

吕达仁, 陈泽宇, 卞建春, 等. 平流层-对流层相互作用的多尺度过程特征及其与天气气候关系——研究进展. 大气科学, 2008, 32 (4): 782~793
Lü Daren, Chen Zeyu, Bian Jianchun, et al. Advances in researches on the characteristics of multi-scale processes of interactions between the stratosphere and the troposphere and its relations with weather and climate. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, 32 (4): 782~793

平流层-对流层相互作用的多尺度过程特征及其与天气气候关系——研究进展

吕达仁 陈泽宇 卞建春 陈洪滨

中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室, 北京 100029

摘 要 在过去 5 年中, 在国家自然科学基金委员会和中国科学院的项目支持下, 针对以大气上下层相互作用中的多时空尺度过程特征及其与天气气候的关系为主要关注内容, 开展了几个方面的研究。本文介绍其中的一些主要进展与结果, 包括: (1) 平流层臭氧的探测与分析研究; (2) 平流层-对流层质量交换 (STME) 与对流层顶特征研究; (3) 中层大气多尺度波动特征研究; (4) 大气辐射传输和 中层大气卫星临边遥感新方法研究。

关键词 大气上下层相互 臭氧 平流层-对流层交换 重力波 大气潮汐 临边遥感

文章编号 1006-9895 (2008) 04-0782-12 **中图分类号** P403 **文献标识码** A

Advances in Researches on the Characteristics of Multi-Scale Processes of Interactions between the Stratosphere and the Troposphere and Its Relations with Weather and Climate

LÜ Daren, CHEN Zeyu, BIAN Jianchun, and CHEN Hongbin

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract In the past five years, funded by the National Natural Science Foundation of China and the Chinese Academy of Sciences, the investigations of the characteristics of the multi-scale processes and the relationship between the processes and weather and climate were conducted in the context regarding the interactions between atmospheric layers. This paper summaries the major results and the advancements in the key research aspects: 1) sounding and analyzing the stratospheric ozone, 2) estimating the mass exchange between the stratosphere and the troposphere (STME) and the features of the tropopause, 3) investigating the characteristics of the multi-scale atmospheric waves in the middle atmosphere, and 4) developing new schemes for the calculation of radiative transfer and the retrieval of middle atmospheric parameters using satellite limb soundings.

Key words interaction between the upper and lower atmosphere, ozone, stratosphere/troposphere exchange, gravity waves, atmospheric tides, limb sounding

1 引言

大气上下层相互作用, 首先是平流层和对流层

之间的相互作用, 一直是大气科学界关注的前沿, 并有一系列国际学术研究计划倡导与组织在这方面的多角度多方面的研究, 例如, 世界气候研究计划

(WCRP) 下属的“平流层过程及其在气候中的作用 (SPARC)”、国际日地物理委员会 (SCOSTEP) 所建立的研究项目“太阳-地球系统的气候和天气 (CAWSES)”, 以及重点关注日地空间但也同样关注大气层过程的“国际与日同在 (Int'l Living With a Star, ILWS) 计划”等。从全球气候与环境变化的深入理解与预测来看, 平流层及更高层大气会在动力、物理与化学过程等多方面均通过上下层耦合而影响下层的天气气候以及臭氧浓度等大气环境, 同样平流层及以上大气的过程特征与整体表现也极大地受制于来自地表与对流层过程的动力、物理和化学成分的驱动与输送作用。值得强调的是, 大气上下层相互作用过程还表现出大气上边界即以太阳辐射和太阳活动性变化作用和其下边界, 即海陆地表和人类活动这两个外源的作用。越来越多的研究结果和新的观测表明这类相互作用对天气气候变化和全球环境有重大影响, 同样也对上层大气中的空间天气气候有重要作用。作为大气上下层相互作用的主要区域中层大气本身由于人类活动能力的增强和活动范围的扩展, 这一大气层已经成为人类高技术活动的一个新舞台, 被高技术应用界称为“临近空间 (near space)”。从这个意义上说, 中层大气天气气候本身也成为人类直接需要关注的对象。

与国际相比, 我国在这方面的研究相对薄弱。发生于东亚上空的平流层-对流层大气相互作用究竟如何表现, 它与全球尺度上的相互作用具有什么样的特点和重要性, 这些相互作用与天气气候的关系如何。这些问题需要我们从多个方面来分析研究, 其中在探测上的薄弱环节还需要我们去加强, 以获得真实认识。

在国家自然科学基金委员会和中国科学院几个研究项目的支持下, 近 5 年来我们在平流层-对流层多尺度过程及其相互作用进行了几个方面的研究。本文将概要介绍以下几个方面的进展:

- (1) 北京大气臭氧准业务探空站观测和冬季青藏高原上空微型臭氧洞的发现;
- (2) 平流层对流层质量交换诊断和对流层顶特征研究;
- (3) 中层大气多尺度波动特征研究;
- (4) 大气辐射传输和中层大气卫星临边遥感新方法研究。

2 平流层臭氧的探测与分析研究

2.1 东亚中纬大陆首个准连续臭氧探空站的建立初步应用

由于东亚大陆上空一直缺乏一个连续的臭氧探空站, 自 1980 年代中期以来只有零星和短期的臭氧探空观测, 这些观测资料对于理解天气过程与臭氧垂直分布的关系是很有意义的。但对于臭氧垂直分布的气候性特征则一直缺乏相应的资料集。为在这一方面跨出重要步子, 在中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室 (以下简称 LAGEO) 已研制的单池电化学臭氧传感器基础上, 结合中国气象局大气探测基地发展的 GPS 气象探空仪单元组成了 GPSO3 臭氧探空仪, 开始了我国第一个臭氧探空准业务探测工作。2002 年初由中国科学院大气物理研究所和中国气象局监网司签订协议联合支持启动第一年联合试验工作, 从 2002 年 9 月开始了第一个探空。一年后, 中国气象局停止支持此项工作, 由 LAGEO 在其他几个研究项目的接连支持下继续开展准连续探测; 其中由 LAGEO 研制提供设备, 北京气象局南郊观象台协助施放。截止 2007 年底, 已施放 367 次, 达到平均每周 1 次以上, 其频度与国际主要臭氧探空站的频次相当。目前此项工作仍在继续, 以使东亚大陆能有一个可以进行大气臭氧结构的气候性研究的探测基地。通过地面实验室定标和已经进行过的与 WMO 认可的芬兰 Vaisala 臭氧探空仪的同时比对, 探测质量得到了保证^[1]。过去 6 年来的探测资料已分别用于臭氧结构的天气气候特征研究 (图 1), 特别是用以验证国际上已有卫星臭氧遥感产品的有效性、可靠性。本项数据集验证了美国 AQUA/AIRS 和 AURA/MLS 的臭氧廓线反演产品, 表明这些产品可用于上对流层/下平流层臭氧结构的研究^[2]。同样, 北京臭氧探空作为欧洲空间局 (欧空局) ENVISAT/MIPAS 臭氧反演产品全球验证中 5 个被采用的中纬度臭氧探空比对站之一, 提供了重要的验证数据^[3]。作为东亚中纬大陆至今唯一准连续的臭氧探空站, 其意义和作用将会在今后进一步体现出来。

2.2 青藏高原上空冬季微臭氧洞的发现

通过 TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) 臭氧总量分布和相关地基臭氧站资料的联合

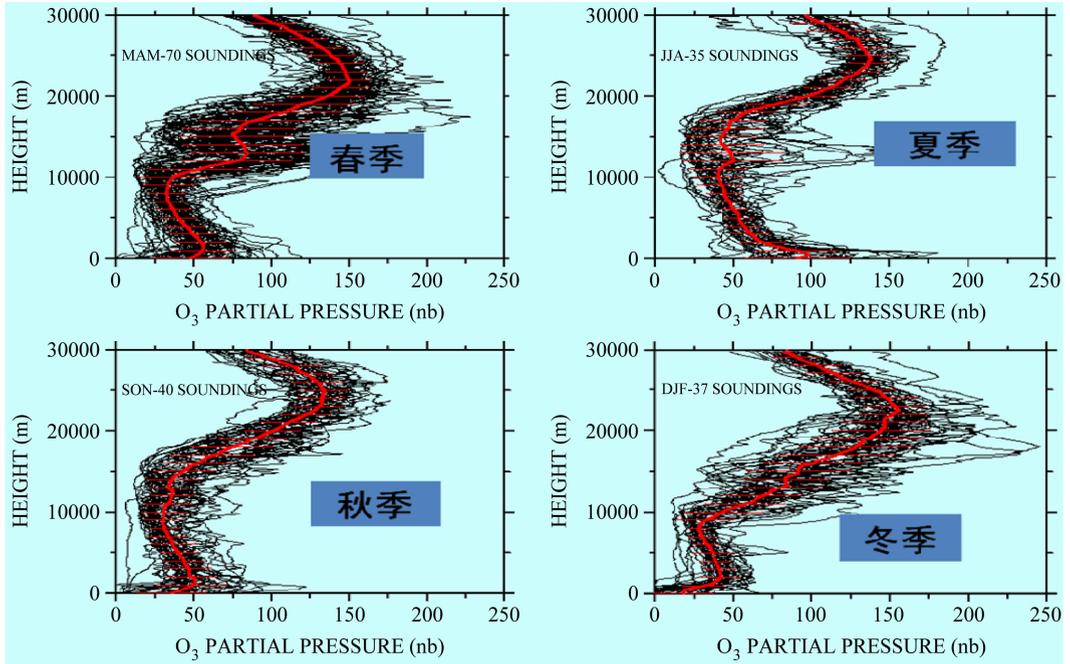


图 1 北京 GPSO3 臭氧探空廓线的气候分布特征图

Fig. 1 Ozone climate sounded by the GPSO3 sondes at Beijing

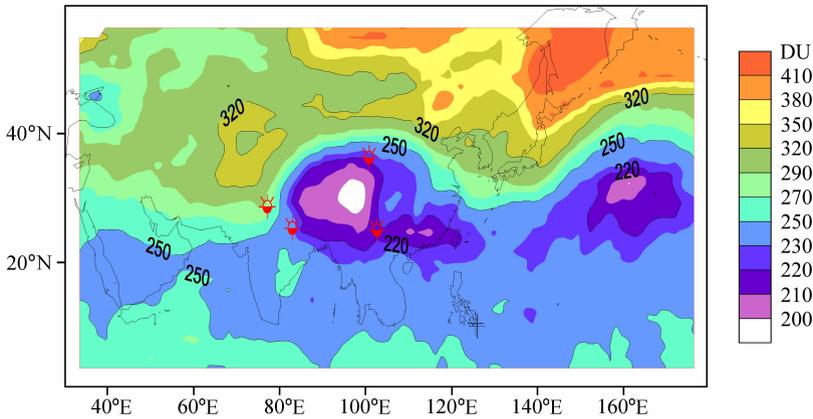


图 2 2003 年 12 月 14~17 日 TOMS 臭氧总量逐日公布图显示的青藏高原卫星臭氧洞

Fig. 2 Mini ozone hole derived by using the daily map of the total ozone amount during 14-17 Dec 2003

诊断分析, 卞建春等^[4]发现 2003 年 12 月 14~17 日在青藏高原上空出现面积超过 $250 \times 10^4 \text{ km}^2$, 臭氧总量小于 220 DU, 而最低值达到 190 DU 的微型臭氧洞(图 2)。在分析此项工作时, 卞建春等^[5]还发现 2002~2003 年期间 TOMS 所发现的臭氧总量的产品存在与地基观测的显著系统误差。

对同时的气象场分析表明, 这个事件中重要的驱动因子是上对流层的动力作用。在 200 hPa 天气图上急流向东北方向移动, 在青藏高原造成对流层顶显著上抬, 至 120 hPa 高度, 对流层低臭氧浓度

空气输送到高原上空下平流层区, 从而使臭氧柱总量迅速减少。这类动力驱动的高原微型臭氧现象值得进一步加以关注。

3 平流层-对流层质量交换诊断与平流层顶特征研究

3.1 平流层-对流层质量交换诊断分析

穿越对流层顶的物质交换和能量交换是大气上下层相互作用的重要定量表征。有关能量动量交换由多种尺度的波动过程实现。关于平流层对流层物

质交换 (STME) 包括平流层高臭氧浓度、空气及所含其他微量成分的向下输送, 还包括对流层水汽、气溶胶、冰云粒子以及对臭氧光化反应起重要作用的微量气体 (由自然和人类活动引起) 向上输送进入平流层。当前的全球再分析资料还缺少可靠的大气成分在对流层顶附近的分布。在杨健和吕达仁^[6]工作的基础上, 郭冬等^[7]进一步利用为期 43 年的 ECMWF 再分析资料, 对 1958~2001 年期间 STME 月平均全球分布开展诊断研究, 得到了长期平均全球 STME 分布, 及其季节和长期变化特征 (图 3)。由于再分析资料在同化过程中产生的误差可能与计算 STME 诊断公式精度要求有距离, 从而使结果产生偏差, 实际诊断结果表明, 虽然全球年总交换量均产生平流层向对流层输送的系统偏离, 但所得区域分布、季节变化以及长期变化 (年际、年代际) 特征均提供了十分有价值的信息。诊断结果表明存在着向上和向下的随季节变化优势区域。印度尼西亚、孟加拉湾、南美中部西海岸等为向上输送重点区。中高纬度同时存在着向上向下的输送, 与天气系统和中小尺度系统的发生发展密切相关。对单位面积而言, 高纬区的交换量和交换通量较低纬为大, 表明该区上下交换效率高。而北半球对上下交换的贡献比南半球大。值得注意的是, 东亚区域占北半球面积 5.6%, 而净交换量占北半球 15.83%, 且有显著的年际和年代际变化, 其原因与作用值得进一步研究。对于产生全球向下偏差的原因, 很可能是赤道附近同化数据中等位温面出现持续冷却这一不一定真实的过程造成。另一方面, 资料所表征的全球对流层顶持续升高也可能是一个因素。

樊雯璇等^[8]用相同的数据集对青藏高原及邻近区域的对流层顶上下交换进行诊断, 结果表明其分布为纬向型, 但表现形式与驱动因子不相同。在副高西风急流北侧对流层顶呈现断裂, 其输送方向从西向东呈现向上、向下、向上的波列结构, 该区交换主要由水平输送顶决定。而急流南侧则主要由垂直输送顶决定。计算结果表明, 尽管高原冬季上空表现为下沉气流, 但由于水平输送顶的优势作用, 其全年均出现向上的输送, 尽管强度上有变化, 这些是值得进一步研究的问题。

3.2 对流层顶特征与其作用的研究

对流层顶是区分对流层与平流层的界面。由于

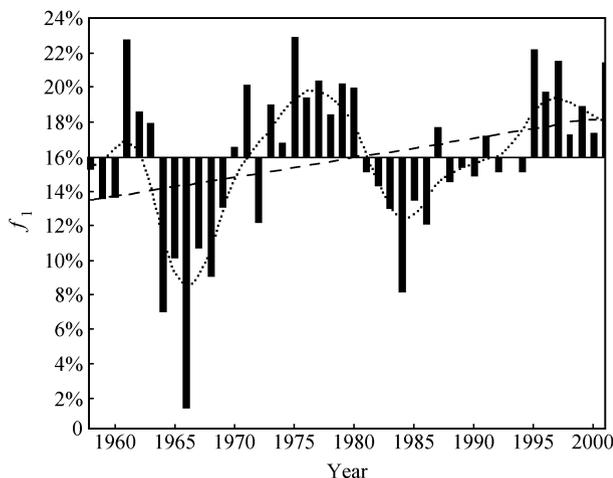


图 3 东亚地区穿越对流层顶质量年交换量占北半球质量年交换量的百分数 f_1 (柱状图)。点线: 对 f_1 进行 9 点 Gauss 滤波后得到的结果; 虚线: 趋势估计

Fig. 3 The percentage (f_1) of the annual amount of the mass exchange between the stratosphere and the troposphere (STME) in East Asia to that in the whole Northern Hemisphere (histogram). The dot line is derived by using 9-point Gaussian filtering, the dashed line is the trend estimation

其作用的不同表现存在着不同的定义, 如动力对流层顶、热力对流层顶, 后者又分为由温度梯度值定义和由最冷点温度定义等。此外还包括由水汽梯度和臭氧极小值定义的界面。越来越多的分析研究表明, 用一种简化的界面来描述对流层顶是不确切的, 也不能用以深入研究大气上下层交换的实际过程。由于已有的再分析同化资料垂直分辨太低, 需要利用高分辨率无线电探空资料以及卫星无线电掩星反演结果来进一步分析研究。

王鑫和吕达仁^[9]利用德国 CHAMP 和阿根廷 SAC-C 两颗 GPS 掩星探测卫星获得的大气温度数据考察了青藏高原及同纬度以东区域 (26.0°N~38.5°N, 75°E~135°E) 2001~2004 年 4 年期间最冷温度 (CPT) 对流层顶和 WMO 定义的温度递减率对流层顶 (LRT) 的季度与地域分布特征 [图 4 (见文后彩图)]。结果表明若以 105°E 为分界, 西边定义为高原区, 东边定义为平原区 (包括部分海面), 无论高原或平原, CPT 高度和气压的季节和年际变化都较小, 而 LRT 气压和高度则表现出较强的季节变化; 在季节变化方面, LRT 高度变化的振幅比 CPT 高度变化振幅大 3 倍。另外, 从图 4 中还看到无论在高原或平原, 冬季 LRT 与 CPT 的

高度都比较接近,但在夏季表现出相当显著的差异。这应该与夏季地表加热和低层大气活跃的对流有关系。正是由于存在这些不同的季节特征,高原 LRT 的年振幅高于平原 LRT 的年振幅,且冬季高原 LRT 高度平均高于平原上空情况。除了上述季节变化特征外,4 年分析结果还显示 LRT 和 CPT 均存在一定的准二年周期振荡(QBO)特征,但是基于当前的数据长度还不足以给出确定的结论。

卞建春和陈洪滨^[10]利用北京高分辨率探空资料对对流层顶高度上的浅薄强逆温层(TIL)的出现和强度进行统计分析(图5)。对流层顶附近强逆温层的存在对波动的上传会有重要作用,只有用高分辨探空资料才能发现这一现象。对北京这个中纬站所作分析表明,对流层顶上强逆温层是全年普遍存在的,其厚度是冬季最厚、夏季最薄,平均厚度变动于 0.72~0.42 km。值得注意的是第二对流层顶也存在着这一现象。TIL 的存在对波动传输的影响要进一步研究。

对流层顶与对流层内对流活动发展,特别是卫星相对容易观测的强对流云的相互关系是对流层顶对于天气气候作用的一个可能表征。王旻燕和吕达仁^[11]利用 2000 年日本地球同步卫星 GMS-5 的红外和水汽通道资料提取强对流云顶信息,并与同时的 NCEP 再分析资料提取的热力对流层顶温度和气压进行对比分析,对比分析表明,东亚地区夏季强对流云顶温度比对流层顶温度平均高出约 4 K,而冬季二者温度差高达 15 K。强对流云顶温度与对流层顶月均值之间的相关系数为 0.757,而强对流云顶温度与对流层顶气压月均值的相关系数高达 0.901。

4 中层大气多尺度波动特征研究

中层大气是各种大气波动盛行的区域,其中包括各种尺度的重力波,起源于平流层和对流层中具有日变化性质的热源激发的各种大气潮汐,以及传播性或定常的行星波。这些波动在垂直传播的过程中实现了能量和动量在不同高度大气之间的转移,在中层大气各圈层之间起到耦合的作用,是中层大气动力学所关注的重要领域。

受大气层结稳定性的影响,或者受波-流相互作用原理的控制,这些波动的传播稳定性会遭到破坏,与此同时将产生湍流,相应地生成作用于背景流上的动力阻曳。基于当前的认识,正是这些来自

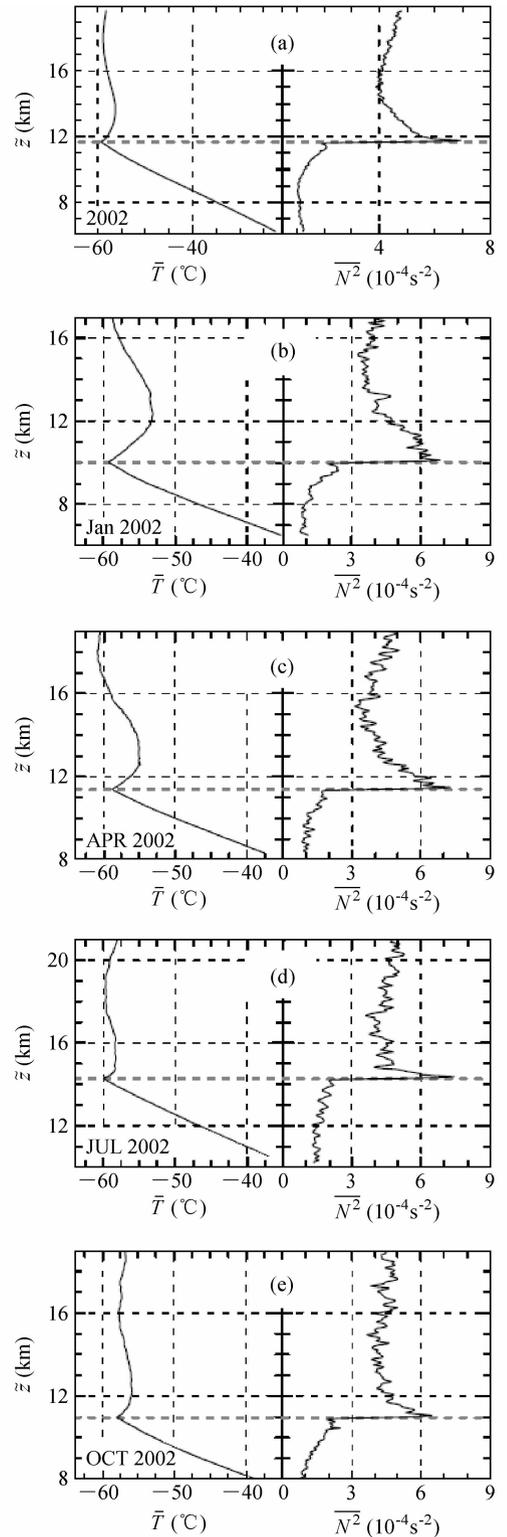


图5 2002年相对于对流层顶的温度月平均廓线以及浮力频率:(a)年平均值;(b)1月;(c)4月;(d)7月;(e)10月
Fig. 5 Height profiles of the monthly mean temperature and Brunt-Vaisala frequency for (a) annual mean, (b) Jan, (c) Apr, (d) Jul, (e) Oct

各种波动传播过程中的动力强迫决定了中层大气环流的基本形态。例如,重力波阻曳对中间层急流的形成起着控制作用,行星波对中纬度中间层“冲浪型”温度结构以及中间层温度反转现象都起着重要控制。由大气热力潮汐产生的动力强迫是赤道区域中间层和低热层动量收支的重要组成部分。此外,那些传播到电离层高度的大气波动可以驱动带电粒子运动产生电离层扰动,而当带电粒子跨越地磁场磁力线时还能产生电离层极化电场,这些都会引起飞行器轨道环境与地空无线电波传播介质环境的变化。从考察中层大气多尺度波动性质的角度出发,国内学者利用多种探测数据和方法针对有关问题开展了研究,Chen 等^[12]在为国际空间研究委员会(COSPAR)提交的国家报告中已经对过去取得的主要成果进行了总结。我们针对平流层重力波活动统计性质和中层大气潮汐全球结构等方面开展了持续的研究,下面介绍一些主要结果。

4.1 下平流层重力波特征的高分辨探空研究

Kitamura 等^[13]首先提出利用高分辨率探空资料估计惯性重力波活动的研究方案。该方案可以利用那些积累下来的长期探空资料,为下平流层/对流层重力波活动气候特征的研究提供了一个有效的途径。该方案被许多研究人员用来研究下平流层重力波统计性质^[14, 15]。近年来,国内学者通过使用在不同纬度区域获得的探空资料,针对这些区域平流层重力波活动的季节和年际变化开展了相关分析工作^[16~18]。卞建春等^[16]利用北京(40°N)探空数据考察了这些地区下平流层重力波的统计性质,给出了季节变化特征。王雪莲等^[18]进一步利用一组在热带台站获得的长达 7 年(1998~2004 年)的高分辨探空数据考察了热带地区下平流层(18~25 km)重力波活动的长期变化特征。这些结果显示,虽然纬度不同,但是从探空数据中提取的重力波信号在固有频率和垂直尺度方面具有相似的性质,频率介于 $1\sim 3f$ 之间,这里 f 为局地科里奥利频率,垂直波长介于 $1\sim 3$ km 之间。

通过比较上述结果可以看到,北半球从热带直到热带外地区,重力波活动的季节变化形式是相似的,总能量在 1 月份达到最大,6 月份最小。但是,与此对应的波动产生机制是不同的。对于热带而言,伴随 1 月份北半球西风向南扩张而得到加强的对流活动是造成重力波活动增强的主要原因。另

外,结合在北京^[16]和武汉^[17]开展研究的结果看到,就强度而言,热带地区重力波能量密度介于 $10\sim 28$ J/kg,而在北京获得的计算结果中最大值为 15 J/kg,说明热带平流层重力波活动远远强于热带外地区。王雪莲等^[18]给出的研究结果还表明,热带重力波活动与赤道 QBO 表现出相当显著的一致性。赤道平流层中部(25 km 高度)纬向风从东风位相转为西风位相的过程总是与热带 [Truk 站,位于(7.4°N, 151.8°E)]重力波能量年际变化的极大值的出现吻合在一起 [图 6(见文后彩图)]。

4.2 基于卫星探测的中层大气潮汐特征研究

通过在武汉(30°N, 114°E)布设中频雷达和流星雷达开展探测,对中国局部区域大气热力潮汐的活动取得了一定了解^[19~22]。但是,从地基测量资料中提取潮汐信号的过程往往受来自其他扰动成分的影响,例如具有相同频率的行星波,或者局地产生的重力波都会对最终分析造成误差。另外,从这类资料中无法获得非迁移性潮汐的贡献。陈泽宇和吕达仁^[23]利用为期一年的卫星遥感反演的温度(SABER/TIMED)资料重建了 120°E 子午圈内中间层和低热层大气潮汐各主要频率分量(周日、半日和 8 小时潮汐)。利用卫星数据取得的分析结果详细说明了中国区域中间层和低热层高度各种不同频率大气热力潮汐活动的性质,尤其是强度的季节变化(图 7)。其中,说明了迁移性成分对周日潮和半日潮的主要控制作用。与此同时,通过考察迁移性成分和非迁移性成分各自在总潮汐中贡献指出,对于某些季节和高度,非迁移性成分的影响也是需要重视的。例如,在分析时段内(2005 年),夏季受(1, 0)模、(1, -3)模和(1, -2)模的共同影响形成了从赤道向南延伸的活动中心,极值中心位于赤道附近,温度振幅达到了 20 K 以上。

4.3 利用中频雷达风廓线探测数据研究潮汐间非线性相互作用

中频雷达风廓线仪是探测中间层和低热层风场的重要地基设备^[17, 22]。目前,利用武汉中频雷达探测数据开展的研究首次给出了一例潮汐非线性相互作用的图像^[22, 24, 25]。Liu 等^[22]利用 Lomb-Scargle 归一化方法获得了 MLT 区域大气风场扰动的周期图。进一步通过检验主要谱成分(潮汐分量)之间的频率组合关系,并且采用双相干谱方法分析了各种潮汐成分之间的相位相关程度。在此基础

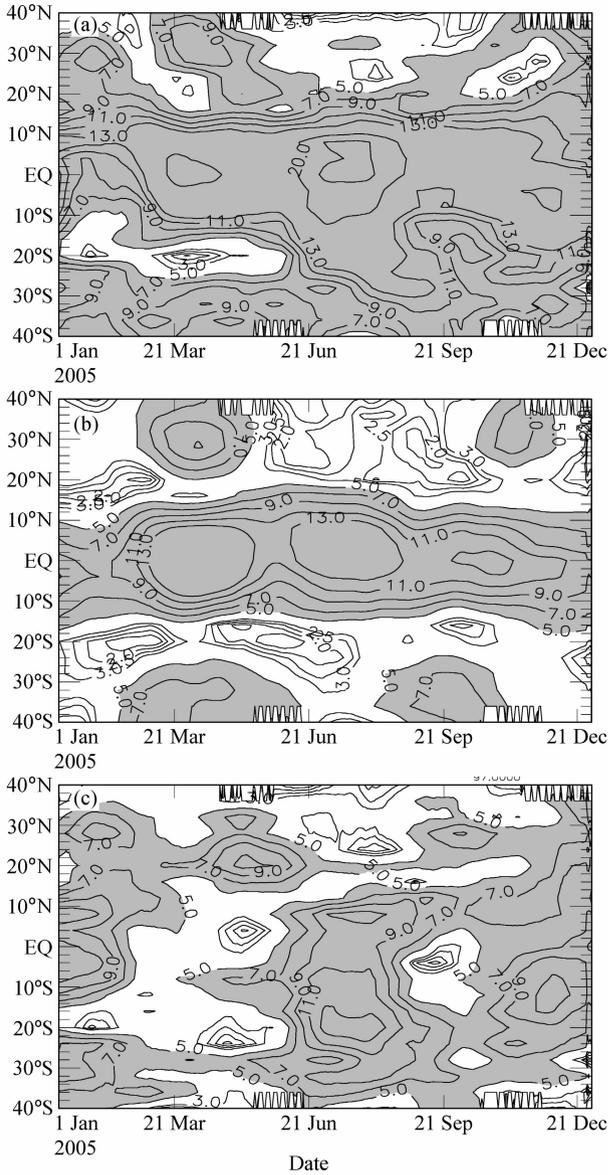


图7 2005年120°E子午圈中97 km高度上空周日潮振幅(a)、迁移性周日潮(1, 1)模振幅(b)和非迁移性周日潮振幅(c)随季节在40°S~40°N范围中的分布(单位: K)。等值线: 最小值为2 K; 阴影: 振幅大于或等于5 K

Fig. 7 Time-latitude cross sections of the amplitudes of (a) diurnal tides, (b) migrating diurnal tides and (c) nonmigrating diurnal tides at 97-km altitude in the meridian of 120°E from 40°S to 40°N in 2005. The minimum of contours is 2 K, and areas with the amplitudes greater than or equal to 5 K are shaded

上,采用滑动的最小二乘谐波拟合获得主要谱分量的时变振幅和时变垂直波长,考察周日、半日和8小时潮汐水平分量的振幅及垂直波长随时间变化的相关关系。图8给出了不同高度周日(实线)、半日(点线)和8小时(虚线)三种经向风潮汐振幅

两两之间随时间的变化,其中可以看到这些潮汐之间表现出幅值相近、变化步调相同或相反的此消彼长的特点,说明它们发生了波-波非线性相互作用。

图8最后,通过比较潮汐拟合振幅的时间均值与相应的Lomb-Scargle谱振幅的异同来考察所发生的潮汐-潮汐相互作用对MLT区域潮汐短期变化和大气波动全尺度频谱随高度变化的影响。Liu等^[24, 25]进一步考察了纬向风和经向风潮汐之间相位在上述非线性相互作用过程中的表现形式,得到的结果首次揭示了在相互作用过程中潮汐水平分量之间明确的相位及相位差关系。在这个研究中,首先对潮汐相位“准正交”和“准同相”的范围作了严格界定。结果表明,在绝大多数观测时间内周日潮汐相位差和半日潮汐相位差呈现出“准正交”的形式,但是8小时潮汐相位差却表现为“准同相”的形式。

5 中层大气临边遥感反演方法研究

近10年来,卫星中层大气遥感工作在国际上获得了长足的进展,其中的一个方面是各种波段的临边遥感有了很大的发展。例如,欧空局环境卫星ENVISAT、美国宇航局地球观测系统卫星AURA、瑞典小卫星Odin等所载各类紫外、可见、红外、亚毫米波段临边遥感仪器。临边遥感具有相当高的垂直分辨率和高度覆盖范围,水平分辨率达~100 km量级,是提供中层大气数据的主要方法。

为建立我国在这方面的遥感能力,郭霞等^[26]首先就紫外波动卫星临边遥感建立相应的基于单次散射的球面分层大气散射辐射传输算法,进行多次散射订正。通过大气臭氧对紫外各波长吸收特征和大气密度垂直分布造成的对入射太阳光的散射的综合作用,可以发现不同波长临边散射辐射垂直分布的一般特征。在此基础上,郭霞和吕达仁^[27]提出了利用多波长紫外临边散射探测来同时遥感反演大气密度、臭氧浓度的垂直分布(图9)。所提出的反演方案已经通过数字模拟验证(图10),并且利用美国1980年代发射的SME卫星紫外临边辐射仪的观测结果进行了实际反演。以上述理论研究和数值模拟为基础,我们正在努力推进我国紫外临边遥感大气成分的相关计划。

有关与遥感相关的辐射传输算法,段民征和吕达仁^[28]纠正了S-M算法由标量和矢量求解过程中

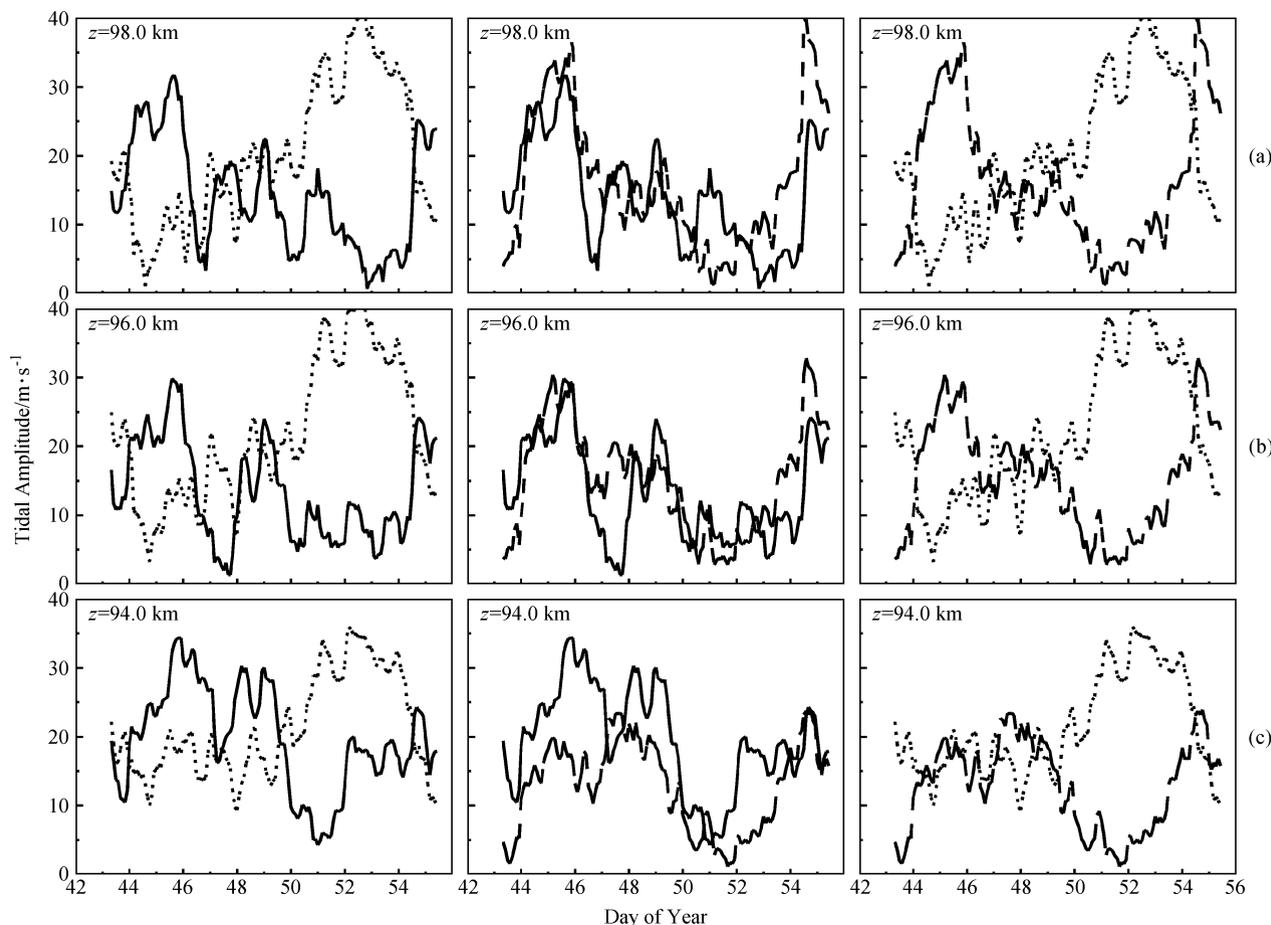


图 8 在不同高度周日(实线)、半日(点线)和 8 小时(虚线)三种经向风潮汐振幅两两之间随时间显示的变化: (a) 98 km; (b) 96 km; (c) 94 km

Fig. 8 Amplitude time variations of the diurnal (solid lines), semidiurnal (dotted lines) and terdiurnal (dashed lines) tides in the meridional wind component at heights 98.0 km, 96.0 km and 94.0 km. On the abscissa the local time corresponds to the middle of a 48-h data window, so the actual time span should be extended forward and backward, respectively, by 24 h

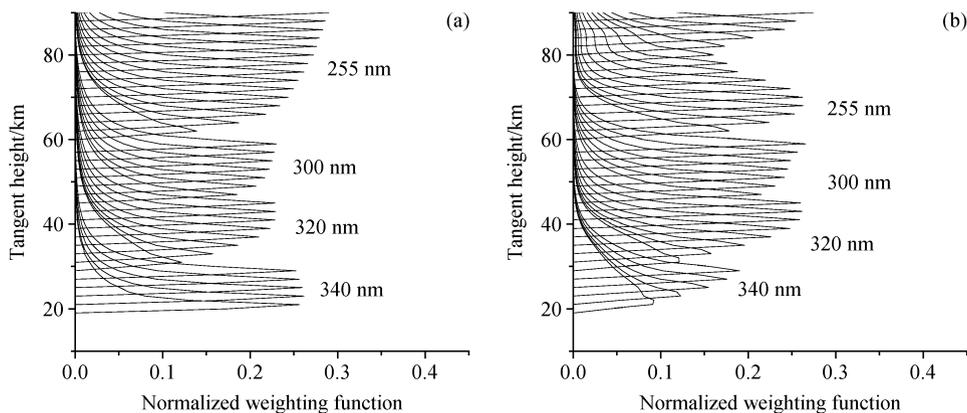


图 9 大气密度 (a) 和臭氧浓度 (b) 归一化的多波长联合的权重函数。波长 340 nm、320 nm、300 nm、255 nm 选取的权重函数高度范围分别为 20~30 km、30~45 km、45~60 km、60~90 km

Fig. 9 Joint normalized weighting functions for (a) air density and (b) ozone. Discrete limb-scanning altitude intervals of 20 - 30 km, 30 - 45 km, 45 - 60 km, and 60 - 90 km are selected for wavelengths of 340 nm, 320 nm, 300 nm, and 255 nm, respectively

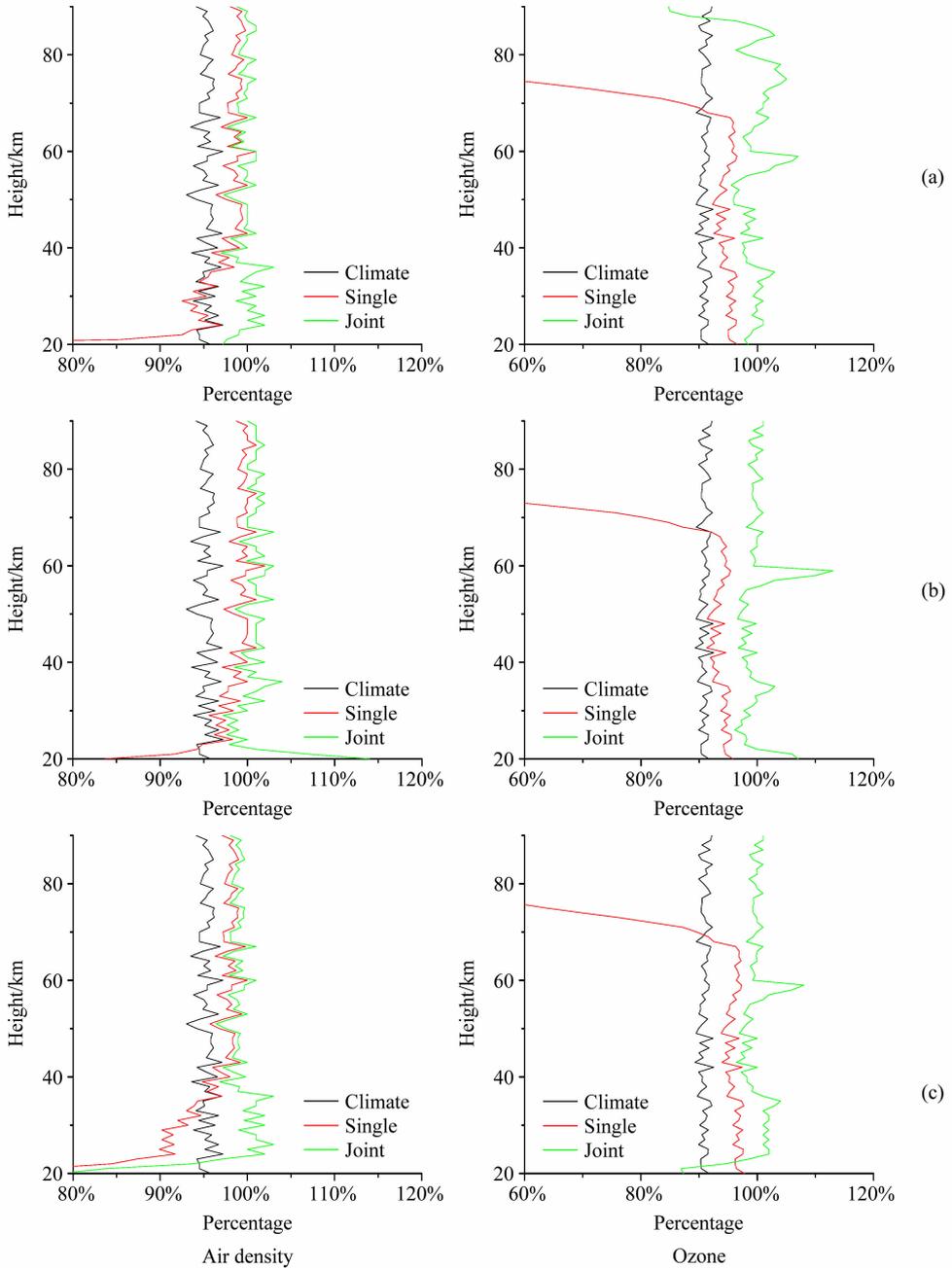


图 10 计算机模拟的反演结果：(a) 个例 1；(b) 个例 2；(c) 个例 3。黑线：气候平均值；红线：单独反演结果；绿线：联合反演结果。横坐标轴为反演成分的密度值与真实值的百分比

Fig. 10 Results of computer simulations for (a) case 1, (b) case 2, and (c) case 3. The x axis is the percentage of number density to the real one. Black curves; predetermined distributions; red curves; single experiment results; green curves; joint experiment results

的一个错误。王越等^[29]利用三维非均匀介质辐射传输算法计算非均匀云顶对入射太阳辐射的反向散射特征，这些反射特征会影响对云的反演，也同样会影响中层大气的辐射传输。其结果一方面对平流层化学过程的辐射输入产生影响，同时也为临边遥感的多次散射订正提供更为符合实际的方案。

6 小结

大气上下层相互作用及其与天气气候的关系是十分广阔的研究领域，上面只是介绍了近几年我们的一些研究进展。发展新探测手段，充分利用新的资料和方法，更多地了解大气上下层相互作用的事

实和过程, 揭示这些过程对上下层天气气候变化的作用, 建立更为符合实际的定量模式和预报预测模式将是今后长期的研究目标。

参考文献 (References)

- [1] 王庚辰, 孔琴心, 宣越健, 等. GPSO3 和 Vaisala 臭氧探空仪平行施放比对结果的初步分析. 应用气象学报, 2004, **15** (6): 672~680
Wang Gengchen, Kong Qinxin, Xuan Yuejian, et al. Preliminary analysis on parallel comparison of GPSO3 and Vaisala ozonesondes. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2004, **15** (6): 672~680
- [2] Bian J, Gettelman A, Chen H, et al. Validation of satellite ozone profile retrievals using Beijing ozonesonde data. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**, D06305, doi: 10.1029/2006JD007502
- [3] Cortesi U, Lambert J C, Clercq C D, et al. Geophysical validation of MIPAS-ENVISAT operational ozone data. *Atmos. Chem. Phys.*, 2007, **7**: 4807~4867
- [4] 卞建春, 王庚辰, 陈洪滨, 等. 2003 年 12 月青藏高原上空出现微型臭氧洞. 科学通报, 2006, **51** (5): 606~609
Bian Jianchun, Wang Gengchen, Chen Hongbin, et al. Ozone mini-hole occurring over the Tibetan Plateau in December 2003. *Chinese Sci. Bull.*, 2006, **51** (7): 885~888
- [5] 卞建春, 陈洪滨, 张中波, 等. 2002~2003 年北半球中纬地区臭氧总量 TOMS 与地面观测的非常差异. 科学通报, 2005, **50** (5): 495~497
Bian Jianchun, Chen Hongbin, Zhang Zhongbo, et al. Unusual discrepancy between TOMS and ground-based measurements of the total ozone in 2002~2003. *Chinese Sci. Bull.*, 2005, **50** (6): 606~608.
- [6] 杨健, 吕达仁. 2000 年北半球平流层/对流层质量交换的季节变化. 大气科学, 2004, **28** (2): 294~300
Yang Jian, Lü Daren. Diagnosed seasonal variation of stratosphere-troposphere exchange in the Northern Hemisphere by 2000 data. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (2): 294~300
- [7] Guo Dong, Lü Daren, Sun Zhaobo. Seasonal variation of global stratosphere-troposphere mass exchange. *Progress in Natural Science*, 2007, **17** (12): 1466~1475
- [8] 樊雯旋, 王卫国, 卞建春, 等. 青藏高原及其临近区域穿越对流层顶质量通量的时空演变特征. 大气科学, 2008, **32** (6), 待发表
Fan Wenxuan, Wang Weiguo, Bian Jianchun, et al. The distribution of cross-tropopause mass flux over the Tibetan Plateau and its surrounding regions. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, **32** (6), in press
- [9] 王鑫, 吕达仁. 利用 GPS 掩星数据分析青藏高原对流层顶结构变化. 自然科学进展, 2007, **7**: 913~919
Wang Xin, Lü Daren. Analyzing variation of the tropopause region over Tibetan Plateau with GPS radio occultation measurements. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2007, **7**: 913~919
- [10] Bian Jianchun, Chen Hongbin. Statistics of the tropopause inversion layer over Beijing. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2008, in press
- [11] 王旻燕, 吕达仁. 东亚强对流的季节变化及其与对流层顶关系初探. 大气科学, 2007, **31** (5): 937~949
Wang Minyan, Lü Daren. Preliminary analysis of seasonal variation of deep convective clouds and its association with the tropopause in East Asia. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (5): 937~949
- [12] Chen Zeyu, Liu Renqiang, Chen Hongbin, et al. Advances in the studies of the middle and upper atmosphere in 2004-2006. *Chinese Journal of Space Science*, 2006, **26** (Suppl.): 61~70
- [13] Kitamura Y, Hirota I. Small-scale disturbances in the lower stratosphere revealed by daily rawin sonde observations. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1989, **67**: 817~830
- [14] Allen S, Vincent R A. Gravity wave activity in the lower atmosphere: Seasonal and latitudinal variations. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**: 1327~1350
- [15] Vincent R A, Allen S J, Eckermann S D. Gravity-wave parameters in the lower stratosphere. *Gravity Wave Processes: Their Parameterization in Global Climate Models*. NATO ASI Ser. I, K. Hamilton, Ed. Springer-Verlag, New York, 1997. 50, 7~25
- [16] 卞建春, 陈洪滨, 吕达仁. 用垂直高分辨率探空资料研究北京上空下平流层重力波的统计特性. 中国科学(D辑), 2004, **34** (8): 748~756
Bian J, Chen H, Lü D. Statistics of gravity waves in the lower stratosphere over Beijing based on high vertical resolution radiosonde. *Science in China (D)*, 2005, **48** (9): 1548~1558
- [17] Zhang Shaodong, Yi Fan. A statistical study of gravity waves from radiosonde observations at Wuhan (30°N, 114°E) China. *Annales Geophysicae*, 2005, **23**: 665~673
- [18] 王雪莲, 陈泽宇, 吕达仁, 等. 热带地区下平流层重力波的特性研究. 自然科学进展, 2006, **16** (12): 1583~1590
Wang Xuelian, Chen Zeyu, Lü Daren, et al. Characteristics of the equatorial lower stratospheric GWs. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2006, **16** (12): 1583~1590
- [19] 熊建刚, 万卫星, 宁百齐, 等. 武汉上空中层和低层大气潮汐的流星雷达观测. 空间科学学报, 2003, **23** (5): 361~370
Xiong J, Wan W, Ning B, et al. Tides in the mesosphere and lower thermosphere over Wuhan revealed by a meteor radar. *Chinese J. Space Sci.* (in Chinese), 2003, **23** (5): 361~370
- [20] 张绍东, 易帆, 胡雄. 武汉上空 (30°N, 114°E) 潮汐及其相互作用的 MF 雷达观测. 空间科学学报, 2003, **23** (6),

430~435

Zhang S, Yi F, Hu X. MF radar observations of tides and their interactions over Wuhan (30°N, 114°E). *Chinese J. Space Sci.* (in Chinese), 2003, **23** (6): 430~435

- [21] Zhao G, Liu L, Ning B, et al. The terdiurnal tide in the mesosphere and lower thermosphere over Wuhan (30°N, 114°E). *Earth Planets Space*, 2005, **57**: 393~398
- [22] Liu Renqiang, Lü Daren, Yi Fan, et al. Quadratic nonlinear interactions between atmospheric tides in the mid-latitude winter lower thermosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 2006, **68**: 1245~1259
- [23] 陈泽宇, 吕达仁. 东经 120 度中间层和低热层大气潮汐及其季节变化特征. *地球物理学报*, 2007, **50** (3): 691~700
Chen Zeyu, Lü Daren. Seasonal variations of the MLT tides in 120°E meridian. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50** (3): 606~616
- [24] Liu Renqiang, Lü Daren, Xu Jiyao, et al. Phase relationships between tidal horizontal wind components observed in the mid-latitude winter upper mesosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2007, doi: 10.1016/j.jastp.2007.09.003
- [25] 刘仁强, 吕达仁. 中纬度冬季低热层潮汐水平风分量相位关系的 MF 雷达观测. *空间科学学报*, 2007, **27** (6): 481~490
- Liu Renqiang, Lü Daren. MF radar observations of phase relationship between tidal horizontal wind components in the mid-latitude winter thermosphere. *Chinese J. Space Sci.* (in Chinese), 2007, **27** (6): 481~490
- [26] Guo Xia, Lü Daren, Lu Yao. A simple but accurate ultraviolet limb-scan spherically-layered radiative-transfer-model based on single-scattering physics. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, **24** (4): 619~630
- [27] Guo Xia, Lü Daren. Feasibility study for joint retrieval of air density and ozone in the stratosphere and mesosphere using limb-scan technique. *Applied Optics*, 2006, **45** (35): 9021~9030
- [28] 段民征, 吕达仁. 矢量辐射传输方程求解中的 d-M 方法. *自然科学进展*, 2007, **17** (4): 488~493
Duan Minzheng, Lü Daren. The d-M method for vector radiative transfer algorithm. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2007, **17** (4): 488~493
- [29] 王越, 吕达仁, 霍娟. 云的非均匀性对双向反射率的影响. *科学通报*, 2007, **52** (7): 2064~2069
Wang Yue, Lü Daren, Huo Juan. Impact of cloud inhomogeneity on bi-directional reflectance. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53** (1): 124~130

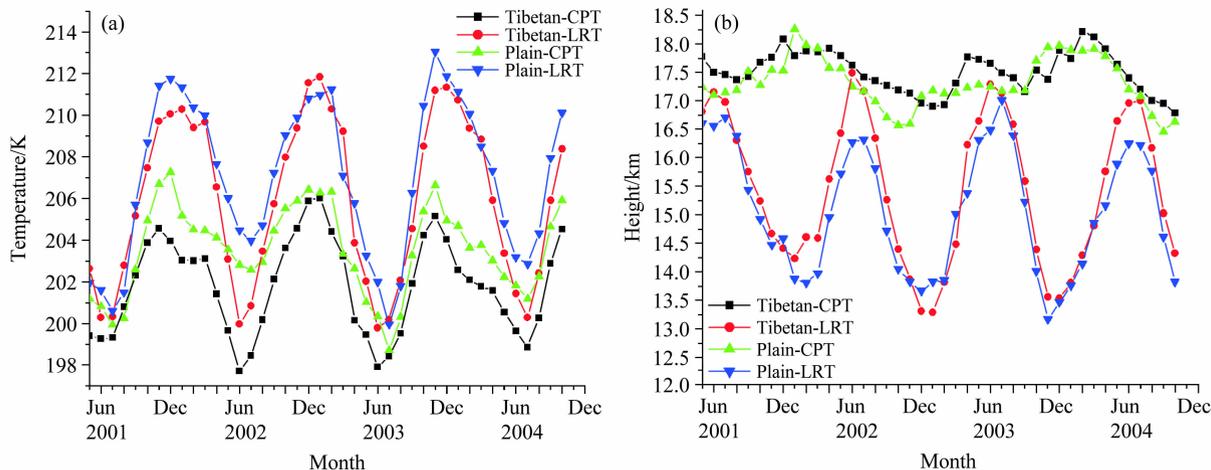


图 4 2001 年 5 月~2004 年 12 月期间月平均 CPT 和 LRT 的温度 (a) 和高度 (b) 变化

Fig. 4 The monthly mean (a) temperatures and (b) altitudes at the cold-point-tropopause (CPT) and the lapse-rate-tropopause (LRT)

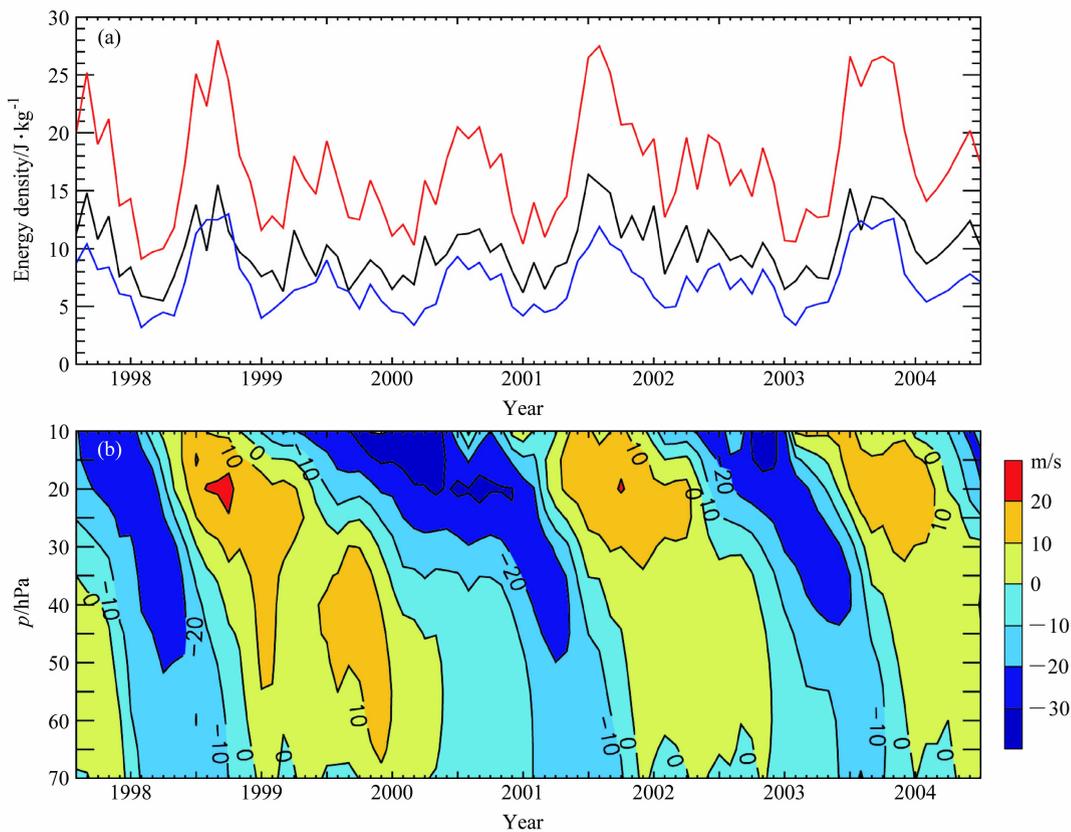


图 6 (a) 1998~2004 年期间 Truk 站 (7.4°N, 151.8°E) 上空 (18~25 km 之间) 月平均重力波动能密度 (黑线)、势能密度 (蓝线) 和总能量密度 (红线); (b) 70~10 hPa 范围中赤道纬向风准两年振荡 (负值为东风)

Fig. 6 (a) The monthly mean of kinetic energy density (black), potential energy density (blue), and total energy density (red) in height range 18–25 km at Truk Island (7.4°N, 151.8°E) during 1998–2004; (b) the monthly mean zonal mean zonal wind (negative value means east wind) for 70–10 hPa at the Equator during 1998–2004, which represents the QBO