贡献程度相当。EOF3 表现出“正—负—正”式的纬向带状分布, $0^{\circ} \sim 10^{\circ}\text{N}$ 和 $23^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}$ 为正异常区域, $10^{\circ}\text{N} \sim 20^{\circ}\text{N}$ 为负异常区域, 极值带位于 5°N 附近。说明 EOF3 主要作用在 5°N 附近的热带地区。对应的时间系数 (PC3) 则表现出了准两年振荡的周期特征 (图 4c), 通过与对应高度 QBO 指

数 (标准化的赤道上空纬圈平均纬向风风速) 的比较, 发现二者的相关系数为 0.62, 呈显著的正相关。西风位相的 QBO 对应着正的 PC3, 也就是说在 QBO 为西风位相时, 5°N 和 27°N 附近的准零风层出现天数增多, 17°N 附近天数减少; 东风位相 QBO 的情况则相反。EOF3 说明 QBO 是除了季节变化外, 影响低纬地区准零风层出现天数的重要因子。此外, QBO 对 $25^{\circ}\text{N} \sim 30^{\circ}\text{N}$ 准零风层出现天数的影响也表明其对热带外平流层环流有一定影响。

由上可知, 低纬地区准零风层主要受到季节变化的影响, 70 hPa 高度上集中出现在冬季的 $7^{\circ}\text{N} \sim 17^{\circ}\text{N}$ 附近, 春秋两季 $20^{\circ}\text{N} \sim 25^{\circ}\text{N}$ 附近出现天数增

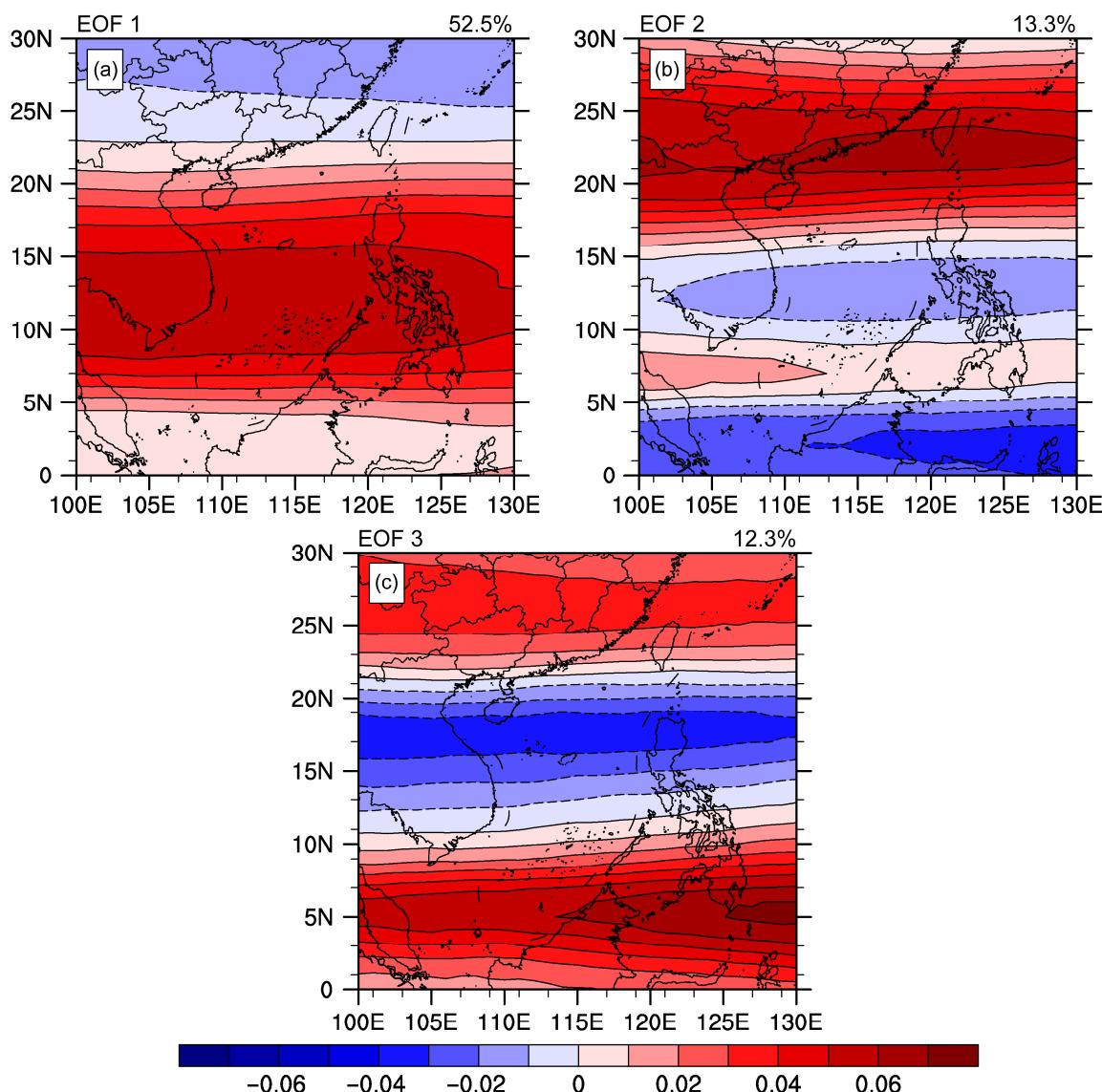


图 3 70 hPa 逐月准零风层出现天数 EOF 分析的前三个模态及其方差贡献 (图中右上方数值): (a) 第一模态 (EOF1); (b) 第二模态 (EOF2); (c) 第三模态 (EOF3)

Fig. 3 The first three leading EOF (Empirical Orthogonal Function) eigenvectors and accumulated variance contribution rate (at top right corner) of monthly QZWL (Quasi-Zero Wind Layer) occurrence days at 70 hPa: (a) The first EOF mode (EOF1); (b) the second EOF mode (EOF2); (c) the third EOF mode (EOF3)

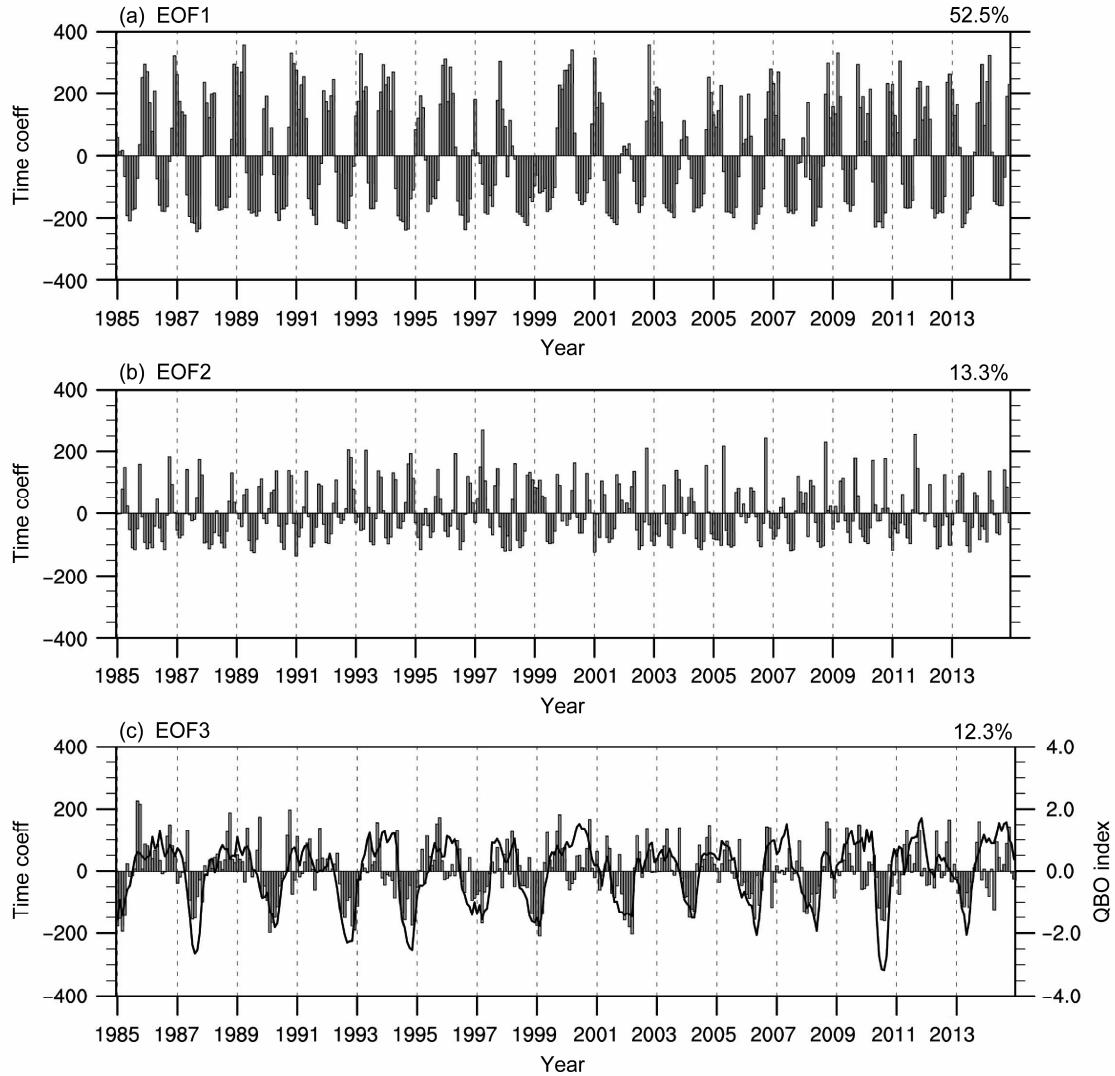


图 4 70 hPa 逐月准零风层出现天数 EOF 分析的前三个模态对应的时间系数及其方差贡献 (图中右上方数值): (a) EOF1; (b) EOF2; (c) EOF3 (黑色实线为 70 hPa 的 QBO 指数)

Fig. 4 Time coefficients corresponding to the first three leading EOF modes and accumulated variance contribution rate (at top right corner) of monthly QZWL occurrence days at 70 hPa: (a) EOF1; (b) EOF2; (c) EOF3. The black solid line in (c) is the QBO (Quasi-Biennial Oscillation) index at 70 hPa

多; QBO 西风位相期间 5°N 附近出现天数也会增多。

3.3 QBO 对准零风层分布的影响

回顾前人研究, 可以发现人们在 QBO 位相划分标准上不尽相同, 既有使用单层纬向风, 也有使用两层纬向风的差值, 还有使用其他更复杂的计算方法, 但各种 QBO 指数的选取都是为了更好地解决相应的科学问题。本文在对比多套 QBO 指数后, 发现同高度 QBO 指数与准零风层的相关程度最高, 因此使用同高度赤道纬圈平均标准化纬向风速作为分类使用的 QBO 指数。

为了直观地表示不同 QBO 位相下 QZWL 在各高度出现的概率 P , 定义 N 为特定 QBO 位相下某

日某一高度 QZWL 出现的年数, N_Q 定义为 1985~2014 年间该 QBO 位相在该日出现的年数, 则:

$$P = N / N_Q. \quad (3)$$

图 5 为不同 QBO 位相下各高度逐日纬向平均准零风层发生概率的时间—纬度分布。不同 QBO 位相下, 各高度准零风层出现的概率存在明显差异, 表现为以 15°N 为界的南北差异。15°N 以北, 无论 QBO 处于何种位相, 10 月至 6 月均有准零风层高概率带的分布, 中心区概率能达到 80% 以上, 中心纬度与副热带西风急流也有很好的一致性, 其中 12 月至 4 月为稳定期, 纬度基本保持固定。便于比较, 将此区域的准零风层高概率带称为“北支”。相较于“北支”, 在 15°N 以南区域出现的准

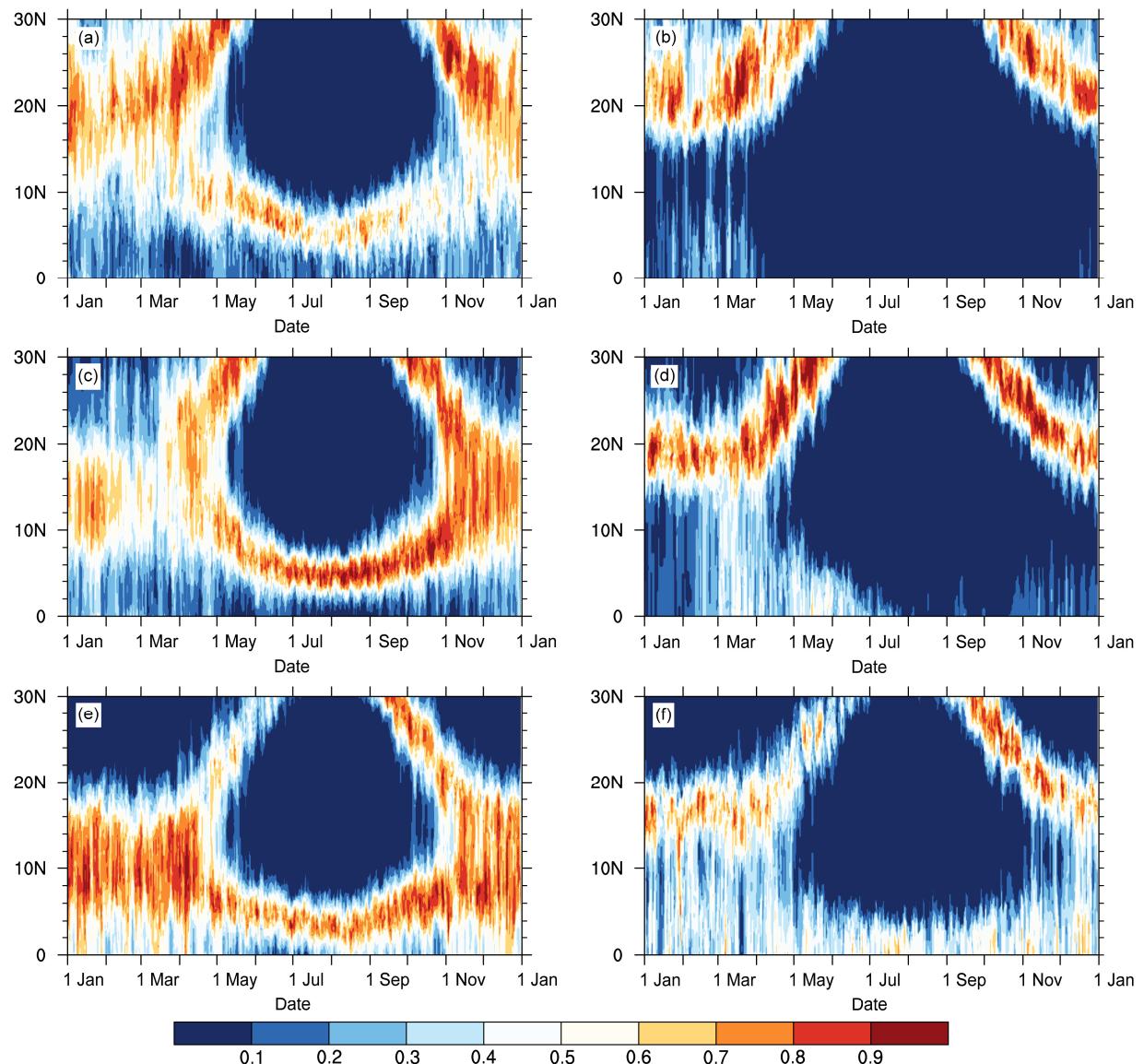


图 5 QBO 东风位相 (左列)、西风位相 (右列) 下 30~70 hPa 逐日纬向平均准零风层出现概率的时间—纬度分布: (a, b) 30 hPa; (c, d) 50 hPa; (e, f) 70 hPa

Fig. 5 Time-latitude cross sections of the probability of daily zonal-mean QZWL occurrence in westerly (left panel) and easterly (right panel) QBO phases at (a, b) 30 hPa, (c, d) 50 hPa, and (e, f) 70 hPa

零风层高概率带 (“南支”), 主要出现在 QBO 西风位相期间, 全年都有分布。“南支”可以明显分为两个时段, 冬春季(11月至次年4月)和夏秋季(5~10月)。冬春季南北两支合并出现于10°N附近, 可以认为是“北支”在QBO 西风位相期间一定程度的向南发展。主要是由于冬季中纬度地区平流层低层为西风控制, 赤道地区受 QBO 影响, 当 QBO 为东风位相时, 近赤道地区为东风, 形成准零风层的“零风速线”位于15°N以北, 所以仅有“北支”的出现; 而 QBO 西风位相期间, 中纬度和赤

道两支西风之间并没有明显的“零风速线”, 且西风位相期间整个近赤道地区水平风速均很小, 在0°~20°N的范围内就有较大范围的高概率准零风层的发生。夏秋季高概率带的宽度大幅减少至约5个纬度, 基本维持在5°N附近, 从风场的角度来看这支高频带主要是由于赤道西风与低纬夏季东风间的过渡形成, 由于夏季低纬东风风速较大且较为稳定, 因此高概率带分布狭长且靠近赤道一侧。

不同高度间准零风层出现的概率和纬度也存在些许差异, 由于形成准零风层的两支气流的纬

度、高度差异, 准零风层高概率带的分布随高度降低而向赤道一侧移动。此外, 在 QBO 西风位相期间, 特别是在 30~50 hPa 高度上, 10 月至次年 1 月间准零风层出现的概率要略高于 1~4 月, 其原因还有待进一步研究。

总体上, “北支”较少受到 QBO 影响, 但 QBO 东风位相期间准零风层出现概率还是略高于西风位相 10% 左右, 并且 30、50 hPa 高度出现的概率更高, 中心区能达到 90% 以上; “南支”明显受 QBO 的影响, 只在西风位相中出现, 相较之下 50、70 hPa 高度上高概率带的分布相对广些, 且概率更优, 普遍达到 70% 以上。

3.4 Weibull 概率分布模型在准零风层研究中的适用性

了解了低纬地区准零风层大致的分布规律后, 就需要对准零风层中的风场进行量化, 以求更好地为平流层飞艇服务。由于风速数据是偏态分布的, 不能采用正态分布进行描述, 因此本文选用双参数 Weibull 分布对平流层低层风场风速进行拟合。双参数 Weibull 分布拟合风速因其较为简便的计算方法和良好的拟合效果, 广泛应用于风电场选址及发电量预估等诸多领域。由于目前风场 Weibull 分析主要集中于近地面风场, 尽管 Roney (2007) 使用 Weibull 分布分析美国本土两处飞艇实验区 20~22 km 高度风场情况, 认为 Weibull 分布在此高度上有很好的适用性。鉴于实验区均位于中纬度, 因此我们还需要检验 Weibull 分布在低纬上空平流层低层的适用情况。

本文分别选取处于“北支”和“南支”的高概率带中海口站(20°N, 110°E)和南沙站(5°N, 112°E)两地逐日风场资料进行适用性分析。

由于热带地区平流层低层冬夏长、春秋短, 且冬夏季风速差异较大, 造成年风速分布为双峰型, 不适宜用 Weibull 概率分布进行拟合, 加之热带地区受 QBO 影响较为显著, 不同 QBO 位相期间风速差异也十分明显。因此, 对所关注的 30~70 hPa 高度风场, 按不同月份、不同 QBO 位相分别进行 Weibull 分布拟合, 得到相应的 Weibull 分布函数, 以求更细致、准确的反映我们研究区域的风速分布。

对比风速频率分布与对应的 Weibull 概率密度分布(图 6)及二者的相关程度(表 1、表 2), 根据 QBO 不同位相划分的逐月风速频率分布与

Weibull 分布拟合情况基本一致, 风速频率分布均为单峰型, 除极个别情况, 二者相关系数接近 1, 且通过 Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验。不仅 Weibull 分布的峰值在各月间存在差异, 其曲线的形状也有着明显的变化。图 6 中给出了 4 种典型的 Weibull 分布型, 图 6a、6c 为“矮胖型”, 风速分布范围广, 变化区间大, 峰值中心 $\pm 1 \text{ m/s}$ 累积概率低于 20%; 图 6b、6d 则为“高瘦型”, 风速分布集中、稳定, 峰值中心 $\pm 1 \text{ m/s}$ 累积概率可达 50% 左右。特别是峰值风速很低时(图 6b), 十分利于平流层飞艇的驻空运行。

尽管 Weibull 概率分布模型仅使用两个参数就能很好的反映某地某个高度特定时间段内的风速概率情况, 特别是可以通过 k 、 c 值大致估计出分布型及峰值风速, 但是这种估计比较粗糙, 因此我们通过 Weibull 拟合得到的参数来计算特定的累积概率风速, 对风场进行进一步的量化。表 1 和表 2 给出了根据 Weibull 拟合的结果分别计算出 Weibull 分布下的平均风速(\bar{U}_{wbl}), 峰值风速(U_{peak}), 50% ($U_{50\%}$)、95% ($U_{95\%}$) 和 99% ($U_{99\%}$) 累积概率风速以及再分析资料中的平均风速(\bar{U}_{obs})和历史最大风速(U_{max})。对比计算结果和再分析资料, Weibull 计算得到的平均风速与观测的平均风速几乎一致, 峰值风速在“矮胖型”分布是略低于平均风速, 在“高瘦型”时与平均风速基本一致, $U_{50\%}$ 也与平均风速大致相同, $U_{95\%}$ 和 $U_{99\%}$ 主要反映拟合时段内的最大风速大小, $U_{99\%}$ 与 U_{max} 的差异基本保持在 2 m/s 以内。因而我们可以通过 Weibull 密度函数得到的 \bar{U}_{wbl} 、 U_{peak} 和 $U_{50\%}$ 来表征风场的平均风速分布特征, 通过 $U_{95\%}$ 和 $U_{99\%}$ 来表征风速极大值情况。

综合 Weibull 概率分布函数图像(图 7)以及相关特征风速(表 1、表 2), 海口站“高瘦型”低风速区域主要出现在 30~50 hPa 高度上, 11 月至 4 月平均风速为 5.2 m/s, $U_{95\%}$ 约为 11.04 m/s, 属于较适合平流层飞艇试验的时段; 不同 QBO 位相期间差异不大, 但在西风位相期间 50 hPa 高度上 1~3 月平均风速在 7 m/s 以上, 略显偏大。南沙站“高瘦型”低风速区域主要出现在 50~70 hPa 高度上, 仅出现在 QBO 西风位相期间, 50 hPa 上年平均风速约为 5.9 m/s, 其中 6~10 月间月平均风速均低于 5 m/s, $U_{95\%}$ 低于 10 m/s, 7~8 月间分布“最瘦”, $U_{99\%}$ 低至 9.17 m/s; 70 hPa 上年平均风速低至 4.8 m/s, 但部分月份 $U_{95\%}$ 高于 10 m/s。南沙站 QBO 西风位

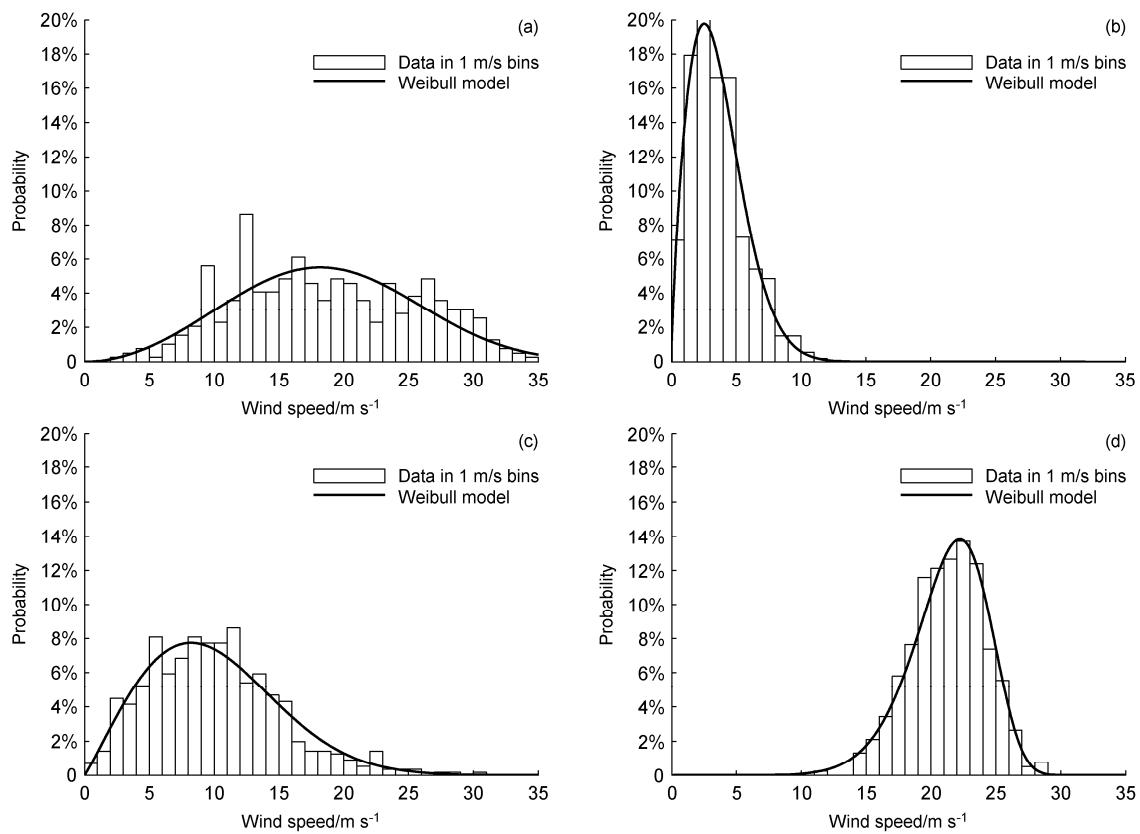


图6 QBO 东风位相(左列)、QBO 西风位相(右列)下(a、b)7月南沙站50 hPa、(c、d)1月海口站70 hPa风速频率分布与Weibull概率密度分布
Fig. 6 Probability distribution of wind speed and calculated Weibull distribution at (a, b) Nansha station at 50 hPa in July and (c, d) Haikou station at 50 hPa in January in easterly (left panel) and westerly (right panel) QBO phases

表1 海口站逐月 Weibull 分布参数及特征风速

Table 1 Weibull distribution parameters and specific probability wind speeds for Haikou station

	月份	$\bar{U}_{\text{obs}}/\text{m s}^{-1}$	$c/\text{m s}^{-1}$	k	$\bar{U}_{\text{wbl}}/\text{m s}^{-1}$	$U_{\text{peak}}/\text{m s}^{-1}$	$U_{50\%}/\text{m s}^{-1}$	$U_{95\%}/\text{m s}^{-1}$	$U_{99\%}/\text{m s}^{-1}$	$U_{\text{max}}/\text{m s}^{-1}$	r
30 hPa	1月	4.91 4.46	5.42 4.90	1.42 1.37	4.93 4.48	2.28 1.90	4.18 3.76	11.76 10.90	15.94 14.91	17.17 27.29	0.96 0.98
	4月	4.97 6.38	5.58 7.17	1.78 1.85	4.96 6.37	3.51 4.69	4.54 5.88	10.33 12.99	13.15 16.40	19.35 16.12	0.99 0.98
	7月	20.67 23.79	21.92 24.92	7.35 10.44	20.56 23.75	21.49 24.68	20.85 24.06	25.45 27.68	26.98 28.85	30.56 30.26	0.95 0.99
	10月	10.87 13.84	12.11 15.18	3.29 4.32	10.86 13.82	10.85 14.28	10.83 13.94	16.91 19.56	19.27 21.61	20.21 24.00	0.97 0.98
	1月	7.20 4.72	8.10 5.26	1.78 1.53	7.20 4.74	5.08 2.63	6.59 4.14	15.02 10.79	19.13 14.29	21.66 18.25	0.96 0.96
	4月	4.66 4.48	5.21 5.05	1.61 1.87	4.67 4.48	2.84 3.36	4.15 4.15	10.32 9.08	13.49 11.42	17.09 11.78	0.97 0.99
	7月	19.37 21.05	20.28 22.02	10.26 10.34	19.31 20.98	20.08 21.81	19.57 21.25	22.57 24.49	23.53 25.53	25.42 28.90	0.98 0.97
	10月	8.09 10.50	9.06 11.60	2.63 3.81	8.05 10.49	7.56 10.71	7.88 10.54	13.74 15.47	16.17 17.32	16.37 18.81	0.94 0.98
70 hPa	1月	10.03 8.32	11.32 9.39	2.07 1.88	10.03 8.34	8.23 6.28	9.48 7.73	19.24 16.82	23.69 21.14	30.37 24.31	0.97 0.98
	4月	6.84 5.79	7.70 6.51	1.82 1.77	6.84 5.80	4.97 4.08	6.29 5.30	14.08 12.09	17.83 15.40	20.12 17.75	0.98 0.99
	7月	20.28 21.33	21.34 22.56	9.38 8.42	20.24 21.29	21.08 22.22	20.52 21.59	23.98 25.69	25.11 27.04	27.89 28.37	0.98 0.99
	10月	6.79 8.42	7.66 9.41	1.91 2.79	6.80 8.38	5.19 8.03	6.32 8.25	13.62 13.95	17.06 16.27	20.39 18.47	0.98 0.97

注：阴影行代表 QBO 东风位相月，空白行代表 QBO 西风位相月，下划线表示未通过 K-S 检验。

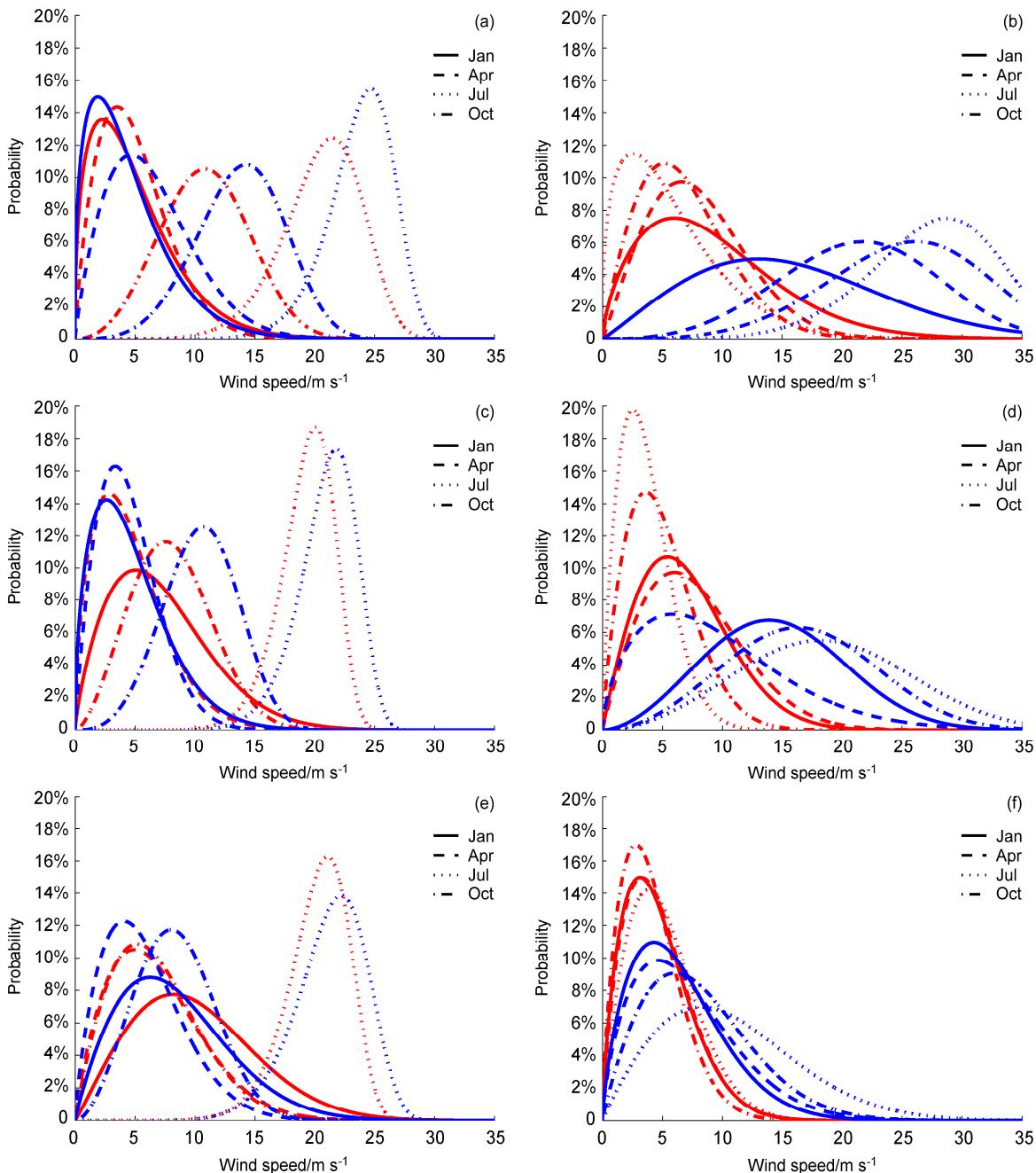


图 7 海口站(左列)、南沙站(右列)1月、4月、7月、10月(a、b)30 hPa、(c、d)50 hPa、(e、f)70 hPa高度Weibull概率密度分布(红色:QBO 西风位相, 蓝色: QBO 东风位相)

Fig. 7 Weibull distributions for January, April, July, and October showing monthly variations at Haikou station (left column) and Nansha station (right column) at (a, b) 30 hPa, (c, d) 50 hPa, and (e, f) 70 hPa (red: westerly QBO phase, blue: easterly QBO phase)

相期间 7~8 月无论从平均风速还是风速极值上, 都是进行平流层飞艇实验最佳的时段。此外无论 QBO 处于何种位相, 南沙站 70 hPa 高度上 11 月至 4 月间月平均风速均在 5~6 m/s 附近, $U_{95\%}$ 低于 15 m/s, 为较长时间的低风速窗口期, 可以进行长期驻空实验。

Weibull 概率密度分布无论是和逐月风速频率的拟合效果, 还是得到的适宜飞艇运行时段与先前结果的一致性, 都表明 Weibull 概率分布模型在低纬地区平流层准零风层分析中是十分适宜的, 其得到的分布型与特征风速在平流层飞艇运行时期的选取中也具有一定的参考价值。

表2 南沙站逐月 Weibull 分布参数及特征风速

Table 2 Weibull distribution parameters and specific probability wind speed for Nansha station

月份		$\bar{U}_{\text{obs}}/\text{m s}^{-1}$	$c/\text{m s}^{-1}$	k	$\bar{U}_{\text{whl}}/\text{m s}^{-1}$	$U_{\text{peak}}/\text{m s}^{-1}$	$U_{50\%}/\text{m s}^{-1}$	$U_{95\%}/\text{m s}^{-1}$	$U_{99\%}/\text{m s}^{-1}$	$U_{\text{max}}/\text{m s}^{-1}$	r
30 hPa	1月	9.26	10.32	1.67	9.22	5.98	8.29	19.90	25.75	26.06	0.96
		15.87	17.82	2.09	15.78	13.04	14.95	30.13	35.00	31.33	0.58
	4月	8.03	9.04	2.08	8.01	6.59	7.58	15.33	18.85	20.83	0.97
		21.34	23.63	3.73	21.33	21.73	21.42	31.72	35.00	32.56	0.81
	7月	5.83	6.40	1.38	5.85	2.53	4.91	14.15	19.31	21.16	0.97
		27.47	29.65	5.96	27.49	28.75	27.88	35.00	35.00	35.00	0.83
	10月	6.80	7.66	1.91	6.80	5.19	6.32	13.61	17.05	17.27	0.98
		25.20	27.73	4.43	25.28	26.18	25.53	35.00	35.00	34.94	0.79
50 hPa	1月	6.99	7.87	1.94	6.98	5.42	6.52	13.85	17.28	17.94	0.96
		14.67	16.32	2.78	14.53	13.91	14.31	24.21	28.25	26.97	0.84
	4月	7.71	8.69	1.95	7.70	6.01	7.20	15.24	19.00	19.79	0.96
		9.63	10.72	1.62	9.60	5.90	8.54	21.14	27.59	24.81	0.86
	7月	3.59	4.04	1.78	3.60	2.54	3.29	7.49	9.55	11.10	0.99
		18.66	20.95	2.94	18.69	18.19	18.50	30.43	35.00	34.74	0.80
	10月	4.92	5.54	1.84	4.92	3.61	4.54	10.06	12.71	15.12	0.99
		16.69	18.67	3.00	16.67	16.31	16.52	26.91	31.05	32.25	0.94
70 hPa	1月	4.66	5.23	1.71	4.67	3.12	4.22	9.95	12.80	17.34	0.99
		6.37	7.16	1.71	6.39	4.30	5.78	13.59	17.46	20.17	0.98
	4月	4.72	5.31	1.76	4.73	3.28	4.31	9.92	12.67	15.60	0.99
		7.05	7.92	1.69	7.07	4.65	6.37	15.16	19.55	23.85	0.96
	7月	5.12	5.78	1.86	5.13	3.81	4.74	10.44	13.15	15.48	0.99
		10.67	12.02	1.93	10.66	8.25	9.94	21.19	26.46	28.80	0.96
	10月	4.12	4.63	1.72	4.13	2.79	3.74	8.76	11.24	14.38	0.99
		8.08	9.10	1.88	8.08	6.07	7.49	16.34	20.54	22.11	0.97

注：阴影行代表 QBO 东风位相月，空白行代表 QBO 西风位相月，下划线表示未通过 K-S 检验。

4 结论

本文使用 ECMWF 提供的 ERA-Interim 再分析风场资料，对中国低纬上空平流层准零风层的时空分布特征进行研究。首先分析了低纬地区准零风层的季节性变化，该地区准零风层主要受到热带大气环流季节性变化和 QBO 的影响。然后筛选出适用于本文研究的最佳 QBO 指数，通过不同 QBO 位相的合成分析讨论了 QBO 对低纬地区准零风层的影响，最后对准零风层高概率带中两地的风速频率进行 Weibull 概率分布拟合，得到如下结论：

(1) 低纬地区准零风层主要集中在 70 至 30 hPa (约 17~25 km) 高度之间，主要出现在 10 月至次年 4 月间，高频带随高度降低而略微偏向赤道一方，夏季受较强的平流层东风气流影响，10°N 以北几乎没有准零风层的出现。

(2) QBO 是影响低纬地区准零风层的另一个重要因素，主要作用在 15°N 以南区域。

(3) 低纬地区准零风层高概率带可分为南北两

支。“北支”出现在每年 10 月至次年 4 月，12 月初至次年 4 月中纬度基本固定在 20°N 附近，30、50 hPa 高度出现的概率较高，且 QBO 东风位相期间出现概率更高，中心区能达到 90% 以上；“南支”明显受 QBO 的影响，只在西风位相期间出现，出现概率一般在 70% 以上，冬春季南北两支于 10°N 附近汇合，夏秋季则出现在 5°N 附近，覆盖范围较冬春季略小。

(4) Weibull 概率密度函数可以很好的用来拟合不同 QBO 位相下平流层低层逐月风场的风速频率分布，并且可以通过 Weibull 分布计算出不同的累积概率风速及其他特征风速，作为选取适宜平流层飞艇运行的低风速风场的依据。海口站 30~50 hPa 高度 11 月至 4 月平均风速为 5.2 m/s, $U_{95\%}$ 为 11.04 m/s；南沙站 50~70 hPa 高度，QBO 西风位相期间，50~70 hPa 上全年平均风速约为 5 m/s, 7~8 月 $U_{99\%}$ 低于 10 m/s，均适宜平流层飞艇的运行。特别是南沙站上空 70 hPa 具有较长时间的低风速窗口期，较宜进行长期驻空试验。

本文基于统计方法分析了低纬地区准零风层的主要时空分布特征，但是鉴于热带大气的复杂

性, 还存在其他可能造成准零风层分布异常的因素, 需要进一步研究。此外, 本文仅使用海口站和南沙站的风场资料进行 Weibull 概率分布的拟合, 后续还需进一步推广和深入研究。

参考文献 (References)

- Baldwin M P, Gray L J, Dunkerton T J, et al. 2001. The quasi-biennial oscillation [J]. *Rev. Geophys.*, 39 (2): 179–229, doi:10.1029/1999RG000073.
- Belmont A D, Dart D G, Nastrom G D. 1975. Variations of stratospheric zonal winds, 20–65 km, 1961–1971 [J]. *J. Appl. Meteor.*, 14 (4): 585–594, doi:10.1175/1520-0450(1975)014<0585:VOSZWK>2.0.CO;2.
- Brewer A W. 1949. Evidence for a world circulation provided by the measurements of helium and water vapour distribution in the stratosphere [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 75 (326): 351–363, doi:10.1002/qj.49707532603.
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137 (656): 553–597, doi:10.1002/qj.828.
- Flury T, Wu D L, Read W G. 2013. Variability in the speed of the Brewer-Dobson circulation as observed by Aura/MLS [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13 (9): 4563–4575, doi:10.5194/acp-13-4563-2013.
- 高志刚, 骆敬新, 刘克修, 等. 2015. ERA-Interim 再分析数据在中国沿海的质量评估 [J]. 海洋科学, 39 (5): 92–105. Gao Zhigang, Luo Jingxin, Liu Kexiu, et al. 2015. Evaluation of ERA-Interim reanalysis data along coast of China [J]. *Marine Sciences (in Chinese)*, 39 (5): 92–105.
- Haynes P H. 1998. The latitudinal structure of the quasi-biennial oscillation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124 (552): 2645–2670, doi:10.1002/qj.49712455206.
- 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.
- Iwasaki T, Hamada H, Miyazaki K. 2009. Comparisons of Brewer-Dobson circulations diagnosed from reanalyses [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87 (6): 997–1006, doi:10.2151/jmsj.87.997.
- 李慧, 孙宏斌, 张芳. 2014. 风电场风速分布模型研究综述 [J]. 电工电能新技术, 33 (8): 62–66. Li Hui, Sun Hongbin, Zhang Fang. 2014. Review on models of wind speed distribution in wind farms [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy (in Chinese)*, 33 (8): 62–66, doi:10.3969/j.issn.1003-3076.2014.08.012.
- 吕达仁, 孙宝来, 李立群. 2002. 零风层与我国首次高空气球停留试验[J]. 目标与环境特性研究, 22 (1): 45–51. Lü Daren, Sun Baolai, Li Liquan. 2002. Zero wind layer and the first dwell experiment of high-altitude balloon in China [J]. *Target Environment Feat (in Chinese)*, 22 (1): 45–51.
- Randel W J, Wu F, Vömel H, et al. 2006. Decreases in stratospheric water vapor after 2001: Links to changes in the tropical tropopause and the Brewer-Dobson circulation [J]. *J. Geophys. Res.*, 111 (D12): D12312, doi:10.1029/2005JD006744.
- 任荣彩, 吴国雄, Cai M, 等. 2014. 平流层一对流层相互作用研究进展: 等熵位涡理论的应用及青藏高原影响 [J]. 气象学报, 72 (5): 853–868. Ren Rongcai, Wu Guoxiong, Cai M, et al. 2014. Progress in research of stratosphere-troposphere interactions: Application of isentropic potential vorticity dynamics and the effects of the Tibetan Plateau [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 72 (5): 853–868, doi:10.11676/qxxb2014.076.
- Roney J A. 2007. Statistical wind analysis for near-space applications [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 69 (13): 1485–1501, doi:10.1016/j.jastp.2007.05.005.
- 陶梦初, 何金海, 刘毅. 2012. 平流层准零风层统计特征及准两年周期振荡对其影响分析 [J]. 气候与环境研究, 17 (1): 92–102. Tao Mengchu, He Jinhai, Liu Yi. 2012. Analysis of the Characteristics of the stratospheric quasi-zero wind layer and the effects of the quasi-biennial oscillation on it [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 17 (1): 92–102, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10087.
- Wais P. 2017. A review of Weibull functions in wind sector [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70: 1099–1107, doi:10.1016/j.rser.2016.12.014.
- 王彦广, 李健全, 李勇, 等. 2007. 近空间飞行器的特点及其应用前景 [J]. 航天器工程, 16 (1): 50–57. Wang Yanguang, Li Jianquan, Li Yong, et al. 2007. Characters and application prospects of near space flying vehicles [J]. *Spacecraft Engineering (in Chinese)*, 16 (1): 50–57, doi:10.3969/j.issn.1673-8748.2007.01.010.
- 肖存英, 胡雄, 龚建村, 等. 2008. 中国上空平流层准零风层的特征分析 [J]. 空间科学学报, 28 (3): 203–235. Xiao Cunying, Hu Xiong, Gong Jiancun, et al. 2008. Analysis of the characteristics of the stratospheric quasi-zero wind layer over China [J]. *Chinese Journal of Space Science (in Chinese)*, 28 (3): 203–235.
- 张健恺, 刘玮, 韩元元, 等. 2014. 平流层臭氧变化对对流层气候影响的研究进展 [J]. 干旱气象, 32 (5): 685–693. Zhang Jiankai, Liu Wei, Han Yuanyuan, et al. 2014. Progresses in influence of variations in stratospheric ozone on tropospheric climate [J]. *Journal of Arid Meteorology (in Chinese)*, 32 (5): 685–693, doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-05-0685.
- 张礼学, 王中伟. 2013. 平流层飞艇环境适应性评价模型 [J]. 航空学报, 33 (4): 719–726. Zhang Lixue, Wang Zhongwei. 2013. Environmental adaptability evaluation model for stratospheric airships [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica (in Chinese)*, 33 (4): 719–726, doi:10.7527/S1000-6893.2013.0131.
- 张玉李. 2015. 平流层冬—夏季节转换及多尺度动力过程的影响 [D]. 中国科学院大学博士学位论文, 1–111. Zhang Yuli. 2015. Stratospheric winter-to-summer seasonal transition and the influences of multi-scale dynamics [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- 郑彬, 施春华. 2015. 1979~2011 年热带对流层顶高度线性趋势变化的因子贡献及其年际变率成因探讨 [J]. 热带气象学报, 31 (3): 300–309. Zheng Bin, Shi Chunhua. 2015. Factors contributing to linear trends of the tropical tropopause height and causes of their interannual variability from 1979 to 2011 [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 31 (3): 300–309, doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2015.03.002.
- 周听家, 陈洪滨, 卞建春. 2011. 北半球平流层中低层纬向风季节转换及转换层特征的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 16 (5): 565–576. Zhou Xinjia, Chen Hongbin, Bian Jianchun. 2011. Analysis of the characteristics of zonal wind reverse layer in the lower and middle stratosphere of the Northern Hemisphere and its seasonal variation [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 16 (5): 565–576, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.05.03.