

北京地区对流层 - 平流层臭氧浓度廓线观测与分析

季成海, 陈昭仔, 韩羽庭, 兰 渝

民航华北空管局大兴空管中心, 北京

收稿日期: 2025年1月21日; 录用日期: 2025年2月5日; 发布日期: 2025年3月5日

摘 要

本文利用2022年8月至2024年12月的大气臭氧探空资料, 分析了北京地区边界层、对流层、平流层臭氧浓度的平均月变化以及季节变化等。结果显示: 大气边界层下层1月臭氧浓度值最小为 29.9×10^{-9} (体积分数, 下同), 最大值为6月达到了 88.24×10^{-9} , 1月到6月逐月递增之后逐渐递减, 臭氧浓度随高度逐渐增长; 大气边界层到对流层顶臭氧浓度随高度先减少, 接近对流层顶浓度增长; 平流层下部臭氧浓度偏低, 之后逐渐增长在20~25 km出现极大值然后逐渐递减。季节变化特征为: 对流层夏季臭氧浓度最大, 冬季最小。边界层季节之间臭氧浓度积分量相差幅度更大, 四个季节均呈现持续增长的趋势, 冬春两季对流层顶偏低; 平流层冬春两季臭氧浓度偏大, 夏秋两季偏小。臭氧浓度极大值出现的高度略有波动。对流层、平流层臭氧浓度与霾的关系为: 近地面春秋两季有霾情况下臭氧浓度更高, 冬季无霾情况下偏高。对流层上部及平流层无霾时臭氧浓度更高并且冬春两季有霾时浓度极值出现在更高的位置, 秋季出现在偏下的位置。

关键词

对流层, 平流层, 臭氧浓度, 变化特征, 霾

Ozone Concentration Profile Observation and Analysis of the Troposphere and Stratosphere in Beijing Areas

Chenghai Ji, Zhaoyu Chen, Yuting Han, Yu Lan

Meteorological Observatory of Daxing Air Traffic Control Center of North China Air Traffic Control Bureau of CAAC, Beijing

Received: Jan. 21st, 2025; accepted: Feb. 5th, 2025; published: Mar. 5th, 2025

文章引用: 季成海, 陈昭仔, 韩羽庭, 兰渝. 北京地区对流层-平流层臭氧浓度廓线观测与分析[J]. 流体动力学, 2025, 13(1): 12-24. DOI: 10.12677/ijfd.2025.131002

Abstract

The paper uses the atmospheric ozone sounding data from August 2022 to December 2024 and analyzes the ozone concentration average monthly change and seasonal variation of the bounding layer, troposphere and stratosphere in Beijing. The results show that the ozone concentration of the bounding layer gets the minimum value which was 29.9×10^{-9} in January while gets the maximum value in June which was 88.24×10^{-9} . From January to June, the ozone concentration increased first and then decreased. The ozone concentration would increase with the height. From the bounding layer to the top of the convective zone, the ozone concentration at first decreases with the growth in the height and then increases. The ozone concentration in the space under the stratosphere is very low but increases with the height and gets the maximum value when the altitude reaches 20~25 km and then decreases. In summer, the ozone concentration of the troposphere is the largest and the least in winter. The ozone concentration of the bounding layer changes a lot in integration variable when the season changes. In winter and spring, the ozone concentration of the troposphere is relatively low. The ozone concentration of the stratosphere is high in winter and spring while low in summer and fall. The height at which the ozone concentration gets the maximum value sometimes changes. In spring and fall, when there is haze around the floor, the ozone concentration is high. In winter, the ozone concentration is high when there is no haze. When there is no haze, the ozone concentration in the top of the troposphere and the stratosphere is high. When there is haze, the ozone concentration extreme value occurs at a higher height in winter and spring and a lower height in the fall.

Keywords

Troposphere, Stratosphere, Ozone Concentration, Variation Characteristics, Haze

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

臭氧在大气中是一种不可或缺的气体，它的存在具有两面性。平流层臭氧对全球生态系统做出巨大的贡献，因为这一层的臭氧可以吸收大部分的紫外辐射，所以平流层臭氧能保护地面的动植物免受紫外辐射的伤害[1]。紫外线强度的变化会受到平流层臭氧的控制，而紫外线与植物和作物的生长是息息相关的，所以这一层次的臭氧间接影响生态环境。除此之外过强的紫外线还会损害眼睛，增加白内障的患病几率。对流层臭氧对人类更多的是危害并且更加直接。污染物的增多导致对流层臭氧浓度过高，这是造成光化学烟雾的罪魁祸首。所以本文利用 2022 年 8 月至 2024 年 12 月的大气臭氧探空资料，分析了北京地区边界层、对流层、平流层臭氧浓度的平均月变化以及季节变化等，对北京地区大气边界层、对流层、平流层臭氧浓度平均值的月变化、季节变化进行分析，并且对霾和臭氧浓度的关系进行研究。

2. 国内外研究进展

2.1. 国内研究进展

对流层和平流层臭氧浓度是一个很有意义的研究课题。这两个层次臭氧浓度的变化与人类的生产、生活以及生态环境和气候变化都是息息相关的。由于对流层和平流层臭氧生成比较复杂，并且所具有的作用也不相同，所以一直是世界各地研究人员研究的难点[1]。随着臭氧的相关问题越来越受到人们的重

视,越来越多的科学家开始对它展开研究。近年来国内研究人员也进行了许多相关研究并且取得了不错的成果。张金强和王振会[2][3]分析大气臭氧总量的趋势变化以及年变化和季节变化,结果为总趋势是下降的,但是各纬度下降幅度和速率不相同,春季臭氧总量下降最大,秋季最小。在 90 年代末,国内对于臭氧进行了大量研究,研究人员对国内许多地区的臭氧进行了长时间的观察和分析,取得了许多建设性的成果。在此次研究中周秀骥[4]等发现在青藏高原地区臭氧浓度的变化尤为明显,存在明显的低值,并且对流层向平流层传输物质也要经过这一地区。周任君和陈月娟[5]认为这一现象对我国相邻两年冬春季的气温和降水有明显的影响。随着城市化发展,大量污染物的排放,导致温室效应造成南极臭氧空洞的生成[6]。对流层光化学反应产生大量的臭氧,臭氧浓度过高造成光化学烟雾对人类健康造成危害。在北京地区,一些研究人员对于臭氧污染以及臭氧对环境气候的影响做出了分析。过快的城市发展,污染物不合理的排放使得北京地区的臭氧浓度超标率保持在较高的水平上[7],较高的臭氧浓度会对人体的健康产生严重的影响,并且还会影响农业生产和生态环境[8]。郑向东等[9]发现北京城区污染物的输送受到个别地区地形以及臭氧浓度变化的影响。刘小红等[10][11]发现白天近地面臭氧浓度受太阳辐射及污染物影响;夜间臭氧往往被大气对流、平流运动传输。鉴于污染物越发严重并且来源很复杂,王雪松和李金龙[12]利用臭氧源识别技术,获取有关臭氧及其前体物的相关信息,统计了不同污染物对于臭氧浓度影响的大小。王庚辰等[13]研究对流层变化特征与臭氧浓度变化的关系发现:一般情况下平流层的臭氧浓度应该明显高于对流层,并且在各个季节臭氧浓度总量变化不同。宗雪梅等[14]发现大气边界层臭氧浓度为一月浓度最小,六月浓度最大。从季节变化来说,臭氧浓度在冬季比较低而在夏季较高。对于臭氧浓度的变化,天气因子也是必须要考虑的因素。唐贵谦等[15]发现北京地区主要受低压前部(主要是蒙古气旋)和高压前部影响,在这两种情况下臭氧浓度数值均有不同的变化。

2.2. 国外研究进展

相对于国内的研究情况来说,国外更早进入这一领域,成果也是显而易见的。在上个世纪研究人员就发现了臭氧的化学组成,并且对臭氧在大气中的作用进行了初步研究,在 19 世纪末发现臭氧浓度的变化对动物和植物能产生很大影响[16]。Middleton 发现臭氧浓度过高能引起光化学烟雾,其对植物有一定危害[17]。Haagen.Smit 认为臭氧所具有的氧化性,能够促进光化学烟雾生成,而且对流层臭氧主要是由氮氧化物光分解而形成的[18]。Junge 发现了对流层臭氧的生成机制[19],他认为平流层臭氧受到大气对流运动影响会向下传输到对流层,并且在近地面形成臭氧的堆积。由前面的介绍可以看出,臭氧浓度过高有很可怕的危害,它浓度的变化会对生物和生态环境造成影响,并且还有可能引起光化学污染,臭氧浓度减少也能够造成平流层温度上升[20]-[22]。William [23]通过对平流层低温层温度突然上升这一现象的研究发现:不同维度臭氧浓度变化通过大气动力作用以及光化学反应能够引起对流层爆发性增温。由此可见如果控制臭氧,或者说恢复对流层平流层臭氧浓度,就可能使平流层恢复温度。臭氧不仅是温室气体,它浓度的减少也会造成增温。例如:Lorenzo 和 Polvani [24]的研究结果表明,如果臭氧损耗,这一结果造成的增温将使臭氧作为温室气体造成增温的三至四倍左右。对流层臭氧能够对植物的光合作用产生影响,使二氧化碳浓度升高,从而使环境增温。近些年,不光环境增温,并且还发现平流层的低温层,其温度有明显的上升。这一升温现象与臭氧浓度的变化是密不可分的。Aghedo [25]在对流层臭氧的瞬时辐射强迫研究中发现,臭氧产生的瞬时辐射强迫,能弥补长波辐射对臭氧的低敏感度。温室气体增加使对流层变暖,但它却导致平流层变冷。近几十年由于自然以及人类活动等原因,大气臭氧层臭氧浓度下降,臭氧层出现损耗。在 WMO [26]中做出了近几十年的全球臭氧评估,得出如下结论:由于人为原因使得近几十年全球臭氧浓度减少了几个百分点,这一现象主要发生在中纬度和极地地区,多发生于冬春季节。在对对流层臭氧的研究方面欧美国家开展较早,所以,国外对臭氧方面还有许多研究成果,并且多

年来国外对臭氧的探测手段也就是臭氧探空仪的研制水平也是很先进的。国际上比较常使用的仪器有 ECC、BM、和 KC，三种探空仪都是利用电化学原理机制工作的。其中 ECC 探空仪是应用最广泛的[27]-[29]。在东亚地区探空数据的积累中日本的 KC 探空仪是功不可没的，在早期被大范围应用。由此可见对流层平流层臭氧浓度方面的研究在国内外都是很受重视的，并且都取得了很大的研究成果。

3. 试验概括

3.1. 试验地点

本文选取的探空数据为 2022 年 8 月至 2024 年 12 月，臭氧探空仪的施放地点在北京南苑观测台，海拔高度 34 m。在此期间共进行了 29 个月的大气臭氧探测，平均每月进行 4 次施放，施放时间为周四下午 13 点左右，如果周四探测失误则周五再次进行施放。探空仪探测高度在 30,500 m 左右，得到的有效数据包括：温度、湿度、气压、风速、风向、高度和臭氧浓度等。

3.2. GPSO3 探空仪原理和验证

探空仪探测的手段一般是，利用探空气球携带探空仪升空，探空仪的无线电装置将信号发射回地面，地面进行接收，从而获得高空臭氧等气象要素的分布资料。探空仪包括两个重要的部分：臭氧测量单元(核心单元)；GPSO3 探空单元(GPS 气象探空仪与臭氧传感器)；各种臭氧探空仪的工作原理可以分为两类，一种是利用臭氧吸收紫外线的特性，让臭氧吸收一定波长的紫外线，再根据吸收量来推断臭氧的量。另一种是利用臭氧的氧化特性，使臭氧和某些物质发生化学反应从而根据反应式和原理定量的分析。而目前大部分使用的探空仪原理是利用电化学式的[30]-[33]。

GPSO3 臭氧探空仪工作原理电化式： $2KI + O_3 + H_2O \rightarrow 2KOH + I_2 + O_2$ 在碘化钾溶液中充入臭氧，臭氧具有强氧化性，使电离子生成碘分子。再将正负电极插入溶液中使溶液中的碘分子发生电离反应再生成碘离子，公式为： $I_2 + 2e \rightarrow 2I^-$ ， $2I^- - 2e \rightarrow I_2$ 通电时碘分子在阴极生成碘离子，然后碘离子受到阳极的吸引游离向阳极，在阳极再生成碘分子，这样在正负电极间形成了电流。在这一系列的氧化还原反应中，再根据离子守恒定律，在溶液中，碘离子的总量是不变的，形成电流所需要的碘离子与碘化钾氧化反应生成的碘分子是正比关系，碘分子与通入的臭氧也是正比关系，所以在单位时间内正负极之间产生的电流与碘化钾氧化反应中的臭氧是正比关系。所以根据通入定量臭氧测定电流大小，从二者之间的关系可以定量的分析臭氧。

通过记录仪记录相关数据，从而计算两种传感器的响应时间和灵敏度值，从而得到结果：两种臭氧传感器的性能是相当的。并且在 2002 年 1 月王庚辰等[34]在北京对这两种探空仪器也进行了验证，得出了相同的结论。由此可见，国产探空仪的研发已经成熟并且探测数据可靠。

4. 结果与分析

大气对流层从地球表面向上延伸，其高度在 10 km 至 12 km 左右[13]。在对流层底部是大气边界层，即从地面到距地面 2 km 高空。在时空分布上，大气臭氧浓度具有一定的变化特性[14]。并且在对流层和平流层不同高度上臭氧浓度的变化特征不尽相同。本文利用 2022 年 8 月至 2024 年 12 月之间的 120 个有效数据进行统计分析，分析臭氧廓线的变化特征。

4.1. 月变化特征

4.1.1. 大气边界层臭氧浓度变化特征

图 1 为臭氧月平均浓度垂直变化廓线。由图中可以看出近地面臭氧浓度 1 月到 6 月逐月增加，6 月

之后逐月减小。其中臭氧浓度的最小值为 1 月臭氧浓度约为 29.9×10^{-9} (体积分数, 下同), 最大值为 6 月, 浓度值达到了 88.24×10^{-9} 。由于对流层臭氧主要来源之一为光化学反应, 需要充足的光照, 而 6 月光照比较充足造成了臭氧浓度的极大值。由图中还可以看出臭氧浓度随高度呈现特定的变化趋势。从地面到 1 km 左右, 这期间各个月份臭氧浓度逐渐增长, 并且在这一高度臭氧浓度达到峰值。其中在 6、7、8 三个月, 在近地面臭氧的增长幅度要大于其他月份。由廓线图可以看出 1 月峰值最小, 臭氧浓度不到 50×10^{-9} 。6 月臭氧浓度峰值最大, 达到了接近 130×10^{-9} 。从各月份的增长的幅度可以看出, 1 月和 2 月增长幅度较小, 3 至 5 月的增长幅度逐渐增加。6 月份的增长幅度明显的增大, 臭氧浓度相对于地面几乎增加了 45×10^{-9} 。7 月和 6 月增长幅度接近, 8、9 月明显减少, 10 月和 11 月有小幅度的减少并且很接近。12 月的增长幅度相当小, 相对于地面臭氧浓度仅增加 3×10^{-9} 。总的来说 6 月份增长幅度最大, 1 月和 12 月份幅度最小。近地面臭氧浓度随高度逐渐增加有可能是因为: 近地面汽车尾气、工厂等排放出臭氧的前体物 - 氮氧化物, 由于强烈太阳辐射的作用, 经光化反应生成臭氧从而使臭氧浓度增长。在 1 km 以上, 在臭氧浓度达到峰值之后, 一些月份出现明显的变化。3 到 5 月份臭氧浓度有微弱的减少并且变化幅度接近, 6 到 9 月份臭氧浓度呈现比较明显的减小, 这几个月份每个月都减少了将近 20×10^{-9} 。并且在 6 月份可以看出在 1 km 以上出现一个反复的波动。11、12 和 1 月份一直保持一个缓慢的增长趋势。并且根据图中臭氧浓度平均值与标准差的加减可以看出, 6 到 9 月份这几个月在一千米以后臭氧浓度的波动范围相对来说较大, 并且在 6 月份 1 km 以上也有较大的波动。而其他月份臭氧浓度波动不大趋于稳定。这个现象有可能是因为天气状况而导致太阳辐射的变化引起的, 但是本位未进行验证有待进一步研究。从总趋势中我们可总结出: 臭氧浓度在一月到六月之间逐月递增, 并且变化幅度逐渐增大。在 6 月份之后臭氧浓度逐渐减少, 直到 1 月份为止。

4.1.2. 对流层臭氧浓度变化特征

本文对中、上对流层臭氧浓度进行分析, 根据王庚成、孔琴心等[13]对北京地区对流层顶的变化的研究中了解到, 对流层顶是变化的, 其范围为 7.7 km 至 14.4 km, 并且对流层顶的变化会导致对臭氧浓度产生影响。从上下层臭氧浓度数值可以看出: 下层 1 月到 6 月臭氧浓度值逐渐增大, 6 月份臭氧浓度最大达到 110×10^{-9} 左右, 然后臭氧浓度值逐渐减小直到 12 月份。而在上层 1 月到 4 月臭氧浓度相对较大, 9 月臭氧浓度最小为 20×10^{-9} 到 30×10^{-9} 之间。对流层中下部仍受到污染物影响, 并且在光照充足的情况下臭氧浓度达到最大值。从臭氧浓度廓线的变化趋势来看, 1 月到 6 月这些月份具有相似的变化特征。可以看出这一层次下部为减少的趋势然后改为增加趋势, 变化的高度在 8 km 到 9 km 之间并且增长的幅度大小不尽相同。这一现象可能是因为对流层顶高度变化而引起的。从图中还可以看出: 1 月到 4 月和 12 月臭氧浓度减少的值较少, 约为 15×10^{-9} 。5 月减少的相对较多达到 40×10^{-9} 。6 月减少的最多为 50×10^{-9} 到 60×10^{-9} 之间。但是这几个月最小值相差不大, 均在 40×10^{-9} 左右, 上下浮动 5×10^{-9} 。在上层, 这几个月的增长幅度也不相同。1 月至 4 月增长幅度最大, 达到 50×10^{-9} 左右。5 月、6 月和 12 月增长幅度相对来说较小, 为 20×10^{-9} 左右。其中 1 月底部有一个小的增长趋势, 2 月和 4 月的廓线比较曲折, 臭氧随高度的变化存在一些突变并不平滑。而在 7 月到 11 月几个月份, 在 2 km 以上臭氧浓度逐渐减少, 期间略有波动, 并且在顶部臭氧浓度仍然存在微弱的回升, 但并不明显只有 5×10^{-9} 左右。在 9 月份的底部有一个微弱的增长趋势直到 4 km 高度才开始变为减小的趋势。这几个月份臭氧浓度减少的总量比较接近, 在 30×10^{-9} 左右。从臭氧浓度平均值与标准差的加减曲线不难看出, 在高层三条曲线相差距离更大, 所以各月份中同一高度臭氧浓度在高层相差比较大相对来说比较离散, 在中下层测得的浓度值相对来说比较稳定集中。总的来说对流层中上层臭氧浓度各个月份之间变化趋势类似, 在中部臭氧浓度逐渐减小接近对流层顶附近臭氧浓度反而逐渐增加直到对流层顶。这种变化特征有可能是因为: 对流

层臭氧的另一个来源是平流层的臭氧下传到对流层，并且臭氧逐渐沉降，在低层形成臭氧的汇集。这就造成了对流层中上部臭氧向地面逐渐递减的变化特征。而对流层顶臭氧的增加有可能是下传臭氧的堆积和对流层顶高度的变化引起的。

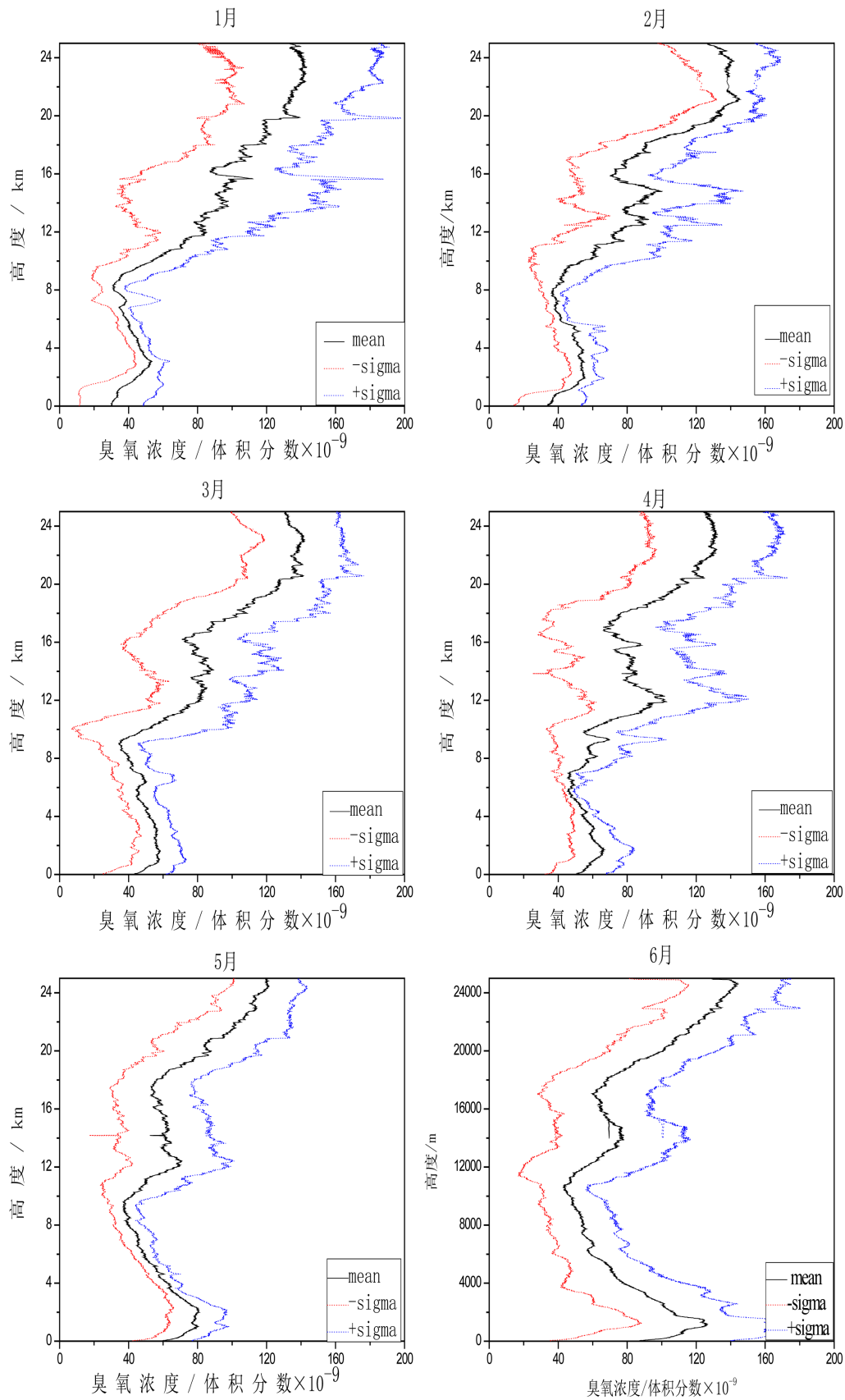
4.1.3. 平流层变化特征

从图 1 中可以看出，在平流层底层臭氧浓度最大在 4 月达到了 100×10^{-9} ，最小值在 9 月为 21×10^{-9} 左右。1、2、3 月底部的臭氧浓度在 80×10^{-9} 左右，4 月到 9 月臭氧浓度数值逐渐减小，9 月到 12 月臭氧浓度数值逐渐增大。从臭氧浓度随高度的变化趋势可以看出，1 月和 10 月到 12 月这四个月份的变化特征相近，从底部到顶部总的趋势是增长的，但是其中 1 月和 12 月臭氧浓度廓线波动比较大，说明各高度臭氧浓度变化较大。并且可以看出其中 12 月增长趋势最大，上下臭氧浓度差达到了 110×10^{-9} 左右。从图中可以看出 2、3、4 三个月份变化趋势相同，从底部到 17 km 左右为减少趋势，之后到 22 km 高空为增长趋势，之后再 25 km 为减少的趋势，并且三个月的变化幅度很接近。5 月到 9 月的变化趋势相对来说比较接近，可以从图中看出底层为微弱的减小趋势，然后在 16 km 左右变为增加的趋势，并且其趋势逐渐减小。总体上在平流层下部为增长的变化，这可能是因为平流层下部在有 NO 存在的情况下 CH_4 氧化可导致产生臭氧。而在平流层的光化学反应中许多反应的产物都是 NO，这就促进了氧化产生臭氧。而各月份底层存在变化差异有可能是因为对流层顶的变化引起的，并且平流层下部臭氧吸收太阳辐射造成光解，对于臭氧浓度的削弱起着至关重要的作用。而且平流层臭氧浓度变化复杂，大气的动力作用，太阳辐射以及光化学反应都会影响臭氧浓度的变化。从图中平均值加减标准差的曲线可以看出，8、9 月份标准差较小，而其他月份标准差均在 20×10^{-9} 以上。1 月和 4 月甚至超过了 40×10^{-9} 。可以看出各月份在同等高度下臭氧浓度相对于平均值来说相差比较大，即比较离散。总的来说，平流层臭氧浓度平均值相对来说较为离散，不同高度下的浓度值变化也比较大。相对于对流层来说，不光同高度下臭氧的分布变化较大，而且平流层臭氧浓度廓线比较曲折，臭氧随高度变化并不平滑，在整个高度上出现多次突变，这一现象可能是随着高度的变化太阳辐射波长也存在一定的变化进而影响臭氧浓度变化。从整体的变化特征来看，虽然各月份之间的变化趋势略有不同，有的月份波动比较大有的月份趋势变化较为不明显，但是结合各个月可以看出，平流层臭氧浓度平均值总的变化趋势是：先是减小趋势，然后是增加趋势并且在 20 km 之上出现了一个极值在 Chapman 纯氧理论中利用氧的浓度和反应系数可以近似地算出臭氧随高度的分布和极大值。

4.2. 季节变化特征

4.2.1. 大气边界层变化特征

图 2 为 22 年到 24 年多年季节臭氧浓度平均值以及各层次臭氧浓度积分量。由图可以看出，总体上夏季臭氧浓度值最大，春季和秋季次之，冬季臭氧浓度最小。因为对流层臭氧的主要来源之一为碳氢化合物在氮氧化合物参与下，通过光氧化反应生成的，而太阳辐射的变化具有一定的季节性，夏季大于冬季所以臭氧浓度夏季大于冬季。因此，夏季总的臭氧浓度平均值远大于其他季节达到了 118×10^{-9} 左右。而冬天臭氧浓度平均值远小于其他季节，只有 25×10^{-9} 左右。另外两个季节均在 60×10^{-9} 左右。从廓线图中各个季节臭氧浓度平均值的发展趋势来看，每个季节有不同的特点。在夏季底层臭氧浓度增长迅速，从不到 100×10^{-9} 增长到超过 120×10^{-9} ，但是上层和下层臭氧浓度相近。冬季 1 km 以下呈现微弱的增长，1 km 以上增长趋势变大，上下层臭氧浓度相差较大超过了 20×10^{-9} 。春季和秋季始终保持一种相近的变化趋势，下层至中层为增长趋势，高层为臭氧浓度逐渐减弱，并且上层和下层臭氧浓度变化不大只有微弱的增长。前文已经交代对流层的臭氧可以由碳氢化合物的光解得到，但是在这一反应中不光能



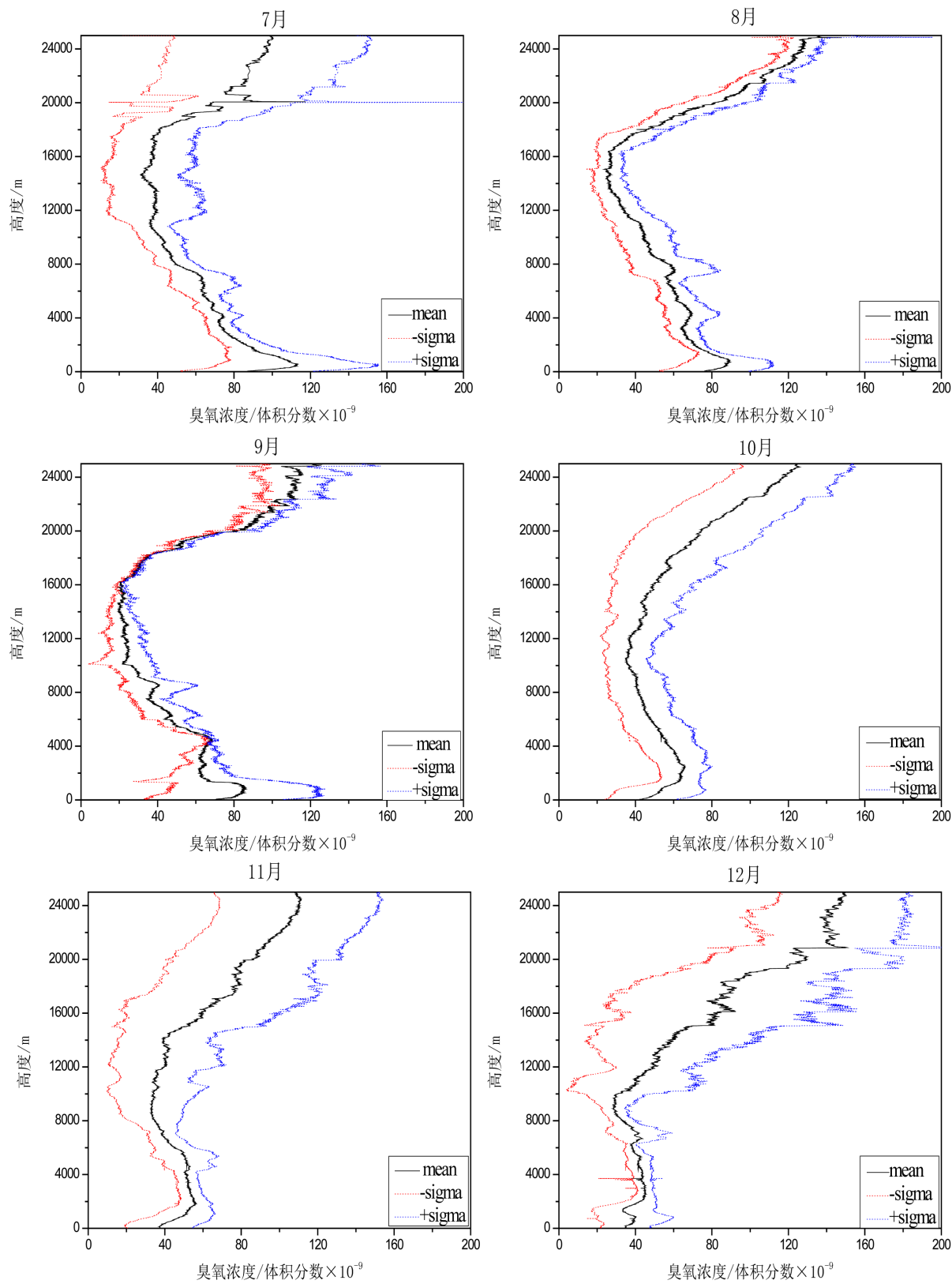


Figure 1. Monthly average ozone concentration profile
图 1. 臭氧月平均浓度廓线

得到臭氧也能消耗臭氧, 存在一种竞争机制, 这就导致了在污染严重的地方臭氧浓度反而不高, 所以由地面向上臭氧浓度逐渐增加。而且可以看出廓线图变化比较平滑, 没有明显的突变, 所以在这个层次各个高度上臭氧浓度应该是平滑的变化。结合图 1 我们还可以分析出: 夏季臭氧浓度标准差变化范围比较大, 每天的臭氧浓度值与平均值之间差额较大。而春、秋、冬三个季节标准差相对来说较小, 所以可以看出每天测得的臭氧浓度与平均值比较接近。这一现象可能是因为夏季天气变化较大从而导致太阳辐射变化而引起的, 但是存在其他可能性有待于进一步验证。由此可以总结出春、秋、夏三个季节变化特征为先增长后减小, 夏季的趋势较大, 冬天是一个持续增长的趋势。同高度下我们可以看出, 夏季臭氧浓度偏差值很大即同高度臭氧浓度相差比较大, 相对来说比较离散。而其他季节相对来说, 同季节、同高度臭氧浓度比较接近平均值相对集中。

4.2.2. 对流层中、上部变化特征

由图 2 可以看出在对流层中下部, 夏季臭氧浓度值最大冬季最小, 春季和秋季臭氧浓度值相当相差 5×10^{-9} 左右。夏季臭氧浓度几乎达到 100×10^{-9} , 而冬季还未达到 50×10^{-9} 。因为在低层碳氢化合物的光解较为明显导致在光照充足的情况下臭氧浓度更高。在高层冬春季的臭氧浓度值大于夏季, 最大达到了 90×10^{-9} , 夏秋两季臭氧浓度相差不超过 5×10^{-9} 。从臭氧浓度季节总的积分量可以看出, 依然是夏季最大冬季最小, 但是相比于大气边界层来说各季节臭氧浓度值的差距变小了, 夏季总的平均值为 60×10^{-9} 左右, 冬季为 40×10^{-9} 左右, 两个季节相差了 20×10^{-9} 左右。而在边界层这两个季节相差了 90×10^{-9} 左右, 其他各季节之间的差距也有明显的变小。因为在对流层中上部受到的污染物影响逐渐减小, 虽然夏季光照充足但是也不能产生大量的臭氧但仍比其他季节多。夏季和秋季变化接近, 可以看出这两个季节臭氧浓度平均值呈现下降的趋势, 夏季降低的大于秋季, 下降了 60×10^{-9} 左右, 在接近顶部的时候两个季节的臭氧浓度几乎相等。这种变化特征在 Junge 提出的经典理论中能够很好的解释, 即平流层氧气吸收波长小于 240 nm 的紫外线辐射, 氧气分解生成氧原子, 一个氧原子再结合氧分子生成臭氧, 再下传到对流层并在地面沉降, 造成了对流层臭氧向地面逐渐递减。另一种变化特征为春季和冬季, 这两个季节在 9.5 km 以下也呈现下降趋势, 但是趋势要小于秋季和夏季, 并且在 4 km 到 6 km 高度之间春季和秋季臭氧浓度值有两次交错。在 9.5 km 以上两个季节臭氧浓度廓线变为增长的趋势春季增长趋势更大一些, 浓度增长了大概 40×10^{-9} 左右。在 9 km 到 11 km 之间两个季节臭氧浓度超过了夏季。从廓线的弯曲程度可以看出, 夏季和秋季两个季节的臭氧廓线相对平滑臭氧随高度变化比较平稳。冬季和春季的廓线有一些小的波动, 在不同高度上臭氧浓度存在一些小的突变。结合直方图中的标准差可以看出这一层次臭氧波动范围比较大。

4.2.3. 平流层变化特征

从图 2 可以看出, 平流层下部臭氧浓度平均值春季最大浓度为 80×10^{-9} , 冬季小于春季, 秋季和夏季臭氧浓度值比较接近为 30×10^{-9} 左右。在上个冬季的臭氧浓度值最大超过了春季的数值达到了 140×10^{-9} 左右。由总的浓度平均值可以看出, 在对流层各季节臭氧平均值变化比较大, 相比于前两个层次浓度值较小的春季和冬季在平流层超过了另外两个季节, 浓度值达到了 95×10^{-9} 左右。而夏季和秋季的臭氧浓度平均值只刚刚超过 40×10^{-9} 。冬季和夏季臭氧浓度值的变化有可能是因为在夏季大气的对流活动频繁, 导致平流层下部臭氧大量下传到对流层, 而冬季相对稳定下传的臭氧较少。从整体的臭氧浓度来看, 平流层臭氧浓度要大于对流层, 因为平流层臭氧能够通过多种光化学反应产生, 利于碳氢化合物的氧化反应, N_2O 的分解, 氧原子与氧分子结合都能产生臭氧, 并且这些前体物都有广泛的来源。从廓线的变化趋势来看也分为两种特征, 但是从整体上四个季节都呈现增长的趋势, 冬季和春季增长趋势较大并且冬季增长的要大于春季, 增长的数值达到了 90×10^{-9} 左右。在冬季 12 km 到 14 km 臭氧浓度增长迅速达

到了 40×10^{-9} 左右, 并且在 14 km 冬季臭氧浓度超过了春季但之后就是一个锐减的突变直到 16 km 才真正超过了春季。而且从图中我们可以看出, 夏季和秋季增长趋势比较接近, 12 km 到 17 km 增长缓慢只增加了 10×10^{-9} 左右, 之后增长趋势变大。可以看出, 在月平均变化中, 在 25 km 左右平流层臭氧浓度开始减少。这种变化特征有可能是因为, 在平流层中能够大量地产生臭氧也能快速地消耗臭氧, 平流层臭氧浓度在二者之间保持一个平衡。在平流层下部臭氧发生微弱的光解并且一部分下传到对流层, 臭氧的光解系数随高度逐渐加大。所以在平流层下部和上部臭氧浓度均不是很高, 而在 20~30 km 之间臭氧浓度存在一个最高值。从廓线的弯曲情况可以看出, 在不同高度上夏季和秋季臭氧浓度变化比较平滑, 而春季和冬季曲线波动明显, 不同高度上臭氧浓度变化大。这和高度的不同高度上发生的光化学反应以及臭氧混合比随高度发生变化相关。总的来说平流层各季节变化特征相似, 均是逐渐递增的增长趋势, 但是由春冬两季曲线可以看到, 臭氧浓度变化剧烈, 并且春冬两季臭氧浓度明显大于夏秋两个季节。

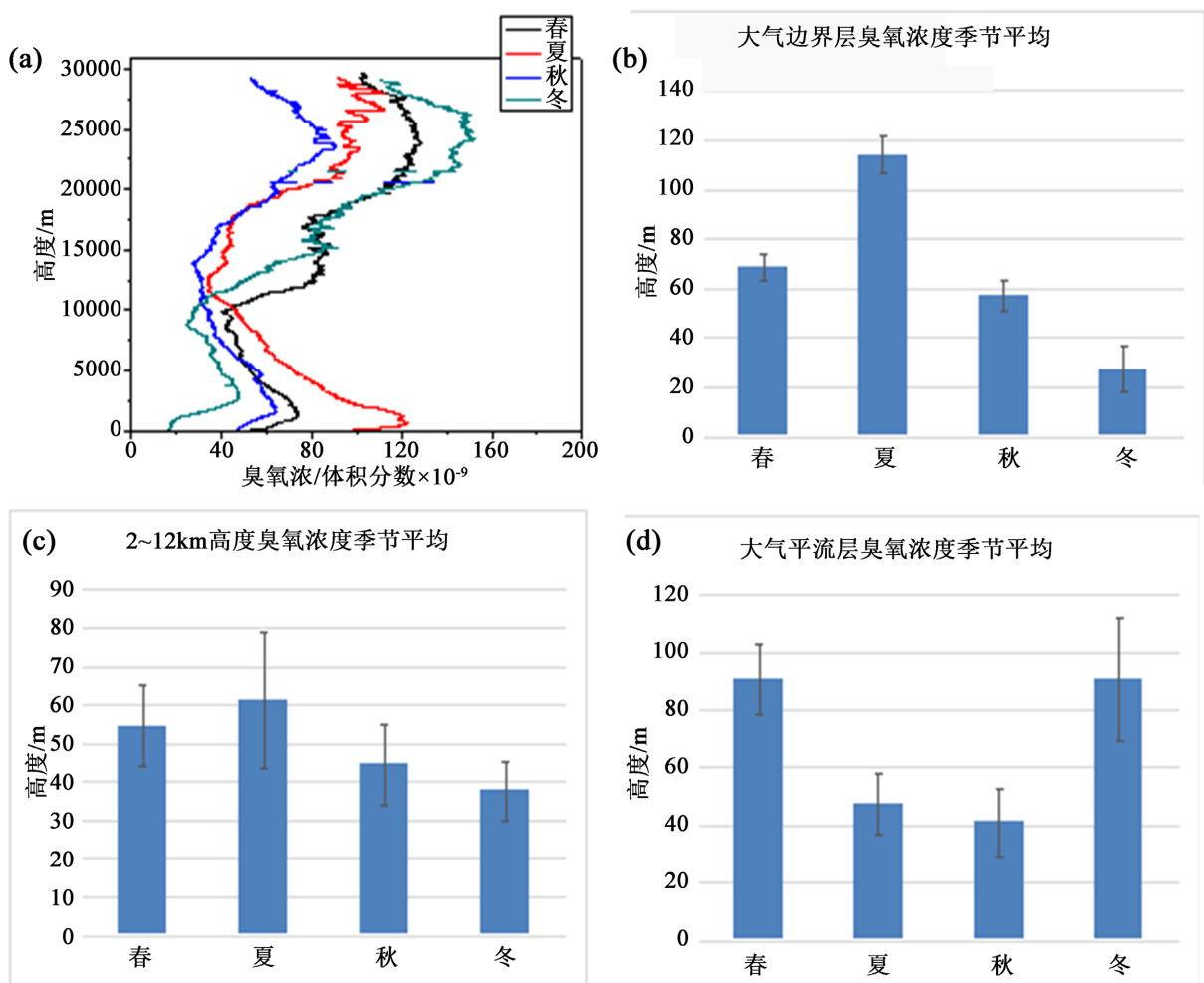


Figure 2. Variations in seasonal ozone concentrations over multiple years and histogram of ozone column amounts

图 2. 多年季节臭氧浓度变化及臭氧积分量柱状图

4.3. 有霾与无霾条件下臭氧浓度廓线的差异

图 3 共统计了 22 年到 24 年 GPSO3 探空数据, 共计 120 个样本量。其中有霾天数共计 85 天, 无霾为 35 天。由图中可以看出春季对流层中部和近地面的大气边界层有霾时臭氧浓度更大, 在对流层上层以

及平流层无霾时臭氧浓度偏大。有可能是因为在下层有霾时污染物更加充足，在光照足够充足时能产生更多的臭氧，而上层由于霾的阻碍使污染物难以向上传输导致臭氧浓度降低，但是影响并不是很大。有霾时臭氧浓度极大值和无霾时相比不光大小不同高度也不相同。秋季和春季变化特征相当，但是秋季在上层无霾和有霾情况下臭氧浓度相差比较大，无霾时极大值达到了 130×10^{-9} 左右，而有霾时为 80×10^{-9} 左右。冬季近地面有霾时臭氧浓度偏小，在上层有霾时浓度极大值出现在更高的高度，总体上无霾时臭氧浓度更大。在样本量中夏季均为有霾天气，而夏季臭氧浓度与其他季节的差异在前文有述。总的来说霾对臭氧浓度有影响，在近地面使臭氧浓度升高，在上层使臭氧浓度降低，并且对于平流层极大值也有影响。

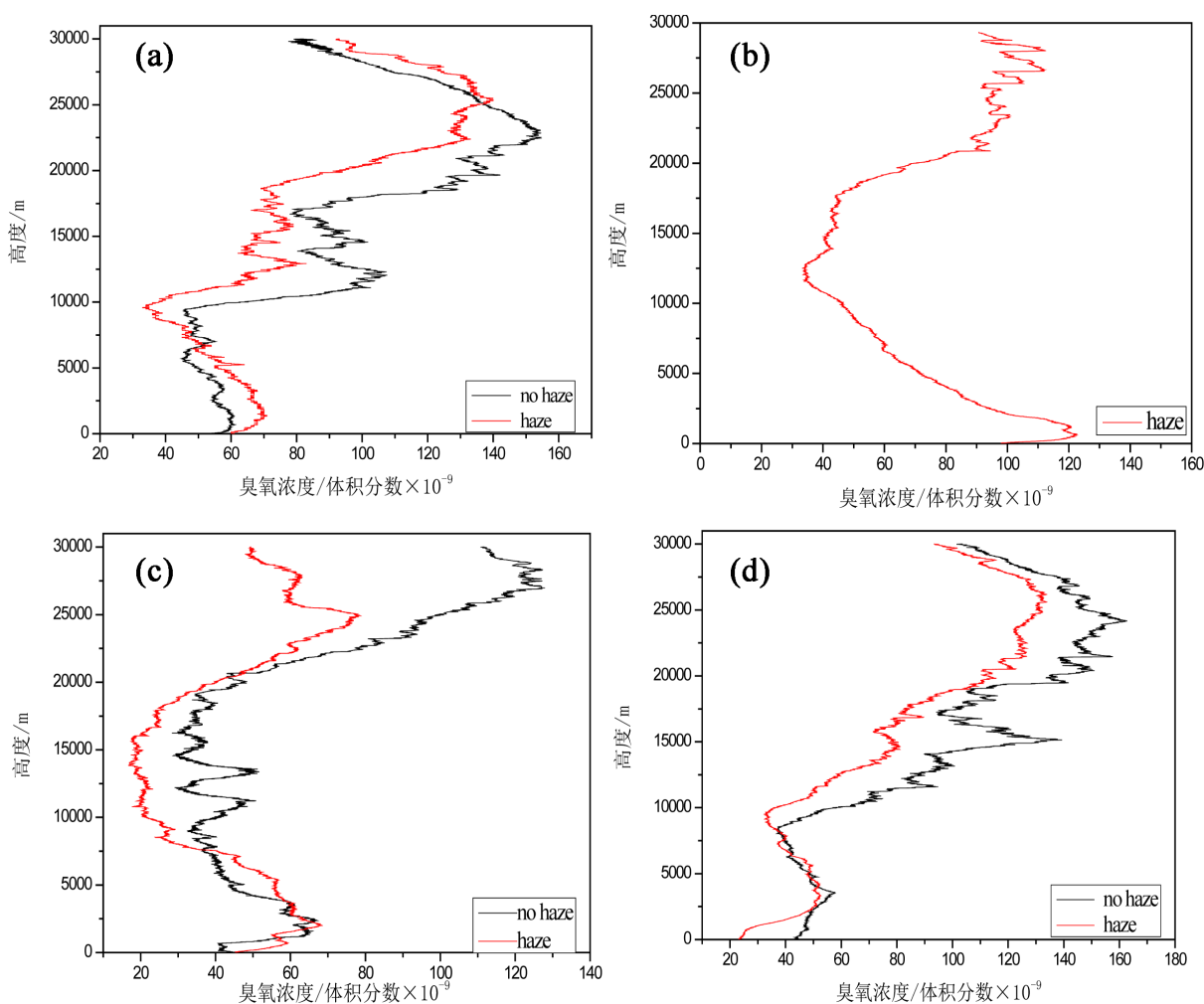


Figure 3. Variations in ozone concentrations during Spring (a), Summer (b), Autumn (c), and Winter (d) under haze and non-haze conditions

图 3. 有霾、无霾春(a)夏(b)秋(c)冬(d)季臭氧浓度变化

5. 总结

根据前文的分析和讨论，对于对流层和平流层臭氧浓度变化特征能够进行初步的了解能得出一定的结论。根据前文可以看出在不同层次不同高度上臭氧浓度的月变化和季节变化具有不同的变化特征并且其浓度值的大小也有所变化等。

- 1) 在对流层月变化中臭氧浓度平均值随高度的变化为 0 至 2 km 逐渐增加, 2 km 到 8 km 左右是逐渐减小的趋势, 再到 12 km 变为增加趋势。
- 2) 在平流层月变化中臭氧浓度平均值随高度的变化为 12 km 到 16 km 是减小的趋势之后为增长得趋势。平流层廓线相对曲折, 并且标准差相对于对流层也更大。
- 3) 在对流层季节变化中臭氧浓度平均值随高度的变化为 0 至 2 km 为先增长然后在 1.7 km 变为减弱的趋势。2 km 至 12 km 夏秋两季臭氧浓度持续减弱, 春冬两季先减弱在 9 km 变为增长趋势。平流层总的臭氧浓度夏季最大春季次之, 冬季最小。
- 4) 平流层季节变化特征为夏秋为持续增长并且趋势相当, 春冬两个季节总体上也为持续增长趋势并且较大。总的臭氧浓度平均值春冬比较大, 夏秋比较小。
- 5) 有霾情况下近地面春秋两季臭氧浓度偏高, 冬季偏低。上层臭氧浓度偏低, 并且霾还对臭氧浓度极大值有影响。

参考文献

- [1] 谢冰, 张华. 关于大气臭氧问题的主要研究进展[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(8): 106-114.
- [2] 郑长贵, 杨晓丽. 国外臭氧层研究进展[J]. 黑龙江气象, 1998, 12(3): 44-48.
- [3] 张金强, 王振会. 臭氧总量的纬度带变化特征分析[J]. 科技信息, 2007(16): 1-2.
- [4] 周秀骥, 李维亮, 陈隆勋, 刘煜. 青藏高原地区大气臭氧变化的研究[J]. 气象学报, 2004, 62(5): 513-526.
- [5] 周任君, 陈月娟. 青藏高原臭氧低值中心的变化与我国气候的关系[J]. 大气科学, 2007, 31(3): 479-485.
- [6] 卞林根, 林忠, 张东启, 郑向东, 陆龙骅. 南极大气臭氧和温度垂直结构及其季节变化的研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(12): 1762-1770.
- [7] 王自发, 李丽娜, 吴其重, 高超, 李昕. 区域输送对北京夏季臭氧浓度影响的数值模拟研究[J]. 自然杂志, 2008, 30(4): 194-198.
- [8] 王雪松, 李金龙, 张远航, 谢绍东, 唐孝炎. 北京地区臭氧污染的来源分析[J]. 中国科学, 2009, 39(6): 548-559.
- [9] 郑向东, 丁国安, 于海青等. 十三陵“清洁区”秋季臭氧在地面及近地边界层垂直分布变化的探测研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2005, 3(s1): 45-52.
- [10] 刘小红, 洪钟祥, 李家伦, 等. 北京市气象塔秋季大气 O_3 , NO_x 及 CO 浓度变化的观测实验[J]. 自然科学进展, 2000, 10(3): 338-342.
- [11] 刘小红, 洪钟祥, 李家伦, 等. 北京地区严重大气污染的气象和化学因子[J]. 气候与环境研究, 1999, 4(3): 231-236.
- [12] 王雪松, 李金龙. 北京地区臭氧源识别个例研究[J]. 北京大学学报, 2003, 39(2): 245-253.
- [13] 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.
- [14] 宗雪梅, 王庚辰, 陈洪滨, 王普才, 宣越健. 北京地区边界层大气臭氧浓度变化特征分析[J]. 环境科学, 2007, 28(11): 2615-2619.
- [15] 唐贵谦, 李昕, 王效科, 辛金元, 胡波, 王莉莉, 任玉芬, 王跃思. 天气型对北京地区近地面臭氧的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(3): 574-578.
- [16] Andreae, M.O. and Merlet, P. (2001) Emission of Trace Gases and Aerosols from Biomass Burning. *Global Biogeochemical Cycles*, **15**, 955-966. <https://doi.org/10.1029/2000gb001382>
- [17] Middleton, P. and Chang, J.S. (1990) Analysis of RADM Gas Concentration Predictions Using OSCAR and NEROS Monitoring Data. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, **24**, 2113-2125. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(90\)90245-j](https://doi.org/10.1016/0960-1686(90)90245-j)
- [18] Haagen-Smit, A.J. (1952) Chemistry and Physiology of Los Angeles Smog. *Industrial & Engineering Chemistry*, **44**, 1342-1346. <https://doi.org/10.1021/ie50510a045>
- [19] Junge, C.E. (1963) *Air Chemistry and Radioactivity*. Academic Press, 23-27.
- [20] Wang, X., Lu, W., Wang, W. and Leung, A.Y.T. (2003) A Study of Ozone Variation Trend within Area of Affecting Human Health in Hong Kong. *Chemosphere*, **52**, 1405-1410. [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(03\)00476-4](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(03)00476-4)

- [21] Arbaugh, M.J., Miller, P.R., Carroll, J.J., Takemoto, B. and Procter, T. (1998) Relationships of Ozone Exposure to Pine Injury in the Sierra Nevada and San Bernardino Mountains of California, Usa. *Environmental Pollution*, **101**, 291-301. [https://doi.org/10.1016/s0269-7491\(98\)00027-x](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(98)00027-x)
- [22] Rabl, A. (1998) An Estimate of Regional and Global O₃ Damage from Precursor Nox and VOC Emissions. *Environment International*, **24**, 835-850. [https://doi.org/10.1016/s0160-4120\(98\)00053-1](https://doi.org/10.1016/s0160-4120(98)00053-1)
- [23] Randel, W.J. (1993) Global Variations of Zonal Mean Ozone during Stratospheric Warming Events. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **50**, 3308-3321. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1993\)050<3308:gvozmo>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1993)050<3308:gvozmo>2.0.co;2)
- [24] Polvani, L.M., Waugh, D.W., Correa, G.J.P. and Son, S. (2011) Stratospheric Ozone Depletion: The Main Driver of Twentieth-Century Atmospheric Circulation Changes in the Southern Hemisphere. *Journal of Climate*, **24**, 795-812. <https://doi.org/10.1175/2010jcli3772.1>
- [25] Aghedo, A.M., Bowman, K.W., Worden, H.M., Kulawik, S.S., Shindell, D.T., Lamarque, J.F., *et al.* (2011) The Vertical Distribution of Ozone Instantaneous Radiative Forcing from Satellite and Chemistry Climate Models. *Journal of Geophysical Research*, **116**, 305-321. <https://doi.org/10.1029/2010jd014243>
- [26] Tomas, W.C. (2010) World Meteorological Organization Global Ozone research and Monitoring Project. *Scientific Assessment of Ozone Depletion*, **23**, 12-67.
- [27] Smit, H.G.J., Straeter, W., Johnson, B.J., Oltmans, S.J., Davies, J., Tarasick, D.W., *et al.* (2007) Assessment of the Performance of ECC-Ozonesondes under Quasi-flight Conditions in the Environmental Simulation Chamber: Insights from the Juelich Ozone Sonde Intercomparison Experiment (JOSIE). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **112**, D19306. <https://doi.org/10.1029/2006jd007308>
- [28] Deshler, T., Mercer, J.L., Smit, H.G.J., Stubi, R., Levrat, G., Johnson, B.J., *et al.* (2008) Atmospheric Comparison of Electrochemical Cell Ozonesondes from Different Manufacturers, and with Different Cathode Solution Strengths: The Balloon Experiment on Standards for Ozonesondes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **113**, D04307. <https://doi.org/10.1029/2007jd008975>
- [29] Logan, J.A. (1999) An Analysis of Ozonesonde Data for the Troposphere: Recommendations for Testing 3-D Models and Development of a Gridded Climatology for Tropospheric Ozone. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **104**, 16115-16149. <https://doi.org/10.1029/1998jd100096>
- [30] 宣越健, 王庚辰, 马舒庆, 潘毅等. 新型 GPSO3 大气臭氧探空系统[J]. 新世纪气象科技创新与大气科学发展: 地球气候和环境系统的探测与研究, 1988, 12(2): 214-217.
- [31] 王庚辰, 孔琴心, 宣越健, 陈洪滨. 我国大气臭氧探空仪的研制和应用[J]. 地球科学进展, 2003, 18(3): 472-475.
- [32] 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.
- [33] 宣越健, 马舒庆, 陈洪滨, 王庚辰, 孔琴心, 赵琼, 万小伟. 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.
- [34] 王庚辰, 孔琴心, 宣越健, 万小伟, 陈洪滨, 马舒庆, 赵琼. GPSO3 和 Vsala 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): 672-680.