

北京地区对流层顶变化及其对上对流层/下平流层 区域臭氧变化的影响

王庚辰 孔琴心 陈洪滨

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘要 根据2001~2003年期间获得的大气臭氧探空资料, 揭示了北京地区上空对流层顶高度的某些变化特征及其对上对流层(UT)和下平流层(LS)区域内大气臭氧含量变化的影响。结果显示: 北京地区上空对流层顶高度的平均值约11.1 km, 其变化范围为7.7~14.4 km, 臭氧层顶始终处在对流层顶下方约0.9 km高度处。对流层顶高度变化与臭氧总量变化之间的关系相对较弱。通常情况下, LS中的臭氧积分量明显高于UT中的相应值, 并且二者呈相反的季节变化特征。北京地区上空仲夏和初秋季节第一对流层顶出现的频数明显减少, 在第一对流层顶消失的情况下, LS中的臭氧积分量明显减少, 而UT中的臭氧积分量明显增加, 臭氧量减少最多发生在200~100 hPa层次中, 而臭氧量增幅最大的层次是400~250 hPa。

关键词 对流层顶 对流层-平流层交换 臭氧变化 臭氧层顶

文章编号 1006-9895(2006)04-0587-09

中图分类号 P421

文献标识码 A

Variation of the Tropopause Height and Its Influence on Ozone Variation in Upper Troposphere/Lower Stratosphere over Beijing

WANG Geng-Chen, KONG Qin-Xin, and CHEN Hong-Bin

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

Abstract Based on ozonesonde data for 2001–2003, some variation characteristics of the tropopause height and its influence on ozone variation in upper troposphere/lower stratosphere (UT/LS) region over Beijing are discussed. Results show that the average tropopause height over Beijing is about 11.1 km with variation range of 7.7–14.4 km, the ozonopause is located, on average, at 0.9 km below the tropopause height throughout the year. In general, integrated ozone content in the LS is much larger than that in the UT, and opposite seasonal variation appears. The negative relation between the tropopause height and total ozone content is relatively weak for Beijing area. Appearance frequency of the tropopause decreases evidently in midsummer and early autumn. In the case of tropopause absence, clear ozone decrease in the LS and ozone increase in the UT are observed. The maximum ozone decrease happens in the layer of 200–100 hPa, while the maximum ozone increase appears in the layer of 400–250 hPa.

Key words tropopause, upper tropopause/lower stratosphere, ozone variation, ozonopause

1 引言

近些年来, 由于对流层-平流层交换在气候变

化中的重要性逐渐被人们认识, 人们对对流层顶的变化也给予越来越多的关注。这是因为在对流层顶这个特殊的大气层次中发生着一些特殊的化学、

辐射、物质输送等过程,而这些过程对于气候-化学相互作用研究以及认识对流层-平流层交换在气候变化中的作用等科学问题有着重要的意义。对流层顶高度的变化甚至可以视为人类活动影响气候变化的标识^[1~3]。研究对流层顶的变化是认识对流层-平流层交换的极为重要的环节,但是,迄今为止,这方面的绝大部分研究工作主要集中在热带对流层顶,这是因为人们通常认为热带对流层顶在对流层-平流层气团交换中起着关键作用^[4, 5]。对于非热带对流层顶,尤其是中纬度地区的对流层顶却研究得很不够,人们对这一区域中各种过程的复杂耦合关系还缺乏认识,对中纬度地区对流层顶在对流层-平流层能量和物质交换中所起的作用还了解甚少^[6, 7]。

已有的研究表明,在对流层顶附近,除气温外,水汽含量、臭氧含量以及气溶胶浓度等参数也都有明显的空间变化,其中臭氧被认为是区分对流层和平流层气团的方便而有效的大气组分之一。因此,在对流层顶区内臭氧的变化可作为了解对流层-平流层交换特征以及认识对流层顶在气候变化与大气化学之间相互作用中地位的重要指标。因此,关于对流层顶高度变化对臭氧影响的研究也倍受关注^[1, 7, 8]。

本文的目的是根据臭氧探空仪的实际探测资料,重点分析和揭示北京地区上空对流层顶的变化及其对上对流层和下平流层(UT/LS)这一区域中臭氧含量影响的一些基本观测事实,从而为定量认识中纬度地区上空 UT/LS 区域内臭氧交换特征提供依据。

2 资料来源和可靠性分析

2001 年 3 月至 2003 年 12 月期间,在北京南苑观象台^[(39°48'N, 116°28'E), 海拔高度 34 m]先后共进行了 28 个月的大气臭氧高空探测,平均探测高度为 30748 m。共获得有效资料(包括臭氧垂直廓线、温度和湿度垂直廓线、风向和风速垂直廓线等)159 组,其中春、夏、秋、冬各季节的有效臭氧垂直廓线资料数分别为 41、35、44、39。所使用的 GPSO3 型臭氧探空仪属带 GPS 的电化学式臭氧探空仪^[9]。为评价大气臭氧探测资料的可靠性,曾将 GPSO3 型臭氧探空仪的臭氧传感器技术性能与芬兰 Vaisala 公司使用的 ECC 型臭氧传感器进行了实验室比对和近地面大气中的臭氧浓度平行测量比

对,除此之外,对 GPSO3 和 Vaisala 两类臭氧探空仪进行了现场单独平行施放和同球施放比对^[10, 11]。现场施放比对结果表明,两者所测得的臭氧垂直分布廓线结构非常接近,平均而言,Vaisala 测值与 GPSO3 臭氧测值之间的相对误差约为 15%(对流层)、5%(平流层下部)和 10%(平流层中部)。为进一步考查 GPSO3 大气臭氧探空资料的可靠性,用同一时间 Dobson 臭氧仪测得的臭氧柱总值对 GPSO3 得到的每一条臭氧垂直廓线的臭氧积分量值进行了归一化因子计算,159 次臭氧探测的平均归一化因子为 1.021。有关 GPSO3 臭氧探空仪比对和资料可靠性的详细讨论参见文献^[11]。

GPSO3 臭氧探空仪根据设定的测量程序,每次探测给出温、湿、压、风和臭氧分压的垂直分布廓线,并按要求给出相应的对流层顶高度、臭氧层顶高度以及各标准等压面和特性层的臭氧值和其他气象参数值。

3 对流层顶和臭氧层顶高度变化的一般特征

对所获臭氧探空资料的分析表明,地处中纬度的北京地区上空通常会出现两种对流层顶,即第一对流层顶(暖而低的极地型对流层顶,简称第一对)和第二对流层顶(冷而高的热带型对流层顶,简称第二对)。观测资料显示,北京地区上空,一年中约有四分之三的观测日有第二对流层顶存在,同时夏季和初秋第一对流层顶出现的频数明显减少。进入 6 月份,第一对流层顶出现的频数由 5 月份的 100%减至 77%,而 7、8、9 月三个月第一对流层顶出现的频数平均仅为 30%,进入 9 月份,这一频数明显增加,达到了 94%。与此同时,7、8、9 月三个月北京上空第二对流层顶出现频数平均高达 74%。两类对流层顶出现频数的这种变化反映了北京地区上空夏季和初秋热带对流层顶占主导地位这一基本事实。例如,统计结果显示,在 6 月 25 日至 9 月 30 日期间的 46 次观测中,无第一对流层顶的就有 33 次,约占 72%。

表 1 给出了根据 159 次臭氧探空资料得到的北京地区上空对流层顶和臭氧层顶高度的变化特征。可以发现,第一对流层顶高度随季节而变化,即夏季最高,冬季最低,季节变化幅度平均约为 1.5 km;而第二对流层顶高度的季节变化则不明显,只是在

表 1 对流层顶和臭氧层顶高度的季节变化
Table 1 Seasonal variation of the tropopause and ozonepause height

	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter	年均 Yearly average	季节变化幅度 Seasonal variation amplitude
第一对顶高度 First tropopause height/km	11.1	11.7	11.3	10.2	11.1	1.5
第二对顶高度 Second tropopause height/km	16.9	16.7	16.0	16.6	16.4	0.9
臭氧层顶高度 Ozonopause height/km	9.9	10.9	10.4	9.5	10.2	1.4

秋季偏低，其季节变化幅度平均为 0.9 km。表 1 显示，北京地区上空第一对流层顶的平均高度为 11.1 km（接近于 40°N 极地对流层顶平均高度值 11.3 km）^[12]。第二对流层顶的平均高度为 16.4 km（高于 40°N 热带对流层顶平均高度值 15.3 km）^[12]，两类对流层顶的高度差为 5 km 左右。第一和第二对流层顶高度的变化范围分别为 7.7~14.4 km 和 12.9~21.7 km。北京上空第二对流层顶高度的变化幅度在秋末冬季明显大于夏季和初秋。表 1 中还列出了北京上空臭氧层顶高度的季节变化数据。大气中的臭氧约有 90%集中在被称为大气臭氧层的 10~50 km 高度范围内，而臭氧浓度的最大值一般出现在 20~25 km 高度范围内(中纬度地区)。臭氧在大气中的垂直分布很不均匀，一般是在对流层中下部，臭氧含量很少，而在对流层顶附近，从某一个高度起，臭氧分压的垂直梯度发生跃变，臭氧含量随高度剧增，这一高度被称为臭氧层顶^[12]。观测资料显示，

在所有的臭氧垂直分布廓线上，无一例外都存在着发生臭氧浓度突变的这样一个高度，这也是大气臭氧垂直分布廓线最显著的特征之一。这一被称为臭氧层顶的高度实际上是一个臭氧浓度发生突变的层次，是贫臭氧对流层和富臭氧平流层之间的一个过渡面。臭氧层顶高度变化特征对研究平流层和对流层之间的臭氧交换有着重要价值。表 1 显示，北京上空臭氧层顶的平均高度为 10.18 km，其变化范围为 7.7~12.2 km，即一年之中第一对流层顶和臭氧层顶高度的变化幅度分别约为 6.7 km 和 4.5 km。无论是对流层顶高度，还是臭氧层顶高度均表现出明显的季节变化。对流层顶高度变化主要受到对流层热力条件、下垫面特征以及大气环流活动的影响。夏季受亚洲南部高原巨大的地形作用而形成的高值闭合中心影响，北京地区上空对流层顶处于较高的位置，而冬季对流层顶高度降低主要受亚洲东部对流层顶高度低值闭合中心的影响^[12, 13]。

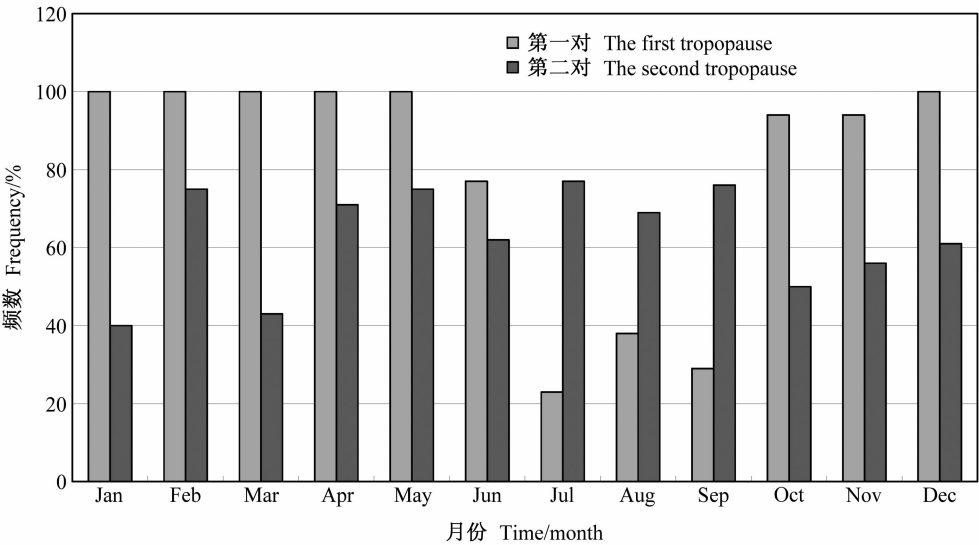


图 1 北京上空第一和第二对流层顶出现频数的月分布
Fig. 1 Monthly distribution of appearance frequency of the first and second tropopaues over Beijing

图 1 给出北京地区各月份第一和第二对流层顶出现的频数。平均而言,一年之中,第一对流层顶出现的频数达 80%,尤其是在冬、春季节,百分之百情况下均有第一对流层顶出现,而 7、8、9 三个月第一对流层顶出现的频数明显减少,约有 70%的探测未发现第一对流层顶存在。第二对流层顶在一年四季均可出现,平均而言,其出现频数达到 60%左右,但 4~9 月期间,其出现频数明显增多。一个值得注意的现象是,夏季和初秋期间第二对流层顶往往是在第一对流层顶消失的情况下出现,而在其他时间,第二对流层顶的出现大都伴随着第一对流层顶同时存在。所有这些均反映了北京地区上空热带气团和极地气团活动的基本特征。

4 对流层顶和臭氧层顶的相对变化

对流层顶和臭氧层顶的物理变化意义是相同的,前者反映温度垂直梯度的不连续,而后者则反映臭氧分压垂直梯度的跃变。由于对流层顶高度变化实际上是因为相应的热力学和动力学过程的改变所造成的,因此,研究对流层顶高度和臭氧层顶高度变化间的关系,不仅对认识臭氧动力学至关重要,而且对于认识 UT/LS 区域范围内臭氧的变化也是十分有帮助的。图 2 给出了北京地区上空对流层顶和臭氧层顶的逐月变化曲线,可以发现北京地区上空第一对流层顶与臭氧层顶有着十分密切的关系和十分类似

的变化特征,二者均呈现夏季高,秋、春次之,冬季最低的季节变化特征,其季节变化幅度也十分接近(约 1.5 km,见表 1)。北京地区上空一年之中,臭氧层顶始终位于第一对流层顶下方约 0.9 km 处,这似乎表明,北京地区上空 UT/LS 区域内始终有下沉运动存在。进一步分析表明,臭氧层顶与第一对流层顶之间的相对距离随季节而变,春季明显偏大(平均为 1.2 km),而冬季二者却较为接近(平均为 0.7 km)。观测结果还显示,春季和冬季二者变化的正相关性尤为明显,其相关系数分别达到 0.59 和 0.74。而夏、秋季这种相关却很弱。这一事实对研究上对流层和下平流层区域的垂直运动和臭氧交换有着最基本的价值。

5 对流层顶高度和臭氧柱总量变化

对流层顶是以对流活动为主的对流层与以平流运动为主的平流层之间的过渡层次,对流层顶的高度变化实际上反映了气团的上升和下沉运动变化,反映了不同气团的更替。正是由于这一原因,人们普遍认为对流层顶高度的变化是不同气团相对运动的结果,因此应该能反映大气中臭氧的柱总含量变化。为此,很多学者^[14, 15]根据实际观测资料研究分析了对流层顶高度变化与大气臭氧柱总量的关系,并认为对流层顶高度的抬升会导致大气臭氧柱总量的降低,相关系数 R 变化于 0.12~0.87 之间。通常

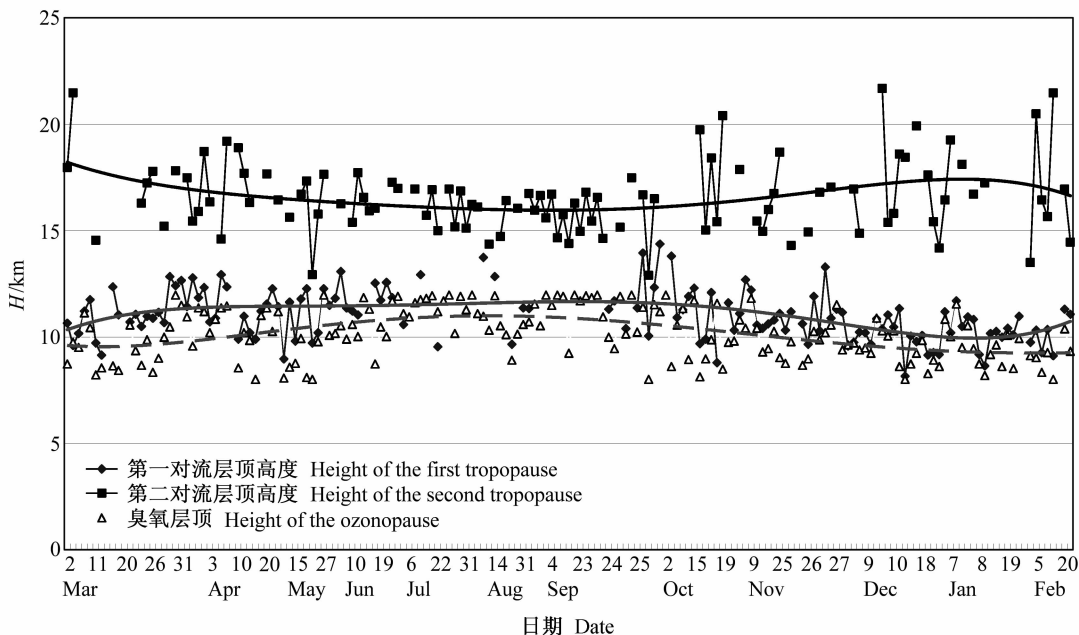


图 2 北京上空对流层顶和臭氧层顶高度的逐月变化
Fig. 2 Monthly variation of the tropopause and ozonopause heights over Beijing

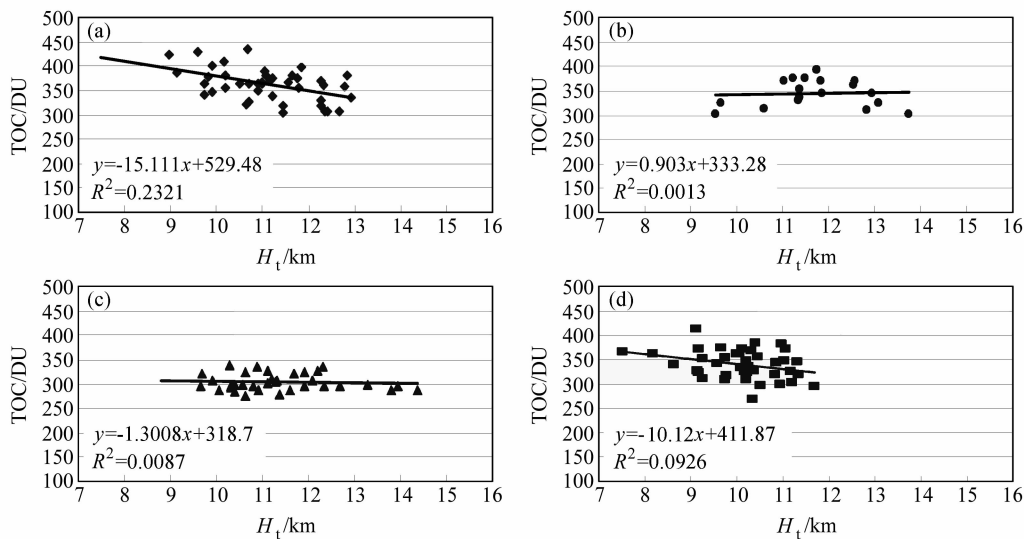


图3 对流层顶高度(H_t)变化与臭氧总量(TOC)变化:(a)春季;(b)夏季;(c)秋季;(d)冬季
Fig. 3 Variations of the tropopause height (H_t) and total ozone content (TOC): (a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

认为,对流层天气系统可直接影响平流层下部的臭氧,对流层气旋伴随着低的对流层顶和平流层下部的高臭氧量。相反,对流层反气旋则伴随着高的对流层顶和低的臭氧含量^[16~17]。但是,由于大气中臭氧总量的变化涉及到大气动力、辐射和大气化学等一系列复杂过程,同时大气臭氧柱总量有着明显的时空变化,而对流层顶高度的变化则主要与气团的垂直和水平运动有关,因此,对流层顶高度变化与大气臭氧总量的关系也会因时间和地理位置不同而发生变化。图3给出了北京地区上空不同季节对流层顶高度(H_t)和臭氧总量值(TOC)的变化。分析发现,对于北京地区,这种负相关相对较弱。比较而言,春季二者的负相关较明显,相关系数达-0.48,冬季次之,相关系数约为-0.30。这反映了北京地区上空春季由于冬季对流层顶向夏季对流层顶的过渡,会造成臭氧从平流层下部向对流层上部输送的增强,进而导致臭氧总量的增加。但另一方面,中纬地区对流层顶高度的抬升会引起贫臭氧的热带上对流层空气向中纬度下平流层运动,进而导致臭氧量的变化。而夏秋季节几乎看不出二者的变化之间有明显相关。可见,对流层高度变化与臭氧总量之间的关系随着季节和地区的差异也会有明显的变化。与此同时,对臭氧廓线资料分析显示,相对而言,北京地区对流层顶高度的变化与平流层下部臭氧变化之间的关系更明显(见下文)。但是应当指出,对流层顶高度变化与臭氧变化之间的这种关系及其时空

变化仍然缺乏足够的理论解释。

6 对流层顶与 UT/LS 区域的臭氧变化

从大气臭氧变化的角度来讲,对流层顶实际上是富臭氧的平流层与贫臭氧的对流层之间的过渡层次。很多研究结果显示,对流层顶高度的变化对 UT/LS 区域范围内的臭氧交换有着重要影响。为评价北京地区上空对流层顶变化对 UT/LS 区域内臭氧变化的影响,根据观测资料对北京地区上空不同层次中臭氧的积分浓度进行了计算,并结合相应的对流层顶高度变化进行了分析。图4给出了上对流层(5.9~11.0 km)和下平流层(11.0~18.5 km)两个

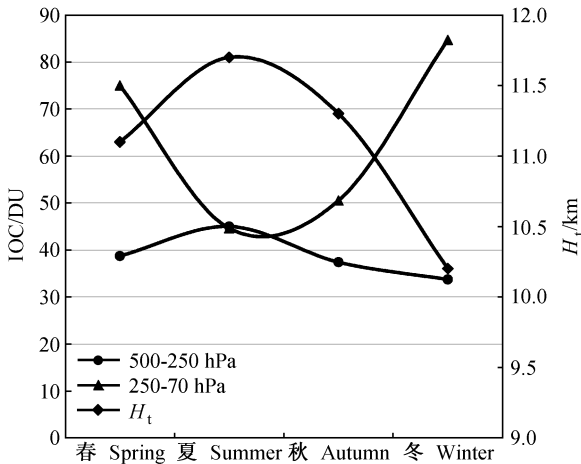


图4 UT和LS区域内臭氧积分量(IOC)的季节变化
Fig. 4 Seasonal variation of integrated ozone content (IOC) in upper troposphere/lower stratosphere (UT/LS)

层次中臭氧积分浓度值 (IOC) 以及第一对流层顶高度 (H_1) 的季节变化。图 4 显示了三个最重要的基本事实, 其一, 下平流层中的臭氧积分量及其变幅明显大于上对流层中相应值, 尤其在春冬季节, 二者差值分别达到 55.8 DU 和 67.6 DU; 其二, 下平流层中的臭氧积分量与上对流层中的相应值呈相反的季节变化特征, 即前者是冬季高夏季低, 而后者是夏季高冬季低, 而且臭氧积分量的季节变化幅度也是前者明显高于后者, 其季节变幅分别为 40.1 DU 和 5.2 DU; 其三, 对流层顶高度的季节变化基本上与上对流层中的臭氧积分量季节变化相似, 即夏季高冬季低。

从 UT/LS 区域臭氧交换的角度来讲, 上述基本观测事实中, 最值得讨论的是在北京地区夏季, 当第一对流层顶高度处于相对较高的位置时, 下平流层中与上对流层中的臭氧积分量之间的差别明显缩小。也就是说, 如果认为在两个层次中臭氧随高度均匀分布, 则两个层次中每公里所含的臭氧量已比较接近。考虑到北京地区上空仲夏和初秋季节, 第一对流层顶高度抬升并且出现的频数仅为 30% 左右, 这为臭氧从下平流层向上对流层输送创造了最有利的条件, 其结果使得北京地区上空夏季上对流层中臭氧积分量明显增加, 而下平流层中的臭氧积分量则明显降低, 最终造成了两个层次中每公里所含的臭氧积分量比较接近的状态。

通常认为, 平流层臭氧向对流层输送主要发生在副热带对流层顶的断裂区范围内。但是, 近年来越来越多的研究结果显示, 臭氧的交换与位势涡度密切相关, 即平流层中的臭氧可以沿着等熵面向下输送, 这个等熵面通常在大气斜压区中与对流层顶相交^[18]。这些研究结果可以对中纬度地区 UT/LS 区域中臭氧的交换给予比较满意的解释。北京地区上空仲夏和初秋季节, 第一对流层顶高度的抬升或消失会使得原本富臭氧的下平流层气团毫无障碍地出现在对流层上部, 从而导致上对流层中臭氧含量的增高。不仅如此, 在第一对流层顶消失或高度抬升的情况下, 经向环流对臭氧的输送会起重要作用, 尤其是在热带和中纬度地区。

观测资料显示, 北京上空 6、7、8 月份, 第一对流层顶不存在的情况分别约占 23%、77%、62%, 9、10 月份无第一对流层顶的情况分别约占 71%、6% (见图 1)。对流层顶的消失无疑有利于 LS 区域中的臭氧向较低的大气层渗透。为了定量地认识这一过

程, 下面对 UT/LS 区域不同层次中的臭氧量变化进行具体分析。为讨论 UT/LS 区域臭氧含量的变化特征, 根据等压面所处的高度位置, 将这一区域分为 6 个大气层次, 即 500~400 hPa、400~300 hPa、300~250 hPa、250~200 hPa、200~100 hPa、100~70 hPa, 各层所对应的高度范围分别为: 5.9~7.5 km、7.5~9.6 km、9.6~10.9 km、10.9~12.1 km、12.1~16.2 km、16.2~18.5 km。

图 5 分别给出了北京上空 6~7 月份以及 9~10 月份有第一对流层顶和无第一对流层顶情况下, UT/LS 区域范围内各层次中臭氧积分含量的变化特征, 图中 1、2、3、4、5、6 分别表示上述 6 个大气层次。图 5 揭示了两个基本观测事实, 一是在 UT/LS 区域内各层次中臭氧积分总量 (IOC) 呈现出夏季明显大于秋季的基本特征, 这与大气臭氧柱总量季节变化特相符; 第二个重要观测事实是在北京地区上空, 无论是夏季还是秋季, 当第一对流层顶消失时, 平流层下部的臭氧含量相对明显减少, 与此同时, 对流层上部的臭氧含量明显增多, 这说明第一对流层顶的消失直接造成了臭氧从平流层下部向对流层上部的输送。为了对这种臭氧变化有一定量的认识, 图 6 分别给出了夏秋季节第一对流层顶消失情况下, UT/LS 区域内各层次中臭氧积分量相对变化的绝对值和相对值。尽管图 6 给出的仅为 6、7 月和 9、10 月份的典型结果, 但仍可定量估计出, 无论夏季还是秋季, 在第一对流层顶消失的情况下, UT/LS 区域内各层次中臭氧量发生了明显的变化。图 6 显示, 在第一对流层顶消失的情况下, 平流层下部 (250~70 hPa) 臭氧积分量的减少平均为 49% (仲夏) 和 33% (初秋)。Weiss 等^[17]研究表明, 对流层顶的变化所引起的下平流层中的臭氧含量变化可达 40%。对于北京地区而言, 臭氧积分量减少最多发生在 200~100 hPa 层次中, 这里仲夏和初秋季节臭氧积分量分别减少约 58% 和 33%, 其臭氧减少绝对量分别达到 22.07 DU 和 7.30 DU。与此同时, 在对流层上部的各个层次 (500~400 hPa、400~300 hPa、300~250 hPa) 中臭氧积分量均有明显增加, 平均约增加 26% (仲夏) 和 32% (初秋), 相应的臭氧绝对增量分别为 5.68 DU (仲夏) 和 5.60 DU (初秋)。其中某些层次 (如 400~250 hPa) 的增幅达到 35% (仲夏) 和 41% (初秋)。

表 2 给出了北京上空第一对流层顶存在和消

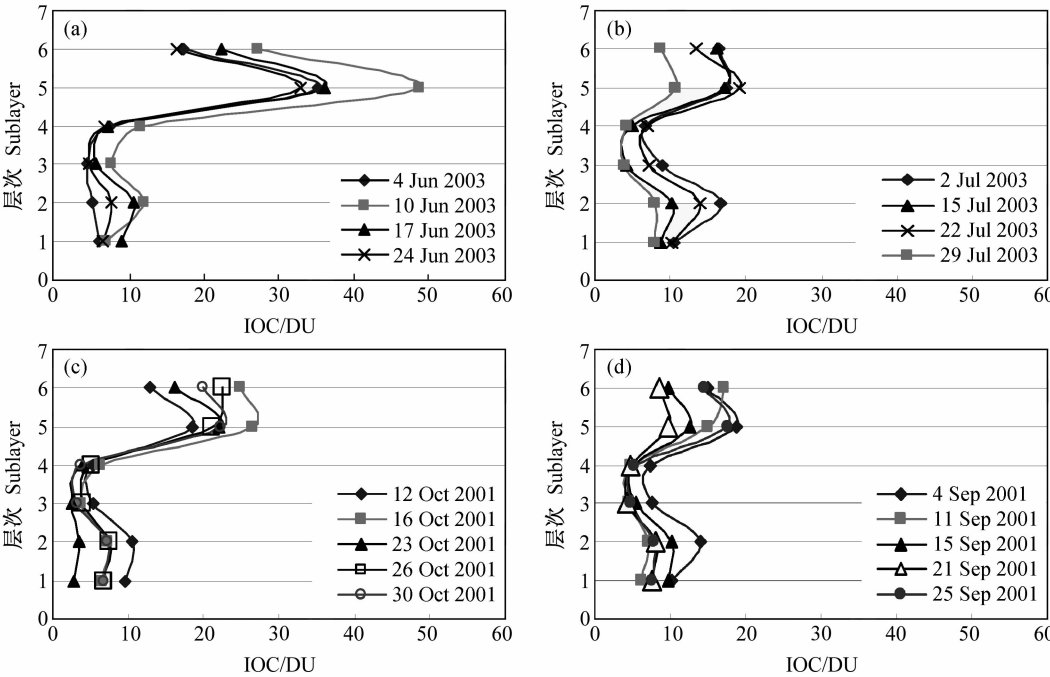


图 5 北京上空 6~7 月份 (a、b) 以及 9~10 月份 (c、d) UT/LS 各层次中臭氧积分量的变化：(a)、(c) 第一对存在；(b)、(d) 第一对消失
Fig. 5 Variation of integrated ozone content in various sublayers within UT/LS over Beijing during Jun - Jul (a, b) and Sep - Oct (c, d) : (a), (c) with the first tropopause; (b), (d) without the first tropopause

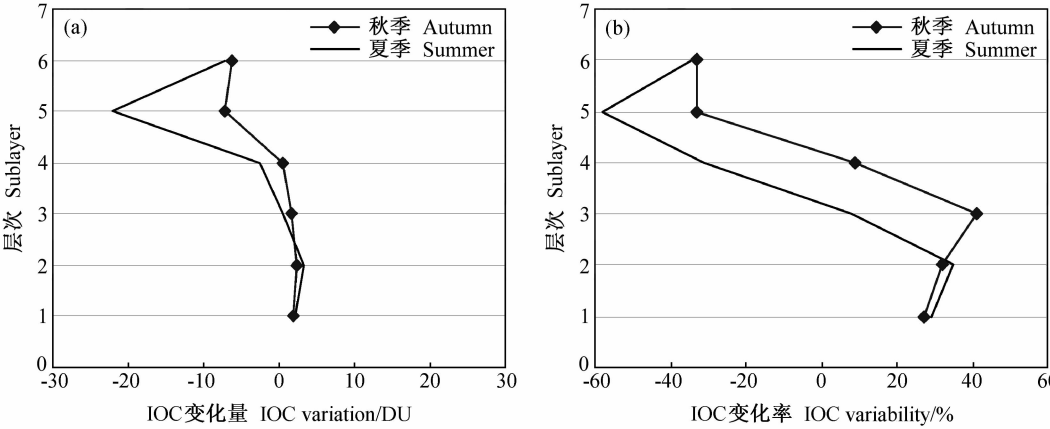


图 6 对流层顶消失情况下各层次臭氧积分量的变化
Fig. 6 Variation of integrated ozone content in various sublayers in absence of the tropopause

表 2 对流层顶存在和消失情况下 UT/LS 区域中的臭氧相对变化
Table 2 Variation of integrated ozone content in UT/LS with and without the tropopause

月份 Month	对流层顶存在 With the tropopause			对流层顶消失 Without the tropopause		
	UT	LS	相对变率	UT	LS	相对变率
	500~250 hPa	250~70 hPa	Variability	500~250 hPa	250~70 hPa	Variability
Jun - Jul	21.93 DU	59.03 DU	169%	27.61 DU	29.81 DU	8.0%
Sep - Oct	17.50 DU	41.34 DU	136%	23.10 DU	27.76 DU	20%

失的情况下,平流层下部(250~70 hPa)和对流层上部(500~250 hPa)臭氧积分量的相对变化情况。可以发现,在第一对流层顶存在的情况下,平流层下部(250~70 hPa)是一富集臭氧的层次,这一层次中的臭氧积分量约为对流层上部(500~250 hPa)相应值的169%(6、7月)和136%(9、10月)。对流层顶(通常位于250~200 hPa层次中)的存在显然为LS和UT之间的臭氧交换设置了障碍,导致了臭氧含量垂直分布的梯度很大。而在第一对流层顶消失的情况下,UT/LS区域各层次中臭氧量发生了较大的相对变化,平流层下部和对流层上部臭氧量之间的差异明显减小,这一差别分别由对流层顶存在情况下的169%(夏季)和136%(秋季)减少为8%(夏季)和20%(秋季)。可见,对流层顶的消失会大大增进臭氧从平流层下部向对流层上部的输送。应当特别指出,尽管对图5、图6和表2反映的基本观测事实需要结合其他相关大气过程,尤其是UT/LS区域范围内的动力学过程进行分析、解释,但从UT/LS区域臭氧交换的角度而言,北京地区上空在夏秋季的某些日子里,第一对流层顶的消失无疑为臭氧从平流层下部向对流层上部的输送创造了有利条件。

7 结论

(1) 北京地区上空对流层顶高度的年均值约11.1 km,其变化范围为7.7~14.4 km;夏季高,冬季低,季节变化幅度平均约为1.5 km。臭氧层顶高度同样呈现出夏高冬低的季节变化特征,但平均而言,臭氧层顶始终处在对流层顶下方约0.9 km的高度处。

(2) 北京地区上空,对流层顶高度与臭氧总量之间的关系相对较弱,春季和冬季它们之间呈较明显的负相关,相关系数分别为0.48和0.30。而夏秋季,平均而言,这种相关都极不明显。相对而言,对流层顶高度变化与平流层下部臭氧变化之间在一年四季均呈负相关,春季和冬季尤为明显。

(3) 平均而言,下平流层中的臭氧积分量明显高于上对流层中的相应值,但二者有着相反的季节变化特征,前者是冬季高夏季低,而后者则是夏季高冬季低,后者的季节变化特征基本上与对流层顶高度的变化相似。

(4) 北京地区上空仲夏和初秋第一对流层顶出

现的频数明显减少。在第一对流层顶消失的情况下,平流层下部的臭氧含量相对明显减少,平均分别减少49%(仲夏)和33%(初秋),与此同时,对流层上部各层次中的臭氧含量都明显增加,平均分别增加26%(仲夏)和32%(初秋)。

(5) 在第一对流层消失的情况下,UT/LS区域内各层次中的臭氧含量均会发生较大的相对变化,其中臭氧减少量最多发生在200~100 hPa层次中,分别达到58%(仲夏)和33%(初秋),而臭氧增幅最大发生在400~250 hPa层次中,分别达到35%(仲夏)和41%(初秋)。这表明对流层顶消失会大大促进臭氧从下平流层向上对流层输送。

致谢 本文使用的臭氧资料由中国科学院大气物理研究所、中国气象局探测综合试验基地和北京市气象局南苑观象台组成的大气臭氧联合试验技术组提供,特此致谢。

参考文献 (References)

- [1] WMO. Scientific assessment of ozone depletion; 2002. Global Ozone Research and Monitoring Project. Report No. 47, Geneva, Switzerland, 2003
- [2] Santer B D, Sausen R, Wigley T M L, et al. Behavior of tropopause height and atmospheric temperature in models, reanalyses, and observations: Decadal changes. *J. Geophys. Res.*, **108**, ACL-1, 10, 1029/2002JD002258, 2003
- [3] Santer B D, Wehner M F, Wigley T M L, et al. Contributions of anthropogenic and natural forcing to recent tropopause height changes. *Science*, 2003, **301**: 479~483
- [4] Wang S, Wang W-C. Inter-hemispheric asymmetry in the seasonal variation of the zonal mean tropopause. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 26645~26659
- [5] Sherwood S C, Dessler A E. A model for transport across the tropical tropopause. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2001, **58** (7): 765~779
- [6] Roelofs G J, Lelieveld J. Model study of the influence of cross tropopause O_3 transports on tropospheric O_3 levels. *Tellus*, 1997, **49B**: 38~55
- [7] Forster P M de F, Tourpali K. Effect of tropopause height changes on the calculation of ozone trends and their radiative forcing. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**: 12241~12251
- [8] 李国辉, 吕达仁, Tie X X. 对流层顶变化对上对流层/下平流层臭氧分布的影响. *空间科学学报*, 2003, **23**(4): 270~277
Li Guohui, Lü Daren, Tie X X. The impact of tropopause variation on ozone distribution in upper troposphere/lower stratosphere. *Chinese Journal of Space Science* (in Chinese), 2003, **23**(4): 270~277
- [9] 王庚辰, 孔琴心, 宣越健, 等. 中国大气臭氧探空仪的研制

- 和应用. 地球科学进展, 2003, **18**(3): 471~475
- Wang Gengchen, Kong Qinxin, Xuan Yuejian, et al. Development and application of ozonesonde system in China. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 2003, **18** (3): 471~475
- [10] 宣越健, 马舒庆, 陈洪滨, 等. 国产 GPSO3 与芬兰 Vaisala 臭氧探空仪的比对实验. 高原气象, 2004, **23** (3): 394~399
- Xuan Yuejian, Ma Shuqing, Chen Hongbin, et al. Intercomparisons of GPSO3 and Vaisala ECC ozonesondes. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23** (3): 394~399
- [11] 王庚辰, 孔琴心, 宣越健, 等. GPSO3 和 Vaisala 臭氧探空仪平行施放比对试验结果的初步分析. 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. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2004, **15** (6): 672~680
- [12] 麻哈维洛 Z M. 对流层顶气候学. 张贵银, 廖寿发, 译. 北京: 气象出版社, 1988. 303pp
- Mahover Z M. *Climatology of the Tropopause* (in Chinese). Translated from the Russia by Zhang Guiyin and Liao Shoufa. Beijing: China Meteorological Press, 1988. 303pp
- [13] 李国辉. 上对流层和下平流层若干问题研究. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2000
- Li Guohui. A study on several issues in the upper troposphere/lower stratosphere. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2000
- [14] Schubert S D, Munteanu M J. Analysis of tropopause pressure and total correlations. *Mon. Wea. Rev.*, 1988, **116**: 569~582
- [15] Hoinka K P, Claude H, Kohler U. On the correlation between tropopause pressure and ozone above central Europe. *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**: 1753~1756
- [16] Steinbrecht W, Claude H, Kohler U, et al. Correlations between tropopause height and total ozone: Implication for long-term changes. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**: 19183~19192
- [17] Weiss A, Staehelin J, Appenzeller C, et al. Chemical and dynamical contributions to ozone profile trends at the Payerne balloon soundings. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**: 22685~22694
- [18] Staehelin J, Harris N R P, Appenzeller C, et al. Ozone trends: a review. *Rev. Geophys.*, 2001, **39**: 231~290