0254-6124/2022/42(3)-0383-13　*Chin. J. Space Sci.*　空间科学学报

HU Yaoyue, WANG Donghai, WU Zhenzhen, ZHANG Chunyan, ZENG Zhilin, WAN Yijing. Analysis of the Observational Characteristics of the Quasi-zero Wind Layer in the Near Space over China (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(3): 383–395. DOI:10.11728/cjss2022.03.210303022

中国区域临近空间准零风层的观测特征*

胡耀月[1,2]　王东海[1,3,4,5]　吴珍珍[1,4,5]
张春燕[1,4,5]　曾智琳[1,4,5]　万轶婧[1,4,5]

1(中山大学大气科学学院　珠海　519082)

2(民航西南空管局气象中心　成都　610202)

3(澳门海岸带生态环境国家野外科学观测研究站 澳门科技大学澳门环境研究院　澳门　999078)

4(南方海洋科学与工程广东省实验室　珠海　519082)

5(广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室　珠海　519082)

摘　要　准零风层（Quasi-zero Wind Layer）是指平流层下部风速较小的东西风转换层，是临近空间（20～100 km）开发利用的重要参考依据，也是当前临近空间飞行器浮空运行的研究热点。基于2010－2019年中国多个站点L波段探空资料，将中国分为5个区域（15°N－20°N，20°N－25°N，25°N－30°N，30°N－40°N，40°N－50°N），分析各区域准零风层的结构特点及其随纬度、季节的变化规律。根据实测风场分析发现平流层下部存在单层/双层准零风层，各区域的南北分布差异大致以25°N为界：单层准零风层主要出现在25°N以北的夏季；双层准零风层主要出现在25°N以南的10月至次年5月。单层/双层准零风层平均维持高度随纬度递增，且其厚度以双峰变化为主。此外，单层准零风层每月出现和维持天数均大于双层，30°N以北的单层准零风层在夏季的维持天数较其他区域长。

关键词　临近空间，准零风层，L波段探空，纬度变化，月变化

中图分类号　P356

Analysis of the Observational Characteristics of the Quasi-zero Wind Layer in the Near Space over China

HU Yaoyue[1,2]　WANG Donghai[1,3,4,5]　WU Zhenzhen[1,4,5]
ZHANG Chunyan[1,4,5]　ZENG Zhilin[1,4,5]　WAN Yijing[1,4,5]

1(*School of Atmosphere Sciences, Sun Yat-Sen University, Zhuhai* 519082)

2(*Meteorological Center of Southwest Air Traffic Management Bureau CAAC, Chengdu* 610202)

3(*National Observation and Research Station of Coastal Ecological Environments in Macao, Macao Environmental Research Institute, Macau University of Science and Technology, Macao SAR* 999078)

* 中国科学院战略性先导科技专项（A类）临近空间飞行器运行环境预报技术项目资助（XDA17010402）

2021-02-27收到原稿，2022-02-06收到修定稿

E-mail：huyy39@mail2.sysu.edu.cn

4(*Southern Marine Sciences and Engineering Guangdong Laboratory, Zhuhai* 519082)

5(*Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies, Zhuhai* 519082)

Abstract The Quasi-zero Wind Layer is a transition region with low zonal wind speed in the lower stratosphere, which is important reference for the development and utilization of the near space (20～100 km) and has been attracting worldwide interest. In this paper, the whole country (China) is divided into five regions (15°N－20°N, 20°N－25°N, 25°N－30°N, 30°N－40°N, and 40°N－50°N) based on the L-band radar soundings secondly data of stations from January 2010 to December 2019. The structural characteristics of the Quasi-zero Wind Layer in China and its variations with latitude and season are analyzed. The single/double Quasi-zero Wind Layer is defined according to the different observed wind fields from the data. Results show that the overall distribution of the single/double Quasi-zero Wind Layer in the five regions is generally different distinguished from the separating latitude of 25°N: The single Quasi-zero Wind Layer mainly appears in summer to the north of 25°N. The double Quasi-zero Wind Layer mainly appears to the south of 25°N from October to May of the next year. The average maintenance heights of the single/double Quasi-zero Wind Layer increase with the increasing latitude, and its thickness shows mainly bimodal variation. The occurrence and maintenance days of the single Quasi-zero Wind Layer are more than that of the double Quasi-zero Wind Layer , and the maintenance days in the north of 30°N are significantly prolonged.

Key words Near space, Quasi-zero wind layer, L-band radar sounding, Latitude variation, Monthly variation

0 引言

临近空间距离地面 20～100 km[1,2], 涵盖了大气圈层的平流层、中间层以及部分热层, 是低层大气与高层电离大气的航行交通枢纽。相较于低层大气和逸散层大气, 临近空间的物质组成、能量交换以及圈层相互作用极其复杂, 蕴藏着许多有待发现的科学规律和物理现象, 需要进一步深入研究[3,4]。目前临近空间环境探测主要通过高空气球/飞机、火箭、球载/地基探测等共同配合[5,6], 随着中高层大气科学探测能力的快速提升, 各国高度重视临近空间高新技术的发展, 例如美国航空航天局(NASA)和 Google 公司都顺利实现了高空气球在平流层底部的长航时飞行[7-9]。伴随临近空间开发应用的逐渐深入, 对相应的临近空间大气科学研究提出了迫切需求, 临近空间环境要素已成为空间技术发展的重要参考依据[10,11]。

平流层中下层风速为 0 的高度层[12,13], 是临近空间风场环境中的重要特征, 被看作是高空大气环流季节转换的标志[14,15], Lü等[16]把其称为准零风层(Quasi-zero Wind Layer)。由于其空间范围较大、持续时间较长, 临近空间浮空器可以较为稳定地驻留, 有利于开展各种临近空间的观测与试验[16,17], 可应用于高空气球/无人机、高速飞行器等领域。这些临空飞行器是高空装备体系的基础和关键, 并在高空环境探测、区域持续侦察、预警探测和通信服务等方面具有重要的科学应用价值。准零风层本质上是平流层中下层东西风的转换, 研究准零风层不仅有助于理解平流层大气环流的转变过程和季节更替的作用机理, 还可以为临近空间飞行器的高空活动提供重要环境参考[18], 从而在多个领域中充分挖掘临近空间的应用价值。

准零风层在冬季和初春分布于低纬度地区(30°N 以南), 在夏季和春末分布于中高纬地区[19](30°N 以北), 除地理位置、季节时间的影响, 准零风层还与平流层准两年振荡(Quasi-Biennial Oscillation, QBO)、平流层爆发性增温(Stratospheric Sudden Warming, SSW)相联系[20-24]。根据准零风层形成机制可将其分为两类[20]: 在热带地区受 QBO 位

相影响形成的准零风层被定义为第一类准零风层，QBO 是影响中低纬地区准零风层分布的主要因素[21]，当 QBO 处于东风位相时中低纬度地区还会出现双层零风层的现象[20]；中高纬度地区的风场主要受平流层大气环流系统的影响[23]，平流层在冬季表现为环极西风，在夏季表现为环极东风[24]，这种由于平流层环流季节转变带来温度梯度的逆转而形成的准零风层被定义为第二类准零风层。此外 SSW 爆发时，平流层高层环流发生异常变化，冬季平流层高层原本存在的西风环流区域产生了东风，在两者边缘交界处就会产生不易稳定维持的准零风层[22]。

由于难以获取长时间高层大气的实况观测，以往对准零风层的研究大都基于再分析资料，直接根据纬向风大小为零的风速带位置来研究准零风层的特点[19-22]。再分析数据是使用同化技术和数值模式对观测资料进行再次分析，其准确度和质量问题在不同地区会有差异[25]。而 L 波段探空数据具有高精度垂直分辨率，可以更准确地解析出高层大气的精细化垂直结构特征，大大增加了资料的准确度和可利用率[26,27]。已有研究结合单站 L 波段探空观测资料验证再分析资料和数值模拟结果的可靠性[21,28]，但并未基于大量探空资料统计出准零风层的观测特征。另外，目前的研究着重分析单层准零风层，并未对双层准零风层进行相关定义和深入讨论，关于准零风层的一些细致的空间特征也并未得到进一步量化，难以满足现有临近空间浮空器运行的核心需求。

本文基于中国地区秒量级的 L 波段观测资料，根据风场特征分别定义了两种不同类型的准零风层，通过分析两种准零风层的厚度/高度、出现/维持时间等特征，细致地讨论了中国两种准零风层的时空分布特征和变化规律，旨在对临近空间大气风场环境的结构和变化有更深入的认识，从而为临近空间飞行器运行环境、临近空间科学观测与试验提供气象支撑。

1 资料与方法

1.1 数据与资料

本文所使用的新一代 L 波段高空气象探测系统实现了时间分辨率达秒量级，观测时间分辨率可达 1.2 s[29]，探测高度可达 10 hPa，每个采集周期内可收集到气压、高度、温度、湿度、风向、风速、仰角、方位、斜距、经纬度方位等多种信息[28-30]，是目前高空高精度自动化探测的有效手段，大大提升了高空自动化气象探测的精度和时间密度[29,30]，在临近空间大气环境研究中具有重要的理论和实际价值。近年来很多科学研究广泛运用了高分辨率的探空资料[25-30]，体现了其非常重要的应用价值。例如 Zhang 等[25] 通过探空观测资料分析了中国高空风速的时间和空间特征，Yang 等[27] 使用垂直高分辨率探空资料进行建模，分析了大气边界层中近地面层的具体特征，Liang 等[29] 采用 L 波段探空观测分析了中国边界层高度的时空变化规律。

中国共有 121 个 L 波段探空站，除了青藏高原西部，其余地区站点分布较为均匀（见图 1）。本文所用资料为 2010 年 1 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日的 L 波段探空资料，包括每日两次常规观测（08:00—20:00 BLT），部分站点有加密观测时次（02:00—14:00 BLT）。在对探空记录进行质控和筛选时，为满足准零风层高度的计算要求，首先剔除最高观测高度不足 20 hPa 的观测记录、单个文件小于 2000 条的记录时次，其次根据大气相应平均高度层风速气候学界限值[31] 对各个气压层中异常的风速值、风切变值记为缺省，以及对异常的风切变进行判断[31]，可以按下列步骤计算出各层的判断系数：

$$X_{k,k+1}=\begin{cases}1, & |W_k-W_{k+1}|>20.6+\\ & \quad 0.275\,(W_k+W_{k+1})\,;\\ 0.5, & 16.5+0.22\,(W_k+W_{k+1})<\\ & \quad |W_k-W_{k+1}|<\\ & \quad 20.6+0.275\times(W_k+W_{k+1})\,;\\ 0, & |W_k-W_{k+1}|<\\ & \quad 16.5+0.22\,(W_k+W_{k+1})\,.\end{cases}\tag{1}$$

式中，W_k与W_{k+1}为第 k 层和第 k+1 层的风速[31]，以此计算出第 k 层与第 k+1 层相关判断系数$X_{k,k+1}$以及类似的第$k-1$ 层与第 k 层相关判断系数$X_{k-1,k}$。若 $X_{k-1,k}+X_{k,k+1}\geqslant 1.5$，将第 k 层的风速W_k 记为缺省。经过质控剔除了 3 个站点，缺失率分别为 92.6%、77.3%、63.6%，其中 2 个站点是由于大量观测记录不满足准零风层的高度计算需求而被剔除，总共选取 118 个站点数用于统计准零风层特征。

1.2 分析方法

准零风层在热带地区和热带外地区具有不同的形成机制、分布时间和高度范围[20]，忽略准零风层随



图 1 根据纬度分区的全国探空站点空间分布（不同颜色站点代表不同区域）

Fig. 1 Spatial distribution of sounding stations in China according to the latitude partition (Different color represents different region)

经度的变化[19]，根据其纬向变化的特征，本文将中国站点分为 5 个区域（见图 1）：15°N－20°N, 20°N－25°N, 25°N－30°N, 30°N－40°N, 40°N－50°N, 从而利用各区域内站点的准零风层平均特征来表现该纬度带的准零风层特点。

由于缺乏统一定义，准零风层尚未基于大量探空观测资料进行定量分析，以往的研究大多基于再分析资料[19-22,32]。本文基于前人的定义和研究，并参照实际观测数据，提出了在探空资料中单层准零风层的定义和计算方法，即高度（指位势高度，下同）位于 16 km 以上，连续出现纬向风风速不超过 4 $m\cdot s^{-1}$，经向风风速不超过 6 $m\cdot s^{-1}$ 的厚度层，上下层的纬向风方向相反，则认为该层为准零风层。双层准零风层是指在 1 次探空记录中出现了准零风层的中断，中断处上方风场条件再次满足准零风层条件。

此外，本文还定义了与准零风层相关的几个概念来描述其特征：考虑到探空资料垂直分辨率较高，将准零风层起始高度$H_{\rm start}$和准零风层结束高度$H_{\rm end}$之间的高度层每 50 m 划分为 1 层，将准零风层的发生概率P[21]定义为某天某高度层出现准零风层的总次数与该天该高度层 10 年内总观测记录的比值，显然在$H_{\rm start}$以上每 50 m 就有相应的概率值，计算公式为

$$P=\frac{N}{N_{\rm sum}}. \tag{2}$$

式中，N为某站该天某高度层准零风层出现的总次数，$N_{\rm sum}$为该站该天 10 年（2010－2019 年）总观测记录。定义$H_{\rm ave}$为准零风层的起始高度与结束高度之间的平均高度，即平均维持高度，计算公式为

$$H_{\rm ave}=(H_{\rm end}-H_{\rm start})/2+H_{\rm start}. \tag{3}$$

定义$H_{\rm thi}$为起始高度与结束高度之间的差值，即准零风层的厚度，其计算公式为

$$H_{\rm thi}=H_{\rm end}-H_{\rm start}. \tag{4}$$

准零风层每月出现天数是指在该月准零风层总

共存在的天数;每月维持天数是指在该月准零风层存在并且连续维持不间断的天数。图 2 为不同站点两次探测记录的风廓线,图 2(a)中只出现了单层准零风层,起始高度 H_{start}为 19.815 km,结束高度 H_{end}为

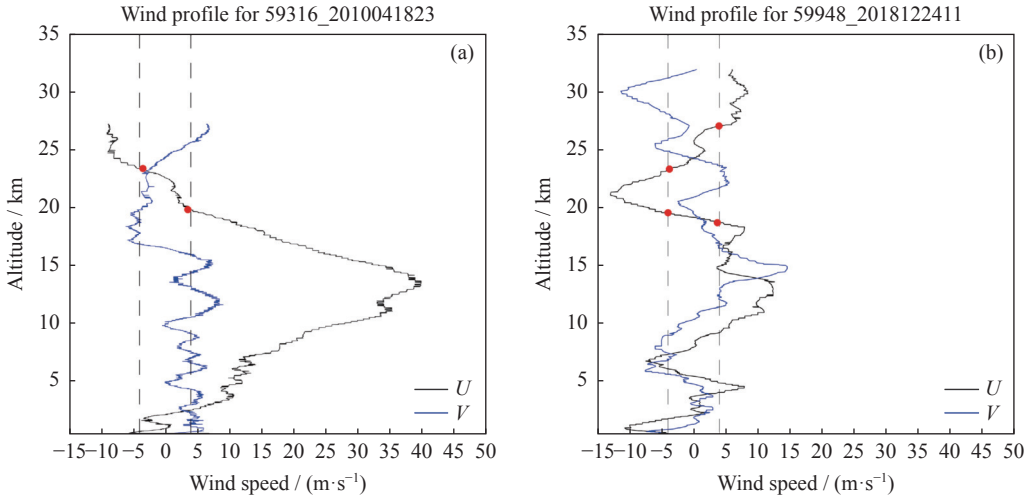


图 2　一次探空观测记录的风廓线 (黑色和蓝色实线表示纬向风和经向风，红点随高度递增依次表示准零风层的开始和结束高度)

Fig. 2　Wind profile for one record of sounding observation (black and blue full line represent zonal wind and meridional wind, respectively. The red dots increasing with the height indicate the beginning and ending height of the Quasi-zero wind layer in turn)

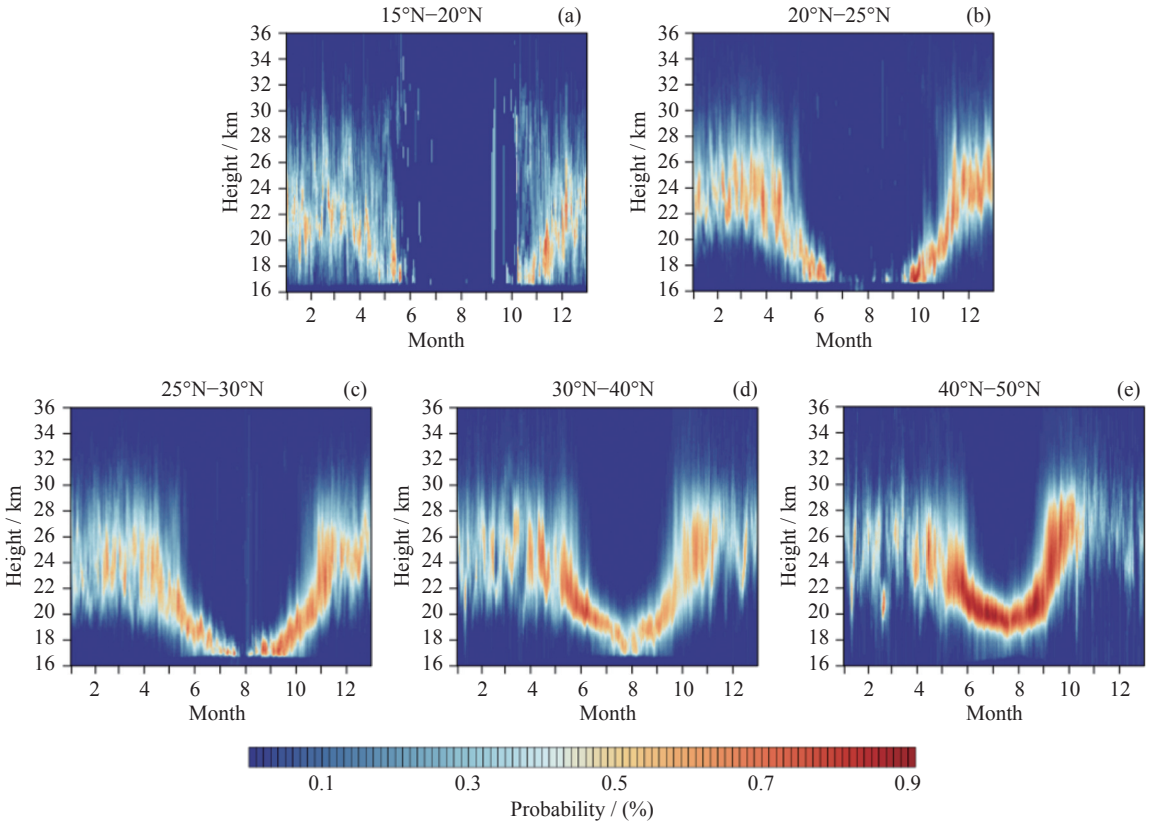


图 3　2010－2019 年平均单层准零风层出现概率高度–时间分布

Fig. 3　Height temporal sections of probability for existence of the single-layer QZWL averaged from 2010 to 2019

23.375 km。图 2(b)的风廓线存在双层准零风层，即1次观测记录中出现了两次准零风层的开始和两次准零风层的结束。第1层准零风层起始高度H_{start}为18.684 km，结束高度H_{end}为19.547 km，第2层准零风层起始高度H_{start2}为23.328 km，结束高度H_{end2}为27.06 km。

2 单层准零风层分布特征

2.1 单层准零风层总体分布

已有研究指出[19-22]准零风层的分布结构随纬度变化存在明显的季节差异。从图3不同区域单层准零风层逐日发生概率的高度–时间分布来看，准零风层分布结构可以大致分为三个时段，6－8月(夏季)、12月至次年2月(冬季)、3－5月及9－11月(季节转换期)。相较于季节转换期，单层准零风层分布结构在夏季和冬季更具纬度差异性。随着纬度递增，单层准零风层在夏季的发生概率逐渐变大，在冬季的发生概率逐渐变小，分布范围也逐渐缩小：图3(a)(b)所示15°N－25°N区域在夏季基本没有单层准零风层分布，高概率带(发生概率大于80%的区域)主要分布在10月至次年5月的18.4～22.8 km之间；25°N以北区域(见图3 c～e)单层准零风层高概率带都主要分布在夏季，高度范围为17～22.6 km，其中40°N－50°N区域(见图3 e)夏季准零风层结构最稳定，维持厚度和边界高度的逐月变化都较小，整体维持在19～21.9 km之间，最大发生概率为92.8%，极大值月份为7月，可见夏季为40°N－50°N区域的单层准零风层稳定维持期。Tao等[20,32]也认为准零风层存在冬季、夏季、过渡期三个状态，在10月底至次年4月初，准零风层主要在低纬度地区存在，而5月下旬至9月初，主要出现在中高纬度地区。

在冬季，北半球平流层西风气流占据主导，东风气流只存在于热带地区，此时在中高纬度地区几乎不存在大范围的东西风转换层，单层准零风层的分布也较零散，由图3(e)可知40°N－50°N地区冬季的单层准零风层分布时常间断，且发生概率远远低于其他区域，分布高度也没有特别集中。

从单层准零风层高概率带(发生概率大于60%的区域)的全年整体分布来看，15°N－40°N纬度区域(图3 a～d)准零风层发生高度大致呈V型分布：其分布高度在春季逐渐下降，到夏季下降到最小值，秋季又逐渐回升，直至完全过渡到冬季。40°N－50°N区域(图3 e)夏季单层准零风层逐月变化较小，发生高度呈U型分布。另外由于平流层环流转型存在区域差异[24]，导致不同纬度带的准零风层发生高度下降和上升的转折时间点不同：图3(a)所示15°N－20°N区域从3月开始下降，11月逐渐回升；图3(b)(c)所示20°N－30°N区域从4月开始下降，9月逐渐回升；图3(d)(e)所示30°N－50°N区域从5月开始下降，9月逐渐回升。5个分区的单层准零风层在两次过渡季节内的垂直分布范围都较为广泛，这是由于当平流层处于季节转换期时，风场也处于过渡期，西风急流和热带东风环流强度相当，风速较弱的区域范围相应扩大[21]，单层准零风层的分布范围也有所扩大，尤其表现在图3(d)(e)所示的中高纬度地区，秋季和春季

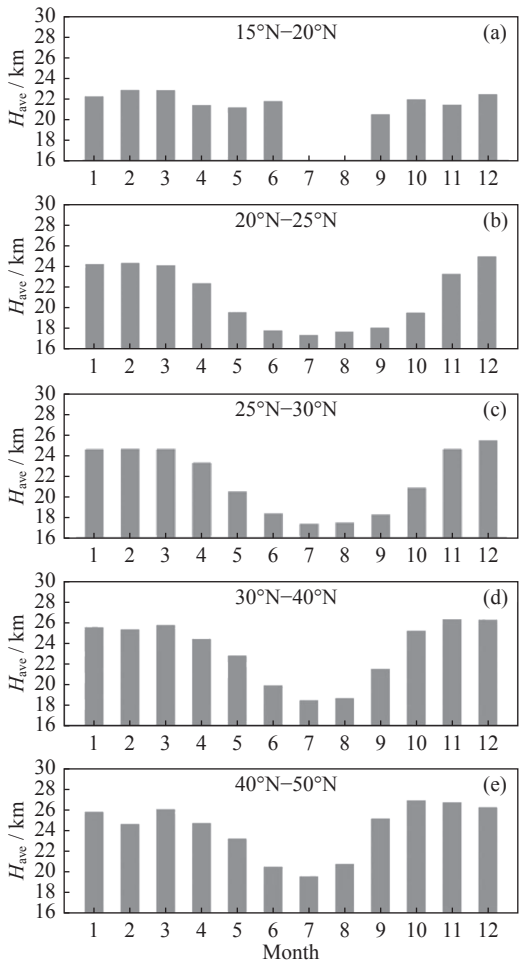


图4 2010－2019年单层准零风层平均维持高度逐月变化

Fig. 4 Annual variation of averaged height of the single-layer QZWL from 2010 to 2019

高概率带的下边界高度最低为 18.7 km, 上边界高度最高达 28.8 km。

2.2 单层准零风层平均维持高度变化

准确把握准零风层高度对于浮空器的定点、定区域长航时驻留试验具有重要意义[18], 且北半球准零风层高度存在季节变化, 夏季准零风层出现的高度更为稳定和集中, 更适合开展有关飞行试验[32]。由前述讨论可知, 单层准零风层在不同月份内, 发生概率和分布高度存在一定差异, 并随纬度变化明显。因此在讨论准零风层维持高度特征时, 需要同时关注纬度和季节的变化。以下利用探空观测资料对不同地区单层准零风层的H_{ave}逐月分布进行分析。

从图 4 可以看到, 不同纬度地区的单层准零风层维持高度的分布基本表现为以 20°N 为界的南北差异。15°N－20°N 区域(图 4 a)单层准零风层主要分布于 9 月至次年 6 月, 且逐月变化较小, 高度在 20.5～22.8 km 之间。其余 4 个分区(图 4 b～e)冬半年的单层准零风层维持高度比夏半年平均高 4.5 km, 从 4 月开始维持高度逐渐下降, 夏季下降至最小, 秋季逐渐回升, 这与前面分析的单层准零风层分布概率结构呈 V 型和呈 U 型趋势有很好的一致性。图 4(b)(c)所示 20°N－30°N 区域准零风层维持高度在 17.4～25.5 km 之间, 图 4(d)(e)所示 30°N－50°N 区域在 18.4～26.9 km 之间, 可见单层准零风层每月维持高

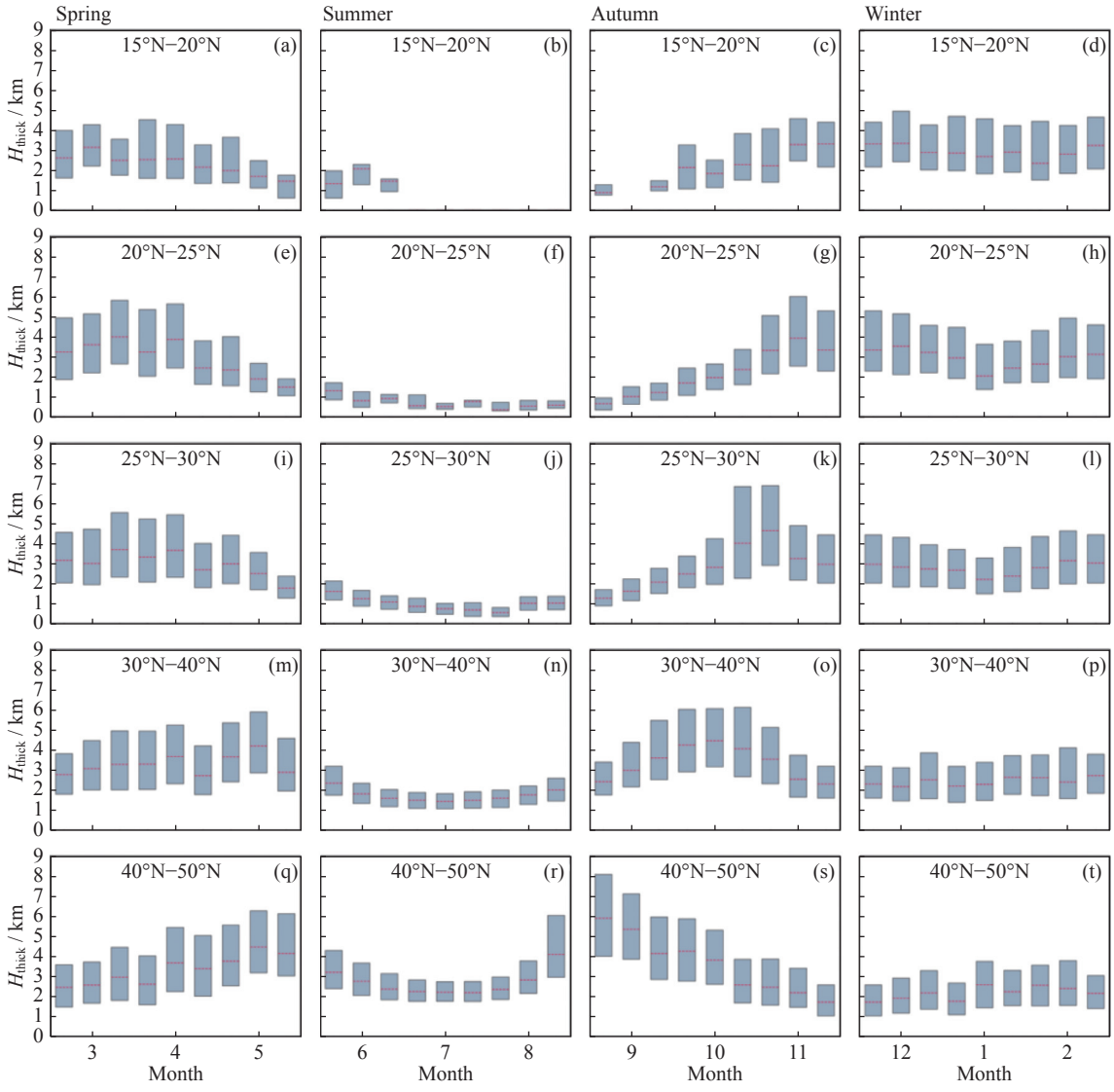


图 5 2010－2019 年单层准零风层厚度的季节变化

Fig. 5 Seasonal variation of thickness of the single-layer QZWL from 2010 to 2019

度随纬度递增相应升高。Liu 等[33] 在分析新疆地区平流层底部风场特征时，也发现与本文类似的空间变化特征：准零风层稳定高度的月变化呈现 U 型分布，5 月下旬至 7 月上旬处于下降期，7 月下旬至 9 月下旬处于上升期，虽选取的站点数与本文不同，但变化趋势与本文基本相符。

2.3 单层准零风层维持厚度变化

准零风层的时空分布特征对临近空间飞行器的飞行指标具有重要指示意义，其厚度对飞行过程的影响也不容忽略，特别是对于高质量的飞行试验来说，准零风层分布厚度的深厚可以为飞行高度范围提供有效保障。就这 5 个纬度带而言，各区域单层准零风层的厚度变化趋势与维持高度不完全一致，但同样季节和纬度变化差异显著。

图 5 为各区域单层准零风层逐月厚度的箱式分布：15°N－20°N 区域(图 5 a～d)50% 的样本厚度保持在 0.87～3.3 km 的范围内；20°N－25°N 区域(图 5 e～h)保持在 0.5～3.9 km 之间；25°N－30°N 区域(图 5 i～l)保持在 0.5～4.6 km 之间；30°N－40°N 区域(图 5 m～p)保持在 1.4～4.4 km 之间；40°N－50°N 区域(图 5 q～t)保持在 1.7～5.9 km 之间，可见单层准零风层厚度和变化幅度随着纬度递增。整体来看，图 5(e)～(t)所示 20°N－50°N 区域准零风层厚度的季节分布呈双峰变化趋势，峰值位于春季和秋季，如图 5(e)(i)(m)(q)和图 5(g)(k)(o)(s)所示；季节过渡期厚度的变化幅度大于冬季和夏季，其上四分位和下四分位相差较大，平均为 3.7 km，这与前述讨论中单层准零风层在季节过渡期的垂直分布范围广泛吻合。15°N－20°N区域(图 5 a～d)准零风层主要分布在 10 月至次年 5 月，其厚度没有显著的季节变化，各月厚度的上四分位和下四分位相差不大，平均为 2.8 km，这与其维持高度的变化保持一致。此外，单层准零风层的厚度在夏季随纬度增大而增大，冬季则随纬度增大而减小。例如 15°N－20°N 区域(图 5 b)的准零风层在夏季分布极少，其厚度也较薄，平均为 0.5 km，但在冬季平均维持在 2.9 km 左右；而 40°N－50°N 区域(图 5 r)夏季厚度平均在 2.7 km 左右，冬季在 2.1 km 左右。

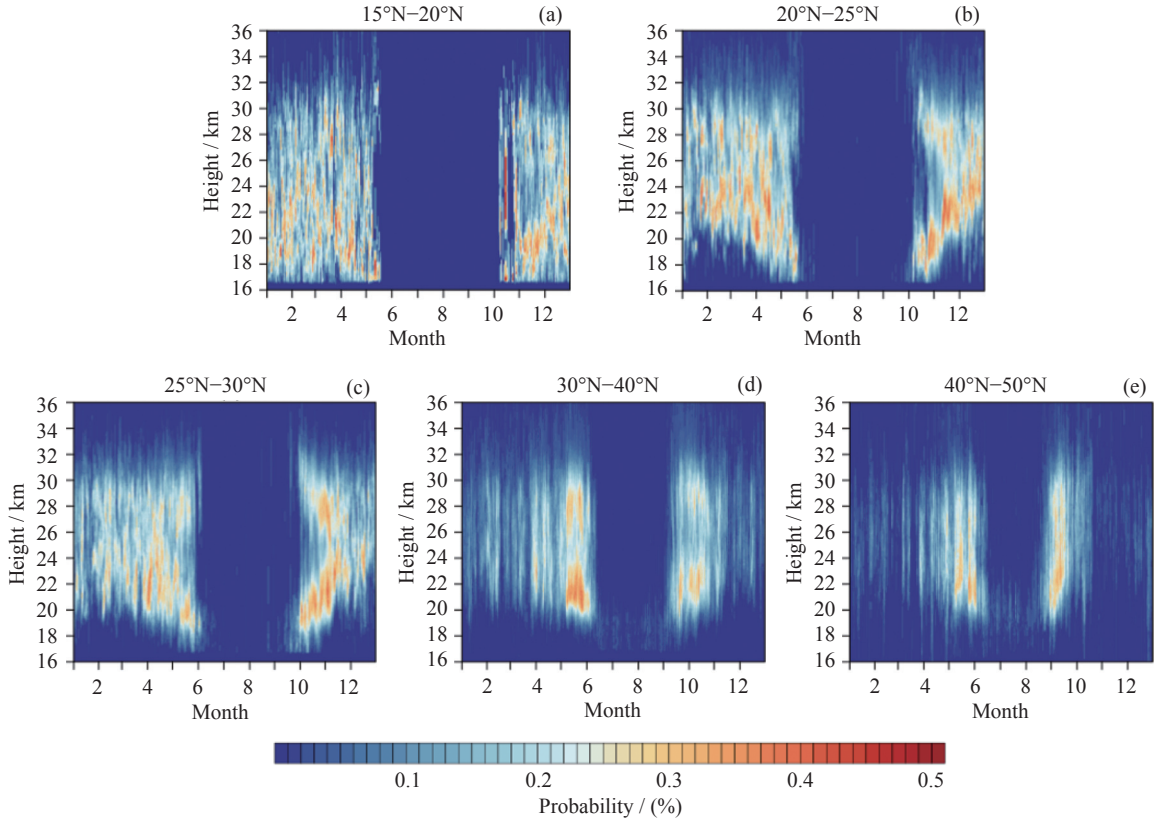


图 6 2010－2019 年多年平均双层准零风层出现概率高度–时间分布

Fig. 6 Height temporal sections of probability for existence of the double-layer QZWL from 2010 to 2019

3 双层准零风层分布特征

3.1 双层准零风层总体分布

通常在 QBO 东风位相年, 低纬度地区存在双层准零风层[20], 本节拟探究其分布特征和变化规律, 首先从发生概率入手, 讨论其分布的时间和空间范围。

根据图 6 可以看出双层准零风层的发生概率明显小于单层, 发生时间和高度范围也存在明显的纬度差异和季节变化。25°N 以南(图 6 ab)为双层准零风层的主要分布纬度, 主要分布时间为 10 月至次年 5 月, 主要高度范围(发生概率大于平均概率的时间内, 其双层准零风层的高度范围)为 16.8～32 km; 25°N 以北区域(图 6 c～e)在夏季虽存在双层准零风层, 但发生概率极小, 10 月至次年 5 月的发生概率和分布范围较 25°N 以南也明显减小。可见双层准零风层整体分布范围和发生概率随纬度增大而减小。

低纬地区的双层准零风层发生概率在夏半年和冬半年明显不同, 这是 QBO 位相在不同季节的影响造成的。Tao 等[20] 通过对典型 QBO 年的合成分析发现, 在冬季当 QBO 处于西风位相时, 低纬地区较容易出现单层准零风层, 当 QBO 处于东风位相时, 低纬地区较容易出现双层准零风层, 此时准零风层的结构一般表现为两层西风包裹一层东风。而在夏季, Tao [32] 指出, QBO 不论是处于西风位相还是东风位相, 低纬很少出现双层准零风层。由于 QBO 是发生于赤道地区的环流现象, 因而低纬度地区双层准零风层出现概率明显大于中高纬度地区。

此外, 各区域双层准零风层分布时间不同于单层, 双层准零风层在低纬度地区主要分布于冬半年, 中高纬度地区主要分布于季节转换期, 发生概率的极大值随纬度增大反而减小: 15°N－20°N 区域(图 6 a)最大发生概率为 50%, 极大值月份为 5 月和 11 月; 20°N－25°N 区域(图 6 b)为 44.2%, 极大值月份为 11 月; 25°N－30°N 区域(图 6 c)为 43.9%, 极大值月份为 11 月; 30°N－40°N 区域(图 6 d)为 39.3%, 极大值月份为 5 月; 40°N－50°N 区域(图 6 e)为 35.9%, 极大值月为 5 月和 9 月。

3.2 双层准零风层平均维持高度变化

双层准零风层中的第一层和第二层维持高度变化趋势较为同步, 除 15°N－20°N 区域(图 7 a)的第二层平均维持高度是夏半年稍大于冬半年以外, 其余分区双层的平均维持高度在冬半年都明显大于夏半年, 这与单层准零风层维持高度的逐月变化趋势保持一致。30°N 以南区域(图 7 a～c)的双层准零分层主要分布于 10 月至次年 5 月, 其中第一层准零风层的维持高度在 18.1～23.2 km, 第二层在 24.6～28.4 km。30°N－40°N 区域(图 7 d)第一层高度范围在 17.9～24 km, 第二层在 19.7～28.6 km; 40°N－50°N 区域(图 7 e)第一层高度范围在 19.1～24.8 km, 第二层在 22.8～28.34 km。可见随着纬度增大, 双层准零风层维持高度有所升高。

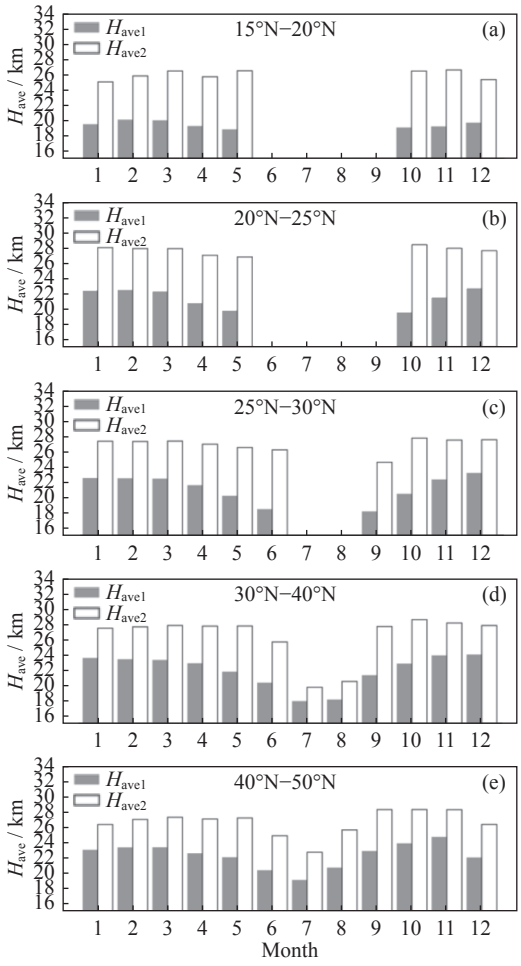


图 7 2010－2019 年双层准零风层平均维持高度逐月变化

Fig. 7 Annual variation of average height of the double-layer QZWL from 2010 to 2019

3.3 双层准零风层维持厚度变化

双层准零风层的厚度分为两层, 从季节变化形势上来看, 15°N－25°N 区域(图 8 a～h)在夏季几乎没有双层准零风层的分布, 在其他季节内的波动较小,

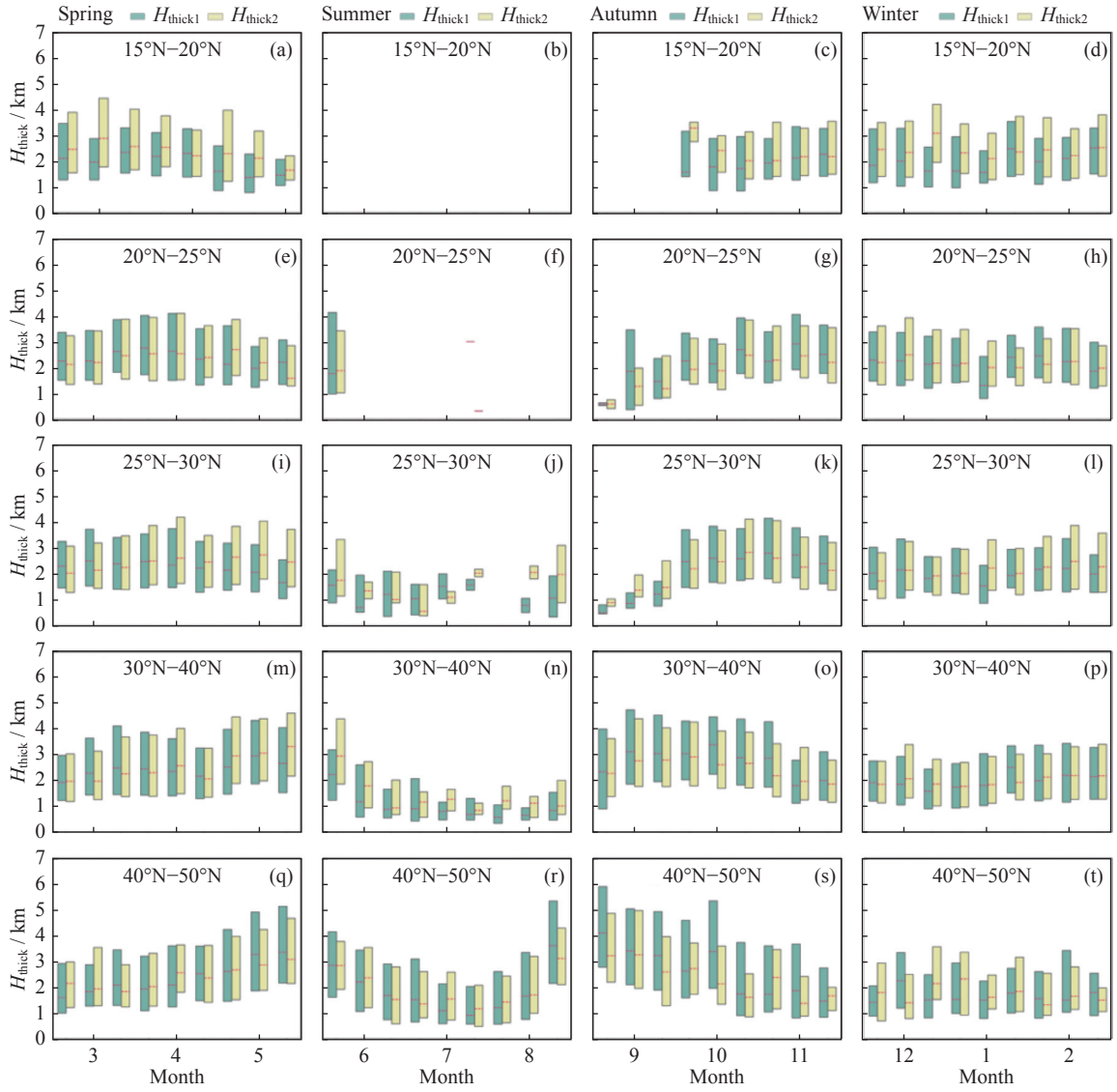


图 8 2010−2019 年双层准零风层厚度季节变化

Fig. 8 Seasonal variation of thickness of the double-layer QZWL from 2010 to 2019

而 25°N−50°N 区域(图 8 i～t)双层准零风层厚度的季节分布呈双峰变化,峰值位于春季和秋季,如图 8(i)(m)(q)和图 8(k)(o)(s)所示,这与单层准零风层厚度的季节变化趋势保持一致。另外,这 5 个分区双层准零风层厚度在冬季的变化幅度最小,第一层和第二层厚度的上四分位和下四分位平均相差为 1.8 km 和 1.9 km。

就第一层而言,15°N−20°N 区域(图 8 a～d)50% 的样本厚度保持在 1.3～2.5 km 的范围内,20°N−30°N 区域(图 8 e～l)在 0.6～3 km 之间,30°N−40°N 区域(图 8 m～p)在 0.6～3.4 km 之间,40°N−50°N 区域(图 8 q～t)在 0.9～4.1 km 之间。第二层厚度与第一层厚度相差不大,总体上双层准零风层的厚度随着纬度增大而增大。

4 两种准零风层维持时间

4.1 准零风层出现天数变化

准零风层结构存在与否,直接影响到能否运行临近空间飞行器,因此研究两种准零风层的出现时间十分必要。图 9 为 5 个区域两种准零风层每月出现天数的分布,可以看到在 10 月至次年 5 月,两种准零风层都集中出现在 30°N 以南(图 9 a～c),单层准零风层平均出现 16 天,双层为 7 天;6−9 月单层准零风层

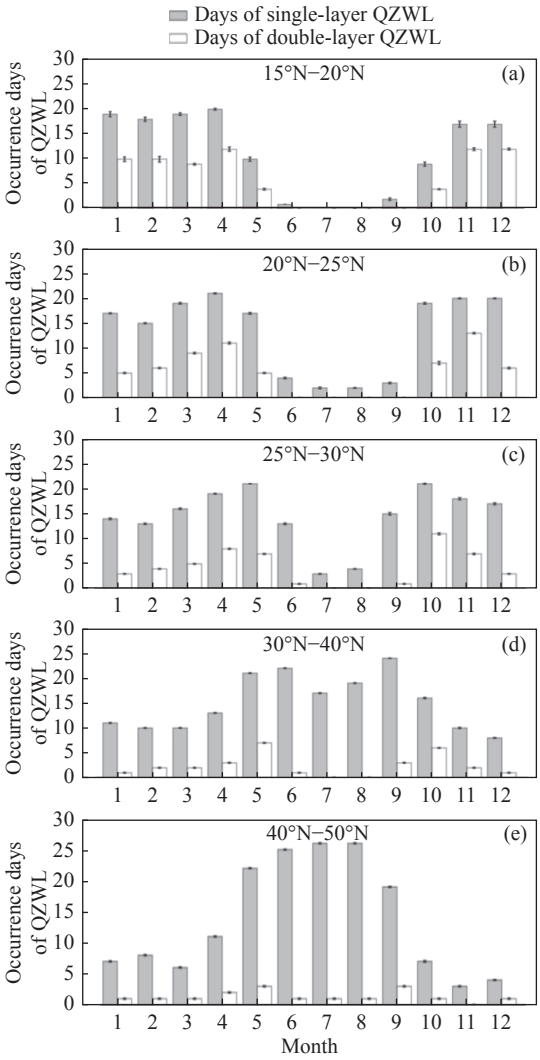


图 9 2010－2019 年多年平均的单层/双层准零风层出现天数逐月变化

Fig. 9 Annual variation of occurrence days of the single/double-layer QZWL from 2010 to 2019

集中出现在 30°N 以北，如图 9(d)(e)所示，平均 22 天，而双层准零风层在该区域出现时间较短。从变化趋势上看，图 9(b)(c)所示 20°N－40°N 地区基本保持一致，但峰值的大小和时间点不同，最小值都在夏季出现：20°N－25°N(图 9 b)单层/双层准零风层最大峰值分别为 21 和 13 天，出现在 4 月和 11 月；25°N－30°N(图 9 c)单层准零风层最大峰值为 21 天，出现在 5 月和 10 月，双层准零风层最大峰值为 11 天，出现在 10 月；30°N－40°N(图 9 d)单层准零风层最大峰值为 24 天，出现在 9 月。40°N－50°N 区域(图 9 e)单层准零风层出现天数分布呈现单峰结构，

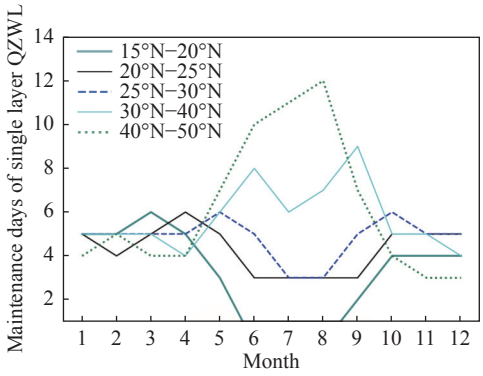


图 10 2010－2019 年多年平均的单层准零风层维持天数逐月变化

Fig. 10 Annual variation of maintenance days of the single layer QZWL from 2010 to 2019

峰值 26 天，出现于 7 月和 8 月，对应前述讨论中的夏季稳定维持期(图 3 e)。

4.2 准零风层维持天数变化

长航时飞行驻留是临近空间飞行器发展的必然趋势，也是目前研究热点。Bellemare[34] 等为改善气球在高空飞行中的驻留时间，通过强化学习(Reinforcement Learning, RL)让气球在平流层停留数周。Google 公司在 Project Loon 计划[8-9] 中也使用 RL 控制器预判高空中的风速风向，借此控制气球的高度和走向，使气球在平流层的飞行时间更长、消耗的能量更少。临近空间飞行试验往往持续数天乃至数月，如果中途经常出现准零风层中断和结束，将难以满足驻留试验需求，因此继续讨论准零风层的维持天数。

图 10 为各分区单层准零风层平均维持天数逐月分布，随着纬度递增，单层准零风层在夏季的维持时间越持久，南北差异以 30°N 为界。30°N 以北地区在夏半年的维持时间大于冬半年，而 30°N 以南变化相反。15°N－20°N 区域在夏季没有单层准零风层的维持，在其他月份内维持天数为 3～6 天；20°N－30°N 区域在夏季维持天数为 3～5 天，在 7 至 8 月有明显下降趋势，在 9 月至次年 5 月的维持天数为 4～6 天。30°N 以北地区在夏季维持时间明显延长，30°N－40°N 地区分布趋势呈现双峰结构，峰值为 9 天，在 9 月出现；40°N－50°N 地区呈现单峰结构，峰值为 12 天，在 8 月出现。Chen[21] 提出在 35°N－50°N 区域，东风中断的时间远远小于低纬度地区，而准零风层的出现与东风期有很好的对应关系[14]，因此

35°N－50°N 区域的准零风层连续出现的时间最长，这与本文的结果保持一致。经过计算分析双层准零风层主要在低纬度 15°N－20°N 出现，且维持天数不超过 2 天。

5 讨论与结论

基于 2010－2019 年中国 118 个站点的 L 波段探空资料，对准零风层进行定义与分析，根据实测风场特征发现平流层下部存在单层和双层的准零风层。将中国分为 5 个纬度区域：15°N－20°N, 20°N－25°N, 25°N－30°N, 30°N－40°N, 40°N－50°N，统计不同区域内两种准零风层的发生概率、维持高度/厚度、出现/维持天数，两种准零风层分布均表现为随纬度和季节的变化特征，结论如下。

（1）5 个分区单层/双层准零风层总体分布表现为以 25°N 为界的南北差异：单层准零风层主要分布于 25°N 以北区域的夏季，分布高度范围为 17～22.6 km；双层准零风层主要分布于 25°N 以南区域的 10 月至次年 5 月，分布高度范围为 16.8～32 km。

（2）5 个分区单层/双层准零风层平均维持高度随纬度递增，20°N－50°N 区域两种准零风层维持高度在冬半年都明显大于夏半年。就单层准零风层厚度而言，20°N－50°N 区域在全年呈双峰变化，峰值位于春季和秋季。就双层厚度而言，25°N－50°N 区域的季节变化趋势与单层保持一致。

（3）单层准零风层每月出现天数大于双层，且单层出现天数随纬度递增，双层反之。单层准零风层集中出现在中高纬度地区的 6－9 月，平均 22 天；双层准零风层集中出现在低纬度地区的 10 月至次年 5 月，平均 7 天。

（4）单层准零风层每月维持天数表现为以 30°N 为界的南北差异，主要体现在夏季：30°N 以南地区在夏季维持天数不超过 5 天，30°N 以北地区维持时间明显延长。

本文采用高精度垂直分辨率的探空观测资料，在给出两种准零风层定义的基础上统计了其在中国的时空分布特征。但目前尚没有基于探空观测准零风层的明确定义，特别是双层准零风层的定义还有待进一步探讨。此外，本文分析准零风层侧重于季节变化，而双层准零风层受到热带准两年振荡的影响，其形成机理分析和年际变化规律有待进一步深入研究。

参考文献

[1] YOUNG M, KEITH L S, PANCOTTI A. An overview of advanced concepts for near-space systems[C]//Proceeding of the 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit Denver, Colorado: AIAA, 2009

[2] XIAO Cunying. Research on the Dynamics of Atmosphere in the Near Space[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2009 (肖存英. 临近空间大气动力学特性研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009)

[3] CHEN Fenggui, CHEN Guangming, LIU Kehua. Analysis of near space environment and its effect[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2013, **10**(4): 71-75, 85 (陈凤贵, 陈光明, 刘克华. 临近空间环境及其影响分析[J]. 装备环境工程, 2013, **10**(4): 71-75, 85)

[4] BATTEN E S. Wind systems in the mesosphere and lower ionosphere[J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1961, **18**(3): 283-291

[5] LÜ Daren, CHEN Zeyu, GUO Xia, *et al*. Recent progress in near space atmospheric environment study[J]. *Advances in Mechanics*, 2009, **39**(6): 674-682 (吕达仁, 陈泽宇, 郭霞, 等. 临近空间大气环境研究现状[J]. 力学进展, 2009, **39**(6): 674-682)

[6] CHEN Hongbin. An overview of the space-based observations for upper atmospheric research[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, **24**(3): 229-241 (陈洪滨. 中高层大气研究的空间探测[J]. 地球科学进展, 2009, **24**(3): 229-241)

[7] FAIRBROTHER D A, PIERCE D. NASA balloon program status[C]//Proceeding of the AIAA Balloon Systems Conference. Seattle, Washington: AIAA, 2009: 1-5

[8] CATHEY H M JR. The NASA super pressure balloon-A path to flight[J]. *Advances in Space Research*, 2009, **44**(1): 23-38

[9] Aarti Upasna. Review on project loon[J]. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2017, **5**(3): 1-6

[10] YANG X X, LIU D N. Renewable power system simulation and endurance analysis for stratospheric airships[J]. *Renewable Energy*, 2017, **113**: 1070-1076

[11] LIU Yuanyuan, WU Wei, ZHANG Jing, *et al*. An introduction to atmospheric environment characteristics and detection technology in near space[C]//Proceedings of the 30th Annual meeting of Chinese Meteorological Society. Beijing, 2013: 1-5 (刘园园, 吴维, 张静, 等. 临近空间大气环境特性及探测技术概论[C]//第30届中国气象学会年会论文集. 北京, 2013: 1-5)

[12] BELMONT A D, DARTT D G, NASTROM G D. Variations of stratospheric zonal winds, 20～65 km, 1961-1971[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1975, **14**(4): 585-594

[13] BELMONT A D, DARTT D G. The variability of tropical stratospheric winds[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1970, **75**(15): 3133-3145

[14] ZHOU Xijia, CHEN Hongbin, BIAN Jianchun. 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*, 2011, **16**(5): 565-576 (周昕家, 陈洪滨, 卞建春. 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, 2011, **16**(5): 565-576)

[15] ZHANG Y L, LIU Y, LIU C X. Dynamic seasonal transition from winter to summer in the northern hemisphere stratosphere[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2014, **7**(3): 180-185

[16] LÜ Daren, SUN Baolai, LI Liqun. Zero wind layer and first dwell experiment of high-altitude Ballon in China[J]. *Target Environmental Feat*, 2002, **22**(1): 45-51 (吕达仁, 孙宝来, 李立群. 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, 2002, **22**(1): 45-51)

[17] RONEY J A. Statistical wind analysis for near-space applications[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2007, **69**(13): 1485-1501

[18] YAN Feng, YANG Yanchu, LU Ying, *et al*. Meteorological service and support system for near space long endurance aerostat[C]//Proceedings of the 4th Annual Academic Conference on High-resolution Earth Observation. Wuhan, 2017: 1-14 (闫峰, 杨燕初, 卢莹, 等. 临近空间长航时浮空器气象服务与保障系统研究[C]//第四届高分辨率对地观测学术年会论文集. 武汉, 2017: 1-14)

[19] XIAO Cunying, HU Xiong, GONG Jiancun, *et al*. Analysis of the characteristics of the stratospheric Quasi-zero Wind Layer over China[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2008, **28**(3): 230-235 (肖存英, 胡雄, 龚建村, 等. 中国上空平流层准零风层的特征分析[J]. 空间科学学报, 2008, **28**(3): 230-235)

[20] TAO Mengchu, HE Jinhai, LIU Yi. 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*, 2012, **17**(1): 92-102 (陶梦初, 何金海, 刘毅. 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, 2012, **17**(1): 92-102)

[21] CHEN Baiqing. Characteristics of Spatial-Temporal Distribution of the Stratospheric Quasi-Zero Wind Layer in China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2018 (陈柏青. 中国上空平流层准零风层时空分布特征分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018)

[22] LIN Haitao. The Discussion of the Influence of QBO and SSW over Quasi-zero Wind Layers[D]. Kunming: Yunnan University, 2017 (林海涛. QBO及SSW对准零风层分布的影响探究[D]. 昆明: 云南大学, 2017)

[23] BLACK R X, MCDANIEL B A. Interannual variability in the southern hemisphere circulation organized by stratospheric final warming events[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, **64**(8): 2968-2974

[24] ZHANG Ling, LI Weijing, CHEN Lijuan. The basic climatic features of stratospheric circulation transition in northern hemisphere[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2011, **22**(4): 411-420 (张灵, 李维京, 陈丽娟. 北半球平流层大气环流转型的基本气候特征[J]. 应用气象学报, 2011, **22**(4): 411-420)

[25] REN Guoyu, ZHANG Aiying, WANG Ying, *et al*. Climatology of upper wind speeds over China[J]. *Geographical Research*, 2009, **28**(6): 1583-1592 (任国玉, 张爱英, 王颖, 等. 我国高空风速的气候学特征[J]. 地理研究, 2009, **28**(6): 1583-1592)

[26] WANG Hong, CAO Yunchang, XIAO Wenan. Comparison between the COSMIC and the L-band radiosonde data[J]. *Meteorological Monthly*, 2010, **36**(9): 14-20 (王洪, 曹云昌, 肖稳安. COSMIC掩星数据与L波段探空数据的对比分析[J]. 气象, 2010, **36**(9): 14-20)

[27] YANG Xiangqing, XU Xiangde, CHEN Hongyao, *et al*. The analysis and correlation model of the surface layer information in L-band radiosonde high resolution profile[J]. *Meteorological Monthly*, 2011, **37**(12): 1504-1510 (杨湘婧, 徐祥德, 陈宏尧, 等. L波段探空高分辨率廓线中近地层信息分析及相关模型[J]. 气象, 2011, **37**(12): 1504-1510)

[28] YANG R, RAN L K, ZHANG Y L, *et al*. Analysis and simulation of the stratospheric quasi-zero wind layer over Korla, Xinjiang province, China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, **36**(10): 1143-1155

[29] LIANG Zhihao, WANG Donghai, LIANG Zhaoming. Spatio-temporal characteristics of boundary layer height derived from soundings[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2020, **31**(4): 447-459 (梁智豪, 王东海, 梁钊明. 探空观测的边界层高度时空变化特征[J]. 应用气象学报, 2020, **31**(4): 447-459)

[30] HAO Ming, TIAN Weihong, GONG Jiandong. Study of L-band second-level radiosonde data applied in GRAPES assimilation system[J]. *Meteorological Monthly*, 2014, **40**(2): 158-165 (郝民, 田伟红, 龚建东. L波段秒级探空资料在GRAPES同化系统中的应用研究[J]. 气象, 2014, **40**(2): 158-165)

[31] WANG Yuting. Characteristics of the Atmospheric Boundary Layer Height in China and a Large Eddy Simulation of Hurricane[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017 (王雨婷. 中国大气边界层高度特征研究及一次飓风大涡模拟试验[D]. 杭州: 浙江大学, 2017)

[32] TAO Mengchu. Characteristics of Zonal Wind in Lower Stratosphere and Diagnosis of a Special Category of Stratospheric Sudden Warming Events[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2011 (陶梦初. 北半球平流层中下层风场特征统计和一类特殊SSW事件的动力学诊断分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011)

[33] LIU Jie, CHEN Jiangyun, WU Sijiang, *et al*. Research on the variation characteristics of wind field environment on the bottom of stratosphere in Xinjiang region[C]//Proceedings of the 4th Annual Academic Conference on High-resolution Earth Observation. Wuhan, 2017: 1-18 (刘杰, 陈江云, 吴思江, 等. 新疆地区平流层底层风场环境变化特征及规律研究[C]//第四届高分辨率对地观测学术年会. 武汉, 2017: 1-18)

[34] BELLEMARE M G, CANDIDO S, CASTRO P S, *et al*. Autonomous navigation of stratospheric balloons using reinforcement learning[J]. *Nature*, 2020, **588**(7836): 77-82

(责任编辑: 孙伟英)