

# 中国大气本底条件下不同地区地面臭氧特征<sup>\*</sup>

闫国安 徐晓斌 罗超 汤洁  
向荣彪 颜鹏 王木林 李兴生

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

## 摘 要

分析了晴天和阴天时瓦里关本底台、临安和龙凤山本底站地面  $O_3$  浓度的特点。晴天时, 临安站地面  $O_3$  有明显日变化, 以春季最大( $42.9 \times 10^{-9}$ ), 夏季最小( $20.3 \times 10^{-9}$ ); 龙凤山站日变化更规则, 秋季最大(约  $27 \times 10^{-9}$ ); 瓦里关本底台除了夏季有微弱日变化外, 其它季节没有明显的日变化, 日较差也很小, 但夏季地面  $O_3$  浓度显著高于冬季; 夏季晴天瓦里关地面  $O_3$  浓度要比龙凤山、临安高  $20 \times 10^{-9}$  以上。阴天时, 临安和龙凤山站除了日变化不很规则和日较差较小外, 其它大致与晴天相同。阴天时瓦里关不仅没有日变化, 而且日较差更小, 但夏季地面  $O_3$  仍然高于冬季。太阳总辐射和  $NO_x$  浓度是控制龙凤山和临安晴天和阴天地面  $O_3$  浓度的决定性因子, 它在不同季节和地区发挥着重要作用。夏季青藏高原周围地区气流向高原输送作用, 是形成夏季瓦里关地面  $O_3$  高值以及微弱日变化的主要原因。在美国 Mauna Loa 基准站也曾观测到类似的输送影响。 $O_3$  在低对流层随垂直高度增加的分布特征, 决定了东西部测点地面  $O_3$  的差异。

关键词: 大气本底, 地面臭氧, 晴天, 阴天。

## 1 引 言

1994 年 8 月 ~ 1995 年 7 月分别在瓦里关本底台、临安和龙凤山本底站进行了地面  $O_3$  及其前体物的观测。关于 3 个站平均地面  $O_3$  的特点, 也有了详细分析<sup>[1,2]</sup>。但由于不同地区、不同季节和不同天气条件下地面  $O_3$  有很大的差异, 据统计有些季节晴天和不分天气的日平均  $O_3$  差值可在  $10 \text{ ppb}$ <sup>①</sup> 以上, 而且这个差值因地区和季节而异。所以地面  $O_3$  算术平均值尚不能充分反映出该测点的特点, 尤其是不便于做不同地区的比较。本文主要目的就是按天气分类, 对不同本底背景条件下的 3 个站地面  $O_3$  特点进行比较分析, 并探讨其生成的原因。全部资料取自上述 3 个站的自动观测仪器采集的存储于计算机的原始记

\* 初稿时间: 1997 年 7 月 30 日; 修改稿时间: 2000 年 3 月 10 日。  
资助课题: 国家自然科学基金会重大项目(49392700)。

①  $1 \text{ ppb} = 1 \times 10^{-9}$ 。

录,并经整理后的小时平均值。

## 2 结果分析

### 2.1 晴天

#### 2.1.1 单站分析

临安本底站地面  $O_3$  各季有明显的日变化:日振幅以春季最大(42.9 ppb)、秋季其次(38.1 ppb)、冬季第三(大于 31.2 ppb),夏季最小(20.8 ppb)。其最高值出现时间略有不同。因为参加统计日数有限,故平均日变化曲线不甚光滑。可以明显地看出各季地面  $O_3$  浓度处于不同水平,其排列次序为:秋季>春季>冬季>夏季(图 1a)。

龙凤山本底站各季地面  $O_3$  平均日变化较之临安本底站的平均日变化更加规则,从日出后地面  $O_3$  浓度逐渐增加,午后 16~17 时达到峰值,而后逐渐下降,直到第 2 天日出。秋季子夜后还可见次高峰的出现。但是龙凤山日较差较临安小。秋季日较差最大(约为 27 ppb),春夏季日较差大约为 17~18 ppb,冬季日较差最小(9.7 ppb)。各季地面  $O_3$  的浓度水平排列次序为:秋季>春季和夏季>冬季(图 1b)。

瓦里关地面  $O_3$  浓度日变化与以上两站有完全不同的特点。它没有出现明显的日变化,日较差也很小(<7 ppb)。其中夏季日较差最大,但也仅为 6.7 ppb,冬季最小只有 2.2 ppb。然而各季地面  $O_3$  浓度水平还是有显著差异的,夏季和冬季日平均地面  $O_3$  浓度差值为 18.2 ppb,其排列顺序依次为夏季>春季>冬季和秋季(图 1c)。

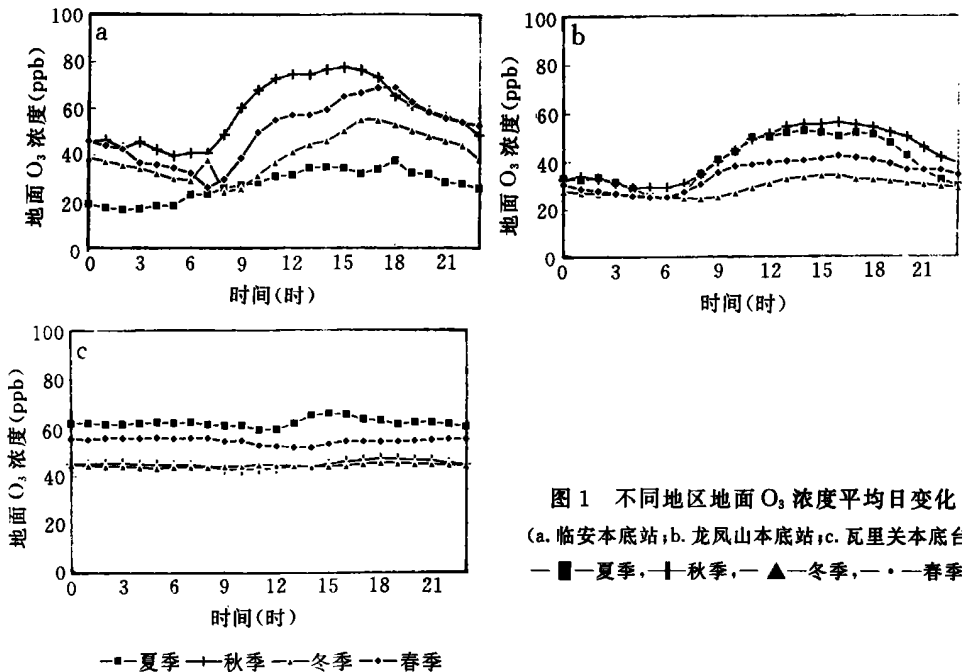


图 1 不同地区地面  $O_3$  浓度平均日变化  
(a. 临安本底站; b. 龙凤山本底站; c. 瓦里关本底台。  
—■—夏季, —▲—秋季, ————冬季, —·—春季)

#### 2.1.2 不同季节的比较

夏季,瓦里关本底台地面  $O_3$  浓度远高于其它两个站。夜间,瓦里关地面  $O_3$  浓度值分别是龙凤山和临安本底站的 2 和 3 倍,午后瓦里关本底台地面  $O_3$  浓度也要高于其它两个

站约 20 ppb。夏季龙凤山站地面  $O_3$  浓度要高于临安站,除个别时次外其差值大约为 10 ppb(图 2a)。

秋季,临安站和龙凤山站表现出明显的日变化,然而临安站的  $O_3$  浓度更高,其峰值区较龙凤山站高 20 ppb 以上,较瓦里关台高 30 ppb 以上(图 2b)。

冬季,瓦里关台地面  $O_3$  浓度较之龙凤山站大约要高 10~20 ppb。临安地面  $O_3$  浓度的日变化要显著高于龙凤山站。其峰值段大约要比其高 20 ppb 以上(图 2c)。

春季,与冬季的情况比较相似,但各站的差异更加大些。瓦里关台地面  $O_3$  浓度要高于龙凤山 10~30 ppb,临安站地面  $O_3$  浓度也比冬季稍大些(图 2d)。

## 2.2 阴天

### 2.2.1 单站特点

临安各季阴天的  $O_3$  日变化不如晴天规则,其日较差也较小,特别在冬季。但仍可以看出午后  $O_3$  浓度有增加的趋势。冬季  $O_3$  的浓度显然高于夏季,冬季阴天  $O_3$  日平均值大于夏季阴天  $O_3$  日平均值约 10 ppb。夏季雨天  $O_3$  日变化更不规则,而且日平均值要小于阴天约 2 ppb。

龙凤山冬季和夏季阴天的日变化较规则,但日较差小于同一季节的晴天(分别为 9.1 和 16.8 ppb)。冬季和夏季的  $O_3$  日平均值比较接近。夏季雨天的  $O_3$  日变化很不规则,日均值小于夏季阴天。

瓦里关阴天同样也没有日变化,冬季和夏季日较差分别为 3.3 和 4.0 ppb。夏季地面  $O_3$  浓度明显地高于冬季,其日平均差值为 12 ppb(见表 1)。

### 2.2.2 不同季节的比较

夏季阴天时,瓦里关站地面  $O_3$  浓度值远高于其它两个站,逐时平均值大约高 20 ppb,日平均值超过 20 ppb。龙凤山阴天地面  $O_3$  浓度高于临安。

冬季阴天时临安、龙凤山地面  $O_3$  浓度比夏天高约 10 ppb。瓦里关冬季地面  $O_3$  浓度要比夏季低约 10 ppb,然而其依然比同期另外两个站要高约 10 ppb。

夏季和冬季阴天时,3 个站地面  $O_3$  日平均浓度排列次序与晴天相同(表 1)。

## 2.3 雨天

3 个站雨天  $O_3$  浓度都小于阴天,特别龙凤山站其差值为 8 ppb。雨天瓦里关台地面  $O_3$  浓度仍比其它两个站高出 25 ppb 以上。

夏季雨天 3 个站地面  $O_3$  平均浓度排列次序也与晴天相同(表 1)。

表 1 不同地区和季节阴天和雨天地面  $O_3$  浓度比较(ppb)

	阴天				雨天	
	日平均		日较差		日平均	日较差
	夏	冬	夏	冬	夏	夏
临安	24.9	34.8	17.5	8.5	22.5	14.8
龙凤山	32.8	31.2	16.8	9.1	24.1	7.7
瓦里关	53.9	41.9	4.0	3.3	50.7	4.2

## 3 讨论

(1)临安晴天时各季地面  $O_3$  浓度和太阳辐射不相一致:总辐射水平最高的夏季地面

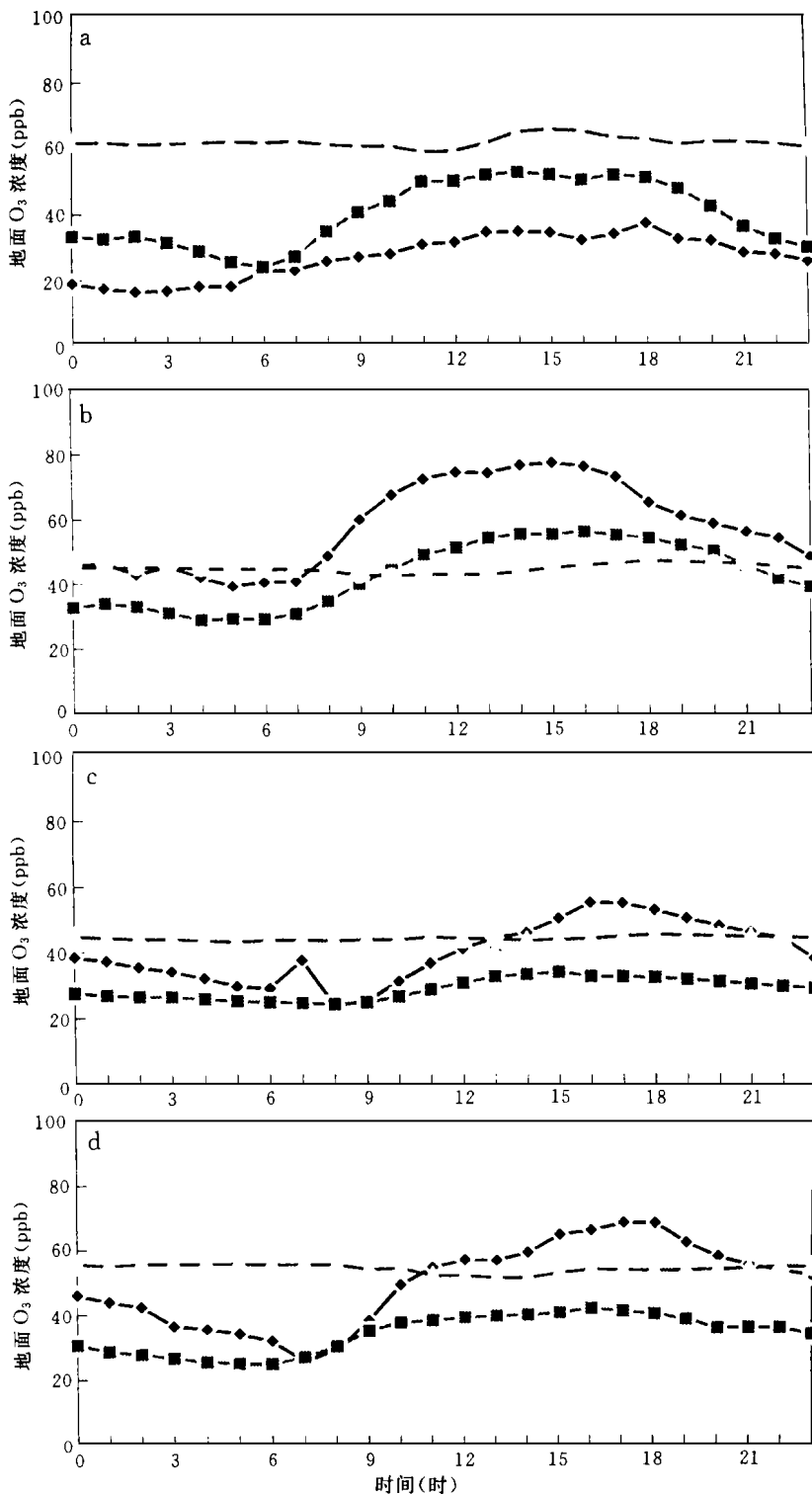


图2 1994年8月~1995年7月不同季节3个站地面O<sub>3</sub>浓度比较  
(a. 夏季; b. 秋季; c. 冬季; d. 春季。—◆—临安, —■—龙风山, — —瓦里关)

O<sub>3</sub> 浓度反而最低。NO<sub>x</sub> 季平均最小值出现在夏季,而最大值是在秋季,依次序为春季和冬季。临安地面 O<sub>3</sub> 季节浓度的差异正好和 NO<sub>x</sub> 的季节浓度差异相一致。由此说明除了总辐射和地面 O<sub>3</sub> 浓度有密切关系之外,NO<sub>x</sub> 也起了重要作用(表 2)。

表 2 晴天临安和龙凤山的 NO<sub>x</sub> 和总辐射

		夏	秋	冬	春
· 临安	O <sub>3</sub> 日平均(ppb)	26.8	57.8	40.0	49.7
	NO <sub>x</sub> 日平均(ppb)	0.7	12.6	2.6	5.7
	总辐射日累值 (MJ·m <sup>-2</sup> )	19.5	13.5	9.3	18.7
龙凤山	O <sub>3</sub> 日平均(ppb)	39.7	42.8	28.8	34.4
	NO <sub>x</sub> 日平均(ppb)	1.5	2.5	4.2	2.1
	总辐射日累值 (MJ·m <sup>-2</sup> )	22.6	12.5	9.3	21.0

龙凤山地面 O<sub>3</sub> 浓度的季节差异则从两个侧面反映了太阳总辐射以及 NO<sub>x</sub> 的重要性。尽管冬季 NO<sub>x</sub> 平均浓度较高(4.2ppb),然而由于太阳总辐射是全年最低的(9.3 MJ·m<sup>-2</sup>),所以冬季地面 O<sub>3</sub> 浓度仍然最低。虽然夏季太阳辐射水平最高,但由于 NO<sub>x</sub> 季平均值仅为 1.5 ppb(位居全年倒数第一),所以夏季仍然未成为全年地面 O<sub>3</sub> 浓度最高季节。这又说明 NO<sub>x</sub> 在地面 O<sub>3</sub> 生成中的重要性。由以上的分析说明太阳总辐射和 NO<sub>x</sub> 在临安和龙凤山的不同季节分别发挥着主要作用:夏季由于 NO<sub>x</sub> 出现较低致使二个站都没有高浓度的地面 O<sub>3</sub> 出现。而在高纬度的龙凤山尽管冬季出现较高 NO<sub>x</sub> 浓度,但是,由于太阳总辐射较弱,所以地面 O<sub>3</sub> 浓度依然为全年最低值。

阴天的情况和晴天比较接近。夏季是总辐射最强的季节,临安日累积值为 6.0 (MJ·m<sup>-2</sup>),几乎为冬季的 2.5 倍,然而由于冬季 NO<sub>x</sub> 浓度相对较高,所以在临安依旧是冬季地面 O<sub>3</sub> 浓度高于夏季。龙凤山情况则正好相反,尽管冬季的 NO<sub>x</sub> 浓度约为夏季两倍,但是,因为冬季的总辐射日累值仅有夏季的一半,所以还是夏季地面 O<sub>3</sub> 日平均浓度略高一些。由此可见,阴天 NO<sub>x</sub> 和总辐射仍然起着重要作用。在中美联合大气化学考察(PEM—WEST—A)中也曾观测到 NO<sub>x</sub> 和总辐射分别为制约地面 O<sub>3</sub> 浓度的重要因素这种现象<sup>[4]</sup>。

表 3 阴天临安和龙凤山 NO<sub>x</sub> 和总辐射

		冬	夏
临安	O <sub>3</sub> 日平均(ppb)	34.8	24.9
	NO <sub>x</sub> 日平均(ppb)	2.9	0.7
	总辐射日累值 (MJ·m <sup>-2</sup> )	2.4	6.0
龙凤山	O <sub>3</sub> 日平均(ppb)	31.2	32.8
	NO <sub>x</sub> 日平均(ppb)	4.6	2.1
	总辐射日累值 (MJ·m <sup>-2</sup> )	6.7	12.5

(2)瓦里关本底台的地面 O<sub>3</sub> 浓度没有显著的日变化,这说明尽管太阳总辐射有明显的日变化,但在低的 NO<sub>x</sub> 浓度水平条件下仍没有明显的光化学反应。然而瓦里关冬、夏季地面 O<sub>3</sub> 浓度分布有很大的差异,而且夏季仍有微弱的日变化。究其原因,与 NO<sub>x</sub> 和非甲

烷烃浓度有关。夏季青藏高原大陆地面受太阳辐射加热作用, 形成上升气流, 高原上空是辐散气流, 对流层低  $O_3$  浓度空气向平流层输送从而减低  $O_3$  总量。与此同时这个输送过程中也将使高原周围地区(云南、四川、陕西和甘肃)相对比较污浊的空气向高原辐合, 高原对流层  $O_3$  前体物大量增加, 加上夏季强烈的太阳总辐射, 结果势必造成夏季瓦里关本底站的地面  $O_3$  出现高浓度。而且较弱的光化学反应也使夏季有别于其它季节出现弱的日变化(见表 4)。相反地, 冬季高原地面辐射冷却作用, 造成大范围的下沉气流, 高空是辐合气流从而形成高的  $O_3$  柱浓度。当然平流层的注入也使对流层  $O_3$  有一定的增加, 这正是瓦里关本底站地面  $O_3$  浓度水平高于同时期龙凤山和临安地面  $O_3$  浓度的原因。然而冬季这种注入量对中低对流层的影响, 小于夏季高原四周污染物向高原输送所引起的地面  $O_3$  增加的量。这种假设亦可以通过表 5 验证。1995 年 12 月~1996 年 8 月在西宁进行的近 50 次臭氧探空记录表明: 冬季平均柱浓度为 343.63 DU<sup>①</sup>, 而夏季仅为 297.21 DU, 两者相差 46.42 DU。然而从对流层平均臭氧浓度来看, 结果却正好相反, 夏季对流层  $O_3$  平均浓度比冬季大 7.92 DU。

表 4 瓦里关冬季和夏季空气中  $SO_2$ 、 $NO_x$  和 NMHC 平均值<sup>[5,6]</sup>

	$SO_2$	$NO_x$	NMHC
冬季	0.095	0.029	27.4+6.1
夏季	0.235	0.055	86.8+25.2
夏季/冬季	2.47	1.90	3.17

表 5 冬季和夏季电化学臭氧探空在不同高度范围内积分出的臭氧浓度(DU)平均值<sup>[7]</sup>

	冬季	夏季	夏季-冬季
地面~10 km	18.19	26.11	7.92
10~20 km	82.48	32.87	-49.61
20~28 km	149.91	134.94	-14.97
28~大气层顶	91.88	103.29	11.41
臭氧总量平均值	343.63	297.21	-46.42

在全球基准站之一的美国 Mauna Loa 本底站也可以看到类似于瓦里关本底站地面  $O_3$  的月际变化。Mauna Loa 本底站位于夏威夷群岛之中的大岛上, 其海拔高度(3397 m)类似于瓦里关本底站, 该岛没有大的工厂及其它污染源。表 6 列出了 1994 年 8 月~1995 年 7 月瓦里关本底站各季地面  $O_3$  的季平均以及晴天季平均和 Mauna Loa 本底站同期季平均和 1973~1995 年季平均值。从表中可以看到 Mauna Loa 本底站同样也有明显的季节变化。所不同是春季地面  $O_3$  浓度最高, 大约比其它季节高 10 ppb 以上。这主要是春季亚洲大陆富含尘埃的空气随着西风气流输送到该岛所引起的。这种机制几乎和瓦里关本底站夏季出现地面  $O_3$  高浓度是一致的。所不同的一点是瓦里关本底站地处欧亚大陆, 夏季高原四周污染物向高原输送的距离更近影响更大。因此瓦里关本底站夏季地面  $O_3$  浓度

① 在 0℃ 标准海平面压力下  $10^{-5}m$  高的  $O_3$  为 1 DU。

要高出 Mauna Loa 春季地面  $O_3$  浓度约 10 ppb。

表 6 瓦里关本底站和 Mauna Loa<sup>①</sup>本底站地面  $O_3$  浓度季平均值对比 (ppb)

	9~11 月	12~次年 2 月	3~5 月	6~8 月	
瓦里关	1994 年 8 月~ 1995 年 7 月	42.1	42.4	52.3	60.6
	1994 年 8 月~ 1995 年 7 月晴天	44.7	44.2	54.4	61.8
MLO	1994 年 8 月~ 1995 年 7 月	38.5	39.5	51.2	36.3
	1973 年~ 1995 年	33.3	39.3	50.2	37.5

(3)不同季节瓦里关站地面  $O_3$  浓度都明显地高于东部临安站和龙凤山站地面  $O_3$  浓度,其主要原因在于它们的海拔高度不同。表 7 是两个接近于海平面的测站:Hilo(夏威夷群岛)和 Samoa(美属南萨摩阿群岛)利用 ECC 臭氧探空仪观测到的季节平均垂直  $O_3$  剖面。从表中可以看出从地面到 700 hPa 高度  $O_3$  浓度是逐渐增加的,从 700 hPa 到 500 hPa 虽然  $O_3$  浓度降低,但在 600 hPa 高度仍有 5 组  $O_3$  浓度值大于地面  $O_3$  浓度值。剩下的两组,这两个高度的  $O_3$  浓度值也十分接近。瓦里关、临安和龙凤山的高度分别为 3810 m、132 m 和 325 m。瓦里关的高度接近 600 hPa 高度,临安、龙凤山接近于海平面。由此可见, $O_3$  在低对流层的垂直分布特征,决定了东西部测点地面  $O_3$  的差异。

表 7 接近海平面测点  $O_3$  探空观测结果(单位:nb)<sup>②</sup>

标准大气 压(hPa)	HILO				SAMOA			
	1~3 月	4~6 月	7~9 月	10~12 月	4~6 月	7~9 月	10~12 月	
地面	17.0	25.5	15.2	24.0	15.6	20.9	17.5	
1000	18.6	24.1	14.2	27.2	15.7	20.9	17.7	
700	34.9	39.5	18.8	26.1	20.9	22.8	25.0	
600	29.9	31.5	16.2	23.4	18.5	19.1	23.6	
500	24.9	23.5	13.5	20.6	16.1	15.4	22.2	

#### 4 小 结

(1)晴天临安地面  $O_3$  有明显日变化和日较差,日较差以春季最大(42.9 ppb),夏季最小(20.8 ppb)。龙凤山有更加规则日变化,但日较差较小:秋季最大(约 27 ppb),冬季最小(9.7 ppb)。瓦里关除了夏季有微弱日变化外,其它季节没有明显的日变化,日较差也很小。但冬季和夏季地面  $O_3$  还是有显著差异,夏季日平均  $O_3$  浓度比冬季大 18.2 ppb。

① Summary Report. U S Department of Commerce, National oceanic and Administration Environmental Research Laboratories. 1994-1995, 71~74.

② Summary Report. U S Department of Commerce, National Oceanic and Administration Environmental Research Laboratories. 1986, 54~55

(2) 夏季晴天夜间瓦里关地面  $O_3$  浓度要分别高於龙凤山和临安 2~3 倍, 午后也要高出两个站 20 ppb 以上。冬季瓦里关站较之龙凤山站地面  $O_3$  浓度大约高 10~20 ppb。

(3) 阴天龙凤山和临安地面  $O_3$  日变化不如晴天规则, 日较差也小。阴天瓦里关不仅没有日变化而且日较差更小, 但夏季地面  $O_3$  依然高于冬季。雨天情况尤其于阴天。阴雨天瓦里关地面  $O_3$  浓度仍高于其它两个站。

(4) 太阳总辐射和  $NO_x$  浓度都是控制龙凤山和临安晴天和阴天地面  $O_3$  浓度的主要因子, 在不同季节和地区分别发挥重要作用。

(5) 夏季高原周围地区地面向青藏高原的输送作用是形成夏季瓦里关地面  $O_3$  高值以及微弱日变化的主要原因。同样地在美国 Mauna Loa 本底站春季也曾观测到类似的亚洲大陆输送影响。

(6)  $O_3$  在低对流层随垂直高度增加的分布特征, 决定了东西部测点地面  $O_3$  的差异。

致谢: 瓦里关本地站、龙凤山和临安本地站的同志协助本课题获取了大量宝贵资料。师昱峰同志帮助整理了许多数据, 在此谨致谢意。

## 参考文献

- 1 颜鹏, 李兴生, 罗超等. 我国地面  $O_3$ 、 $NO_x$ 、 $SO_2$  背景值的观测研究. 应用气象学报, 1997, 8(1): 53~61
- 2 Ding Guoan, Xu Xiaobin, Xiang Rongbiao et al. Research on surface  $O_3$  with meteorological conditions under atmospheric background conditions in Northeast China. ACTA Meteorologica Sinica, 1997, 11(4): 478~488
- 3 汤洁, 李兴生. 青海瓦里关山地面臭氧的观测和初步结果. 见: 周秀骥主编. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响, 北京: 气象出版社, 1996, 19~29
- 4 丁国安, 罗超, 汤洁等. 清洁地区气象因子与地面  $O_3$  关系的初步研究. 应用气象学报, 1995, 6(3): 350~355
- 5 徐晓斌, 向荣彪, 丁国安. 中国大陆本底大气 NMHC 的浓度构成及其与臭氧的关系. 见: 周秀骥主编. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响, 北京: 气象出版社, 1996, 67~81
- 6 于晓兰, 汤洁, 李兴生. 我国西部清洁大气中  $SO_2$  和  $NO_x$  的观测和分析. 应用气象学报, 1997, 8(1): 62~66
- 7 Liu Qijun, Zheng Xiangdong, Luo Chao, et al. Ozone vertical profile characteristics over Qinghai Plateau measured by electrochemical concentration cell ozonesondes. Advances in Atmospheric Sciences, 1997, 14(4): 481~490



# SURFACE OZONE CHARACTERISTICS AT DIFFERENT AREAS UNDER ATMOSPHERICAL BACKGROUND CONDITIONS IN CHINA

Ding Guoan Xu Xiaobin Luo Chao Tang jie  
Xiang Rongbiao Yan Peng Wang Mulin Li Xingshen

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences Beijing, 10081*)

## Abstract

The characteristics of surface  $O_3$  on clear day, cloudy and rain day at Waliguan observatory, Lin'an regional station and Longfengshan regional station were analyzed. There were obvious daily variation on clear day at Lin'an. The maximum (42.9 ppb) and minimum (20.3 ppb) of daily variation presented in autumn and summer, respectively. The daily variation was more regular at Longfengshan than at Lin'an. The maximum (about 27 ppb) presented in autumn at Longfengshan. There was not obvious daily variation and also daily range was smaller in other seasons except summer (there were weak daily variation) at Waliguan. But the surface  $O_3$  concentration in summer was higher than winter. The surface  $O_3$  concentration on clear day of summer at Waliguan was over 20 ppb higher than it at Longfengshan and Lin'an. Except daily variation was not very regular and daily range was smaller on overcast at Lin'an and Longfengshan, the others were same to on clear day. There was non-daily variation. also daily range is smallest on overcast at Waliguan. But the surface  $O_3$  concentration in summer was still higher than winter. Both global radiation and  $NO_x$  concentration were main factors to control surface  $O_3$  concentration on clear day and overcast at Longfengshan and Lin'an. They brought into important play in different seasons and areas. The main reason for higher air pollutant concentration in summer at Waliguan was that air flow of higher air pollutant concentration of area around Qinghai-Tibetan plateau transported into this area. The similar effect of transportation was obtained at Mauna Loa observatory. The distribution characteristics of surface  $O_3$  concentration increasing with vertical high in troposphere decided the difference of surface  $O_3$  between east and west in China.

**Key words:** Atmospheric background, Surface  $O_3$ , Clear day, Cloudy day.