

2003—2004年冬季北半球爆发性增温期间极地平流层甲烷、水汽的演变特征^{*}

刘传熙^{1,2} 王海平^{1,2} 刘毅^{1**}

1. 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; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 利用欧洲空间局(ESA)提供的 ENVISAT/MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding) 卫星观测数据以及 ECMWF 业务分析场, 综合分析了 2003—2004 年冬季北半球爆发性增温(SSW)事件中极地平流层大气甲烷和水汽的演变特征. 结果表明: (1) 增温出现时, 平流层高、中层极涡先后发生分裂, 对应的甲烷、水汽极值中心也同时发生分裂; (2) 增温下传过程中, 平流层中上层甲烷、水汽同时具有“向上输送”的特征, 这主要是由极地平流层的上升运动造成; 增温过程中行星波活动引起的向极输送造成这种“向上输送”特征在高层具有一定的超前性; (3) 增温后期, 高层极涡迅速恢复, 极涡内的下沉运动将中间层低层的空气(甲烷、水汽浓度极低)输送进入平流层, 造成平流层高层极涡(52 km 附近)内出现甲烷、水汽浓度的异常低值.

关键词 平流层爆发性增温 极涡 大气成分 MIPAS

大气甲烷与水汽是重要的温室气体, 它们的浓度与分布变化能够显著地影响地球气候系统的辐射平衡. 同时, 甲烷与水汽也是平流层大气中重要的化学成分, 甲烷的化学氧化是平流层水汽的重要来源, 而平流层水汽浓度的变化^[1-4]与近年来平流层温度的变化趋势有一定联系^[5,6]; 而且水汽的变化还可能通过改变极地平流层云(PSCs)形成的温度条件以及极涡内部的温度^[7], 进而对平流层臭氧的损耗产生一定影响^[8].

平流层甲烷主要来源于对流层排放, 因此其在平流层中的分布主要取决于 Brewer-Dobson 环流^[9,10]等动力输送过程. 与此不同, 平流层水汽同时受到大气动力和化学过程的制约; 过去的研究表明^[11,12], 甲烷氧化过程是平流层中上层水汽的主要来源, 而甲烷的氧化速率随高度增加而增大, 因此, 在平流层中水汽浓度具有随高度递增的分布特

征.

平流层爆发性增温^[13]是冬半球中层大气中最为显著的环流结构突变现象, 它主要指极区平流层温度在短期内升高几十度, 纬向平均风场逆转, 极涡发生强烈扰动甚至出现崩溃的现象. 过去关于爆发性增温形成的动力机制研究的较多, 其中 Matsuno^[14]提出的上传行星波与平流层基本气流相互作用的机制最为重要; Hsu^[15]利用 Holton 的半波模型^[16]成功对爆发性增温过程进行了模拟, 从而证实了 Matsuno 的上述观点. 20 世纪 90 年代, 北半球冬季平流层极涡处于一个异常稳定的时期, 在 1991/1992 年到 1999/2000 年的 9 个冬季(12 月至次年 3 月)间, 北半球仅发生了 2 次强增温现象^[17]. 进入 21 世纪以后, 从 2000/2001 年至 2003/2004 年短短的 4 个冬季中, 北半球极地平流层发生了 5 次强增温事件. 近年来如此频繁的增温事件, 尤其是

2008-07-16 收稿, 2008-09-14 收修改稿

* 国家自然科学基金重点项目资助(批准号: 40633015)

** 通信作者, E-mail: liuyi@mail.iap.ac.cn

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

2002年南极冬季平流层发生的一次历史罕见的臭氧洞分裂事件^[18],使得大量的科学研究工作开始重新关注极夜平流层的变化.与上世纪七八十年代所不同的是,近年来对平流层的研究应用了大量遥感观测资料,特别是近年来兴起的临边探测技术,有利于我们对极地中层大气的动力、热力场以及大气微量成分进行高时空分辨的研究.

2003—2004年北半球极地平流层同样发生一次历史罕见的增温事件^[17],其具体特征将在文中介绍.本文利用欧洲空间局最新的MIPAS卫星遥感资料结合ECMWF提供的平流层大气动力分析场,研究了2003—2004年北半球极夜期间北极平流层甲烷与水汽的空间分布与时间演变特征.

1 资料介绍

1.1 MIPAS观测

MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding) 被动大气探测 Michelson 干涉仪是搭载在欧洲环境卫星 (ENVISAT) 上的高分辨率 Fourier 红外光谱仪,可以对中层大气进行临边观测^[19,20].MIPAS 可以对平流层及对流层上层 20 余种大气微量气体成分进行观测,每天提供的 14 条太阳同步轨道资料可以覆盖全球,其水平分辨率约为 500 km.由于 MIPAS 利用大气中红外谱段辐射进行观测,因此即使是在极夜期间也可以得到高时空分辨的观测数据,这是过去 HALOE 等卫星探测仪器^[21]无法实现的.

目前,欧洲空间局 (ESA) 所提供的业务化二级产品主要包括温度, H_2O , CH_4 , N_2O , O_3 , HNO_3 以及 NO_2 的体积混合比资料,这些卫星遥感产品已经得到探空、雷达等其他观测资料的验证^[22,23],其中 MIPAS 对流层上层至平流层中下层的臭氧垂直廓线同北京的臭氧探空资料具有很高的相关性^[24].自 2002 年 9 月—2004 年 4 月的第一观测阶段 MIPAS 数据具有很高的观测精度.2004 年 4 月以后 MIPAS 干涉仪的控制部分出现问题,导致传感器灵敏度有所降低、影响了观测精度,2004 年 4 月以后的数据仍在分析和重新处理中.本文采用的是经过验证的 Level2 观测数据 (Consolidated Dataset) 中 CH_4 , H_2O 浓度的逐日观测数据.

1.2 ECMWF 业务分析资料

使用的平流层大气动力场 (温度、水平风速、垂直速度) 是 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 提供的业务分析场,资料水平分辨率为 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$,垂直方向具有 60 层,从地面直到 0.1 hPa (约 60 km 高度),资料顶层与平流层顶高度相当.研究中利用 ECMWF 基本动力场计算了 MPV (modified PV),这是一种改进的位涡定义^[25],它在传统位涡定义^[26]的基础上考虑了平流层中大气密度随高度的快速衰减,从而克服了 Ertel 位涡在垂直方向上的不可比性,因此可以用来研究平流层大气中极涡等行星尺度系统的垂直结构.本文中使用的 35 MPVU (modified PV unit) 来表征平流层中上层极涡的水平边界,其中 $1MPVU = 1 \times 10^{-6} m^2 \cdot s^{-1} \cdot K \cdot kg^{-1}$.

2 2003—2004 年平流层爆发性增温的基本特征

2003—2004 冬季北极平流层发生了一次十分特殊的爆发性增温事件,MIPAS 的温度资料完整地记录了这次爆发性增温过程中极地平流层温度的演变特征^[27].与过去 50 年的观测记录相比,这次增温事件具有一些显著的异常特征^[17],主要包括:(i) 平流层中下层极涡扰动持续的时间长;(ii) 平流层高层极涡迅速恢复;(iii) 增温现象向平流层下层下传的过程缓慢.

图 1 是利用 ECMWF 分析场计算得到的平流层高层 (52 km) 与中层 (30 km) MPV 的时间演变图,其中数值为 35 MPVU 的 MPV 等值线已用加粗的实线标出,用来近似表示极涡的边缘.

3 增温期间平流层中上层甲烷、水汽的演变特征

3.1 甲烷、水汽的水平分布

图 2, 3 分别是由 MIPAS 4 天逐日轨道观测资料合成得到的北半球极地平流层中层 (30 km)、高层 (52 km) 甲烷与水汽的水平分布;其中 $> 35 MPVU$ 的 MPV 等值线用粗实线标出,用来近似表示平流层极涡的位置.

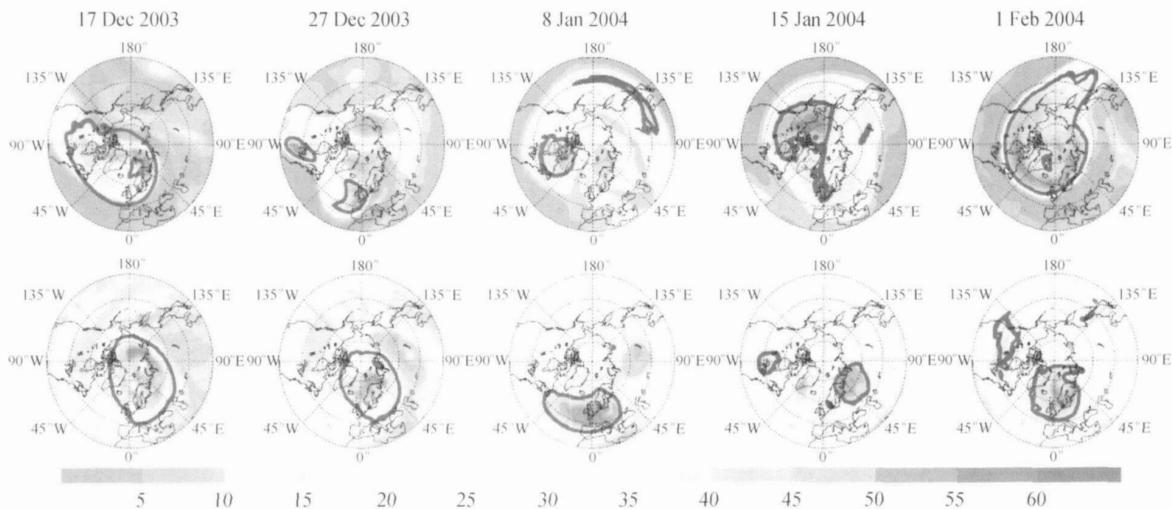


图 1 平流层高层(52 km, 第一行)、中层(30 km, 第二行)Modified PV 水平分布的演变
其中粗实线为 Modified PV=35 Modified PVU ($1\text{MPVU}=1\times 10^{-6}\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{K}\cdot\text{kg}^{-1}$) 等值线, 用来表征极涡边缘的位置

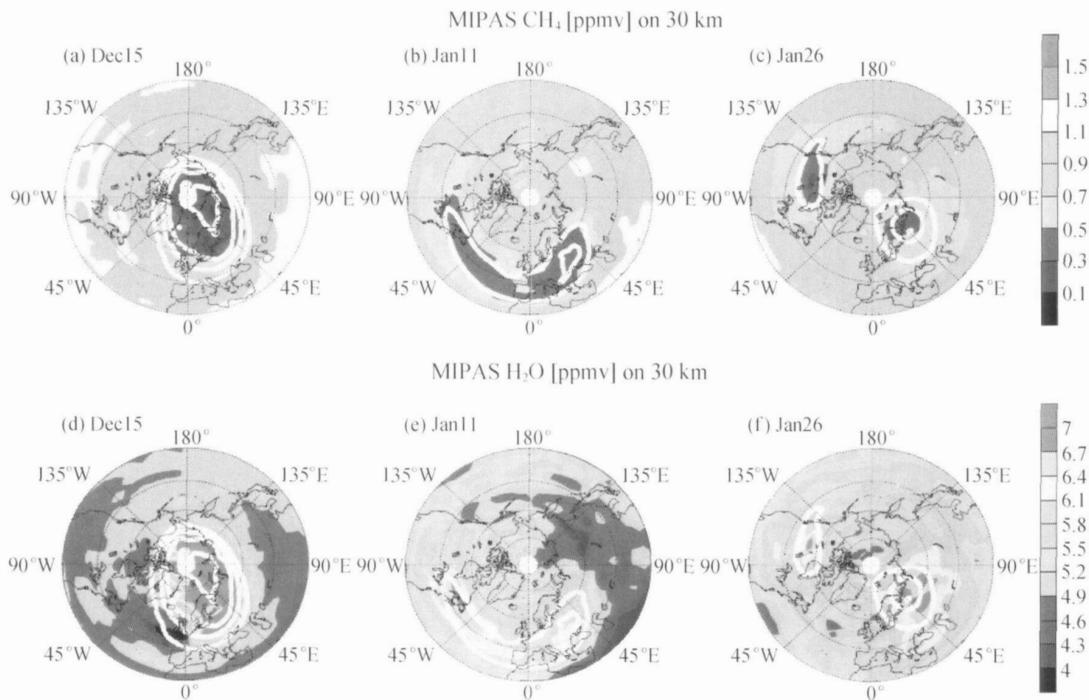


图 2 利用前后 4 天卫星轨道资料合成的爆发性增温前期(2003 年 12 月 15 日)、中期(2004 年 1 月 11 日)、后期(2004 年 1 月 26 日)平流层中层(30 km)甲烷、水汽体积混合比(ppmv)水平分布的演变图
(a)~(c)为甲烷分布图;(d)~(f)为水汽分布图

图 1 表明, 平流层高层极涡在 12 月中旬已出现扰动, 并在 12 月 27 日左右发生分裂; 而中层极涡的扰动落后于高层, 直到 1 月 8 日才开始分裂. 10hPa 上极涡分裂 1 周以后, 高层极涡出现

恢复(1 月 15 日左右), 并在 2 月初达到最大强度. Clilverd 等的研究^[28]表明, 这种强大的高层极涡有利于更高层的空气通过极涡内的下沉运动进入极地平流层.

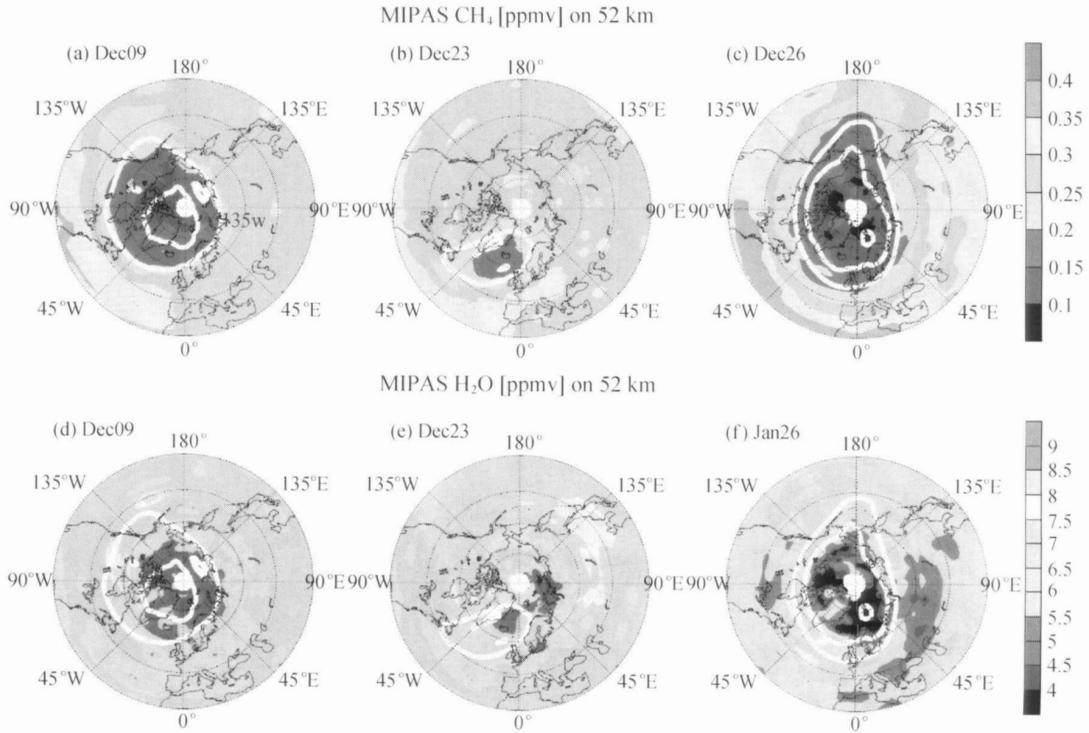


图 3 同图 2, 但为平流层高层(52 km)分布状况

在爆发性增温出现之前, 平流层中、高层极涡都较强, 且稳定地位于北极地区(如图 2(a)、3(a)). 在平流层中层(30 km), 与极涡对应的是甲烷的低值中心(图 2(a))和水汽的高值中心(图 2(d)). 而平流层高层(52 km), 极涡中心同时对应甲烷与水汽的低值中心(如图 3(a), 3(d)). 这种甲烷与水汽不同的分布型主要是由平流层中甲烷与水汽的垂直分布以及平流层中行星尺度大气输送造成的. 如前所述, 甲烷具有对流层源, 其在平流层中的分布主要依赖于 Brewer-Dobson 环流的输送, 因此在平流层中具有随高度递减的分布特征(如图 4(a)). 与此不同, 甲烷氧化是平流层中高层水汽的重要来源, 而且甲烷氧化的反应活性随高度的增加大于甲烷的垂直递减率, 从而造成中高纬度地区平流层水汽呈现随高度递增的垂直分布特征(如图 4(b)).

12 月 20 日以后, 随着平流层行星波活动的增强, 平流层高层极涡发生扰动, 52 km 极涡面积大大缩小并偏向北大西洋上空; 与此对应, 甲烷和水汽低值中心的面积与位置与极涡有相似的变化(如

图 3); 但在高层极涡分裂的过程中(12 月 23 日), 水汽低值中心位置与极涡位置有所偏差, 在高层极涡的东北侧存在另一个水汽浓度低值中心. 随着行星波影响的持续, 极地平流层增温现象逐渐向下传播^[27]; 到 12 月末, 平流层中层极涡也开始出现扰动, 并在 2004 年 1 月 10 日前后发生分裂(如图 2(b)), 30 km 高度上的甲烷、水汽浓度中心也相应发生分裂(如图 2(b), (e)).

1 月中旬以后, 随着增温信号继续下传, 平流层中低层极涡也逐渐出现扰动; 同时, 平流层高层极涡出现快速恢复并得到异常的增强(如图 3(c)). Liu 等^[27]的研究表明, 这种高层极涡的快速恢复与平流层中低层极涡的持续分裂(如图 1)以及中低层东风的长期维持直接相关. MIPAS 观测中, 甲烷与水汽的浓度分布也显示出相似的特征, 具体来说: 30 km 高度上, 甲烷、水汽的低、高值中心与极涡位置对应, 并一直维持分裂状态(如图 2(c), (f)); 对应于异常强大的高层极涡, 52 km 处甲烷与水汽的低值中心也变得异常显著(如图 3(c), (f)), 极涡中心的甲烷、水汽浓度可分别达到

0.1 ppmv 与 4 ppmv 以下；这种平流层高层极涡内甲烷与水汽浓度极低值的出现与 1 月中旬以后极涡内一致性的下沉运动^[28]有紧密地联系。

3.2 甲烷、水汽的垂直分布

图 4 是极地地区 (60°N 以北) 平均的平流层甲烷、水汽随时间演变图, 图中表明, 爆发性增温出现以后 (2003 年 12 月中旬—2004 年 1 月上旬), 平流层中上层甲烷表现出高浓度逐渐“向上输送”的特征; 而平流层中上层水汽在不同高度上则具有不

同的演变特征: 上层增加, 而下层水汽出现减少, 从而表现为平流层水汽高值带发生整体“向上输送”。极地地区 (60°N 以北) 平均的垂直运动场 (如图 5(a)) 显示, 从 12 月 15 日至 1 月上旬, 北极平流层中层 (50 km 以下) 具有明显的上升运动, 这与平流层中层甲烷、水汽的“向上输送”特征在时间上基本一致; 考虑到极地平流层中甲烷与水汽浓度的垂直梯度, 可以认为上述甲烷、水汽的垂直演变特征主要是由北极地区的垂直上升运动造成的。

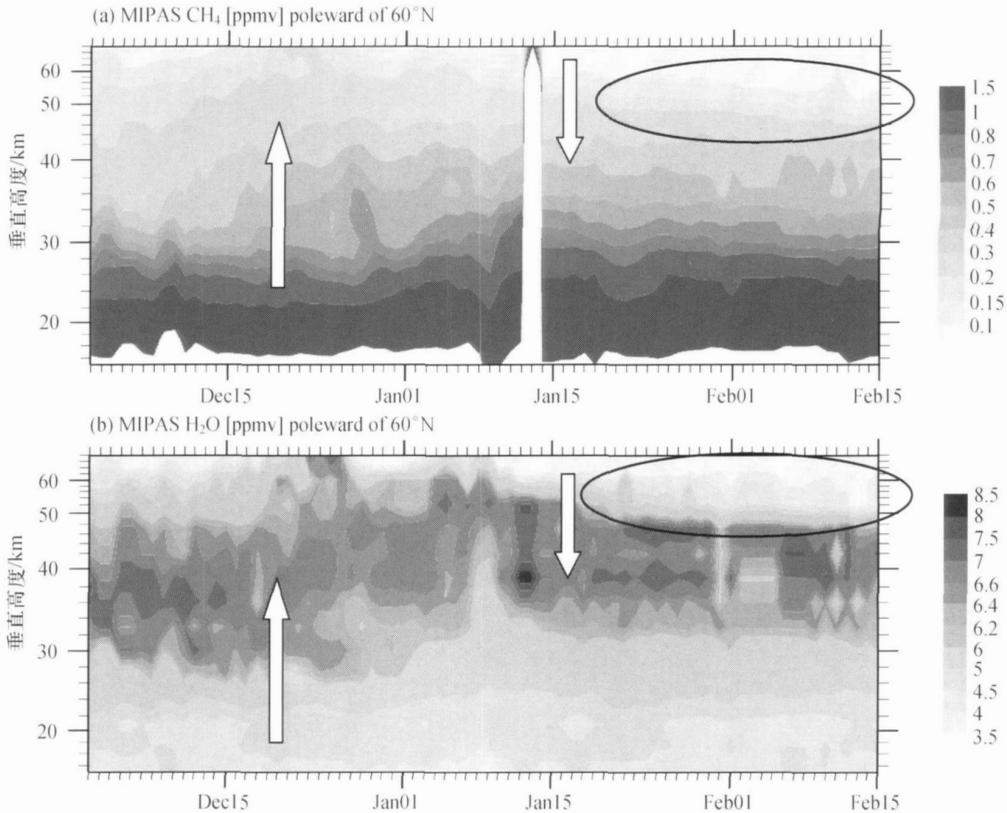


图 4 极地地区 (60°N 以北) 平流层甲烷、水汽体积混合比 (ppmv) 的垂直-时间演变图
(a) 甲烷; (b) 水汽

进一步分析可以发现, 上述化学成分 (尤其是甲烷) 的“向上输送”特征在不同高度具有一定的时间先后性: 高层超前于低层 (如图 4(a)). 具体来看: 在平流层上层 (40 km 以上), 大约从 12 月 12 日开始, 甲烷、水汽同时开始增加; 而平流层中层 (30 km 附近) 的甲烷浓度从 12 月 18 日开始突然增加, 同时水汽浓度出现减少, 30 km 附近甲烷、水汽的这种反向变化主要是由于二者在垂直方向上相

反的浓度梯度所造成的. 此外, 平流层高层与中层之间的“超前—滞后性”并不能完全使用极区的垂直运动场来解释, 还必须结合水平输送运动进行理解; 为此, 文中将分别使用 1 hPa, 10 hPa 与 50 hPa 等压面上行星 1 波的振幅来表示平流层高层、中层与低层上向极涡动输送的强度. 以甲烷为例, 当行星波活动增强并造成极涡发生扰动时, 与行星波活动相联系的向极涡动输送运动会不断向极地输送来

自中、低纬的空气(温度、甲烷浓度较高),从而造成极区(60°N 以北)在温度增加的同时,甲烷浓度也有所增加;同时,由于平流层高层极涡扰动超前于中低层(如图1),随着行星波(尤其是1波)影响的逐渐“下传”(如图6),“增温”现象与甲烷浓度增加一起表现为相似的“下传”特征.因此,上述甲烷的“向上输送”具有一定的高层超前性.综合来说,增温发展阶段,极地平流层中高层同时存在着

向上输送运动以及与行星波活动相联系的向极涡动输送运动,这两种过程共同造成甲烷的“向上输送”具有明显的高层超前、低层滞后特征.与甲烷类似,平流层水汽的整体“向上输送”也具有一定时间先后特征,其中的机制与甲烷完全类似;但由于平流层中甲烷、水汽浓度的垂直梯度有所不同,因此二者的具体特征有较大差异.

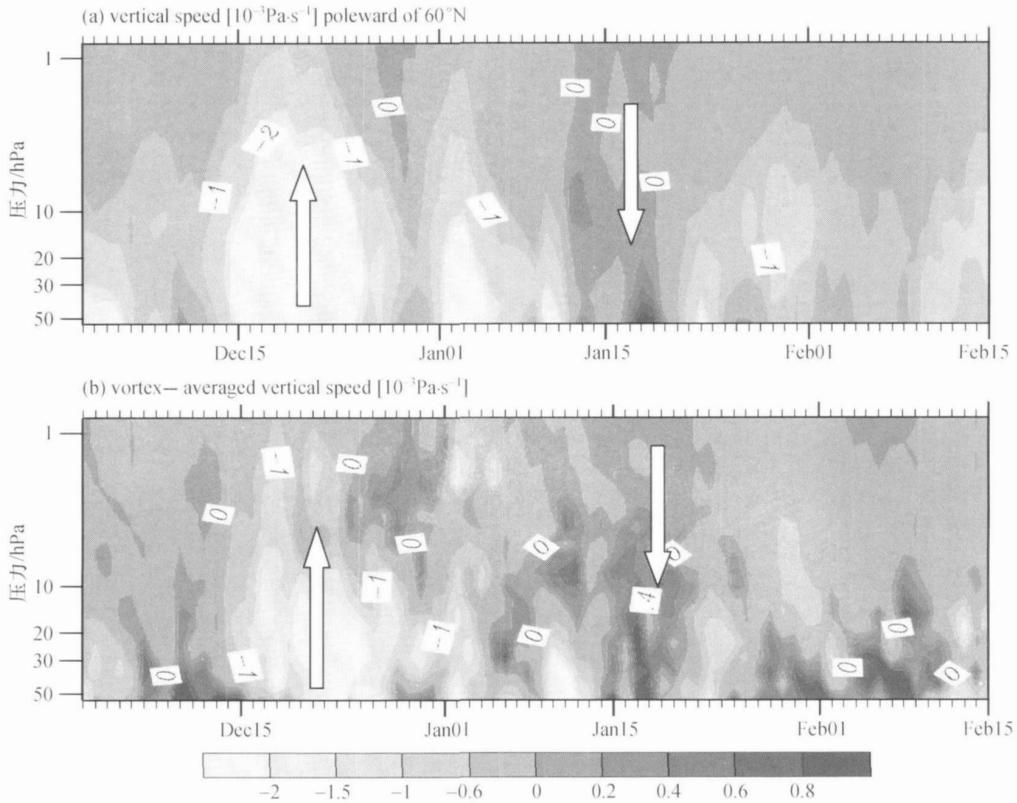


图5 平流层中高层极地区(60°N 以北)以及极涡内部垂直运动场 $10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 的高度-时间演变
(a) 极地区(60°N 以北)平均; (b) 极涡内部平均

2003—2004年爆发性增温的显著特征之一就是,当平流层中层极涡分裂后,高层极涡快速恢复,并达到很高的强度(如图1).极涡内部的平均垂直运动场显示,1月中旬以后,平流层中高层极涡内部为显著的下沉运动(如图5(b)),并且这种极涡内部的下沉运动控制了整个极地区,造成北极平流层地区为一致性的下沉运动(如图5(a)).Clilverd等^[28]的研究认为,这种强大的高层极涡有利于

更高层的空气通过极涡内的下沉运动进入极地平流层.如前文所述,1月下旬52km高度上极涡内部的甲烷、水汽浓度异常偏低.以上结果共同表明,高层极涡迅速恢复后,平流层中高层极涡内部一致性的下沉运动能将中间层低层的空气(甲烷、水汽浓度极低)向下输送到极地平流层高层,并造成平流层高层极涡内甲烷、水汽浓度异常偏低.

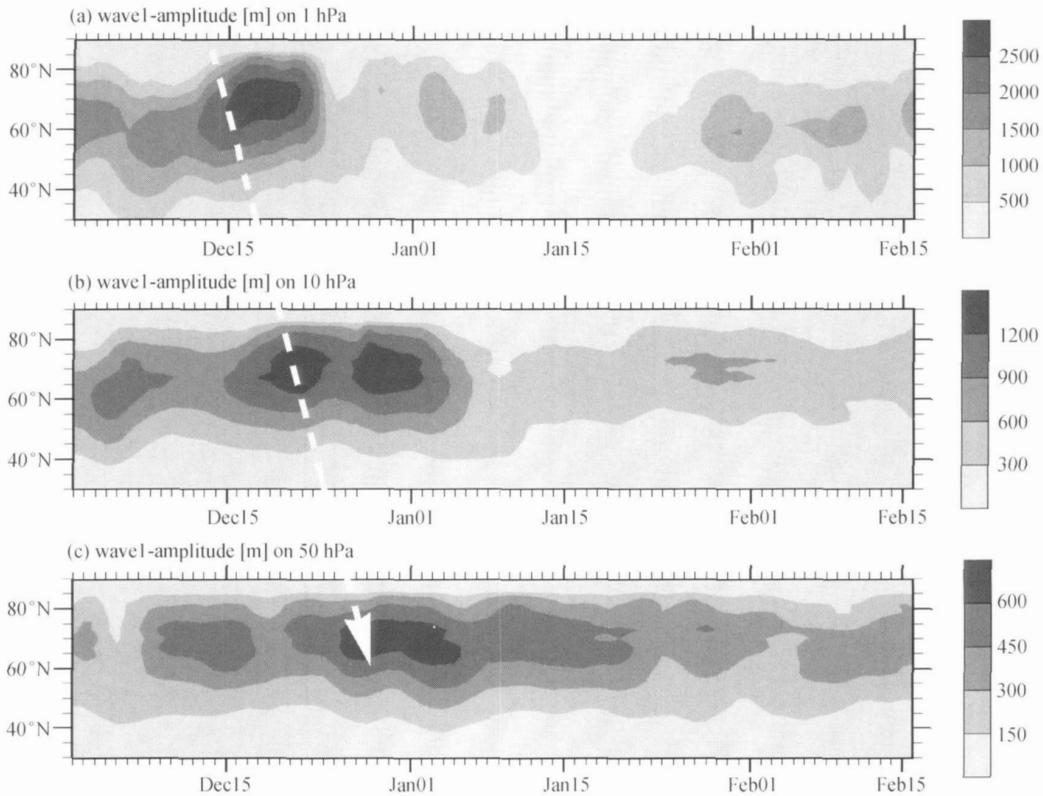


图 6 平流层高层(1 hPa)、中层(10 hPa)、低层(50 hPa)高纬地区行星 1 波振幅(m)的时间演变
(a) 1hPa; (b) 10hPa; (c) 50 hPa

4 结论与讨论

利用欧洲空间局的 ENVISAT/MIPAS 资料分析了 2003—2004 年北半球冬季强爆发性增温期间极地平流层中上层甲烷、水汽的演变特征。分析结果表明, 平流层极涡与甲烷、水汽浓度的极值中心具有很好的对应关系, 增温期间平流层极涡的位置变动以及与行星波动、极涡相联系的水平、垂直输送的变化对于平流层甲烷、水汽的空间分布和时间演变具有显著的影响。具体表现为:

(1) 极地平流层中甲烷具有随高度递减的垂直分布特征, 而极地平流层水汽浓度随高度递增。在此相应, 平流层高层(52 km), 极涡中心同时对应着整个北半球甲烷、水汽的低值中心, 而在平流层中层(30 km 附近)极涡则对应着北半球上甲烷的低值中心与水汽的高值中心。

(2) 增温出现后, 随着平流层高层(52 km)、中层(30 km)极涡先后发生分裂, 极涡对应的甲烷、

水汽浓度极值中心也同时发生分裂; 在高层极涡分裂过程中, 在极涡东北部存在另一个水汽浓度低值中心。

(3) 增温期间, 极地(60°N 以北)平流层中高层中甲烷、水汽同时表现出“向上输送”的特征, 这主要是由极地平流层显著的上升运动所造成的; 同时, 由于极涡扰动在高层超前于低层, 与行星波活动相联系的向极输送也具有高层超前性。因此伴随着增温现象的下传, 甲烷的“向上输送”具有明显的高层超前、低层滞后特征; 而水汽则表现为高层浓度先增加, 随后低层浓度发生减小, 整个水汽高浓度带“向上输送”。甲烷与水汽垂直演变的差异主要是由二者垂直方向上浓度梯度所造成的。

(4) 随着高层极涡的迅速恢复, 平流层高层极涡中出现显著的下沉运动, 这种一致性的下沉运动可以将中间层低层的空气(甲烷、水汽浓度极低)输送进入平流层, 从而造成平流层高层极涡内甲烷、水汽浓度异常偏低。

平流层中甲烷主要来自对流层排放, 并通过动力输送运动进入平流层, 在平流层中一般不存在显著的源; 与甲烷类似, 平流层低层水汽主要通过平—对流层交换(STE)以及 Brewer-Dobson 环流穿越热带对流层顶进入平流层, 对流层顶与平流层低层的低温造成水汽发生“冻干”, 因此在平流层低层水汽浓度很低; 而在平流层中上层开始出现显著的水汽源(主要是甲烷氧化反应). 平—对流层交换(STE)与对流层顶温度两个因素对于热带与中纬度平流层低层水汽的分布十分重要; 然而, 在SSW的生命周期内, STE与对流层顶温度的变化相对于SSW的剧烈程度来说影响较小; 而且本文主要关注的是北半球高纬度地区平流层中高层水汽的演变特征, 因此文中暂时没有考虑以上两个因素的影响.

爆发性增温期间, 随着极夜急流的减弱, 极地平流层温度可以在几天的时间尺度上升高 20—40℃, 如此剧烈的温度变化可能强烈地影响各种热化学的反应速率; 然而, 在 10 d 以内的时间尺度上, 动力作用往往占据主导地位, 而且仅仅从观测中很难较为精确地分离出动力与化学变化的相对贡献, 因此对于爆发性增温事件中化学反应速率变化的定量研究, 目前只能通过较为复杂的中层大气化学输送模式(如 NCAR/ACD 的 MOZART-3 等)来实现, 这种动力—化学耦合现象是目前平流层研究中的热点问题之一, 也正是我们下一步的工作重心之一.

致谢 感谢欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供了 60 层业务气象场资料, 感谢国家遥感中心与欧洲空间局“龙计划”合作项目以及 MIPAS Science Team 为本研究提供的 MIPAS 卫星观测资料.

参 考 文 献

- Oltmans SJ, Vömel H, Hofmann DJ, et al. The increase in stratospheric water vapour from balloonborne frostpoint hygrometer measurements at Washington, D. C. and Boulder, Colorado. *Geophys Res Lett*, 2000, 27: 3453—3456
- Oltmans SJ, Hofmann DJ. Increase in lower-stratospheric water vapour at a mid-latitude Northern Hemisphere site from 1981—1994. *Nature*, 1995, 374: 146—149
- Evans SJ, Toumi R, Harries JE, et al. Trends in stratospheric humidity and the sensitivity of ozone to these trends. *J Geophys Res*, 1998, 103: 8715—8725
- Rosenlof KH, Oltmans SJ, Kley D. Stratospheric water vapour increases over the past half century. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 1195—1198
- de F Forster PM, Shine KP. Stratospheric water vapour changes as a possible contributor to observed stratospheric cooling. *Geophys Res Lett*, 1999, 26: 3309—3312
- Oinas V, Lacis AA, Rind D, et al. Radiative cooling by stratospheric water vapour: Big differences in GCM results. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 2791—2794
- Kirk-Davidoff DB, Hintsala EJ, Anderson JG, et al. The effect of climate change on ozone depletion through changes in stratospheric water vapour. *Nature*, 1999, 402: 399—401
- Solomon S. Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history. *Rev Geophys*, 1999, 37(3): 275—316
- Brewer AW. Evidence for a world circulation provided by the measurement of helium and water vapor distribution in the stratosphere. *Q J R Meteorol Soc*, 1949, 75: 351—363
- Dobson GMB. Origin and distribution of polyatomic molecules in the atmosphere. *Proc R Soc London*, 1956, A236: 187—193
- Abbas MM, Michelsen HA, Gunson MR, et al. Seasonal variations of water vapour in the lower stratosphere inferred from ATMOS/ATLAS-3 measurements of H₂O and CH₄. *Geophys Res Lett*, 1996, 23: 2401—2404
- Michelsen HA, Irion FW, Manney GL, et al. Features and trends in Atmospheric Trace Molecule Spectroscopy (ATMOS) version 3 stratospheric water vapour and methane measurements. *J Geophys Res*, 2000, 105: 22713—22724
- Scherhag R. Die explosionsartigen stratosphäerener warmungen des spatwinters 1951—1952. *Berit Dtsch Wetterdienst*, 1952, 6: 173—188
- Matsuno T. A dynamical model of the stratospheric sudden warming. *J Atmos Sci*, 1971, 28: 1479—1494
- Hsu C-PF. Air parcel motions during a numerically simulated sudden stratospheric warming. *J Atmos Sci*, 1980, 37: 2768—2792
- Holton JR. A semi-spectral numerical model for wave-mean flow interactions in the stratosphere: Application to sudden stratospheric warmings. *J Atmos Sci*, 1976, 33: 1639—1649
- Manney GL, Kruger K, Sabutis JL, et al. The remarkable 2003—2004 winter and other recent warm winters in the Arctic stratosphere since the late 1990s. *J Geophys Res*, 2005, 110: D04107
- Hoppel K, Bevilacqua R, Allen D, et al. POAM III observations of the anomalous 2002 Antarctic ozone hole. *Geophys Res Lett*, 2003, 30(7): 1394
- Carli B, Alpaslan D, Carlotti M, et al. First results of MIPAS/ENVISAT with operational Level 2 code. *Adv Space Res*, 2004,

- 33(7): 1012–1019
- 20 Raspollini P, Belotti C, Burgess A, et al. MIPAS level 2 operational analysis. *Atmos Chem Phys*, 2006, 6: 5605–5630
- 21 毕云, 陈月娟, 许利, 等. 利用 HALOE 资料分析中层大气中水汽和甲烷的分布特征. *大气科学*, 2007, 31(3): 440–448
- 22 Cortesi U, Lambert JC, De Clercq C, et al. Geophysical validation of MIPAS-ENVISAT operational ozone data. *Atmos Chem Phys*, 2007, 7: 4807–4867
- 23 Ridolfi M, Blum U, Carli B, et al. Geophysical validation of temperature retrieved by the ESA processor from MIPAS/ENVISAT atmospheric limb-emission measurements. *Atmos Chem Phys*, 2007, 7: 4459–4487
- 24 Liu Y, Cai ZN, Erkki K. Comparison of ENVISAT GOMOS and MIPAS Ozone Profiles with Balloon Sonde Measurements from Beijing. *ESA Special Publication (SP-655)*, 2008
- 25 Lait LR. An alternative form for potential vorticity. *J Atmos Sci*, 1994, 51(12): 1754–1759
- 26 Ertel H. Ein Neuer hydrodynamischer Wirbelsatz. *Met Z*, 1942, 59: 271–281
- 27 Liu Y, Liu CX, Wang HP, et al. Atmospheric tracers during the 2003–2004 stratospheric warming event and impact of ozone intrusions in the troposphere. *Atmos Chem Phys Discuss*, 2008, 8: 13633–13666
- 28 Chilverd MA, Seppäki A, Rodger CJ, et al. Temporal variability of the descent of high-altitude NO_x inferred from ionospheric data. *J Geophys Res*, 2007, 112: A09307

宽带隙半导体 SiC 非磁性掺杂研究取得进展

长期以来, 过渡元素 (Fe, Mn, Co 等) 掺杂稀磁宽带隙半导体的磁性来源问题一直存在着很大争议. 主流观点认为, 由于样品制备条件的差异, 大多数过渡元素掺杂宽带隙半导体的磁性来源于磁性杂质的干扰或磁性原子在基体形成团簇所致, 而不是掺杂材料的本征特性. 因此, 通过掺杂非磁性元素可以有效地避免磁性杂质的引入, 排除磁性杂质的干扰, 可以为探讨稀磁半导体的磁性来源提供理想的实验体系. 这对深入认识宽带隙半导体中自旋长程有序的机制有着重要学术意义.

中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家实验室陈小龙研究组采用非磁性 Al 元素对 SiC 进行掺杂, 获得了 Al 掺杂的 4H-SiC 单相样品. 磁性测量结果表明, 通过掺杂 Al 元素 (~0.75 at%) 在样品中建立了长程磁有序和自旋玻璃共存的现象, 即玻璃态铁磁性. 一种可能的解释为: Al 原子最外层为 3 个电子, 比 Si 最外层少 1 个电子, 通过 Al 元素的掺入, 在 SiC 中引入了未成对电子, 导致自旋磁矩的存在. 这些自旋磁矩通过缺陷作为耦合途径有可能在相当大的范围内显现长程自旋有序. 此外, SiC 在掺杂过程中极易出现多晶型 SiC 共存现象一直是困扰研究人员的一个难题. 研究发现 Al 元素掺杂具有明显的稳定 4H-SiC 晶型的作用, 为微量元素掺杂稳定 SiC 晶型提供了一个新的方法. 该研究结果为宽禁带半导体中实现自旋长程有序提供了一条新的途径, 同时加深了对稀磁半导体磁性起源的认识.

该成果发表在近期出版的《美国化学会志》(*J. Am. Chem. Soc.* 131 (2009) 1376–1377) 上. 相关工作还在进行当中.

(供稿: 中国科学院物理研究所)