

青藏高原清洁地区近地面层臭氧的特征分析

乜虹^{1,2}, 牛生杰¹, 王治邦², 汤洁³, 赵玉成²

(1. 南京气象学院, 江苏 南京 210044 2. 青海省气象局, 青海 西宁 810001 3. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要 利用瓦里关 1994 年 8 月~2001 年 12 月地面臭氧资料, 分析了地面 O_3 年季变化, 以及不同天气条件下的日变化特征。结果表明, 青藏高原洁净地区地面 O_3 具有明显的季节变化且呈缓慢的上升趋势, 春季浓度明显高于冬季, 最高值出现在每年夏初, 而最低值在 12 月左右。与低纬的 Izana 站相比, 瓦里关地区地面 O_3 浓度变化趋势与之比较相近, 而且, 亦呈逐年上升趋势。不同天气条件下, 春、夏、秋、冬四个季节地面 O_3 浓度变化不尽相同, 晴天和多云天, 春、夏、秋季的地面 O_3 变化趋势基本一致, 其中, 春秋季节, 晴天 O_3 值高于多云天和降雨天, 而冬季和夏季则不明显, 说明晴空天气虽然有利于 O_3 浓度的增加, 但并不是重要因子之一。各季节降雨、雪天 O_3 浓度的变化情况来看, 地面 O_3 在春、秋、冬三个季节变化不大, 而夏季与其它季节明显不同, 变化幅度很大, 日较差在四个季节中为最大, 这与雨、雪的冲刷关系很大, 并且可能存在雨、雪以及降雨强度的差异。

关键词 地面臭氧, 天气条件, 特征

中图分类号: P404

文献标识码: A

引言

大气 O_3 在全球气候和生态方面起着重要的作用, 是当今大气科学界重要的研究对象之一。人类活动已经引起全球大气 O_3 含量和分布的变化^[1]。近十几年的观测表明^[2], 中高纬度地区大气平流层 O_3 浓度逐渐减少, 对流层臭氧反而增加, 较清洁地区 O_3 浓度也有普遍增加的趋势。

目前, 国内对城市环境地面臭氧浓度已有较多的观测研究, 但对于远离人类活动直接影响地区的地面臭氧背景浓度变化机制到目前研究还比较少。尽管同期国内虽然也有瓦里关地区地面臭氧方面的研究报道^[3~4], 但因时间序列短, 数据量少, 尚不能较好地估算该地区地面臭氧增长及变化趋势。本文根据瓦里关地面 O_3 的观测资料并结合同期气候观测资料, 分析了不同天气条件下 O_3 的变化机制, 并进一步探讨了其生成和耗减机制。

1 观测概述

1.1 站点

中国大气本底基准观象台(简称瓦里关或

CGAWBO)是世界气象组织/全球大气本底监测计划(WMO/GAW)22个监测站之一, 也是我国唯一一个全球大气本底基准观象台, 位于青海省海南藏族自治州共和县境内的瓦里关山上, 海拔高度 3 810m, 北纬 36°4', 东经 100°9'。该山地处青藏高原东北坡上(高度差约 600m), 相对偏远, 除测站东北方数十公里外的部分地区经济发达外, 周围广大地区以浅草植被、干旱半干旱的荒漠草原和沙洲为主(仅河谷地区有少量农业), 受人类活动直接影响的机率很小, 站址环境完全符合 WMO 关于进行大气温室气体本底浓度观测的要求^[5]。

1.2 仪器

采用 TECO 49 型(美国 Thermo Electron Co.)紫外吸收式臭氧分析仪平行观测比较, 仪器最低检测限和精度均为 2×10^{-9} , 基线漂移率 $< 0.5\%$ /月, 95% 响应时间 $< 20s$ 。两台仪器使用前和观测过程中均由 TECO-49PS 型标定仪(属于世界气象组织-全球大气监测网地面臭氧标定系统中的二级标定仪器)进行了多点线形标定^[3], 同时, 为了减少空气中颗粒物的污染, 仪器入口装配了空气过滤器, 每周更换滤膜一次。

为保持分析数据的连续性,使用时根据仪器的标定和数据获取情况分别采用两台仪器以下时段的数据:1994~1997年的数据使用TECO#1(S/N 47307);1998年因TECO#1 27~40周、41~53周无数据,用TECO#2(S/N 47318)数据;1999年用TECO#2数据;2000年因TECO#1在14~26周停机,使用TECO#2数据;2001年用TECO#2数据;2002年用TECO#1数据。

2 地面臭氧年、季变化特征

图1、2给出了1994年8月~2001年12月瓦里关地区地面 O_3 浓度的年、季变化曲线。可以看

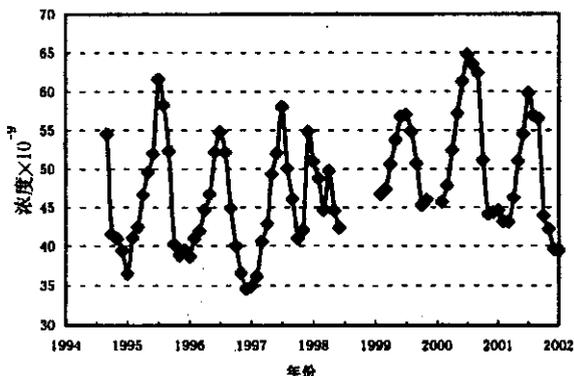


图1 瓦里关地区地面臭氧年际变化,1994~2001年
Fig.1 Annual variation of surface ozone over Waliguan

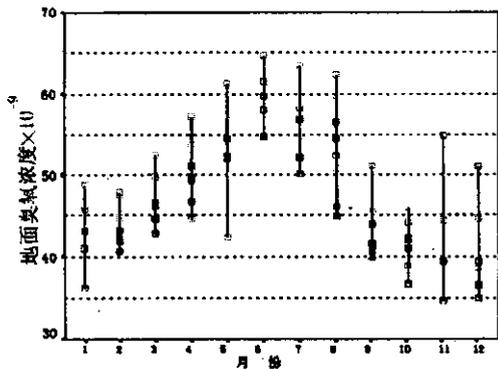


图2 瓦里关地区地面臭氧季节变化,1994~2001年
Fig.2 Seasonal variation of surface ozone over Waliguan

出,地面 O_3 浓度具有明显的季节变化且呈缓慢上升趋势;春季 O_3 浓度明显高于冬季,最高值出现在每年的6月初,而最低值则出现在冬季的12月份(表1)。其中,地面 O_3 浓度的高值年出现在2000年,值为 53.27×10^{-9} ,低值年出现在1994年,浓度为 42.58×10^{-9} (表2)。从图上看,1997年1月份 O_3 平均浓度明显低于其它各年份的值,与同期的浓度值相比,变化幅度很大,而且,11、12月份出现了两个高值,这与其它各年份 O_3 的变化差异较大。

表1 地面臭氧浓度月平均

Tab.1 Monthly average of surface ozone 月/年

月份	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
1		41.05	40.97	36.17	48.73	46.67	45.75	43.15
2		42.43	41.91	40.57	44.64	47.36	47.88	43.08
3		46.62	44.63	42.81	49.77	50.63	52.44	46.21
4		49.59	46.71	49.38	44.57	53.79	57.20	51.08
5		52.00	52.24	52.03	42.33	56.78	61.29	54.55
6		61.56	54.75	57.99		56.96	64.72	59.76
7		58.24	52.15	50.10		54.83	63.49	56.92
8	54.52	52.33	44.87	46.08		50.73	62.36	56.54
9	41.54	40.17	39.92	40.96		45.32	51.18	43.91
10	40.94	38.81	36.62	41.99		45.94	44.09	42.17
11	39.36	39.44	34.64	54.88			44.31	39.52
12	36.53	38.63	34.92	50.99			44.55	39.35

单位:ppb = 10^{-9}

表2 1994~2001年地面臭氧浓度平均统计

Tab.2 Statistics of surface ozone average in 1994~2001

年份	最小值	最大值	平均	标准偏差
1994	36.53	54.52	42.58	6.9517
1995	38.63	61.56	46.74	7.9487
1996	34.64	54.75	43.69	6.8222
1997	36.17	57.99	46.99	6.5919
1998	42.33	49.77	46.01	3.1237
1999	45.32	56.96	50.90	4.4890
2000	44.09	64.72	53.27	8.1419
2001	39.35	59.76	48.02	7.3334

单位:ppb = 10^{-9}

图3给出了瓦里关本底站与低纬的Izana海洋站地面 O_3 浓度年平均变化曲线。Izana站位于大西洋中的海岛上,是全球22个基准站之一(海拔2

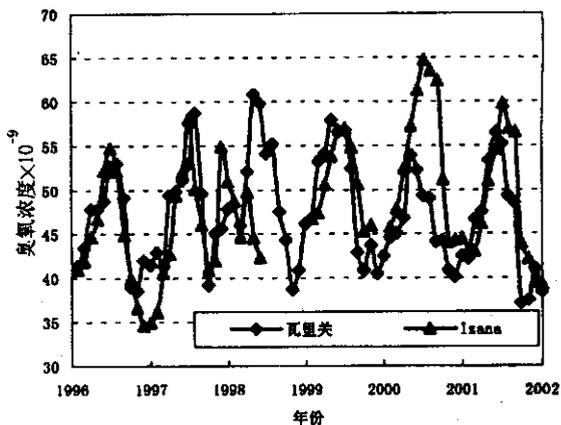


图3 西班牙Izana站与瓦里关站地面臭氧浓度年平均变化曲线,1996.1~2001.12

Fig.3 The annual average variation curve of surface ozone over Waliguan and Izana station in Spain, 1996.1~2001.12

367m 28°18'N, 16°30'W)。从图上可以看出,瓦里关和 Izana 站地面 O₃ 浓度变化趋势较为一致,亦呈逐年上升趋势,且上升较为缓慢。从季节变化来看,最高值均出现在春末夏初(6 月份),冬春季为两地的低值区,春季 O₃ 浓度水平略高于冬季。

另外,从图上看,2000 年夏季瓦里关 O₃ 浓度出现了一低值区,其值分别低于前后 2a 同期的 O₃ 值;而 Izana 站该年夏季出现了一 O₃ 高值区,而且值远高于其它各年份。这种个别年份出现的差异可能与 2 站所处的地理位置和环境条件有关。

3 不同天气条件下的 O₃ 日变化特征

鉴于地面臭氧变化较为复杂,为比较容易发现其变化规律,依据瓦里关每日 3 次(08 时、14 时、20 时)的气候观测资料,分别统计了 1995~2001 年各季节典型晴天、多云天及雨/雪天地面 O₃ 的小时平均,其参加统计天数分别为 31、32 和 30d。其中,在选择雨/雪天时,主要统计了连续性降水/雪日,未考虑阵性降水或降雪日。

3.1 晴天

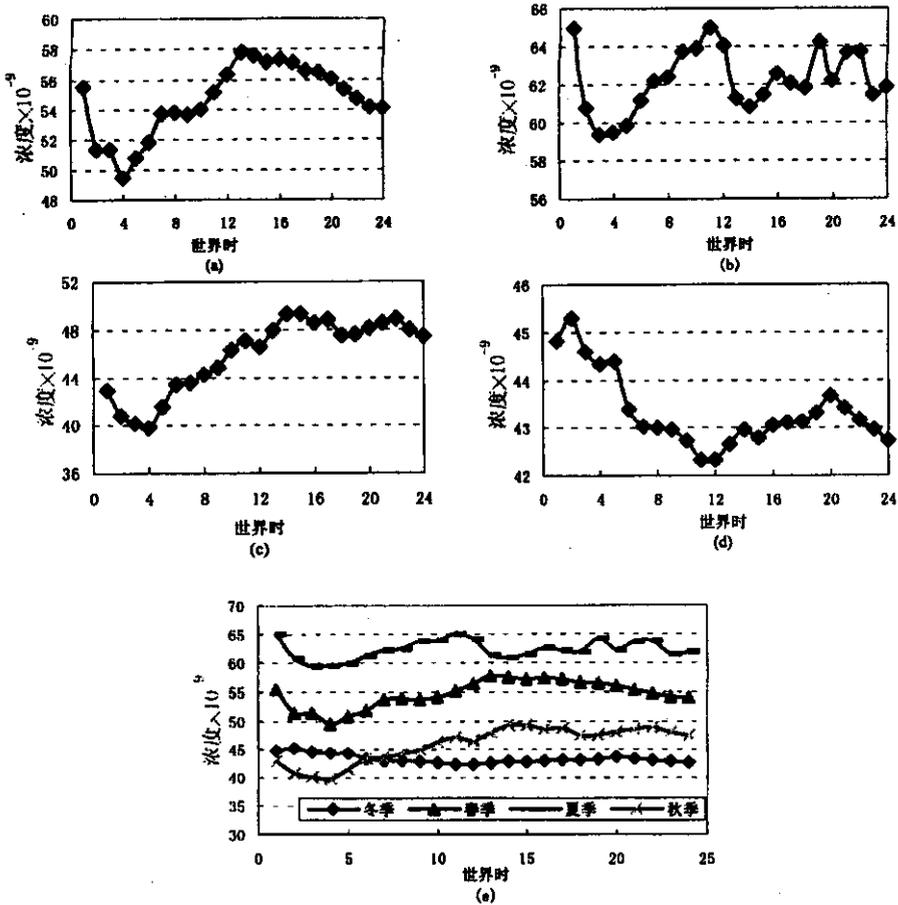


图 4 不同季节晴天地面 O₃ 浓度的平均日变化,1995~2001 年(a. 春季 b. 夏季 c. 秋季 d. 冬季 e. 各季节)

Fig. 4 Average diurnal variation of surface ozone under the clear sky condition of different season in 1995~2001(a. spring ; b. summer ; c. autumn d. winter e. all seasons)

图 4a, b, c, d 分别给出了 1995~2001 年春、夏、秋、冬 4 个不同季节典型晴天 O₃ 浓度小时平均值的日变化曲线。其中,起始时刻为世界时(UT)00 时,即北京时 08 时。从图 4a 可以看出,春季 O₃ 浓度呈明显的双峰型, O₃ 在早晨 1 时从一个较高值开始迅速下降,中午 4 时达到最低值 47×10^{-9} , 12 时左右达到一日的最大值(58×10^{-9})。与春季变化不太

一样,夏季 O₃ 呈典型的多峰型,而且波动较大,从图上看, O₃ 在早晨开始下降,下降速度远大于春季, 3 时左右,达到一日极低值(59×10^{-9}),傍晚 11 时达到最大值(65×10^{-9}),该值略高于早晨 1 时的值。秋季晴天 O₃ 浓度的日变化较为缓慢,而且波动很小,从变化曲线上看,没有明显特征,最大值出现在晚上 14~15 时,而最小值在中午 4 时。冬季,地面

O₃ 的变化与以上季节区别较大,其变化曲线呈显著的马鞍型。O₃ 浓度从早晨 1 时开始上升,至 2 时达到最大,然后迅速下降,傍晚 12 时达到一日的最低值。

从以上图可以得出,在典型的晴朗天气里,各季节地面 O₃ 浓度处于不同水平,其排列次序为:夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季。其中,春季 O₃ 浓度呈明显的双峰型,日振幅 11×10^{-9} ,夏季 O₃ 浓度呈多峰型,而且波动较大,日振幅为 7×10^{-9} ,秋季 O₃ 浓度变化较为缓慢,日较差在各季节中最大,为 10×10^{-9} ,冬季 O₃ 浓度呈马鞍型,其变化与春、夏、冬 3 个季节不尽相同(图 4e)。上述现象表明,相同天气条件,不同季节 O₃ 的源和汇有显著的差别。

3.2 多云天

图 5a, b, c, d 分别给出了 1995~2001 年春、夏、秋、冬 4 个不同季节多云天 O₃ 浓度小时平均值的日变化曲线。从图上看,春季地面 O₃ 变化较为明显,

呈双峰型,最低值出现在早晨 1 时(45×10^{-9}),傍晚 12 时达到最高值(50×10^{-9});夏季,多云天 O₃ 浓度的变化与春季大体相同,但也有不同之处,其表现在夏季多云天 O₃ 浓度最低值出现在早晨 1 时,次日凌晨 18 时达到最大值(66×10^{-9});秋季多云天 O₃ 浓度变化与晴天变化基本一致, O₃ 在早晨 1 时从最低值(30×10^{-9})开始上升,下午 8 时左右达到最高值,之后开始下降,且下降较为缓慢;冬季,多云天 O₃ 变化亦呈明显的马鞍型,其浓度从 1 时开始上升,8 时达到一日最低值(40×10^{-9}),接着又迅速上升,子夜时分达到最高值(44×10^{-9}),然后逐渐下降,并伴有一些小的波动,且不稳定。

总体上看,不同季节多云天 O₃ 浓度的变化趋势较为一致,但量值上低于晴天的 O₃ 浓度。多云天,春季 O₃ 浓度变化呈明显的双峰型,最高值出现在傍晚 12 时,最低值出现在早晨 1 时;然而,夏季,最高值出现时间比春季推迟近 5h,但最低值出现时

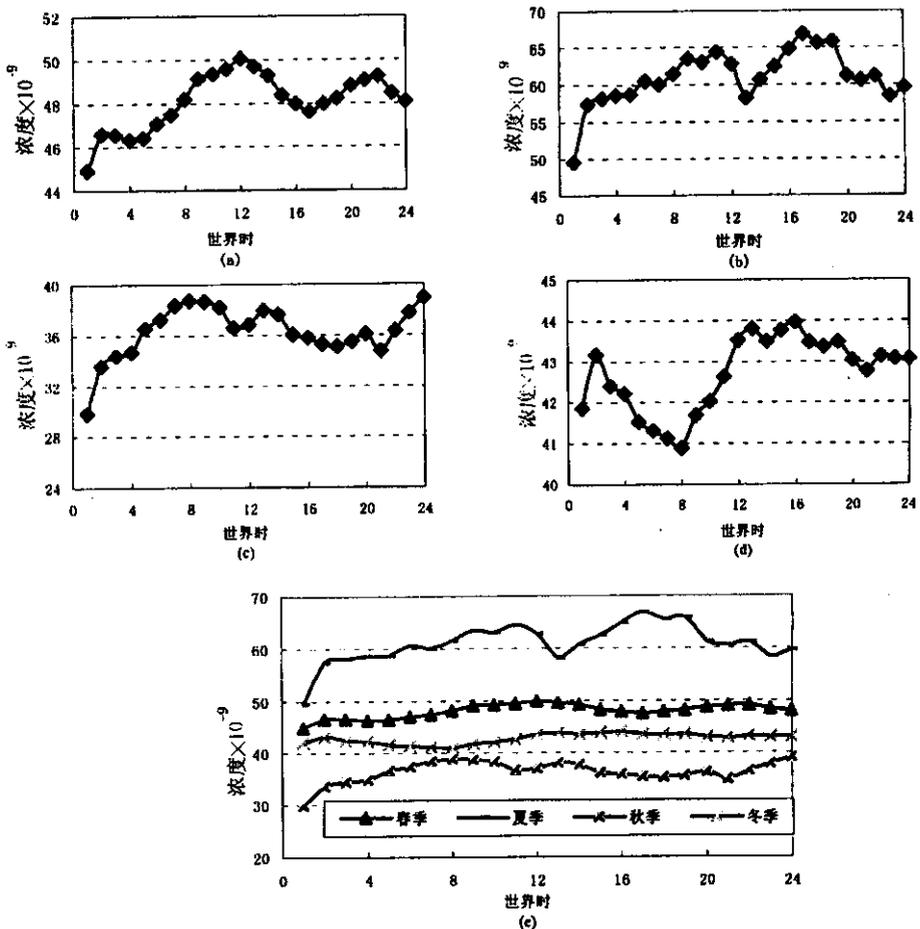


图 5 不同季节多云天地面 O₃ 浓度的平均日变化,1995~2001 年(a. 春季; b. 夏季; c. 秋季; d. 冬季; e. 各季节)

Fig. 5 Average diurnal variation of surface ozone under the cloudy sky condition of different season in 1995~2001(a. spring; b. summer; c. autumn; d. winter; e. all seasons)

间均在早晨 1 时, 秋季 O_3 浓度变化比较缓慢, 且幅度较小, 最高值出现时间提前到下午 8 时, 最低值出现时间保持不变; 冬季 O_3 浓度的变化刚好与春、夏、秋季相反, 其变化呈典型的马鞍型, 最高值出现在晚上 16 时, 最低值出现在下午 8 时(图 5e)。从季节变化来看, 夏季 O_3 浓度还是最高, 春季次之, 但冬季 O_3 浓度高于秋季, 这与晴天 O_3 在冬季和秋季的变化刚好相反。

3.3 降雨/雪天

图 6a, b, c, d 分别给出了 1995~2001 年春、夏、秋、冬 4 个不同季节降雨/雪天地面 O_3 浓度小时平均值的日变化曲线。从图 6a, b, c, d 可以看出: 春季地面 O_3 浓度从早晨 1 时开始下降, 2 时达到最

低值(42×10^{-9}), 然后迅速上升, 傍晚 11 时达到一日最高值(50×10^{-9}); 冬季地面 O_3 浓度变化较为缓慢, 而且幅度较小, 最低值出现在中午 5 时(37×10^{-9}), 最高值出现在晚上 15 时(42×10^{-9}), 其变化幅度低于其它各季节; 秋季 O_3 浓度的变化类似于春季的变化, 但秋季 O_3 浓度日变化更为缓慢, O_3 在早晨 1 时从最低值(34×10^{-9})开始上升, 且速度较慢, 中间出现许多小的波动, 至次日凌晨 22 时达到最高值(40×10^{-9}); 夏季降雨天 O_3 浓度与春季、秋季及冬季大不相同, 其变化曲线呈明显的马鞍型, 最高值、最低值依次出现在上午 3 时和晚上 12 时, 其值分别为 59×10^{-9} 和 50×10^{-9} 。

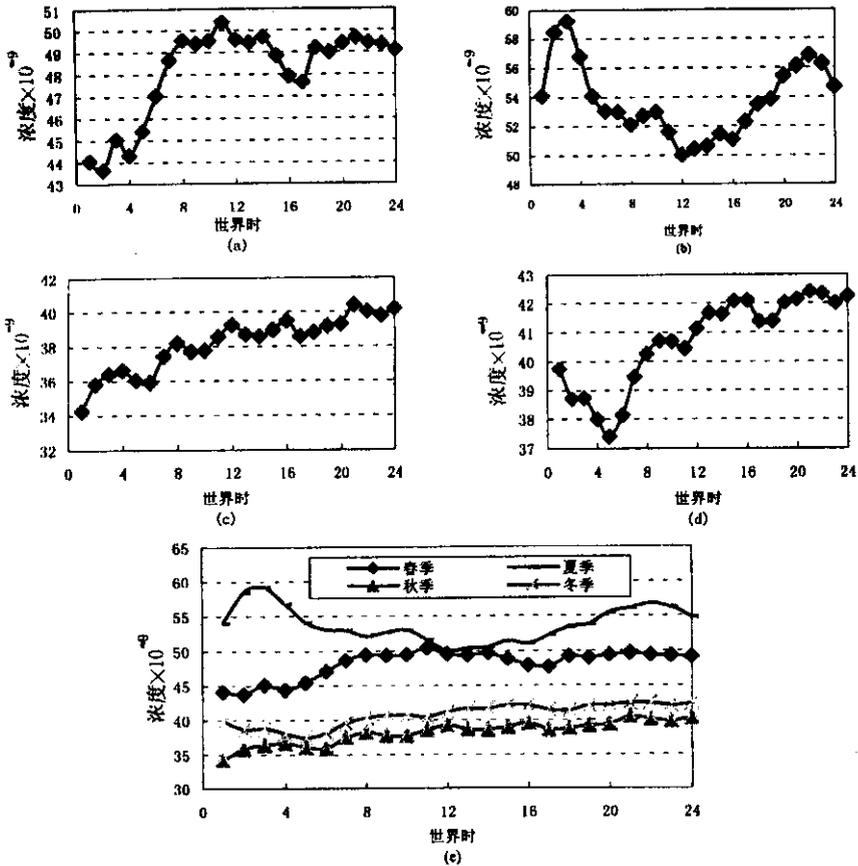


图 6 不同季节降雨/雪天地面 O_3 浓度的平均日变化, 1995~2001 年(a. 春季; b. 夏季; c. 秋季; d. 冬季; e. 各季节)

Fig. 6 Average diurnal variation of surface ozone under the rainy/snowy sky condition of different season in 1995~2001(a. spring; b. summer; c. autumn; d. winter; e. all seasons)

从以上各季节降雨、雪天 O_3 浓度的变化情况来看(见图 6e), O_3 浓度仍然在夏季最高, 春季次之, 冬季高于秋季, 这种变化与晴空天气基本相同。春、秋、冬 3 个季节 O_3 变化非常接近, 大体上是上午出现最低值, 其中秋季最低值在 1 时, 春季最低值在

2 时, 冬季最低值相对推后, 在中午 5 时; 然而, 最高值变化相差甚大, 春季、冬季及秋季最高值依次出现在一日的 11 时、15 时和次日凌晨 22 时, 春季日较差最大, 而冬季最小。当然, 这种时间差异不仅仅是不同季节太阳高度角的变化, 还有其它更为复杂的

因素。夏季 O_3 浓度变化幅度很大,其变化与其它季节明显不同,日较差在 4 个季节内为最大,最高、最低值分别出现在早晨 3 时和晚上 12 时。总的来看,晴天、多云天不同季节 O_3 浓度的变化没有大的差异,而降雨、雪天 O_3 浓度变化有较大反常,这和降雨出现时间不同,以及降雨冲刷作用有一定关系^[6]。

3.4 不同季节不同天气比较

图 7a b c d 分别给出了 1995~2001 年春、夏、秋、冬 4 个不同季节天气条件下 O_3 浓度小时平均值的日变化曲线。从图 7a 可以看出,春季晴天、多云天及降雨、雪天 O_3 浓度的变化趋势较为一致,其中晴天 O_3 浓度明显高于多云天和降雨/雪天,而多云天和降雨、雪日 O_3 浓度区别不大。秋季不同

天气条件下 O_3 浓度变化与春季基本一样,但量值上较低于春季。秋季地面 O_3 在雨、雪天变化幅度很小,而在多云天有较大波动,浓度值略低于雨雪天;另外,秋季多云天和雨、雪天最高值和最低值出现时间比较靠近,比晴天最高值相对推迟约 7h。冬季地面 O_3 浓度在晴天和多云天差别不大(见图 7d),最高值均出现在早晨 2 时左右,最低值出现在傍晚 9~10 时,与春季、秋季不同的是,冬季多云天夜间的地面 O_3 浓度值高于晴天值。从 O_3 浓度晴天的这种复杂变化来看,晴空天气虽然有利于 O_3 浓度的增加,但并不是重要因子之一。然而,冬季雨、雪天 O_3 浓度与之相比,有较大差别,最低值出现在中午 5 时,而最高值出现在次日凌晨,但从量值上看, O_3 浓度没有大的变化。

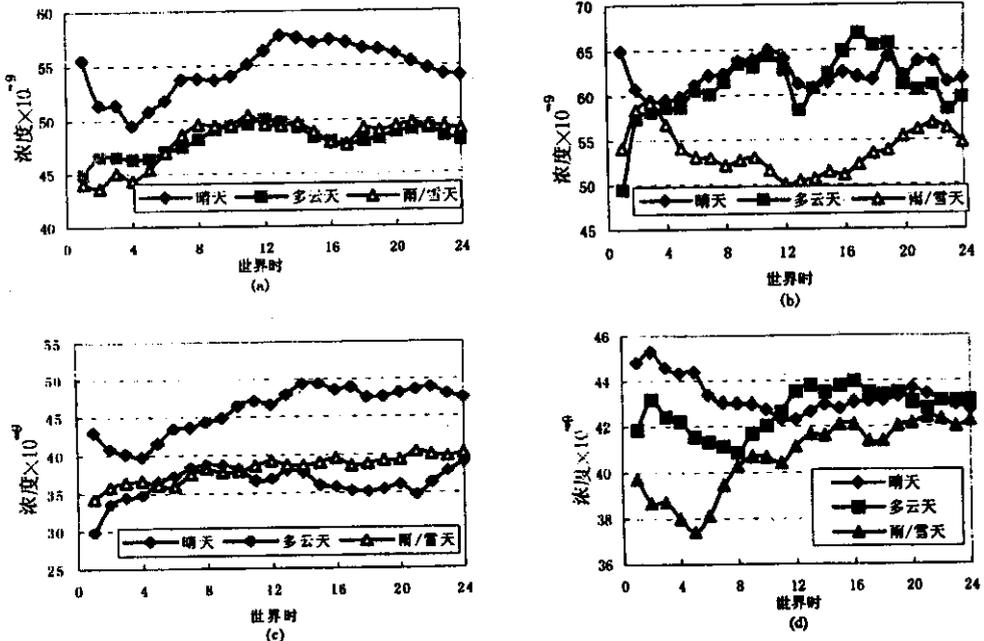


图 7 不同季节不同天气条件下地面 O_3 浓度的平均日变化,1995~2001 年(a.春季;b.夏季;c.秋季;d.冬季)

Fig. 7 Average diurnal variation of surface ozone under the different sky condition of different season in 1995~2001(a. spring ; b. summer ; c. autumn ; d. winter)

从图 7b 可以看出,夏季不同天气条件下,晴天和多云天 O_3 浓度变化基本一致,然而,降雨条件下 O_3 浓度变化很大,其变化正好与前两者相反,最高值出现在上午 2 时,最低值出现在晚上 12 时左右,而且 O_3 浓度因为降雨明显低于晴天和多云天,这可能是因为雨水的冲刷作用,将空气中的 O_3 带到地面破坏^[6],致使 O_3 浓度降低。存在这样一个问题,在春季、秋季和冬季 3 个季节,尽管有降雨、雪,但未发现 O_3 浓度有明显减少,反而保持上升趋势。从气候概况来看^[7],瓦里关山处于高原温带干旱气

候区,具有显著的大陆型气候特征,光照充足,日射强烈,干旱少雨,降水集中,每年 4 月初~9 月中旬为该地区的主要降雨季节,而其它季节则少雨或以降雪为主,可能雨、雪对 O_3 的冲刷方面,降雨在冲刷上比降雪效果更为显著一些,另外,雨、雪强度的不同,可能对 O_3 的冲刷作用也不同。当然,瓦里关夏季 O_3 日变化的特殊性,同时也反映了夏季近地面 O_3 增加和耗减机制与不同天气条件及天气过程之间的复杂性。关于这一问题今后有待进一步的研究。

4 主要结论

4.1 瓦里关地区地面 O_3 具有明显的季节变化且呈缓慢的上升趋势。春季 O_3 的浓度明显高于冬季,浓度最高值出现在每年夏初,而最低值则出现在冬季的 12 月份。与低纬的 Izana 站相比,瓦里关地区地面 O_3 变化趋势与之较为相近,且亦呈逐年上升趋势。

4.2 在典型的晴朗天气里,春季 O_3 浓度呈明显的双峰型;夏季 O_3 浓度呈多峰型,而且波动较大;秋季 O_3 浓度变化较为缓慢,日较差相对较小;冬季 O_3 浓度变化呈马鞍型,其变化与春、夏、秋 3 个季节不尽相同。分析表明,相同天气条件下,不同季节, O_3 的源和汇有显著的差别。晴空天气虽然有利于 O_3 浓度的增加,但并不是重要因子之一。

4.3 不同季节多云天 O_3 浓度的变化趋势较为一致,但量值上低于晴天的 O_3 浓度。春季 O_3 呈双峰型,夏季,最高值出现时间比春季推迟近 5h,但最低值出现时间均一样。秋季 O_3 浓度变化比较缓慢,且幅度较小;冬季 O_3 浓度的变化刚好与春、夏、秋季相反,变化呈典型的马鞍型,最高值出现在晚上 15 时,最低值出现在下午 8 时。说明晴空天气有利于

O_3 浓度增加的同时,云对 O_3 的影响也不容忽视。

4.4 降雨条件下 O_3 浓度的变化在夏季尤为显著,其变化正好与晴天和多云天相反,最高值出现在上午 2 时,最低值出现在晚上 12 时左右,而且 O_3 浓度因为降雨明显低于晴天和多云天,这可能是因为雨水的冲刷作用,将空气中的 O_3 带到地面破坏,致使 O_3 浓度降低,另外,降水强度的不同,对 O_3 的冲刷作用也不同。

参考文献:

- [1] 徐晓斌,丁国安,李兴生,等. 龙凤山大气近底层 O_3 浓度变化及与其它因素的关系[J]. 气象学报,1998,56(5):421-433.
- [2] 杨昕,李兴生. 近地面 O_3 变化化学反应机理的数值研究[J]. 大气科学,1999,23(4):427-438.
- [3] 汤洁,李兴生. 青海瓦里关山地面臭氧的观测和初步结果[A]. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响(— I M). 北京:气象出版社,19.
- [4] 张晓春,温玉璞,汤洁,等. 瓦里关地区地面臭氧的测量及初步分析[A]. 温室气体浓度和排放监测及相关过程[M]. 北京:气象出版社,61.
- [5] 温玉璞,汤洁,邵志清. 瓦里关山大气二氧化碳浓度变化及地表排放影响的研究[J]. 应用气象学报,1997,8(2):129-136.
- [6] 王明星. 大气化学[M]第 2 版. 北京:气象出版社,1999.364.
- [7] 中国大气本底基准观象台年度报告(1994-1995) [R]. 6.

Characteristic Analysis of Surface Ozone over Clean Area in Qinghai - Xizang Plateau

NIE Hong^{1,2}, NIU Sheng-jie¹, WANG Zhi-bang², TANG Jie³, ZHAO Yu-cheng²

(1. Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044, China; 2. Qinghai Meteorological Bureau, Xining 810001, China; 3. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract Based on the data of surface ozone in 1994.8~2001.12 over Waliguan, the seasonal variation and the characteristics of surface ozone under different sky condition are analyzed. The results show that the surface ozone over clean area in Qinghai - Xizang plateau has significant seasonal variation, and it also keeps increasing with low speed, the concentration of O_3 in spring is obviously higher than that in winter, the maximum is in the beginning of summer, the minimum is in January. Compared with Izana station in Spain, the annual variation of two stations is very close, and also keeps increasing slowly. Under different sky condition, the variation of O_3 in each season is also different, its variation in spring, summer and autumn is almost same. In spring and autumn, the O_3 value in clear day is higher than that in rainy or cloudy day while it is insignificant in winter and summer, it illustrates that the clear day is favorable to the increasing of O_3 , but it is not so important. In rainy and snowy day, the variation of O_3 in spring, autumn and winter is not evident, but in summer, it is totally different from other seasons, its daily difference is the biggest among all seasons, this probably has some relationship with the washing of snow and rain, moreover the difference of snow and rain may be important to the elimination of O_3 .

Key words surface ozone; sky condition; characteristics