

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

汤洁¹, 卞林根^{1*}, 颜鹏¹, 逯昌贵¹

(1. 中国气象局 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要: 2008年7月至9月, 中国第3次北极科学考察期间, 在走航路线上利用黑碳仪对黄海—日本海—鄂霍次克海—西北太平洋—白令海—楚科奇海—加拿大海盆等海区上的黑碳气溶胶浓度进行连续观测, 最北观测位置达 $85^{\circ}21.3'N$ 。观测结果显示, 北冰洋是全航线黑碳浓度最低的海区, 平均浓度为 $(5.3 \pm 3.7) \text{ ng/m}^3$; 在 $70^{\circ}N$ 以北的海区范围内黑碳浓度纬向梯度分布不显著。后向气流轨迹的分析显示, 夏季期间环北冰洋陆地向北冰洋的输送作用很弱, 是北冰洋海区内大气黑碳浓度较低、变化幅度较小、纬向分布不明显的主要原因。日本海、黄海海区的黑碳浓度比较接近, 也是整个航线各海区中最高的。7月份去程期间, 这两个海区的黑碳浓度均为 $140 \sim 160 \text{ ng/m}^3$; 9月回程期间为 $400 \sim 500 \text{ ng/m}^3$, 约为7月份的3倍。对不同海区黑碳浓度差异的分析以及后向气流轨迹的分析均显示, 陆源输送是影响海洋大气中黑碳气溶胶浓度的关键因素。

关键词: 第3次北极考察; 黑碳; 气溶胶; 观测

中图分类号: P736.21

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2011)02-0060-9

1 引言

大气中的气溶胶以直接和间接两种方式影响全球气候: 通过散射和吸收辐射来增加地球的行星返照率, 称之为气溶胶的直接气候效应, 而通过改变云的光学特性和云寿命间接影响气候, 则称之为气溶胶间接气候效应^[1-2]。与温室气体不同, 气溶胶对全球和区域气候变化的影响具有更大的不确定性。这种不确定性源于气溶胶的组成、物理化学性质、时空分布的复杂性和多变及对全球和区域气候系统的多种并存的辐射强迫形式^[3-4]。相对于陆地上较多观测站网的长期观测结果而言, 海洋上的观测资料主要是通过卫星观测获取^[5-6]。因此, 对海洋上的直接在线观测对于增进我们对广大海洋地区气溶胶物理化学性质及其辐射强迫效应的了解来说显得弥足珍贵。

黑碳(black carbon, BC)是气溶胶中最主要的光学吸收性成分, 在环境大气中BC的质量浓度一般不会超过气溶胶总质量浓度的5%, 但是由于BC的质量吸收系数比其他气溶胶组分大2到3个数量级, 因而BC对气溶胶的气候辐射强迫效应有着重要的影响^[4, 7-8]。研究表明, BC具有正的辐射强迫作用, BC同硫酸盐等气溶胶混合在一起还会极大地减弱气溶胶的负辐射强迫, 在地表反照率较大的北半球地区这种作用尤为明显^[9]。根据IPCC第4次评估报告^[4]给出的最新估算, 化石燃料来源的BC直接辐射强迫为 $(0.20 \pm 0.15) \text{ W/m}^2$; 生物质燃烧的BC直接辐射强迫为 $(0.03 \pm 0.12) \text{ W/m}^2$; 在极地和冰雪地区, 沉降的BC明显改变冰雪反照率, 导致极地冰雪、冰川的加速消融, 由此产生 $(0.1 \pm 0.1) \text{ W/m}^2$ 的辐射强迫作用; 三者合计的辐射强迫作用为 0.33 W/m^2 , 已经超过蒙特利尔公约限制的氟利

收稿日期: 2010-07-18; 修订日期: 2011-01-06。

基金项目: 中国第四次国际极地年行动(IPY); 中国第三次北极科学考察项目资助。

作者简介: 汤洁(1958—), 男, 上海市人, 研究员, 硕士生导师, 主要从事大气本底环境研究。E-mail: Tangj@cans.cma.gov.cn

* 通信作者: 卞林根。E-mail: blg@cans.cma.gov.cn

昂气体,成为仅次于二氧化碳、甲烷的第3位温室效应的大气成分。近年来的研究指出,在全球升温的背景下,北极的增温速度是全球平均的2倍^[10],北极海冰的范围快速缩小^[11],包括黑碳气溶胶在内的多种短寿命大气成分被认为是导致北极地区以超出全球平均速度快速增温的重要原因^[12-13]。据估计^[13],在北极地区对流层底层黑碳气溶胶的直接/间接辐射强迫作用在春季最大可达到 1.6 W/m^2 ,在夏季可达到 1.0 W/m^2 ;黑碳在冰面上的沉降引起雪冰表面反照率下降所导致的辐射强迫在春季和夏季则分别达到 0.53 和 0.21 W/m^2 。由此,2008和2009年的AMAP(Arctic Monitoring and Assessment Programme)报告(<http://www.amap.no/documents>)认为,黑碳对北极地区的辐射强迫增温作用是其全球平均的近4倍,达到 $0.6 \text{ }^\circ\text{C/a}$,是该地区范围内仅次于二氧化碳的增温效果最强的大气成分。因此,自20世纪七八十年代“北极霾”问题被关注以来,黑碳再次成为被广泛关注的影 响北极地区气候环境快速变化的关键角色^[14]。

我国自1999年开展北极科学考察以来,国内研究者对北极航线上包括气溶胶在内的多种大气成分进行了观测研究^[15-17]。在我国第3次北极科学考察期间,笔者利用黑碳仪对走航路线上的海洋大气中的黑碳气溶胶浓度进行了连续在线观测,以获取了不同海区的观测数据,为进一步深入了解北极地区气候环境的快速变化机理提供第一手的资料。本文报告了全航线的观测结果,比较了不同海区黑碳气溶胶浓度变化特征及其差异,并应用后向气流轨迹方法对影响不同海区的陆源输送过程进行分析和讨论。

2 观测

2.1 航行线路

我国第3次北极科学考察中,“雪龙”船航行12000余海里(航线图见图1),历时76天,可分三个航行阶段^[18]。第一航段:上海—Nome港(7月11日—7月29日),途经对马海峡、宗谷海峡,穿越黄海、日本海、鄂霍次克海、西北太平洋、白令海。其间7月12和14日在长江口锚地和济州岛各停留了约1d,进行出航休整和接收直升机;7月19日前为航渡阶段,之后在白令海区展开了连续的海洋调查作业。第二航段:Nome港—北冰洋—Nome港(7月31日—9月9日),“雪龙”船2次穿越白令海峡,于8月31日航行至整个航次的最北点($85^\circ 21.3' \text{ N}$,

$147^\circ 27.2' \text{ W}$),其间在白令海、楚科奇海、加拿大海盆开展海洋调查和冰站考察作业,8月21~29日,“雪龙”船驻停在北纬 85° 的冰区开展了长期冰站的综合考察作业。第三航段:Nome港—上海(9月11日—9月24日),“雪龙”号途径津轻海峡、对马海峡,穿越白令海、西北太平洋、日本海、黄海,其间于9月20日在济州岛海区短暂停留,送直升机离船,之后于9月22日抵达长江口锚地,24日停靠上海基地码头。

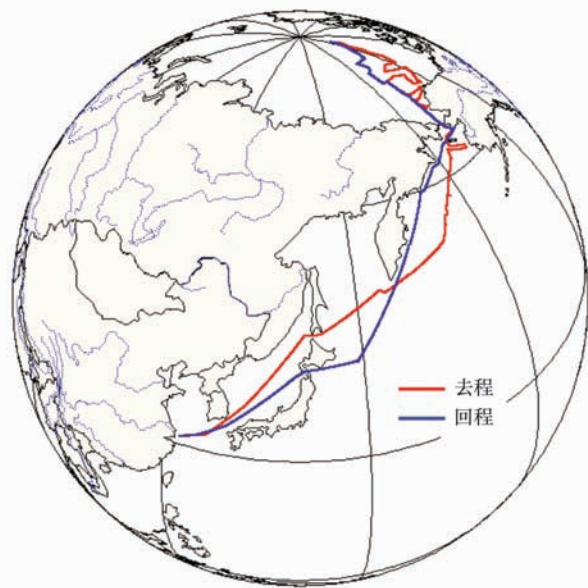


图1 第3次北极科学考察走航路线示意图

2.2 观测仪器

观测仪器为美国玛基科学公司(Magee Scientific Co.)生产的AE31型黑碳仪。该仪器是一种基于光学测量原理的吸收性气溶胶测量设备,用7个波长的LED光源(中心波长分别为370, 470, 520, 590, 660, 880, 950 nm)照射在采集的石英滤膜上的气溶胶样品,在假定气溶胶中非黑碳成分的光学吸收与黑碳成分相比可以忽略的前提下,根据石英滤膜上气溶胶样品光学衰减的时间增量、该时段的大气采样体积和黑碳质量吸收系数,计算得到实时的大气黑碳浓度^[7]。为减少石英滤膜上的气溶胶样品遮蔽效应对观测的影响,设定更换滤膜的光学衰减阈值为75%,并且每次换膜时对仪器的光源稳定性均进行检测。整个观测期间,黑碳仪的光源稳定性指标均符合正常范围。为保证在海上低黑碳浓度环境下观测的稳定性,设定黑碳仪的采样体积流速为 $8\sim 9 \text{ L/min}$ 。仪器均安装在“雪龙”船艙楼驾驶

室下面的气象室内,采用 0.95 cm 口径的专用塑料管,采样管伸出至驾驶室顶部采样观测甲板的左后侧,进气口高出甲板护栏约 1.5 m。

2.3 数据处理

在起止于长江口锚地的 72 天航行期间,共获得 1 718 h 的黑碳仪观测数据,原始数据的记录间隔为 5 min。在“雪龙”船 2 次停靠诺姆港以及在海洋作业期间,“雪龙”船处于低速航行、停滞或转向状态时,可以较清晰地看出观测数据系列中的短周期(一般在 0.5 h 以内)的高浓度峰或多个连续的、剧烈起伏的高浓度峰。除去靠近陆地或繁忙航线的海区外,海洋上不存在黑碳的直接排放源,主要源自于陆地源排放的大量黑碳,经过长距离的输送,在海洋上空达到相对均匀的混合状态,其浓度变化平稳。观测船只自身排放的烟羽,对观测来说是一种小时间尺度的正扰动,它会造成观测到的黑碳浓度短时剧烈升高,甚至可以达到其前后平稳值的上百倍。根据船只自身排放污染的上述特点,用“平滑基线”作为主要判别依据,并参考“雪龙”船的航速、航向、相对风速数据,识别船舶排放对观测数据的影响,从原始记录的 5 min 数据进行筛选和剔除。剔除异常数据后,再进行小时平均值计算。5 min 数据少于 4 个时,不计算小时平均浓度。最终得到 1 536 h 的黑碳浓度观测数据,数据的总时间完整率约为

89.5%。

3 结果与讨论

3.1 小时平均浓度的变化

图 2 显示了全航线上黑碳气溶胶的小时平均浓度。由于在 2.3 节所提及的数据质量控制步骤中删除的 10.5% 数据基本上都是“雪龙”船海上作业停泊、低速航行等期间的数据,因此图 2 显示的全航线小时平均黑碳浓度的空间连续性还是完整的。从总体上看,尽管航线上黑碳气溶胶小时浓度的变化幅度很大,但是变化比较连续,未出现跳跃式的大幅变化,说明海洋大气的均匀混合程度较好。

为方便统计和比较起见,按照航线的地理走向和黑碳浓度的变化特征,划分出不同海区(见表 1)。考虑到白令海峡附近的陆地对观测的影响,将 72°N 以南海区作为白令海峡海区与白令海一并统计,此外,在回程期间,注意到白令海和堪察加半岛以东的航线距离陆地都比较近,因此在表 1 中将从诺姆港出发后至堪察加半岛尖端的航线作为 1 个海区考虑;由于在北海道南侧海域黑碳浓度已经明显受到日本列岛的输送影响而升到较高浓度水平,因此仅将堪察加半岛尖端至 150°E 附近的航线作为西北太平洋海区统计,而将 150°E 以西的航线列入日本海海区进行统计。

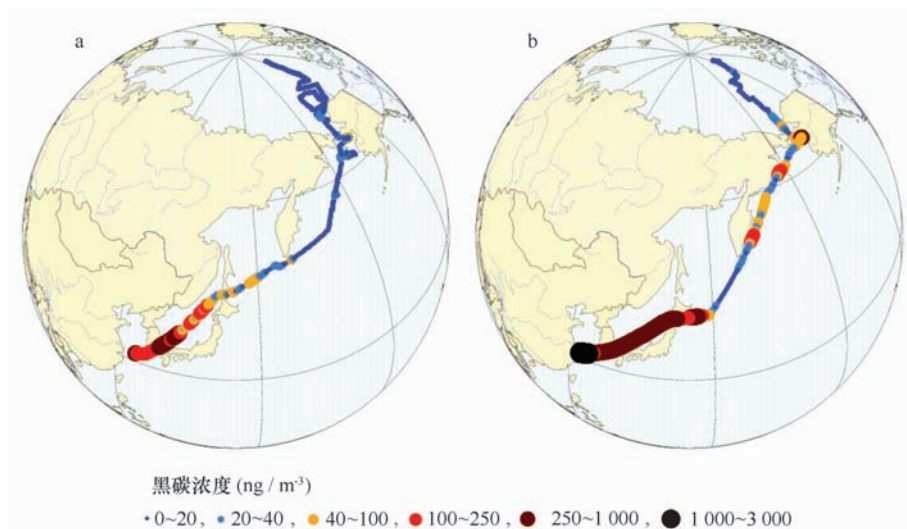


图 2 走航线路上黑碳气溶胶小时平均浓度

a. 去程(2008 年 7 月 12 日—8 月 19 日), b. 回程(2008 年 8 月 20 日—9 月 22 日)

按照表 1 的海区划分,将不同海区的黑碳浓度

的平均值、中值及标准差描绘于图 3,可以看出,不

表1 走航线路上的海区范围及黑碳浓度

序号	海区	航线起止时间及经纬度		黑碳浓度、中值/ $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$
1	黄海	起	7月12日12:00, 31.07°N, 122.65°E	140.5±41.5, 125.3
		止	7月13日11:00, 34.03°N, 128.48°E	
2	日本海	起	7月13日12:00, 34.23°N, 128.70°E	158.7±121.2, 122.9
		止	7月15日21:00, 45.75°N, 141.12°E	
3	鄂霍次克海	起	7月15日22:00, 45.73°N, 141.47°E	27.7±14.4, 26.9
		止	7月17日21:00, 50.18°N, 157.37°E	
4	西北太平洋	起	7月17日22:00, 50.27°N, 157.78°E	9.9±9.5, 7.6
		止	7月19日5:00, 53.20°N, 169.65°E	
5	白令海	起	7月19日6:00, 53.28°N, 169.98°E	13.4±7.2, 12.9 ¹⁾
		止	7月27日12:00, 64.35°N, 170.15°W	
6	诺姆港	起	7月27日13:00, 64.33°N, 170.02°W	23.3±10.3, 22.3
		止	8月1日5:00, 64.45°N, 165.48°W	
7	白令海及白令海峡	起	8月1日6:00, 64.42°N, 165.95°W	13.4±7.2, 12.9 ¹⁾
		止	8月5日19:00, 71.95°N, 168.90°W	
8	北冰洋	起	8月5日20:00, 72.00°N, 168.98°W	6.4±3.9, 5.6 ²⁾
		止	8月20日17:00, 84.60°N, 144.90°W	
9	冰站	起	8月20日18:00, 84.63°N, 145.30°W	3.0±1.7, 2.5
		止	8月30日18:00, 85.02°N, 146.40°W	
10	北冰洋	起	8月30日19:00, 84.93°N, 146.48°W	6.4±3.9, 5.6 ²⁾
		止	9月7日16:00, 71.85°N, 168.52°W	
11	白令海及白令海峡	起	9月7日17:00, 72.00°N, 168.98°W	25.1±15.3, 26.3
		止	9月9日19:00, 64.42°N, 165.90°W	
12	诺姆港	起	9月9日20:00, 64.43°N, 165.83°W	85.9±70.9, 46.0
		止	9月11日4:00, 64.45°N, 165.52°W	
13	白令海及堪察加半岛沿岸	起	9月11日5:00, 64.40°N, 165.68°W	51.2±38.1, 39.0
		止	9月15日5:00, 50.15°N, 157.53°E	
14	西北太平洋	起	9月15日6:00, 49.95°N, 157.30°E	14.9±5.6, 14.6
		止	9月16日17:00, 42.70°N, 149.50°E	
15	日本海	起	9月16日18:00, 42.50°N, 149.32°E	396.5±273.2, 447.0
		止	9月20日12:00, 34.03°N, 129.33°E	
16	黄海	起	9月20日13:00, 33.88°N, 129.08°E	500.2±313.2, 384.3
		止	9月21日8:00, 31.65°N, 124.23°E	
17	长江口锚地	起	9月21日11:00, 31.15°N, 122.63°E	2112±280, 2074
		止	9月22日6:00	

注1):5海区 and 7海区合并统计;2)8海区和10海区合并统计。

同海区的黑碳浓度差异比较明显。北极冰站海区的黑碳浓度平均值(± 1 倍标准差范围,下同)和中值分别为(3.0 ± 1.7)和 2.5 ng/m^3 ,北冰洋海区的黑碳浓度平均值和中值分别为 6.4 ± 3.9 和 5.6 ng/

m^3 ;将上述两海区合并计算,其平均黑碳浓度为(5.3 ± 3.7) ng/m^3 ,中值浓度为 4.4 ng/m^3 。长江口锚地的黑碳浓度为全航线最高,平均值和中值分别达到了2112和2074 ng/m^3 ,其浓度与位于我国

长江三角洲地区的陆地本底站临安的观测结果相差不多^[19]。其他海区黑碳浓度范围的顺序(由低到高)大体如下:去程(7月)西北太平洋海区的黑碳浓度平均值和中值分别为 (9.9 ± 9.5) 和 7.6 ng/m^3 ;去程(7月)白令海区和回程(9月)西北太平洋海区的黑碳浓度平均值和中值均为 $13 \sim 15 \text{ ng/m}^3$;去程(7月)诺姆港锚地、回程(9月)白令海峡海区、去程(7月)鄂霍茨克海区的黑碳浓度的平均值和中值均为 $20 \sim 30 \text{ ng m}^{-3}$;回程期间(9月)的堪察加半岛沿岸和诺姆港锚地海区黑碳浓度的平均值和中值分别在 $50 \sim 90$ 和 $40 \sim 50 \text{ ng/m}^3$ 。黄海和日本海的黑碳浓度仅次于长江口锚地海区,去程(7月)的平均浓度分别为 (140.5 ± 41.5) 和 $(158.7 \pm 121.2) \text{ ng/m}^3$,中值浓度为 125.3 和 122.9 ng/m^3 ;回程(9月)的平均浓度分别为 (500.2 ± 313.2) 和 $(396.5 \pm 273.2) \text{ ng/m}^3$,中值浓度为 384.3 和 447.0 ng/m^3 ,黄海和日本海的平均黑碳浓度与我国内陆本底地区的瓦里关山大气中的黑碳浓度相近^[20]。在所有海区中,去程期间在西北太平洋海区观测的黑碳浓度波动范围相对较大, ± 1 倍标准差的范围已经超过1个数量级,这可能是该海区出现的短时强降水天气对大气中黑碳颗粒有效冲刷导致黑碳浓度短时下降。其他海区的黑碳浓度的波动范围相对稳定, ± 1 倍标准差的范围基本上都小于1个数量级。

关于海洋上空的黑碳气溶胶直接观测的报道很少,在2001年春季的亚洲气溶胶试验期间(ACE-Asia),美国的“Ronald H. Brown”观测船曾在靠近日本九州附近的黄海、日本海中部和南部的海区进行过有机碳/元素碳(OC/EC)的观测,报告这些海区的元素碳浓度约为 $20 \sim 50 \text{ ng/m}^3$ ^[21]。一般情况下元素碳观测结果要低于黑碳观测结果1倍以内,两者数值不能直接比较,但是该报告的观测结果与本文得到的夏季(7月)观测结果比较接近,而与秋季的观测结果相差较大。

3.2 陆源输送的影响

黑碳气溶胶来源于含碳物质的燃烧,是典型的陆源性气溶胶。除船舶航行的孤立排放外,海洋上不存在大规模的黑碳排放源,因而陆源输送是影响海洋大气黑碳气溶胶的关键因素,而陆源气溶胶向海洋的输送往往受季风等环流形势变化的影响,存在显著的季节性变化特征^[22-23]。为了考察陆地输送对航线上黑碳气溶胶浓度变化的影响,应用HY-SPLIT 4.9模式标准程序和美国NOAA的NCEP

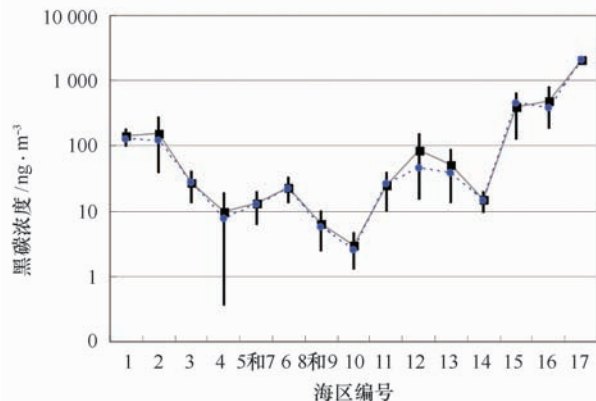


图3 不同海区的黑碳浓度

—■—平均值, —●—中值。垂直实线为1倍标准差范围。

海区编号见表1

北半球再分析气象数据(<http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>),计算了航线上00:00, 03:00, 06:00, 09:00, 12:00, 15:00, 18:00, 21:00整点时刻的后向气流轨迹。起始计算高度为50 m,后推时间长度为7 d。从图4的后向气流轨迹可以清晰看出不同海区受陆源输送影响的程度不同。

除了北冰洋海区(包括北极冰站海区)外,去程和回程航线上的黑碳浓度存在较大幅度变化,这种变化中既有航线位置变化的原因,也有季节改变的原因。对比去程和回程北冰洋以外海区的黑碳浓度可以看出,同样的航线,回程期间的黑碳浓度要高于去程,如在黄海、日本海、白令海(及堪察加半岛以东海区)等海区,尤其是日本海和黄海的这种对比更加明显。去程途经日本海和黄海的时间是7月,夏季风强盛,陆地向海洋的输送较弱,而回程已经进入9月,夏季风已经减弱或基本消退,因此陆地向海洋的输送作用更加明显。对比图4a和c,图4b和d 7和9月期间的后向气流轨迹图也可以看到,从黄海到白令海峡间的多段航线,在9月回程期间要较7月去程受到更多的陆源输送影响。例如:7月份黄海和日本海航线上的后向轨迹落点多数在海洋区域,只有极少数落点经过朝鲜半岛、日本列岛和俄罗斯远东陆地,而在9月份期间,黄海和日本海航线上的后向轨迹落点中有相当部分经过日本列岛、我国东部长江三角洲沿海地区和俄罗斯远东陆地,尤其是日本列岛的气团影响非常显著。因此,9月份日本海和黄海海区的黑碳浓度比7月份更多地受到了陆地特别受日本列岛的输送影响。值得注意的是,尽管7和9月期间的黄海、日本海黑碳浓度有较明显

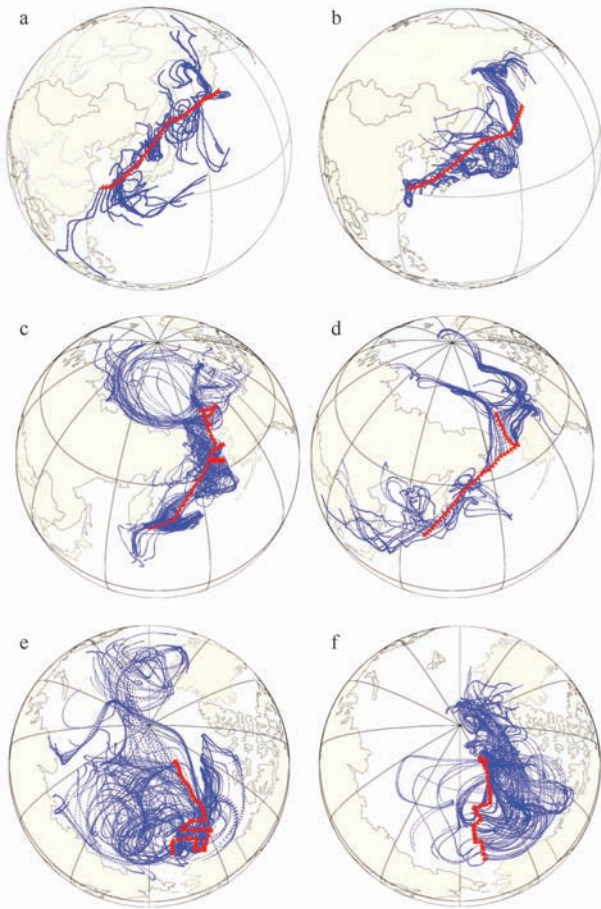


图4 不同海区的(7 d)后向气团轨迹

a. 去程 1, 2, 3, 4 海区; b. 回程 14, 15, 16, 17 海区; c. 去程 5, 6, 7 海区; d. 回程 11, 12, 13 海区; e. 去程 8 海区; f. 9, 10 海区

的差别,9月回程期间的黑碳平均浓度或中值浓度为7月去程时的3倍或以上,但是在同一期间内2个海区的黑碳浓度十分接近,航线上的黑碳浓度在2个海区内的空间差异较小,这种情况与在陆地上经常观测到的较大的空间浓度梯度情况形成较鲜明的对照,说明虽然这两个海区受周边的我国、日本、韩国以及俄罗斯远东地区的影响各不相同,而且不同的陆地区域其黑碳排放强度也不尽相同,经过一定距离的海上输送、混合过程后,黄海和日本海上的黑碳气溶胶浓度已经具有类似的季节变化特征和一定程度的整体变化特征。又如,从堪察加半岛尖端到诺姆港的这段航线上,7月份的后向轨迹落点多数在海洋区域,只有极少数落点经过俄罗斯东部的陆地边缘,而在9月份期间,后向轨迹落点中有相当部分经过俄罗斯东部的陆地边缘,包括勘察加半岛、库页岛、日本列岛北部及以西的陆地地区。

相邻的海区,越是靠近陆地的航线,其黑碳浓度越高,如在白令海,去程时航线偏东,而回程的航线非常靠近堪察加半岛,距离一般在数十至200 km以内,因而其陆地输送影响十分明显。与上面的例子相反,去程鄂霍次克海区的黑碳浓度平均为 27.7 ng/m^3 ,回程航线绕行鄂霍次克海外的西北太平洋海区,这时尽管已经是9月,但是该段航线的平均黑碳浓度也只有 14.9 ng/m^3 。

图4e,f显示,在夏季的8月,北极海区航线上的后向轨迹落点基本限制在北极地区范围以内,陆源输送的影响不明显,这说明北极锋面的存在大大地阻碍了中低纬度大气向北极低层大气的输送(AMAP Assessment 2006: Acidifying Pollutants, Arctic Haze, and Acidification in the Arctic. <http://www.amap.no/documents>)。

3.3 北极海区的黑碳浓度

从20世纪80年代起,在“北极霾”所引起的环境关注促使之下,北极地区一些国家的研究者在北极地区对大气中的黑碳浓度进行了飞机观测^[24-25],并且在一些地面站点开始了长期观测^[26-27]。我国的研究者在2005—2008年期间在北极地区的黄河站也进行了夏季的黑碳观测^[14]。此外还有研究者在格陵兰岛对雪冰内黑碳含量进行了测定^[12]。这些观测显示,北极地区大气中黑碳浓度季节变化较大,冬末春初的“北极霾”期间的浓度最高,夏季浓度最低。格陵兰岛冰雪内黑碳含量的观测显示,20世纪的初期北极大气中的黑碳浓度达到极值,之后呈现缓慢减小趋势。北极地区的三个长期陆地观测站(加拿大东北靠近格陵兰岛的Alert,阿拉斯加的Barrow和挪威北部的Zeppelin)的观测结果也显示,在近10~20 a内,北极地区的黑碳浓度基本上呈现不同程度的减小趋势。上述的这些观测基本上都局限在北极地区的大陆边缘或海岛范围,但对广大的北冰洋海区的观测却很少。

图5显示的是“雪龙”船8月5日至9月7日期间在 $71.5^{\circ}\sim 85.5^{\circ}\text{N}$, $143^{\circ}\sim 173^{\circ}\text{W}$ 航行过程中黑碳小时平均浓度数据。在 71.5°N 以北的北冰洋海域,小时平均黑碳浓度随纬度变化有一定幅度的起伏波动,说明北冰洋海洋大气中黑碳气溶胶的混合并非十分均匀。不过从总体上看,高于 10 ng/m^3 的数据量较少,为全部数据的1/10左右,小时平均黑碳浓度的最大值为 $1\sim 5 \text{ ng/m}^3$,累计超过5成。在

83°N 以北的海区, 小时平均黑碳浓度基本上都在 10 ng/m³ 以下。简单线性回归显示, 随纬度的增加

黑碳浓度呈现一定的递减趋势, 但是 R^2 低于 0.1, 说明黑碳浓度的纬向梯度分布不显著。

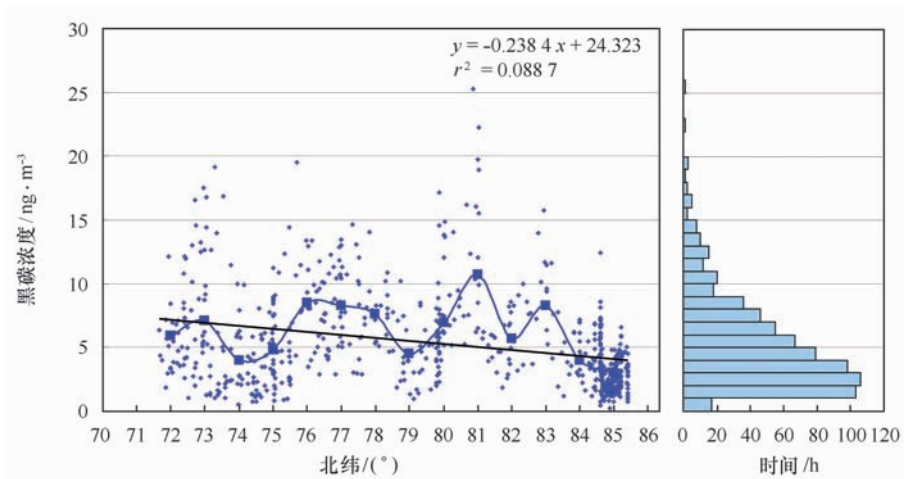


图 5 北极海区黑碳浓度的纬向分布

对北极地区的污染物输送路径的研究 (Arctic Monitoring and Assessment Programme, 1998. AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues. <http://www.amap.no/documents/>) 指出, 北极锋面的存在对低纬的污染物向北冰洋输送起着明显的阻碍作用。在冬季, 北极锋面可以最大扩展到 40°N 附近地区, 在夏季则收缩到 65~70°N 以北的范围。北极锋面范围的这种变化使冬季成为中纬度地区污染物向北冰洋输送的主要季节, 在夏季这种输送作用则明显减弱。还有研究者^[28] 利用拉格朗日方法计算了北极地区近地层大气与外界的交换过程, 指出北极地区大气的寿命 (即连续在 70°N 以北地区停留的时间) 在冬季较短, 平均在 1 周左右, 而在夏季则增加为平均 2 周左右; 从地域分布上看, 在 90°~180°W 扇区 (冬季) 和 90°~180°W 至 135°E 扇

区 (夏季) 内大气的寿命最长。第 3 次北极考察的北冰洋航线在 143°~173°W 扇区范围, 所航行海区内大气的寿命较长, 受低纬度输送的影响更小, 而且混合得更均匀, 因而本文观测的黑碳浓度很低, 并且没有明显的纬向浓度梯度。从图 4 显示的后向轨迹计算结果也同样可以看出北极锋面存在的影响。

表 2 列出了在北极地区的多个地面观测站的观测结果, 与本文在北冰洋获得的黑碳观测数据进行比较可以看出, 本文观测到的北冰洋海区黑碳浓度与阿拉斯加的 Barrow 站和北欧 Zeppelin 站的观测结果比较接近, 而加拿大 Alert 站 8 月份黑碳浓度则高于本文结果。由于北极锋面在格陵兰岛一侧有明显的退缩, Alert 站的观测结果更容易受到低纬度输送的影响。

表 2 北极地区及北冰洋海区的黑碳气溶胶浓度

站点	观测期间	黑碳浓度/ng·m ⁻³	文献
加拿大 Alert (82.45°N, 62.52°W, 210 m)	2004—2005 年, 全年	平均 52.2(±54.8), 中值 34.7	注 2)
	2004—2005 年, 8 月	平均 14.3(±14.0), 中值 9.2	
美国 Barrow ¹⁾ (71.32°N, 156.61°W, 210 m)	2006—2007 年, 全年	平均 14.1(±56.1), 中值 9.5	注 2)
	2006—2007 年, 8 月	平均 3.4(±5.7), 中值 2.1	
挪威 Zeppelin (78.90°N, 11.88°E, 474 m)	1998—2007 年, 全年	平均 39, 中值 27	[26]
	1998—2007 年, 6~9 月	平均 0~10	

续表 2

站点	观测期间	黑碳浓度/ $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$	文献
黄河站 (78.9°N, 11.9°E, 10 m)	2005—2008年, 夏季	15	[16]
北冰洋, 71.5°~85.5°N, 143°~173°W	2008年8月	纬度平均 6.4(3.0~10.7) 纬度中值 5.7(2.6~8.1)	本文

注:1)在 Barrow 站采用微粒碳吸收光度计(particle soot absorption photometer, PSAP)观测,与本表所列其他站点的观测仪器不同,直接测量的数据为气溶胶吸收系数(L_{abs}),为此根据该站所属的美国 NOAA/GMD 给出的经验换算公式: $E_{\text{BC}}(\text{ng}/\text{m}^3) = L_{\text{abs}}(\text{Mm}^{-1}) \times 1\,000 / 19(\text{m}^2/\text{g})$,将气溶胶吸收系数换算为等效黑碳浓度 E_{BC} ;2)世界气象组织气溶胶数据中心(WMO World Data Centre for Aerosols),<http://wdca.jrc.it/>.

4 结论

2008年7月至9月,我国第三次北极科学考察期间,对黄海—日本海—鄂霍次克海—西北太平洋—白令海—楚科奇海—加拿大海盆等海区上的黑碳气溶胶浓度进行连续观测,最北观测位置达 $85^{\circ}13.57'N$ 。

(1)北冰洋是全航线黑碳气溶胶浓度最低的海区,平均浓度为 $(5.3 \pm 3.7) \text{ng}/\text{m}^3$;在 $70^{\circ}N$ 以北的海区范围内黑碳气溶胶浓度纬向梯度分布不显著。分析后向气流轨迹显示,夏季期间环北冰洋陆地向北冰洋的输送作用很弱,是北冰洋海区内大气黑碳

气溶胶浓度的变化幅度较小、纬向分布不明显的主要原因。

(2)日本海、黄海海区的黑碳气溶胶浓度比较接近,也是整个航线各海区中最高的。7月份去程期间,这两个海区的黑碳气溶胶浓度为 $140 \sim 160 \text{ng}/\text{m}^3$;9月的回程期间为 $400 \sim 500 \text{ng}/\text{m}^3$,约为7月份的3倍。季风转换引起陆源输送强度的明显变化是导致去程和回程两个期间黄海、日本海区黑气溶胶浓度季节性差异明显的主要原因。

(3)对不同海区黑碳气溶胶浓度差异的分析以及后向气流轨迹的分析均显示,陆源输送是影响海洋大气中黑碳气溶胶浓度的关键因素。

参考文献:

- [1] HOUGHTON J T, MEIRA F L G, CALLANDER B A, et al. Climate Change 1995: The Science of Climate Change[R]. New York: Cambridge University Press, 1996: 572.
- [2] CHARLSON R J, SCHWARTZ HALES E J M. Climate forcing by anthropogenic aerosols[J]. Science, 1992, 255: 423—430.
- [3] COAKLEY J A, CESS R D. Response of the NCAR community climate model to the radiative forcing by the naturally occurring tropospheric aerosols[J]. J Atmos Sci, 1985, 42: 1677—1692.
- [4] IPCC. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing[R]//Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 163—167.
- [5] CLAEKE A D, CHARLSON R J. Radiative properties of the background aerosol: absorption component of extinction [J]. Science, 1985, 229(4710): 263—267.
- [6] DUBOVIK O, HOLBEN B, SMIRNOVA E T F, et al. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2002, 59: 590—608.
- [7] HANSEN A D A. The Aethalometer Manual [K]. Berkeley, California, USA: Magee Scientific, 2003.
- [8] IPCC. Climate change 2000: Chapter 6[R]//Radioactive Forcing of Climate Change. New York: Cambridge University Press, 2001: 25—26.
- [9] JACOBSON M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols [J]. Nature, 2001, 409: 695—697.
- [10] ACIA. Arctic Climate Impact Assessment [R]. New York: Cambridge Univ Press, 2005.
- [11] WANG M, OVERLAND J E. A sea ice free summer arctic within 30 years? [J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36: L07502, doi:10.1029/2009GL037820.
- [12] McCONNELL J R, EDWARDS R, KOK G L, et al. 20th-century industrial black carbon emissions altered arctic climate forcing [J]. Science, 2007, 317(5843): 1381—1384, doi:10.1126/science.1144,856.
- [13] QUINN P K, BATES T S, BAUM E, et al. Short-lived pollutants in the arctic: their climate impact and possible mitigation strategies

- [J]. *Atmos Chem Phys*, 2008,8:1723—1735.
- [14] 詹建琼,陈立奇,张远辉,等. 北极黑碳气溶胶研究现状和展望[J]. *极地研究*,2010,22(1):56—68.
- [15] 徐建中,孙俊英,秦大河,等. 中国第二次北极科学考察沿线气溶胶可溶性离子分布特征和来源[J]. *环境科学学报*, 2007,27(9):1417—1424.
- [16] 张东启,徐建中,汤洁,等. 中国第二次北极科学考察路线上温室气体瓶采样结果分析[J]. *冰川冻土*,2006,28(3):319—323.
- [17] 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):1131—1136.
- [18] 张海生. 中国第三次北极科学考察报告[R]. 北京:海洋出版社,2009.
- [19] 朱厚玲. 我国地区黑碳气溶胶时空分布研究[D]. 北京:中国气象局中国气象科学研究院,2003.
- [20] 汤洁,温玉璞,周凌日希,等. 中国西部大气清洁地区黑碳气溶胶的观测研究[J]. *应用气象学报*,1999,10(2):160—170.
- [21] QUINN P K, COFFMAN D J, BATES T S, et al. Aerosol optical properties measured on board the *Ronald H. Brown* during ACE—Asia as a function of aerosol chemical composition and source region[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004,109:D19S01, doi:10.1029/2003JD004010.
- [22] 刘毅,周明煜. 中国近海大气气溶胶的时间和地理分布特征[J]. *海洋学报*,1999,21(1):32—40.
- [23] 邓学良,潘德炉,何冬燕,等. 卫星遥感中国海域人为和沙尘气溶胶时空分布的研究[J]. *海洋学报*,2009,31(4):58—68.
- [24] GALLAWAT J N, WHELPDALE D M. WATOX—86 Overview and Western North Atlantic Ocean S and atmospheric budget[J]. *Global Biochem. Cycles*, 1987,1(4):261—282.
- [25] HANSEN A D A,NOVAKOV T. Aerosol black carbon measurements in the Arctic Haze during AGASP—II[J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1989,9:347—361.
- [26] ELEFTHERIADIS K, VRATOLIS S,NYEKI S. Aerosol black carbon in the European arctic: measurements at Zeppelin station, Ny—A° lesund, Svalbard from 1998—2007[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009,36:L02809, doi:10.1029/2008GL035741
- [27] SHARMA S, ANDREWS E, BARRIE L, et al. Variations and sources of the equivalent black carbon in the high Arctic revealed by long-term observations at Alert and Barrow: 1989—2003[J]. *J Geophys Res*, 2006,111: D14208, doi:10.1029/2005JD006581.
- [28] STOHL A. A one-year Lagrangian“climatology” of airstreams in the Northern Hemisphere troposphere and lowermost stratosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001,106:7263—7279.

The observational study of black carbon aerosol over the cruise during the Third National Arctic Research Expedition of China

TANG Jie¹, BIAN Lin-gen¹, YAN Peng¹, LU Chang-gui¹

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Aerosol black carbon concentration measured at deck level on board the R/V “Xuelong”, with an in-situ aethalometer, during the cruise of the Third National Arctic Research Expedition of China from 12 July to 22 September, 2008. The cruise starts and ends at Shanghai, at the northern most point of 85°13.57'N. The result shows that the surface concentration of black carbon in the Arctic Ocean is the lowest throughout the course, with the mean of $(5.3 \pm 3.7) \text{ ng/m}^3$. There is little meridional gradient of black carbon concentration observed in the Arctic Ocean north of 70°N. Back trajectory analysis indicates that the transportation from low latitude to the Arctic Ocean north of 70°N in summer results not only in low surface concentrations of black carbon, but also in a small variation and a very weak meridional gradient. The black carbon concentrations in surfaces of Huanghai Sea and the Sea of Japan are very close each other in both July and September. The black carbon concentration in September is in range of 400~500 ng/m^3 , which is 3 times of that in July, 140~160 ng/m^3 . The terrigenous transport from the northeast Asia land and Alaska is a crucial element to influence the level of black carbon concentration in the ocean.

Key words: third national arctic research expedition of China; black carbon; aerosol; observation