

基于飞机观测数据的黑碳全球分布

22307110359 李秋奇

1 概述

黑碳是大气气溶胶的重要组成部分，由于其物理性质具有很强的吸光性，故具有较强气候效应，是少数具有正辐射强迫的气溶胶。人类的工业活动、交通工具的排放与森林、草原的生物质燃烧事件都会向大气层中排放黑碳。大尺度模式无法准确地模拟全球黑碳的分布，在城市等人为因素与其他排放源显著的区域更加准确。大多数研究采用的是单一数据集与地面观测网络的数据，因此我们的研究目的是利用多个数据集来研究更大尺度上黑碳气溶胶浓度的垂直廓线与全球整体分布特征。

研究指出，黑碳主要是在燃料有机组分的不完全燃烧中产生，并碰并形成纳米单质碳小球聚合体，模拟微物理过程的全球气溶胶模型预测大多数黑碳会在1到5天内与其他物质混合，黑碳可以随着大气环流输运，研究表明人为源石海洋气溶胶碳质组分的主要来源，黑碳生物化学惰性极强，长期存在在各个圈层中。

除了地面观测网络长期直接观测黑碳浓度外，气象卫星通过反演得到粗分辨率的黑碳浓度，全球数值模式也可以获得较短时间内精度较高的黑碳浓度数据，以及飞机观测活动可以直接获得高空中的黑碳浓度，可以提供了垂直方向的浓度分布。本研究主要使用了大量飞机观测活动的数据以及1个地面台站数据以比较。

2 数据与方法

2.1 数据来源

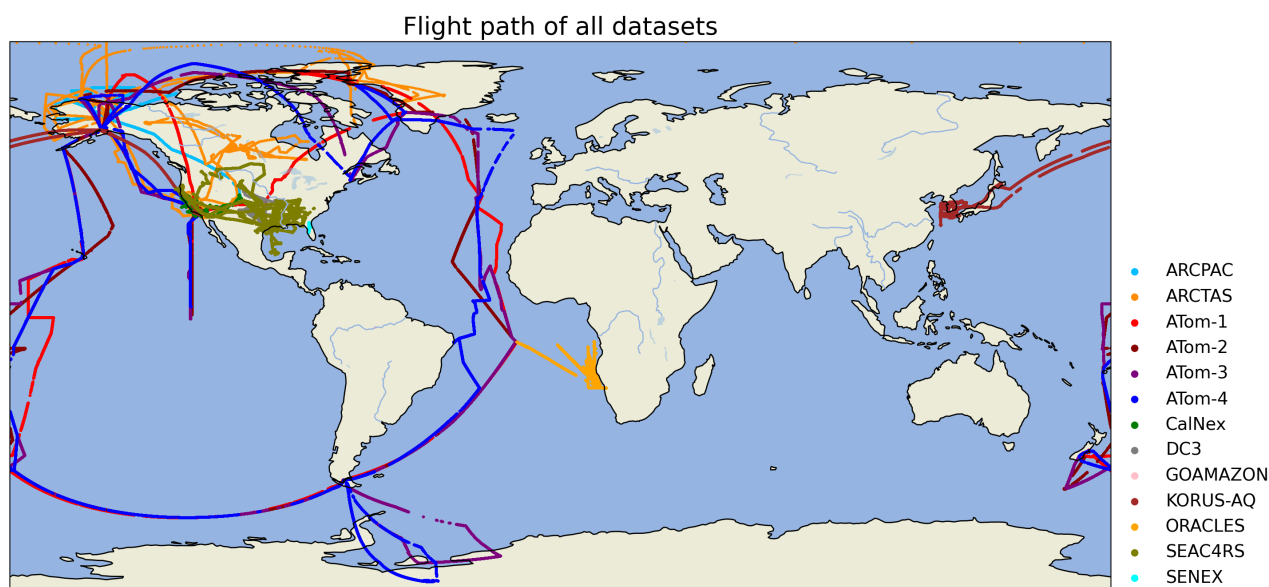


图1：飞机观测活动路径，每个观测活动用不同的颜色标出，利用对所有经纬点的散点表示出路径或覆盖范围。

本研究综合了2008年到2018年间的11次飞机观测活动和1个地面观测活动，这是一份时间跨度和空间覆盖度相当大的组合，图1显示了这些活动的飞行轨迹（每个活动在本研究中使用同一颜色上色），表1列出了每个活动的相关信息，包括观测活动涵盖的地点、时间、仪器与该活动主要信息的参考文献，除了GOAMAZON是地面台站外均为飞机观测活动，约一半集中于北美，其他观测覆盖了太平洋、大西洋和东亚、西非。这些观测基本集中在春夏季进行，使用SP2（单粒子颗粒光度计，Single Particle Soot Photometer）对黑碳直接进行测量，其中3个观测活动使用两台在不同相对湿度下并行运行的SP2，称为Dual-SP2（HD-SP2）。

数据集中所有黑碳气溶胶的测量值都以标准温度和压力下进样的质量浓度给出，单位为 ng/m^3 ，所有观测值都以1分钟平均值的时间分辨率报告。

表1：观测活动的数据集

Campaign	Location & Dates	Technique & Reference
ARCPAC	Arctic & North America (12 April-23 April 2008)	SP2 (Brock et al., 2011)
ARCTAS	Arctic & North America (18 March-13 July 2008)	SP2 (Jacob et al., 2010)
ATom-1	Pacific & Atlantic & North America (29 July-23 August 2016)	SP2 (Wofsy et al., 2018)
ATom-2	Pacific & Atlantic & North America (26 January-21 February 2017)	SP2 (Wofsy et al., 2018)
ATom-3	Pacific & Atlantic & North America (28 September-27 October 2017)	SP2 (Wofsy et al., 2018)
ATom-4	Pacific & Atlantic & North America (24 April-21 May 2018)	SP2 (Wofsy et al., 2018)
CalNex	West North America (30 April-22 June 2010)	SP2 (Ryerson et al., 2013)
DC3	North America (18 May-22 June 2012)	HD-SP2 (Barth et al., 2014)
GOAMAZON	Amazon (17 February-19 October 2014)	SP2 (Martin et al., 2014)
KORUS-AQ	Korean Peninsula & Northwest Pacific (26 April-18 June 2016)	HD-SP2 (Crawford et al., 2018)
ORACLES	West Africa (31 August-27 September 2016)	SP2 (Marilyn et al., 2018)
SEAC4RS	South North America (6 August-23 September 2013)	HD-SP2 (Toon et al., 2016)
SENEX	East North America (31 May-10 June 2013)	HD-SP2 (Warneke et al., 2016)

2.2 研究方法

本研究对于所有数据集的黑碳浓度数据进行汇总，利用基本的统计方法进行绘图与数据分析，每个数据集都代表了一个时间段一种区域类型的黑碳浓度情况，对于不同的数据集，分析其黑碳浓度的垂直剖面，并且比较其统计量特征。对于所有数据集构成的大范围尾迹观测数据，对其进行降采样来对全球黑碳浓度分布进行概览。

3 结果

3.1 数据集统计特征

通过对于每个数据集观测到的黑碳浓度的整体特征，绘制了各个数据集构成的箱线图（如图2）。

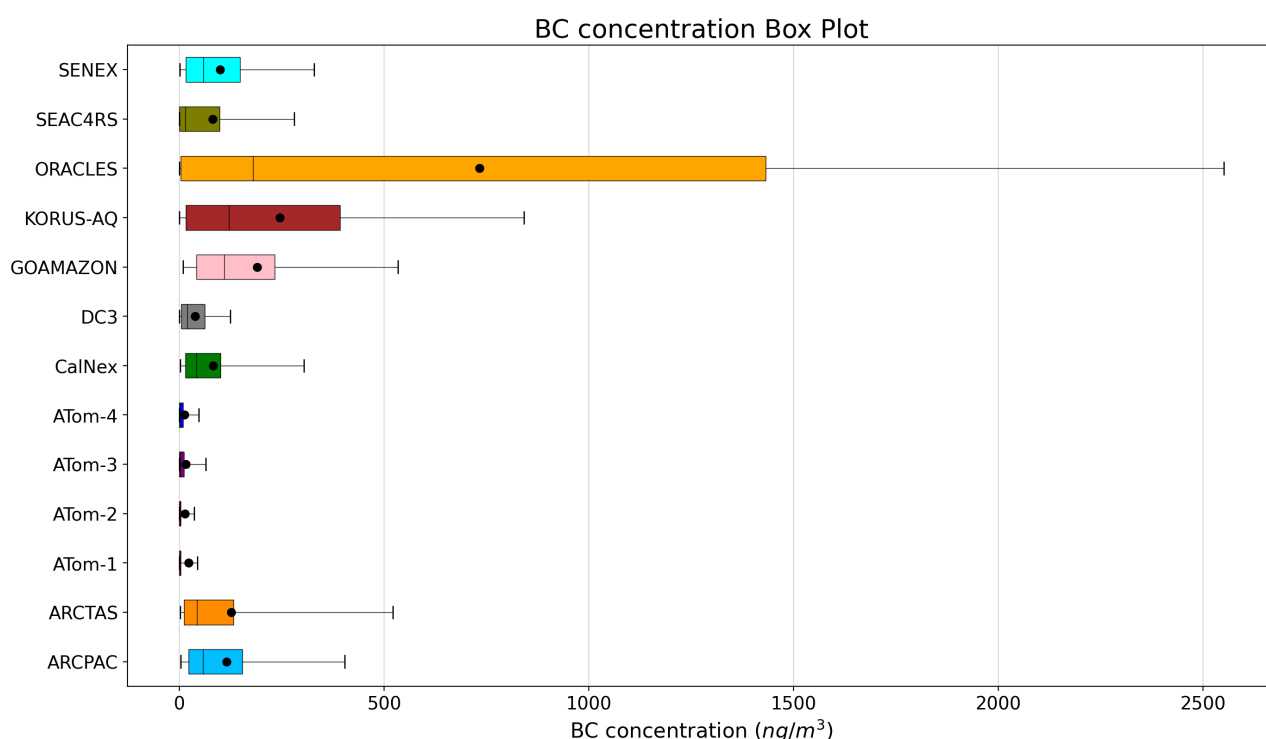


图2：所有观测活动的箱线图，每个数据集用不同的颜色表示，在每个箱形中，黑色的实心点代表数据集的均值，黑色的竖线代表数据集的中位数，左右延伸的须代表数据集的上5%分位点和下5%分位点。箱体代表数据集上25%分位点和下25%分位点。

可以对于这13个数据集进行分类，其中，ATom-1、ATom-2、ATom-3、ATom-4四次观测的范围覆盖了太平洋、南大洋和大西洋，整体的质量浓度水平非常低，可以构成“远洋”分类；ARCPAC与ARCTAS是北极区域的观测，虽然地处偏远，但这些观测结果受到了北美洲北方火灾事件的影响，DC3，CalNex，ORACLES处于较偏远的陆地区域，受到自然界中生物质燃烧较大，归入“生物质燃烧”分类；处于北美的SEAC4RS、SENEX与远东朝鲜半岛以北的KORUS-AQ受到人类城市工业活动显著，归为“污染”类，但事实上，所有数据集都与人为污染有关；而GOAMAZON是位于南美洲亚马逊雨林中地面观测站，所有数据的高度均为50m，作为自然环境地面黑碳浓度的对照。

图2中，ORACLES是对于西非草原火灾的专项观测，在草原火灾季定期组织，无论是均值、中位数还是整体分布都远远超出其他的数据集，草原火灾的烟羽蔓延到东大西洋上，对于海洋上空大气环境造成严重的污染，此处大气中的黑碳浓度高到肉眼可见的程度，是导致大西洋和美洲部分地区黑碳浓度上升的来源之一，对于其他数据集的判别造成干扰，其中差异不易看出，如图3，去除ORACLES后重新绘制了箱线图。

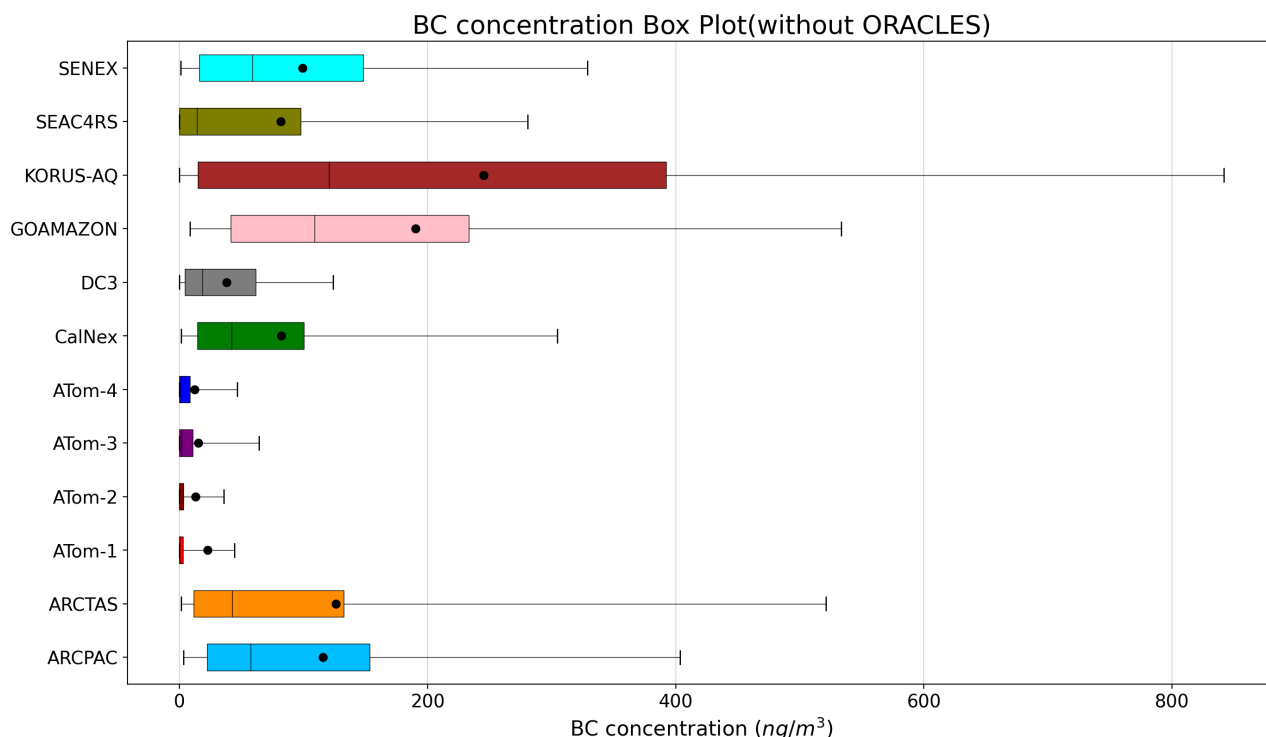


图3：去除了ORACLES观测活动的箱线图，每个数据集用不同的颜色表示，在每个箱形中，黑色的实心点代表数据集的均值，黑色的竖线代表数据集的中位数，左右延伸的须代表数据集的上5%分位点和下5%分位点，箱体代表数据集上25%分位点和下25%分位点。

受到当地生物质燃烧事件显著的数据集与受到人为污染显著的数据集普遍浓度很大，并且，它们向右延伸的标志上5%分位的须非常长，表明这些数据集中浓度较高的数据点要比整体的平均高出许多，受污染的地区很有可能存在局部的热点。

ATom的4个观测活动反映了远洋的黑碳浓度情况，它们的4个数据集浓度非常小，延伸的须也不长，但它们显示出一个特点：代表平均值的黑色实心点在箱体之外，这表明有大量高值拉高了数据集整体均值，而远洋的大部分地方黑碳浓度非常低。

GOAMAZON的左端与其他数据集显示出不同的特点：它距离零点有一段距离，表明作为一个陆地观测站，GOAMAZON的数据更加稳定，不像飞机观测有一部分观测数据来自于相当洁净的高空大气。

3.2 垂直剖面

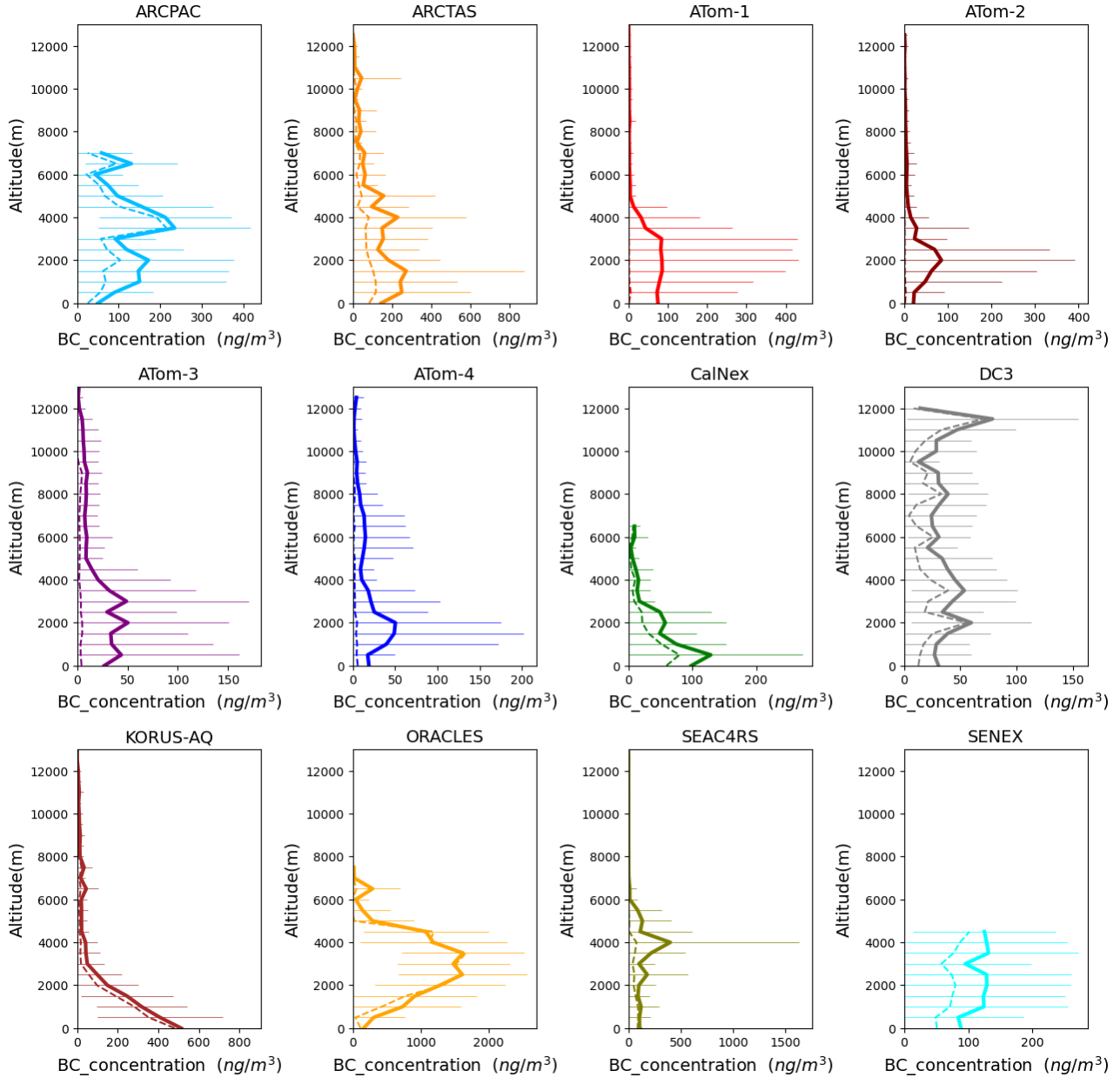


图4：所有飞机观测活动的垂直剖面，高度分辨率为500m，粗实线代表了这个高度的平均值，虚线代表了这个高度的中位数，左右延伸的细线代表了这个高度的标准差，所有数据都以所有数据集中最高的海拔12000m来绘制。

如图4，图像显示了所有观测活动的黑碳平均垂直剖面图，高度分辨率为500m，图中给出了每个高度的平均值，中位数与标准差。飞机观测的活动并不完全代表这一区域的统一抽样，这是由于飞机的观测轨迹上下起伏，同时只能测得某一时刻某一地点某一高度的浓度，而不能取得代表整个区域的浓度水平，另外，部分飞机观测活动进行了“追逐”羽流的观测，测得的浓度相比背景值偏高，这是飞机观测的平均值高于中位数的原因，大部分数据点为低值而被相对少数的高值影响，相对而言，中位数受这些羽流的影响更小。各个观测活动所能覆盖的高度范围不同，图像上的纵轴坐标都统一在同一高度，缺失的高度并不显示。

通常，黑碳的浓度应当在边界层、尤其是近地面层达到峰值，这是由于黑碳主要是源于地面的生物质燃烧与燃料燃烧产生，并且随着海拔升高而降低，反映了羽流在大气中输送

中逐步的稀释与去除过程，部分气象要素如强对流、包括大型生物质燃烧事件可能局部地改变这一剖面分布特征。事实上在陆地上出现的峰值往往在近地面层以上，自由大气中的某一高度，这可能是由于近地面的去除过程更强或是由于自由大气黑碳混合更均匀从而被观测到，另外，飞机观测活动对于低空的观测时间较少。KORUS-AQ完全体现出近地面层黑碳浓度最低、随着海拔高度递减的特征，CalNex的峰值高度在500m处，并随海拔高度递减。

以ATom为代表的“远洋”数据集数据更加均匀，随着高度的变化不大，整体背景值也较小，自由大气的浓度要比近地面层（海面）更高，表明黑碳可能通过海气界面，海洋成为了大气中黑碳的一个汇，黑碳主要分布于5000m高度以下。很显然，在海洋表面，除了稀少的船只外，不存在其他的黑碳源，并且这些源几乎不会对飞机观测活动的结果造成干扰，可以认为远洋的黑碳源均来自陆地，并且在自由大气中充分混合，相同高度的浓度的地区分异性小。

ARCPAC期间受到北方的生物质燃烧事件产生的黑碳输送的影响，在自由大气中的黑碳浓度达到峰值，特别是4000m处，数个观测活动得到的结果在2000m-4000m处存在浓度峰值，这可能是对流层黑碳输运的典型高度，在与黑碳源适当的距离处都会受到影响。ORACLES对于西非野火季节有针对地进行了观测活动，在西非以及野火发生的地点的盛行风向下风向进行集中观测，即西非西部海域的上空，结果与其他规律相接近，在2000-4000m处出现黑碳浓度极高的峰，而近地面层的浓度很低。

在许多垂直分布上特异性较低的数据集中，可以认为黑碳在自由大气中混合更加均匀，存在环境背景值，但不同环境数值差异很大，难以直接得出结论。

3.3 降采样全球分布灰度

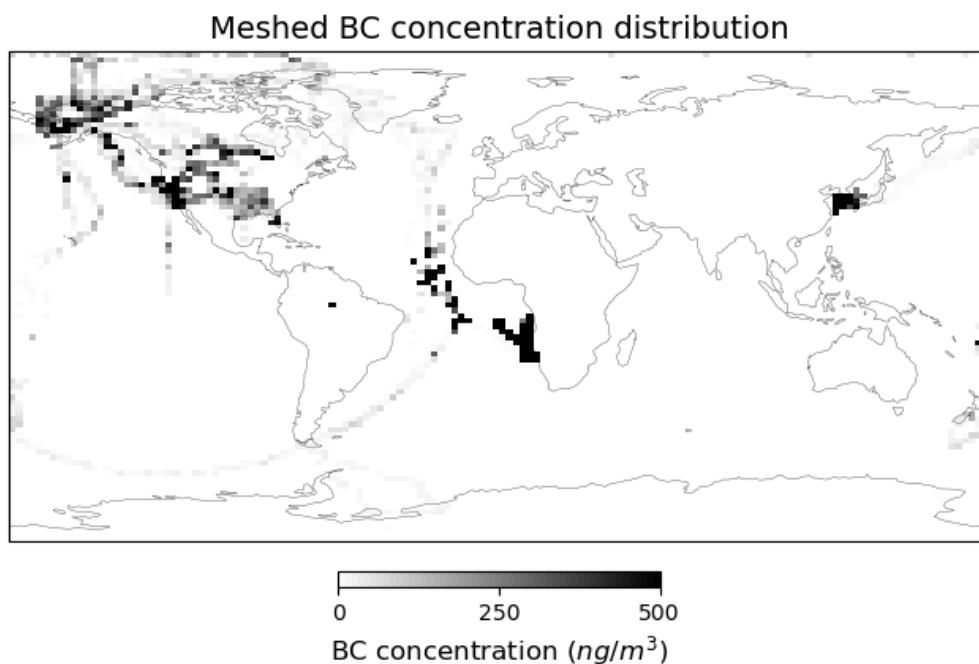


图5：所有飞机观测活动观测数据绘制的黑碳浓度灰度图，经纬度分辨率为 $2.5^\circ \times 2^\circ$ ，高度分辨率为500m，对格点内的数据点进行平均，覆盖所有时间，显示范围的最大值为500。

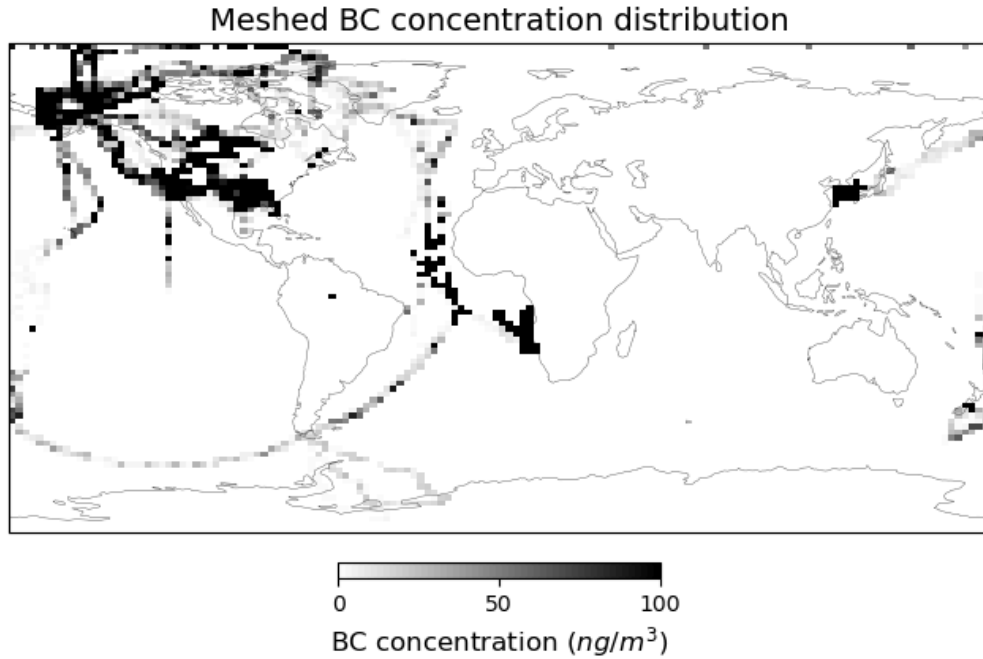


图6：显示范围的最大值为100。

为了方便后续的研究，对于飞机观测的原始数据进行了网格化处理，把每个时刻的数据经纬度都调整到它所在的网格格点的代表经纬度，格点的经纬度分辨率为 $2.5^\circ \times 2^\circ$ ，高度分辨率为500m，代表的经纬度数值由以下公式给出。

$$(\varphi, \theta)_{i,j} = \left(\frac{\varphi_{left\ edge} + \varphi_{right\ edge}}{2}, \frac{\theta_{left\ edge} + \theta_{right\ edge}}{2} \right)$$

对于同一个格点的数据，也就是说对于同一天、在 2.5° 经度 $\times 2^\circ$ 纬度 $\times 500$ m高度的区域内的所有数据，取其平均值，代表的是这一天该格黑碳浓度。图5、图6对于所有格点所有时间的数据点进行灰度的绘图，如果每个格点中，存在多个时间观测到数值，则取其中的最大值。

由于一部分草原火灾的干扰，在非洲西海岸，ORACLES的观测处黑碳浓度非常高，显色不明确，其余区域来看，大陆上靠近人口密集区域，如美国西海岸、朝鲜半岛的黑碳浓度更高，而人口稀少的内陆地区就相对更少。在阿拉斯加、北极地区的观测显示出其受到北美生物质燃烧事件的高值。

远洋的观测大部分地区的黑碳浓度很低，但是在大西洋中部的低纬地区存在非常高的黑碳浓度区域，可能是收到了非洲草原火灾的影响。太平洋上的飞行轨迹也显示出，低纬地区的黑碳浓度相较于其他区域更高。

4 总结

本报告基于2008年至2018年的飞机观测和地面台站数据，分析了全球黑碳气溶胶浓度的垂直廓线及其空间分布特征。结果表明，不同观测活动在区域特征和浓度分布上差异显著，其中生物质燃烧事件显著提高了局部黑碳浓度，而远洋观测显示黑碳浓度较低且分布均匀，但也受生物质燃烧和大气环流影响。垂直剖面分析显示，黑碳浓度通常在边界层内最

高，但特殊事件可导致自由大气中出现峰值。通过降采样和网格化处理，研究构建了黑碳浓度的全球分布图，为进一步理解黑碳的气候效应和大气输运机制提供了重要依据。

参考文献

- [1] 王宇程,朱君,徐国杰.亚洲碳质气溶胶与生物质燃烧分布特征及相关性研究[J].环境科学学报,2023,43(02):330-339.DOI:10.13671/j.hjkxxb.2022.0223.
- [2] Bond C T,Doherty J S,Fahey W D, et al. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,2013,118(11).
- [3] Hansen, J., M. Sato, R. Ruedy, A. Lacis, and V. Oinas, 2000: Global warming in the twenty-first century: An alternative scenario. Proc. Natl. Acad. Sci., 97, 9875-9880, doi:10.1073/pnas.170278997.
- [4] Lahaye, J., Particulate carbon from the gas phase. Carbon, 1992. 30(3):p. 309-314
- [5] Kholghy, M., et al, The evolution of soot morphology in a laminar coflow diffusion flame of a surrogate for Jet A-1. Combustion & Flame, 2013. 160(10):p. 2119-2130
- [6] Sedlacek AJ 3rd, Lewis ER, Onasch TB, Zuidema P, Redemann J, Jaffe D, Kleinman LI. Using the Black Carbon Particle Mixing State to Characterize the Lifecycle of Biomass Burning Aerosols. Environ Sci Technol. 2022 Oct 18;56(20):14315-14325. doi: 10.1021/acs.est.2c03851. Epub 2022 Oct 6. PMID: 36200733.