

郑向东,宣越键,林伟立,等. 国产 ECC 型 O<sub>3</sub> 探空仪性能测试及室外比对观测. 应用气象学报,2018,29(4):460-473.

DOI: 10.11898/1001-7313.20180407

# 国产 ECC 型 O<sub>3</sub> 探空仪性能测试及室外比对观测

郑向东<sup>1)\*</sup> 宣越键<sup>2)</sup> 林伟立<sup>3)4)</sup> 汤洁<sup>3)</sup>

田宏民<sup>1)5)</sup> 张金强<sup>2)</sup> 邢毅<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(中国气象科学研究院,北京 100081)

<sup>2)</sup>(中国科学院大气物理研究所,北京 100029) <sup>3)</sup>(中国气象局气象探测中心,北京 100081)

<sup>4)</sup>(中央民族大学生命与环境科学学院,北京 100081) <sup>5)</sup>(成都信息工程大学,成都 610225)

## 摘 要

该文介绍了中国科学院大气物理研究所(简称 IAP)研制的电化学浓度电池(ECC)型臭氧(O<sub>3</sub>)探空仪基本性能测试和 2013 年上半年室外比对观测结果。结果表明:ECC 的背景电流( $I_{bg}$ )在 0.1  $\mu$ A 以下或更低;测量 O<sub>3</sub> 的响应时间为 21~26 s;NO<sub>2</sub>(SO<sub>2</sub>)使 O<sub>3</sub> 测值偏高(低);抽气泵低压泵效系数( $C_{ef}$ )在 100 hPa 高度以下为 1.0 左右,在该高度以上上升,10 hPa 达到 1.17 $\pm$ 0.10,5 hPa 达到 1.28 $\pm$ 0.16,性能略低于同类进口产品(1.055 以下)。国产和进口仪器在气象探空或抽气泵等部件上具有良好兼容性;两者所测 O<sub>3</sub> 垂直分布廓线总体一致。IAP O<sub>3</sub> 探空仪 O<sub>3</sub> 总量与 Brewer 光谱仪测值比值为 0.9~1.1; $C_{ef}$ 和  $I_{bg}$ 订正有效降低了 IAP O<sub>3</sub> 探空仪在平流层低层与进口仪器测值的差别,这一订正对 O<sub>3</sub> 柱浓度在平流层和对流层的贡献分别为约 15 DU 和 4~6 DU;在对流层,IAP O<sub>3</sub> 探空仪测值与进口仪器间的绝对差别稳定且低于 0.5 mPa;而平流层受泵效影响较明显。因此,建议 IAP O<sub>3</sub> 探空仪提高其  $C_{ef}$  的稳定性,参与国际比对测试,国产气象探空平台数据接收处理增加必要的滤波技术以降低平流层探测数据(包括 O<sub>3</sub>)的振荡。

**关键词:** IAP O<sub>3</sub> 探空仪;泵效系数及订正;比对观测

## 引 言

电化学浓度电池(electrochemical concentration cell,ECC)型臭氧(O<sub>3</sub>)探空仪是利用 O<sub>3</sub> 与 KI 溶液发生的电化学反应产生的电信号测量大气中 O<sub>3</sub> 浓度的仪器,也是探空观测 O<sub>3</sub> 垂直分布的主流技术手段<sup>[1]</sup>。尽管欧洲、日本和印度在 20 世纪 90 年代前研制了各自的 O<sub>3</sub> 探空仪且进行了较长时间的业务观测,但 1996 年世界气象组织举行的室内 O<sub>3</sub> 探空严格比对试验(Jülich Ozone Sonde Inter-comparison Experiment 1996; JOSIE-1996)确定了双池(阴极及阳极池)ECC 型 O<sub>3</sub> 探空仪(含 ENSCI-2Z 及 SPC-6A 两种型号)平均性能及准确度上优于

其他类型(BM 和 KC 型)探空仪后<sup>[2]</sup>,欧洲国家(如德国、瑞士及比利时等)及日本气象厅均逐步放弃了原来各自研制并已进行长期观测的 O<sub>3</sub> 探空仪进而选取了 ECC 型<sup>[3]</sup>。因此,尽管中国科学院大气物理研究所(IAP)O<sub>3</sub> 探空仪在 KC 单池型基础上已进行了较长时间的研制工作<sup>[4-6]</sup>,而且与之配套的 GPS 气象探空仪也进行了很多比对测试<sup>[7-10]</sup>,但新型仪器研制采用 ECC 原理,参照 SPC-6A 型号,并选择国产 GPS 气象探空仪为气象探空仪平台<sup>[11]</sup>,国内已有的 O<sub>3</sub> 垂直分布探测工作中 ECC 型的探空仪也使用较多<sup>[12-13]</sup>。本文将国产 O<sub>3</sub> 探空仪简称为 IAP O<sub>3</sub> 探空仪。本文主要介绍该探空仪室内性能测试及外场比对观测分析结果,以了解其技术现状并确定改进的方向。

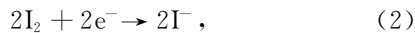
2017-10-13 收到,2018-03-09 收到再改稿。

资助项目:公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106041)

\* 邮箱:xdzheng@cma.gov.cn

## 1 ECC 型 O<sub>3</sub> 探空仪原理

ECC 型 O<sub>3</sub> 探空仪采用 Teflon 材质制作阴阳两个反应池,通过池里所发生的电化学反应产生的电信号获取 O<sub>3</sub> 信息,阴极池用 0.5% 或 1% 的 KI 溶液,而阳极池则用过饱和 KI 溶液。根据 Komhyr 的工作<sup>[1]</sup>,在阴极池里 O<sub>3</sub> 与 KI 发生在如式(1)的反应生成单质 I<sub>2</sub>,I<sub>2</sub> 会在阴极溶液中发生还原反应,重新变成碘离子和自由电子(式(2))。这些自由电子在阴极溶液中被铂金(Pt)网捕获,而阴极 Pt 网则通过离子电桥连接到阳极反应池的 Pt 网,使阴极自由电子转向阳极池,而阴极的碘离子还原成单质 I<sub>2</sub>(式(3))。阴极和阳极反应池自由电子的迁徙与外界电路形成闭合回路产生电流。



反应中产生自由电子数与 O<sub>3</sub> 浓度成比例。根据电化学理论,在大气高度  $Z$  上,大气 O<sub>3</sub> 分压  $P_3$  ( $Z$ ) 可通过以下测量实现:

$$P_3(Z) = 4.307 \times 10^{-4} (I(Z) - I_{\text{bg}}) T_p(Z) t C_{\text{ef}}(Z). \quad (4)$$

式(4)中,直接测量与大气相关的参数包括  $I$  (电化学反应池电流) 和  $T_p$  (被采样进空气的温度)。与 O<sub>3</sub> 探空仪器有关的参数包括  $I_{\text{bg}}$  (电化学反应池背景电流) 和  $t$  (探空仪抽气泵采集 100 ml 空气所用的时间),两者均为地面测值。 $C_{\text{ef}}$  是对  $t$  的修正系数,称为泵效系数。由于抽气泵设计(活塞式)原理的局限及机械加工存在细微差异,这种差异在地面常规气压下不明显,但在低压下(100 hPa 以上高度)差异则易被放大并给  $P_3$  带来显著误差<sup>[14]</sup>。 $C_{\text{ef}}$  通常是采用经验性的测值用以订正  $P_3(z)$ 。而日常业务中的 O<sub>3</sub> 探空仪静态测量参数包括  $I_{\text{bg}}$  和  $t$ 。

大气 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub> 也会参与 KI 溶液的化学反应。SO<sub>2</sub> 通入到阴极 KI 溶液中后,会与 I<sub>2</sub> 发生如式(5)的化学反应,该反应会消耗 I<sub>2</sub>,与反应式(1)形成竞争,降低 O<sub>3</sub> 与 I<sub>2</sub> 反应机会从而使 O<sub>3</sub> 被低估。



NO<sub>2</sub> 在阴极碘化钾溶液中首先与 H<sub>2</sub>O 反应生成硝酸,硝酸再将 I<sup>-</sup> 离子氧化成 I<sub>2</sub>。总反应如式(6)所示,其结果使得溶液中 I<sub>2</sub> 浓度增大,导致反应电流增大,从而高估 O<sub>3</sub> 浓度。



因此,O<sub>3</sub> 探空仪测值对 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub> 的敏感性检验也是很有必要的,虽然在日常的 O<sub>3</sub> 探空观测中很少进行测试,却为检验电化学反应池的准确性和可靠性的内容之一。

## 2 室内测试

室内测试(低压舱测试除外)均在室内常温(20~25℃)、常压下(1000 hPa)进行。 $I_{\text{bg}}$ ,  $t$  和  $C_{\text{ef}}$  的测试是通入零空气,响应时间测试则是仅通入含一定浓度的 O<sub>3</sub> 气体,而 SO<sub>2</sub> 或 NO<sub>2</sub> 对 IAP O<sub>3</sub> 探空仪测值的影响是通入一定量 SO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 或 NO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 的混合气体完成。

### 2.1 背景电流( $I_{\text{bg}}$ )

$I_{\text{bg}}$  测试是电化学反应池通入没有 O<sub>3</sub> 和反应性气体(如 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>) 的纯净空气时输出的电流值的变化。根据 39 次(2013 年 24 次,2016 年 15 次)测试结果,IAP O<sub>3</sub> 探空仪的  $I_{\text{bg}}$  平均值为  $0.032 \pm 0.024 \mu\text{A}$ ,数值与国际上的 ECC O<sub>3</sub> 探空仪的测值<sup>[15]</sup> 相当或更低。

$I_{\text{bg}}$  被认为是只有 O<sub>2</sub> 参与微弱化学反应引起且与高度相关。 $I_{\text{bg}}$  在 100 hPa 以上高度随高度降低<sup>[16]</sup>,Komhyr 等<sup>[17]</sup> 分析 STOIC 1989 期间试验数据后发现, $I_{\text{bg}}$  在探空仪放飞前的地基测试后可能还会减小,在以 Vaisala-RS92 气象探空仪为平台的 SPC-6A 型 O<sub>3</sub> 探空仪观测中, $I_{\text{bg}}$  是根据气压大小进行了适当的订正以满足其随高度增加而减小的特性<sup>[15]</sup>。图 1 为室内低压模拟舱中 IAP O<sub>3</sub> 探空仪  $I_{\text{bg}}$

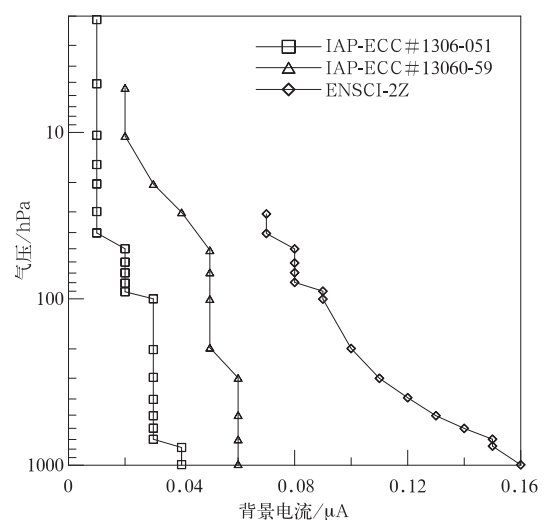


图 1 IAP 和 ENSCI-2Z O<sub>3</sub> 探空仪  $I_{\text{bg}}$  随气压变化  
Fig. 1 Variations of IAP and ENSCI-2Z ECC ozonesonde  $I_{\text{bg}}$  with the atmospheric pressure

随高度变化。可以看到,  $I_{bg}$  测值均随气压下降而下降, ENSCI-2Z 型  $O_3$  探空仪也是如此。

近地面检测结果同时表明,  $I_{bg}$  会随测试时间增加而减少<sup>[18]</sup>。因此, 由图 1 仅看到 ECC 型  $O_3$  探空仪  $I_{bg}$  随气压的变化导致  $O_2$  浓度降低相关外,  $I_{bg}$  本身随时间变化也可能有一定影响, 因为测量过程中随着气压的降低测量时间也增加。实际观测过程中, 当  $O_3$  探空仪处于高浓度  $O_3$  平流层环境中时  $I_{bg}$  也可能增加, 因而实际  $O_3$  探空观测中  $I_{bg}$  随高度的变化并不完全符合图 1 规律。

## 2.2 响应时间

$O_3$  探空仪响应时间( $\tau$ )测试分为  $O_3$  浓度增大和减小两个方向。浓度增大方向首先是对探空仪通入纯净空气 10 min, 然后迅速接入  $O_3$  发生器的输出端, 记录探空仪测值随时间的变化。浓度减小方向则是将探空仪接入  $O_3$  发生器输出的已知浓度  $O_3$ , 待测量稳定后迅速将探空仪进气口切入纯净空

气, 记录探空仪测值随时间的变化。 $\tau$  根据式(7)计算<sup>[2]</sup>。

$$S(t) = S(0)e^{-t/\tau} \quad (7)$$

式(7)中,  $S(t)$  为  $t$  时刻反应池电流值,  $S(0)$  为初始  $O_3$  浓度稳定时刻的池电流值;  $t$  为时间(单位: s);  $\tau$  为响应时间, 是  $S(t)$  值下降到  $S(0)$  的  $1/e$  时所对应的时间值。

在测试的 2 个 IAP  $O_3$  探空仪和 1 个 ENSCI-2Z  $O_3$  探空仪获得了 6 组数据见表 1。由表 1 可知, IAP  $O_3$  探空仪的响应时间总体为 21~26 s, 甚至优于进口的探空仪测值, 特别是在浓度增大方向上;  $\tau$  随着  $S(0)$  值而略有增加, 但同样测量条件下进口 ENSCI-2Z 型仪器的测值达到 32 s。在  $O_3$  浓度减小方向上,  $\tau$  总体稳定在 21 s 左右, 与 ENSCI-2Z 测值较一致。以  $\tau$  平均值为 21~25 s,  $O_3$  探空气球平均升速一般为 5 m/s 时, 测量  $O_3$  有效垂直分辨率为 105~125 m。

表 1 IAP 与 ENSCI-2Z ECC  $O_3$  探空仪响应时间  $\tau$  测试结果(单位: s)

Table 1 Response time( $\tau$ ) of IAP and ENSCI-2Z ECC ozonesondes(unit: s)

$O_3$ 浓度/ $10^{-9}$	浓度增大方向			浓度减小方向		
	IAP #1	IAP #2	ENSCI-2Z	IAP #1	IAP #2	ENSCI-2Z
200	25.7	27.7	34.1	21.2	21.1	20.0
150	23.3	24.0	26.2	20.9	21.3	20.0
100	23.1	24.5	26.1	20.3	21.4	19.6
50	23.2	23.8	29.9	21.2	20.3	20.9
15	25.3	27.3	43.7	21.0	21.4	20.7
平均	24.1	25.5	32.0	20.9	21.1	20.3

## 2.3 $NO_2$ , $SO_2$ 对 $O_3$ 探空仪测值的影响

如式(5)和式(6)所示, 大气中  $SO_2$  和  $NO_2$  会与 KI 溶液发生反应从而干扰  $O_3$  探空仪浓度结果, 特别是大气污染较严重地区。为了理解该干扰对测值的影响, 试验中 IAP  $O_3$  探空仪通入不同浓度的  $SO_2$  或  $NO_2$  气体以定量了解污染气体对  $O_3$  探空测值的影响。具体测量过程中, 独立进行  $O_3$  测量的仪器是 TE49i, 它是根据光学原理测量, 不受  $NO_2$  或  $SO_2$  污染性气体影响。 $NO_2$  和  $SO_2$  影响测试各进行 3 次, 而  $SO_2$  浓度在  $0 \sim 160 \times 10^{-9}$  之间变化, 详细测试过程设计详见文献<sup>[19]</sup>。

比较 IAP  $O_3$  探空仪与 TE49i 测量  $O_3$  的差值。 $n$  为样本量。图 2a 显示, 随着通入  $NO_2$  浓度增大, IAP  $O_3$  探空仪会增大  $O_3$  的测值。这显然与式(6)有关, 2 个溶于 KI 的  $NO_2$  分子生成 1 个  $I_2$  分子, 即

2 个  $NO_2$  分子在反应池中参与的电化学反应作用相当于 1 个  $O_3$  分子参与反应, 这一假设是基于式(1)和式(6)的反应速率是一样的, 但事实上并非如此。由于  $NO_2$  不容易被溶液吸收, 而且被吸收  $NO_2$  和  $H_2O$  也会发生如式(8)反应, 与式(6)发生竞争。



由于上述 3 个反应,  $NO_2$  对 IAP  $O_3$  探空仪测值的影响是较复杂的。Schenkel 等<sup>[20]</sup> 在研究  $NO_2$  对 Brewer-Master 型  $O_3$  探空仪测值影响时曾指出, 由于 KI 溶液对 KI 的吸收率较低, 且吸收率与流量、KI 溶液的体积及其所在容器的几何形状等因素有关,  $NO_2$  使该类型的  $O_3$  探空仪测值仅出现微弱增加, 斜率仅为 0.057; 而图 2a 的斜率统计结果 0.27, 远高于这一测值<sup>[20]</sup>, 其原因目前还不清楚, 但反映了  $NO_2$  浓度变化对 IAP  $O_3$  探空仪测值影响。

当假设式(1)和式(5)的速率相同时,理论上在通入与 O<sub>3</sub> 浓度相同的 SO<sub>2</sub> 的情况下, O<sub>3</sub> 探空仪与 TE49i 测值差值即为 SO<sub>2</sub> 浓度,也就是 O<sub>3</sub> 探空仪的误差值与 SO<sub>2</sub> 浓度值之间的斜率应为-1。但由图 2b 可以看到,两者拟合直线的斜率约为-0.92,这与 Schenkel 等<sup>[20]</sup>所得到的一0.93 接近。图 2b 中的斜率不为-1 与式(1)和式(5)之间反应速率差异有关:SO<sub>2</sub> 和 O<sub>3</sub> 均与 KI 发生化学反应但 O<sub>3</sub> 反应速率较快,这就是 O<sub>3</sub> 探空仪仍能够探测出 O<sub>3</sub> 的原因。由图 2b 也可以看到,SO<sub>2</sub> 对 IAP O<sub>3</sub> 探空仪的影响显然与 NO<sub>2</sub> 不同,因为 SO<sub>2</sub> 极易溶解于 KI 溶液使式(5)快速发生。根据图 2b 中 SO<sub>2</sub> 与 KI 的反应

特性,已研制成功了测量大气 O<sub>3</sub> 和 SO<sub>2</sub> 垂直廓线分布的探空仪<sup>[21]</sup>。

北京地区近地面边界层 NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> 浓度平均值分别约为  $60 \times 10^{-9}$ <sup>[22]</sup> 和  $30 \times 10^{-9}$ <sup>[23]</sup>,显然它们对 IAP O<sub>3</sub> 探空仪测值的影响比较明显。根据图 2 的测试结果,理论上,NO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 对 IAP O<sub>3</sub> 探空仪测值的影响可相互抵消,但实际情形应比较复杂,因为 NO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 与 KI 溶液反应速率存有差异,而且探空仪一旦释放后便以 5 m/s 速度上升,在飞出近地面污染层后 SO<sub>2</sub> 对 IAP O<sub>3</sub> 测值的影响则会明显降低。

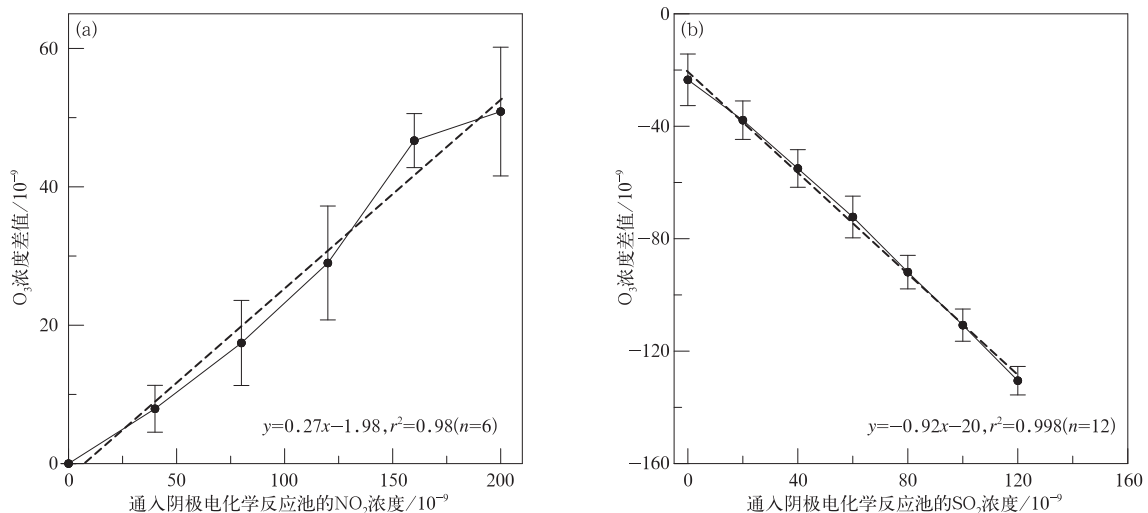


图 2 NO<sub>2</sub> (a)和 SO<sub>2</sub> (b)对 IAP O<sub>3</sub> 探空仪测值影响的测试

Fig. 2 Influences of NO<sub>2</sub> (a) and SO<sub>2</sub> (b) on measurements of IAP ozonesonde

#### 2.4 流量( $t$ )和泵效系数( $C_{ef}$ )

地面流量值  $t$  通过皂泡型流量计测定。式(4)中  $t$  值定义为 O<sub>3</sub> 探空仪抽取 100 ml 空气所需时间,国际上 ECC 型 O<sub>3</sub> 探空仪的  $t$  值通常为 27~30 s。笔者统计国产 39 个已释放的 ECC O<sub>3</sub> 探空仪  $t$  值均为 29~30 s,与进口的 O<sub>3</sub> 探空仪接近。

对 IAP O<sub>3</sub> 探空仪的泵效系数  $C_{ef}$  的测量方法主要是在低压舱内利用二甲基硅油(低压下可以形成泡)的特性,使用推拉式注射器控制硅油液面高度,通过数码摄影记录硅油泡在流量计中移动的图像;然后通过视频帧的分析,计算出不同气压下硅油泡经过等长距离的时间,该时间值与地面所测时间  $t$  的比值即为  $C_{ef}$ <sup>[24]</sup>。图 3a 为 2013 年 5 月 26 日和

27 日两次 IAP O<sub>3</sub> 探空仪  $C_{ef}$  测量曲线。注意到这两次测试结果在低压下差异较为显著,这与驱动抽气泵转动的马达电流大小密切相关。第 1 次测试中马达电流为 57 mA,而第 2 次测试中为 146 mA,这也给探测工作提供一个重要提示,驱动抽气泵的马达电流的变化可作为判断  $C_{ef}$  变化的依据之一。

图 3b 是随机选取 15 套 IAP O<sub>3</sub> 探空仪进行 15 次泵效测试结果。气压点分别从地面~5 hPa 之间展开。图中也给出 15 次测量的  $C_{ef}$  平均值(红线)以及标准偏差(右图)。当气压为 200~700 hPa 时  $C_{ef}$  接近 1,而小于 100 hPa 时,  $C_{ef}$  随着气压减小而增大,  $C_{ef}$  标准偏差在气压大于 20 hPa 时不超过 5%,小于 20 hPa 则  $C_{ef}$  标准偏差变大。在 700, 500, 300,

200,100,70,50,30,20,10 hPa 和 5 hPa 的  $C_{ef}$  平均值分别为 0.99,0.99,0.99,1.00,1.01,1.04,1.04,1.07,1.09,1.17 和 1.28。 $C_{ef}$  在 70 hPa 以上相对标准偏差为 4%~16%。

图 3c 给出了 IAP  $O_3$  探空仪  $C_{ef}$  测值与国际上一些测值比较。本文测值在 10~100 hPa 之间介于

美国 Wyoming 大学和 NOAA-CMDL 测值之间,但普遍高于 SPC-6A 和 ENSCI-2Z 公开值<sup>[14]</sup>。需要说明的是,本文这些测量于 2013 年完成,随着加工工艺的改进,新的 ECC 型 IAP  $O_3$  探空仪抽气泵的稳定性已得到极大提高,抽气泵电流稳定在 70 mA 附近,其  $C_{ef}$  在高空的稳定性也得到了加强。

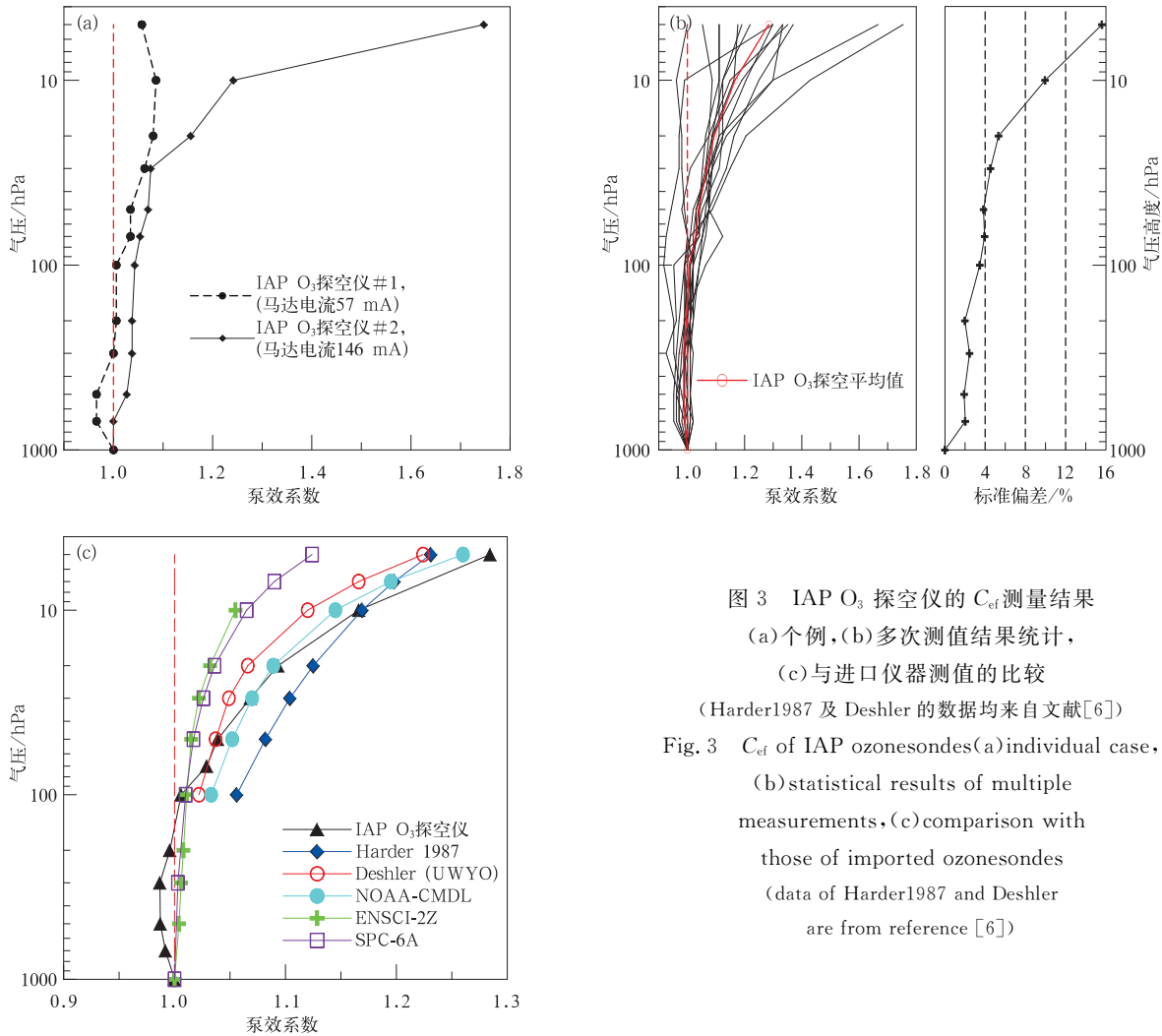


图 3 IAP  $O_3$  探空仪的  $C_{ef}$  测量结果

(a) 个例, (b) 多次测值结果统计, (c) 与进口仪器测值的比较

(Harder1987 及 Deshler 的数据均来自文献[6])

Fig. 3  $C_{ef}$  of IAP ozonesondes (a) individual case,

(b) statistical results of multiple measurements, (c) comparison with those of imported ozonesondes

(data of Harder1987 and Deshler are from reference [6])

### 2.5 地面测值准确度

IAP  $O_3$  探空仪准确度测试通过类似对地面  $O_3$  仪的标定完成。TE49 PS 产生的已知浓度  $O_3$  同时接入  $O_3$  探空仪及地面  $O_3$  仪 TE49i 的进气口, 比较 IAP  $O_3$  探空仪和 TE49i 的  $O_3$  测值确定准确度。图 4 为随机选取的一个 IAP  $O_3$  探空仪的标定结果。由图 4 可以看到, IAP  $O_3$  探空仪测值略偏低 (<5%), 这一点与早在 2001 年对进口的 ENSCI-2Z 型的 ECC 型  $O_3$  探空仪准确性的测试结果一

致<sup>[25]</sup>。两者测值的一致性很高 ( $r^2 = 0.99997$ )。

在地面常压条件下(此时  $C_{ef}$  差异的影响可以忽略), 两者测值差异反映了 ECC 型  $O_3$  探空仪的电化学反应方法固有的测量效率问题, 包括: ① 气态的  $O_3$  进入液态的 KI 溶液被吸收的效率, ② 化学反应式(1)中  $O_3$  与  $I_2$  之间的当量转化, 因为 KI 的吸收效率很难达到 100%。这是探空仪测值系统上略低的主要原因。

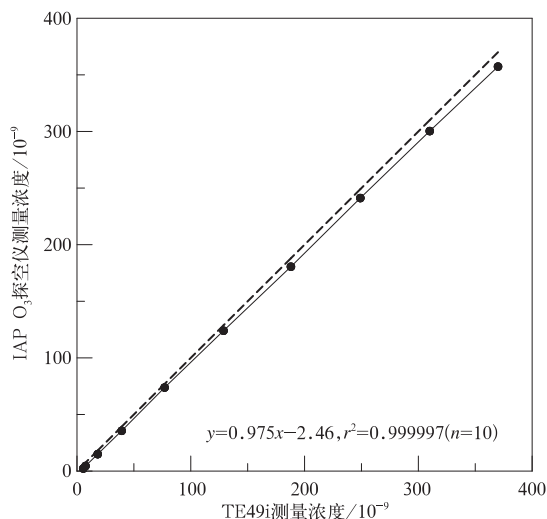


图 4 IAP O<sub>3</sub> 探空仪与 TE49i 测量浓度比较  
Fig. 4 Comparisons of ozone concentration measured by IAP ozonesonde and TE49i

### 3 室外 O<sub>3</sub> 垂直廓线分布及柱总量比对测试

为了检测 IAP O<sub>3</sub> 探空仪的整体技术性能,2013 年

上半年在北京同球释放 IAP O<sub>3</sub> 探空仪(除特别说明外,均使用 1.0% 阴极 KI 溶液)和 SPC-6A(阴极 KI 溶液浓度 1.0%)或者 ENSCI-2Z(阴极 KI 溶液浓度 0.5%)型 O<sub>3</sub> 探空仪。SPC-6A 型和 ENSCI-2Z 型为现在国际成熟的 O<sub>3</sub> 探空仪,两者的性能在世界气象组织举行的 JOSIE-1998 和 JOSIE-2000 比对试验中已经给出了细致的结果<sup>[26-27]</sup>,这也是它们被用于与 IAP O<sub>3</sub> 探空仪进行比对测试的原因,但并不是以 SPC-6A 型或 ENSCI-2Z 型所测量的 O<sub>3</sub> 浓度为正确值,因为即使这两种仪器在室内环境模拟舱中严格测试的结果也有差别:对流层差别达 5%,在平流层 ENSCI-2Z 测值比 SPC-6A 偏高 5%~10%<sup>[1]</sup>。此外,O<sub>3</sub> 探空仪的个体差异和气象探空仪均可以影响测量结果。因此,本文用 Brewer 光谱仪的 O<sub>3</sub> 测值比较探空 O<sub>3</sub> 的积分总量。由于 IAP O<sub>3</sub> 探空仪的结构和 KI 溶液均与 SPC-6A 型的 O<sub>3</sub> 探空仪一致,因此,根据式(4)计算 O<sub>3</sub> 探空测量的分压时,C<sub>ef</sub>采用图 3b 的测量结果,而 I<sub>bg</sub>随高度的变化则采用 SPC-6A 的处理方法<sup>[14]</sup>。

表 2 给出了这 10 次比对观测的概况。由表 2 可知:①IAP O<sub>3</sub>探空仪和地基观测的 O<sub>3</sub> 总量测值比

表 2 2013 年 IAP 和进口 ECC O<sub>3</sub> 探空仪在北京观测比对总体情况

Table 2 Comparison observations of IAP and ENSCI-2Z/SPC-6A ozonesondes in Beijing in 2013

日期	O <sub>3</sub> 探空仪类型	气象探空平台	探空积分总量/DU			Brewer/DU	备注
			原始数据	C <sub>ef</sub> 订正	C <sub>ef</sub> 及 I <sub>bg</sub> 订正		
2013-01-15	IAP	国产	321	327±10 <sup>①</sup>	331	317	
	ENSCI-2Z	RS92			317		
2013-01-22	IAP	国产	376	391±15 <sup>①</sup>	395	388	相同保温盒
	ENSCI-2Z	RS92			371		
2013-03-11	IAP	RS92	302 <sup>②</sup>		312±10 <sup>③</sup>	332	
	ENSCI-2Z				322		
2013-03-13	IAP	RS92	326 <sup>②</sup>		340±13 <sup>③</sup>	336	
	SPC-6A				337		
2013-03-14	IAP	RS92	318 <sup>②</sup>		333±13 <sup>③</sup>	343	
	SPC-6A				330		
2013-03-15	IAP	RS92	272 <sup>②</sup>		284±11 <sup>③</sup>	311	
	SPC-6A				311		
2013-03-18	IAP	RS92	382 <sup>②</sup>		397±15 <sup>③</sup>	429	0.5%KI 溶液
	ENSCI				431		
2013-03-26	IAP	国产	346	351±1.8 <sup>④</sup>	352	350	ENSCI-2Z 泵
	ENSCI-2Z	国产	338	353±1.8 <sup>④</sup>	356		
2013-04-02	IAP	国产	267	270±1.3 <sup>④</sup>	271	315	ENSCI-2Z 泵
	ENSCI-2z	国产	273	276±1.3 <sup>④</sup>	278		
2014-04-23	IAP # 1	国产	392	399±2.7 <sup>④</sup>	402	402	10 km 无信号
	IAP # 2	国产					
	SPC-6A	RS92			398		

注:①图 3b 所示 C<sub>ef</sub>值订正 O<sub>3</sub> 廓线,②由于 Vaisala92 原始数据未提供化学反应池电流值,该积分总量已含 I<sub>bg</sub>订正,③图 3b 所示 C<sub>ef</sub>值和 SPC-6A 探空 I<sub>bg</sub>处理方式订正 O<sub>3</sub> 廓线,④图 3c 中 ENSCI-2Z 的 C<sub>ef</sub>值订正 O<sub>3</sub> 廓线。



率为0.9~1.1,满足1998年的SPARC的技术文档要求<sup>[28]</sup>;②IAP O<sub>3</sub>探空仪与进口O<sub>3</sub>探空仪部件相互兼容:2013年3月11—18日IAP O<sub>3</sub>探空仪利用了Vaisala RS92的气象探测平台观测;3月26日、4月2日进口和IAP O<sub>3</sub>探空仪则用国产气象探空平台观测,同时这两次观测和4月23日观测IAP O<sub>3</sub>探空仪均利用进口的ENSCI抽气泵;③C<sub>ef</sub>和I<sub>bg</sub>订正提高了IAP O<sub>3</sub>探空仪的O<sub>3</sub>积分总量,使之与Brewer测值间差别减小,I<sub>bg</sub>订正总体上贡献4~6 DU左右,对积分O<sub>3</sub>柱浓度贡献为1%~2%,C<sub>ef</sub>的订正能够引起O<sub>3</sub>积分总量约15 DU的变化(1月15日和22日),但C<sub>ef</sub>订正对进口探空仪及采用进口采样泵的IAP O<sub>3</sub>探空仪的影响也仅是2~7 DU(3月26日,4月2日及4月23日)。

根据两种探空仪的器件组合将10次比对分为4组:①相同类型的采样泵和气象探空平台(2013年3月26日和4月2日);②相同采样泵和不同的气象探空平台(2013年4月23日);③相同气象探空平台不同O<sub>3</sub>探空仪(2013年3月11—18日);④完全不同的O<sub>3</sub>探空仪和气象探空仪所组成的系统(2013年1月15日和22日)。这些不同组合比对观测为分析判断IAP O<sub>3</sub>探空仪系统各组成部分对结果影响提

供了依据。

首先比较2013年3月26日和4月2日O<sub>3</sub>垂直分布情况(图5a、图5b)。两种探空仪测量的O<sub>3</sub>分压垂直分布基本一致,在对流层进口探空仪的O<sub>3</sub>分压略高。由于进口抽气泵的标准偏差很稳定(图3c),图5未显示C<sub>ef</sub>订正对O<sub>3</sub>分压廓线有显著影响。4月2日进口探空仪的平流层O<sub>3</sub>测值高于国产探空仪且O<sub>3</sub>分压在20 km以上的高度出现振荡。这种振荡与用IAP探空系统中的气象探空仪缺乏对探测数据的滤波处理有关。尽管图5中已对O<sub>3</sub>分压垂直分布进行内插100 m的平均处理,但在平流层的振荡较为明显。相比之下,在4月23日的比较中,进口O<sub>3</sub>探空仪因为采用了Vaisala-RS92气象探空平台,O<sub>3</sub>廓线在20 km以上比IAP探空系统平滑。

O<sub>3</sub>垂直分布在平流层出现显著的振荡(如4月2日)不符合实际情况。因为平流层比对流层稳定,但在实际数据中IAP O<sub>3</sub>探空仪廓线在20 km以下的对流层反而比较光滑平稳。因此,可以推测平流层的O<sub>3</sub>垂直分布的振荡除了O<sub>3</sub>探空数据的接收和处理过程中缺乏滤波技术外,还有可能与O<sub>3</sub>探空仪技术层面的未知问题有关,在这里最主要的可能是C<sub>ef</sub>的变化。

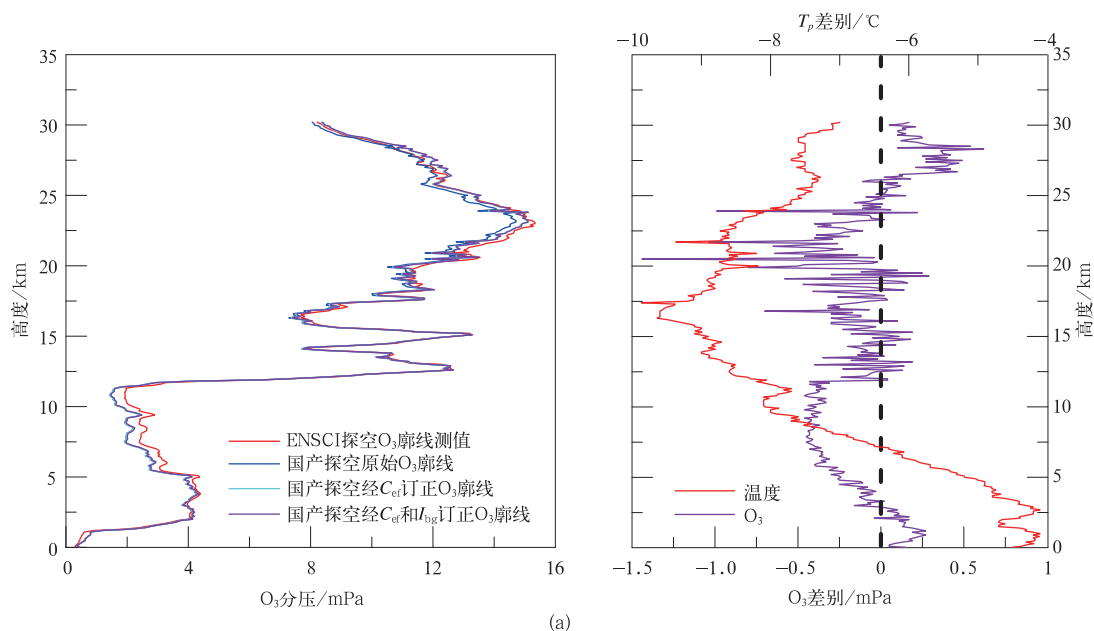


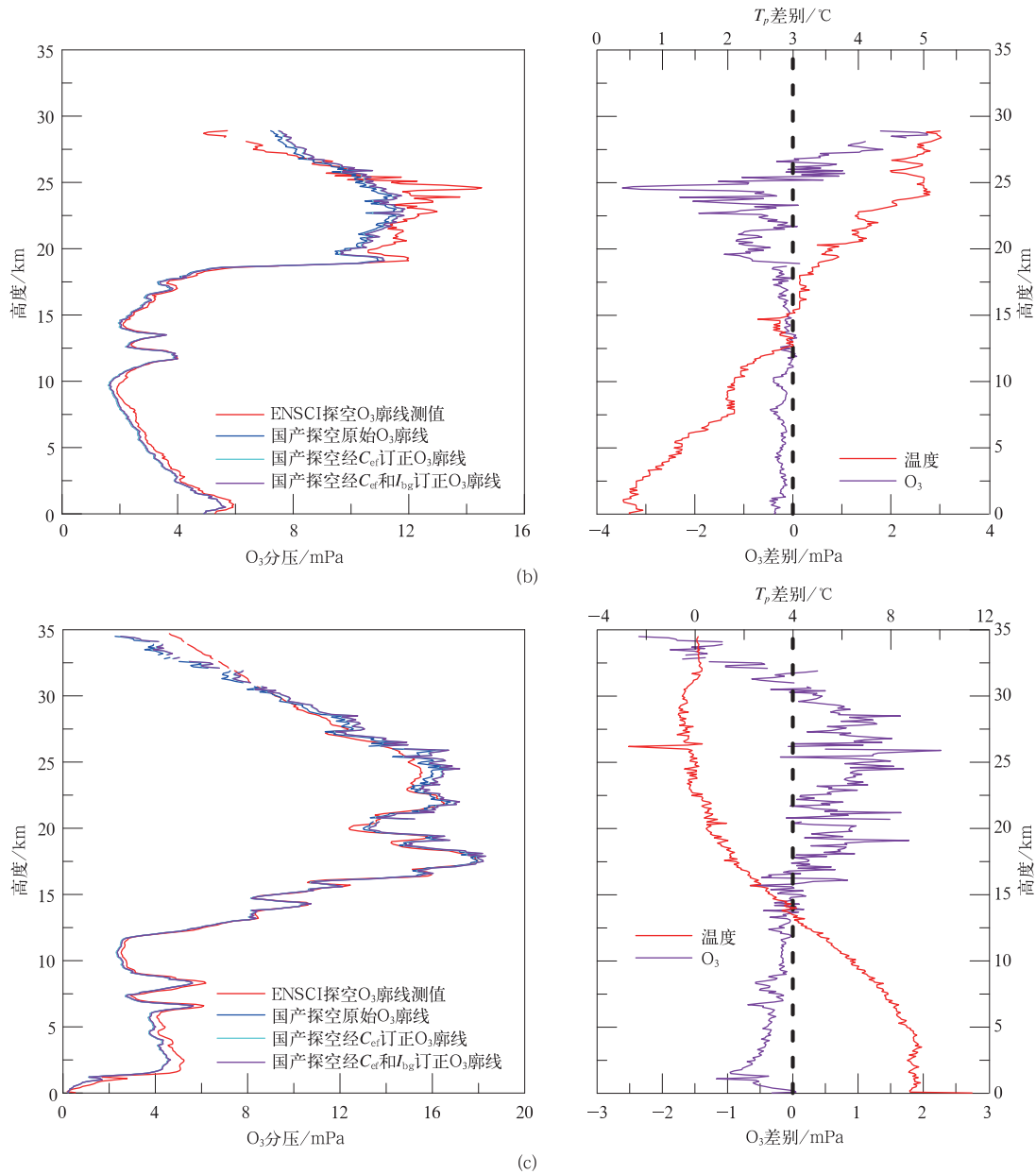
图5 相同型号进口抽气泵下IAP与仪器O<sub>3</sub>测值比较

(左图为O<sub>3</sub>分压廓线,右图为绝对差别廓线)

(a)2013年3月26日,(b)2013年4月2日,(c)2013年4月23日

Fig. 5 Measurements of IAP and imported ozonesonde operated by same type of imported pumps (the left is ozone partial pressure profile, the right is absolute difference profile)

(a)on 26 Mar 2013,(b)on 2 Apr 2013,(c)on 23 Apr 2013



续图 5

O<sub>3</sub> 分压廓线在平流层的振荡现象显然已传递到温度廓线比较中(图 5 右图),但差别在对流层不大。3 月 26 日进口探空仪平流层 O<sub>3</sub> 测值高于 IAP,而在 4 月 2 日则是相反。从 T<sub>p</sub> 温度差别看,它与 O<sub>3</sub> 分压的差别没有明显的统计特征,尽管探空仪包装或温度测量方式导致了 T<sub>p</sub> 测值的差异,但在这 3 次的比较中,O<sub>3</sub> 分压差别在 3 月 26 日、4 月 2 日和 4 月 23 日平均为  $-0.12 \pm 0.28$  mPa ( $-1.44 \sim 0.62$  mPa),  $0.05 \pm 0.7$  mPa ( $-2.36 \sim 2.27$  mPa) 和  $-0.28 \pm 0.78$  mPa ( $-3.4 \sim 2.75$  mPa),平均准确度已满足 IAP O<sub>3</sub> 探空仪的设计要求,而 3 月 26 日和 4 月 2

日的测值差别比 4 月 23 日偏小,很可能与两种 O<sub>3</sub> 探空使用不同的气象探空平台有关。

图 6 是在 RS92 气象探空平台下的 IAP O<sub>3</sub> 探空仪和进口 O<sub>3</sub> 探空仪测量 O<sub>3</sub> 廓线比较情况的 3 个个例。由于 RS92 原始探测数据中没有电化学反应池电流的输出,图中未能给出不包含 I<sub>bg</sub> 订正的 O<sub>3</sub> 廓线,但 IAP O<sub>3</sub> 探空仪原始及经 C<sub>ef</sub> 订正 O<sub>3</sub> 廓线(均含 I<sub>bg</sub> 订正)可以根据式(4)重新确定。由这 3 个个例可以看到,图 3 中的 C<sub>ef</sub> 订正显著地降低了 3 月 13 日国产与进口探空仪 O<sub>3</sub> 测值的差别(3 月 11 日也是如此(图略)),而 3 月 14 日的测值则在



20 km 以上偏多,3月15及18日(图略)则是在15 km 以上测值偏低。与图5相比, $O_3$ 垂直廓线及 $O_3$ 分压差别廓线因为采用了RS92气象探空仪平流层的振荡现象被过滤掉。尽管 $O_3$ 探空仪的包装不同,但采用相同的Vaisala接口电路和温度测量使图6国产与进口探空仪的 $T_p$ 值差别廓线基本上

与图6a和图6c一样(3月11日和18日也基本一样(图略)),也与图5中的3月26日的比较一致。IAP  $O_3$ 探空仪和进口 $O_3$ 探空仪的测值差别主要在20 km 高度以上。IAP  $O_3$ 探空仪抽气泵个体之间的差异又使 $C_{ef}$ 订正效果有所不同。 $T_p$ 差别廓线与图5相比,振荡也不明显。

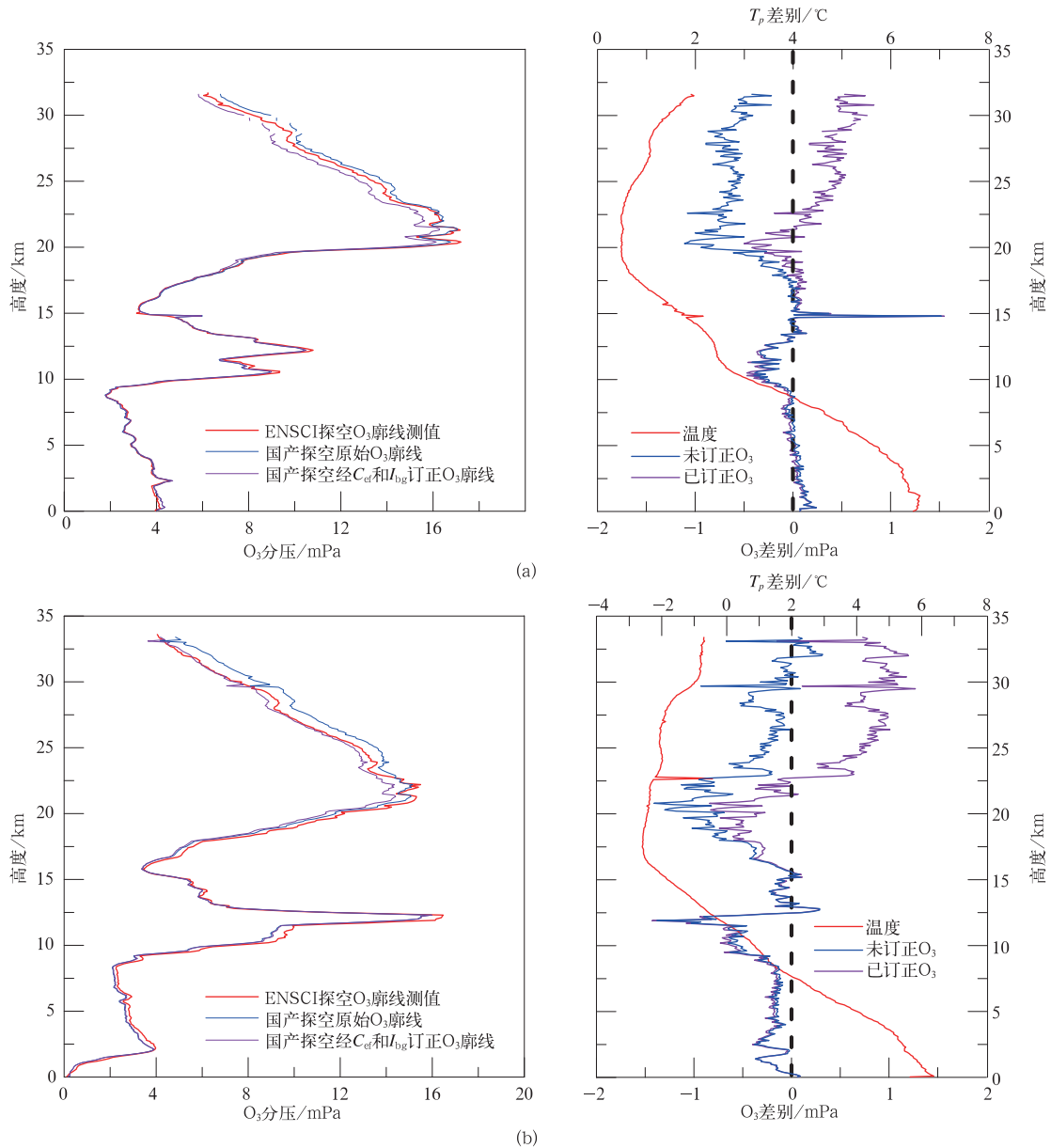


图6 RS92气象探空平台下IAP和进口探空仪 $O_3$ 廓线比较

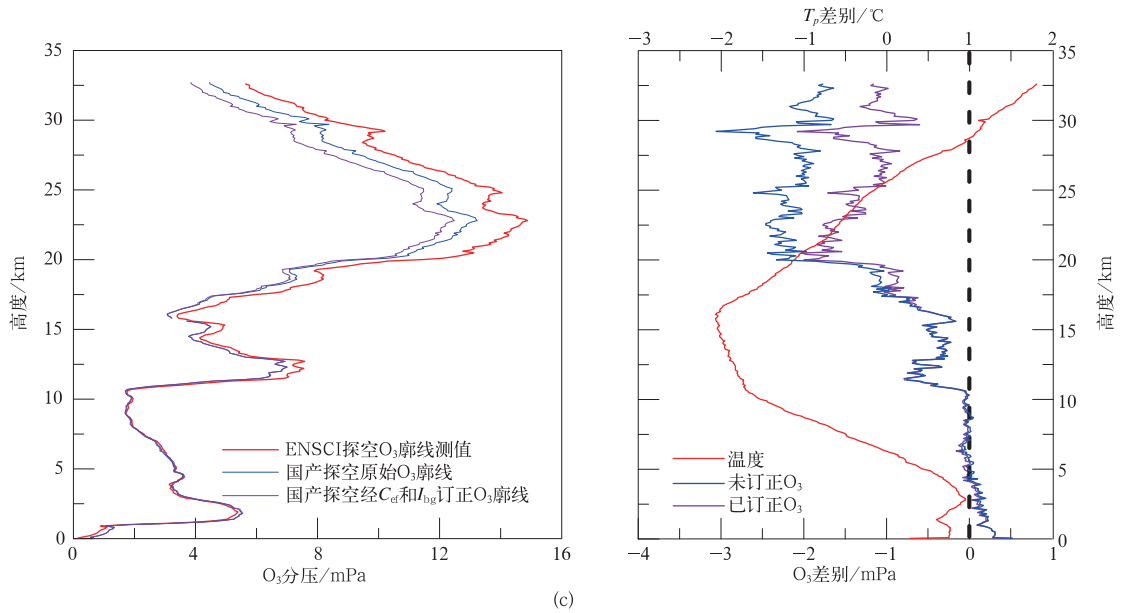
(左图为 $O_3$ 分压廓线,右图为绝对差别廓线)

(a)2013年3月13日,(b)2013年3月14日,(c)2013年3月15日

Fig.6 Measurements of IAP and imported ozonesonde operated by same type of RS92 radiosonde platform

(the left is ozone partial pressure profile, the right is absolute difference profile)

(a)on 13 Mar 2013,(b)on 14 Mar 2013,(c)on 15 Mar 2013



续图 6

图 7 是 2013 年 1 月 15 日和 22 日的 O<sub>3</sub> 测值垂直比较。在这组比较中,IAP O<sub>3</sub> 探空仪和进口 O<sub>3</sub> 探空仪完全不同。由于 IAP 探空数据输出信息比较完整,得出 4 种情形下的 O<sub>3</sub> 探测廓线:IAP 原始 O<sub>3</sub> 廓线,经 C<sub>ef</sub> 订正廓线,经 I<sub>bg</sub> 订正廓线及经 C<sub>ef</sub> 和 I<sub>bg</sub> 共同订正廓线。由图 7 可以看到,IAP 和进口 O<sub>3</sub> 探空仪所测的 O<sub>3</sub> 垂直分布结果比较一致,但由于

缺乏对数据必要的滤波处理,使得 10 km 以上 IAP O<sub>3</sub> 探空仪的 O<sub>3</sub> 廓线及其差别出现振荡。从订正的效果来看,经 I<sub>bg</sub> 订正对平流层 O<sub>3</sub> 廓线影响不大,但 C<sub>ef</sub> 订正后效果在 20 km 高度以上的很明显,其中与图 6 的现象一样,IAP O<sub>3</sub> 探空仪的个体差异使得在 1 月 22 日的 C<sub>ef</sub> 订正效果与 1 月 15 日的差别较大,特别是在 20 km 以上的高度。

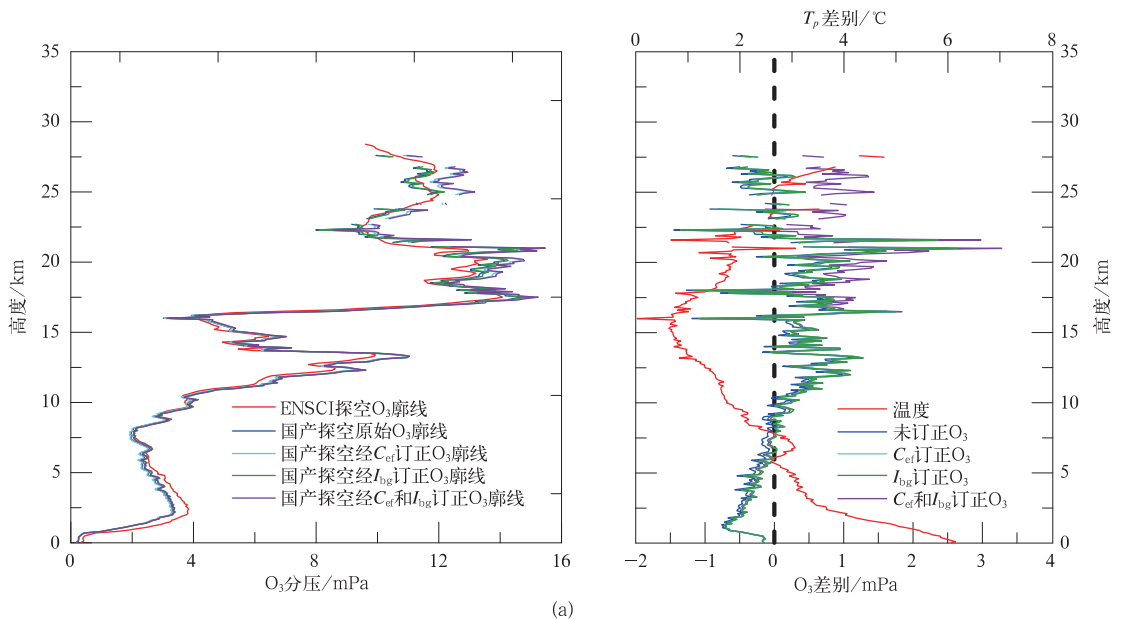
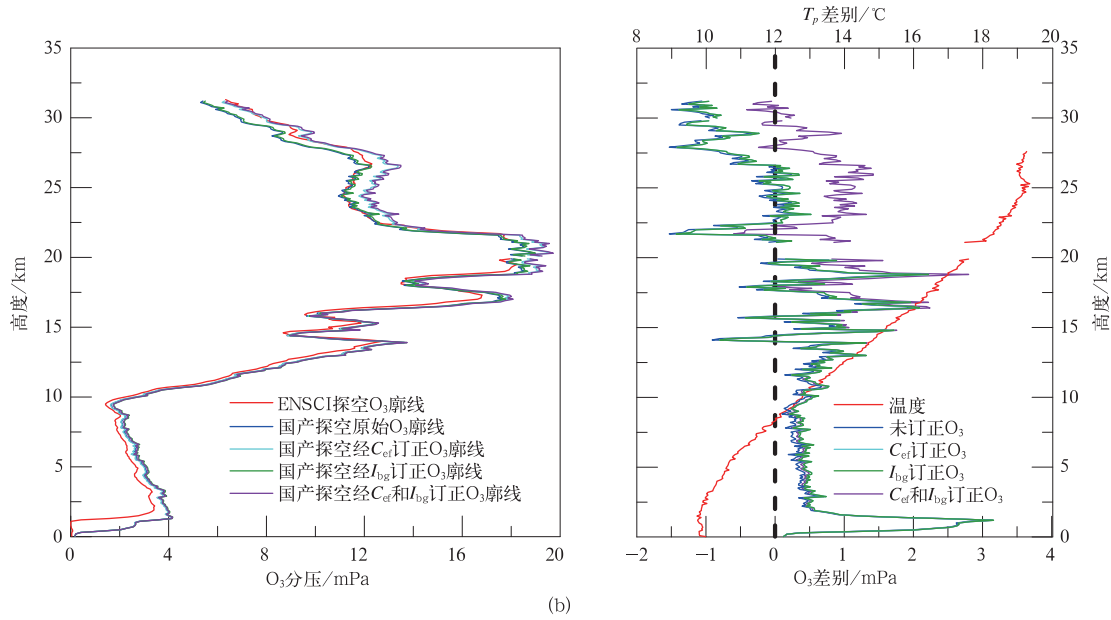


图 7 完全国产与完全进口探空仪 O<sub>3</sub> 测值比较(左图为 O<sub>3</sub> 分压廓线,右图为绝对差别值廓线)  
(a)2013 年 1 月 15 日,(b)2013 年 1 月 22 日

Fig.7 Measurements of domestic and imported ozonesonde operated by completely different pumps and radiosonde platform(the left are the ozone partial pressure profiles,the right is absolute difference profiles)(a)on 15 Jan 2013,(b)on 22 Jan 2013



续图 7

表 3 给出在不同高度范围内 IAP O<sub>3</sub> 探空仪与进口 O<sub>3</sub> 探空仪测值差别统计结果。可以看到,相同的 ENSCI 抽气泵在 IAP O<sub>3</sub> 探空仪使用时,各高度层的 O<sub>3</sub> 测值与进口的相比差别(含标准偏差)较小,特别是近地边界层,整层的平均差别也较小。但

是由于 IAP O<sub>3</sub> 探空仪存在个体稳定性的问题(比如类型 III 的比较),在表 3 中的比较差别的数值被平滑掉,使得整体比较结果的统计特征并不明显;但平均绝对差别未超过 1.0 mPa,而在对流层则在 0.5 mPa 以内。

表 3 各种情形下国产与进口探空仪 O<sub>3</sub> 测值绝对差别的统计(单位:mPa)

Table 3 The ozone partial pressure absolute difference measured by IAP and imported ozonesondes under various situations(unit:mPa)

高度范围	比对类型	原始廓线	C <sub>ef</sub> 订正	I <sub>bg</sub> 订正	C <sub>ef</sub> 及 I <sub>bg</sub> 共同订正
地面~2 km	I (n=2)	-0.08±0.25	-0.08±0.25	-0.07±0.25	-0.07±0.25
	II (n=1)	-0.57±0.33	-0.57±0.33	-0.56±0.32	-0.56±0.32
	III (n=5)	0.14±0.51			0.14±0.51
	IV (n=2)	0.51±1.25	0.50±1.25	0.54±1.24	0.53±1.24
2.1~10 km	I	-0.3±0.14	-0.3±0.14	-0.27±0.14	-0.26±0.14
	II	-0.4±0.21	-0.4±0.21	-0.38±0.21	-0.37±0.21
	III	-0.04±0.27			-0.08±0.27
	IV	0.05±0.32	0.02±0.32	0.15±0.32	0.12±0.32
10.1~25 km	I	-0.49±0.55	-0.37±0.49	0.45±0.55	-0.3±0.49
	II	-0.10±0.40	0.27±0.5	0.14±0.4	0.31±0.50
	III	-0.57±0.33			-0.57±0.33
	IV	0.35±0.58	0.65±0.57	0.46±0.58	0.76±0.57
25 km 以上	I	0.13±0.67	0.48±0.74	0.17±0.68	0.52±0.74
	II	-0.37±1.16	0.03±1.22	-0.33±1.17	0.07±1.23
	III	-1.18±0.80			-0.24±0.86
	IV	-0.61±0.48	0.56±0.48	-0.49±0.48	0.58±0.48
廓线平均	I	-0.32±0.54	-0.21±0.54	-0.17±0.54	0.17±0.54
	II	-0.19±0.71	-0.01±0.77	-0.15±0.71	0.28±0.78
	III	-0.68±0.81			-0.34±0.69
	IV	0.14±0.68	0.43±0.64	0.24±0.67	0.54±0.64

注: I 表示抽气泵和气象探空相同(2013 年 3 月 26 日和 4 月 2 日), II 表示相同抽气泵和不同气象探空(2013 年 4 月 23 日), III 表示相同气象探空平台(2013 年 3 月 11—18 日), IV 表示不同系统(2013 年 1 月 15 日和 22 日)。

## 4 讨论

从室内检测到室外比对观测看, IAP O<sub>3</sub> 探空仪已可以有效测量大气 O<sub>3</sub> 的垂直的分布状况, 但应看到 20 km 高度以上 IAP O<sub>3</sub> 探空仪测值还存在一定偏差。提高 20 km 高度以上的国产 O<sub>3</sub> 探空仪测量精度是以后需要改进的技术方向。

尽管 O<sub>3</sub> 探空仪测值受 NO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 影响主要在近地面边界层, 但目前 O<sub>3</sub> 探空业务观测中并未考虑。NO<sub>2</sub> 对 IAP O<sub>3</sub> 探空仪测值的影响程度与已有类似的测试<sup>[20]</sup> 差异较大需要进一步的测试, 而近地面边界层 NO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 综合对 IAP O<sub>3</sub> 探空仪测值的影响还可考虑通入由不同浓度的 O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 组合的混合气体进行测试研究。

研究表明 C<sub>ef</sub> 测值是关键。在 100 hPa 以上的标准偏差为 4%~16%, 而 C<sub>ef</sub> 也从 100 hPa 的 1.01 变化为 5 hPa 的 1.28, 增加近 27%, 该测值高于 SPC-6A 和 ENSCI-2Z, 这与机械加工的技术有关。但 C<sub>ef</sub> 在实际个体 IAP O<sub>3</sub> 探空仪差异性值得注意。日本气象厅对 C<sub>ef</sub> 采用实际测量而非厂家推荐的经验平均值的办法值得借鉴, 它能最低限度降低因 C<sub>ef</sub> 的个体差异带来的对测值影响<sup>[29]</sup>。由于采用 IAP O<sub>3</sub> 探空仪缺乏对探测数据必要滤波过程, 使 O<sub>3</sub> 层的测值在平流层易出现振荡, 这一现象在 IAP O<sub>3</sub> 探空仪的数据接收和处理过程中应加以改进。

仅凭 10 次外场比对观测得到关于国产 ECC 型 O<sub>3</sub> 探空仪技术性能的结论并不合适, 进口 O<sub>3</sub> 探空仪也不能代表比较的标准。IAP O<sub>3</sub> 探空仪需进一步测试, 应采用类似 JOSIE-1996 的室内测试, 因为只有室内环境模拟舱(低压环境和 O<sub>3</sub> 环境的模拟)中的准确测量才能给出 IAP 探空仪的绝对误差<sup>[2]</sup>。另外, 近几年抽气泵得到有效改进, 每次测试时驱动抽气泵转动的马达电流已稳定在 70 mA 附近, 泵效系数稳定性也应相应提高。

## 5 结论

通过国产 ECC 型 O<sub>3</sub> 探空仪的室内常压下的静态性能技术参数测试和室外比对观测, 可以得到以下结论:

1) 流量  $t$ 、背景电流  $I_{bg}$  与国际同类产品接近, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> 对电化学反应电池测量 O<sub>3</sub> 的干扰影响明

显, SO<sub>2</sub> 使测值降低而 NO<sub>2</sub> 则相反。

2) 泵效订正因子 C<sub>ef</sub> 在 100 hPa 以下的测值稳定在 1.0 附近, 在 100 hPa 以上测值随着气压的降低而增高, 在 10 hPa 增加到 1.17±0.1, 高于国际同类产品(SPC-6A 为 1.055 或 ENSCI-2Z 为 1.064)。

3) 与国际通用的气象探空平台(Vaisala-RS92)兼容, 主要部件抽气泵与进口仪器(ENSC-2Z 或 SPC-6A)均兼容。

4) 在对流层与进口探空仪测值差别较稳定, 平均绝对差别未超过 0.5 mPa; 在平流层则未超过 1.0 mPa。C<sub>ef</sub> 订正降低了平流层国产探空仪 O<sub>3</sub> 测值与进口探空仪之间的差别, IAP O<sub>3</sub> 探空仪抽气泵存在个体差异。

5) 配套于 IAP O<sub>3</sub> 探空仪的气象探空平台在 O<sub>3</sub> 数据的接收和处理过程中, 应考虑增加数据的滤波功能, 降低测量数据在平流层垂直分布中的振荡现象。

致谢: 中国科学院大气物理研究所万小伟高级工程师和颜晓露博士参加了室外比对观测。

## 参考文献

- [1] Komhyr W D. Electrochemical concentration cells for gas analysis. *Ann Geophys*, 1969, 25: 203-210.
- [2] Smit H G J, Kley D. Julich Ozone Sonde Inter-comparison Experiment-1996 (JOSIE-1996). Global Atmosphere Watch Report Series, 1998, No. 130. WMO/TD-No. 926. Geneva: WMO, 38-44.
- [3] StÜbi R, Levrat G, Hoegger B, et al. In-flight comparison of Brewer-Mast and electrochemical concentration cell ozone-sondes. *J Geophys Res*, 2008, 113, D13302, DOI: 10. 1029/2007JD009091.
- [4] 孔琴心, 王庚辰, 刘广仁, 等. 大气 O<sub>3</sub> 垂直分布的电化学测量. *大气科学*, 1992, 16(5): 636-640.
- [5] 王庚辰, 孔琴心, 宣越健, 等. GPS O<sub>3</sub> 和 Vaisala 臭氧探空仪平行施放比对结果的初步分析. *应用气象学报*, 2004, 15(6): 672-680.
- [6] 郑向东, 李伟. 国产臭氧探空仪观测数据质量分析. *应用气象学报*, 2005, 16(5): 608-618.
- [7] 李伟, 赵培涛, 郭启云, 等. 国产 GPS 探空仪国际比对试验结果. *应用气象学报*, 2011, 22(4): 453-462.
- [8] 颜晓露, 郑向东, 李蔚, 等. 两种探空仪观测湿度垂直分布及其应用比较. *应用气象学报*, 2012, 23(4): 433-440.
- [9] 姚雯, 马颖, 高丽娜. L 波段与 59-701 探空系统相对湿度对比分析. *应用气象学报*, 2017, 28(2): 218-226.
- [10] 姚雯, 马颖, 王战, 等. 用数值预报场间接对比新疆两种型号探空系统. *应用气象学报*, 2012, 23(2): 159-166.
- [11] Zhang J Q, Xuan Y J, Yan X L, et al. Development and preliminary

- nary evaluation of a double-cell ozonesonde. *Advances of Atmospheric Science*, 2014, 31(4): 938-947.
- [12] 郑向东, 汤洁, 周秀骥, 等. 拉萨地区 1998 年夏季臭氧总量及垂直廓线的观测研究. *应用气象学报*, 2000, 11(2): 173-179.
- [13] 郑向东, 丁国安, 孙敏锋, 等. 北京冬季低层大气 O<sub>3</sub> 垂直分布观测结果的研究. *应用气象学报*, 2002, 13(增刊 I): 100-108.
- [14] Johnson B J, Oltmans S J, Vömel H, et al. Electrochemical concentration cell (ECC) ozonesonde pump efficiency measurements and tests on the sensitivity to ozone of buffered and unbuffered ECC sensor cathode solutions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, 107(D19): ACH 8-1-ACH 8-18.
- [15] Reid S J, Vaughan G, Marsh A R W, et al. Accuracy of ozonesonde measurements in the troposphere. *J Atmos Chem*, 1996: 25, 215-226.
- [16] Thornton D C, Niazy N. Sources of background current in the ECC-ozonesonde: Implication for total ozone measurements. *J Geophys Res*, 1982, 87: 8943-8950.
- [17] Komhyr W D, Barnes R A, Brothers G B, et al. Electrochemical concentration cellosonde performance evaluation during STOIC 1989. *J Geophys Res*, 1995, 100: 9231-9244.
- [18] Vömel H, Diaz K. Ozone sonde cell current measurements and implications for observations of near-zero ozone concentrations in the tropical upper troposphere. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2010, 3(2): 495-505, DOI: 10. 5194/amt-3-495-2010.
- [19] 田宏民. 国产电化学反应池型 O<sub>3</sub> 探空仪性能测试研究. 成都: 成都信息工程大学, 2014: 17-18.
- [20] Schenkel A, Broder B. Interference of some trace gases with ozone measurements by the KI method. *Atmospheric Environment*, 1982, 16(19): 2187-2190.
- [21] Morris G A, Labow G, Akimoto H, et al. On the use of the correction factor with Japanese ozonesonde data. *Atmospheric. Atmos Chem Phys*, 2013, 13: 1243-1260.
- [22] 2014 年北京市环境状况公报. 北京市环保局, 2015.
- [23] Lin Weili, Xu Xiaobin, Ma Zhiqiang, et al. Characteristics and recent trends of sulfur dioxide at urban, rural, and background sites in North China: Effectiveness of control measures. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(1): 34-49.
- [24] 田宏民, 郑向东, 汤洁, 等. 大气低压模拟舱研制与初步应用. *气象科技*, 2015, 43(1): 30-35.
- [25] 郑向东, 丁国安, 于海青, 等. 十三陵“清洁区”秋季 O<sub>3</sub> 在地面及近地边界层垂直分布变化的探测研究. *中国科学(地球科学)*, 2005, 48(增刊 I): 55-63.
- [26] Smit H G J, Wolfgang S. JOSIE-1998 Performance of the ECC Ozone Sondes of SPC-6A and ENSCI-Z Type. Global Atmosphere Watch Report Series, No. 157. WMO/TD-No. 1218. Geneva: WMO, 2004.
- [27] Smit H G J, Wolfgang S. JOSIE-2000, The 2000 WMO International Intercomparison of Operating Procedures for ECC-Ozone Sondes at the Environmental Simulation Facility at Jülich. Global Atmosphere Watch Report Series, No. 158, WMO/TD2 No. 1225. Geneva: WMO, 2004.
- [28] SPARC-IOC-GAW Assessment of Trends in the Vertical Distribution of Ozone. SPARC report No. 1, WMO Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 43. Geneva: WMO, 1998.
- [29] Tatsumi Nakano, Keisuke Ueno. Development of Automatic Pump Efficiency Measurement System for ozone sonde. Quadrennial Ozone Symposium, Toronto, Canada, 2012.

## Performance Tests and Outdoor Comparison Observations of Domestic Remade ECC Ozonesondes

Zheng Xiangdong<sup>1)</sup> Xuan Yuejian<sup>2)</sup> Lin Weili<sup>3)4)</sup> Tang Jie<sup>3)</sup>

Tian Hongmin<sup>1)5)</sup> Zhang Jinqiang<sup>2)</sup> Xing Yi<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> (Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

<sup>2)</sup> (Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029)

<sup>3)</sup> (Meteorological Observation Center, CMA, Beijing 100081)

<sup>4)</sup> (College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081)

<sup>5)</sup> (Chengdu University of Technology and Information, Chengdu 610225)

### Abstract

The electrochemical concentration cell (ECC) type ozone sonde, developed by Institute of Atmospheric Physics(IAP), Chinese Academy of Sciences(CAS) is tested through indoor basic examinations and outdoor flying comparison observations with imported ECC ozonesondes. Indoor tests for IAP ozone sonde include the sonde background current ( $I_{bg}$ ), the response time and the influences of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> on ozone measurements, and the low pressure pump efficiency ( $C_{ef}$ ). Results show that  $I_{bg}$  is less than 0.1  $\mu$ A and it decreases with the growth of altitude. The response time is 21–26 s. Ozone concentration is much underestimated/overestimated as SO<sub>2</sub>/NO<sub>2</sub> gas is input to the ozone sonde.  $C_{ef}$  is about 1.0 as the atmospheric pressure is more than 100 hPa while it rises with the decrease of atmospheric pressure, reaching  $1.17 \pm 0.10$ – $1.28 \pm 0.16$  as the pressure is 10 to 5 hPa.  $C_{ef}$  of IAP ozonesonde is higher than that of imported products with the value of about 1.055. Outdoor comparison observation shows that IAP and imported ozonesonde have good compatibility in the radiosonde platform and sampling pumps. The ozone vertical profiles from each sonde show generally consistent with each other. The ratio of total ozone measured by IAP ozonesonde to that from Brewer observations is 0.9–1.1. Ozone concentration difference is effectively reduced in the lower stratosphere when  $C_{ef}$  and  $I_{bg}$  of IAP ozonesonde is used. Applications of  $C_{ef}$  and  $I_{bg}$  of IAP ozonesonde contributed to 15 DU and 4–6 DU column ozone. The mean absolute difference of tropospheric ozone partial pressure are stable and its values are less than 0.5 mPa, and the stratospheric difference doesn't exceed 1.0 mPa, although the impact from the pump on IAP ozonesonde is obvious. An international low-pressure environment simulation cabin comparison test is necessary for IAP ozonesonde. The stability of  $C_{ef}$  of this radiosonde system should be improved, and it suggests that filtering algorithm should be added to data depressing (including meteorology and ozone processing) to decrease data oscillations.

**Key words:** IAP ozonesonde; correction of  $C_{ef}$ ; comparison observations