

上对流层-下平流层交换过程研究的进展与展望

陈洪滨 卞建春 吕达仁

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 上对流层和下平流层 (UTLS) 区域的高度范围大致为 5~20 km。UTLS 区域大气成分的分布及变化对于认识气候长期变化也极为重要, 因为该区域的臭氧是一种有效的温室气体, 其中的水汽、卷云和气溶胶对太阳短波辐射和地球长波辐射有很强的调制作用, 因而对于天气和气候变化产生不可忽略的辐射强迫作用; UTLS 区域中, 还有航空业的飞机排放, 强对流云中云上闪电产生相当量的 NO_x , 这些都对 UTLS 区域乃至更高及更低层大气的化学成分与分布产生重大影响。该文介绍上对流层和下平流层区域的交换过程研究的意义和手段, 同时介绍有关研究的进展, 重点回顾近年来国内一些学者开展的工作。另外, 还列举一些研究问题和方向, 最后重点展望青藏高原上空上对流层-下平流层区域的研究, 因为该地区 UTLS 交换过程不仅具有显著区域特征, 而且在全球平流层-对流层交换中可能有重要贡献。

关键词 上对流层-下平流层 平流层-对流层交换 青藏高原

文章编号 1006-9895 (2006) 05-0813-08

中图分类号 P421

文献标识码 A

Advances and Prospects in the Study of Stratosphere - Troposphere Exchange

CHEN Hong-Bin, BIAN Jian-Chun, and Lü Da-Ren

Laboratory for the Middle Atmosphere and Global Environmental Observation (LAGEO), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The range of upper troposphere and lower stratosphere (UTLS) is about 5 - 20 km. The distribution and change of atmospheric constituents in UTLS are crucial in understanding the climate change. In this region, ozone is an effective greenhouse gas, and water vapor, cirrus cloud and aerosol have important radiative forcing on the weather and climate variation by actively adjusting the solar radiation and long-wave radiation. Aircraft emission and lightning in the strong convection clouds producing considerable NO_x take place in UTLS, which greatly impact the structure of atmospheric constituents in UTLS and upper and lower layers.

In this paper, the scientific issues and research methods in the study of stratosphere - troposphere exchange (STE) are introduced, and some advances in related fields, especially domestic works in recent years, are summarized. Some key issues and prospects are also discussed. Finally, some expected researches are emphasized in the study of UTLS over the Tibetan Plateau, because the STE processes in this region not only have some significant regional features, but also play potentially an important role in the global STE.

Key words upper troposphere and lower stratosphere, stratosphere - troposphere exchange, the Tibetan Plateau

1 引言

在过去的三十年里, 随着我们对大气物理化学

过程、海-气相互作用、陆面过程和地球系统科学的深入了解, 国际大气科学界开始认识到大气平流层和对流层相互作用, 特别是上对流层与下平流层

收稿日期 2006-05-26, 2006-06-26 收修定稿

资助项目 中国科学院知识创新重要方向性项目 KZCX3-SW-217, 国家自然科学基金资助项目 40375013、40333034

作者简介 陈洪滨, 男, 1960 年出生, 研究员, 主要从事大气遥感和大气物理学方面的研究。E-mail: chb@mail.iap.ac.cn

(UTLS) 之间的物理化学过程及其效应对气候变化起着重要的作用, 研究的重点又在于平流层-对流层交换 (stratosphere-troposphere exchange, 简称 STE) 过程的研究。开展 STE 研究涉及的重大科学和实际问题有:

(1) 平流层臭氧的损耗、分布及其时空变化是气候变化和生态环境重大问题之一, 因此以臭氧为中心的辐射-化学动力学过程和平流层中层大气环流及其变化一直是大气科学界普遍关注的问题。由于人类活动所产生的对平流层臭氧有破坏作用的各种化学物质, 都必须穿越对流层顶到达平流层, 大气能量、动量、物质 (水汽、微量气体、气溶胶) 也必须通过对流层顶和平流层进行交换, 因此, 不了解 STE 过程和机制, 就无法准确评估人类活动 (排放) 对全球臭氧层的影响, 更无法对其未来演变作出合理的预测。

(2) 当前数值天气预报模式和气候系统模式的改进方向不仅要提高水平分辨率, 而且要向高层发展, 即包括更高的大气层。虽然对流层顶之上大气质量不到总量的 20%, 大气密度比海平面小 1~2 个数量级, 但作为大气层的一部分, 现代模式不包括平流层顶及其以上大气或考虑太过粗略, 显然很难给出更好的天气与气候模拟及预报结果。STE 过程和机制的深入研究, 是打通对流层-平流层的关键。

(3) 上对流层是洲际航空运输的主要通道, 由于该高度大气密度稀薄, 飞机排放的相对重要性是显而易见的。随着国际航空业特别是中国航空业的迅速发展, 飞机排放物在 UTLS 中的物理与化学效应已经引起普遍关注。不对 STE 过程进行深入研究, 就无法准确评估飞机排放的短期和长期影响。

(4) 上对流层和下平流层区域是日地关系的关键环节, 太阳活动的 (地面) 天气气候效应不论以何种形式存在, 必然通过该区域或在该区域有所反映。深入研究 STE 过程, 将有助于对太阳-地球关系的深入认识。

关于 STE 研究及其意义有许多综述^[1~4]。平流层与对流层交换研究的重点区域在上对流层和下平流层, 该区域高度范围大致为 5~20 km, 随纬度和季节变化, 是对流/斜压涡控制的对流层和层结稳定的平流层之间的转换区域。该区域是大气动力、热力和大气成分结构发生明显转换的区域。

UTLS 区域大气成分的分布及变化对于认识气

候长期变化极为重要, 该区域发生的微物理和化学过程也是一个重要但还认识不足的领域。其重要性表现为该区域臭氧是一种有效温室气体, 水汽、卷云和气溶胶由于其对太阳短波辐射和地球长波辐射的调制而产生对于天气气候重大的辐射强迫。认识 UTLS 区域水汽分布极其重要, Harries^[5]通过敏感性试验指出, 上对流层水汽约 10% 误差所产生的不确定性相当于 CO₂ 倍增引起的效应; Forster 等^[6]指出下平流层水汽的重要作用。平流层和对流层多尺度交换过程、影响臭氧和水汽等变化的多相化学反应和云微物理过程也发生在该区域, 从而影响气候长期变化。人类活动中的飞机排放也在此高度范围; 强对流云中与云上闪电亦产生相当量的 NO_x。已有研究表明下平流层对臭氧总量减少的贡献最大。

由此, 世界气候研究计划 (WCRP) 于 1993 年启动的核心计划 SPARC 在执行 5 年后, 通过与 IGBP/IGAC 和 COSPAR 有关计划协作, 并与 WMO 的国际臭氧与环境监测计划协调后, 于 1998 年将研究重点移至上对流层-下平流层区域。SPARC 联合 IGAC 和 COSPAR 等呼吁要加强开展 UTLS 区域的综合试验与模式研究。

本文介绍上对流层和下平流层区域上下交换过程研究的意义和手段, 同时介绍有关方面研究的进展, 重点回顾近年来国内学者开展的工作。文中还列举一些研究问题和方向, 最后重点展望青藏高原上空上对流层-下平流层区域的研究。

2 UTLS 区域的探测研究

UTLS 中交换过程的机制与定量化还有很大的不确定性, 一个非常重要的原因是缺乏对该区域风场、温度场、臭氧、水汽、卷云、气溶胶和其他成分的连续而又精细的观测。因此, 该区域三维大气结构的监测对于该区域各种动力、物理和化学过程的研究极为重要。UTLS 区域的探测主要有四种手段, 即高空气球探空、卫星观测、飞机观测和地基雷达。这里简要介绍这些探测手段。

高空气球探测主要有两类: 气象业务高空气球和大气成分气球探空。目前, 绝大多数气象业务高空气球探空在 UTLS 区域仅提供比较可靠的风和温度资料, 而且只提供规定层和特性层信息。尽管也提供湿度信息, 但由于 UTLS 区域水汽含量低、气温低等原因, 目前采用的湿度传感器所提供

的湿度测量准确性差,因而无法利用。大气成分气球探空主要是臭氧和水汽探空。臭氧探空目前全球范围内有数十个站点长期连续观测。国内中国科学院大气物理研究所与中国气象局监测网络司合作,从 2002 年 3 月开始在北京利用自制的 GPS 臭氧探空仪进行连续观测;水汽探空目前只有美国 NOAA 在科罗拉多州 Boulder 进行了二十多年连续长期观测^[7]。另外,在一些野外试验中对臭氧、水汽及其他成分采用气球探空,我国科学家在青藏高原、南北极和北京等地区进行过臭氧探空。目前实现 UTLS 区域水汽较精确探测的技术^[8]有:霜点湿度计、Lyman- α 湿度计和可调二极管激光分光计。

卫星观测。尽管 20 世纪 70 年代就实现了平流层和对流层区域的卫星观测,但是真正提供 UTLS 区域信息的卫星观测是 1991 年美国发射了以中层大气为主要探测对象的 UARS 卫星,连续多年对动力、热力与成分结构的大尺度变化进行全球性监测,由此提供研究全球尺度中层大气过程的基础。20 世纪 90 年代中期,美国 John Hopkins 大学应用物理实验室 (APL) 发射军民两用 MSX 卫星,装载了中层大气遥感仪器,其探测资料可逐渐释放提供研究应用。1995 年,欧洲空间局 (ERA) 发射 ERS-1 卫星,其中搭载 GOME 遥感仪探测大气痕量成分浓度和分布。进入 21 世纪,以平流层和对流层大气化学过程,特别是以平流层-对流层交换及其相互作用为研究目标的德国/荷兰联合研制的卫星探测器 SCIAMACHY 于 2002 年 3 月发射成功,SCIAMACHY 将临边探测同垂直对地探测方式有机结合起来,实现了对平流层和对流层化学成分的同步观测。2002 年 5 月和 2004 年 7 月美国 NASA 分别发射 AQUA 和 AURA 卫星,提供覆盖全球的大气臭氧层、空气质量和气候关键要素的每日探测资料。2006 年 4 月,美国、加拿大与欧洲合作发射 CloudSat 和 CALIPSO 卫星,可以观测对流层顶附近卷云的垂直结构。另外,全球定位系统 (GPS) 无线电掩星观测也可用来反演 UTLS 区域的温度场结构,且垂直分辨率比较高。

飞机观测。飞机是观测大气三维结构的良好平台,所以使用飞机开展 UTLS 区域的观测有近 40 年的历史,从以前某类天气系统(如切断低压及对流层顶折叠等)上的单航线梯形上下飞行观测,到近期开展的覆盖半球的南北向多航线观测。对于了

解从热带到热带外的 UTLS 区域主要化学成分和气象场的分布、验证数值模式的结果以及诊断和定量估算上下层交换量,飞机测量提供了大量的宝贵资料。例如,美国 NASA 支持的臭氧和氮氧化物试验使用 DC-8 型飞机,于 1997 年 10~11 月在北大西洋上空民航欧洲-北美航线附近进行了多次飞行观测,飞机上不仅安装实地测量温度、湿度、风、臭氧、一氧化碳、氮氧化物 NO_x 、反应性氢氧化物和气溶胶粒子等仪器,还装备了可测量飞机上下臭氧廓线的差分吸收激光雷达和遥感反演温度廓线的微波辐射计。同一时期,完全对应的欧洲 POLI-NAT-2 项目,使用了类似装备的 FALCON-20 飞机,并进行了几次比较科学试验飞行。这两项飞机外场试验的主要观测区域是上对流层-下平流层^[9]。Flentje 等^[10]利用机载水汽差分吸收激光雷达在大西洋上的观测,研究了对流层顶折叠的水汽不均匀性。此外,欧洲的“空中客车臭氧和水汽测量计划 (MOZAIC)”自 1993 年实施以来,提供了许多航线 UTLS 区域的观测资料^[11],对于改进上对流层和下平流层区域的过程认识和对流层顶附近化学及输送的模式处理十分有价值。MOZAIC 三期将增设 NO_y 和 CO 的测量仪器。

地基的激光雷达和 VHF 雷达,可以提供站点上空温度、风、臭氧廓线和对流层顶等要素的长时间序列资料,不仅可以与卫星和探空观测进行相互验证,而且可以验证数值模式的模拟结果。一些高山站的地面观测结合模式,也能评估平流层向对流层的输送,例如,Zanis 等^[12]利用阿尔卑斯山上两站¹⁰Be 和⁷Be 一整年的测量,研究了平流层向对流层输送对低对流层臭氧的影响,揭示平流层下侵明显的季节变化,在春季的极大与气旋天气的联系。

目前,UTLS 区域探测还存在以下问题:(1)业务高空气球探空提供的资料垂直分辨率低、高层水汽资料不可用;(2)大气成分的气球探空站点少、观测变量少、历史资料时间短;(3)卫星观测垂直分辨率较低,定量反演的精度还需提高;(4)地基雷达观测的站点较少,分布也不尽合理;(5)飞机观测时次少,提供的资料不足以详细刻画 UTLS 中的要素分布及中小尺度交换过程。

3 平流层-对流层交换

对流层和平流层有着完全不同的热力、动力和

大气成分分布特征,在对流层,静力稳定度低,通过湿对流过程把地面空气和化学污染物输送到对流层高层只要几个小时,通过斜压波运动也只需要几天。而在平流层,稳定度高,同样距离的垂直输送需要一年或更长时间,这样必然伴随辐射加热或冷却。因此这两个区域之间的空气质量交换有着重要意义。平流层-对流层交换(STE)是控制 UTLS 区域臭氧、水汽和其他成分收支的一个非常重要的因子。

1950 年前后,为了解释平流层中水汽和臭氧的垂直-经向分布,Brewer 和 Dobson 先后提出了从赤道向两极的沟通对流层-平流层的垂直经向环流,即 Brewer-Dobson 环流^[1]。在热带外中高纬地区,天气系统引发的区域内对流层与平流层交换,特别是对流层顶折叠现象十分明显。因此,在 20 世纪 80 年代以前上下层的相互作用更多的是对这类过程作区域性个例研究。同时,研究表明行星波与重力波发生发展及其上传至平流层以上产生波不稳定、破碎,从而在这些高度上引起动量通量辐散,可能形成控制低层环流的抽引作用,从热带地区抽吸大气向上向极地方向输运。结合以大气臭氧、水汽全球大尺度分布及源汇关系的研究,促使大气上下层相互作用的全球尺度观点又重新获得深入认识,形成了 Holton 等^[1]总结的大气上下层相互作用中经圈环流的基本图像。这一图像刻画了几个本质性环节,但同时也在区域过程作用、量化及长期变化与变动性等方面留下了极大的需要深入研究解决的空间。

跨越对流层顶的 STE 过程具有多种尺度,表现为不同的物理过程,影响辐射强迫,改变上下层大气成分分布,并通过臭氧浓度变化等调制地面紫外辐射和平流层自身的辐射加热/冷却。然而,STE 过程与量化及其对 UTLS 区域大气成分分布的影响是一个远未解决的重大问题。下面列出几个问题及研究进展。

对流层顶的确定。STE 量化的一个问题是 对流层顶的确定和刻画,尤其在热带外地区^[13]。对流层顶是对流层和平流层之间的分界,从不同角度出发,对流层顶有着不同的确定方法,例如:热力对流层顶(温度递减率)、动力对流层顶(位涡)、化学成分对流层顶、最冷点(热带),等等。Fischer 等^[14]、Hoor 等^[15, 16]和 Pan 等^[17]根据中纬地区对流层顶区域观测到的 O₃-CO 关系,分析表明对流

层顶附近由于对流层和平流层空气的混合形成了一个转换层,转换层的厚度随纬度和季节而变化。研究表明,平流层向对流层的输送(STT)或对流层向平流层的输送(TST)的计算结果显著依赖于对流层顶的确定。因此对流层顶定义的不确定性是 STE 量化的一个问题。

另外,Birner 等^[18, 19]分析热带外对流层顶区域的精细结构时,发现存在很强的对流层顶逆温层(TIL),此处静力稳定度显著大于上方平流层典型稳定度值。因此,TIL 的存在必然影响 STE 过程,还会影响 Rossby 波和重力波的传播。Hakim^[20]分析中纬地区分析误差的垂直结构时发现,经向风最大误差出现在对流层顶附近。因此对流层顶附近大气精细结构特征也是 STE 过程与量化的一个问题。

STE 深交换。早期 STE 研究主要关注跨越对流层顶的空气或痕量成分通量。从交换所涉及的层次角度,STE 可以分成浅交换和深交换。实际上浅交换是部分可逆的,只是改变对流层顶区域大气成分的重新分布。例如,瞬时 STT(平流层空气进入但短时停留在对流层,并很快返回平流层),平流层空气可能很少有机会与对流层空气混合(瞬时 TST 也有同样的问题)。而深交换过程在很大程度上是不可逆的,通过从下平流层到低对流层甚至地面之间的交换,对大气化学产生特别显著、持久的影响。深交换过程主要有强对流(干、湿对流)可以在几小时内把地面空气和污染物输送到对流层顶附近;平流层深侵入可以把平流层空气和化学物质输送到低对流层。目前,深交换事件在 STE(尤其是化学物质)中的作用还是一个重要而知之甚少的领域。

拉格朗日方法。近几年开始发展基于拉格朗日观点的方法分析 STE^[21]。原因有两个:一是 Appenzeller 等^[22]采用全球制约原则计算热带外地区跨对流层顶质量净通量,估算净 STE 的收支方法不能解决单个交换过程,而 Wei^[23]方法在定量估算 STT、TST 甚至净 STE 时精度不高;第二个也是更重要的原因是精确计算跨对流层顶质量通量并不能完全刻画 STE 的相关方面,尤其是 STT 和 TST 的深度和驻留时间等对大气化学重要的反映化学成分混合程度的变量。例如:对流层顶附近的 STT 或 TST 浅交换过程对大气化学影响不明显,而对流层和平流层空气之间的不可逆交换事件,尤其是深交换过程具有重要影响。深交换事件有一些特殊

方面, 现有分析 STT 和 TST 浅交换的方法不能准确刻画 STT 和 TST 深交换。STE 深交换过程的这些特征只能通过拉格朗日方法来研究。目前, STE 诊断方法的改进以及相互之间的比较还有很多重要问题需要解决, 例如混合过程、对流参数化等^[3]。

空间尺度问题。STE 是一个跨越很大尺度范围的空气交换过程。全球尺度的 Brewer-Dobson 环流, 把热带对流层空气向上抽吸, 穿越对流层顶进入平流层, 在平流层向极、向下输送, 最后在热带外地区回到对流层。这种简单图像适用于位温 380 K 以上区域, 而且只有在时间平均和纬向平均的意义上可能是精确的。涡旋过程在 STE 中起着很重要的作用, 大量的穿越对流层顶的空气交换是通过天气尺度和中尺度过程完成的, 例如热带气旋和对流、热带外对流层顶折叠、切断低压、中尺度对流复合体。这些天气尺度和中尺度过程中的 STE 机制和定量化是一个未解决的问题。

对流层顶附近的混合。对流层与平流层空气的混合, 在化学成分的平流层-对流层交换中起重要的作用, 虽然经常被观测到, 但其定量化仍是一个挑战。近期, Pan 等^[24]利用飞机观测资料和 O₃-CO 相关, 分析研究了在热带外对流层顶何处发生混合; 使用平流层化学拉格朗日模式 (CLaMS) 模拟研究表明, 拉格朗日模式有潜力定量化混合对 UT-LS 化学成分的影响。

资料来源。目前, STE 研究的资料来源主要有两类, 一是利用全球尺度对流层和低平流层同化资料 (NCEP 和 ECMWF 资料) 诊断分析对流层顶上下的交换与全球对流层顶的气候学特征^[25, 26]。二是利用全球模式或 MM5 等区域模式模拟研究典型地区典型天气过程的大气上下层相互作用与交换, 对切断低压、对流层顶折叠等过程中的交换机制与定量特征进行研究^[27, 28]。虽然中尺度模式并不专为 STE 研究设计, 但结果表明在对流层顶上下过程研究中仍是有效的工具, 当然在初始化、云微物理、化学成分以及小尺度动力过程参数化等方面仍有大量工作要做。另外, 还需要发展云分辨模式描述对流过程中的强上升气流、云微物理和化学过程。

4 国内 STE 研究的进展

国内 STE 研究与国际上对这一问题的关注几乎同步开展, 但规模要小得多。早在 20 世纪 50 年

代国际地球物理年期间, 赵九章等老一辈科学家关注臭氧探测和平流层研究, 建立了我国 Dobson 臭氧总量观测站, 这一工作的持续提供了北京、昆明和西宁等地上空多年臭氧变化的第一手可靠资料。20 世纪 60 年代, 我国气象学家们关注平流层动力学的一些前沿问题。20 世纪 80 年代特别是 90 年代以来, 中层大气研究被列入我国大气科学重点发展方向之一, 开展了一系列研究工作。周秀骥等^[29~31]对青藏高原臭氧低值区的发现及其成因研究曾是我国十大科学新闻之一。郑向东等^[32]根据大气臭氧探空资料进行的研究, 指出臭氧分布与天气系统之间的联系。丛春华等^[33]使用 Wei 方法估算了青藏高原及其临近地区上空平流层-对流层间大气质量的交换量。崔宏等^[34]使用 Wei 方法对一次平流层-对流层交换过程中臭氧通量进行了估算。Chen 等^[35]开展利用 UARS 卫星资料分析与二维模式研究, 对平流层臭氧 NO_x 的 QBO 有了较深入的了解。卞建春等^[36]利用北京站的垂直高分辨率探空资料, 分析给出下平流层重力波的统计特征参数。在 20 世纪 90 年代, 中国科学院兰州高原大气物理研究所开展了平流层环流对于对流层气候影响的相关分析研究。

在中层大气探测研究方面, 中国科学院空间科学与技术中心、武汉物理与数学研究所, 武汉大学, 北京大学等分别建立中层大气密度激光雷达、钠层激光雷达、中频 MF Doppler 雷达投入观测, 在重力波传播以及重力波化学过程相互作用等方面均有新的探测结果和相应的前沿性理论工作^[37]。

中国科学院大气物理研究所在中层探测方面进行了长期努力, 研制成功 VHF 多普勒测风雷达、GPS 臭氧探空仪和平流层高空气球系统等。1990 年以来, 对于平流层火山气溶胶、飞机排放影响、二维模式研究、中纬度强对流三维重力波激发、对流层平流层交换的诊断、对流层顶的全球变化特征、切断低压对 STE 的贡献与机制、利用高分辨探空资料分析重力波统计特征研究等方面, 开展了比较系统的工作^[37]。

5 研究展望——青藏高原上空 UTLS 区域大气结构及 STE 过程研究

综上所述, STE 是一个全球性的多时空尺度的交换过程。同时, 我们注意到 STE 表现出明显的

区域特征。国外学者在许多地区,开展了一系列区域性的综合观测、诊断分析和模式模拟研究。

南亚地区由于大尺度的海陆分布以及青藏高原大地形造成的动力和热力影响,其大气环流表现出明显的特殊性与重要性,已为国内外的一些研究工作所揭示。夏季,南亚地区大气环流与持续深对流相耦合,上对流层反气旋环流向上扩展到下平流层,对流层顶相对比较高和冷^[38],并经常出现卷云^[39]。冬季,副热带西风急流位于青藏高原南缘,青藏高原北侧也经常出现另外一支西风急流,高原地处对流层顶断裂带,对流层顶经向梯度非常大。

在此特殊大气环流影响下,青藏高原地区 UTLS 层区大气成分分布也具有显著区域特征。在夏季,季风区 UTLS 区域水汽含量比较高,下平流层最高水汽含量出现在南亚季风区的北部,主要位于青藏高原及其南坡地区^[40]。近期研究还表明,夏季南亚季风区上对流层 CO、CH₄ 和 NO_x 含量高,这些化学物质的源主要来自地面排放^[41]。夏季青藏高原上空存在臭氧低值中心(臭氧低谷)^[29, 30, 42],分析表明臭氧浓度偏低主要出现在 25 km 高度以下^[43]。在冬季,10 月和 11 月份,高原周围经常存在一个臭氧总量环状高值区,Moore 和 Semple^[44]认为这是由于高原地区从地面一直延伸到下平流层的 Taylor 帽造成的。在 10 月至 2 月份,青藏高原上空在特定大气环流条件下(副热带西风急流调整及其所引起的垂直环流结构),还会出现微型臭氧洞或臭氧极低值事件,初步分析表明臭氧浓度减少主要出现在 25 km 高度以下^[45]。

已有研究表明,青藏高原地区 STE 过程不仅具有显著区域特征,而且在全球 STE 中占据重要地位。研究表明热带下平流层水汽浓度在北半球夏季比冬季大 60%,而夏季输送到全球热带平流层的水汽总量的大约 75% 发生在南亚季风和青藏高原地区^[46],其中青藏高原地区的对流输送是一个重要通道^[40]。初步研究表明,面积仅占北半球 5.6% 的东亚地区的中、高层大气物质年净交换量却占北半球的 29%^[26]。青藏高原 STE 对周边地区甚至全球 UTLS 大气有显著影响。例如,研究表明我国台湾中坜市上空卷云的形成大部分(3/4)起源于青藏高原地区,另有研究表明南半球臭氧总量的分布受到南亚高压向南的跨赤道气流的很大影响。

赤道辐合带是热带上升运动的集中地区,其深

厚积云对流旺盛,这表明热带深对流是该地区向上输送的重要机制。热带及中纬地区强对流作为重力波源亦是不可低估的。上对流层以及对流层顶附近卷云的形成与深对流及其所引起的重力波有着密切的关联。青藏高原亦是对流活动十分旺盛的特殊区域之一^[47, 48]。研究表明副热带西风急流附近的动力学过程在 STE 中起着重要作用^[24]。尽管急流中心是等熵混合的障碍,但是急流周围的天气尺度和中尺度动力学与大尺度波破碎一起产生对流层与平流层空气之间的不可逆交换。近期研究表明混合发生的位置决定于 Rossby 波相速度与急流最大风速之间的关系。研究还表明动力不稳定和对流不稳定都可能在急流附近产生湍流。冬季,副热带西风急流位于青藏高原的南缘,同时高原北侧也经常出现另外一支急流,青藏高原地处对流层顶断裂带;夏季,高原北侧为副热带西风急流,而南侧有一支东风急流。青藏高原地区这些不同尺度过程相互作用产生对流层和平流层之间的输送和混合。

因此,处于对流层中部的青藏高原及周边地区特殊的大地形以及特殊动力、热力结构效应构成了全球平流层、对流层间能量、物质交换重要“窗口”,该地区研究将对全球 STE 机制与影响问题的探讨具有重要意义。

现在对青藏高原地区 STE 过程及其对 UTLS 区域大气成分收支影响的研究还处于起步阶段,当前最大的问题首先在于对该地区 STE 过程及定量了解十分薄弱。具体包括:(1) UTLS 区域大气成分的分布及变化特征,(2) 对流层顶附近的精细结构,(3) 对流层顶附近以及下平流层重力波特征,(4) 对流层顶附近对流统计特征及其在 STE 中的重要性,(5) 急流在 STE 中的作用,(6) STE 过程在夏季青藏高原臭氧低谷和冬季青藏高原微型臭氧洞事件中的动力作用。

一方面,需要通过长期监测和个例综合探测获得新的事实,了解过程特征;另一方面,需要对已有资料进行综合诊断与数值模拟研究。对前者,主要在青藏高原及其临近地区开展相关综合观测,取得好的个例观测资料。对后者,则要立足于青藏高原,同时关注青藏高原与临近地区的相互作用,以及青藏高原在东亚地区乃至全球的重要性,过程研究与气候统计分析相结合,以诊断分析与数值模拟为手段,研究机制和定量特征。这二方面工作的同

步开展, 将增加对青藏高原及其临近地区 STE 过程及其在 UTLS 区域大气成分收支中作用的认识。

参考文献 (References)

- [1] Holton J R, Haynes P H, McIntyre M E, et al. Stratosphere-troposphere exchange. *Rev. Geophys.*, 1995, **33**: 403~439
- [2] Shepherd T G. Issues in stratosphere-troposphere coupling. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2002, **80**: 769~792
- [3] Stohl A, Bonasoni P, Cristofanelli P, et al. Stratosphere-troposphere exchange: A review, and what we have learned from STACCATO. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (D12): 8516, doi:10.1029/2002JD002490
- [4] 杨健, 吕达仁. 平流层-对流层交换研究的进展. *地球科学进展*, 2003, **18** (3): 380~385
Yang Jian, Lü Daren. Progresses in the study of stratosphere-troposphere exchange. *Adv. Earth Sci.* (in Chinese), 2003, **18** (3): 380~385
- [5] Harries J E. Atmospheric radiation and atmospheric humidity. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1997, **123**: 2173~2186
- [6] Forster P M de F, Shine K P. Stratospheric water vapor changes as a possible contributor to observed stratospheric cooling. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**: 3309~3312
- [7] Oltmans S J, Hofmann D J. Increase in lower-stratospheric water vapor at a midlatitude Northern Hemisphere site from 1981 to 1994. *Nature*, 1995, **374**: 146~149
- [8] Vömel H, Oltmans S J, Johnson B J, et al. Balloon-borne observations of water vapor and ozone in the tropical upper troposphere and lower stratosphere. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**: 1029/2001JD000707
- [9] Singh H B, Tompson A M, Schlager H. SONEX airborne mission and coordinated POLINAT-2 activities: Overview and accomplishments. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26** (20): 3053~3056
- [10] Flentje H, Dörnbrack A, Ehret G, et al. Water vapor heterogeneity related to tropopause folds over the North Atlantic revealed by airborne water vapor differential absorption lidar. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**: D03115, doi: 10.1029/2004JD004957
- [11] Marenco A, Thouret V, Nedelec P, et al. Measurement of ozone and water vapor by Airbus in service aircraft: The MOZAIC airborne program, an overview. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103** (D19): 25631~25642
- [12] Zanis P, Gerasopoulos E, Priller A, et al. An estimate of the impact of stratosphere-to-troposphere transport (STT) on the lower free tropospheric ozone over the Alps using ^{10}Be and ^7Be measurements. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (D12): 8520, doi:10.1029/2002JD002604
- [13] Bethan S, Vaughan G, Reid S J. A comparison of ozone and thermal tropopause heights and the impact of tropopause definition on quantifying the ozone content of the troposphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1996, **122**: 929~944
- [14] Fischer H, Wienhold F G, Hoor P, et al. Tracer correlations in the northern high latitude lowermost stratosphere: Influence of cross-tropopause mass exchange. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**: 97~100
- [15] Hoor P, Fischer H, Lange L, et al. Seasonal variations of a mixing layer in the lowermost stratosphere as identified by the CO-O₃ correlation from in situ measurements. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107** (D5): 10.1029/2000JD000289
- [16] Hoor P, Fischer H, Lelieveld J. Tropical and extratropical tropospheric air in the lowermost stratosphere over Europe: A CO-based budget. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**: L07802, doi:10.1029/2004GL022018
- [17] Pan L, Randel W J, Gary B L, et al. Definitions and sharpness of the extratropical tropopause: A trace gas perspective. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D23103, doi: 10.1029/2004JD004982
- [18] Birner T, Dörnbrack A, Schumann U. How sharp is the tropopause at midlatitudes? *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29** (14): 1700, doi:10.1029/2002GL015142
- [19] Birner T. Fine-scale structure of the extratropical tropopause region. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**: D04104, doi: 10.1029/2005JD006301
- [20] Hakim G J. Vertical structure of midlatitude analysis and forecast errors. *Mon. Wea. Rev.*, 2005, **133**: 567~578
- [21] Wernli H, Bourqui M. A Lagrangian '1-year climatology' of (deep) cross-tropopause exchange in the extratropical Northern Hemisphere. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107** (D2): 4021, doi:10.1029/2001JD000812
- [22] Appenzeller C, Holton J R, Rosenlof K H. Seasonal variation of mass transport across the tropopause. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**: 15071~15078
- [23] Wei M Y. A new formulation of the exchange of mass and trace constituents between the stratosphere and troposphere. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44** (20): 3079~3086
- [24] Pan L, Konopka P, Browell E V. Observations and model simulations of mixing near the extratropical tropopause. *J. Geophys. Res.*, 2006, **111**: D05106, doi: 10.1029/2005JD006480
- [25] Sprenger M, Wernli H. A northern hemispheric climatology of cross-tropopause exchange for the ERA15 time period (1979-1993). *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (D12): 8521, doi:10.1029/2002JD002636
- [26] 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 based on 2000 NCEP data. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2004, **28** (2): 294~300

- [27] 杨健, 吕达仁. 东亚地区一次切断低压引起的平流层、对流层交换数值模拟研究. 大气科学, 2003, **27**: 1031~1044
Yang Jian, Lü Daren. A simulation study of stratosphere – troposphere exchange due to cut-off-low over Eastern Asia. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2003, **27**: 1031~1044
- [28] 杨健, 吕达仁. 东亚地区平流层、对流层交换对臭氧分布影响的模拟研究. 大气科学, 2004, **28** (4): 579~588
Yang Jian, Lü Daren. Simulation of stratosphere – troposphere exchange effecting on the distribution of ozone over Eastern Asia. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2004, **28** (4): 579~588
- [29] 周秀骥, 罗超, 李维亮, 等. 中国地区臭氧总量变化与青藏高原低值中心. 科学通报, 1995, **40** (15): 1396~1398
Zhou Xiuji, Luo Chao, Li Weiliang, et al. Variation of total ozone over China and the Tibetan Plateau low center. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1995, **40** (15): 1396~1398
- [30] Zou H. Seasonal variation and trends of TOMS ozone over Tibet. *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**: 1029~1032
- [31] Liu Yu, Li Weiliang, Zhou Xiuji. Mechanism of formation of ozone valley over Tibetan Plateau in summer transport and chemical process of ozone. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20**: 103~109
- [32] 郑向东, 李维亮, 周秀骥, 等. 臭氧垂直分布个例观测中次峰现象的诊断分析. 自然科学进展, 2001, **11** (11): 1181~1185
Zheng Xiangdong, Li Weiliang, Zhou Xiuji, et al. Diagnostic analysis of subpeaks in the ozone profile measurements. *Progress in Natural Science*, 2001, **11** (11): 1181~1185
- [33] 丛春华, 李维亮, 周秀骥. 青藏高原及其邻近地区上空平流层-对流层之间大气的质量交换. 科学通报, 2001, **46** (22): 1914~1918
Cong Chunhua, Li Weiliang, Zhou Xiuji. Regional mass exchange between stratosphere and troposphere over Tibetan and neighborhood area. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2001, **46** (22): 1914~1918
- [34] 崔宏, 赵春生, 秦瑜, 等. 一次平流层-对流层交换过程中臭氧通量的估算. 科学通报, 2004, **49** (5): 506~513
Cui Hong, Zhao Chunsheng, Qin Yu, et al. An estimation of ozone flux in a stratosphere-troposphere exchange event. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49** (2): 167~174
- [35] Chen Yuejuan, Zheng Bin, Zhang Hong. The features of ozone quasi-biennial oscillation in tropical stratosphere and its numerical simulation. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, **19** (5): 777~793
- [36] 卞建春, 陈洪滨, 吕达仁. 用垂直高分辨率探空资料分析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 Jianchun, Chen Hongbin, Lü Daren. Statistics of gravity waves in the lower stratosphere over Beijing based on high vertical resolution radiosonde. *Science in China* (Series D) (in Chinese), 2005, **48** (9): 1548~1558
- [37] Chen Zeyu, Chen Hongbin. Advances in the study of the middle and upper atmosphere. *Chinese J. Space Sciences*, 2004, **24** (suppl.), 128~133
- [38] Highwood E J, Hoskins B J. The tropical tropopause. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1998, **124**: 1579~1604
- [39] Wang P H, Minnis P, McCormick M P, et al. A 6-year climatology of cloud occurrence frequency from Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II observations (1985 – 1990). *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**: 29407~29430
- [40] Fu R, Hu Y, Wright J S, et al. Convective transport over the Tibetan Plateau—A short-circuit of water vapor and polluted air to the global stratosphere. *PNAS*, 2006, **103**: 5664~5669, 10.1073/pnas.0601584103
- [41] Randel W, Park M. Deep convective influence on the Asian summer monsoon anticyclone and associated tracer variability observed with AIRS. Submitted to *J. Geophys. Res.*, 2005
- [42] 周秀骥, 李维亮, 陈隆勋, 等. 青藏高原地区大气臭氧变化的研究. 气象学报, 2004, **62** (5): 513~527
Zhou Xiuji, Li Weiliang, Chen Longxun, et al. Study of ozone change over Tibetan Plateau. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (5): 513~527
- [43] 周任君, 陈月娟. 青藏高原和伊朗高原上空臭氧变化特征及其与南亚高压的关系. 中国科学技术大学学报, 2005, **35** (6): 899~908
Zhou Renjun, Chen Yuejuan. Ozone variations over the Tibetan and Iranian Plateaus and their relationship with the South Asia high. *J. University of Science and Technology of China* (in Chinese), **35** (5): 899~908
- [44] Moore G W K, Semple J L. A Tibetan Taylor Cap and a halo of stratospheric ozone over the Himalaya. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**, L21810, doi:10.1029/2005GL024186
- [45] 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 Science Bulletin*, 2006, **51** (7): 885~888
- [46] Gettelman A, Kinnison D E, Dunkerton T J, et al. Impact of monsoon circulations on the upper troposphere and lower stratosphere. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: D22101, doi: 10.1029/2004JD004878
- [47] 徐祥德, 周明煜, 陈家宜, 等. 青藏高原地-气过程动力、热力结构综合物理图像. 中国科学(D辑), 2001, **31**: 428~440
Xu Xiangde, Zhou Mingyu, Chen Jiayi, et al. A comprehensive physical pattern of land – air dynamic and thermal structure on the Qinghai-Xizang Plateau. *Science in China* (Series D), 2002, **45** (7): 577~594
- [48] Gettelman A, Salby M L, Sassi F. Distribution and influence of convection in the tropical tropopause region. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**: D10, 10.1029/2001JD001048