

ZHENG Guanghui, JU Tianzhen, DING Minghu, BIAN Linggen, ZHENG Xiangdong. Validation of the Long-term (1993–2023) Reanalysis of Total Ozone Column and Their Trends at Zhongshan Station in Antarctica (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(1): 86–96. CSTR:32142.14.cjss.2025-0009. DOI:10.11728/cjss2026.01.2025-0009

南极中山站长期 (1993—2023 年) 再分析 臭氧总量地基观测验证及趋势*

郑广惠^{1,2} 巨天珍¹ 丁明虎^{2,3}
卞林根² 郑向东^{2,3}

1(西北师范大学地理与环境科学学院 兰州 730070)

2(中国气象科学研究院 北京 100081)

3(复旦大学 极地海冰气候系统与天气气候教育部重点实验室 上海 200438)

摘要 基于南极中山站 1993—2023 年 Brewer 光谱仪地基观测大气臭氧总量 (Ω), 对再分析数据 MERRA2 和 ERA5 的臭氧总量进行验证、评估和趋势分析. 研究发现, 再分析数据与地基测值在反映南极臭氧洞及臭氧总量季节变化方面是一致的. 日均 MERRA2 和 ERA5 的臭氧总量差异浓度值 ($\Delta\Omega$) 分别为 -2.0 ± 9.6 DU 和 3.2 ± 7.8 DU, 相对差异分布均呈随机特征. 1993—2004 年和 2005—2023 年两个时段的臭氧洞 (地基 $\Omega \leq 220$ DU) 期间, MERRA2 的相对差异百分比 ΔR 均值分别为 $6.9\%\pm 4.6\%$ 和 $-0.4\%\pm 2.3\%$, 而 ERA5 则分别为 $4.6\%\pm 2.0\%$ 和 $6.4\%\pm 3.1\%$; 随着太阳天顶角 θ 的上升, MERRA2 与 ERA5 的 ΔR 在 1993—2004 年分别呈现总体幅度为 3% 和 2% 的上升, 而在 2005—2023 年则分别呈 -2% 下降和 2% 上升; 2005—2023 年的再分析臭氧总量数据质量优于 1993—2004 年. 经 Brewer 光谱仪测值订正后的再分析数据均表现出 Ω 的恢复态势, 其中 ERA5 的恢复速率每 10 年为 1.3 DU. 再分析数据在被地基验证和订正之前应慎用于评估南极大气臭氧总量长期趋势变化. 地基臭氧总量观测时数虽然受太阳天顶角或天气影响而远低于再分析数据, 但对再分析数据的验证是评估臭氧总量长期变化的关键依据.

关键词 臭氧总量, Merr2-TOC, ERA5-TOC, Brewer 光谱仪, 南极中山站

中图分类号 P421.33

Validation of the Long-term (1993—2023) Reanalysis of Total Ozone Column and Their Trends at Zhongshan Station in Antarctica

ZHENG Guanghui^{1,2} JU Tianzhen¹ DING Minghu^{2,3}
BIAN Linggen² ZHENG Xiangdong^{2,3}

* 国家自然科学基金项目 (41775031) 和中国气象科学研究院科技发展基金项目 (2024KJ001, 2023KJ014) 共同资助

2025-01-08 收到原稿, 2025-04-30 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

1(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070)

2(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

3(Key Laboratory of Polar Atmosphere-Ocean-Ice System for Weather and Climate, Ministry of Education, Fudan University, Shanghai 200438)

Abstract Based on the Brewer ozone spectrophotometer long-term (1993—2023) observations at Zhongshan Station, Antarctica, the atmospheric Total Ozone Column (TOC) of the MERRA2 and ERA5 reanalysis are compared, evaluated, and their trends are analyzed. The results show that the reanalysis is generally in good agreement with the ground-based data in the context of occurrence of the ozone hole and the TOC seasonality. The TOC bias (ΔQ) on the daily mean scale is -2.0 ± 9.6 DU and 3.2 ± 7.8 DU for MERRA2 and ERA, respectively. Both the probability distributions of the reanalysis ΔQ exhibit normal random processes and their large variations occurred at the end of March and during the ozone hole period. The reanalysis data were divided into two periods, 1993—2004 and 2005—2023, based on the changes of satellites to which the reanalysis data were assimilated, but the ΔQ values (including ERA5) during the ozone hole increases with decreasing of the TOC in the both periods, and the ΔR values for MERRA2/ERA5 were $6.9\% \pm 4.6\%/4.6\% \pm 2.0\%$ and $-0.4\% \sim 2.3\%/6.4\% \pm 3.1\%$, respectively. The ΔR of MERRA2 and ERA5 show an increasing trend with the Solar Zenith Angle (SZA) during 1993—2004, with each magnitude of 3% and 2%, while the opposite trend is observed from 2005 to 2023, with magnitudes of -2% and 2% for MERRA2 and ERA5, respectively. The quality of reanalysis TOC data from 2005 to 2023 is superior to that from 1993 to 2004. Both the reanalysis TOC data validated by Brewer show their consistent recovery trends of TOC, and the linearly fitted recovery rate of ERA5 is 1.3 DU per decade. The study suggests that raw reanalysis TOC data should be used with much caution before evaluating the long-term trends of the ozone layer, and the data from the ground-based observations, although the number of the data is much less than that of reanalysis outputs due to seasonal SZA or weather conditions, is critical for the reanalysis TOC validation and conclusions of the TOC trend.

Key words Total Ozone Column (TOC), Merr2-TOC, ERA5-TOC, Brewer spectrophotometer, Zhongshan Station in Antarctica

0 引言

20 世纪 80 年代中期发现南极春季臭氧洞以来^[1,2], 已实施了一系列保护臭氧层的措施, 成功遏制了平流层臭氧进一步损耗趋势^[3]. 但当前臭氧层的恢复态势仍比较脆弱, 许多能威胁到臭氧层恢复的因素, 例如森林大火^[4]、火山爆发^[5], 甚至星链卫星老化坠入大气层燃烧后排放物等因素^[6], 均可能造成平流层臭氧的损耗. 研究认为, 2060 年南极臭氧层厚度有望恢复至 1980 年前的水平, 但这一预测仍需要长期、连续的精准观测数据予以验证^[7].

在南极臭氧洞被发现的同期, 中国启动了南极科学考察. 最早在南极长城站利用自制仪器开展了地基臭氧总量 (TOC) 和 NO_2 柱总量观测^[8]; 随后又引进了世界气象组织推荐的 Brewer 臭氧光谱仪, 在南极

中山站 (69.37°S, 76.38°E) 开展长期观测^[9-12]. 1993 年和 2008 年该站先后实施了臭氧探空观测^[13,14], 2009 年又启动了抑制杂散光能力达 10^{-8} 的双光栅 Brewer 光谱仪, 持续开展臭氧总量观测至今. 但中山站与中低纬度地区不同, 后者仅通过白天太阳直射光的观测即可获取全年完整的地基臭氧总量数据, 而中山站需面对近 4 个月 (4 月下旬至 8 月下旬) 太阳天顶角 $\theta \geq 80^\circ$ 的情形, 这对利用白天太阳直射光中紫外波段开展臭氧总量观测极为不利, 同时该波段的星基平台也难以满足南极全年臭氧总量的观测需求^[12]. 因此, 基于紫外、红外和微波波段卫星观测数据同化计算得到的再分析连续臭氧总量数据在一定程度上弥补了地基观测空白时间窗区^[15]. 然而, 卫星观测会因探测器老化、反演算法更新等因素而出现漂移误差从而影响再分析数据的一致性与准确性. 因此, 再分

析数据产品和观测数据之间存在差异,若这种差异存有趋势特征则会进一步影响到基于再分析数据对臭氧层长期变化趋势的判断。

基于自 1993 年起在南极中山站开展的地基臭氧总量观测数据,针对目前应用最广泛的两种再分析数据集——第二现代时代研究与应用回顾性再分析数据集 (MERRA2) 和欧洲中期天气预报中心第五代再分析数据集 (ERA5) 中的臭氧总量数据进行比对与分析,研究再分析 TOC 长期数据的准确性、可靠性及其反映的臭氧层变化趋势。

1 数据

使用的地基臭氧总量数据来自南极中山站 Brewer 光谱仪白天太阳直射光观测的小时平均值。Brewer 光谱仪通过对太阳辐射四个波长 (310.0, 313.5, 317.0, 320.5 nm) 的光谱辐照度观测确定臭氧总量值,数据最高时间分辨率每次可达 3 min。单光栅 Brewer-074 光谱仪因其对杂散光抑制能力有限,观测的太阳天顶角上限为 72° ,而双光栅 Brewer-193 光谱仪观测的太阳天顶角上限提升至 80° 以上^[16,17]。2009—2011 年两台 Brewer 光谱仪并行观测, Brewer-074 观测数据经 Brewer-193 的测值订正^[12],保证了中山站长期地基臭氧总量测值的一致性。

MERRA2 的臭氧总量再分析资料由美国国家航空航天局提供,其数据水平分辨率为 0.5° (纬度) $\times$ 0.625° (经度),垂直分辨率是 73 层,时间分辨率是 1 h。MERRA2 资料是通过三维变分同化卫星观测数据得到的。其中 1980—2004 年的卫星数据来自太阳后向紫外散射 (SBUV) 探测器观测;2004 年 11 月以后则同化了极光 (Aura) 卫星搭载的臭氧监测仪器 (OMI) 的臭氧总量数据以及微波临边探测器 (MLS) 的臭氧廓线^[18]。MERRA2 的臭氧总量值在加拿大的 Eureka 站点 (80.05°N , 86.4°W) 与 Brewer 光谱仪测值相关系数达到 0.99,长期平均差异仅为 1.6%^[15];2000—2020 年,其与 6 台 Brewer 光谱仪的臭氧总量观测标准仪器系统的相对差异保持在 $-2\%\sim 2\%$ 以内^[19]。此外, MERRA2 臭氧总量及臭氧廓线数据还被应用于臭氧在平流层—对流层交换过程的研究^[20,21]。

ERA5 的臭氧总量数据水平分辨率为 $0.25^\circ\times 0.25^\circ$,从地表到 80 km 高度,垂直分辨率为 137 层,

时间分辨率也为 1 h。ERA5 的臭氧总量数据同化了多个卫星数据,包括来自太阳紫外波段、天底观测的大气红外波段的臭氧总量以及 MLS 廓线^[22],同化过程中由于采用了双参数模型,纠正了臭氧总量随太阳天顶角变化而变化的差异,ERA5 的臭氧总量数据整体上比较稳定。值得注意的是,ERA5 并未同化 2000 年以前 SBUV 数据,因为该卫星数据在极地高纬度地区易出现异常高的臭氧总量值^[23],这种现象在 MERRA2 上已体现^[18]。

以中山站为中心,对距离中心点水平距离在 50 km 以内的 MERRA2 或 ERA5 的格点数据进行提取平均为中山站的再分析臭氧总量值。选取太阳天顶角 $\theta\leq 80^\circ$ 时 Brewer 光谱仪 DS 观测小时平均数据与再分析臭氧总量数据比较,在此基础上,再将比较结果转化为日、月或年均值进行分析。MERRA2 或 ERA5 的臭氧总量差异 $\Delta\Omega$ 和相对差异 ΔR 分别表示为

$$\Delta\Omega = \Omega_{\text{ERA5}} - \Omega_{\text{Brewer}}, \quad (1)$$

$$\Delta R = (\Delta\Omega / \Omega_{\text{Brewer}}) \times 100\%. \quad (2)$$

2 结果分析

2.1 臭氧总量整体状况

图 1(a) 给出了 1993—2023 年中山站三种臭氧总量日均值时间序列的比较,图中因极夜或太阳天顶角较高时段则没有 Brewer 测值,虚线为臭氧洞阈值 (220 DU)。从图 1 可见,三组数据呈现的臭氧总量季节变化过程、趋势和特征较一致,且 MERRA2 和 ERA5 的 TOC 值接近 (MERRA2 数据几乎被 ERA5 和 Brewer 光谱仪覆盖)。春季南极臭氧洞的现象的有无在这三组数据均有体现,包括 2019 年因平流层爆发性增温而未出现臭氧洞的情形^[24]。显然,再分析数据在极夜或接近极夜高太阳天顶角情形下,弥补了 Brewer 光谱仪无法提供地基臭氧总量数据的空白,使中山站地区的臭氧总量全年变化过程能够完整呈现。

Brewer 光谱仪与 MERRA2 及 ERA5 散点图的线性拟合分析 (图 1b 和 1c) 表明, Brewer 光谱仪与再分析臭氧总量值线性相关系数高,从图 1(b) 还可以看出,当地基臭氧总量低于 200 DU 时,出现了 MERRA2 值偏高至 260 DU 的异常现象但 ERA5 则没有。

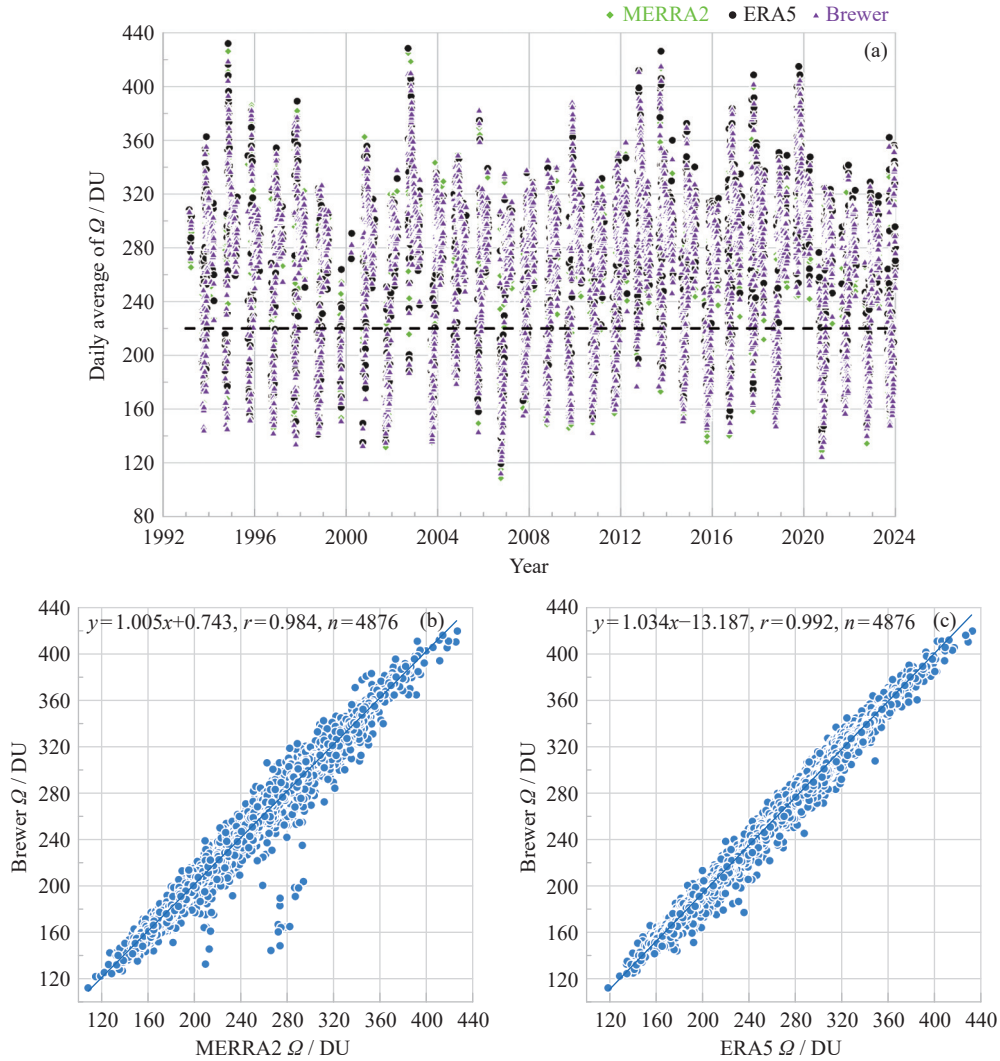


图 1 (a) 1993—2023 年中山站臭氧总量日均值变化, (b) MERRA2 与 Brewer 光谱仪的臭氧总量散点图及线性拟合结果, (c) ERA5 与 Brewer 光谱仪的臭氧总量散点图及线性拟合结果

Fig. 1 (a) Variations of daily mean TOC at Zhongshan station from 1993 to 2023. (b) Scatter plot and linear fitting results of MERRA2 and Brewer's TOC. (c) Scatter plot linear fitting results of ERA5 and Brewer's TOC

图 2 给出的是 MERRA2 和 ERA5 的臭氧总量日均值与 Brewer 光谱仪测值之间的 ΔQ 和 ΔR 的时间序列。从图 2(a) 可以看出, 2004 年之前, MERRA2 的臭氧总量存在 2~3 段异常高值, 对应的 Brewer 光谱仪观测值显示这正处于南极春季臭氧洞期间; 且这三段高值也体现在 ΔR 中 (见图 2b), 其数值均超过了 20% (最高可达 80%), 而通常高值对应的太阳天顶角 $\theta \geq 65^\circ$ 。ERA5 的 ΔQ 与 ΔR 异常高值在 1996 年以前表现较明显; 2013—2015 年及 2022 年出现个别的异常高值, 且 ERA5 的高值同样也集中在臭氧洞期间 (见图 2c); $\Delta R \geq 10\%$ 所对应的 $\theta \geq 70^\circ$ (见图 2d)。

2005 年以后 MERRA2 因同化了新卫星数据, 使得异常差异现象不再出现。而在此之前被同化的 SBUV 平流层臭氧廓线在高太阳天顶角情形下易受气溶胶影响, 1993—1994 年 MERRA2 在臭氧洞期间异常高值应是 1991 年菲律宾皮纳图博火山爆发向全球平流层注射了大量气溶胶所致^[18,25], 但 2001 年的 MERRA2 的异常高值原因未知。相比之下, ERA5 则因同化了不含 SBUV 在内的多种卫星数据, 包括在臭氧洞期间与南极中山站 Brewer 的测值有较好一致性的卫星红外波段的臭氧总量测值^[26]而避免了异常值。此外, 从图 2 还可以看出, 2008 年以后, 当地基臭氧总量处于较低 (基本在 220 DU 以下臭氧洞的情形)

时对应异常高值的太阳天顶角也普遍较高. 这说明低臭氧总量与高太阳天顶角是导致 ΔQ 偏高的主要因素.

MERRA2 和 ERA5 与 Brewer 光谱仪测值的差异整体统计特征分布如图 3 所示. 两者相对差异均呈现显著正态分布, 尽管从图 2(c)(d) 可知 ΔQ 有个别异常的高值. 总体上, MERRA2 有近 1/3 的臭氧总量值比 Brewer 光谱仪的低 2%, 而 ERA5 则比 Brewer 光谱仪高 2% 左右. MERRA2 的 ΔQ 和 ΔR 统计结果分别为 -2.0 ± 9.6 DU 和 $-0.6\% \pm 4.3\%$, 而 ERA5 则对应分别为 3.2 ± 7.8 DU 和 $1.5\% \pm 3.4\%$.

2.2 与 ΔR 变化有关因素

以地基观测为准的大气臭氧总量值和太阳天顶角是影响卫星遥感臭氧总量数据精度重要因素^[12,27],

这种影响会传递到再分析数据上. 从上述结果 (见图 2a 和 2c) 显示, 当地基臭氧总量较低时再分析数据的 ΔQ 幅度变大. 臭氧洞期间, 臭氧总量值在较小尺度内因为极地涡旋的快速变化而变化, 再分析数据难以准确捕捉到此变化全过程. 因此, ΔQ 和 ΔR 值在臭氧洞期间的变化幅度较显著 (见图 4), MERRA2 和 ERA5 的 ΔQ 值在 3 月底 (儒略日 90 天附近) 和 8 月底至 11 月 (儒略日约 240~300 天附近) 期间变化幅度较大, 而对应的臭氧总量测值基本上均在 250 DU 以下.

以 Brewer 光谱仪的臭氧总量值为自变量, 考虑到 MERRA2 的臭氧总量在 2005 年前后分别同化了不同卫星数据的事实, 图 5 给出了 1993—2004 年

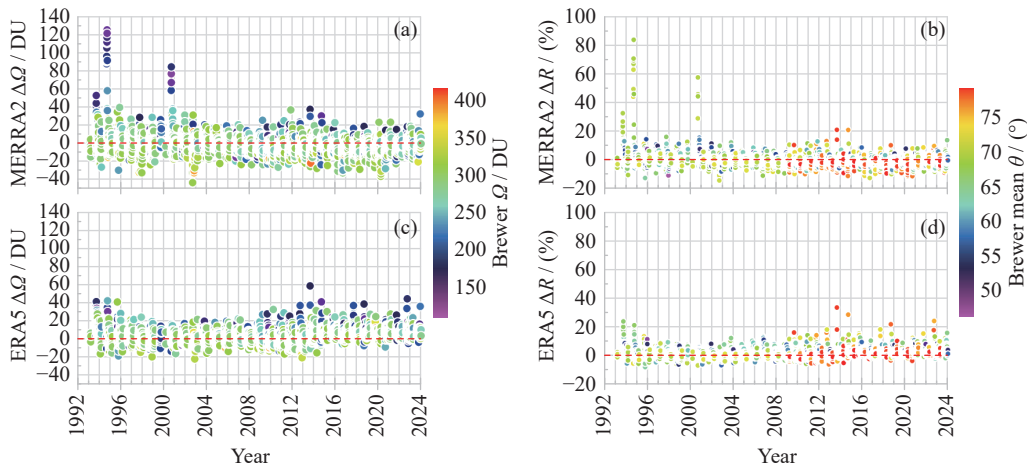


图 2 1993—2023 年 MERRA2 和 ERA5 的 ΔQ 和 ΔR 日均时间序列

Fig. 2 Time series of daily mean of ΔQ and ΔR for MERRA2 and ERA5 during 1993–2023

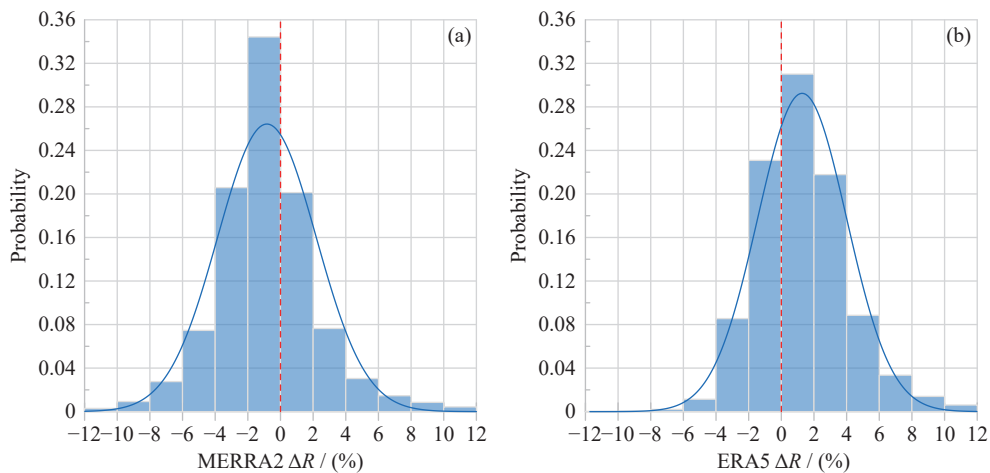
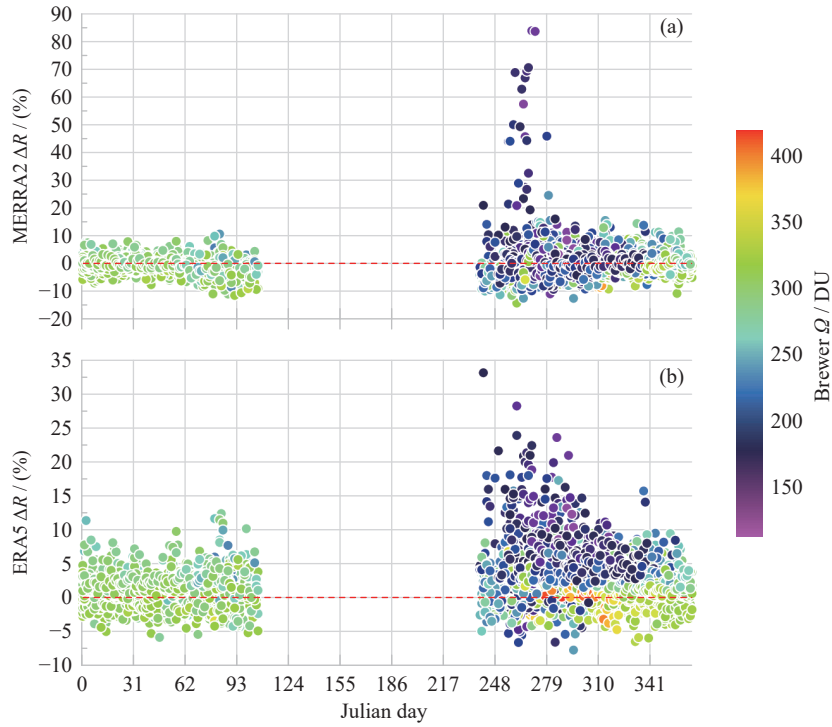


图 3 MERRA2 和 ERA5 ΔR 的概率分布

Fig. 3 ΔR probability distribution of MERRA2 and ERA5

图4 MERRA2 和 ERA5 日均 ΔR 随季节分布变化Fig. 4 Daily average ΔR of MERRA2 and ERA5 changes with seasonal distribution

(图 5a) 和 2005—2023 年 (图 5b) 两个时期 MERRA2 和 ERA5 的 ΔTOC 作为地基 TOC 测值的函数关系统计分布特点. 图 5 中 Brewer 光谱仪的臭氧总量值是从 120 DU 以下及 120~440 DU 区间, 每隔 20 DU 的统计分析. 1993—2004 年臭氧洞期间 MERRA2 的 ΔR 为 3.6%~14.5%, 平均为 $6.9\% \pm 4.6\%$; ERA5 的 ΔR 为 2.6%~7.6%, 平均为 $4.6\% \pm 2.0\%$. 两种 ΔR 随地基臭氧总量变化态势基本一致. 当地基 $\Omega \geq 260$ DU 时, MERRA2 的 ΔR 为 $-1.4\% \sim 3.0\%$, 平均为 $0.3\% \pm 1.5\%$; ERA5 的 ΔR 为 $-0.9\% \sim 3.4\%$, 平均为 $0.6\% \pm 1.4\%$.

2005—2023 年被同化的卫星数据更换后, MERRA2 的 ΔR 值在臭氧洞期间下降至 $-0.4\% \sim 2.3\%$, 平均值为 $-0.07\% \pm 1.4\%$. 实际上, 当地基臭氧总量在 160~420 DU 时, MERRA2 的 ΔR 值稳定在 $0 \sim -2\%$; 仅在地基 $\Omega \geq 420$ DU 后, ΔR 迅速下降至 -4% . 而 ERA5 的 ΔR 值在臭氧洞期间最高可达 10% 左右; 当地基臭氧总量测值在 120 DU 以下时, ΔR 最低也在 2.9%, 平均值为 $6.4\% \pm 3.1\%$; 但是当地基臭氧总量在 300~380 DU 之间时, $\Delta\Omega$ 也稳定在零线附近; 而当地基臭氧总量在 300 DU 以下时, $\Delta\Omega$ 随着地基臭

氧总量下降而上升. 非臭氧洞期间, MERRA2 的 ΔR 值变化范围在 $-0.72\% \sim -3.11\%$ 之间, 平均值为 $-1.47\% \pm 0.7\%$, 而 ERA5 的 ΔR 则在 $-0.37\% \sim 2.63\%$ 之间, 平均值为 $0.84\% \pm 1.0\%$.

图 6 给出了 1993—2004 年和 2005—2023 年 MERRA2 和 ERA5 的 ΔR 随太阳天顶角 θ 变化情况. 2004 年之前, 由于 Brewer-074 观测受太阳天顶角的限制, 仅给出 $\theta \leq 72^\circ$ 的分析结果. 由图 6(a) 可以看出, 1994—2004 年的 MERRA2 和 ERA5 的 ΔR 随太阳天顶角的增加而呈现上升趋势, MERRA2 的 ΔR 从太阳天顶角在 47.5° 的 -0.5% 上升至 72.5° 附近的 3%. 其中, 太阳天顶角从 $55^\circ \sim 60^\circ$ 上升至 $70^\circ \sim 75^\circ$ 时, ΔR 变化幅度高达 2.1%; ERA5 的 ΔR 则是在 $0 \sim 1.9\%$ 之间变化. 再分析数据的 ΔR 与 θ 间均存在微弱依赖性.

图 6 (b) 显示了 2005—2023 年期间太阳天顶角在 $75^\circ \sim 80^\circ$ 之间的 ΔR 变化结果. 可以看出, MERRA2 和 ERA5 的 ΔR 整体上仍存在对太阳天顶角的微弱依赖趋势, 但 ΔR 值随太阳天顶角的变化控制在较小的范围之内, 比 1993—2004 年结果更优. MERRA2 的 ΔR 趋向低值仅在 $-0.5\% \sim -1.5\%$ 之间变化,

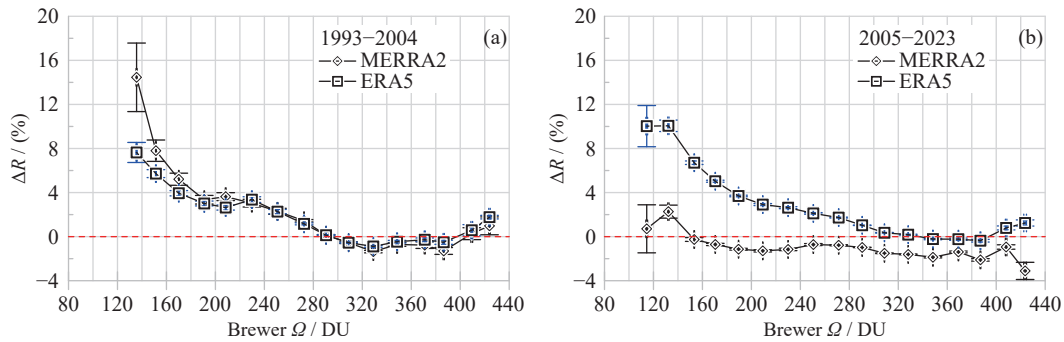


图 5 1993—2004 年和 2005—2023 年 MERRA2 和 ERA5 的 ΔR 随 Brewer 光谱仪测得的臭氧总量值的变化

Fig. 5 Variation of ΔR of MERRA2 and ERA5 with TOC measured by Brewer during 1993—2004 and 2005—2023

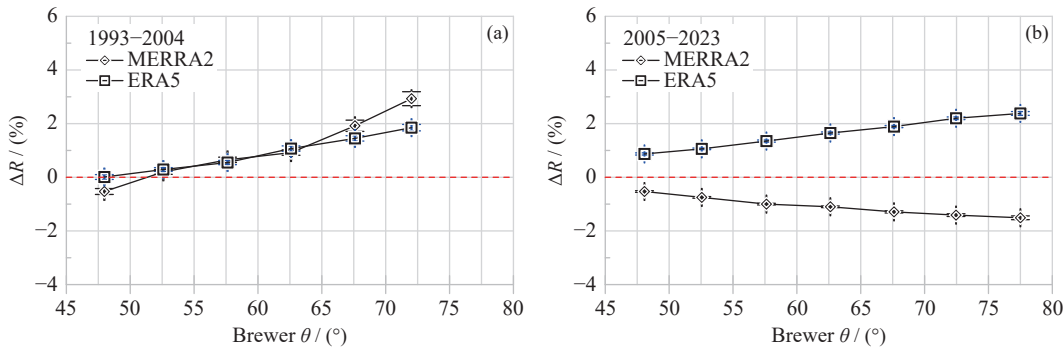


图 6 MERRA2 和 ERA5 的 ΔR 随地基太阳天顶角值的变化

Fig. 6 Variation of ΔQ of MERRA2 and ERA5 with ground-based SZA

而 ERA5 趋向低值也仅在 0.8%~2.4% 之间变化; 但 MERRA2 的 ΔR 范围仅在 -0.5%~-2% 之间, 而 ERA5 的 ΔR 则在 1%~2% 之间。

2.3 长期趋势比较分析

MERRA2 和 ERA5 的 ΔQ 日均值 (图 2b 和 2d) 所反映的一些趋势特征在月均值上表现更为明显 (见图 7)。从图 7 中 ΔR 的拟合曲线可以看出, 在 1996 年之前, 再分析的 ΔR 偏高, 最高接近 16%。MERRA2 的 ΔR 在 1996 年以后基本在 -4%~4% 之间变化, 而平均值 (实线为多项式拟合均值) 说明了 1996—2004 年平均 ΔR 接近零值参考线。2005 以后 ΔR 则开始偏低, 这可能与其同化的 OMI 卫星臭氧总量数据有关: SBUV 的臭氧总量采用 TOMS 8.0 Version 反演算法; 而 Aura OMI 的臭氧总量则采用了 TOMS 8.6 反演算法, 算法的更替使 OMITOC 值系统略低^[25], 在图 7(a) 中体现为 2004 年之后的 ΔR 逐渐趋于负值, 但 MERRA2 的 ΔR 在 2016 年以后个别月份平均值下降至 -6% 的原因未知。1996—2012 年 ERA5 平均 ΔR 维持在几乎接近于零参考线附近,

2012 年以后则呈现增加趋势但均值未超过 3% (个别月份接近 8%)。ERA5 的臭氧总量偏高现象与 1996—2015 年个别卫星臭氧总量值高于 Brewer 光谱仪测值 2.6%~4% 是一致的^[12], 但在 2012 年以后呈现上升趋势的原因不明。

图 7 中 ΔR 随时间变化的趋势特征会影响仅基于再分析数据对南极中山站臭氧总量趋势的判断, 从而影响对南极臭氧层恢复与否的判断。首先看臭氧洞的趋势特征 (见图 8a)。从图中可以看出, 30 个年度的臭氧洞期间臭氧总量值变化在 ERA5 和 Brewer 光谱仪数据中均呈现微弱的恢复态势, 但 MERRA2 因 1993—1994 年有异常高值则呈现明显下降趋势。

这里将中山站再分析臭氧总量数据分成两个时段, 即 1993—2004 年和 2005—2023 年。将两个时段内再分析数据臭氧总量按地基 Brewer 光谱仪小时平均测值划分为臭氧洞和非臭氧洞两种情形, 并分别建立各自与地基测值的线性拟合关系, 再根据拟合结果对再分析臭氧总量值进行订正^[28], 进而比较臭氧总量的变化趋势, 结果如图 8(b)(d) 所示。图 8 中方框里

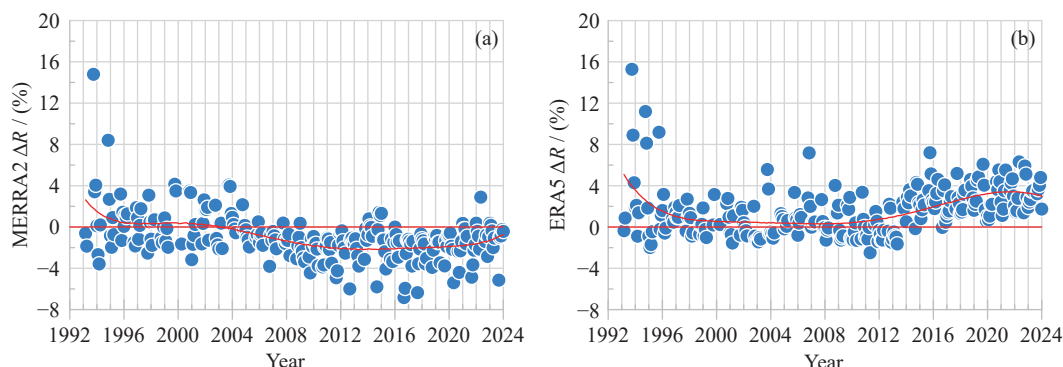
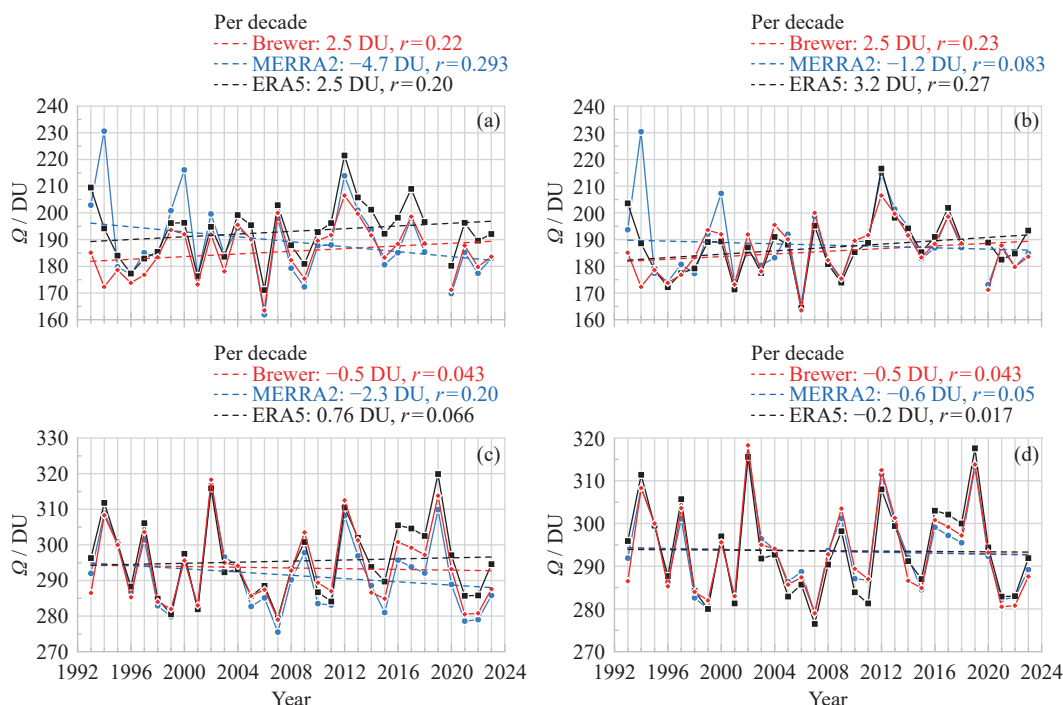
图 7 MERRA2 和 ERA5 的 ΔR 月均值时间序列Fig. 7 Monthly mean time series of ΔR of MERRA2 and ERA5

图 8 1993—2023 年南极中山站 Brewer 光谱仪, MERRA2 和 ERA5 年均臭氧总量的变化及线性拟合趋势比较.

(a) 原始臭氧总量数据呈现的臭氧洞趋势, (b) Brewer 观测数据及订正再分析臭氧总量数据呈现臭氧洞趋势, (c) 同 (a) 但为非臭氧洞趋势, (d) 同 (c) 但为非臭氧洞趋势

Fig. 8 Comparison of yearly mean TOC variations and their linearly fitted trends of Brewer, MERRA2 and ERA5 at Zhongshan Station, Antarctica from 1993 to 2023. (a) Ozone hole trends with raw TOC data, (b) ozone hole trends with validated reanalyzed and TOC data of Brewer, (c) as same as (a) but for non-ozone hole trends, (d) as same as (b) but for non-ozone hole trends

数值对应斜率 (恢复速率) 和相关系数. 从图 8(b) 可见, 在臭氧洞期间, 经校正后, ERA5 的臭氧总量与 Brewer 光谱仪测值相同, 仍呈恢复态势 (速率分别为每 10 年 2.5 DU 和 3.2 DU), 而 MERRA2 的下降率从每 10 年的 -4.7 DU 下降到 -1.2 DU, 仍呈下降态

势, 但统计特征较不明显 ($r = 0.083$).

由图 8(c)(d) 非臭氧洞期间的臭氧总量趋势比较可以看出, 订正前 ERA5 的臭氧总量趋势较不明显, 没有统计显著性; 从斜率来看, ERA5 与 Brewer 光谱仪反映的臭氧总量长期变化趋势是相反的, 只有

MERRA2 的臭氧总量值下降趋势仍较明显, 这可能与图 7 (a) 中的 MERRA2 的臭氧总量值在 2005 年之后偏低有关. 由图 8(d) 可以看出, 校正后的 ERA5 和 MERRA2 的臭氧总量值在非臭氧洞期间的长期趋势也不明显.

研究表明, 南极臭氧层出现了积极恢复信号^[29-31]. Zhang 等^[12] 通过比较 Brewer 光谱仪与卫星的观测数据, 发现 1996—2015 年南极中山站臭氧层出现了微弱的恢复信号. 上述分析表明, 当再分析 TOC 数据样本数与 Brewer 光谱仪测值样本数相同时, MERRA2 并未表现出期盼的臭氧层恢复态势, 而在非臭氧洞期间三种臭氧总量数据的统计趋势特征也不明显.

再分析数据的优势是小时均值、连续性完整, 而 Brewer 光谱仪受天气和太阳天顶角影响, 一年中获取的有效臭氧总量测值还不到再分析数据的 1/3, 因此, 若仅依靠 Brewer 光谱仪的臭氧总量测值评估南极中山站臭氧总量的变化趋势, 样本数少的劣势会使其不能准确反映年均尺度上的臭氧层趋势特征. 因为在非臭氧洞期间 (4 月上旬至 8 月上旬), Brewer 光谱仪基本上没有臭氧总量数据.

图 9 给出了 MERRA2 和 ERA5 全年臭氧洞和非臭氧洞期间已校正和未校正的臭氧总量年均值及其在 1993—2023 年的趋势. 与图 8 相比, 图 9 中每年度的臭氧洞与非臭氧洞的臭氧总量值样本数之和

均为 8760 h (或闰年 8784 h). 从图 9(a) 可以看出, 即使样本数增加, 但 MERRA2 未经 Brewer 光谱仪测值订正的臭氧总量值在过去 30 年臭氧洞期间整体趋势仍较不明显 (每 10 年 -0.5 DU, $r = 0.05$), 而经过订正的臭氧总量值呈现为明显的恢复态势 (每 10 年 4.1 DU, $r = 0.42$). 非臭氧洞期间, 臭氧总量恢复趋势 (每 10 年 3.2 DU, $r = 0.33$) 较明显, 而订正后的恢复速率则上升至每 10 年 4.7 DU. 对于 ERA5 来说, 如图 9(b) 所示, Brewer 光谱仪的订正效果使 ERA5 在这两个时期的臭氧总量恢复速率均略有降低. 臭氧洞期间, 速率从未订正的每 10 年 1.6 DU 下降到 1.3 DU; 非臭氧洞期间则从每 10 年 2.3 DU 下降到 1.3 DU. 由于 ERA5 的臭氧总量数据同化了多种卫星数据, ERA5 的臭氧总量数据的趋势质量应优于 MERRA2, 尤其是在 2005 年以前尤为明显. MERRA2 的臭氧总量数据在 1993—2004 年和 2005—2023 年呈现前高后低的特征, 经 Brewer 光谱仪测值校准后, 其臭氧总量数据则是前高值降低, 而后低值升高, 恢复态势随之改变.

需说明的是, 本文地基 Brewer 光谱仪的臭氧总量数据仅在 $\theta \leq 80^\circ$ (1993—2004 年 $\theta \leq 72^\circ$) 情形下获取的白天太阳直射光测值. 图 9 中被订正的再分析臭氧总量数据并未包含秋冬季期间对应的地基观测数据订正信息, 随着对 Brewer 光谱仪的其他观测

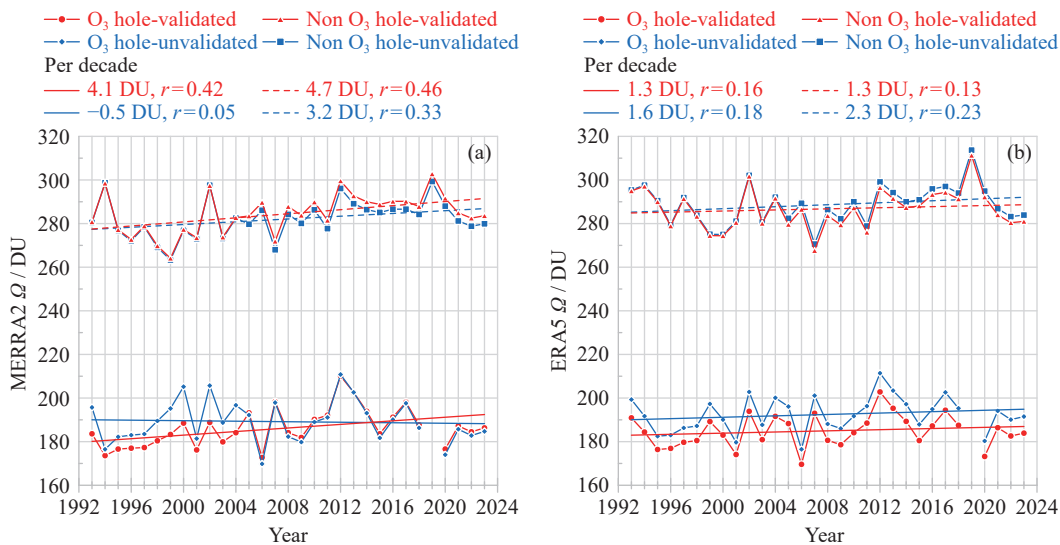


图 9 1993—2023 年再分析数据年均臭氧总量值在中山站臭氧洞 ($Q \leq 220$ DU) 和非臭氧洞 ($Q > 220$ DU) 期间的趋势比较

Fig. 9 Yearly mean reanalysis TOC trends during the ozone hole ($Q \leq 220$ DU) and non ozone hole ($Q > 220$ DU) periods at Zhongshan Station from 1993 to 2023

(例如聚焦月光或太阳) 臭氧总量数据质量的进一步了解^[32], 后续可开展秋冬季再分析臭氧总量数据质量评估, 有望更合理、准确地研判中山站再分析臭氧总量数据的长期变化趋势。

3 结论

(1) 南极中山站 MERRA2 和 ERA5 再分析臭氧总量数据与地基测值较一致, 包括臭氧洞的展现及臭氧总量季节特征。参考 Brewer 光谱仪日均测值, MERRA2 的 ΔQ 和 ΔR 值分别为 -2.0 ± 9.6 DU 和 $-0.6\% \pm 4.3\%$, 而 ERA5 的 ΔQ 和 ΔR 值则分别为 3.2 ± 7.8 DU 和 $1.5\% \pm 3.4\%$ 。

(2) MERRA2 和 ERA5 个别 ΔR 值在 3 月和臭氧洞期间均呈现大幅度变化, 幅度分别在 $-30\% \sim 100\%$ 以上和 $-30\% \sim 50\%$ 。臭氧洞期间, MERRA2/ERA5 的 ΔR 在 1993—2004 年和 2005—2023 年中均值分别为 $6.9\% \pm 4.6\%/4.6\% \pm 2.0\%$ 和 $-0.4\% \sim 2.3\%/6.4\% \pm 3.1\%$, 而在非臭氧洞期间, 对应均值分别为 $0.3\% \pm 1.5\%/0.6\% \pm 1.4\%$ 以及 $-1.47\% \pm 0.7\%/0.84\% \pm 1.0\%$ 。1993—2004 年 MERRA2 和 ERA5 的 ΔR 均值随太阳天顶角的上升而上升, 幅度变化分别为 3% 和 2%; 2005—2023 年两者随太阳天顶角值上升而呈现趋势相反, MERRA2 从 -0.5% 下降至 -1.5% , 而 ERA5 则从 0.8% 上升至 2.4% 。

(3) MERRA2 和 ERA5 的 ΔQ 均有长期特征。MERRA2 (EAR5) 在 2005 年以后臭氧总量测值分别系统地低 (高) 于地基臭氧总量值。MERRA2 和 ERA5 的臭氧总量数据不宜直接用来做南极地区臭氧总量长期趋势评估分析。

(4) Brewer 光谱仪长期的地基臭氧总量测值对再分析数据校正较重要, 校正后的 MERRA2 和 EAR5 再分析臭氧总量值均表明了中山站地区的臭氧层均处于微弱的恢复趋势, 而 ERA5 的臭氧总量数据在 2005 年之前因未出现类似于 MERRA2 的异常高值, 其恢复速率每 10 年为 1.3 DU 也较为合理。

致谢 中国南极科学考察队对中山站地基 Brewer 光谱仪的长期连续观测给予了关键性的支持。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突。

参考文献

[1] CHUBACHI S. Preliminary result of ozone observations at

Syowa station from February 1982 to January 1983[J]. *Memoirs of National Institute of Polar Research*, 1984, **34**: 13-19

[2] FARMAN J C, GARDINER B G, SHANKLIN J D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction[J]. *Nature*, 1985, **315**(6016): 207-210

[3] KESSENICH H E, SEPPÄLÄ A, RODGER C J. Potential drivers of the recent large Antarctic ozone holes[J]. *Nature Communications*, 2023, **14**(1): 7259

[4] OHNEISER K, ANSMANN A, KAIFLER B, et al. Australian wildfire smoke in the stratosphere: the decay phase in 2020/2021 and impact on ozone depletion[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, **22**(11): 7417-7442

[5] EVAN S, BRIOUDE J, ROSENLOF K H, et al. Rapid ozone depletion after humidification of the stratosphere by the Hunga Tonga Eruption[J]. *Science*, 2023, **382**(6669): eadg2551

[6] FERREIRA J P, HUANG Z Y, NOMURA K I, et al. Potential ozone depletion from satellite demise during atmospheric reentry in the era of mega-constellations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, **51**(11): e2024GL109280

[7] DHOMSE S S, KINNISON D, CHIPPERFIELD M P, et al. Estimates of ozone return dates from Chemistry-Climate Model initiative simulations[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(11): 8409-8438

[8] MAO Jietai. Measurement of the O_3 and NO_2 column abundance at the Great Wall Station Antarctica[J]. *Meteorological Monthly*, 1989, **15**(12): 3-7 (毛节泰. 南极长城站大气臭氧和 NO_2 的观测研究 [J]. 气象, 1989, **15**(12): 3-7)

[9] ZHOU Xiuji, ZHENG Xiangdong, LU Longhua, et al. Ground based measurements of column amounts of ozone and UV-B over Zhongshan station, Antarctica, in the 93 “ozone hole” [J]. *Antarctic Research*, 1994, **6**(4): 14-22 (周秀骥, 郑向东, 陆龙骅, 等. 1993 年中山站地区“臭氧洞”和 UV-B 的特征分析 [J]. 南极研究, 1994, **6**(4): 17-25)

[10] ZHENG Xiangdong, ZHOU Xiuji, LU Longhua, et al. Observational study on the Antarctic “ozone hole” at Zhongshan station in 1993[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1994, **40**(6): 533-535 (郑向东, 周秀骥, 陆龙骅, 等. 1993 年中山站南极“臭氧洞”的观测研究 [J]. 科学通报, 1994, **40**(6): 533-535)

[11] ZHENG Xiangdong, LU Longhua, ZHOU Xiuji. A study on the 6-year observation of the spring ozone depletion at Zhongshan station, Antarctica[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 1999, **11**(4): 265-274 (郑向东, 陆龙骅, 周秀骥. 近六年中山站春季臭氧低值的观测结果分析 [J]. 极地研究, 1999, **11**(4): 265-274)

[12] ZHANG Lei, ZHENG Xiangdong, BIAN Lingen. Comparison of long-term total ozone observations from space- and ground-based methods at Zhongshan Station, Antarctica[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, **47**(11): 2013-2024. (张雷, 郑向东, 卞林根. 南极中山站卫星臭氧总量与地基长期测值的对比分析 [J]. 中国科学: 地球科学, 2017, **47**(11): 1371-1382. DOI: 10.1360/N072017-00054)

[13] KONG Qinxin, LIU Guangren, WANG Gengchen. Observations and analyses of atmospheric ozone over antarctic

- Zhongshan station in the spring of 1993[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1996, **20**(4): 395-400 (孔琴心, 刘广仁, 王庚辰. 1993年春季南极中山站上空大气臭氧的观测分析[J]. *大气科学*, 1996, **20**(4): 395-400)
- [14] BIAN Ling, LIN Zhong, ZHANG Dongqi, *et al.* The vertical structure and seasonal changes of atmosphere ozone and temperature at Zhongshan station over east Antarctica[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, **41**(12): 262-270 (卞林根, 林忠, 张东启, 等. 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): 262-270)
- [15] ZHAO X Y, BOGNAR K, FIOLETOV V, *et al.* Assessing the impact of clouds on ground-based UV-visible total column ozone measurements in the high Arctic[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, **12**(4): 2463-2483
- [16] SCARNATO B, STAEHELIN J, STÜBI R, *et al.* Long-term total ozone observations at Arosa (Switzerland) with Dobson and Brewer instruments (1988-2007)[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, **115**(D13): D13306
- [17] ZHAO X Y, FIOLETOV V, CEDE A, *et al.* Accuracy, precision, and temperature dependence of Pandora total ozone measurements estimated from a comparison with the Brewer triad in Toronto[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, **9**(12): 5747-5761
- [18] WARGAN K, LABOW G, FRITH S, *et al.* Evaluation of the ozone fields in NASA's MERRA-2 reanalysis[J]. *Journal of Climate*, 2017, **30**(8): 2961-2988
- [19] ZHAO X Y, FIOLETOV V, BROHART M, *et al.* The world Brewer reference triad – updated performance assessment and new double triad[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, **14**(3): 2261-2283
- [20] WANG M C, FU Q. Stratosphere-troposphere exchange of air masses and ozone concentrations based on reanalyses and observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, **126**(18): e2021JD035159
- [21] WANG M C, FU Q, HALL A, *et al.* Stratosphere-troposphere exchanges of air mass and ozone concentrations from ERA5 and MERRA2: annual-mean climatology, seasonal cycle, and interannual variability[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2023, **128**(24): e2023JD039270
- [22] HERBACH H, BELL B, BERRISFORD P, *et al.* The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, **146**(730): 1999-2049
- [23] HERBACH H, DE ROSNAY P, BELL B, *et al.* Operational Global Reanalysis: Progress, Future Directions and Synergies with NWP[R]. ERA Report Series No.27. Reading: ECMWF, 2018. DOI: 10.21957/tkic6g3wm
- [24] YAMAZAKI Y, MATTHIAS V, MIYOSHI Y, *et al.* September 2019 Antarctic sudden stratospheric warming: quasi-6-day wave burst and ionospheric effects[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(1): e2019GL086577
- [25] BHARTIA P K, MCPETERS R D, FLYNN L E, *et al.* Solar Backscatter UV (SBUV) total ozone and profile algorithm[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, **6**(10): 2533-2548
- [26] HU Xiaoxin, LU Longhua, ZHANG Fengying, *et al.* Retrieval of total ozone from TOVS data and its comparison with brewer observations in Antarctic spring[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 1996, **7**(4): 437-442 (胡筱欣, 陆龙骅, 张凤英, 等. 南极春季臭氧的 TOVS 反演及其与 Brewer 观测的比较[J]. *应用气象学报*, 1996, **7**(4): 437-442)
- [27] MCPETERS R D, LABOW G J. An assessment of the accuracy of 14.5 years of Nimbus 7 TOMS version 7 ozone data by comparison with the Dobson network[J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, **23**(25): 3695-3698
- [28] ZHENG Xiangdong, WEI Xiaoli. Long term total ozone comparisons between space based and ground based observations at 4 sites in China[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2010, **21**(1): 1-10 (郑向东, 韦小丽. 中国 4 个地点地基与卫星臭氧总量长期观测比较[J]. *应用气象学报*, 2010, **21**(1): 1-10)
- [29] HASSLER B, DANIEL J S, JOHNSON B J, *et al.* An assessment of changing ozone loss rates at South Pole: twenty-five years of ozonesonde measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, **116**(D22): D22301
- [30] CHIPPERFIELD M P, BEKKI S, DHOMSE S, *et al.* Detecting recovery of the stratospheric ozone layer[J]. *Nature*, 2017, **549**(7671): 211-218
- [31] STONE K A, SOLOMON S, KINNISON D E, *et al.* On recent large Antarctic ozone holes and ozone recovery metrics[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(22): e2021-GL095232
- [32] ZHENG Guanghui, JU Tianzhen, DING Minghu, *et al.* Comparison analysis of ground-based total ozone observations under high solar zenith angle at Zhongshan Station, Antarctica[J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in press), 2025 (郑广惠, 巨天珍, 丁明虎, 等. 南极高太阳天顶角下地基臭氧总量观测比较分析[J]. *气象学报*, 2025)

作者简介



郑广惠 1997年4月出生,理学硕士,西北师范大学地理与环境科学学院,主要从事大气探测研究。

E-mail: 631782338@qq.com



巨天珍(通信作者) 女,1965年8月出生,西北师范大学地理与环境科学学院环境科学与工程系教授,硕士生导师,主要从事环境科学和生态学方面的教学和研究工作。

E-mail: Jutianzhen@nwnu.edu.cn