

利用 GOMOS 卫星资料研究热带平流层臭氧、二氧化氮和三氧化氮的准两年和半年振荡特征

刘毅^①, 陆春晖^{①②*}, 王永^{①②}, KYRÖLÄ Erkki^③

① 中国科学院大气物理研究所, 中层大气与环境重点实验室, 北京 100029;

② 中国科学院研究生院, 北京 100049;

③ Finnish Meteorological Institute, Earth Observation, Helsinki, Finland

* 联系人, E-mail: alex61704@163.com

2011-01-19 收稿, 2011-03-25 接受

国家重点基础研究发展计划(2010CB428604)、中欧龙计划(5311)和国家自然科学基金(40633015)资助项目

摘要 利用 2002~2008 年的 GOMOS(Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars)卫星观测资料, 研究了热带平流层臭氧、二氧化氮和三氧化氮的准两年振荡(QBO)和半年振荡(SAO)特征. 对赤道上空臭氧和剩余环流垂直速度的年际异常的诊断分析表明: 动力输送是赤道平流层臭氧呈 QBO 分布的主要控制因素; 在垂直输送作用下, 平流层中层臭氧的 QBO 信号会随着剩余速度的异常向下传播. 而在赤道外的平流层低层, 动力输送在一些年中对臭氧形成 QBO 分布作用显著; 在赤道外的平流层中层, 动力输送只影响南半球的臭氧分布. 此外, 文中分析了热带平流层中二氧化氮的分布, 它在赤道平流层中、高层表现出深厚且准静止的 QBO 特征, 与同高度上垂直剩余速度的分布有关; 在赤道外平流层中层, 二氧化氮在南北半球呈现不同的分布特征. 受赤道纬向风 SAO 的影响, 三氧化氮的年际异常在赤道平流层上层表现出显著的 SAO 分布特征, 在纬向风 SAO 的不同阶段, 动力输送对三氧化氮的分布产生相反的作用结果.

关键词

准两年振荡

半年振荡

GOMOS 卫星观测

平流层臭氧

动力输送

在赤道平流层区域, 纬向风的准两年(QBO)和半年(SAO)周期振荡现象自被发现之后引起了广泛的关注和研究. 大多数的研究集中在 3 个方面: 产生这一振荡现象的动力学原因^[1,2], 平流层中的这一周期性振荡会对全球的大气环流产生的影响^[3], 以及这一现象的动力学机制^[4]. 但是应用卫星观测资料研究分析 QBO 和 SAO 对大气微量气体影响的工作不多, 并且这些不多的研究大都集中在分析大气成分的分布特征^[5-9], 对引起这些分布特征的动力学、化学原因的研究更加缺乏.

GOMOS(Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars)是搭载在欧洲空间局环境卫星 ENVISAT 上的一颗探测器, 它利用掩星的方法对全球的平流层

和中间层的臭氧、二氧化氮和三氧化氮等微量成分进行观测. ENVISAT 作为一颗太阳同步的极轨卫星位于 800 km 的高空, 倾角为 98.55°. 从 2002 年起, GOMOS 连续提供了多年的观测数据, 为开展有关 QBO 和 SAO 的研究提供了新的资料集. Kyrölä 等人^[10-12]使用这一卫星数据研究了 2003 年臭氧、二氧化氮和三氧化氮的分布特征, 并且在近期对这一数据的长期变化趋势和特征进行了分析, 证明了它的可靠性. Hauchecorne 等人^[13]也应用了这一数据分析了纬向风 QBO 对臭氧、二氧化氮和三氧化氮分布的影响, 重点从化学反应过程解释了这些分布形成的原因. 这一卫星数据还被用于研究青藏高原上空的臭氧极端低值事件的形成机制^[14].

英文版见: Liu Y, Lu C H, Wang Y, et al. The quasi-biennial and semi-annual oscillation features of tropical O₃, NO₂, and NO₃ revealed by GOMOS satellite observations for 2002–2008. Chinese Sci Bull, 2011, 56: 1921–1929, doi: 10.1007/s11434-011-4519-7

1 数据和分析

GOMOS 的特殊探测方法使得它可以更加精确的获得大气成分的廓线分布, 它可以同时进行3个光谱通道的观测: 248~690, 755~774 和 926~954 nm, 因此可以得到臭氧、二氧化氮、三氧化氮、水汽、氧气和气溶胶的垂直廓线分布. 本文将针对前3个成分进行分析研究. 其中臭氧的廓线在30 km以下的垂直分辨率为2 km, 在40 km以上为3 km; 二氧化氮和三氧化氮的垂直分辨率是3 km. 2002年至今, 除了2003年7月和2005年1月发生的系统故障, GOMOS 可以进行覆盖全球的连续观测, 对它的二级数据进行计算转化, 得到整个中层大气(10~100 km)中臭氧、二氧化氮和三氧化氮的垂直分布. 此外, 使用地基观测数据和探空数据对 GOMOS 的臭氧廓线进行验证, 表明 GOMOS 的观测误差很小, 一般低于10%, 特别是在19~30 km 高度范围, 误差小于5%^[15]. 在夜间的观测条件下, GOMOS 的探测结果和地基观测在20~40 km 范围内相差不到2%^[16].

图1给出了GOMOS观测臭氧、二氧化氮和三氧化氮混合比的气候平均态分布, 从中可以看出这3种气体有类似的纬向分布特征, 尤其是它们的大值中心位于赤道平流层的不同高度, 其中臭氧的大值中心位于30 km, 中心值达到9 ppmv, 二氧化氮的大值中心位于40 km, 中心值达到14 ppbv, 而三氧化氮的

大值中心位于43 km, 中心值达到250 pptv. 由于赤道平流层纬向风的QBO和SAO分别位于不同高度, 所以臭氧、二氧化氮和三氧化氮在不同的高度会受到QBO和SAO不同的影响过程.

此外, 本文还使用了欧洲中心2002~2008年的ERA-Interim再分析资料进行动力学的诊断分析. ERA-Interim数据在垂直方向上一共有37层, 最高层位于1 hPa(约50 km), 采用了T159的水平分辨率^[17], 本文使用的是240×121(经度 vs. 纬度)水平分辨率的月平均资料. 定义温度和纬向风的原始数据和多年平均值的差为它们的年际变化异常, 图2给出了两者年际异常在赤道平流层中的时间序列分布, 从中可以看出, 在100~5 hPa的高度范围中纬向风和温度异常都有显著的准两年周期振荡特征, 并且会随着时间向下传播. 而在5~1 hPa的区域内, 纬向风和温度异常则表现为典型的半年周期振荡特征, 且两者振荡的位相相同. 比较3种微量气体的分布区域, 可以看出臭氧主要位于QBO的影响范围(100~5 hPa), 三氧化氮主要处于SAO的作用区域(5~1 hPa), 而二氧化氮则位于QBO和SAO影响区域的结合处, 因此可能受到两者的共同作用.

2 臭氧、二氧化氮的QBO特征及动力学诊断

以上的分析表明, 在平流层不同高度范围内, 赤道纬向风的QBO和SAO效应对臭氧、二氧化氮和三

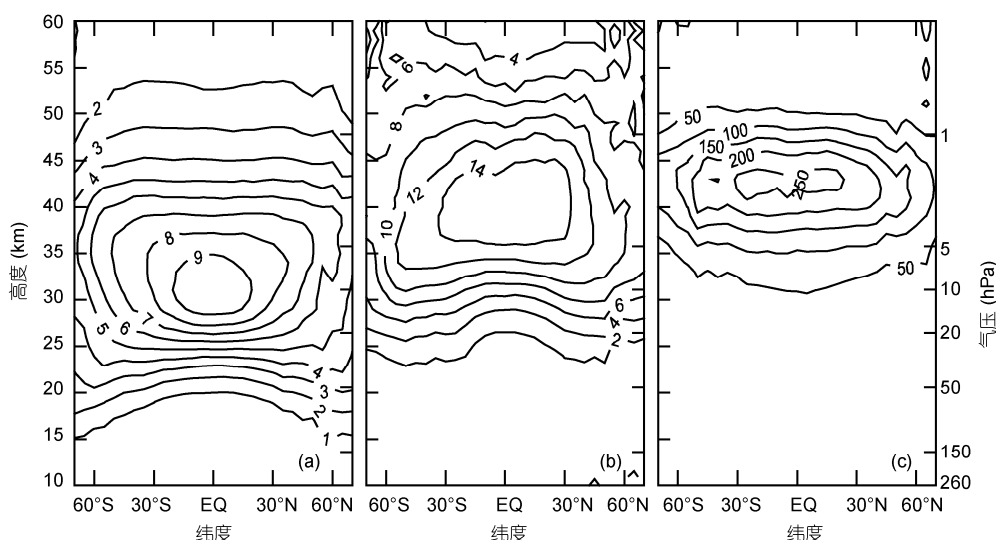


图1 2002~2008年GOMOS观测得到的臭氧、二氧化氮和三氧化氮气候中值的纬度-高度分布
(a) 臭氧(ppmv); (b) 二氧化氮(ppbv); (c) 三氧化氮(pptv)

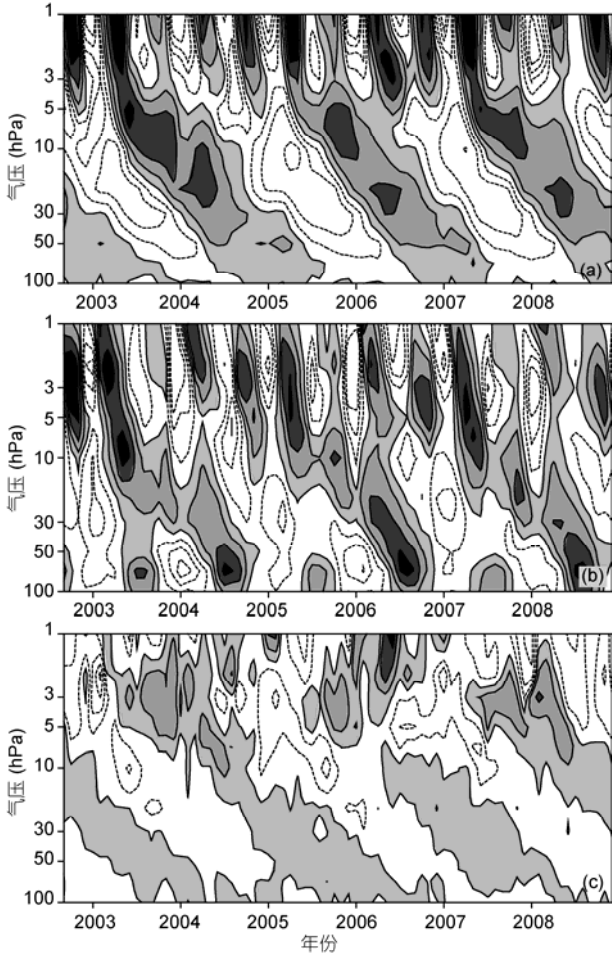


图2 平流层纬向风、温度和剩余环流垂直速度的年际异常在赤道上空的时间-高度分布

(a) 纬向风异常, 等值线间距为 10 m/s; (b) 温度异常, 等值线间距为 2 K; (c) 剩余环流垂直速度异常, 等值线间距为 0.05 cm/s. 阴影部分表示正值

氧化氮的分布产生不同的影响. 文中定义大气成分的年际变化异常为观测值减去其多年平均值. 图 3(a) 给出了赤道平流层臭氧年际异常随时间的分布, 图中表明在平流层中、低层, 都存在臭氧准两年周期的振荡现象, 其在平流层中层(29~38 km)的异常中心强度达到 1.5 ppmv, 而在平流层低层(21~28 km)这一强度有所减小. 为了进一步弄清臭氧的 QBO 特征, 对臭氧年际异常进行 22~30 个月的带通滤波^[18], 图 3(b) 给出了经过带通滤波后臭氧年际异常的时间序列分布, 表明平流层臭氧在多数层次都具有典型的准两年振荡特征, 其中平流层中层臭氧的 QBO 最大振幅达到 0.6 ppmv, 其方差解释了年际以上变率的 55%; 而平流层低层臭氧的 QBO 振幅也达到了 0.6 ppmv,

其方差解释了年际以上变率的 60%. 比较赤道平流层纬向风的 QBO 分布, 发现以 10 hPa 高度的纬向风为标志, 在平流层中层, 臭氧和纬向风的准两年振荡呈反位相, 而在平流层低层, 两者的位相相同且 QBO 振幅更强, 这一特征归因于纬向风 QBO 的不同阶段, 平流层剩余环流对臭氧输送作用的方向和强度均不相同.

图 3(d)和(e)给出了二氧化氮年际异常及其带通滤波(22~30 个月)结果的时间序列分布, 从中可以看出在平流层中层和高层(38 km 以上), 二氧化氮都具有准两年周期振荡的特征, 并且它最大振幅达到 2 ppbv, 方差解释了年际以上变率的 40%~60%. 与臭氧的 QBO 特征相比, 二氧化氮和 10 hPa 纬向风的 QBO 位相相同, 且在平流层的中层和上层它的 QBO 信号符号一致.

为了进一步分析赤道平流层臭氧的 QBO 特征和动力输送的关系, 图 2(c)给出了剩余环流垂直速度(w^*)年际变化的时间序列分布, 对比臭氧年际异常的分布可以看出: 两者年际异常的最大变化模态都是准两年周期振荡, 并且最大的振幅都出现在平流层中层, 臭氧在 32 km 处达到 1.5 ppmv, w^* 在 3 hPa 处达到 0.2 cm/s. 两者的最大扰动在平流层中层形成后逐渐向下传播, 下传的相位相同但符号相反. 在 28 km 以上高度, 臭氧的正异常对应了 w^* 的负异常, 这是因为在这一高度区域上输送作用在垂直方向上表现为辐合作用, 且臭氧分布的最大值也位于同一高度, 输送的辐合效应造成了这一高度臭氧的正异常, 并且这一正异常会随着 w^* 的下沉作用逐渐向下传播; 相应的, 当输送的辐散效应控制这一区域时, 臭氧表现为负异常, 由于向上的输送作用会带来低臭氧含量的大气, 所以臭氧的负异常对应了 w^* 的正异常逐层向下传播. 这一结果表明动力输送作用是赤道平流层臭氧呈 QBO 分布的主要因素, 其影响范围不仅包括了 28 km 以下的平流层低层(Hauchecorne 等人^[13]), 还包含了 29~38 km 的平流层中层.

类似地, 比较赤道平流层二氧化氮(图 3(d))和 w^* 年际异常的时间序列分布可以看出: 动力输送作用也是引起二氧化氮 QBO 分布特征的主要因素. 第一部分的研究表明二氧化氮主要分布在赤道平流层的 40 km 高度, 因此它主要受 3~5 hPa 区域内的 w^* 输送作用影响, 当 w^* 表现为正异常时, 二氧化氮含量较高的大气被输送到平流层高层和中间层, 造成这一

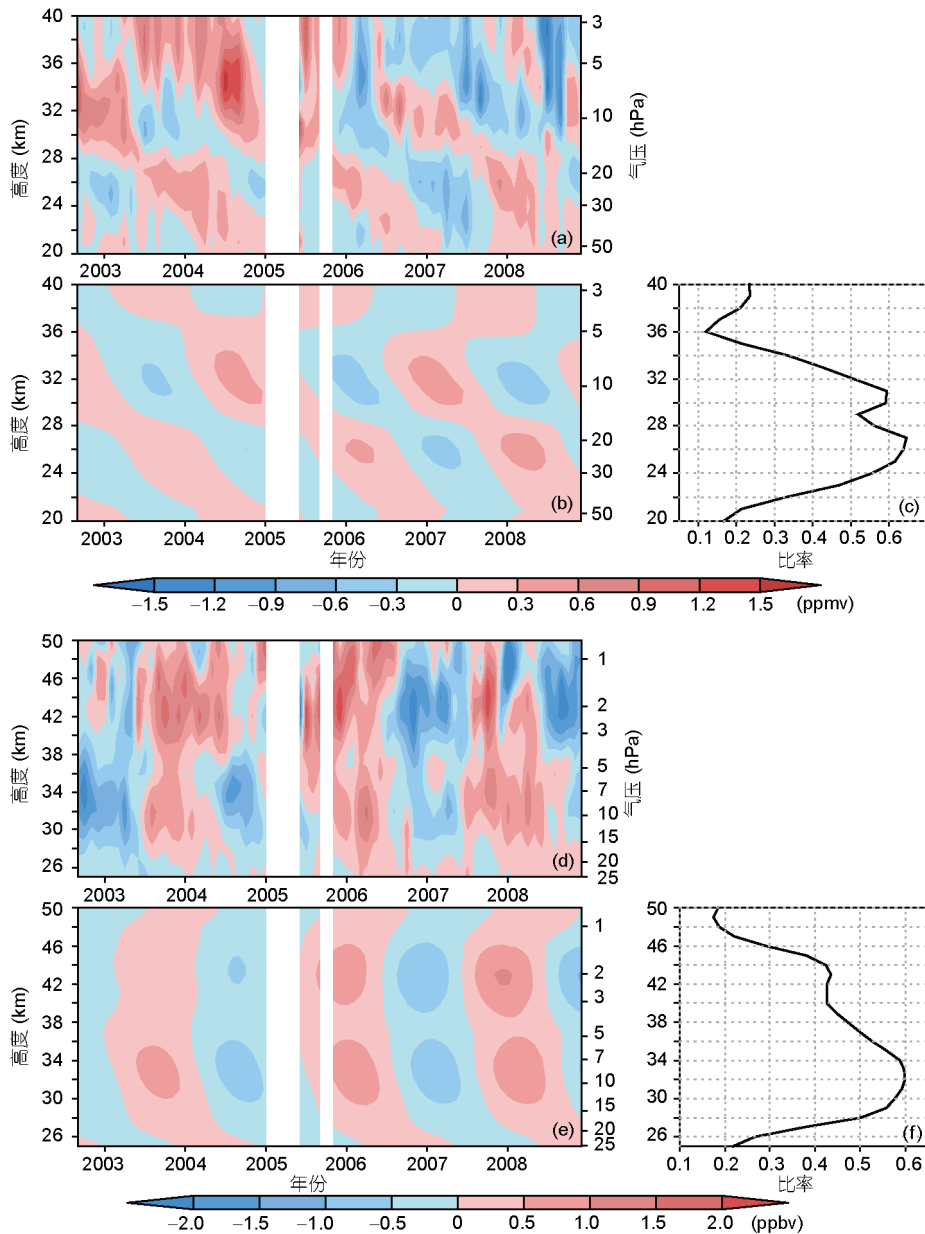


图3 GOMOS 臭氧、二氧化氮年际异常的时间-高度分布

(a) 臭氧的年际异常; (b) 臭氧年际异常 22~28 个月带通滤波后的分布; (c) 臭氧年际异常 QBO 的方差贡献率; (d) 二氧化氮的年际异常; (e) 二氧化氮年际异常 22~28 个月带通滤波后的分布; (f) 二氧化氮年际异常 QBO 的方差贡献率

区域(38~50 km)二氧化氮的增加;而在上升运动的下方, w^* 向下的输送作用又将二氧化氮注入平流层中层, 对应了正的异常. 相反的垂直输送作用会造成相反的二氧化氮分布特征, 3~5 hPa 区域内负的 w^* 异常及其下方的上升效应对应了平流层中高层以及中间层的二氧化氮负异常. 在二氧化氮主要的分布区域里, w^* 的异常呈准静止分布, 在 10~1 hPa 的范围内输

送方向相同, 因此二氧化氮的 QBO 特征在平流层中、上层也呈准静止状态, 几乎不随时间向下传播.

为了进一步分析平流层臭氧和二氧化氮 QBO 分布的纬向结构及其与动力输送的关系, 图4给出了臭氧、二氧化氮和 w^* 在各自 QBO 振幅最大高度上的时间-纬度分布. 图中显示 w^* 在赤道两侧呈对称的准两年周期振荡分布, 当赤道地区为上升运动时, 在南、

北半球的赤道外地区对应了下沉运动, 由此构成了一个闭合的经圈环流; 反之, 当赤道外区域为上升运动时, 赤道地区为下沉运动. 而臭氧和二氧化氮在 $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 的范围内准两年周期振荡的特征十分显著, 并且和 w^* 的垂直输送作用密切相关. 当 20 hPa 高度为 w^* 负异常时, 向下的输送作用会将高臭氧含量的空气带到 26 km 处, 造成这一高度臭氧含量增加; 同样当 20 hPa 高度为向上的输送作用时, 二氧化氮含量较低的空气被送到高层, 引起 32 km 处二氧化氮的负异常. 相反的垂直输送作用对应了相反的臭氧和二氧化氮异常分布, 动力的输送作用在赤道区域起主导作用. 但是在赤道外区域, 臭氧和 w^* 年际异常分布的对应关系有所减弱, 只在 2003, 2006 和 2008 年有较好的对应关系, 高臭氧含量的大气在赤道地区被向上输送至高层, 通过经圈环流输送到赤道外地区, 相应的下沉作用又将这些富含臭氧的大气注入低层, 引起低层臭氧含量的增加. 在另一些年中, 平流层臭氧可能还受到其他因素的影响, w^* 的输送作用与臭氧分布呈现更为复杂的关系. 二氧化氮年际异常的 QBO 特征在赤道外地区呈非对称分布, 其在南半球的分布主要受动力输送影响, 二氧化氮和 w^* 的异常有很好的对应关系; 但是在北半球, 垂直方向的输送作用不再是主要的影响因素, 西风急流、热带深对流和行星波活动等都有可能引起二氧化氮分布的变化, 因此需要结合化学输送模式开展深入的研究.

文中还分析了臭氧和二氧化氮在其 QBO 振幅次大值高度的纬向分布结构及其与垂直输送作用的关系, 结果表明: 在平流层中层, 臭氧的年际异常在赤道和南半球赤道外区域表现出准两年周期振荡的特征, 和二氧化氮在 32 km 高度的分布特征相似(图 4(c)), 动力输送起到了重要的作用; 在平流层高层, 二氧化氮的 QBO 特征没有平流层中层显著, 动力的输送作用也仅表现在赤道地区.

3 三氧化氮的 SAO 特征及动力学、化学诊断

以上分析表明准两年周期振荡是赤道平流层臭氧和二氧化氮年际变化异常最显著的特征, 并且动力输送作用在其形成过程中起着主要作用. 三氧化氮位于平流层中、上层, 因此与赤道纬向风的半年振荡密切相关. 图 5(a)给出了赤道上空三氧化氮年际异常的时间序列分布, 从中可以看出明显的半年周期

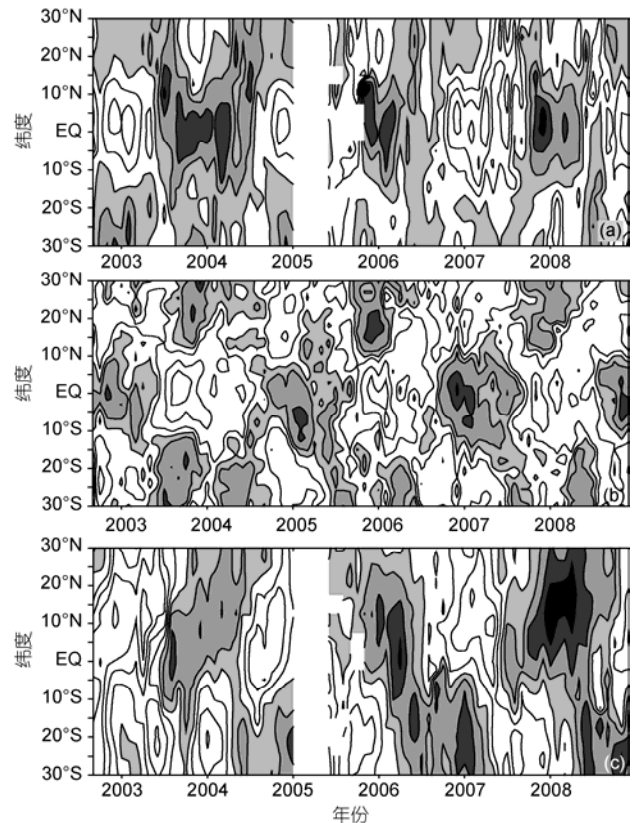
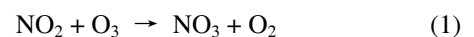


图 4 臭氧、剩余环流垂直速度和二氧化氮年际异常在各自 QBO 振幅最大高度的时间-纬度分布
(a) 26 km 高度的臭氧, 等值线间距 0.2 ppmv; (b) 28 km 高度的剩余环流垂直速度, 等值线间距 0.02 cm/s; (c) 32 km 高度的二氧化氮, 等值线间距 0.5 ppbv. 阴影部分表示正值

振荡特征, 振幅的最大值中心位于 42 km, 达到 100 pptv, 并且三氧化氮的 SAO 位相和 2 hPa 高度的纬向风相同. 通过 4~8 个月带通滤波后的结果表明: 三氧化氮 SAO 信号的方差贡献超过 60%, 最大的区域超过 75%, 位于 44 km 高度.

三氧化氮的生命期比臭氧和二氧化氮都短, 并且对温度非常敏感^[19], 因此可以推测三氧化氮的半年周期振荡模态与温度异常的振荡密切相关. 此外, Marchand 等人^[19]提出了一个涉及到臭氧、二氧化氮和三氧化氮的化学反应, 这一反应过程可以维持三氧化氮的平衡, 并且和温度有很强的正相关:



因此, 在平流层高层三氧化氮表现出显著的半年周期振荡特征, 除了动力的输送作用, 化学反应过程也有很大的贡献.

图 6 给出了在赤道纬向风不同 SAO 阶段时平流

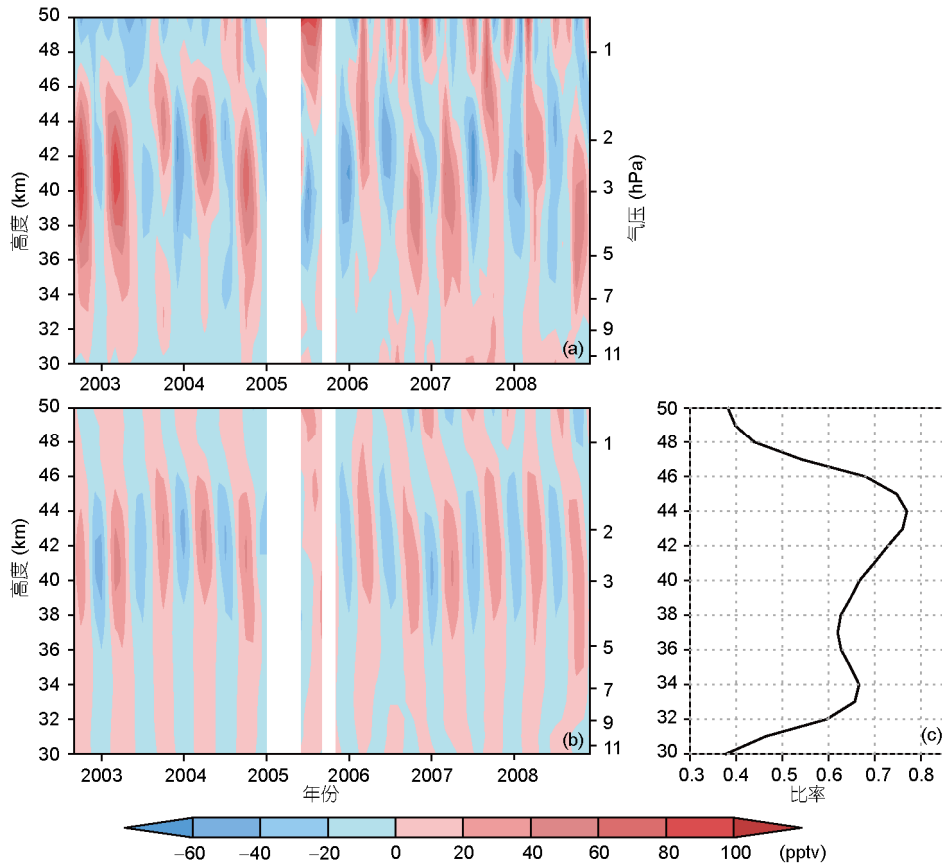


图5 GOMOS 三氧化氮年际异常的时间-高度分布

(a) 三氧化氮的年际异常; (b) 三氧化氮年际异常 4~8 个月带通滤波后的分布; (c) 三氧化氮年际异常 SAO 的方差贡献率

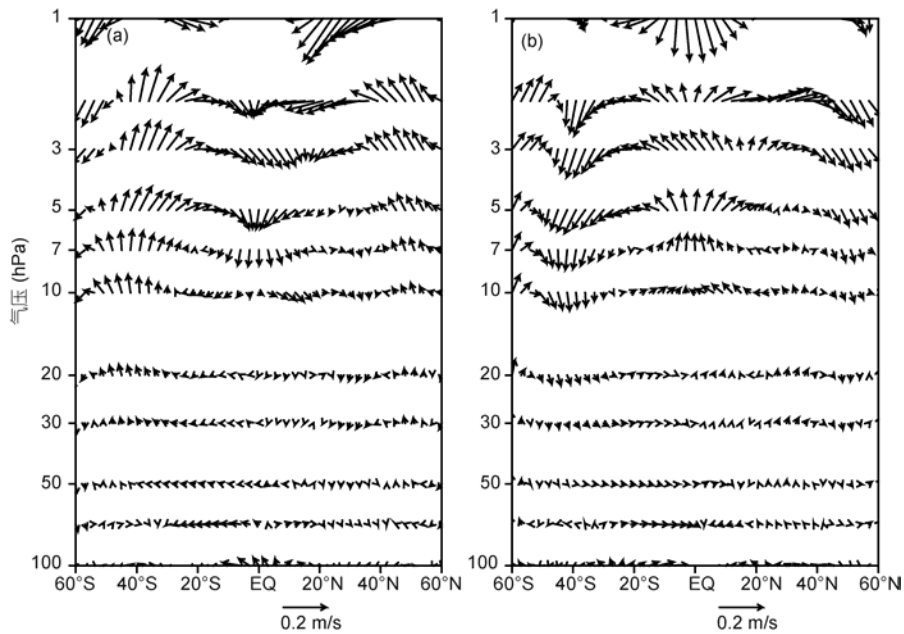


图6 不同纬向风 SAO 阶段时剩余环流的合成分布

(a) 西风态 SAO 时的剩余环流; (b) 东风态 SAO 时的剩余环流

层剩余环流异常的合成分布,从中可以看出在西风态 SAO 时,平流层高层存在 2 个明显的经圈输送环流,北半球为逆时针方向输送,南半球为顺时针方向输送.这 2 个环流造成了赤道地区平流层高层强烈的下沉输送作用,三氧化氮含量较高的大气被输送到下层,引起了平流层中、下层三氧化氮的增加.并且绝热下沉运动会造成大气温度的升高,也有利于三氧化氮的生成.在东风态 SAO 时,平流层高层的 2 个经圈环流输送方向反转,赤道地区为显著的向上输送作用,低层三氧化氮含量较低的大气被输送到高层,引起 10~2 hPa 高度范围内三氧化氮的负异常,同时绝热上升运动造成的温度下降也不利于生成三氧化氮的化学反应.

以上的分析表明赤道平流层中臭氧和二氧化氮的年际异常主要表现为准两年的周期振荡,而三氧化氮主要表现为半年的周期振荡.为了进一步分析动力输送和化学反应各自的贡献,图 7 给出了臭氧、二氧化氮和三氧化氮相互之间的相关系数,以及三者与 QBO 和 SAO 指数之间的相关系数分布,定义 10 hPa 高度的赤道纬向风为 QBO 指数,而 2 hPa 高度的赤道纬向风为 SAO 指数.分析 QBO 的效应发现:QBO 的影响范围主要集中在平流层中、低层,臭氧和 QBO 的相关系数存在 2 个大值区,并且在 28 km 处发生转折,与其时间序列分布一致.已有研究指出

28 km 处的转折对应了动力和化学效应的综合影响,在 28 km 以下臭氧主要受动力作用影响,而在 28 km 以上主要受化学反应和温度控制^[20,21].总的来说,臭氧和 QBO 的相关系数在平流层低层较高,在平流层高层较低.二氧化氮和 QBO 的相关系数存在 2 个大的正值区,一个位于 28~35 km,一个位于 37~45 km,这一特征与化学反应和动力输送都有着紧密的联系.三氧化氮和 QBO 在 36 km 处有较明显的负相关,这是因为纬向风 QBO 的不同阶段垂直输送的作用不同.

分析 SAO 的效应发现:在 30~45 km 高度,三氧化氮和 SAO 间存在明显的连续正相关关系,这是因为在纬向风 SAO 的不同阶段,经圈剩余环流表现出相反的输送方向,西风态 SAO 对应了三氧化氮的正异常,东风态 SAO 对应了三氧化氮的负异常.臭氧和 SAO 的相关关系在 40 km 附近为连续的负相关,二氧化氮和 SAO 的相关系数在 30~47 km 高度都为负值,这是因为臭氧和二氧化氮主要分布区域低于三氧化氮,因此相同方向的输送作用对它们的影响和三氧化氮不同,例如向上的输送作用会带来富含臭氧和二氧化氮的大气,但对于三氧化氮却是含量较低的大气,反之亦然.

分析臭氧、二氧化氮和三氧化氮相互之间的相关关系发现:一共存在 3 个相关系数绝对值超过 0.5 的区域:首先在 28~35 km 高度,臭氧和二氧化氮表现

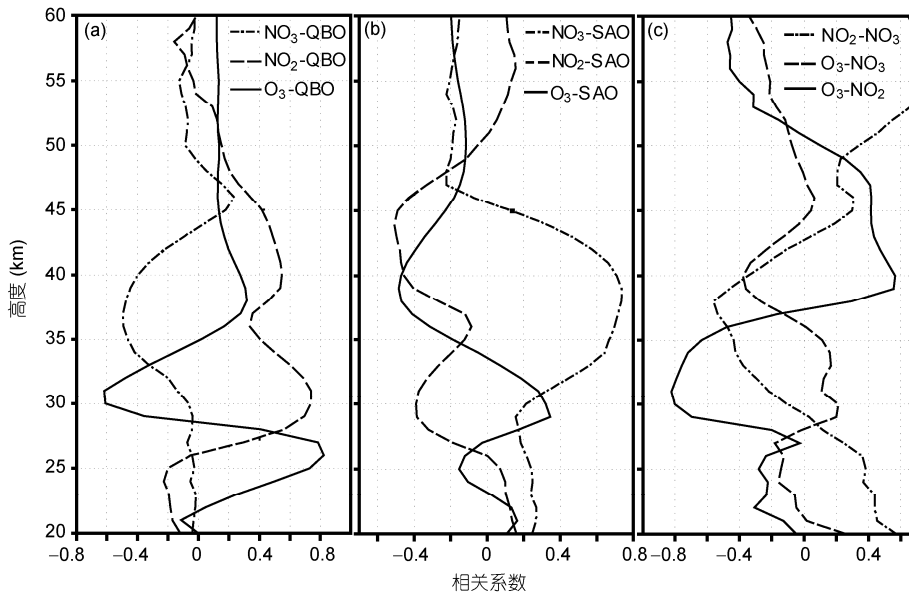
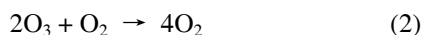


图 7 臭氧、二氧化氮、三氧化氮和 QBO, SAO 指数的相关关系及相互之间的相关关系

(a) 臭氧等和 QBO 指数的相关系数分布; (b) 臭氧等和 SAO 指数的相关系数分布; (c) 臭氧、二氧化氮和三氧化氮相互之间的相关系数分布

出显著的负相关,这是由于在这一区域有活跃的接触化学反应,氮氧化物可以消耗臭氧^[22].其次,在38~48 km高度,臭氧和二氧化氮具有明显的正相关关系,Hauchecorne等人^[13]对这一现象做出了2种可能的解释,认为主要是由上升运动带来的氧化亚氮(N₂O,又称一氧化二氮)维持了臭氧和二氧化氮之间的化学平衡.此外在50~60 km高度二氧化氮和三氧化氮存在明显的正相关关系,之前大部分的观测都局限在40 km以下,无法捕捉到这一特征,因此下面对这一现象进行研究分析.在赤道平流层上层存在着大量的氧化亚氮^[23],向上的输送作用会将氧化亚氮送到大气上层,并通过氧化反应转化为氮氧化物,这一化学反应过程为平流层高层提供了足够的二氧化氮,通过化学反应(1)维持了二氧化氮和三氧化氮之间的化学平衡,这一化学过程对温度十分敏感并且在平流层高层非常普遍^[24],更加详细的模式研究有助于对这一假设机制的验证和完善.臭氧和三氧化氮之间的关系较难解释,因为在平流层高层臭氧有很多复杂的化学反应,例如受温度影响的自我分解过程^[24]:



以上的分析表明:赤道平流层纬向风QBO的动力作用是影响平流层臭氧和二氧化氮分布的主要因素;在32~45 km高度,三氧化氮主要受SAO的动力效应控制,化学反应过程也有一定的贡献;在平流层高层,化学过程维持了二氧化氮和三氧化氮的平衡,在很大程度上影响着它们的时空分布.

4 结论与讨论

GOMOS卫星观测资料提供了超过6年(2002~2008年)连续的臭氧、二氧化氮和三氧化氮的观测数据,这一卫星资料为研究平流层环流变化过程提供了新的资料集.本文详细分析了赤道平流层纬向风的准

两年、半年周期振荡对臭氧、二氧化氮和三氧化氮分布的影响,并且探索了形成这些变化的动力和化学机制.

根据GOMOS观测结果和ERA-Interim再分析资料研究发现:臭氧的年际变化异常有显著的准两年周期振荡特征,并且这一分布特征与平流层纬向风的QBO密切相关.赤道(10°S~10°N)上空臭氧和垂直剩余速度 w^* 的分布表明:动力输送作用是臭氧形成QBO分布的主要因素,影响范围从20至38 km,不只包括了Hauchecorne等人^[13]提出的28 km以下区域.赤道外的热带地区,在平流层的低层,动力作用在一些年中较为显著;在平流层的中层,动力输送作用只在南半球区域影响臭氧的QBO分布.二氧化氮的年际异常在赤道平流层中、高层也表现出明显的QBO特征,并且呈准静止分布形势,这与10~1 hPa高度上 w^* 的深厚分布特征密切相关.二氧化氮的纬向结构在平流层中层呈非对称分布,其中只有南半球分布与垂直输送作用有关.在赤道平流层高层,三氧化氮的年际异常呈典型的SAO分布特征,分析赤道纬向风SAO不同阶段的剩余环流发现:动力作用是最主要的影响因素,赤道区域的垂直运动不仅可以通过输送过程改变三氧化氮的分布,还可以通过影响温度变化调节化学反应的强度和速率,从而进一步影响三氧化氮的分布.化学反应过程在平流层高层和中间层对大气成分的变化有着重要影响.最后,本文利用剩余环流诊断分析了大气环流的变化及其对化学反应过程的影响,因此可以较为真实的反应平流层大气成分的变化过程.

本文在影响平流层大气成分长期变化的诸多过程中重点探索了2个方面:赤道纬向风准两年、半年周期振荡过程和化学反应过程,详细地分析了臭氧、二氧化氮、三氧化氮等成分的变化特征及其与动力、化学过程的关系,为深入研究平流层大气化学成分的变化规律奠定了一定的基础.

致谢 感谢欧洲气象中心提供了再分析资料.

参考文献

- Wallace J M, Holton J R. A diagnostic numerical model of the quasi-biennial oscillation. *J Atmos Sci*, 1968, 25: 280-292
- Wallace J M, Panetta R L, Estberg J. Representation of the equatorial stratospheric quasi-biennial oscillation in eof phase space. *J Atmos Sci*, 1993, 50: 1751-1762
- Holton J R, Tan H C. The influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 mb. *J Atmos Sci*, 1980, 37: 2200-2208

- 4 Plumb R A. The interaction of two internal waves with the mean flow: Implications for the theory of the quasi-biennial oscillation. *J Atmos Sci*, 1977, 34: 1847–1858
- 5 Tung K, Yang H. Global QBO in circulation and ozone, part I, reexamination of observational evidence. *J Atmos Sci*, 1994, 51: 2699–2707
- 6 Tung K, Yang H. Global QBO in circulation and ozone, part II, a simple mechanistic model. *J Atmos Sci*, 1994, 51: 2708–2721
- 7 Logan J A, Jones D B, Megretskaja I A, et al. Quasi-biennial oscillation in tropical ozone as revealed by ozone-sonde and satellite data. *J Geophys Res*, 2003, 108: 4244, doi: 10.1029/2002JD002170
- 8 Chen Y J, Zheng B, Zhang H. The features of ozone quasi-biennial oscillation in tropical stratosphere and its numerical simulation. *Adv Atmos Sci*, 2002, 19: 777–793
- 9 郑彬, 施春华, 陈月娟. 平流层中部甲烷的赤道反对称输送. *科学通报*, 2006, 51: 455–458
- 10 Kyrölä E, Tamminen J, Leppelmeier G W, et al. Nighttime ozone profiles in the stratosphere and mesosphere by the global ozone monitoring by occultation of stars on Envisat. *J Geophys Res*, 2006, 111: D24306, doi: 10.1029/2006JD007193
- 11 Hauchecorne A, Bertaux J L, Dalaudier F, et al. First simultaneous global measurements of nighttime stratospheric NO₂ and NO₃ observed by global ozone monitoring by occultation of stars in 2003. *J Geophys Res*, 2005, 110: D18301, doi: 10.1029/2004JD005711
- 12 Kyrölä E, Tamminen J, Sofieva V. Gomos O₃, NO₂, and NO₃ observations in 2002–2008. *Atmos Chem Phys*, 2010, 10: 7723–7738
- 13 Hauchecorne A, Bertaux J, Dalaudier F, et al. Response of tropical stratospheric O₃, NO₂ and NO₃ to the equatorial quasi-biennial oscillation and to temperature as seen from Gomos/Envisat. *Atmos Chem Phys*, 2010, 10: 8873–8879
- 14 Liu C X, Liu Y, Cai Z N, et al. A Madden-Julian oscillation triggered record ozone minimum over the Tibetan Plateau in December 2003 and its association with stratospheric “low-ozone pockets”. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L15830, doi: 10.1029/2009GL039025
- 15 Liu Y, Cai Z N, Kyrölä E. Comparison of ENVISAT GOMOS and MIPAS ozone profiles with balloon sonde measurements from Beijing. In: *Proceedings of the Dragon 1 Programme Final Results 2004–2007*, Beijing, PR China. ESA SP655, 2008
- 16 Van Gijssel J, Swart D, Baray J, et al. GOMOS ozone profile validation using ground-based and balloon sonde measurements. *Atmos Chem Phys Discuss*, 2010, 10: 8515–8551
- 17 Dee D, Uppala S. Variational bias correction of satellite radiance data in the Era-interim reanalysis. *Quart J R Meteorol Soc*, 2009, 135: 1830–1841
- 18 施春华, 郑彬, 陈月娟, 等. 热带平流层水汽的准两年周期振荡. *地球物理学报*, 2009, 52: 2428–2435
- 19 Marchand M, Bekki S, Lefevre F, et al. Temperature retrieval from stratospheric O₃ and NO₃ Gomos data. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L24809, doi: 10.1029/2007GL030280
- 20 Butchart N, Scaife A, Austin A, et al. Quasi-biennial oscillation in ozone in a coupled chemistry-climate model. *J Geophys Res*, 2003, 108: 4486, doi: 10.1029/2002JD003004
- 21 Tian W S, Chipperfield M, Gray L, et al. Quasi-biennial oscillation and tracer distributions in a coupled chemistry-climate model. *J Geophys Res*, 2006, 111: D20301, doi: 10.1029/2005JD006871
- 22 Chipperfield M, Gray L, Kinnarsley J, et al. A two-dimensional model study of the QBO signal in Sage NO₂ and O₃. *Geophys Res Lett*, 1994, 21: 589–592
- 23 Jin J J, Semeniuk K, Beagley S, et al. Comparison of cmam simulations of carbon monoxide (CO), nitrous oxide (N₂O), and methane (CH₄) with observations from Odin/Smr, Ace-Fts, and Aura/MIs. *Atmos Chem Phys*, 2009, 9: 3233–3252
- 24 Brasseur G P, Solomon S. *Aeronomy of the Middle Atmosphere: Chemistry and Physics of the Stratosphere and Mesosphere*. Heidelberg: Springer, 2005