

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.03.002

南极臭氧柱总量的时空变化特性与影响因素分析

唐超礼¹, 郝德卫^{1*}, 魏圆圆², 戴聪明³, 魏合理³

(1 安徽理工大学电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001;

2 安徽大学互联网学院, 安徽 合肥 230039;

3 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 利用大气本底站监测数据验证了大气红外探测仪 (AIRS) 反演数据 (2003年3月—2021年2月), 在此基础上基于 AIRS 数据分析了南极臭氧柱总量时空分布以及变化特性, 并进而利用线性回归、相关性分析、小波分析等方法, 结合平流层温度和海冰数据, 分析了南极臭氧柱总量变化特征的影响因素。结果表明: AIRS 反演数据与大气本底站监测数据的相关系数均在 0.945 以上, 具有较高的准确度和平稳性。南极臭氧柱总量的时间变化具有很强的周期性, 谷值与谷值交替约为 12 个月。通过小波时-频结合分析发现, 南极臭氧柱总量明显存在时间尺度为 2、4、6、8~10、13 年的周期, 其中震荡最剧烈的第一主周期 13 年又以 10 年为周期变化, 第二主周期 6 年又以 4 年为周期变化, 2003—2021 年内第一主周期经历了 2 次高-低变化期, 第二主周期经历了 4 次高-低变化期。臭氧柱总量随季节变化明显, 春季是南极臭氧柱总量最高的季节, 冬季、夏季、秋季依次次之。南极臭氧的空间分布特征差异较大, 总体来看纬度越高, 臭氧柱总量越低, 并在 85° S 附近达到最低值。南极洲大部分区域平流层温度与臭氧柱总量呈显著正相关, 统计结果显示当平流层温度小于 189 K 时会出现臭氧洞; 南极海冰范围与南极臭氧柱总量变化基本一致, 两者皆存在 2、6~8、12~14 年的变化周期, 但海冰范围变化要早一个月。

关键词: 南极; 臭氧柱总量; 小波分析; 平流层温度; 海冰范围

中图分类号: P421.32

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)03-201-013

Temporal and spatial characteristics and influencing factors of total ozone column in Antarctic

TANG Chaoli¹, HAO Dewei^{1*}, WEI Yuanyuan², DAI Congming³, WEI Heli³

(1 Institute of Electrical & Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2 School of Internet, Anhui University, Hefei 230039, China;

3 Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: The inversion data of Atmospheric infrared sounder (AIRS) from March 2003 to February 2021 were verified using the base data of Global Atmosphere Watch (GAW), and then based on AIRs data, the

基金项目: 国家重点实验室专项基金资助项目 (201909), 安徽高校自然科学研究重点项目 (KJ2019A0103), 国家重点研发计划课题 (2019YFA0706004)

作者简介: 唐超礼 (1980-), 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事大气数据与信息技术研究。E-mail: chltang@mail.ustc.edu.cn

收稿日期: 2021-11-22; **修改日期:** 2022-01-09

***通信作者.** E-mail: 2604264228@qq.com

spatial and temporal distribution and variation characteristics of the total ozone column in Antarctica were analyzed. Moreover, combined with stratospheric temperature and sea ice data, linear regression, correlation analysis, wavelet analysis and other methods were performed to identify the key factors affecting the total ozone column in Antarctica. The results show that the correlation coefficient between AIRS inversion data and atmospheric watch station monitoring data is more than 0.945, indicating the high accuracy and stability of AIRS inversion data. The temporal variation of the total column of ozone in Antarctica has an obvious periodicity, with valley-valley alternating for about 12 months. The wavelet time-frequency analysis shows that the total amount of ozone column in Antarctic has obvious cycles with time scales of 2 years, 4 years, 6 years, 8-10 years and 13 years. Among them, the first main 13-year cycle with the most severe oscillation changes has a 10-year cycle, and the second main 6-year cycle has a 4-year cycle. From 2003 to 2021, the first main cycle experienced two high-low periods, and the second main cycle experienced four high-low periods. Furthermore, it is found that the total ozone column varies significantly with seasons, with spring being the season with the highest total ozone column in Antarctica, followed by winter, summer, and autumn. And there is a quite difference of the spatial distribution characteristics of ozone in Antarctica among seasons. Generally, the total ozone column decreases with the increase of the latitude, and reaches the bottom value near 85° S. The total column of ozone in most parts of Antarctica is significantly positively correlated with the stratospheric temperature, and the statistical results show that there will be an ozone hole when the stratospheric temperature is less than 189 k. The change of Antarctic sea ice extent is basically correlated with that of the total Antarctic ozone column, and both of them have a change cycle of 2 years, 6-8 years and 12-14 years, but the change of sea ice is one month earlier.

Key words: Antarctic; total ozone column; wavelet analysis; stratospheric temperature; sea ice extent

0 引言

南极是指 60° S 以南地区, 其 95% 以上区域被浮冰或冰雪覆盖, 常年气温低下, 气候极其恶劣^[1]。由于其独特的地理环境, 南极地区受人类活动的影响微乎其微, 其大气成分对全球气候变化极其敏感, 因此南极地区臭氧柱总量时空变化特性研究对了解全球大气活动有着重要的意义。臭氧是大气中氧气吸收了太阳光中波长小于 185 nm 的紫外线后生成的一种淡蓝色气体, 约 90% 分布在高度为 10~50 km 的大气平流层, 约 10% 分布在对流层中^[2-4]。平流层的臭氧主要吸收高空紫外辐射, 在对大气起增温作用的同时保护生物免于辐射污染^[5,6]。近年来, 随着全球温室效应以及其他臭氧消耗物对臭氧层威胁的日益加剧, 全球臭氧问题成为科学界、公众、政府聚焦的重要话题^[7]。

随着国内外对臭氧的关注日益增长, 越来越多的学者对臭氧进行观测与研究。张雷等^[8]利用南极中山站 Brewer 光谱仪验证大气红外探测仪 (AIRS) 第六版温度和臭氧垂直廓线产品, 结果表明卫星反演的值相比光谱仪测量值偏高; 郑向东等^[9]利用 1992—1993 年间中国南极科考期间的地面臭氧观测数据对南极地区臭氧柱总量的变化进行全方位的研究, 结果表明 60° S~ 90° S 臭氧柱总量平均值在逐渐减少, 尤其在南极点损耗

最剧烈; 陆龙焯等^[10]利用 1999—2000 年中国首次北极考察和第 16 次南极考察走航期间获得的臭氧资料, 给出了地面臭氧随纬度的变化和高、中、低纬度地区臭氧柱总量的日变化特征; McPeters 等^[11]利用 76 个臭氧光谱仪测量资料与臭氧观测仪 (OMI) 数据进行对比, 发现 OMI-TOMS 和 OMI-DOAS 资料分别比地基观测资料平均高 0.4% 和 1.1%, 这与张雷等^[8]所得结论相同; Balis 等^[12]通过地基资料与 OMI 数据进行比对, 得出 OMI-TOMS 与 OMI-DOAS 的精度偏差都非常小, 并且 OMI-TOMS 具有较高的整体质量, 对太阳天顶角或纬度没有显著依赖性。

为了在研究中进一步了解臭氧柱总量变化特性, 必须得到精准、稳定的数据, 目前全球臭氧总量的观测手段主要有卫星、地基以及探空观测等^[13-15]。要想获得高精度的数据, 往往采用探空仪进行探测, 但由于南极极端的恶劣天气, 探空仪的精度会受其影响, 因此想在南极得到现场长期观测数据几乎不现实。而利用 AIRS 对南极臭氧时空分布的多源遥感监测解决了地面测量的局限性, 较好地获得了大范围臭氧柱总量长时间序列数据^[16-18]。之前研究臭氧柱总量时空分布特征局限于数据量小、时间序列短。本研究根据 AIRS V6 级 2003 年 3 月—2021 年 2 月期间长时间序列数据分析了臭氧时空分布特性, 并结合平流层温度、海冰范围数据分析了影响南极臭氧柱总量变化因素。

1 资料和方法

1.1 数据来源

1) 采用 AIRS 反演的臭氧数据对南极臭氧柱总量进行分析。AIRS 仪器搭载在美国国家航空航天局 (NASA) 地球观测系统 (EOS) Aqua 卫星上, 该卫星于 2002 年 5 月 4 日发射, 主要提供整个对流层内的温度、臭氧、长波辐射通量和一氧化碳混合体积比等大气参数^[19]。目前 AIRS 数据包括 V5、V6 和 V7 三个版本^[20], 本研究所分析数据为 2003 年 3 月—2021 年 2 月全球范围 V6 版本 Level-3 臭氧数据 (<http://old-cdc.cma.gov.cn/satellite/subject.jsp?product=AIRS>), 主要研究南极区域的经纬度范围为 60° S~90° S, 180° W~180° E, 数据空间分辨率为 1°×1°。

2) 海冰范围数据。南极 95% 以上区域被浮冰覆盖, 地形较为独特。为了研究海冰范围与南极臭氧柱总量之间的相关性, 从美国海冰数据中心 (<http://nsidc.org/data/G02135>) 下载 2003 年 3 月—2021 年 2 月的海冰范围数据, 利用 IDL 编程重新提取并且配合 AIRS 反演数据使用。

1.2 研究方法

1.2.1 线性回归分析

线性回归法用来描述南极臭氧柱总量与平流层温度之间的变化趋势, 一元回归方程表示为

$$y = ax + b, \quad (1)$$

式中 y 是南极臭氧柱总量; x 表示平流层温度序列; a 表示线性变化率, 其绝对值大小反映了变化速率大小, 当 $a > 0$ 时, 表明两者之间呈现正相关且呈增强趋势; 当 $a < 0$ 时, 两者之间呈现负相关且呈减弱趋势。通过相关系数 R 检验相关性的强弱, 验证变化趋势的可靠性。

1.2.2 Pearson 相关性分析

皮尔逊相关分析法是指对可能存在相关联系的变量进行分析, 并在分析之后通过计算得出变量之间的相关程度。对于变量 x 和 y , 其相关系数 r_{xy} 可以表示为

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2)$$

式中 n 为研究的样本总量, x_i, y_i 为第 i 对样本, \bar{x}, \bar{y} 为两个变量样本均值。 r_{xy} 的取值范围是 $[-1, 1]$, 当 $0 < r_{xy} < 1$ 时, 表明 x 和 y 呈正相关; 当 $-1 < r_{xy} < 0$ 时, 表明 x 和 y 呈负相关, 并且 $|r_{xy}|$ 越大, 表示 x 和 y 之间关系越紧密。但由于样本相关系数具有一定的随机性, 它能否说明总体的相关程度往往同样本容量有一定关系, 所以需要对相关系数进行显著性检验。本研究主要通过皮尔逊相关分析法验证 AIRS 数据与大气本底站数据, 并对 AIRS 反演的臭氧柱总量与平流层温度和海冰数据的相关性进行分析, 进而讨论影响南极臭氧柱总量变化的因素。

1.2.3 小波分析

南极臭氧柱总量长时间序列容易受其他因素的影响, 属于非平稳序列, 因此从时域上分析无法得到时间序列的变化趋势, 周期性、随机性、多时间尺度嵌套会影响对非平稳时间序列的研究。Morlet 小波从时-频结合的角度清晰地反映时间序列中隐藏的多周期, 能对短期未来趋势进行预测。此外, 通过对南极臭氧柱总量时间序列的消噪和滤波、周期成分的识别、多时间尺度的分析等进行研究, 从而在频域上更直观得到时间序列的周期性。

1.3 数据验证

为了验证 AIRS 数据的准确性, 将研究所需的 AIRS 数据与多个大气本底站数据 (GAW) 进行逐月均值对比, GAW 数据来源于 NOAA (National Aeronautics and Space Administration) 的地球系统研究实验室 (ESRL) 的官方网站 (<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/dv/data/index.php?category=Ozone>)。由于主要研究南极臭氧数据, 所以选用南半球三个站点来验证 AIRS 数据准确性。选择的站点分别为美属萨摩亚 (SMO) 站点 (14.25° S, 170.56° W)、澳大利亚珀斯 (PTH) 站点 (31.92° S, 115.96° E)、新西兰劳德 (LAU) 站点 (45.04° S, 169.68° E)。AIRS 对应经纬度的月平均值数据与 SMO 本底站、PTH 本底站、LAU 本底站数据的皮尔逊相关系数分别为 0.9586、0.9461、0.9785。选取 AIRS 南极臭氧数据与三个本底站监测数据逐月对比并进行相关性分析, 结果如图 1 所示。TotO3 代表臭氧柱总量, 单位为多布森 (DU)。由此可以得出选用的 AIRS 臭氧柱总量数据精度较高并且有很强的可靠性。

2 南极臭氧柱总量的时空变化

2.1 南极臭氧柱总量的时间变化

2.1.1 南极臭氧柱总量年际变化

臭氧柱总量受自然和人为因素影响相对剧烈, 为了更好地研究南极臭氧柱总量在一年中的变化趋势, 选取了 2003 年、2006 年、2009 年、2012 年、2015 年以及 2020 年进行研究。由图 2 (a) 可以看到, 南极臭氧柱总量在全年的大部分时间都高于 220 DU, 在一定程度上表现为“V”型, 1—10 月, 臭氧柱总量持续下降, 谷值位于 9 月和 10 月, 其原因可能是北半球的冬季是南半球的夏季, 在冬至日附近, 南半球存在极昼天气, 太阳光子对臭氧的光解离, 造成臭氧柱总量减少。图 2 (b) 显示了 2003 年 3 月—2021 年 2 月期间共 216 个月逐月平均值

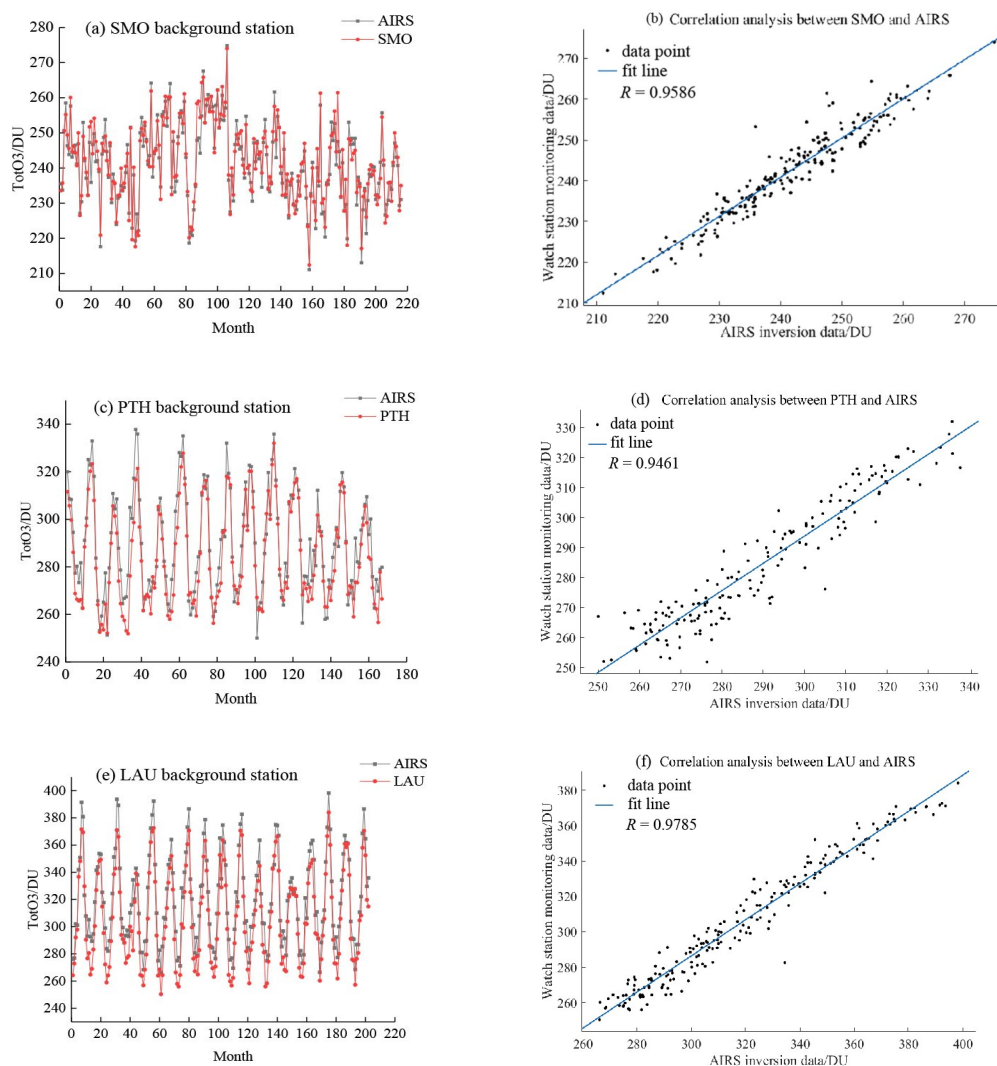


图 1 AIRS 数据与本底站观测数据逐月比较及相关性分析。(a)、(b) 萨摩亚; (c)、(d) 珀斯; (e)、(f) 劳德

Fig. 1 Monthly comparison and correlation analysis between AIRS data and watch station monitoring data.

(a), (b) SMO; (c), (d) PTH; (e), (f) LAU

的南极臭氧柱总量变化特性, 可以看出周期性变化明显并且变化幅度大, 臭氧柱总量峰值和谷值交替的周期约为 12 个月, 谷底出现在每年的 10 月左右。南极臭氧柱总量出现周期性的变化, 原因可能是太阳活动和准两年震荡的调制以及臭氧层的破坏与恢复。对年内臭氧柱总量分析结果可以得出: 2012 年大多数月份的南极臭氧柱总量均较常年偏高, 其原因可能是一方面是自 1987 年《蒙特利尔公约》的签订导致破坏臭氧层的氟氯烃浓度正在减少; 另一方面 2012 年南极的低温区域比以往年份减少, 难以形成“极地平流层云”, 抑制了臭氧分子与部分化合物的反应, 尤其是 9 月和 10 月, 变化幅度超过 20 DU。

为了研究南极臭氧柱总量的变化规律, 其最好的办法是研究其周期变化。图 3 为 2003—2021 年南极臭氧柱总量的小波分析。由图可以看出, 南极臭氧柱总量存在多重周期的嵌套组合, 即在特定时间段上的周期是变化的。由图 3 (a) 可看出, 南极臭氧柱总量明显存在时间尺度为 2、4、6、8~10、13 年的周期。由图 3 (b) 可看出有 4 个明显的峰值, 这些峰值对应的时间尺度为 4、6、10、13 年, 在这些时间尺度中, 13 年尺度对应的峰

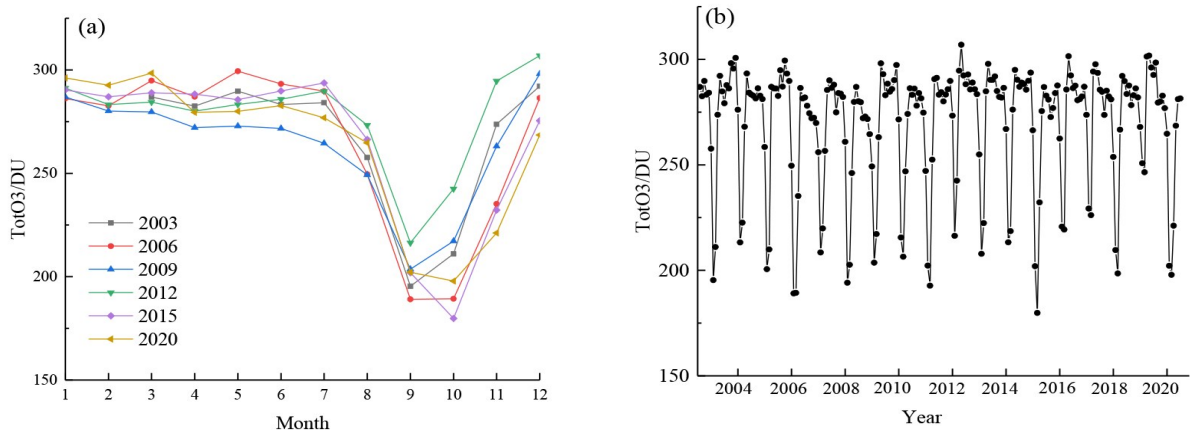


图2 2003年3月—2021年2月南极臭氧柱总量月平均值折线图。(a) 不同年际逐月平均变化; (b) 216个月逐月变化

Fig. 2 Broken line chart of monthly average of total ozone column in Antarctica from March 2003 to February 2021. (a) Monthly mean variation of Antarctica in different years; (b) monthly change over 216 months

值最大,说明南极臭氧柱总量变化13年周期最明显,为南极臭氧柱总量变化的主周期;6、4、10年尺度变化明显程度依次变弱。图3(c)为小波系数模值对应时间尺度分布图,其中小波系数模值越高,表明对应时间尺度周期性越强。由图可以看出,南极臭氧柱总量变化过程中,13年周期的模值最高,其时间尺度变化最明显,其次为4年周期模值,其余不明显。图3(d)为小波系数模方对应时间尺度分布图,小波模方即能量谱密度,其值越大,说明对应时间尺度震荡周期越明显。由图可以看出,13年周期的震荡周期最剧烈,但具有局部性(2006年前)。

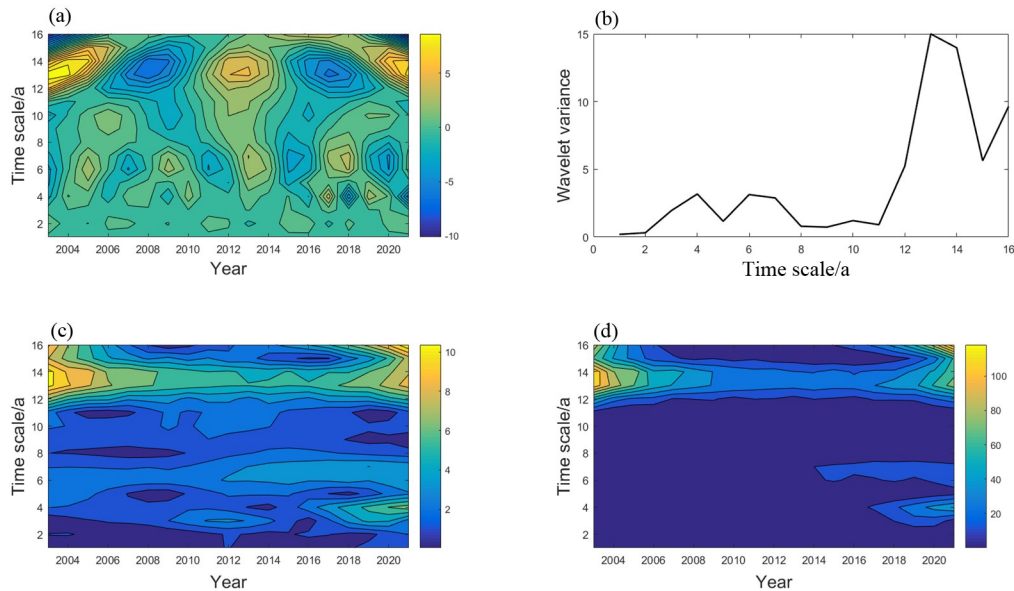


图3 2003—2021年南极臭氧柱总量小波分析。(a) 小波实部; (b) 小波方差; (c) 小波模值; (d) 小波模方

Fig. 3 Wavelet analysis of total ozone column in Antarctica from 2003 to 2021. (a) Wavelet real part graph; (b) wavelet variance; (c) wavelet modulus; (d) wavelet modulus square

进一步分析多尺度特征对南极臭氧柱总量的影响,选取第一周期和第二周期作多尺度特征对应的小波

系数图,如图4所示。大体来看,不同的时间尺度对应不同的变化周期以及高低变化特征。图4(a)表明,13年第一主周期对应的南极臭氧柱总量变化周期约为10年,2003—2021年大约经历了2个高-低变化期。图4(b)显示6年第二主周期对应的南极臭氧柱总量变化周期约为4年,2003—2021年大约经历了4个高-低变化期。

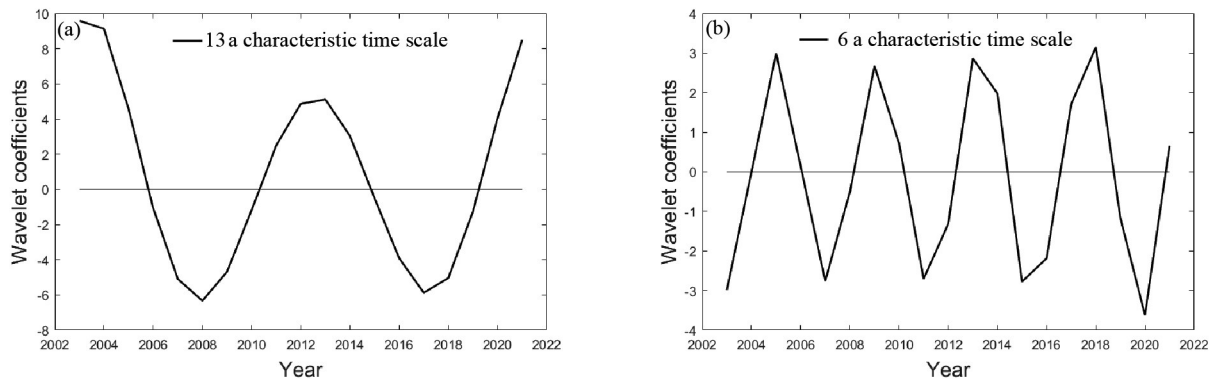


图4 2003—2021年多尺度特征变化。(a)第一主周期;(b)第二主周期

Fig. 4 Multiscale characteristic changes from 2003 to 2021. (a) First main cycle; (b) second main cycle

2.1.2 南极臭氧柱总量季节变化

进一步分析南极臭氧柱总量季节分布特征,按季节将一年分为3—5月(春季)、6—8月(夏季)、9—11月(秋季)、12月—次年2月(冬季)。图5为南极臭氧柱总量四季分布趋势。由图可知,2003年3月—2021年2月南极臭氧柱总量的季节变化明显,空间分布随纬度变化明显。春季南极臭氧柱总量均值最高,冬季、夏季次之,秋季的臭氧柱总量均值最低。具体来看,纬度越高,臭氧柱总量均值越低;纬度越低,均值越高。春季,南极大部分区域的臭氧柱总量均值位于280~320 DU之间,低值区出现在高纬度区。夏季,随着平流层温度降低,南极臭氧柱总量有所下降。秋季,臭氧柱总量降低至最低值,大部分南极区域的臭氧柱总量均值低于260 DU,低值区仍在高纬度地区,高值区出现在低纬度地区。

2.2 南极臭氧柱总量空间分布

图6(a)是2003年3月—2021年2月全球臭氧柱总量经纬度分布。由图可以看到:全球臭氧柱总量低值主要分布在南极和赤道附近。赤道附近对流层温度比平流层温度高,这种温度差导致对流层几乎不含臭氧的空气上升,稀释了平流层的臭氧,从而导致赤道附近的臭氧柱总量低。而在南极,极地涡旋的存在阻挡了从中纬度向极地的臭氧输送,并且极低温加速了极地平流层云的产生,然而极地平流层云很大程度上消耗了臭氧总量,这种正反馈机制造成南极臭氧柱总量大量减少出现低值^[21]。相比之下,由于南极的冰原地表,导致南极极低温产生的极涡远比北极强大,北极未出现这种情况。不同纬度的臭氧柱总量变化受地表类型(陆地或海洋)和自然因素影响相对剧烈。图6(b)为2003年3月—2021年2月全球臭氧柱总量随纬度变化趋势。由图可以看出,在南极范围内,臭氧柱总量随纬度的升高而减少,其原因可能是中低纬地区平流层光化学反应过程产生的臭氧被大气环流输送到高纬度,这种极向环流随着纬度的升高而减弱,并在85° S附近臭氧柱总量达到最低值,最低值为250 DU左右。

根据上图6的全球臭氧柱总量分布特征,进一步对南极臭氧柱总量的空间分布进行分析。图7(a)为

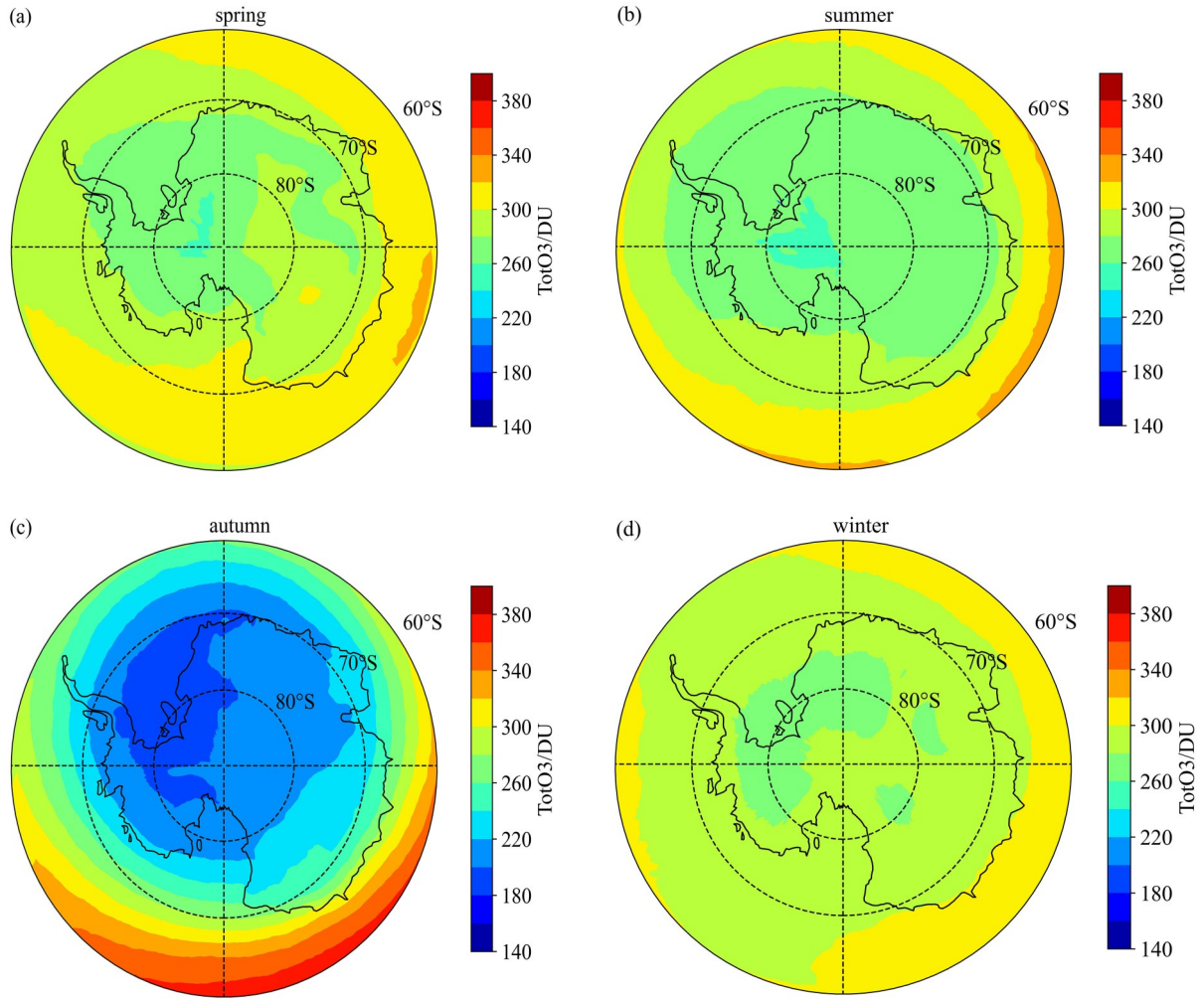
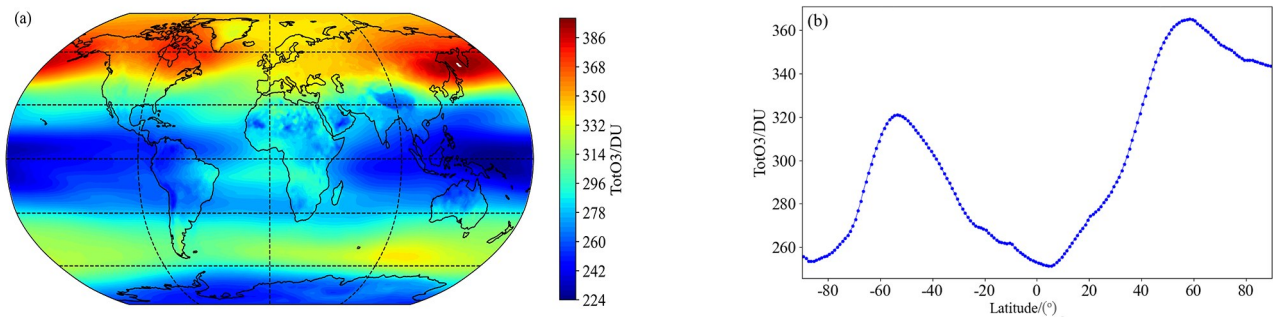


图5 2003年3月—2021年2月南极臭氧柱总量季节分布。(a)春季;(b)夏季;(c)秋季;(d)冬季
 Fig. 5 Seasonal distribution of total ozone column in Antarctica from March 2003 to February 2021.

(a) Spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter



注:此图基于国家自然资源部标准地图服务系统的标准地图[审图号:GS(2016)1611号]绘制,底图无修改

图6 2003年3月—2021年2月全球臭氧柱总量空间分布。(a)臭氧柱总量随经纬度分布;(b)臭氧柱总量随纬度分布
 Fig. 6 Spatial distribution of total global ozone column from March 2003 to February 2021. (a) Distribution of total ozone column with longitude and latitude degree; (b) distribution of total ozone column with latitude degree

2003年3月—2021年2月南极臭氧柱总量平均值分布图, 整体来看, 臭氧柱总量随纬度变化明显, 随经度变化不明显, 并且从图中可以明显看出臭氧柱总量随纬度的升高逐渐降低, 并在85°S附近达到最低, 这与前文所述相符。图7(b)为南极区域臭氧柱总量年变化率空间分布图, 总体来看, 西半球70°S~90°S之间总体呈下降趋势, 仅小部分呈现增长趋势, 东半球与之相反。而60°S~70°S之间总体呈增长趋势, 少数部分呈现下降趋势, 这可能是因为中纬度与高纬度之间的温度差导致中纬度更多含有臭氧的空气进入60°S~70°S地带, 而高纬度地带的极涡作用导致温度进一步下降, 促进了臭氧分子与极地平流层云产生的副产物发生化学反应, 造成臭氧柱总量的下降。

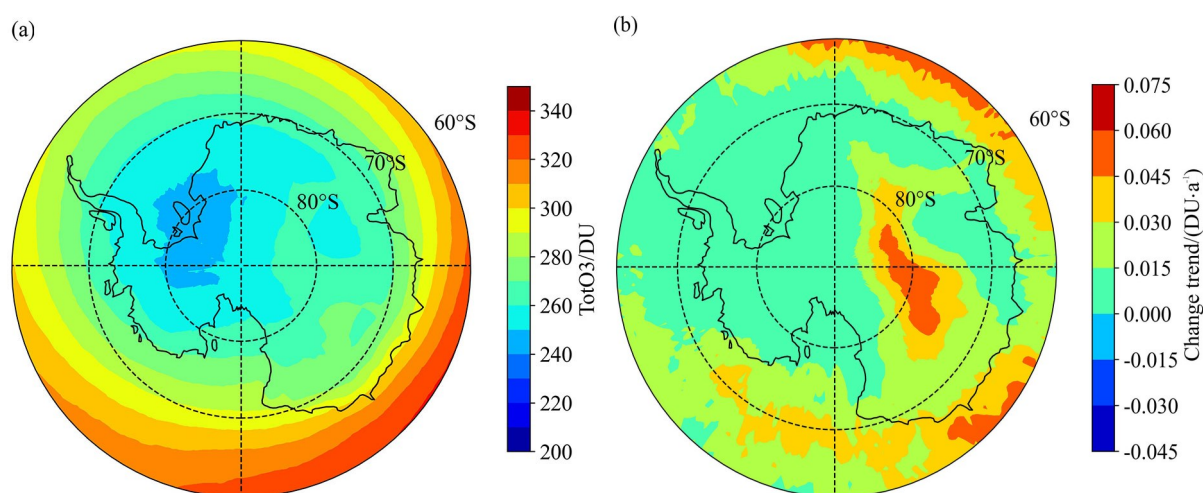


图7 南极臭氧柱总量均值空间分布及变化趋势。(a) 均值空间分布; (b) 年变化率空间分布

Fig. 7 Mean spatial distribution and variation trend of total ozone column in Antarctica. (a) Mean spatial distribution; (b) spatial distribution of annual change rate

3 南极臭氧柱总量的影响因素分析

3.1 平流层温度与南极臭氧柱总量的关系

平流层中的大气非常干燥, 极难形成云, 只有在平流层温度低于 -78°C 时才会形成平流层云, 而通常只有在两极的平流层中才会出现极低温度, 因此只有在两极的平流层中才能产生平流层云。平流层云提供了一个能产生“自由基”副产物的平台, 这种自由基会与臭氧分子结合, 造成臭氧柱总量的下降。如图8(a)所示, 南极平流层温度与南极臭氧柱总量存在显著性相关关系($p < 0.05$), 在通常南极最冷的9月和10月, 平流层温度较低, 同时臭氧柱总量也处于较低水平, 两者之间的误差水平在9、10、11、12月较大。一方面, 当臭氧柱总量增加(减少)时, 会造成平流层温度的上升(下降)。另一方面, 平流层温度的上升(下降)会影响平流层云的增加(减少), 进而导致促进(抑制)臭氧分子与自由基的化学反应。图8(b)显示了南极区域臭氧柱总量与平流层温度的相关系数空间分布, 可以看出在南极洲大部分区域, 两者相关性极高, 相关系数均在75%以上。根据回归方程和臭氧空洞等级计算, 当平流层温度小于189.08 K时, 可能出现臭氧空洞。但是从图8(c)可看出, 这12个点的离散程度较高, 说明扰动南极臭氧柱总量的因素很多, 并不只有平流层温度这一种

因素。

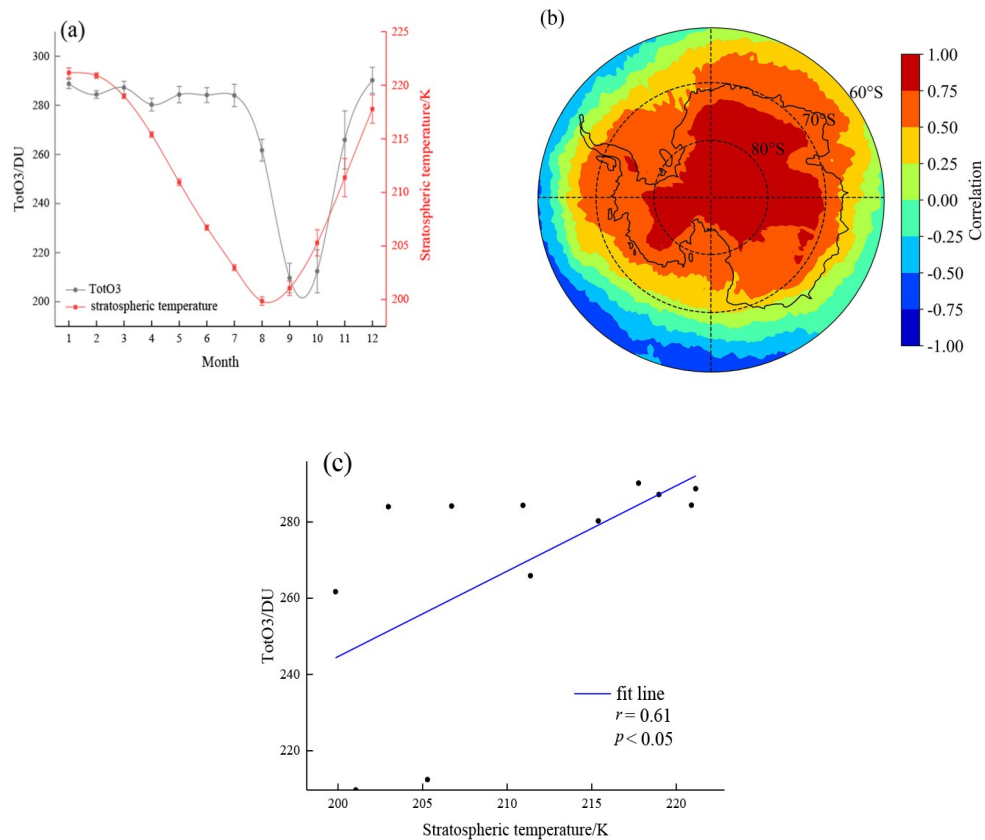


图8 南极臭氧柱总量与平流层温度变化趋势图及线性拟合。(a) 变化趋势;(b) 相关系数空间分布;(c) 线性拟合

Fig. 8 Variation trend and linear fitting of total ozone column and stratospheric temperature in Antarctica. (a) Variation trend; (b) spatial distribution of correlation coefficient; (c) linear regression

3.2 海冰范围与臭氧柱总量的关系

南极大陆最显著的特征即95%以上的面积被冰雪或者数百千米的浮冰所覆盖,而海冰作为极地海洋中最显著的特征,其范围变化会直接影响南极臭氧柱总量的变化^[1]。因此本研究对臭氧柱总量与海冰范围的关系做初步探讨。图9显示了2003年3月—2021年2月南极臭氧柱总量的平均值和海冰范围月变化。总体来看,南极海冰范围的变化趋势与南极臭氧柱总量的变化趋势比较接近,在南极臭氧柱总量减少的同时,南极海冰范围逐渐减小;在南极臭氧柱总量增加的同时海水结冰,进而海冰范围增大,但南极海冰范围的变化比南极臭氧柱总量变化要早约一个月。

进一步对南极海冰范围作小波分析,如图10所示,由分析图呈现的结果可知:南极海冰范围存在2、7、9、12~14、14~16年的周期,其中9年作为海冰范围变化的第一主周期,在2003—2021年经历了3次广-窄变化期;在海冰范围变化过程中,震荡周期最明显的为14~16年周期,但其具有局限性,仅在2016年后。结合前文南极臭氧柱总量的小波分析结果,两者都存在2、6~8、12~14年的变化周期。此处只对南极海冰范围与南极臭氧柱总量变化关系作了初步探讨,两者之间的变化过程比较复杂,需进一步研究。

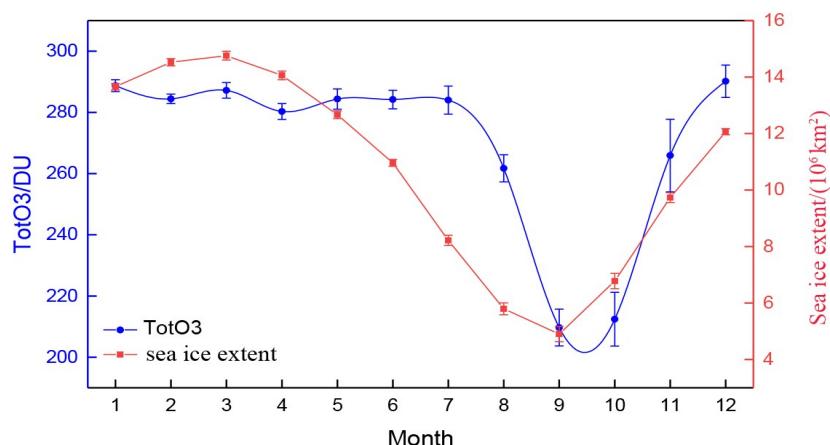


图 9 2003 年 3 月—2021 年 2 月南极臭氧柱总量与海冰范围的平均变化关系

Fig. 9 Average variation relationship between total ozone column and sea ice range in Antarctica from March 2003 to February 2021

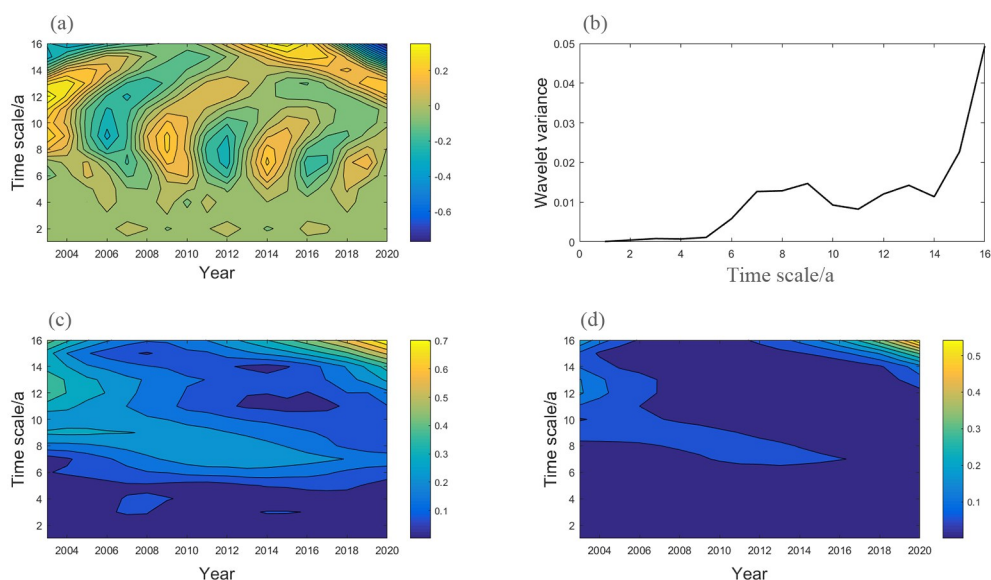


图 10 2003—2021 年南极海冰范围小波分析。(a) 小波实部; (b) 小波方差; (c) 小波模值; (d) 小波模方

Fig. 10 Wavelet analysis of Antarctic sea ice range from 2003 to 2021. (a) Wavelet real part; (b) wavelet variance; (c) wavelet modulus; (d) wavelet modulus square

4 结 论

利用 2003 年 3 月—2021 年 2 月的 AIRS 反演数据对南极臭氧柱总量进行了时空特性分析验证以及影响因素讨论, 展示了南极臭氧柱总量的时空变化规律, 分析结果显示 AIRS 反演数据与大气本底数据有良好的一致性。

南极臭氧柱总量平均值在 2003 年 3 月—2021 年 2 月总体呈现先降后升的趋势, 其变化周期存在 2、4、6、8~10、13 年的多重周期组合嵌套, 其中震荡最剧烈的第一主周期 13 年以 10 年为周期变化, 第二主周期 6 年以

4年为周期变化;2003—2021年内第一主周期经历了2次高-低变化期,第二主周期经历了4次高-低变化期。南极臭氧柱总量的季节性变化明显,春季臭氧柱总量最高,夏季、冬季次之,南极平流层温度最低的秋季臭氧柱总量最低。南极臭氧柱总量随纬度的升高逐渐减少,并在85°S附近达到最低值。南极臭氧柱总量平均值变化率最大值约为0.075 DU/a,最小值约为-0.045 DU/a。

在绝大部分南极洲范围内,南极臭氧柱总量与南极平流层温度呈显著正相关,通常在南极平流层温度最低的9月、10月臭氧柱总量最低。海冰范围与南极臭氧柱总量变化趋势大致相同,两者均存在2、6~8、12~14年的变化周期,但海冰范围变化要比臭氧柱总量变化早一个月。

影响南极臭氧柱总量的因素有很多,本研究仅用相关系数和线性回归的方法分析了南极臭氧柱总量与平流层温度、海冰范围之间的关系,用小波分析从频域上分析南极臭氧柱总量和海冰范围的周期变化,初步讨论导致南极臭氧柱总量变化的原因。对于更深层次的原因分析,还需要连续不断的监测与深入研究。

参考文献:

- [1] Ye L, Bian L G, Tang J, *et al.* A study on surface ozone depletion episodes over the Antarctic coast [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2017, 75(3): 506-516.
冶磊, 卞林根, 汤洁, 等. 南极大陆沿岸地面臭氧损耗事件的研究 [J]. 气象学报, 2017, 75(3): 506-516
- [2] Zhang J K, Liu W, Han Y Y, *et al.* Progresses in influence of variations in stratospheric ozone on tropospheric climate [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2014, 32(5): 685-693.
张健恺, 刘玮, 韩元元, 等. 平流层臭氧变化对对流层气候影响的研究进展 [J]. 干旱气象, 2014, 32(5): 685-693.
- [3] Hu S X, Meng X Q, Cao K F, *et al.* Analysis of vertical distribution of atmospheric ozone over Hefei [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2011, 6(2): 141-145.
胡顺星, 孟祥谦, 曹开法, 等. 合肥上空大气臭氧垂直分布特征分析 [J]. 大气与环境光学学报, 2011, 6(2): 141-145.
- [4] Cao X Y, Qi D L, Xiao J S, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of tropospheric ozone in Qinghai Plateau based on satellite observations [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(5): 1640-1648.
曹晓云, 祁栋林, 肖建设, 等. 基于卫星观测的青海高原对流层臭氧时空分布特征研究 [J]. 环境科学学报, 2021, 41(5): 1640-1648.
- [5] Yu R X, Liu M X, Li L, *et al.* Spatial and temporal variation of atmospheric ozone column concentration and influencing factors in the Yangtze River Delta region in recent 15 years [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(3): 770-784.
于瑞新, 刘旻霞, 李亮, 等. 长三角地区近15年大气臭氧柱浓度时空变化及影响因素 [J]. 环境科学学报, 2021, 41(3): 770-784.
- [6] Bodeker G E, Shiona H, Eskes H. Indicators of Antarctic ozone depletion [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, 5(10): 2603-2615.
- [7] Tully M B, Klekociuk A R, Krummel P B, *et al.* The Antarctic ozone hole during 2015 and 2016 [J]. *Journal of Southern Hemisphere Earth System Science*, 2019, 69(1): 16-28.
- [8] Zhang L, Zheng X D, Bian L G. Comparative analysis of satellite ozone total amount and long-term ground-based measurements at Zhongshan Station, Antarctica [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2017, 47(11): 1371-1382.
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.

- [9] 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, 1995, 40(6): 533-535.
- [10] 陆龙骅, 卞林根, 程彦杰, 等. 南、北极考察航线地面臭氧的观测 [J]. 科学通报, 2001, 46(15): 1311-1316.
- [11] McPeters R, Frith S, Labow G. OMI total column ozone: Extending the long-term data record [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8: 4845-4850.
- [12] Balis D, Kroon M, Koukouli M E, *et al.* Validation of Ozone Monitoring Instrument total ozone column measurements using Brewer and Dobson spectrophotometer ground-based observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, 112: D24S46.
- [13] Li T Y. *Study on Temporal and Spatial Variation of Total Ozone Column Based on OMI and TOMS* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011 .
李天奕. 基于OMI和TOMS的大气臭氧柱总量时空变化的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.
- [14] Zhang S H, Xie B, Zhang H, *et al.* Spatial-temporal distribution characteristics of CO₂ over globe and east Asia by AIRS satellite [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2019, 14(6): 442-454.
张绍会, 谢冰, 张华, 等. 基于AIRS卫星的全球和东亚地区CO₂时空特征分析 [J]. 大气与环境光学学报, 2019, 14(6): 442-454.
- [15] Diaz S B, Paladini A A, Deferrari G A, *et al.* Evolution of ozone depletion on Antarctic and Sub-Antarctic regions (1979-2012) [J]. *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, 2013, 8795: 87950E.
- [16] Song J Y, Liu M X, Sun R D, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of atmospheric ozone concentration in Southeast Coast based on OMI data [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(2): 438-449.
宋佳颖, 刘旻霞, 孙瑞弟, 等. 基于OMI数据的东南沿海大气臭氧浓度时空分布特征研究 [J]. 环境科学学报, 2020, 40(2): 438-449.
- [17] Qian Y Y, Si F Q, Luo Y H, *et al.* Retrieval of Antarctic total ozone column from EMI [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2021, 16(3): 215-222.
钱园园, 司福祺, 罗宇涵, 等. EMI南极臭氧柱总量反演研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2021, 16(3): 215-222.
- [18] Sepúlveda E, Cordero R R, Damiani A, *et al.* Evaluation of Antarctic ozone profiles derived from OMPS-LP by using balloon-borne ozonesondes [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 4288.
- [19] Wang W N, Cheng T, van der A R, *et al.* Verification of the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) and the Microwave Limb Sounder (MLS) ozone algorithms based on retrieved daytime and night-time ozone [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 14(2): 1673-1687.
- [20] Wang R F, Ma X D, Zhao T L, *et al.* Evaluation of MACC reanalysis ozone data over China using ground-based and AIRS satellite observations [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(10): 4412-4422.
王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 等. 利用地面观测资料和AIRS卫星资料评估MACC再分析臭氧数据中国地区的适用性 [J]. 环境科学, 2019, 40(10): 4412-4422.
- [21] Tritscher I, Pitts M, Poole L, *et al.* Polar stratospheric clouds: Satellite observations, processes, and role in ozone depletion [J]. *Reviews of Geophysics*, 2021, 59(2): 18-41.