

南大洋和热带西太平洋大气中黑碳气溶胶的分布及影响因素

苏辰昀, 乐凡阁, 康辉, 余夏薇

(安徽省极地环境与全球变化重点实验室, 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026)

摘要: 黑碳气溶胶(BC)具有直接和间接的气候效应,能够长距离传输,了解BC在全球大气中的浓度和分布对认识气候变化具有重要的意义.在中国第三十四次南极科学考察期间(2017年11月至2018年4月),利用多角度吸收光度计(MAAP)在线监测方法对航线上空的BC浓度进行了观测,结合氮氧化物(NO_x)气体浓度,探讨了BC浓度的分布特征及其影响因素.排除船基影响,南大洋海域中山站至法国站海区、罗斯海海区以及热带西太平洋海域海洋大气BC浓度分别为 $7.86 \text{ ng/m}^3 \pm 15.52 \text{ ng/m}^3$ 、 $4.73 \text{ ng/m}^3 \pm 11.52 \text{ ng/m}^3$ 和 $17.80 \text{ ng/m}^3 \pm 32.71 \text{ ng/m}^3$;来源分析表明,罗斯海海区上空BC浓度反映了南极大陆的自然背景,热带西太平洋上空相对较高的BC浓度与陆地来源影响有关,估算的BC干沉降通量远远高于模型模拟的结果.

关键词: 黑碳气溶胶(BC);多角度吸收光度计(MAAP);南大洋;热带西太平洋

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.0253-2778.2020.07.007

引用格式: 苏辰昀,乐凡阁,康辉,等.南大洋和热带西太平洋大气中黑碳气溶胶的分布及影响因素[J].中国科学技术大学学报,2020,50(7):912-919.

SU Chenyun, YUE Fange, Kang Hui, et al. Factors influencing the amount of atmospheric black carbon over the southern ocean and the Tropical Western Pacific Ocean[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2020,50(7):912-919.

Factors influencing the amount of atmospheric black carbon over the southern ocean and the Tropical Western Pacific Ocean

SU Chenyun, YUE Fange, Kang Hui, Yu Xiawei

(Anhui Province Key Laboratory of Polar Environment and Global Change, School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Black carbon (BC) has direct and indirect climatic effects and can be transported over long distances. Knowledge of the concentration and distribution of BC aerosol in the globe is of significant climatic importance. During the 34th Chinese Antarctic Research Expedition (CHINARE), the concentrations of BC were measured by multi-angle absorption photometer (MAAP). The factors influencing the level of BC were investigated based upon NO_x and other data measured synchronously. Excluding the influence of ship emissions, the BC concentrations of the ocean areas from Zhongshan station to France station, and the Ross Sea in the Southern Ocean, and the tropical Western Pacific Ocean was $7.86 \text{ ng/m}^3 \pm 15.52 \text{ ng/m}^3$, $4.73 \text{ ng/m}^3 \pm 11.52 \text{ ng/m}^3$, and $17.80 \text{ ng/m}^3 \pm 32.71 \text{ ng/m}^3$, respectively. Further source analysis showed that BC concentrations over the Ross Sea reflect the natural background of the Antarctic continent, the relatively high BC concentrations over the tropical Western Pacific Ocean may be related to the terrestrial sources, and the estimated dry deposition flux of BC aerosol is much higher than the model results.

Key words: black carbon (BC); multi-angle absorption photometer (MAAP); Southern Ocean; tropical Western Pacific Ocean

0 引言

黑碳气溶胶(black carbon aerosol, BC)是以碳为基础的燃料在高温条件下不完全燃烧生成的并

向大气排放的一种含碳气溶胶.全球范围内,BC的主要来源包括化石燃料燃烧、生物质燃料燃烧和草原、森林等野外生物质燃烧.根据Bond等^[1]的估算,2000年全球BC总排放量为 $7500 \text{ Gg} \cdot \text{a}^{-1}$,其

收稿日期:2020-04-22;修回日期:2020-07-12

基金项目:国家自然科学基金(41676173)资助.

作者简介:苏辰昀,女,1994年生,硕士生.研究方向:大气环境研究. E-mail: sucy@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:余夏薇,博士后. E-mail: aivy@ustc.edu.cn

中人为排放的 BC 占比超过 64%。BC 在大气中的化学反应活性非常低,停留时间较长,可以在大气中远距离传输^[2]。BC 对可见光具有很强烈的吸收,在 550 nm 波长光的照射下,其质量吸收截面(单位质量的光学吸收截面)至少可以达到 $5 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ^[3]。沉降到极地地区冰雪表面上的 BC 会显著降低冰雪的反照率,诱发一系列正反馈并进一步放大增暖效应^[1]。远距离传输和本地排放的 BC 会对远洋地区的气候系统产生相当大的影响。因此,全球尺度上海洋大气 BC 的浓度和分布具有重要的气候学意义。

海洋是全球重要的碳库,黑碳作为碳库的组成部分,在全球慢速碳循环中发挥着潜在的作用^[4],通过干、湿沉降进入海洋的黑碳大约分别为 2 和 10 $\text{Tg} \cdot \text{a}^{-1}$ (以碳单质计量)^[5]。然而,目前海洋大气 BC 开展的系统观测非常稀少。前人对北半球黄海、日本海、鄂霍次克海、西北太平洋、白令海、楚科奇海、加拿大海盆和北冰洋等海区的黑碳进行了观测,发现海洋大气黑碳气溶胶主要受到陆源输送的影响,并且显示出季节和空间上的变化特征^[6-7]。Moorthy 等人发现 $20^\circ\text{S} \sim 56^\circ\text{S}$ 区域海洋大气背景 BC 浓度非常低 ($< 50 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$),且在受到人为干扰的情况下很稳定,而 20°S 以北海域 BC 浓度变化很大,在阿拉伯海域甚至可以达到 $2000 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[8]。在南极地区,目前只有少量大陆上空大气 BC 和元素碳(EC)的观测研究^[9-13],如 Weller 等^[13]使用多角度吸收光度计(MAAP)发现南极洲的 BC 浓度为 $2.1 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3} \pm 2.0 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,并且有明显的季节性变化。在南极 McMurdo 站的观测发现,科考站的排放和附近船舶的活动会导致当地 BC 浓度明显升高^[11],目前这些研究多集中于南极大陆站点。本研究依托中国第三十四次南极科学考察,在 2017 年 11 月至 2018 年 4 月间,采用多角度吸收光度计(MAAP)在线观测大气 BC 浓度。在此基础上,结合 NO_x 浓度数据、船速等航行记录及后向轨迹反演方法,研究了航线海域大气中 BC 浓度分布及其影响因素。

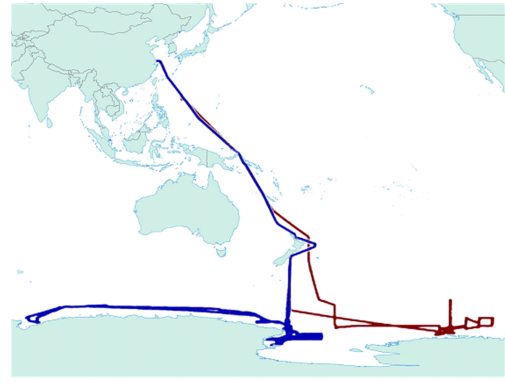
1 材料与方法

1.1 航行路线和研究区域

从 2017 年 11 月 8 日起至 2018 年 4 月 20 日,考察队员搭乘“雪龙”号科考船,从上海出发,途经中国近海、热带西太平洋、新西兰近海、南半球西风带、南大洋、罗斯海和阿蒙森海等海区进行中国第三十四次南极科学考察。本研究将仪器放置在“雪龙”号上对走航路线上空的 BC 浓度等指标进行了观测。“雪龙”号的航行路线如图 1 所示。由于航线跨越多个时区,本文中统一使用协调世界时(coordinated universal time, UTC)。本文中所使用的时间、经度、纬度、对地航速(speed over ground, SOG)和对地航向(course over ground, COG)数据由“雪龙”号上的全球定位系统(GPS)接收器提供,风向、风速等数据由安装在“雪龙”号顶层甲板的自动气象站(Coastal Weather Pak 2000)记录。

1.2 观测仪器和研究方法

“雪龙”号的发动机使用柴油作为燃料,发动机



蓝色和深红色分别代表航段 I 和航段 II。
图 1 中国第三十四次南极科考“雪龙”号走航路线
Fig. 1 The cruise route of ice breaker Xuelong during the 34th CHINARE

和尾气排烟口靠近船的尾部。为了避免船基排放对航测仪器采样和分析造成干扰,本研究使用的搭载在“雪龙”号上的仪器和它们的采样口都被安置在船首顶层前甲板的迎风处,距离海平面约 30 m^[14]。各仪器都依据美国国家标准与技术研究院(NIST)标准对温度、气压和体积流速进行了校准。

1.2.1 多角度吸收光度计

本研究利用美国 Thermo Fisher 公司生产的多角度吸收光度计(Model 5012 MAAP)^[15-16]进行 BC 的在线监测,该仪器使用的测量方法是光学方法,测得的结果也被称为等价黑碳气溶胶(EBC)浓度。在走航过程中,MAAP 仪器被固定在机柜上,置于带有控温装置的防水箱中,控温范围是 $0 \sim 30^\circ\text{C}$,以防极地地区的极端低温或者是仪器散热产生的高温对仪器及测量结果产生影响。仪器的进气口为直径 16mm 的不锈钢管,装有 $\text{PM}_{2.5}$ 切割头和不锈钢遮雨罩,距离顶层甲板地面约 3.5m。MAAP 采用 670nm 的可见光源对采集在玻璃纤维滤带(GF 10, Schleicher & Schüll 公司)上的气溶胶样品进行照射,根据光透过玻璃纤维滤膜后衰减的程度、EBC 的质量吸收截面(MAC)、采样的时长和采样流量等参数,进行反演计算,得到大气中 BC 的实时质量浓度。本研究中采用仪器默认值 $6.6 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 作为 MAC 值。相对于其他的 BC 光学测量方法(比如黑碳仪(Aethalometer)和烟尘颗粒物吸收光度计(PSAP)),MAAP 最主要的改进就是减轻了气溶胶散射对测量的干扰。本研究中 MAAP 采样时长和采样流量分别为 30 min 和 $1000 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$,这种情况下 MAAP 的检出限可以达到 $20 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ (95%置信度)。本研究中对低于 $20 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 的 BC 浓度进行置零处理^[17-18]。这种处理方法会对平均值的计算产生低估,对标准差的计算产生高估^[17]。根据 Weller 等^[13]在南极洲的报道,MAAP 流量为 $1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ($1000 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$)时,24 小时平均数的检测限可以达到 $0.25 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

1.2.2 其他辅助观测仪器及研究方法

化学发光 NO_x 分析仪:一氧化氮(NO)和二氧化氮(NO_2)统称为 NO_x 。本研究利用美国 Thermo Fisher 公司生产的化学发光 NO_x 分析仪(Model

42i)对 NO_x 进行在线监测. 在走航过程中, NO_x 分析仪被固定在机柜上, 置于控温防水箱中. 仪器的进气口为直径 6.35 mm (1/4 inch) 的特氟龙 (Teflon) 管, 装有直径 47 mm、孔径 $4.5 \mu\text{m}$ 的 Teflon 颗粒物滤膜和不锈钢遮雨罩, 距离顶层甲板地面约 1.5 m. Teflon 颗粒物滤膜需每周更换. 本研究中 NO_x 分析仪采样时长和采样流量分别为 1 min 和 $600 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 这种情况下 NO_x 分析仪的检出限为 $0.4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 出于方便统计的目的, 本研究中为低于 $0.4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 的 NO_x 浓度赋予 $0.2 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ (0.5 倍检出限) 的值^[11,19].

气团轨迹反演方法: 本研究采用 NOAA 大气资源实验室 (ARL) 开发的大气传输和扩散 HYSPLIT 模型反演气团的后向轨迹^[20-21]. 为了更好地展示轨迹反演结果, 本文还运用 TrajStat 软件进行气团后向轨迹的反演^[22]. 本研究采用全球数据同化系统 (GDAS) 分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的气象数据进行反演计算. 根据 Parungo 等^[23] 估算的海洋边界层 BC 停留时间 (约 5 天), 本研究以采样点海平面上空 50 m 处作为起始点, 进行 5 天后向轨迹反演.

BC 干沉降通量的估算: BC 的干沉降通量通过公式 $F_D = C \times V$ 进行计算^[24], 其中 F_D 为 BC 的干沉降通量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), C 为 BC 的浓度 ($\text{ng} \cdot \text{cm}^{-3}$), V 为干沉降速率 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$). 气溶胶的干沉降速率会随着风速和颗粒物粒径的不同而发生变化, 假设海表温度为 298 K, 相对湿度为 80%, 风速为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的情况下, $\text{PM}_{2.5}$ 的沉降速率约为 $0.004 \sim 2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[5].

1.3 数据处理

由于船舶发动机尾气中同时含有 NO_x ^[25-27], 因此可以根据 NO_x 的浓度去除船基排放的影响, 远高于南极地区背景值的 NO_x 浓度可以作为船基排放的指示物 (船基排放对 BC 和 NO_x 浓度影响的具体讨论见本文 2.1 节). 考虑到本研究所使用的 NO_x 分析仪检出限 ($0.4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$) 远高于 NO_x 的海洋背景浓度 ($0.035 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)^[28], 本研究利用 NO_x 浓度作为辅助数据对可能被船基排放影响的数据进行筛选, 只要测得的 NO_x 浓度高于检出限, 即认定该段数据受到船基排放影响, 在后续讨论中予以去除, 另外还根据停船以及慢速航行时 (航速 ≤ 2 knot, 即 $1.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 和船后向来风 (相对船首风向在 $120^\circ \sim 240^\circ$ 范围内) 进行了数据筛选^[14,29].

2 结果与讨论

2.1 船基排放的潜在影响和区域的选择

在南极科考实际水上及冰上航行和作业过程中, “雪龙”号有时会停船进行采水、拖网等作业, 有时遇到较厚的冰层会不可避免地慢速航行甚至倒退再向前航行, 这些情况下放置测量仪器的顶层甲板处的风有可能是由船尾方向吹来, 或者说顶层甲板会受到船发动机尾气烟羽也就是船基排放的影响^[7,30]. 图 2 展示了一段典型的 BC 和 NO_x 浓度高值. 从图 2 中可以看出, BC 和 NO_x 的浓度变化高度同步. BC 浓度的最大值为 $4050 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, NO_x 浓度的最大值为 $4435 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 这表明在图 2 对应的时段中它们具有相同的来源.

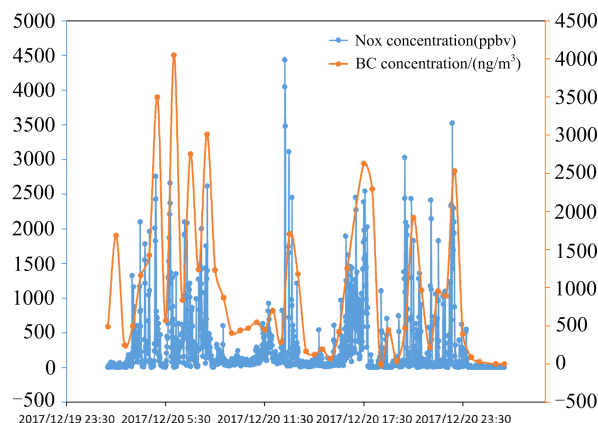


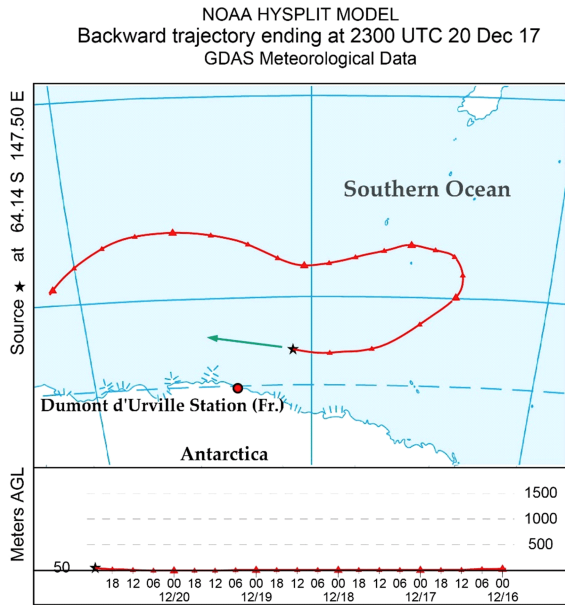
图 2 一段典型的 BC 和 NO_x 浓度高值随时间的变化图
Fig. 2 The temporal variations of BC and NO_x concentrations during a typical period of the 34th CHINARE

Lee 等^[28] 和付丹等^[31] 的结果表明, 远离陆地的开阔大洋上 NO_x 自然背景浓度非常低, 尤其是在人迹罕至的南极地区, NO_x 浓度变化范围通常为 $0.003 \sim 0.008 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 受到火山活动影响时最大值可达 $0.016 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 因此, 图 2 中展示的 NO_x 浓度极端高值 (最大值超过 $4000 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$) 在极地地区只有可能是人为来源导致的, 比如船舶和飞机的柴油发动机排放的尾气. 前人的研究^[32-33] 表明, 即使是在停泊期间, 只有副发动机工作的状态下, 燃料类型为海洋柴油的船舶发动机仍可以排放非常大量的 NO_x 到空气中, 浓度超过 $900 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

根据本研究 NO_x 浓度辅助数据可计算得出图 2 对应时段 24 h 平均 $\text{NO}_2 : \text{NO}$ 比值为 0.145 ± 0.088 (算术平均值 \pm 标准偏差). 付丹等^[31] 在中国第三十二次南极科考期间对航线上的 NO_x 浓度进行了连续观测, 结果表明, 对于南极圈以外的地区, 24 h 平均 $\text{NO}_2 : \text{NO}$ 比值在中国近海海域内最大, 与受到人为活动严重影响的大陆距离越远, 这个比值就越小. 中国近海海域是一片受到人为活动严重影响的海区, 付丹等^[31] 在该海域内测得的 24 h 平均 $\text{NO}_2 : \text{NO}$ 比值范围是 $0.1 \sim 0.2$, 本研究中的 0.145 正处于该范围内, 说明图 2 中的 NO_x 浓度受到了很强的人为活动影响. 此外, 与其他 NO_x 人为排放源 (比如精炼厂) 相比, 船基排放具有典型的 NO 浓度高的特征. 本研究计算得出的 24 h 平均 $\text{NO}_2 : \text{NO}$ 比值较小, 符合船基排放的特征. 另外, 图 2 对应时段内五天气团后向轨迹反演结果 (图 3) 显示所有气团均来源于 BC 自然背景浓度非常低的相对清洁的开阔大洋 ($\leq 50 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)^[2,8,34,35]. 因此, 图 2 中超高 NO_x 浓度受到了船基排放的影响. 本研究利用 NO_x 浓度作为辅助数据对被船基排放影响的数据进行筛选.

在去除了所有受到船基排放影响的数据之后, 选择了三个区域进行讨论 (三个区域的 BC 和 NO_x 随时间变化见补充材料^①), 探讨潜在的影响因素,

① 补充材料请见《中国科学技术大学学报》网站 <http://just.ustc.edu.cn>.



图中黑五角星表示 2017 年 12 月 20 日晚 23 点前的 30 min BC 采样时段内“雪龙”号的平均地理位置,绿色箭头为“雪龙”号的平均对地航向。

图 3 对应时段内一个典型的五天气团后向轨迹反演结果图
Fig. 3 A representative five-day air mass backward trajectory during the time period shown in Fig. 2

并通过影响因素的研究,排除人为排放的干扰,得到不同海区内大气 BC 自然背景浓度.这三个区域的选择依据包括:

(I)在这三个事件内,“雪龙”号分别处于不同且具有重要研究意义的海区,比如南大洋海区、罗斯海海区和热带西太平洋海区(罗斯海和中山站至法国站海区:毗邻多个科考站,并且 2016 年 10 月,罗斯海地区设立世界上最大的海洋保护区,旨在保护南极海洋生态系统.因此在此区域开展 BC 的研究,有助于了解人为科考活动对该海域黑碳气溶胶的影响;热带西太平洋海区:邻近有人为活动的海岛,探讨人为排放的影响并和南大洋海区进行对比);

(II)对这三个事件内 BC 浓度的影响因素的讨论能够将大洋上 BC 浓度的多种影响因素清晰地展现出来;

(III)通过对 BC 浓度的影响因素的讨论,能够排除受到人为影响的数据,得到对应海区的 BC 自然背景浓度;

(IV)在去除了所有受到船基排放影响的数据之后,这三个事件均仍保有足够数量的 BC 浓度数据以保证结果的代表性^[6,10].

三个区域的主要信息如图 4 所示.图 4(a)展示了三个区域案例中“雪龙”号的航行轨迹概况,蓝色实线代表航行轨迹,数字 1、2 和 3 分别代表区域一、二和三.

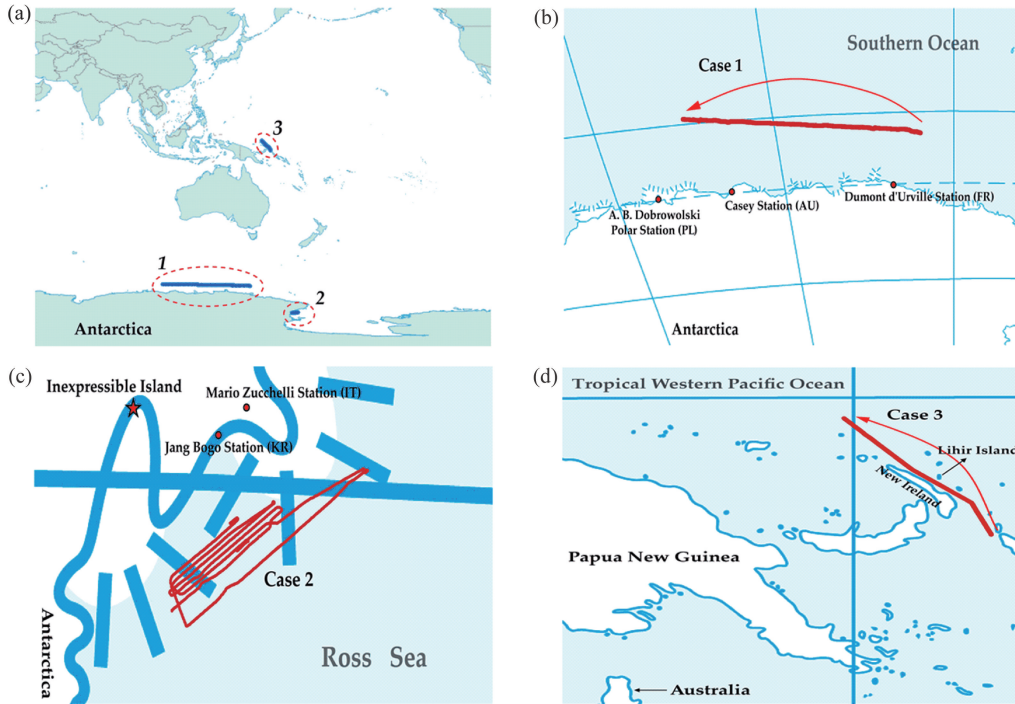
2.2 中山站至法国站海域上空大气 BC 浓度

中山站至法国站海域(62.63°S~63.44°S, 104.95°E~144.38°E)观测时“雪龙”号正向西航行(如图 4(b)所示,起始时间为 2017 年 12 月 21 日至

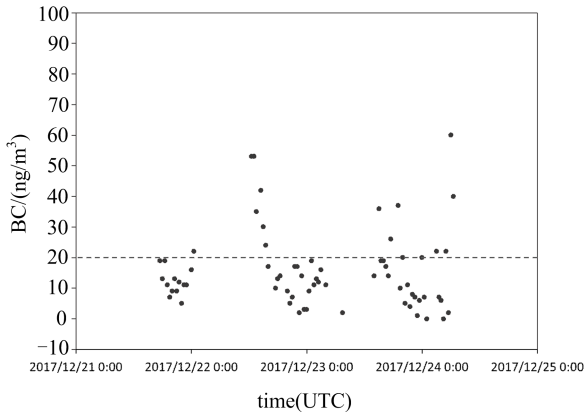
12 月 24 日).先后与南极大陆上的法国科考站迪蒙·迪维尔站(Dumont d'Urville Station, 66.7°S, 140°E)、澳大利亚科考站凯西站(Casey Station, 66.3°S, 110.5°E)和波兰科考站多布罗沃尔斯基站(A. B. Dobrowolski Polar Station, 66.3°S, 100.8°E)较为接近(如图 4(b)所示,图中红色实线表示航行轨迹,红色箭头指示大体航行方向,下同).其中迪蒙·迪维尔站和凯西站是正常运行的常年站,多布罗沃尔斯基站现处于闲置状态.图 5 展示了消除船基排放影响后 BC 浓度随时间的变化,图中水平黑色虚线代表 MAAP 检出限(下同),BC 浓度的变化范围从低于仪器检出限到 60 ng·m⁻³.从图中可以看出,在去除受到船基排放影响的数据之后,绝大部分 BC 浓度都处于开阔大洋 BC 自然背景浓度范围内(≤50 ng·m⁻³).图 6 展示了消除船基排放影响后该区域所有 TrajStat 软件可计算的五天气团后向轨迹反演结果,图中的黑点代表图 5 中数据点对应的数据采集时段内“雪龙”号的平均地理位置,红色实线是模型反演的从各数据点 GPS 位置出发的五天气团后向轨迹线(下同).大约二分之一的采样点没有五天气团后向轨迹反演结果,这是 TrajStat 软件设置的限制导致的, TrajStat 软件只能对整点时刻进行气团后向轨迹反演计算.从图 6 中可以看出几乎所有的气团都来源于开阔大洋,未受到科考站的影响.因此,消除船基排放影响后,测得的 BC 浓度值可以代表其所处海区的背景.通过计算可得,BC 平均浓度为 7.86 ng·m⁻³ ± 15.52 ng·m⁻³,在海洋背景浓度范围内.根据 BC 的平均浓度估算出干沉降通量约为 27.15~13573.57 mg·m⁻²d⁻¹,远高于模型通过气溶胶卫星数据进行估算的结果(0.03 mg·m⁻²d⁻¹)^[5].由于没有实测的粒径、气溶胶浓度等的观测数据,本研究中给出的沉降速率范围较大,还需要更详尽的观测数据对远洋的 BC 沉降通量进行评估.

2.3 罗斯海大气 BC 浓度

罗斯海观测区域(-74.91°S~-76.79°S, 163.78°E~169.97°E)的起始时间为 2018 年 1 月 21 日至 1 月 22 日,如图 4(c)所示.此时“雪龙”号正在罗斯海邻近恩克斯堡岛(Inexpressible Island, 74.9°S, 163.8°E)的海域内“之”字形行驶,进行海底地形测绘工作(如图 4(c)所示).其位置与罗斯海沿岸的韩国常年科考站张保皋站(Jang Bogo Station, 74.6°S, 164.2°E)和意大利度夏科考站马里奥·祖切利站(Mario Zucchelli Station, 74.7°S, 164.1°E)较为接近.张保皋站是南极大陆上几个较大的常年科考站之一,占地 4458 m²,夏季最多可容纳 60 人,冬季 15 人.马里奥·祖切利站占地约 7200 m²,最多可容纳 90 人,站上的保障设施包括电机、供暖系统、供水系统、燃烧炉、净水器和氮氦液化气等.此外,罗斯海沿岸还有美国的麦克默多站(McMurdo Station, 77.9°S, 166.7°E)等考察站.麦克默多站是美国最大的南极考察站也是南极洲最大的科学研究中心和社区.它位于罗斯岛(Ross Island, 2460 km²)的最南端,配备有一系列生活和



图中红点表示各科考站的地理位置,红五角星表示恩克斯堡岛的地理位置。
 图 4 三个区域中“雪龙”号的航行轨迹总体概况和各个区域的详细说明图
 Fig. 4 The general view and detailed map of each case



图中水平黑虚线代表 MAAP 检出限。

图 5 消除船基排放影响后中山站至法国站海域中 BC 浓度随时间的变化图

Fig. 5 The temporal variations of BC concentrations after excluding the data potentially affected by ship emission in the sea from Zhongshan station to France station

科学研究支持系统,包括发电站、供水系统、供暖系统、一个港口、一座直升飞机场和三座飞机场(其中两个是季节性的)等,最多可以支持 1258 人在站内正常生活. 麦克默多站的飞机场位于冰封的麦克默多湾上,通常每天美国在南极等区域考察探险专用型运输机 LC-130 型飞机和 C-141 型运输机(于 2006 年退役)会在这里数次起降执行任务^[11]. 埃里伯斯火山(Erebus Volcano, 77.5°S, 167.2°E)也位于罗斯岛上,是地球上地理位置最南的活火山,山

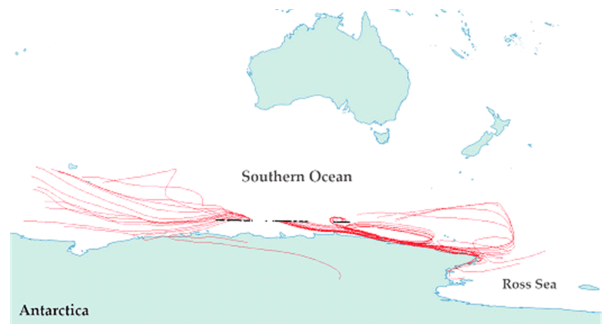


图 6 消除船基排放影响后中山站至法国站海域时段内 TrajStat 软件可计算的五天气团后向轨迹反演结果图
 Fig. 6 Five-day air mass backward trajectories after excluding the data potentially affected by ship emission in the sea from Zhongshan station to France station

顶海拔 3794 m. 图 7 展示了 BC 浓度随时间的变化, BC 浓度的变化范围从低于仪器检出限到 $44 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均浓度为 $4.73 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3} \pm 11.52 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 干沉降通量约为 $13.62 \sim 8174.77 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. 从图 7 可以看出,所有 BC 浓度数据都处于开阔大洋 BC 自然背景浓度范围内,表明人为活动影响较小.

图 8 展示了五天气团后向轨迹反演结果,为了使轨迹线较为清晰,图中仅展示典型的五天气团后向轨迹反演结果(相同走向的轨迹线只展示一条). 从图中可以看出气团主要来源于 BC 自然背景浓度比开阔大洋还低的南极大陆^[9,10,13],而且没有受到南极大陆最主要的人为 BC 排放源——科考站的影响. 同时注意到罗斯海海域上空 BC 浓度($4.73 \text{ ng} \cdot$

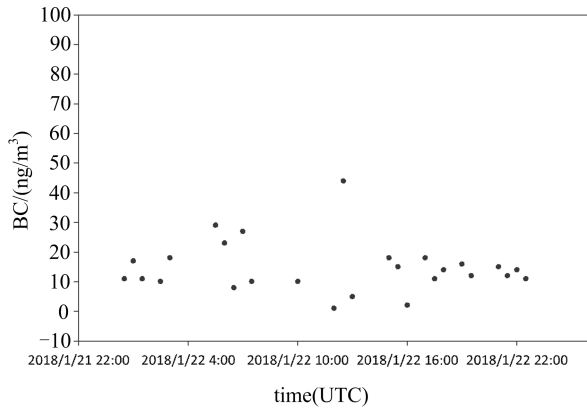
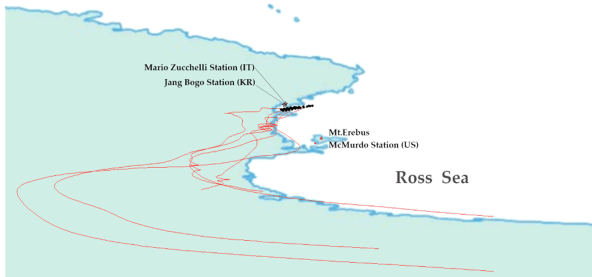


图 7 消除船基排放影响后罗斯海域中 BC 浓度随时间的变化图

Fig. 7 The temporal variations of BC concentrations during after excluding the data potentially affected by ship emission in Ross Sea

m^{-3}) 比中山站至法国站海区上空 BC 浓度 ($7.86 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$) 要小. 罗斯海海域上空 BC 浓度反映了南极大陆较低的 BC 自然背景浓度.



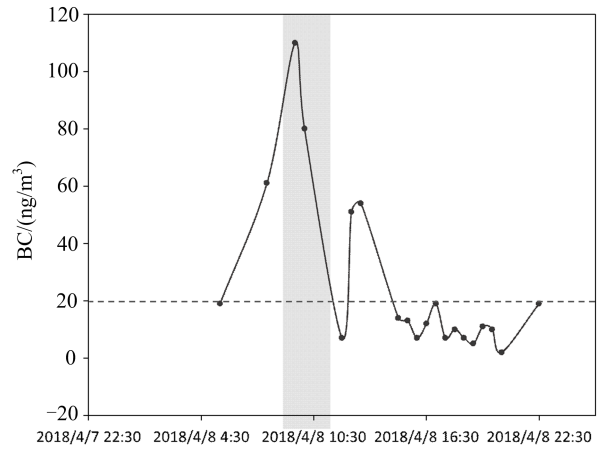
图中红五角星表示各科考站的地理位置, 红三角形表示埃里伯斯火山的地理位置.

图 8 消除船基排放影响后罗斯海观测时段内典型的五天气团后向轨迹反演结果图

Fig. 8 Representative five-day air mass backward trajectories after excluding the data potentially affected by ship emission in Ross Sea

2.4 热带西太平洋大气 BC 浓度

热带西太平洋海域 ($-1.13^{\circ}\text{S} \sim -5.32^{\circ}\text{S}$, $150.04^{\circ}\text{E} \sim 153.97^{\circ}\text{E}$) 观测的起始时间为 2018 年 4 月 7 日至 4 月 8 日, 航线邻近巴布亚新几内亚 (Papua New Guinea) 所属的新爱尔兰岛 (New Ireland Island, 3.3°S , 152.0°E) 和利希尔岛 (Lihir Island, 3.1°S , 152.6°E) (如图 4(d) 所示). 利希尔岛是图 4(d) 所示航线以西群岛中最大的岛屿, 长 22 km, 宽 14.5 km, 人口约 18000 人 (2007 年). Ladolam 金矿开采是岛上居民主要的收入来源, 也是主要的 BC 人为排放源. 岛上还有一条可供小型喷气式飞机起降的飞机跑道. 虽然利希尔岛上的火山目前不再活跃, 但仍有地热活动. 图 9 展示了 BC 浓度随时间的变化, BC 浓度的变化范围从低于仪器检出限到 $110 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 从图中可以看出, 绝大部分 BC 浓度数据都处于开阔大洋 BC 自然背景浓度范围内 ($\leq 50 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$), 除了图 9 中灰色区域所示的一些相对高的 BC 浓度. 图 10(a) 和图 10(b) 展示了所有 TrajStat 软件可计算的五天气团后向轨迹



图中灰色区域囊括了一段 BC 浓度较高的区间.

图 9 消除船基排放影响后热带西太平洋海域 BC 浓度随时间的变化图

Fig. 9 The temporal variations of BC concentrations after excluding the data potentially affected by ship emission in the Western Pacific Ocean

反演结果 (图 10(b) 为图 10(a) 中黑色虚线方框内的放大图), 从中可以看出, 所有的气团都起源于自然背景浓度较低 的开阔大洋——热带西太平洋. 在图 10(b) 中用红色实线重点突出了两条特殊的气团轨迹, 这两条轨迹显示气团在接近“雪龙”号所在位置的途中经过了利希尔岛 (如图 10(b) 所示), 而且气团经过利希尔岛时高度很低, 几乎是贴近地表 (如图 10(c) 及图 10(d) 所示). 因此, 利希尔岛上的人为活动和地热活动排放的 BC 很有可能随着气团传输到了“雪龙”号所在的位置. 图 9 灰色区域内的 BC 浓度高值正出现在受到利希尔岛气团影响的时间段. 因此图 9 灰色区域内测得的 BC 浓度受到了利希尔岛上人为和自然活动的影响. 在识别出这些被利希尔岛上陆源 BC 排放影响的时间段之后, 本研究通过排除掉在这些时间段内测得的 BC 浓度, 也就是排除图 9 灰色区域所囊括的 BC 浓度高值之后, 得到这一热带西太平洋海区上空 BC 浓度的背景值为 $17.80 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3} \pm 32.71 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 也处在开阔海洋大气 BC 浓度的范围内, 背景 BC 的干沉降通量约为 $61.52 \sim 3.758.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 也远远高于模型估算的 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ($0^{\circ} \sim 30^{\circ}\text{S}$) [5].

3 结论

(I) 罗斯海海域上空 BC 浓度反映了南极大陆较低的自然背景 BC 浓度.

(II) 热带西太平洋上空 BC 浓度的上升与陆地来源的 BC 有关.

(III) 中山站至法国站海域、罗斯海区和热带西太平洋海区海洋大气 BC 浓度背景值分别为 $7.86 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3} \pm 15.52 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $4.73 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3} \pm 11.52 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $17.80 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3} \pm 32.71 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 从热带到高纬明显减少. 尽管浓度相对较低, 但热带地区明显受到了人为活动的影响. 通过观测估算的 BC 干沉降通量远远高于模型的估算.

(IV) 本研究调查区域有限, 由于黑碳具有重要

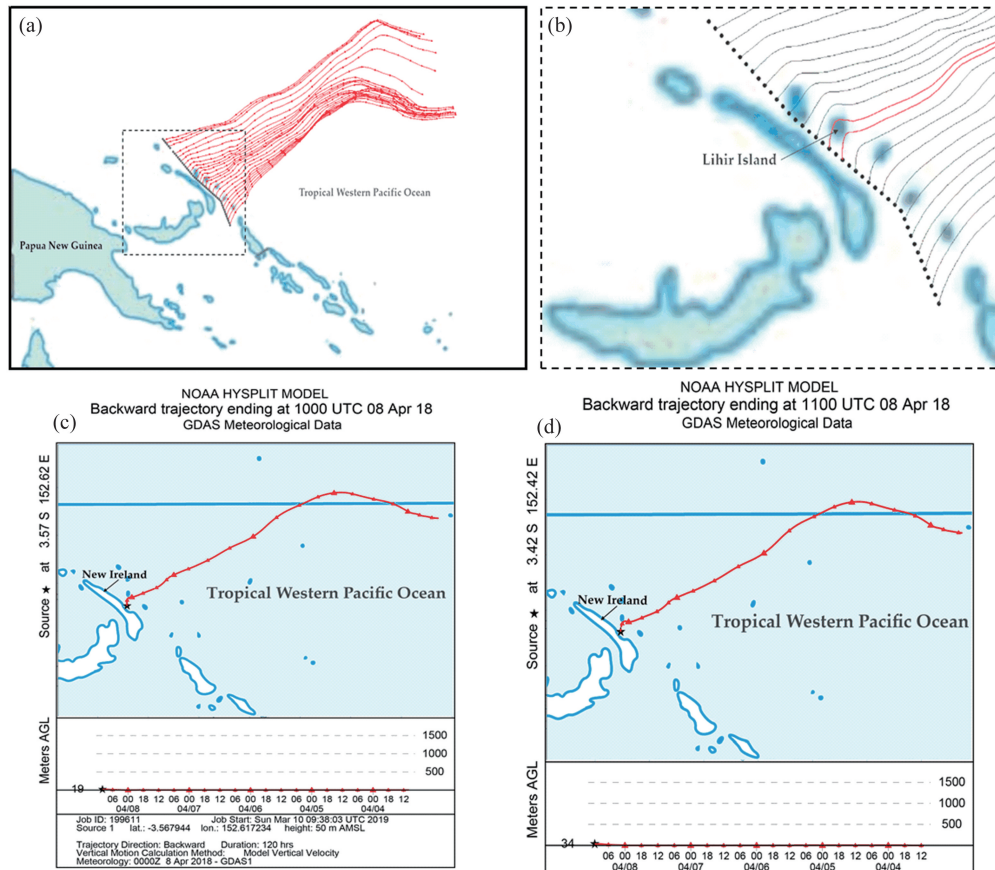


图 10 消除船基排放影响后五天气团后向轨迹反演结果图

Fig. 10 Five-day air mass backward trajectories

的辐射强迫效应,对于海洋黑碳气溶胶的研究还需要其他海区大范围的观测数据.另外,在利用船基平台进行大气观测时,需要避免并排除船基排放的污染.

参考文献(References)

- [1] BOND T C, DOHERTY S J, FAHEY D W, et al. Bounding the role of black carbon in the climate system; A scientific assessment [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(11): 5380-5552.
- [2] BODHAINE B, HARRIS J, OGREN J, et al. Aerosol optical properties at Mauna Loa Observatory: Long-range transport from Kuwait? [J]. *Geophysical Research Letters*, 1992, 19(6): 581-584.
- [3] BOND T C, BERGSTROM R W. Light absorption by carbonaceous particles: An investigative review [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2006, 40(1): 27-67.
- [4] 曹军骥, 占长林. 黑碳在全球气候和环境系统中的作用及其在相关研究中的意义 [J]. *地球科学与环境学报*, 2011, 33(2): 177-184.
- [5] JURADO E, DACHS J, DUARTE C M, et al. Atmospheric deposition of organic and black carbon to the global oceans [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(34): 7931-7939.
- [6] 汤洁, 卞林根, 颜鹏, 等. 中国第三次北极科学考察走航路线上空黑碳气溶胶的观测研究 [J]. *海洋学报*,

2011, 33(2): 60-68.

- [7] XING J, BIAN L G, HU Q H, et al. Atmospheric black carbon along a cruise path through the arctic ocean during the fifth chinese arctic research expedition [J]. *Atmosphere*, 2014, 5(2): 292-306.
- [8] MOORTHY K K, SATHEESH S K, BABU S S, et al. Large latitudinal gradients and temporal heterogeneity in aerosol black carbon and its mass mixing ratio over southern and northern oceans observed during a trans-continental cruise experiment [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(14): 337-349.
- [9] BODHAINE B A. Aerosol absorption measurements at Barrow, Mauna Loa and the south pole [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, 100 (D5): 8967-8975.
- [10] WOLFF E W, CACHIER H. Concentrations and seasonal cycle of black carbon in aerosol at a coastal Antarctic station [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, 103(D9): 11033-11041.
- [11] HANSEN A D A, LOWENTHAL D H, CHOW J C, et al. Black carbon aerosol at McMurdo station, Antarctica [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2001, 51(4): 593-600.
- [12] CHAUBEY J P, MOORTHY K K, BABU S S, et al. Black carbon aerosols over coastal Antarctica and its scavenging by snow during the Southern Hemispheric

- summer [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115: D10210.
- [13] WELLER R, MINIKIN A, PETZOLD A, et al. Characterization of long-term and seasonal variations of black carbon (BC) concentrations at Neumayer, Antarctica [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(3): 1579-1590.
- [14] HE P Z, BIAN L G, ZHENG X D, et al. Observation of surface ozone in the marine boundary layer along a cruise through the Arctic Ocean: From offshore to remote [J]. *Atmospheric Research*, 2016, 169: 191-198.
- [15] PETZOLD A, SCHÖNLINER M. Multi-angle absorption photometry—a new method for the measurement of aerosol light absorption and atmospheric black carbon [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2004, 35(4): 421-441.
- [16] PETZOLD A, SCHLOESSER H, SHERIDAN P J, et al. Evaluation of multiangle absorption photometry for measuring aerosol light absorption [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2005, 39(1): 40-51.
- [17] WOOD M, BERESFORD N A, COPPLESTONE D. Limit of detection values in data analysis: Do they matter? [J]. *Radioprotection*, 2012, 46(6): S85-S90.
- [18] XIE Z, SUN L, BLUM J D, et al. Summertime aerosol chemical components in the marine boundary layer of the Arctic Ocean [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111: D10309.
- [19] WU X, LAM J C W, XIA C, et al. Atmospheric concentrations of DDTs and chlordanes measured from Shanghai, China to the Arctic Ocean during the Third China Arctic Research Expedition in 2008 [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(22): 3750-3757.
- [20] NOAA's Air Resources Laboratory. Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) [EB/OL]. [2020-02-15]. <https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>.
- [21] STEIN A F, DRAXLER R R, ROLPH G D, et al. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, 96(12): 2059-2077.
- [22] WANG Y, ZHANG X, DRAXLER R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2009, 24(8): 938-939.
- [23] PARUNGO F, NAGAMOTO C, ZHOU MY, et al. Aeolian transport of aerosol black carbon from China to the ocean [J]. *Atmospheric Environment*, 1994, 28(20): 3251-3260.
- [24] BAO H, NIGGEMANN J, LUO L, et al. Aerosols as a source of dissolved black carbon to the ocean [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 510-510.
- [25] DALSPØREN S, EIDE M, ENDRESEN Ø, et al. Update on emissions and environmental impacts from the international fleet of ships: the contribution from major ship types and ports [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9: 2171-2194.
- [26] ENDRESEN Ø. Emission from international sea transportation and environmental impact [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108: 4560.
- [27] EYRING V, ISAKSEN I S A, BERNTSEN T, et al. Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(37): 4735-4771.
- [28] LEE J D, MOLLER S J, READ K A, et al. Year-round measurements of nitrogen oxides and ozone in the tropical North Atlantic marine boundary layer [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114: D21302.
- [29] YU J, XIE Z Q, KANG H, et al. High variability of atmospheric mercury in the summertime boundary layer [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(1): 1-7.
- [30] LOHMANN R, JAWARD F M, DURHAM L, et al. Potential contamination of shipboard air samples by diffusive emissions of PCBs and other organic pollutants: Implications and solutions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(14): 3965-3970.
- [31] 付丹, 郑晓玲, 陈军辉, 等. 中国东海至南大洋航线海洋近地层大气 NO_x 分布特征 [J]. *环境科学研究*, 2018, 31(2): 231-238.
- [32] CORBETT J J, FISCHBECK P. Emissions from ships [J]. *Science*, 1997, 278(5339): 823-824.
- [33] COOPER D. Exhaust emissions from ships at berth [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(27): 3817-3830.
- [34] SAMSET B H, MYHRE G, HERBER A, et al. Modelled black carbon radiative forcing and atmospheric lifetime in AeroCom Phase II constrained by aircraft observations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(22): 12465-12477.
- [35] STITH J L, RAMANATHAN V, COOPER W A, et al. An overview of aircraft observations from the Pacific Dust Experiment campaign [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114: D05207.