

文章编号: 1001-8166(2003)03-0380-06

平流层—对流层交换研究进展

杨健, 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 平流层与对流层之间的物质输送和混合(STE)是控制自然和人为排放的化学痕量物质对大气成分影响的一个重要过程。STE可以影响温室气体在上对流层和下平流层中的垂直分布,进而影响气候。要预报全球气候变化就必须了解平流层与对流层之间动力、化学及辐射的耦合。从STE研究的尺度问题 热带和中纬度地区STE研究以及我国STE研究现状进行了评述。STE具有多种尺度和形式,热带外平流层由波强迫驱动的全球尺度环流,可以诊断长时间尺度的STE,它不能充分描述短时间尺度过程。热带外低平流层环流不能简单地描述为纬向平均,要正确描述痕量气体的分布必须包含纬向非对称的天气尺度过程。热带地区的漏滴管理论提供了一个新的诊断STE框架。目前对中纬度地区对流层顶折叠和切断低压的研究是比较充分的。

关键词 平流层 对流层 交换

中图分类号 P433 **文献标识码** A

要预报全球气候变化我们必须了解平流层与对流层之间动力、化学及辐射的耦合。平流层—对流层交换(STE)是控制自然和人为排放的化学痕量物质对大气成分影响的一个主要过程。下平流层和上对流层之间的质量交换可以将引起 O_3 损耗的气体输送到平流层,这种交换还将 O_3 富集的平流层空气向下输送到对流层。平流层到对流层的输送不仅包括平流层臭氧的清除机制,而且也代表了对流层化学系统中 O_3 及其它活性物质的输入。平流层、对流层交换的化学效应还会影响下平流层和上对流层的辐射通量平衡^[1,2]。此外穿越对流层顶的质量输送是大气模式中的一个关键过程,然而现在我们还不能完全理解和模拟穿越对流层顶的输送过程。

1 不同尺度STE的研究

1.1 STE的全球尺度研究

Brewer^[3]为了解释在平流层观测到的低水汽混合同比,提出在热带强积云对流使空气穿过对流层顶

进入平流层,由于热带地区的对流层顶又高又冷,这样气团在低温的对流层顶经过脱水,水汽混合同比降低,随后气团在平流层向下、向极地方向移动,由于质量连续的约束,在热带外是一支进入对流层的返回流。

Dobson等^[4]指出这种向极、向下的环流,即Brewer-Dobson环流是与极地下平流层中观测到的高臭氧浓度一致的,极地下平流层远离臭氧的光化产生区,因此那里的高臭氧浓度来自于热带地区的输送。始于1979年的卫星观测数据充分肯定了这个经典的全球尺度的物质交换和运输图像^[5],此后臭氧及其它大气成分的观测^[6]以及理论和数值试验的结果^[7]都证实了这一结论。

Haynes等^[8]指出主要是作用在热带外平流层的波引起的强迫,驱动全球尺度的经向环流,这样气团在热带被向上、向极推动,然后从“the overworld”向下推入到热带外的下平流层。Holton等^[9]同样强调了热带外“the overworld”中的波和涡旋,他指出波

收稿日期: 2002-10-25 修回日期: 2003-03-18

* 基金项目 国家自然科学基金项目“航空业对平流层下部、对流层上部辐射—光化学过程影响”(编号:49875001);中国科学院大气物理研究所知识创新重大项目“上对流层、下平流层过程及其气候效应研究”(编号:9-3102)资助。

作者简介 杨健(1970-),女,天津人,博士研究生,主要从事大气化学和大气研究 E-mail: yangjian_jiap@yahoo.com

引起的强迫驱动着一种热带外全球尺度的流体动力学抽吸泵,从热带下平流层向上、向极方向抽吸空气,然后向极、向下将气团推到热带外对流层。形成这个“泵”的机制是向上传播到平流层以上高度的行星波和重力波破碎后产生动量通量辐散所致。这种全球尺度环流使平流层远离辐射平衡条件。他同时指出,引起的强迫可以认为是非局地控制的,在热带外主要是向下控制(downward control),即穿过某一等压面的质量交换由该等压面之上的大尺度涡旋和动量的辐合、辐散引起的经向流动控制^[7],并通过穿过下平流层等熵面的质量输送横向的到达热带地区。

由于北半球冬季波引起的强迫最强,因此最大交换率也出现在冬季。这种全球尺度环流的泵机制经常被动力学家作为波驱动的环境谈及,而且它也是全球尺度STE,尤其是季节和长时间尺度STE的一种有效的测试手段。流体动力学抽吸泵的存在不仅解释了观测到的热带下平流层温度低于辐射平衡值^[10],而且对于那些在热带下平流层有光化学汇的长寿命物质(如CFCs、N₂O、CH₄等)在对流层中存在的时间长短,抽吸泵也起着主要控制作用。对于热带外地区的抽吸泵作用,现在只是了解其物理真实性,但是对其强度、季节和年际变化、引起环流动力过程的非线性方面,即有关抽吸泵作用如何到达热带的精确方式依然不甚了解。

现在大多数全球尺度的输送和混合的诊断方法依然停留在纬向平均的框架,这在最低平流层部分是不充分的。Brewer-Dobson环流在热带上升已经被许多化学物质和水汽的观测所证实,如何对其定量化是一重要问题。这一上升与剩余环流有紧密联系,而剩余环流又与非绝热环流紧密联系。由于剩余环流不能被精确地测量,许多研究通过非绝热增温估计。众所周知这种计算是非常困难的,因此现在对于热带上涌的估计是不确定的。热带平均上涌被非绝热增温所平衡,即热带下平流层温度低于辐射平衡温度,热带外下平流层向极地输送被波的强迫所平衡。Yulaeva等^[11]提出,热带下平流层温度的年循环由热带外地区波强迫的年循环控制,Rosenlof等^[12]通过诊断分析支持了这一观点,但是对这一联系详细的定量理论依然缺乏。

1.2 STE的中尺度过程研究

平流层、对流层交换最简单、合理、定性的模型描述为在各半球赤道地区单一的穿越对流层顶的上升运动,在平流层向极、向下输送,最后在热带外地

区回到对流层^[3,4,23]。这种简单的图像仅适用于位温在380 K以上的区域(热带地区对流层顶的平均位温为380 K),而且只有在时间平均和纬向平均的意义上它可能是精确的。但是这并不能完全描述交换过程的物理机制,特别是涡旋过程在平流层、对流层交换中也起着很重要的作用,大量的穿越对流层顶的质量交换是通过中尺度混合完成的。热带外地区的最低平流层环流不能以简单的纬向平均环流描述,特别是痕量气体如臭氧和水汽的分布,如果不包含纬向非对称的天气尺度过程是得不到正确描述的,热带外地区的天气尺度现象对于研究穿越对流层顶质量交换时空分布的定量化理解是十分重要的。

热带积云对流穿过对流层顶进入平流层是热带地区平流层、对流层交换的主要方式。中纬度地区通过两种过程完成交换:一种是沿等熵面的绝热过程的输送与交换,这种交换主要由涡动来完成,如伴随着上对流层气旋生成及大尺度波动的对流层顶折叠处^[14-16]、稳定的急流附近^[17,20]、高空槽及切断低压发展过程中平流层物质进入对流层^[19,20];另一种是跨越等熵面的非绝热过程,如重力波破碎和不稳定切变引起的混合及湍流过程,这种交换是不可逆的而且引起跨越等熵面的物质输送使得平流层物质进入对流层。在高纬度地区主要是由于平流层的动力下沉使得平流层空气进入对流层。

许多作者对中尺度STE过程进行模拟研究,但是平流层、对流层的物质交换在定量化上存在很大的不确定性。不同作者针对不同个例,用不同的方法计算出的交换通量存在很大差别。不同研究聚焦不同的交换机制,结果非常离散,臭氧通量在 $12 \times 10^{10} \sim 137 \times 10^{10}$ 分子/(cm²·s),空气质量通量在 $0.5 \times 10^9 \sim 3.5 \times 10^9$ kg/(m²·s),对流层O₃收支研究中由平流层进入对流层的O₃存在很大的不确定性,由400 Tg/a到1 400 Tg/a^[21]。这种离散化说明在穿过对流层顶质量交换的定量上还存在很多问题。

2 热带地区STE研究

2.1 热带平流层喷泉假设

在热带地区受哈德利(Hadley)环流上升支的影响空气质量是由对流层向平流层输送的,这主要是穿越对流层顶的非绝热过程造成的^[22]。但是热带地区对流层顶的温度很高,难以解释平流层中观测到的很低的水汽混合比。Newell等^[23]提出热带平流层喷泉的假设,即热带地区向平流层的输送主要发生在北半球冬季的热带西太平洋。最近的观测和

模式结果认为 尽管热带西太平洋地区的对流层顶温度比热带平均温度低 而且经常观测到卷云 但是那里的对流层顶是净的下沉区^[24, 25] 这与 Newell 的假设是矛盾的。Holton 等^[26] 通过二维模式模拟研究提出一个新的假设, 即水平输送使得在其他地区已经达到对流层顶的气团 被输送到热带西太平洋冷区, 气团在被输送过程中脱水 水汽混合比降低。

2.2 副热带输送障碍

Trepte 等^[27] 在皮纳图博(Pinatubo)火山爆发中观测到在 22 km 以上气溶胶由热带地区向热带外的输送很弱, 即副热带地区存在着输送障碍。不同纬度长寿化学相关成分的廓线观测, 以及卫星观测的下平流层水汽结果都表明输送障碍的存在。Plumb^[28] 用热带管模式(tropical pipe) 对此进行描述, 即热带的空气被向上平流而不与中纬度交换。但是化学模式研究表明用严格的热带管模型不能解释观测的化学物质廓线, 这需要中纬度地区空气的稀释, 尤其是 22 km 以下的地区。副热带输送障碍的存在及其强度是有季节性的, 从秋季到春季其边缘将被侵蚀即热带管存在滴漏地区, 大量的研究证明热带管在 22 km 以下存在滴漏地区。现在许多研究是针对热带管滴漏的定量化, 因为这对于研究飞机排放的 NO_x 对 O₃ 层的影响有重要意义。Volk 等^[29] 通过垂直上涌和化学过程与滴漏的平衡估算出在热带 21 ~ 22 km 上升的空气中 有 50% 来源于热带外。

现在研究 STE 的框架发生着迅速的变化, 通过飞机和卫星用新方法进行化学物质的测量 尤其是在热带地区, 为定量化输送和混合提供了新的可能。现在需要发展一个量化的诊断框架对测量结果进行解释并同模式结果进行比较。特别是我们应该得到除古典的 κ -理论(其代表几十年前的认识状态)之外的框架, 滴漏管理论是基于这种考虑的第一步。

2.3 磁带记录

热带对流层顶一般假设为物质向上输送的面, 假如热带与热带外的横向和垂直交换很小, 那么如果对流层顶物质浓度随时间变化, 在其上层会发现同样的变化, 只是在时间上滞后。Kley 等^[30] 通过气球观测下平流层的比湿提出这一机制。Mote 等^[31] 将其称为大气磁带记录, 上层大气研究卫星(UARS)中的微波临边遥感设备(MLS)观测的水汽混合比, 及 HALOE 试验中的水汽测量均证实了这种效应。Mote^[31] 指出由于热带下平流层的空气实际上独立于热带外地区的空气, 因此向上输送的

气至少在 18 个月内保存着对流层顶条件的记忆。水汽在热带对流层顶的改变与环境温度有关, 因为限制了通过该高度的水汽混合比。

2.4 准二年振荡(QBO)

热带下平流层纬向风存在 QBO, 其发生的地区也是对流层物质向上输送的区域, QBO 将通过其二级经向环流影响着向上的输送过程。早在 1982 年 Plumb 等^[32] 就指出, 与经向环流有关的经向输送, 同赤道纬向风的 QBO 有联系。Trepte 等^[27] 指出气溶胶在热带下平流层向中纬度输送的机制强烈地依赖于赤道的纬向风的位相, 存在向西切变相的 QBO 时示踪物向高纬度输送更强些。Carr 等^[33] 发现用微波临边遥感(MLS)探测出的 22 hPa 等压面上的水汽混合比与 QBO 指数引起的垂直速率异常相关。Mote 等^[31] 通过模式计算指出, 当纬向风为负的垂直切变即东风时意味着赤道温度低, 上升速度加强。相反, 正的垂直切变即西风时意味着高的温度和上升速度的减弱。Marco 等^[34] 用 GCM 模式进行了一系列试验, 研究 QBO 对赤道低平流层的温度场、垂直输送及比湿的影响。他指出, QBO 的温度信号(海平面温度 SST)改变着向上输送的空气的比湿, 而且其二级环流改变着向上输送的速率。这样 QBO 为东相(西风)时向上输送的气团湿, 而且其向上的速率低于西相的 QBO。

3 中纬度地区的 STE 研究

3.1 对流层顶折叠

过去 40 年通过观测、个例研究及模式模拟对对流层顶折叠进行了广泛的研究, Reed^[14] 和 Danielsen^[35] 等先后提出了中纬度地区平流层向对流层输送的概念模式, 指出中纬度地区高空的中尺度气旋生成过程使对流层顶发生折叠, 触发了物质由平流层向下的输送。20 世纪 70 年代以后一系列飞机观测支持了 Danielsen 的理论^[36], 世界气象组织(WMO)^[37] 对此进行了总结。Browell^[38] 和 Kriz^[39] 给出新的个例, 这些研究证实大量的 STE 事件的发生与对流层顶折叠相关, 折叠过程的结构和动力学特性与高空锋生有关^[40]。

西风带急流中斜压不稳定的发展和经常伴随着地面气旋的上对流层锋生作用, 引起中纬度地区对流层顶折叠^[41]。为了维持热成风的平衡, 出现一个二级横向的非地转环流, 二级环流的平流作用使温度梯度增强, 导致锋的快速加强, 平流还使气团从赤道地区几千公里处的下平流层向下、向赤道方向

运动,并深入到对流层。这种下沉使具有平流层特征的PV值很高的气团沿倾斜的等熵面平流,对流层顶发生折叠,同时长舌状的冷空气沿锋面进入到对流层。被折叠的空气PV值很高,并且相对较干,长舌边界的空气通过小尺度过程逐渐同对流层的空气不可逆地混合。依赖于斜压波的发展,折叠中的气团可以脱离平流层而后散布到对流层,并与对流层空气交换。此外,折叠中的气团随时间衰退可能又返回到平流层,则交换总量限制在折叠发生时段内,而且依赖于空气沿折叠边界漏出的速率。另一种情况是沿某一等熵面进行的小尺度混合或通过包括辐射及潜热释放在内的大尺度平均的非绝热过程。

早期对流层顶折叠的研究用三维原始方程模式,由于对流层顶折叠是小尺度过程,而模式的分辨率较低,其结果有一定的局限性。最近高分辨率的中尺度模式(水平分辨率由50~100 km)被用来模拟与上层斜压波发展相联系的对流层顶折叠^[42, 43]。

3.2 切断低压

切断低压(Cut-Off-Lows,简称COLs)有时被称为冷池,是上对流层气旋,一般伴随着对流层流场的阻塞形势。当高空槽向赤道方向延伸的足够长,并在其末端形成闭合的气旋性环流时即形成切断低压。它是高空气流中独立的气旋性涡旋,是急流沿经向延伸的结果^[44]。在常规的高空图上它是闭合的等位势高度线,一般可维持几天,但是有些个例可以维持到3周^[45]。在动力上COLs是跨越对流层和平流层的等熵面上独立的闭合的高位涡区^[13],一般将这个高度称为“the middleworld”^[46]。切断低压包含的空气一般起源于更高的纬度,我们可以认为中纬度地区的COLs将极区的高PV区向低纬方向移动。切断低压中的“the middleworld”区域的典型厚度大约为2~3 km,由于PV的增强使涡度及稳定度达到最大值,PV距平实际上包含闭合的平流层空气,切断低压的对流层顶比其周围空气的对流层顶要低,它所包含的温度的温度一般也比周围空气的低。低压中冷空气可以诱发深对流,特别是在夏季和海洋表面,切断低压下面特别是其东南边缘的地面将形成低压并带来大量降水^[15]。Bamber^[47]通过飞机测量上对流层切断低压中的痕量气体,发现在切断低压中上对流层大约2 km厚的空气,其化学特性介于对流层和平流层之间,即O₃高浓度、CFCs和碳氢化合物低浓度。这表明,平流层与对流层的空气发生了混合。一种可能的机制是积雨云的云砧穿过对流层顶,使平流层中臭氧富集的空气进入上

对流层,同时对流层顶在更高的高度上重建^[37]。Bamber^[47]指出,切断低压是平流层、对流层混合的活跃区,对STE有很大贡献。切断低压中的平流层、对流层交换可以通过异常低的对流层顶(切断低压的特征)对流入产生,也可以通过与切断低压相关的急流附近的湍流混合产生,或是通过沿切断低压边缘的对流层顶折叠产生^[15, 40, 48]。Price等^[45]对切断低压进行了统计,他们指出,只有极地类型的切断低压对STE有明显贡献。而且他们认为切断低压引起的平流层、对流层交换与气旋生成区的对流层顶折叠相比要小。

4 国内STE研究现状

国内下平流层、上对流层区域的研究开展较晚。郑向东探讨了天气过程对对流层臭氧垂直分布的影响,指出低空的上升运动与高空的下沉运动对臭氧次峰的形成有重要作用。韩志伟通过2个个例研究了春秋两季东亚地区天气系统引发的对流层顶的波动和折叠对对流层臭氧的影响。他们的工作没有将对流层顶折叠引起的物质上、下交换定量化,而且研究的侧重点都在对流层。

为了评估平流层和对流层之间的质量、水汽和化学成分的交流在全球气候和环境变化中的重要作用,研究对流层顶的空间分布结构和时间变化是很必要的。李国辉用40年的NCEP资料分析了对流层顶的时空分布结构及变化。陈泽宇对中纬度深厚对流诱发平流层重力波进行了数值模拟研究,指出对流活动和由此诱发的重力波在影响有关穿越对流层顶输送过程中的作用不同,重力波在维持对流层顶稳定方面起着积极作用。杨健用NCEP资料诊断北半球STE,结果表明东亚地区除夏季外其他三季都存在很强的平流层向下的输送通量,且其中心位置移动不大,这说明东亚地区的STE对北半球平流层、对流层交换研究的重要性。随后又用中尺度模式模拟研究了四季东亚切断低压引起的STE

郑向东: 对流层臭氧垂直分布结构及其变化的分析[D]. 北京大学, 2000.

韩志伟: 东亚地区对流层臭氧的数值模拟研究[D]. 中国科学院大气物理研究所, 2000.

李国辉: 上对流层和下平流层若干问题研究[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2000.

陈泽宇: 博士后研究工作总结出站报告[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2000.

杨健: 东亚地区平流层、对流层交换过程研究[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2002.

并将其定量化。

5 STE 研究展望

(1) 尽管许多人对平流层—对流层交换进行了研究,但是在定量描述全球及区域尺度上的交换量依然有很多问题。现有的诊断框架基本上是基于纬向平均的,这在低平流层是不合适的。因此需要发展一个新的定量的诊断框架,可以对观测资料进行解释并与模式结果进行比较,漏滴管理论是基于这种考虑的第一步。

(2) 现有的全球环流模式(GCM)分辨率较低,对对流层顶折叠、切断低压以及漂流混合等中小尺度过程引起的STE只能通过参数化实现,因此对STE动力过程的描述还不充分。

(3) 利用全球化学输送耦合模式来研究大气化学成分(主要是臭氧)在对流层顶附近的交换是目前大气化学研究的一个重要方面。但目前所得到的结果有很大的不确定性,不同的模式计算出的臭氧向上、向下交换量差异很大。主要问题是现有全球化学—气候模式中,对对流层顶附近的化学动力过程描述较简单。而准确描述臭氧的交换量对于全球气候变化的研究是至关重要的,完善的动力化学耦合模式是未来的发展方向。

(4) 东亚地区平流层、对流层相互作用具有多种尺度和明显的季节变化,并有以青藏高原为代表的强地形作用,下平流层和上对流层区域在冬夏季均有不同形式的交换。因此东亚地区平流层、对流层交换的观测模拟研究对全球STE研究具有重要意义。

参考文献(References):

- Ramaswamy V, Schwarzkopf M D, Shine K P. Radiation forcing of climate from halocarbon-induced global stratospheric ozone loss [J]. *Nature* 1992 355 810-812.
- Tsumi R, Bekkis, Law K S. Indirect influence of ozone depletion on climate forcing by clouds [J]. *Nature* 1994 372 348-351.
- Brewer A M. Evidence for a world circulation provided by the measurement of helium and water vapor distribution in the stratosphere [J]. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 1949 75 351-363.
- Dobson A E, Hinds A E J, Winstock E M, et al. Origin and distribution of polyatomic molecules in the atmosphere [J]. *Proceedings of the Royal Society of London* 1956 A236 187-193.
- Carr E S, Harwood R S, Mote P W, et al. Tropical stratospheric water vapor measured by the microwave limb sounder (MLS) [J]. *Geophysical Research Letters* 1995 22 591-594.
- Shapiro M A. Turbulent mixing within tropopause folds as a mechanism for the exchange of chemical constituents between the stratosphere and troposphere [J]. *Journal of Atmospheric Science*, 1980 37 994-1004.
- Holton J R. On the global exchange of mass between the stratosphere and troposphere [J]. *Journal of Atmospheric Science* 1990, 47 392-395.
- Haynes P H, Marks C J, McIntyre M E, et al. On the "downward control" of the extratropical diabatic circulations by eddy-induced mean zonal flow [J]. *Journal of Atmospheric Science* 1991, 48 651-678.
- Holton J R, Haynes P H, McIntyre M E, et al. Stratosphere-troposphere exchange [J]. *Reviews of Geophysics* 1995 33 403-439.
- Fels S B. Radiative-dynamical interactions in the middle atmosphere [J]. *Advances in Geophysics*, 1985 28A 277-300.
- Yulaeva E, Holton J R, Wallace J M. On the cause of the annual cycle in tropical lower-stratospheric temperatures [J]. *Journal of Atmospheric Science* 1994 51 169-174.
- Rosenlof K H. Seasonal cycle of the residual mean meridional circulation in the stratosphere [J]. *Journal of Geophysical Research* 1995 100 5 173-5 191.
- Holton J R. Troposphere-stratosphere exchange of trace constituents: The water vapor puzzle [A]. in: Holton J R, Masuno T, eds. *Dynamics of the Middle Atmosphere* [C]. Tokyo, Japan: Terra Scientific Publishing Company 1980 369-385.
- Reed R J. A study of a characteristic type of upper level frontogenesis [J]. *Journal of Meteorology*, 1955 12 226-237.
- Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 1985 3 887-946.
- Vaughan G, Price J D, Howells A. Transport in the troposphere in a tropopause fold [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 1994 120 1085-1103.
- Allam R J, Tuck A F. Transport of water vapor in a stratosphere-troposphere general circulation model. 1. Trajectories [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 1984 110: 357-392.
- Kelly K K, Tuck A F, Heidt L E, et al. A comparison of ER-2 measurements of stratospheric water vapor between the 1987 Antarctic and 1989 Arctic airborne missions [J]. *Geophysical Research Letters* 1990 17(4) 465-468.
- Anzelli G, Pelon J, Beekmann M, et al. Ground-based lidar studies of ozone exchanges between the stratosphere and the troposphere [J]. *Journal of Geophysical Research* 1991 96 22 401-22 422.
- Wirth V. Diabatic heating in an axisymmetric cut-off cyclone and related stratosphere-troposphere exchange [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 1995 121 127-147.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. The third assessment report, Climate Change. The Scientific Basis: Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases [R]. IPCC, 2001.
- Hoerling M P, Schaak TK, Jensen A J. A global analysis of stratospheric tropospheric exchange during northern winter [J]. *Monthly Weather Review* 1993 121 162-172.
- Newell R E, Gould-Stewart S. A stratospheric fountain? [J]. *Journal of Atmospheric Science* 1981 38 2 789-2 796.
- Shewood SC. A "stratospheric drain" over the Maritime continent [J]. *Geophysical Research Letters* 2000 27 677-680.
- Gettelman A, Holton J R, Douglas A R. Simulations of water vapor in the lower stratosphere and upper troposphere [J]. *Journal of Geophysical Research* 2000 105 9 9003-9 023.
- Holton J R, Gettelman A. Horizontal transport and the dehydration of the stratosphere [J]. *Geophysical Research Letters* 2001,

- 14 2 799-2 802.
- [27] Trepte C R, Hitchman M H. Tropical stratospheric circulation deduced from satellite aerosol data[J]. *Nature*, 1992, 355: 626-628.
- [28] Plumb R A. "Tropical pipe" model of stratospheric transport[J]. *Journal of Geophysical Research* 1996, 101: 3 957-3 972.
- [29] Volk C M, Elkins J W, Fahey D W, et al. Quantifying transport between the tropical and mid-latitude lower stratosphere[J]. *Science* 1996, 272: 1 763-1 768.
- [30] Kley D, Stone E J. In situ measurements of the mixing ratio of water vapor in the stratosphere[J]. *Journal of Atmospheric Science* 1979, 36: 513-2 524.
- [31] Mote P W, Rosenfiof K H, McInyre M E, et al. An atmospheric tape recorder: The imprint of tropical tropopause temperature on stratospheric water vapor[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101: 3 989-4 006.
- [32] Plumb R A, Bell R C. A model of the quasi-biennial oscillation on an equatorial beta-plane[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 1982, 108: 335-352.
- [33] Carr E S, Harwood R S, Mote P M, et al. Tropical stratospheric water vapor measured by the microwave limb sounder (MLS)[J]. *Geophysical Research Letters* 1995, 22: 691-694.
- [34] Marco A G, Bengtsson L. Potential role of the quasi-biennial oscillation in the stratosphere-troposphere exchange as found in water vapor in general circulation model experiments[J]. *Journal of the Geophysical Research* 1999, 104: 6 003-6 019.
- [35] Danielsen E F. Stratospheric-tropospheric exchange based on radioactivity, ozone, and potential vorticity[J]. *Journal of Atmospheric Sciences* 1968, 25: 502-518.
- [36] Danielsen E F, Mohren V A. Project Dustorm report: Ozone transport, in situ measurements, and meteorological analyses of tropopause folding[J]. *Journal of Geophysical Research* 1977, 82: 5 867-5 877.
- [37] World Meteorological Organization. Amospheric ozone 1985 Report of WMO Scientific Group[R]. Geneva: WMO, 1986.
- [38] Browell E V. Tropopause fold structure determined from lidar and in situ measurements[J]. *Journal of Geophysical Research* 1987, 92: 1 112-2 120.
- [39] Kritz M S. Air mass origins and troposphere-to-stratosphere exchange associated with mid-latitude cyclogenesis and tropopause folding inferred from 7Be measurements[J]. *Journal of Geophysical Research* 1991, 96: 17 405-17 414.
- [40] Keyser D A, Shapiro M A. A review of the structure and dynamics of upper level frontal zones[J]. *Monthly Weather Review*, 1986, 118: 914-1 921.
- [41] Hoskins B J. The mathematical theory of frontogenesis[J]. *Annual of Reviews Fluid Mechanics* 1982, 14: 31-151.
- [42] Bush A B G, Pellier W R. Tropopause folds and synoptic-scale baroclinic wave life cycles[J]. *Journal of Atmospheric Science*, 1994, 51: 581-1 604.
- [43] Lamarque J F, Hess P G. Cross-tropopause mass exchange and potential vorticity budget in a simulated tropopause folding[J]. *Journal of Atmospheric Science* 1994, 51: 2 246-2 269.
- [44] Palmen E, Newton C W. *Atmospheric Circulation Systems*[M]. New York: Academic Press, 1969.
- [45] Price J D, Vaughan G. Statistical studies of cut-off flow systems[J]. *Annals of Geophysics*, 1992, 10: 96-102.
- [46] Hoskins B J. Towards a PV- view of the general circulation[J]. *Tellus* 1991, 43: 27-35.
- [47] Danielsen E F. Vertical profiles of tropospheric gases: Chemical consequences of stratospheric intrusions[J]. *Atmospheric Environment* 1984, 18: 759-1 766.
- [48] Price J D, Vaughan G. On the potential for stratosphere-troposphere exchange in cut-off flow systems[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 1993, 119: 343-365.

PROGRESSES IN THE STUDY OF STRATOSPHERE - TROPOSPHERE EXCHANGE

YANG Jian L, Da-ren

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China)

Abstract The Stratosphere-Troposphere Exchange (STE) of air mass and chemical species is an important process influencing the effects of trace chemical species emitted from natural and anthropogenic sources on the atmospheric composition. STE may affect climate by altering the vertical distributions of greenhouse gases in the upper troposphere and low stratosphere. Dynamical, chemical and radiative coupling between stratosphere and troposphere are among the many important processes that must be understood for prediction of global change. The paper reviews some main progresses in STE studies focusing on scale questions, researches in tropic and mid-latitude areas and also in China. STE are multi-scale interaction processes. The wave in the extra-tropical stratosphere induced forces drive a kind of global-scale circulation, which is a useful measure of global-scale stratosphere-troposphere exchange, especially on seasonal or longer time scales. But it is not suitable for describing short time scale processes. The circulation in the extra-tropical lower stratosphere cannot be simple regarded as zonal averaged. The distribution of some trace species cannot be simulated exactly if the model excludes the latitudinal asymmetry synoptic scale processes. The theory of "leaky pipes" presents a new quantitative diagnostic framework to interpret measured results and compare them with model results. Tropopause folding and cut-off flow in mid-latitude were well studied in the past.

Key words Stratosphere; Troposphere; Exchange.