

文章编号: 2096-1618(2016)01-0116-07

东亚3个站点臭氧层顶和对流层顶关系研究

张银量^{1,2}, 宣越健¹, 张金强¹, 陈洪滨¹, 万晓伟¹

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 中国科学院大气物理研究所中层大气和全球环境探测重点实验室, 北京 100029)

摘要:为研究东亚部分区域臭氧层顶和对流层顶的关系,利用统计的方法,结合中国北京、日本那霸和中国香港2001~2012年期间臭氧探空资料,对3个东亚地区的臭氧层顶和对流层顶分布特征进行了分析。结果表明,北京和那霸站点臭氧层顶位于对流层顶之下0.1 km,香港地区两者所处高度很一致。近10年内,3个站点对流层顶均呈现下降趋势,北京和那霸地区的臭氧层顶也出现下降趋势。北京、那霸和香港3个站点的臭氧层顶与对流层顶绝对差值在1 km以内所占比例分别为72.4%、80.9%和86.4%。北京地区第一对流层顶和臭氧层顶季节变化较为明显,均在夏季最高,冬季最低;那霸和香港地区出现反向特征,即冬季高,夏季低。

关键词:大气物理学与大气环境;臭氧层;臭氧探空;质量控制;对流层顶;臭氧层顶;东亚

中图分类号:P412.293

文献标志码:A

0 引言

臭氧层顶是一种化学成分对流层顶,概念首先由Bethan等基于臭氧混合比垂直梯度变化提出^[1],具体有3个定义条件:(1)臭氧体积混合比垂直梯度需大于 $60 \times 10^{-9}/\text{km}$;(2)臭氧体积混合比需大于 80×10^{-9} ;(3)臭氧体积混合比在对流层顶以上需大于 110×10^{-9} 。目前,臭氧层顶计算方法主要有Cutoff-from-below、Cutoff-from-above、Best-fit-line、Latitudinally-based-groups和Ozone-gradient等。2008年,Kerry等^[2]对比分析了由不同算法得到的臭氧层顶,结果表明,春季和夏季Ozone-gradient得到的臭氧层顶要明显高于其他方法;在不同地域,各种算法获得的臭氧层顶存在差别。热力学对流层顶是根据温度梯度的不连续特征定义的对流层到平流层的过渡区,理论研究中通常当成一个面^[3]。1957年,WMO给出了热力学对流层顶的定义:500 hPa等压面之上温度递减率小于或等于 $2^\circ\text{C}/\text{km}$ 的最低高度,且自此高度至其上2 km范围内的平均温度递减率不超过 $2^\circ\text{C}/\text{km}$ 。按该定义确定了一个热力学对流层顶之后,在此高度至其上1 km范围内的温度递减率超过 $3^\circ\text{C}/\text{km}$,则可根据该定义确定第二个热力学对流层顶^[4]。多层热力学对流层顶的形成和温度平流之间具有一定的相关性^[3]。当存在两层热力学对流层顶时,暖而低的极地型为第一对流层顶,冷而高的热带型为第二对流层顶^[5]。臭氧层顶和对流层顶可以利用臭氧探空资料同时计算得

到^[5]。

大气臭氧垂直分布资料可通过臭氧探空仪获取^[6-7]。目前,臭氧探空仪主要基于电化学原理设计^[8]。依据技术细节不同,这类型臭氧探空仪主要分为ECC、Brewer-Mast(BM)和KC3种类型^[9]。为评估不同臭氧探空仪的探测性能,世界气象组织举行多次对比试验,包括JOSIE-1996、JOSIE-1998和JOSIE-2000等^[10-17]。结果表明:ECC型探测精度为 $\pm(4 \sim 5)\%$,BM型探测精度为 $\pm(10 \sim 13)\%$,KC型探测精度为 $\pm(11 \sim 18)\%$ 。20世纪80年代末,中国自主研发GPSO3臭氧探空仪,并与ECC探空仪进行比对试验。结果表明:GPSO3臭氧传感器的灵敏度与ECC相当,泵效相差较小,响应时间比ECC传感器略大;GPSO3测量结果在1~12 km高度范围内偏高约为10%,在12~27 km高度范围内偏低约为10%^[18-20]。2005年,郑向东等^[21]分析了GPSO3臭氧探空仪观测资料,结果表明:中国产臭氧探空仪观测能够合理地反映臭氧垂直分布特征。

北京地区的臭氧层顶主要利用GPSO3臭氧探空资料计算,资料还被用于研究臭氧分布特征、验证卫星观测和模式结果。郑向东等^[22]联合使用ECC臭氧探空、气象和卫星资料分析了臭氧次峰和天气过程,指出臭氧次峰与切断低压和高空急流关系密切。2004年,王庚辰等^[23]使用北京地区2001年3月~2002年2月期间GPSO3臭氧探空资料分析北京上空大气臭氧分布结构,结果表明,该地区上空臭氧浓度季节极大值为15.1~16.7 mPa,高度位于20.7~25.1 km,季节极小值为2.0~2.8 mPa,高度在对流层顶附近。2007年,

收稿日期:2015-01-25

基金项目:公益性行业(气象)科研专项资助项目(GYHY201106041);国家自然科学基金资助项目(41275039)

卞建春等^[24]利用北京地区 2002 年 9 月至 2005 年 7 月 GPSO3 臭氧探空资料验证 AIRS 和 MLS 两种卫星资料在上对流层下平流层区域内的可用性,结果表明卫星资料和 GPSO3 臭氧探空资料一致性很好。2009 年,蔡兆男等^[25]使用 ECC 和 GPSO3 臭氧探空资料验证 GOME 卫星臭氧观测结果,卫星观测对流层柱总量与臭氧探空资料在拉萨、西宁和北京 3 个地区平均偏差小于 10 %。2012 年,王永等^[26]使用 GPSO3 数据发现:北京地区对流层臭氧在冬季出现极小值,夏季出现极大值,并且夏季极大值存在增长趋势。

除臭氧层顶相关研究,臭氧探空资料还可用于提取热力学对流层顶,并可与臭氧层顶分布特征进行对比分析,以获取对流层顶高度变化对上对流层和下平流层区域内大气臭氧含量变化的影响^[5]。2012 年,Anne 等^[27]指出,低臭氧层顶和对流层-平流层交换相对应。2006 年,Leclair 等^[28]研究表明,出现低臭氧层顶时,在较低高度范围内臭氧会快速增长,且具有臭氧次峰;当出现高臭氧层顶时,一般会伴随深对流发生。

研究臭氧层顶和热力学对流层顶的关系,对臭氧动力学的认识至关重要^[5],同时,还可从化学和热力学的角度更清楚的了解平流层和对流层的分界面。目前,中国关于臭氧层顶和对流层顶的对比研究还较少^[5],文中使用长时间序列(2001~2012 年)的臭氧探空资料,并利用卞建春^[4]提到的对流层顶和臭氧层顶计算方法探讨北京、那霸和香港地区臭氧层顶和对流层顶气候分布特征,旨在研究两者在东亚不同纬度地区的关系。

1 资料来源及处理

2001~2012 年,北京地区使用 GPSO3 探空仪测得 677 条臭氧廓线;日本那霸有 451 条廓线,由 KC-96 和 ECC 测得;中国香港站点由 ECC 测得 416 条廓线。后面 2 个站点资料来源于世界臭氧与紫外线辐射数据中心(WOUDC)。除了强烈天气过程以外,3 个站点的资料均是每周探测一次。为保证 GPSO3 探空资料的精度,文中首先对北京地区观测数据进行质量控制,主要包括泵效订正和总量订正。

质量控制首先是剔除探测廓线中不合理数据和舍弃不合理廓线。其中,不合理数据为廓线中发生突变或一直保持不变的数据点;不合理廓线主要包括积分臭氧总量与地基总量差值太大、探测野点过多以及探测高度未超过臭氧极值层的廓线。经过上述控制后,获得了 485 条更高探测精度廓线。

泵效即地面泵流速与探测高度处泵流速的比值,

用臭氧探测值除以对应高度上的泵效系数即得订正后的臭氧值。文中使用宣越健等^[19]提出的泵效系数,具体结果见表 1。

对泵效订正后的廓线进行积分,用地基总量除以积分总量求得总量订正系数,再用该系数乘以廓线中的臭氧值进行总量订正。当地基探测缺测时,使用前后两次总量的线性插值代替。总量订正公式如下^[29]

$$X = X_1 + X_2$$

$$X_1 = 0.789 \int_{P_2}^{P_1} r dP$$

$$X_2 = 0.789 \times r \times P_2$$

$$r_{\text{总}} = \frac{X_D}{X}$$

其中 X 是臭氧总量(单位为 DU), X_1 是探测高度以下的积分总量, X_2 为探测高度之上的积分总量, X_D 是地基臭氧总量, r 是臭氧的体积混合比, P_2 是最大探测高度处的气压, $r_{\text{总}}$ 是臭氧总量订正系数。

表 1 GPSO3 在不同环境气压下的泵效值

气压/hPa	GPSO3
1000	1.000
500	0.998
200	0.994
100	0.986
50	0.971
20	0.926
10	0.851
5	0.701

完成上述质量控制后,使用北京(116.5°E,39.8°N,34 m)、那霸(127.6°E,26.2°N,30 m)和香港(114.1°E,22.3°N,70 m)地区资料计算臭氧层顶和对流层顶。3 个站点纬度存在一定差异,北京最高、那霸次之、香港最小,旨在研究东亚不同纬度地区的对流层顶和臭氧层顶的关系。

2 臭氧层顶和对流层顶分布特征

研究热力学对流层顶和臭氧对流层顶的年际和季节分布特征。部分廓线得到的热力学对流层顶或者臭氧对流层顶明显偏低,且二者差异较大(>4 km),不能真实反映对流层和平流层的分界,故未进行讨论,其产生的物理机理正在另一研究中进行。该类数据在北京地区所占比例为 7 %,那霸为 2 %,香港为 0.7 %。

2.1 年际特征

表 2 是 2001~2012 年北京、那霸和香港站点平均

对流层顶和臭氧层顶高度(HO3)。可以看出:北京和那霸地区臭氧层顶在第一对流层顶(HT1)之下100 m,香港站点臭氧层顶与第一对流层顶高度相同。纬度越低,臭氧层顶和对流层顶越高,且纬度较低地区(那霸、香港)的第一对流层顶高于纬度较高地区(北京)的第二对流层顶(HT2)。由于不同算法得到的臭氧层顶高度存在差异^[2],结论一中北京地区的臭氧层顶和对流层顶位置关系比2006年王庚辰等^[5]的研究结果小0.8 km,但两者的臭氧层顶均在对流层顶之下。

表2 东亚3站点上空多年平均对流层顶和臭氧层顶高度/km

	北京	那霸	香港
第一对流层顶(HT1)	11.1	16.6	16.9
第二对流层顶(HT2)	14.3	17.2	17.5
臭氧层顶高度(HO3)	11.0	16.5	16.9
HT2-HT1	3.2	0.6	1.9
HO3-HT1	-0.1	-0.1	0.0

鉴于臭氧层顶和第一对流层顶的位置接近,且具有较好的相关性^[5],下面只分析臭氧层顶和第一对流层顶的关系。图1是北京、那霸和香港站点第一对流层顶与臭氧层顶差值频率分布图,差值范围为-4~4 km,差值区间为0.5 km。可以看出,北京地区臭氧层顶主要在对流层顶之下0~0.5 km范围内,所占比例为30.9%,那霸和香港地区臭氧层顶主要在对流层顶之上0~0.5 km范围内,各为33.6%和39.5%。这反映较高纬度地区臭氧层顶一般分布在对流层顶之下,较低纬度地区臭氧层顶一般分布在对流层顶之上,与对流层顶气候学中的结论一致。整体来说,热力学对流层顶和臭氧对流层顶高度吻合较好,北京、那霸和香港站点差值在-1~1 km所占比例分别为72.4%、80.9%和86.4%。

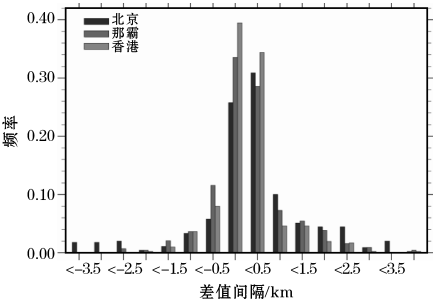
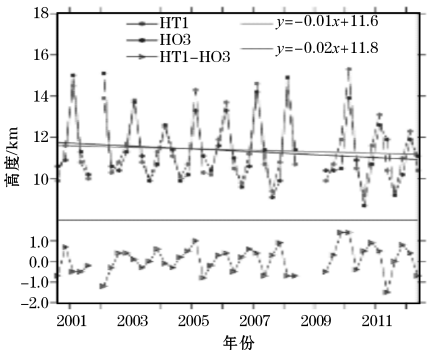


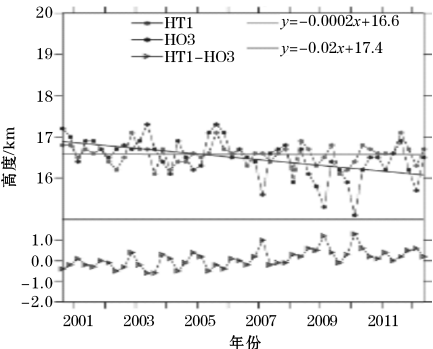
图1 北京、那霸和香港站点对流层顶与臭氧层顶差值频率分布

图2是北京、那霸和香港地区第一对流层顶、臭氧层顶以及两者差值年际分布特征。相对而言,北京站点对流层顶和臭氧层顶年际差异较大,那霸和香港地区差异较小。3个站点对流层顶均呈现下降趋势,北京和那霸地区的臭氧层顶也出现下降趋势,其中北京

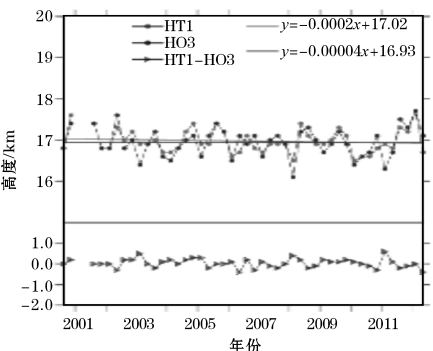
对流层顶和臭氧层顶10年间分别下降约400 m和800 m,那霸地区的对流层顶和臭氧层顶十年间分别下降约10 m和800 m,香港地区的对流层顶下降约80 m。北京对流层顶高度变化范围为9.2~15.3 km,臭氧层顶高度变化范围为9.2~15.1 km。那霸对流层顶高度变化范围为16.2~17.1 km,臭氧层顶高度的变化范围为15.3~17.3 km。香港对流层顶高度的变化范围为16.5~17.7 km,臭氧层顶高度的变化范围为16.4~17.7 km。整体来说,3个站点热力学对流层顶和臭氧对流层顶高度基本一致(差值维持在0 km附近)。



(a) 北京



(b) 那霸



(c) 香港

图2 北京、那霸和香港站点第一对流层顶(HT1)、臭氧层顶(HO3)及两者差值(HT1-HO3)年际分布

2.2 季节特征

对流层顶高度与地表对大气增温以及高层大气吸收辐射增温密切相关^[3],具有季节变化特征。表 3 是北京、那霸和香港地区第一对流层顶和臭氧层顶季节变化及其标准差。北京地区对流层顶和臭氧层顶季节变化较为明显,均在夏季最高,冬季最低,与 2006 年王庚辰等^[3]的研究结果一致。那霸和香港对流层顶和臭氧层顶未呈现出明显的季节变化,相对而言冬季较

高、夏季较低。此外,北京对流层顶的季节变化要大于臭氧层顶,而那霸和香港则呈现相反特征,即臭氧层顶季节变化大于对流层顶。北京和那霸地区在春季、夏季和秋季期间臭氧层顶标准差要大于或等于对流层顶,冬季小于或等于对流层顶。香港在夏季和秋季期间臭氧层顶标准差大于或等于对流层顶,春季和冬季小于对流层顶。表明在春夏秋季节内,臭氧波动要高于温度;但在冬季,臭氧波动要低于温度。

表 3 北京、那霸和香港地区第一对流层 (HT1) 和臭氧层顶 (HO3) 季节变化及其标准差/km

		北京		那霸		香港	
		平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
春季	HT1	10.6	1.2	16.6	0.9	17.0	0.7
	HO3	10.2	1.4	16.6	1.0	17.0	0.6
夏季	HT1	13.1	2.2	16.5	0.6	16.8	0.5
	HO3	12.4	2.6	16.1	1.0	16.6	0.7
秋季	HT1	11.7	2.2	16.6	0.5	16.8	0.5
	HO3	12.2	2.2	16.7	0.6	16.9	0.5
冬季	HT1	9.8	1.2	16.7	0.9	17.1	0.7
	HO3	9.9	1.2	16.8	0.7	17.1	0.6

图 3 为北京、那霸和香港不同季节内对流层顶与臭氧层顶差值频率分布。可以看出,3 个地区在 4 个季节的差值主要集中在 -1 ~ 1 km,其频率在春季 >75 %,夏季>58 %,秋季>66 %,冬季>80 %。此外,对流层顶和臭氧层顶分布关系存在逆反现象:在较热的低纬一般是对流层顶低于臭氧层顶,而在热的夏季则容易出现对流层顶高于臭氧层顶;在较冷的中高纬一般是对流层顶高于臭氧层顶,而在较冷的秋冬季节则容易出现对流层顶低于臭氧层顶。

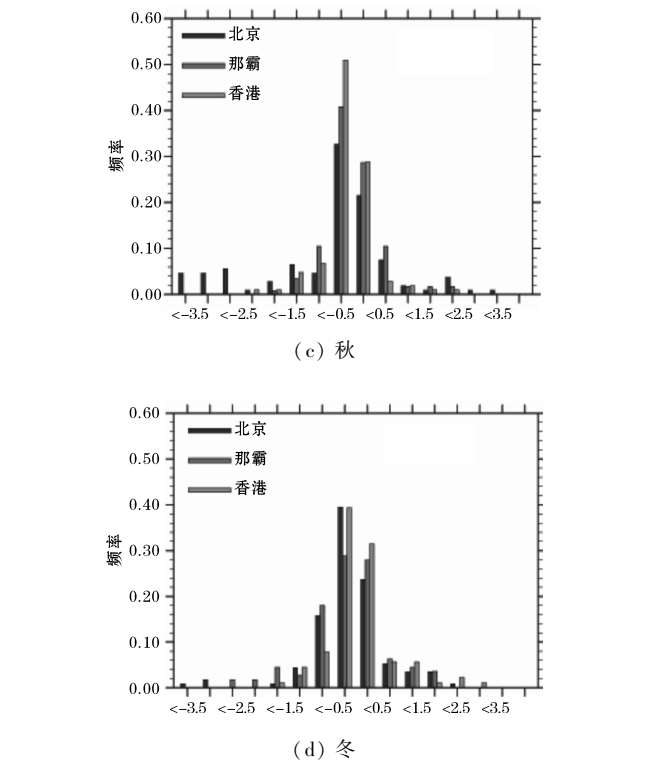


图 3 北京、那霸和香港不同季节对流层顶与臭氧层顶差值频率分布

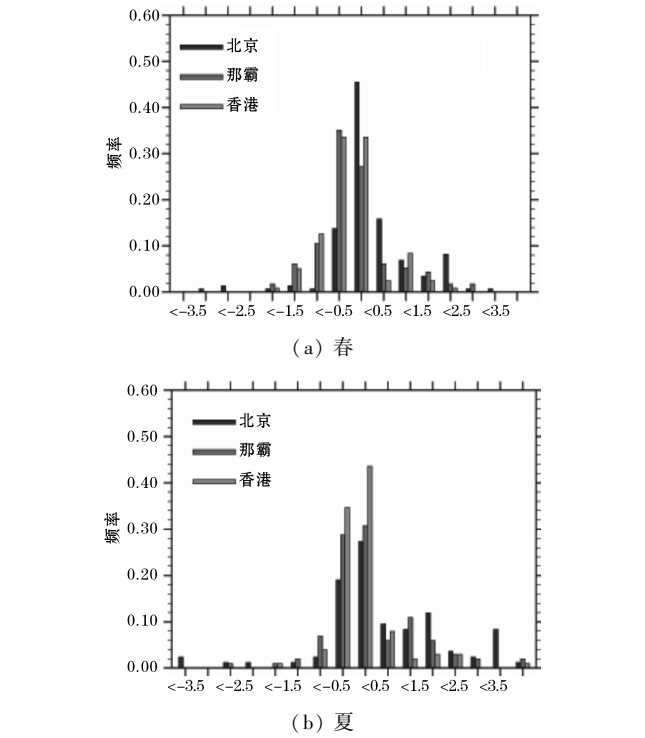
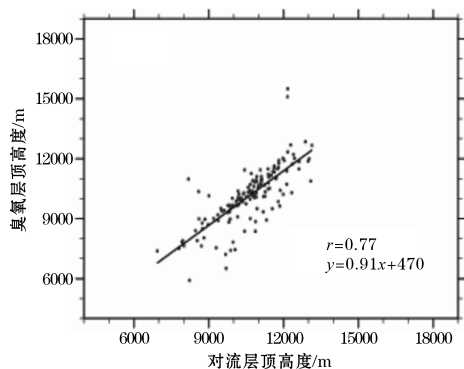
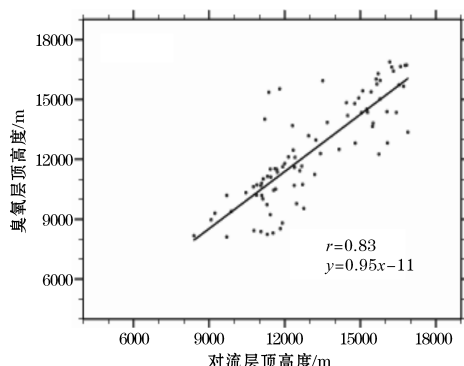


图 4 为北京地区不同季节内对流层顶和臭氧层顶的相关系数和回归曲线。4 个季节内回归曲线的斜率均小于 1,夏季的斜率最大 (0.95),冬季的斜率最小 (0.76)。此外,夏季相关系数最高 (0.83),春秋两季较为接近,冬季最小 (0.74)。由于臭氧层顶的计算方法不同,文中臭氧层顶和对流层顶的相关系数大于

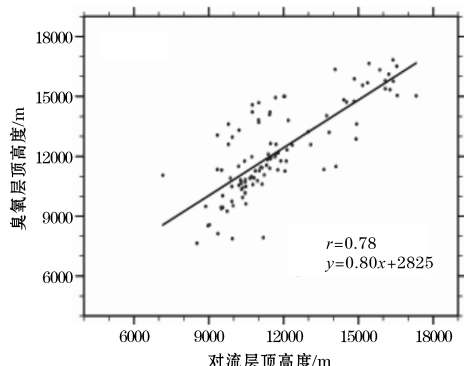
2006年王庚辰等^[5]的研究结果。



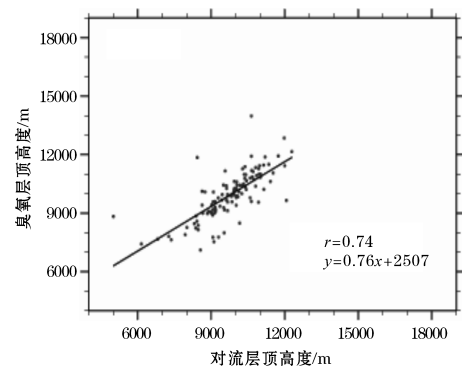
(a) 春



(b) 夏



(c) 秋



(d) 冬

图4 北京对流层顶和臭氧层顶的回归曲线

3 结论

利用北京、那霸和香港3个站点2001~2012年长时间序列的观测数据,分析对流层顶和臭氧层顶之间的关系,具体结论如下:

(1)北京和那霸地区平均臭氧层顶位于对流层顶之下,差值为0.1 km;香港站点两者几乎处于同一高度。近10年内,3个站点对流层顶均呈现下降趋势,北京和那霸地区的臭氧层顶也出现下降趋势。

(2)北京、那霸和香港对流层顶与臭氧层顶差值主要集中在-1~1 km,其年均差值维持在0 km附近,热力学对流层顶和臭氧对流层顶高度基本一致。

(3)在春夏秋3个季节,臭氧层顶波动要大于对流层顶,冬季反之。对流层顶和臭氧层顶的季节变化幅度和纬度有关,较高纬度地区季节变化幅度要大于较低纬度。

参考文献:

- [1] S Bethan, G Vaughan, S J Reid. A comparison of ozone and thermal tropopause heights and the impact of tropopause definition on quantifying the ozone content of the troposphere [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1996, 122(532): 929-944.
- [2] Kerry Meaghan Dougherty. The effect of ozonopause placement on tropospheric ozone budgets: An analysis of ozonesonde profiles from selected IONS-06 sites [D]. The Pennsylvania State University, 2008.
- [3] 张贵银, 廖寿发. 对流层顶气候学 (M). 北京: 气象出版社, 1988.
- [4] 卞建春. 上对流层/下平流层大气垂直结构研究进展 [J]. 地球科学进展, 2009, 24(3): 262-271.
- [5] 王庚辰, 孔琴心, 陈洪滨. 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 [J]. 大气科学, 2006, 30(4): 587-595.
- [6] 王贵琴. 大气臭氧研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [7] 郭世昌, 琚建华, 常有礼, 张秀年. 大气臭氧变化及其气候生态效应 [M]. 北京: 气象出版社, 2002.
- [8] 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 [J]. 地球科学进展, 2003, 18

- (3): 471–475.
- [9] 王庚辰. 我国大气臭氧探测技术的进展现状[J]. 地球科学进展, 1991, 6(6).
- [10] Herman G J Smit. Quality Assurance and Quality Control for Ozone Sonde Measurements in GAW. World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch [R]. Geneva, Switzerland: World Meteorol. Organ., 2013: 1–92.
- [11] J B Kerr, H Fast, C T McElroy, The 1991 WMO International Ozone Sonde Intercomparison at Vanscoy, Canada [J]. Atmosphere – Ocean, 1994, 32 (4): 685–716.
- [12] W D Komhyr, R A Barnes, G B Brothers, Electrochemical concentration cell ozonesonde performance evaluation during STOIC 1989 [J]. Journal Of Geophysical Research, 1995, 100 (D5): 9231–9244.
- [13] Gerard Ancellet, Matthias Beekmann. Evidence for changes in the ozone concentration in the free troposphere over Southern France from 1976 to 1995 [J]. Atmospheric Environment, 1997, 31 (17): 2835–2851.
- [14] Jennifer A Logan. An analysis of ozonesonde data for the troposphere: Recommendations for testing 3-D models and development of a gridded climatology for tropospheric ozone [J]. Journal Of Geophysical Research, 1999, 104 (D13): 16, 115–116, 149.
- [15] H G J Smit, D. Kley. The 1996 WMO International intercomparison of ozone sondes under quasi flight conditions in the environmental simulation chamber at Julich [R]. WMO Global Atmos, WMO-Report, 130, 1998.
- [16] H G J Smit, W. Strater. JOSIE-1998 Performance of ECC Ozone Sondes of SPC-6A and ENSCI-Z Type [R]. WMO Global Atmos, WMO-Report, 157, 2004.
- [17] H G J Smit, W Strater. The 2000 WMO international intercomparison of operating procedures for ECC-ozone sondes at the environmental simulation facility at Julich [R]. WMO Global Atmos, WMO-Report, 158, 2004.
- [18] 王庚辰, 孔琴心, 宣越健, 等. GPSO3 和 Vaisala 臭氧探空仪平行施放比对结果的初步分析 [J]. 应用气象学报, 2004, 15(6).
- [19] 宣越健, 马舒庆, 陈洪滨, 等. 国产 GPSO3 与芬兰 Vaisala 臭氧探空仪的比对试验 [J]. 高原气象, 2004, 23(3): 394–399.
- [20] Zhang Jingqiang, Xuan Yuejian, Yan Xiaolu, et al. Development and Preliminary Evaluation of a Double-cell Ozone Sonde [J]. ADVANCES IN ATMOSPHERIC SCIENCES, 2014, (31): 938–947.
- [21] 郑向东, 李伟. 国产臭氧探空仪观测数据质量分析 [J]. 应用气象学报, 2005, 16(5): 608–617.
- [22] 郑向东, 李维亮, 周秀骥, 等. 臭氧垂直分布个别观测中次峰现象的诊断分析 [J]. 自然科学进展, 2001, 11(11): 1181–1185.
- [23] 王庚辰, 孔琴心, 陈洪滨, 等. 北京上空大气臭氧垂直分布的特征 [J]. 地球科学进展, 2004, 19(5): 743–748.
- [24] Jianchun Bian, Andrew Gettelman, Hongbin Chen, et al. Validation of satellite ozone profile retrievals using Beijing ozonesonde data [J]. Journal of geophysical research, 2007, 112 (D06305): 1–11.
- [25] 蔡兆男, 王永, 郑向东, 等. 利用探空资料验证 GOME 卫星臭氧数据 [J]. 应用气象学报, 2009, 20(3): 337–344.
- [26] Y Wang, P Konopka, Y. Liu, et al. Tropospheric ozone trend over Beijing from 2002–2010: ozonesonde measurements and modeling analysis [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12: 8389–8399.
- [27] Anne M Thompson, Sonya K Miller, Simone Tilmes et al. Southern Hemisphere Additional Ozonesondes (SHADOZ) ozone climatology (2005–2009): Tropospheric and tropical tropopause layer (TTL) profiles with comparisons to OMI-based ozone products [J]. Journal Of Geophysical Research, 2012: 117.
- [28] J Leclair De Bellevue, A Rechou, J L Baray, et al. Signatures of stratosphere to troposphere transport near deep convective events in the southern subtropics [J]. Journal Of Geophysical Research, 2006: 111.
- [29] 孔琴心, 王庚辰, 刘广仁, 等. 大气臭氧垂直分布的电化学测量 [J]. 大气科学, 1992, 16(5): 636–640.

A Study of Relationship between Ozonopause and Tropopause
over Three Sites in the East Asian

ZHANG Yin-Liang^{1,2}, XUAN Yue-Jian¹, ZHANG Jin-Qiang¹, CHEN Hong-Bing¹, WAN Xiao-Wei¹

(1. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics Chinese, Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Statistical methods were applied to analyze the distribution characteristics of ozonopause and tropopause at Beijing, Naha, and Hongkong sites by using the ozonesonde data collected from 2001 to 2012. The ozonopause located about 0.1 km below the tropopause in Naha and Beijing; they were almost the same in Hongkong. A decreasing trend of tropopause was observed at three sites during the period. A same trend of ozonopause existed over Beijing and Naha regions. The absolute differences of two heights were generally less than 1 km for 72.4 % in Beijing, 80.9 % in Naha, and 86.4 % in Hongkong. A distinct seasonal variation of first tropopause and ozonopause was exhibited at Beijing site with the maximum value in summer and minimum value in winter. However, the maximum and minimum magnitude of the two parameters at Naha and Hongkong occurred in winter and summer, respectively.

Key words: atmospheric physics and atmospheric environment; ozone layer; ozonesonde; quality control; tropopause; ozonopause; East Asian