

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0023

ZHONG Miao, XU Jianzhong, ZHANG Xinghua, et al. Chemical composition and optical properties of the atmospheric aerosols during wintertime in the Mount Qomolangma region, the Himalayas[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(1):80-91. [钟苗, 徐建中, 张兴华, 等. 喜马拉雅珠峰地区冬季大气气溶胶化学组分及光学特征[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1):80-91.]

喜马拉雅珠峰地区冬季大气气溶胶 化学组分及光学特征

钟 苗^{1,2}, 徐建中¹, 张兴华^{1,3}, 冯 琳⁴

(1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国气象局 兰州干旱气象研究所, 甘肃 兰州 730020; 4. 阿坝师范学院, 四川 汶川 623002)

摘 要: 为了研究喜马拉雅山北坡冬季大气气溶胶化学组分、光学特征及来源, 2017年11—12月在珠穆朗玛峰站(QOMS)共采集22个PM_{2.5}样品。结果显示: PM_{2.5}中包括水溶性离子(WsIs)、有机质(OM)、元素碳(EC)在内的所有检测成分, 总质量浓度为(3.36±1.06) μg·m⁻³; 有机碳(OC)、元素碳(EC)和水溶性有机碳(WSOC)的浓度分别为(1.10±0.38)、(0.13±0.12)和(0.84±0.24) μg·m⁻³, 浓度水平与偏远地区相当, 低于季风前。碳质成分(OM+EC)占有测试成分比例为73.6%, 与之前珠峰站报道的研究结果相近。用PM_{2.5}水溶性组分在365 nm处的光吸收效率(Abs₃₆₅)来表征水溶性棕色碳(WS-BrC), 它与WSOC、K⁺存在较好的相关性(R²=0.63、0.50), 而与EC相关性弱(R²=0.01), 说明水溶性棕色碳可能源于生物质燃烧和二次反应。MODIS火点信息和气团后向轨迹分析进一步表明, 尼泊尔地区的燃烧活动是珠峰站冬季碳质气溶胶的重要来源。同时, 喜马拉雅山脉独特的局地风场是污染物跨境传输至珠峰地区的重要原因。

关键词: 喜马拉雅山北坡; 珠峰站; PM_{2.5}; 化学组分; 水溶性棕色碳; 来源分析

中图分类号: X513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)01-0080-12

0 引言

大气气溶胶的化学组成非常复杂, 分为水溶性无机离子组分和碳质组分等^[1]。水溶性离子组分中, 硫酸盐、硝酸盐和铵盐主要来自于前体物在大气中的二次反应, 并且会受气象要素如温度和湿度的影响^[2-3]。碳质组分包括有机碳(OC)、元素碳(EC)等^[4]。元素碳(也称作BC)具有良好的化学稳定性, 可以作为人为一次排放源的标识物质^[5], 主要由化石燃料和生物质的不完全燃烧产生^[6]。元素碳的来源和组分均比较复杂, 既包括由排放源(化石燃料或生物质燃烧)直接排放的一次有机碳, 又包括一些大气中气态前体物(如VOCs等)经过光化学反应, 凝结凝聚及吸湿增长后生成的二次有机碳

(SOC)^[7-8]。大气气溶胶影响大气辐射、云物理和降水等过程, 是非常重要的气候强迫因子^[9]; 同时大气气溶胶对冰冻圈的消融也产生显著影响, 喜马拉雅和青藏高原(HTP)地区尤其如此^[10-11]。大气气溶胶的气候、环境效应受到气溶胶的化学组成、质量浓度等方面影响, 而气溶胶的化学组成、质量浓度则取决于其来源与传输过程。因此, 了解背景地区气溶胶的理化性质, 对确定气溶胶的来源区域, 阐明人为污染物的远程传输机制, 以及评估气溶胶的气候与环境效应具有重要意义。

碳质气溶胶中黑碳(BC)在可见光波段具有超强吸光能力, 通常被认为是导致正辐射强迫的最重要的气溶胶成分^[12-14], 模式得到BC也是导致雪冰消融的主要因子^[15]。然而, 越来越多的证据表明, 某

收稿日期: 2019-07-15; 修订日期: 2020-06-01

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目(徐建中)资助

作者简介: 钟苗, 博士研究生, 主要从事大气化学研究. E-mail: zhongm2013@lzu.edu.cn

通信作者: 徐建中, 研究员, 主要从事大气化学研究. E-mail: jzxu@lzb.ac.cn

些 OC 在近紫外、可见波段 also 具有很强的吸光能力, 这部分 OC 被称为棕色碳 (BrC)^[16-20]。许多基于水溶液萃取的水溶性棕色碳吸光性质的研究在喜马拉雅和青藏高原 (HTP) 地区陆续开展起来^[21-24]。采用水溶液萃取的方法可以避免水不溶性物质 (如黑碳) 的干扰, 但一些水不溶性有机碳成分也具有吸光性^[25], 会对棕色碳吸光性质产生一定的低估。棕色碳除了具有与黑碳一样的一次来源外^[26-27], 还具有通过化学反应生成的二次来源^[28]。一般来说, 不同来源、不同地区和不同季节的棕色碳具有不同的光学性质。因此, 需要进行野外实验, 以便更多地了解棕色碳的时空变化。

珠峰地区位于喜马拉雅北坡 (青藏高原南缘), 很少受到人类活动影响。然而, 研究表明污染物可以通过大尺度大气环流和局地山谷风循环, 从南亚跨越喜马拉雅山脉输送到青藏高原^[29-32]。青藏高原南缘受到夏季印度洋季风和冬季西风控制, 季风、西风交替使得区域气溶胶性质也随之发生变化^[33]。喜马拉雅青藏高原地区地处偏远, 环境及气候条件恶劣, 开展野外观测活动十分困难, 对于珠峰地区冬季大气气溶胶缺少针对性的研究。

本研究基于气溶胶膜采样, 研究珠峰地区冬

季大气的细颗粒物, 包括大气气溶胶的化学组分 (无机离子组分和碳质组分), 大气气溶胶中水溶性棕色碳的吸光性质, 以及确定珠峰站冬季气溶胶的可能来源, 以期揭示喜马拉雅和青藏高原地区气候变化 (如气温升高、冰川融化) 与人为污染物 (尤其是吸光碳质气溶胶) 之间的联系提供基础。

1 样品采集与实验分析

1.1 研究区概况

珠穆朗玛峰地区在气候、大气环流系统和环境特征等方面可作为喜马拉雅中部地区的典型代表^[34-35]。珠穆朗玛峰大气与环境综合观测研究站 (28.36°N、86.95°E, 海拔 4 276 m) (图 1), 依托于中国科学院青藏高原研究所。珠峰站位于定日县扎西宗乡, 与珠峰大本营、定日县城和拉萨的距离分别约 30 km、80 km 和 650 km。该地区植被稀疏、环境恶劣且人口稀少^[34]。由于采样时期属于冬季 (非季风期), 大气环流以西风带为主。风向玫瑰图表明本次采样期间主导风向为西南风。因此, 除了大规模的大气环流, 还应该考虑当地地形对空气污染物运输的影响^[30]。

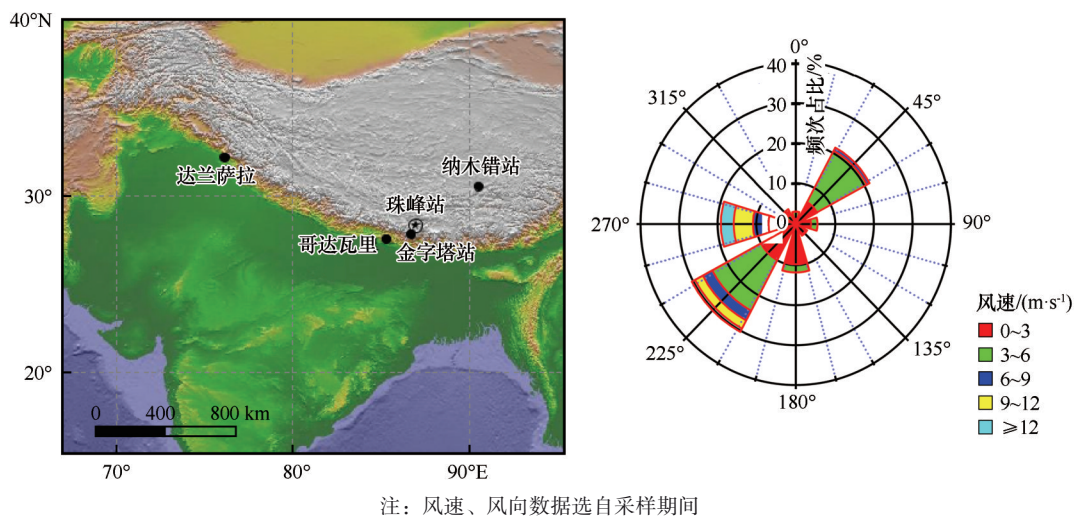


图 1 珠峰站位置及本研究中风向玫瑰图

Fig. 1 Map showing location of the Qomolangma Station for Atmospheric and Environmental Observation and Research (QOMS) (left) and wind rose plot colored by wind speed in this study (right)

1.2 采集样品

$\text{PM}_{2.5}$ 通过 PQ200 小流量采样仪 (美国 BGI 公司生产) 采集。PQ200 以 $16.7 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的流速, 将颗粒物收集至 47 mm 的 PALL 石英滤膜上。所有膜使用前, 为使膜中碳质气溶胶浓度降到最低, 在 550°C 的

马弗炉中烧 8 h。采样结束后, 样品放入装有铝箔的膜盒中, 并装进自封袋中, 放在 -18°C 的冰箱中或放在装有高效冰的保温箱中低温保存。运输时, 膜样品盛放在有冰的保温箱中。

在珠峰站进行为期一个月的 $\text{PM}_{2.5}$ 采样实验

(2017年11月19日至12月19日),每日在固定时间内(北京时间09:00至次日08:50)采集一个样品,采样时长为23时50分,除去断电日共采集到22个样品。另外采样期间采集了一个空白膜,以减少样品采集、运输及处理过程中可能带来的污染。空白膜采集是把空白膜放在采样器中,不抽气,放置10 min后取出,保存及处理方法与样品一致。所有数据都是扣除空白膜的。

1.3 实验分析

打孔取0.296 cm²的石英膜,用于测试OC/EC,剩余部分用超纯水(Milli-Q, 18.2 M Ω , 25 $^{\circ}$ C)进行1 h超声萃取,然后用0.45 μ m的聚四氟乙烯滤头过滤。滤出液进行水溶性有机碳(WSOC)、离子色谱(IC)与紫外-可见光吸收光谱(UV-Vis)测试。其中水溶性有机碳、离子色谱与紫外-可见光吸收光谱的测试均在冰冻圈科学国家重点实验室完成,OC/EC在中国气象局兰州干旱气象研究所完成测试。

(1) OC/EC测定

使用美国沙漠研究所研制的DRI Model 2001A有机碳/元素碳分析仪(美国Atmoslytic公司生产),该仪器采用IMPROVE协议的热光反射法,关于仪器测试原理可见文献[36–37]。测试样品前,需对仪器进行蔗糖标样较准实验。加5个同一浓度不同体积的蔗糖标样进行测试,以测量值(μ g C \cdot m⁻²)为横坐标、蔗糖用量(μ L)为纵坐标绘制标准曲线,回归方程相关系数 $R^2>0.990$,表明仪器状态良好。

OC、EC的检测限换算成大气中的浓度为0.12 μ g \cdot m⁻³。空白膜中OC、EC测试浓度按照采样体积换算成大气中的浓度分别为0.24、0 μ g \cdot m⁻³,所有测试样品均高于空白值。采集的这批样品EC浓度普遍很

低,部分样品由于低于检测限从而未检测出EC(在研究与EC相关项目时剔除掉这些点)。

(2) WSOC测定

使用TOC分析仪(德国Hanau公司生产),按总碳/无机碳(TC/TIC)的方法测定,滤出液中测得的总碳与总无机碳的差值即为总的水溶性有机碳(TOC=TC-TIC)。仪器测试原理见文献[22]。测试样品前,配制梯度浓度标液(浓度分别为10、100、250、500、1 000、2 000 μ g \cdot L⁻¹)进行仪器标定,每个梯度浓度做3组重复实验,在标准差范围内取平均值,以测量峰面积值为横坐标、梯度浓度(μ g \cdot L⁻¹)为纵坐标绘制标准曲线,回归方程相关系数 $R^2>0.990$,表明仪器状态良好。另外,在本批样品的中间位置和最后进行标液测试(浓度为500、1 000 μ g \cdot L⁻¹),确定仪器状态良好,保证数据质量。

TOC空白值按照PM_{2.5}采样体积转化为大气中的浓度为0.26 μ g \cdot m⁻³,所有测试样品均高于空白值。

(3) 水溶性离子测定

使用两套881离子色谱仪(瑞士Metrohm公司生产)测定水溶性离子(Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺)的离子色谱,关于仪器操作原理可见文献[3]。测试样品前,配置梯度浓度阴阳离子标准溶液进行仪器标定。以测量峰面积值为横坐标、梯度浓度(μ g \cdot L⁻¹)为纵坐标绘制标准曲线,回归方程相关系数 $R^2>0.990$,表明仪器状态良好。另外,在更换淋洗液后以及所有样品测试完成之后进行标液测试,确定仪器状态良好,保证数据质量。表1给出了空白中离子浓度值和按照采样体积转换成大气中的浓度值,所有测试样品均高于空白值。

表1 水溶性离子空白值
Table 1 Water soluble ion blank value

项目	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
溶液中浓度/(μ g \cdot L ⁻¹)	11.8	48.7	39.3	10.9	28.0	—	13.5	—
大气中浓度/(μ g \cdot m ⁻³)	0.010	0.041	0.032	0.009	0.023	—	0.011	—

(4) 紫外光谱测定

使用UV-2700双光束谱仪(日本Shimadzu公司生产)测定滤出液的吸收光谱,关于仪器测试原理可见文献[22]。测试样品前,先走基线,再在190~900 nm波长范围内测试超纯水的吸收值,判断仪器达到稳定后开始测样。每个样品分析前后,均用去离子水冲洗光吸收池,直到光吸收基线回到零为止。

空白膜的水提取液在365 nm处光吸收按照采样体积转化成吸收系数为0.05 M \cdot m⁻¹,所有测试样品均高于空白值。

1.4 数据处理

(1) 计算光学参数

本文参照文献[38],将实验测得的光吸收数据转化为特定波长下的吸收系数(Abs _{λ})。

$$\text{Abs}_\lambda = (A_\lambda - A_{700}) \cdot \frac{V_l}{V_a \cdot l} \cdot \ln(10) \quad (1)$$

式中: A_λ 、 Abs_λ 分别为某特定波长下的光吸收、吸收系数 ($\text{M} \cdot \text{m}^{-1}$); A_{700} 为波长 690~700 nm 处光吸收的平均值; l 为测试时溶液的光程 (5 cm); V_l 为萃取时用水的体积; V_a 为对应通过膜的气体体积。为简便起见, 之前的研究^[38]用 365 nm 波长下 (360~370 nm 的平均值) 的吸收系数定义棕色碳的吸收; 同时该研究^[38]指出, 此波长远离紫外区域, 可以避免非有机物 (如硝酸盐) 的干扰。

棕色碳吸收光的波长依赖性可以用指数方程来表示。

$$\text{Abs}_\lambda = K \cdot \lambda^{-\text{AAE}} \quad (2)$$

式中: Abs_λ 为特定波长下的吸收系数 ($\text{M} \cdot \text{m}^{-1}$); K 为与气溶胶质量浓度相关的一个常数; AAE 为颗粒物的 Angstrom 指数, 可通过对 300~400 nm 波长范围内波长的自然对数与对应吸收系数的自然对数线性拟合得到。

本文计算了水溶性有机碳在 365 nm 波长处的光吸收效率 (MAE), 用于比较不同样品中水溶性棕色碳吸光能力的差异。

$$\text{MAE}_{365} = \frac{\text{Abs}_{365}}{C_{\text{WSOC}}} \quad (3)$$

式中: MAE_{365} 为 365 nm 波长下单位质量 WSOC 的光吸收强度 ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$); C_{WSOC} 为水溶性有机碳的浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。棕色碳的物质组成极其复杂, 目前难以在分子水平对其进行完全定量分析, 因此研究中用 WSOC 作为水溶性棕色碳的替代物。文中提到的 MAE 与传统物理学中的质量吸收截面值 (MAC) 不一样, 后者通常描述颗粒态光吸收组分的吸光能力。

(2) 估算一次、二次有机碳

采用 EC-tracer 方法^[39]推导。

$$\text{POC} = \text{EC} \cdot (\text{OC}/\text{EC})_{\text{pi}} \quad (4)$$

$$\text{SOC} = \text{OC} - \text{POC} \quad (5)$$

式中: $(\text{OC}/\text{EC})_{\text{pi}}$ 取所有样本中最小实测值 (2.96)。需要指出的是, 由于气溶胶样本较少 ($N=22$), SOC 的估计可能存在固有的不确定性。

(3) 气团后向轨迹分析

本研究利用美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 全球数据同化系统 (GDAS) 的气象数据, 采用中国气象科学研究院 (CAMS) 王亚强团队基于 HYSPLIT 模型开发的 Trajstat 程序研究气团的起源。在高于地面 500 m 高度处, 每 6 h 计算一次 72 h

后向轨迹。

(4) MODIS 数据

火点数据是由南亚和东南亚的火灾信息资源管理系统 (FIRMS) 提供的 MODIS 卫星数据 (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>)。

2 结果与讨论

2.1 气象条件及细颗粒物总况

采样期处于冬季, 寒冷且干燥多风。西风主导了大规模大气环流。如图 2(a) 所示, 大气温度范围从 $-13.4 \sim 14.0^\circ\text{C}$, 平均值为 -1.2°C ; 相对湿度范围为 3%~81%, 平均为 32.4%。无降水事件发生。风速风向表现出明显的日变化特征: 风速在清晨接近静风期, 日出后风速不断增大, 直至午后达最大; 风向则是日出后先出现一段时期较弱的上坡风 (偏北风), 之后下沉的风 (西南风) 克服上坡风成为白天主导风向 [图 2(a)]。以往研究表明, 在喜马拉雅山南坡, 风场表现为明显的山谷风循环 (由于山顶和谷地之间的温差, 白天盛行向上的谷风, 夜间盛行向下的山风), 白天谷风将南亚污染物输送到高海拔处^[29]。不同的是, 在喜马拉雅山北坡分布着大面积的冰川, 下沉的冰川风会取代向上的谷风成为白天的主导风向, 将南亚输送至高海拔的污染气团携带到珠峰地区^[30]。因而, 喜马拉雅地区独特的山谷地形成为污染物传输的重要通道。

观测期间, $\text{PM}_{2.5}$ 中所有检测成分 (WSIs+OM+EC) 总质量浓度平均值 (3.36 ± 1.06) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (OM = $2.1 \times \text{OC}$), 各成分质量浓度及所占比例的时间序列见图 2(b)。碳质成分 (OM+EC) 平均占有测试组分比例为 73.6% (图 3)。无机离子组分中 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 、 NO_3^- 平均占有所有无机离子成分的 65.2%, 在某种程度上二次无机离子 (SNA) 可以反映出二次反应的强烈程度。与生物质燃烧相关的离子 K^+ 也具有较高含量, 平均所占比例为 1.2%, 说明在该采样阶段, 大气气溶胶受生物质燃烧的影响。 Ca^{2+} 含量较少, 说明在该采样阶段, 受到粉尘影响较小。

2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分

2.2.1 水溶性离子组分

气溶胶样品中阳离子当量浓度与阴离子当量浓度的比值 (CE/AE) 为 1.27, 大于 1, 说明该地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 呈现较明显的碱性 (图 4)。由于 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量较少 (占有水溶性无机离子的比例为 $(3.4 \pm 2.0)\%$), 因此, 粉尘不是导致 $\text{PM}_{2.5}$ 呈碱性的重要原

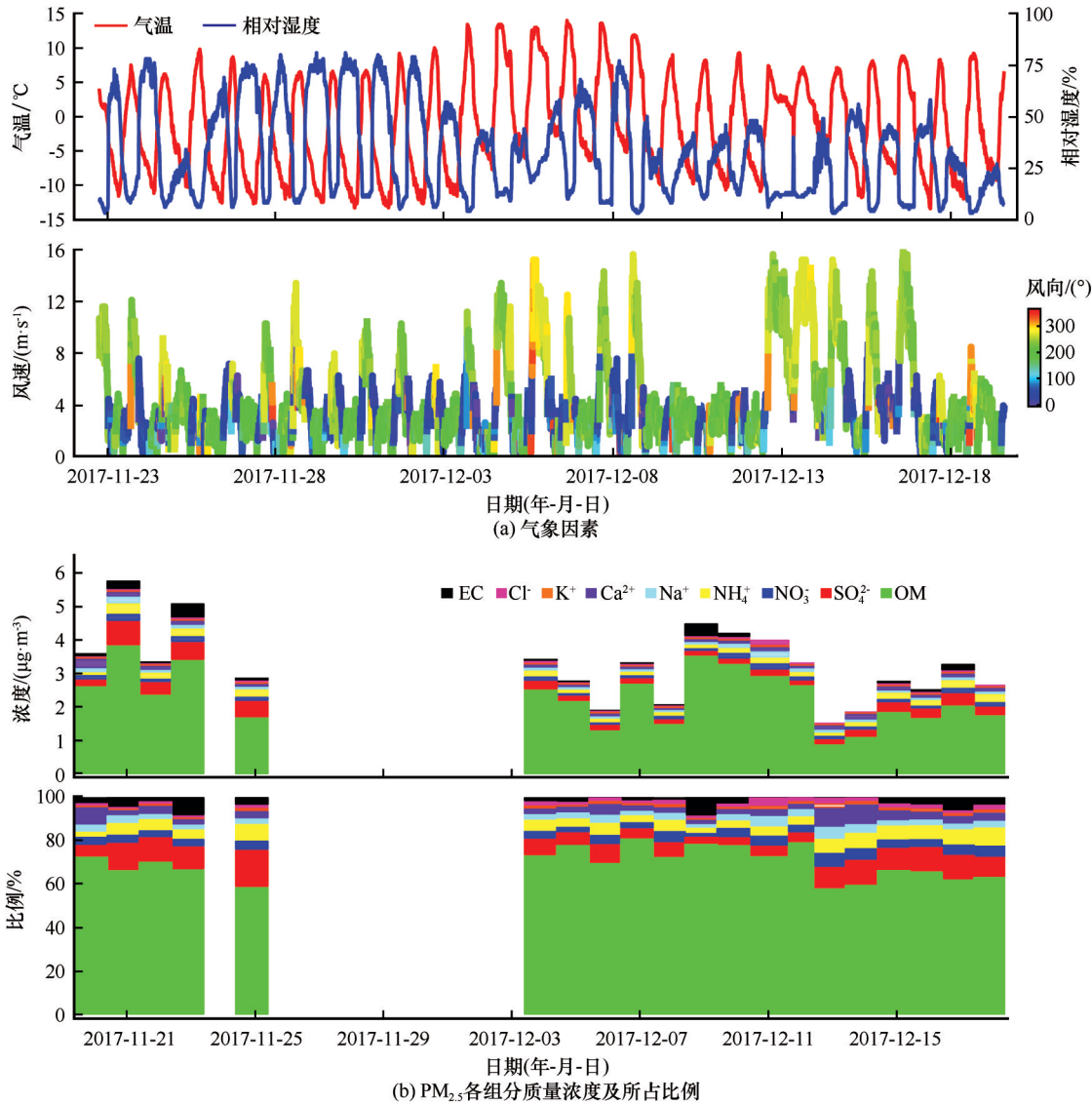


图2 采样期间气象因素(a)和PM_{2.5}各组分质量浓度及所占比例(b)的时间序列
Fig. 2 Time series of meteorological factors (a) and mass concentration of PM_{2.5} species and mass contributions to total PM_{2.5} (b)

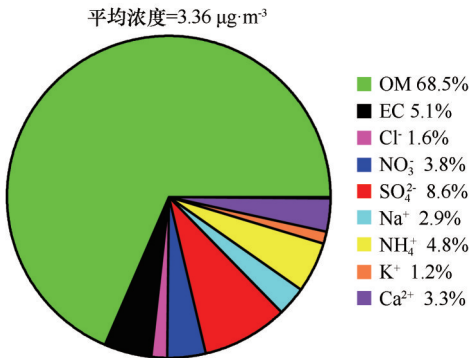


图3 PM_{2.5}样品中各成分的构成
Fig. 3 Pie chart showing composition of the PM_{2.5} species

因。之前的研究表明,气溶胶呈现较明显碱性,是由于存在离子色谱没有测到的有机酸^[40]。表2展示了气溶胶样品中各种无机离子之间的相关性系数,

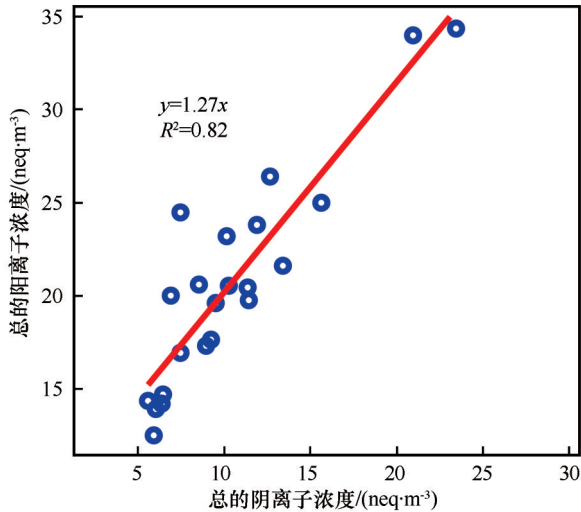


图4 阴阳离子当量浓度散点图
Fig. 4 Scatter plot of equivalent cations and anions

表2 气溶胶样品中主要可溶性离子的相关性

Table 2 Correlation coefficient (r) among the water-soluble inorganic ions of the aerosol species

	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Cl ⁻	1.00							
NO ₃ ⁻	0.34	1.00						
SO ₄ ²⁻	-0.24	0.66	1.00					
Na ⁺	0.54	0.84	0.43	1.00				
NH ₄ ⁺	-0.03	0.72	0.92	0.46	1.00			
K ⁺	0.54	0.67	0.50	0.52	0.70	1.00		
Ca ²⁺	-0.02	0.20	0.04	0.28	-0.10	-0.16	1.00	
Mg ²⁺	0.57	0.68	0.16	0.68	0.27	0.45	0.55	1.00

注: 较强的相关性 ($r>0.65$) 用粗体表示。

SO₄²⁻与NH₄⁺、NO₃⁻之间具有很好的相关性,与一次矿尘源离子(Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、Cl⁻)相关性弱,推测样品中SO₄²⁻主要来自二次源。NO₃⁻与二次离子(SO₄²⁻、NH₄⁺)以及生物质燃烧示踪剂(K⁺)之间均具有较好的相关性,推测样品中NO₃⁻与二次反应和生物质燃烧相关。与此同时,以往的研究表明,N₂O₅

可以吸附在颗粒物表面发生一系列的化学反应生成硝酸盐,或者气态的HNO₃与海盐或者粉尘反应生成硝酸盐^[41],这可能是造成NO₃⁻与矿尘离子(Mg²⁺、Na⁺)之间具有较好相关性的原因。

2.2.2 碳质气溶胶组分

(1) 有机碳(OC)、元素碳(EC)

表3为采样站点OC、EC质量浓度、OC/EC比值与喜马拉雅和青藏高原地区其他站点情况的对比。采样期间,采样点平均有机碳(OC)、元素碳(EC)的浓度分别为(1.10±0.38) μg·m⁻³、(0.13±0.12) μg·m⁻³。本研究中OC、EC浓度水平与早期报道的珠峰冬季浓度水平相当但要明显低于季风前^[30];同时,喜马拉雅山脉南坡金字塔站(NCO-P)季风前期OC、EC的浓度水平也要高于本研究^[42],这主要是由于季风前生物质燃烧的影响较大。南亚城市达兰萨拉(Dharamshala)和哥达瓦里(Godavari)的OC、EC浓度水平比本研究高3~5倍^[24,43],这是由于两地海拔较低、人口密集,受到人为排放的严重影响。

表3 采样站点OC、EC质量浓度与喜马拉雅和青藏高原地区其他站点的对比

Table 3 Comparison of OC, EC mass concentration of PM_{2.5} with that in other sites in the Himalayas and the Tibetan Plateau

采样点	位置	海拔/m	采样类型	采样时间	OC/(μg·m ⁻³)	EC/(μg·m ⁻³)	OC/EC	文献来源
珠峰站	青藏高原南缘	4 276	PM _{2.5}	2017-11/2017-12	1.10	0.12	12.10	本研究
珠峰站	青藏高原南缘	4 276	TSP	2009-08/2010-07	1.43	0.25	6.69	[31]
纳木错站	青藏高原中部	4 730	TSP	2014-12/2015-02	1.94	0.19	14.10	[23]
金字塔站(尼泊尔)	喜马拉雅南坡	5 079	PM ₁₀	2006、2008年季风前	2.40	0.50	4.80	[42]
哥达瓦里(尼泊尔)	喜马拉雅南坡	1 600	PM ₁₀	2012-04/2014-05	2.93	0.77	4.12	[24]
达兰萨拉(印度)	喜马拉雅南坡	1 350	PM ₁₀	2015-02/2015-04	5.00	2.50	2.01	[43]

研究OC、EC之间的关系,可以在一定程度上对其来源进行定性分析^[35]。前期的工作表明,珠峰在季风前具有较为单一的污染源(生物质燃烧源),与之相对应的是季风前期OC、EC之间的强相关性($R^2=0.81$)^[26]。但本研究中OC、EC间相关性 [$R^2=0.35$,图5(a)]明显低于季风前,说明珠峰冬季气溶胶的影响因素较季风前复杂。

研究OC/EC比值也可以一定程度判断污染物的来源状况。一方面,由于EC能够在大气中稳定存在,而OC却易发生化学反应形成二次有机碳(SOC),这导致了OC/EC比值的升高;一般认为,当OC/EC比值>2.0时,存在SOC^[44]。另一方面,不同污染源对EC、OC贡献不一样,导致OC/EC比值不一样;通常,生物质燃烧释放的气溶胶具有较高的OC、EC比值^[45]。本研究中OC/EC比值为2.96~28.80,平均为12.10。这种高OC/EC比值同样也出

现在偏远的Namco^[22]。喜马拉雅山南坡城市地区OC、EC比值远低于偏远的TP地区^[24,43](表3)。综合来看,珠峰站冬季高OC/EC比值,指示了存在大量二次有机气溶胶的可能性。同时,另一个潜在的可能性是生物质燃烧的影响。

(2) 水溶性有机碳(WSOC)

WSOC/OC值可以作为判断有机气溶胶是原生还是次生的一个指标,SOC比POC更容易溶于水,大部分WSOC来源于二次转化^[46]。本研究中水溶性有机碳平均质量浓度为(0.84±0.24) μg·m⁻³,WSOC、OC比值平均值高达0.75;同时,OC与EC、OC与WSOC之间相关性分别为 $R^2=0.35$ 、0.40[图5(a)~(b)]。之前研究表明,珠峰站季风前期具有全年最低的WSOC、OC比值(WSOC/OC=0.47),且OC与EC($R^2=0.81$)、OC与WSOC($R^2=0.94$)呈现显著正相关;表明珠峰季风前主要是一次生物质燃

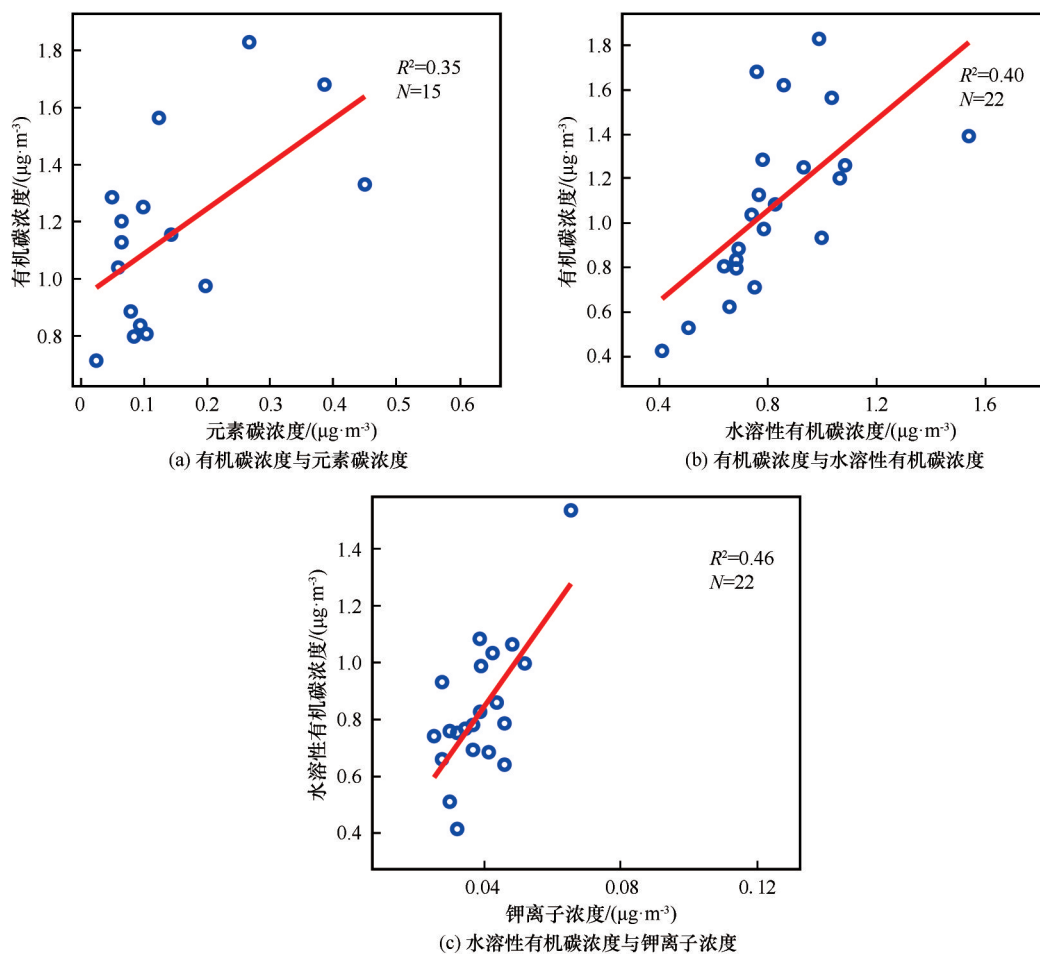


图5 $PM_{2.5}$ 中有机碳和元素碳(a)、有机碳和水溶性有机碳(b)以及水溶性有机碳和钾离子(c)之间的相关性

Fig. 5 Correlation between organic carbon and elemental carbon (a), organic carbon and water-soluble organic carbon (b), and water-soluble organic carbon and potassium ions (c) in $PM_{2.5}$

烧排放源的贡献,气溶胶老化程度弱、形成较少的SOA^[30]。在本研究中WSOC、OC的比值远高于季风前,相关性分析却表现更弱。因此可大致推测,SOA的形成对珠峰冬季大气气溶胶的贡献较大。同时WSOC、 K^+ 之间存在较好相关性[图5(c)],表明生物质燃烧是珠峰冬季气溶胶的另一个重要来源。

2.3 水溶性棕色碳(WS-BrC)吸光性质

图6(a)表示本研究中大气细颗粒物水提取液在300~600 nm波长范围内的吸收光谱。可以看出,所有样品的光吸收强度都表现出明显的波长依赖性,吸收随着波长增大迅速减小(在波长600 nm之后几乎没有吸收)。这与之前关于棕色碳吸收光谱的研究结果一致^[17-19]。

2.3.1 吸收系数

Abs_{365} 是水溶性棕色碳365 nm下的吸收系数,珠峰冬季 Abs_{365} 的变化范围为0.15~0.61 $M \cdot m^{-1}$,平均值为(0.38±0.13) $M \cdot m^{-1}$ 。对比其他区域来看,南

亚城市地区的吸收系数远高于珠峰地区,如坎普尔(IGP)冬季大量秸秆焚烧时期的 Abs_{365} 高达69.30 $M \cdot m^{-1}$ ^[47]。金字塔站冬季下午,受到上坡风带来的污染气团影响时, Abs_{365} 为(0.31±0.08) $M \cdot m^{-1}$ ^[21],与珠峰地区相当。这是由于金字塔站与珠峰站分别位于喜马拉雅山南北两侧(海拔相近),且同时受到由山谷风输送的南亚污染气团的影响。纳木错站 Abs_{365} 平均值为(0.15±0.08) $M \cdot m^{-1}$ [季风前 Abs_{365} 为(0.22±0.05) $M \cdot m^{-1}$ 、季风期为(0.09±0.05) $M \cdot m^{-1}$]^[22],低于珠峰地区。整体上看,喜马拉雅和青藏高原地区各个站点间 Abs_{365} 的差别主与WSOC质量浓度有关,南亚城市地区排放更多碳质污染物,而到了喜马拉雅山脉高海拔地区至青藏高原内部,人为排放碳质气溶胶逐渐减小^[21-22,43]。

本研究中 Abs_{365} 与WSOC以及生物质燃烧的示踪剂 K^+ 有较好的相关性($R^2=0.63$ 、0.50),而与一次排放源指示物EC的相关性弱($R^2=0.01$) [图7(a)~

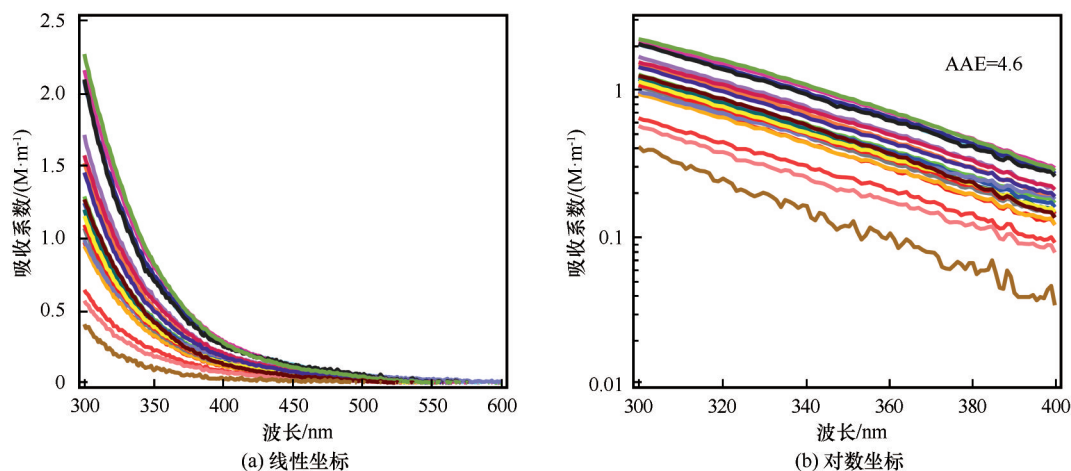


图6 各样品在线性坐标(a)、对数坐标(b)下的吸收光谱

Fig. 6 Light absorption spectra of water-soluble aerosols under linear scale (a) and log scale (b)

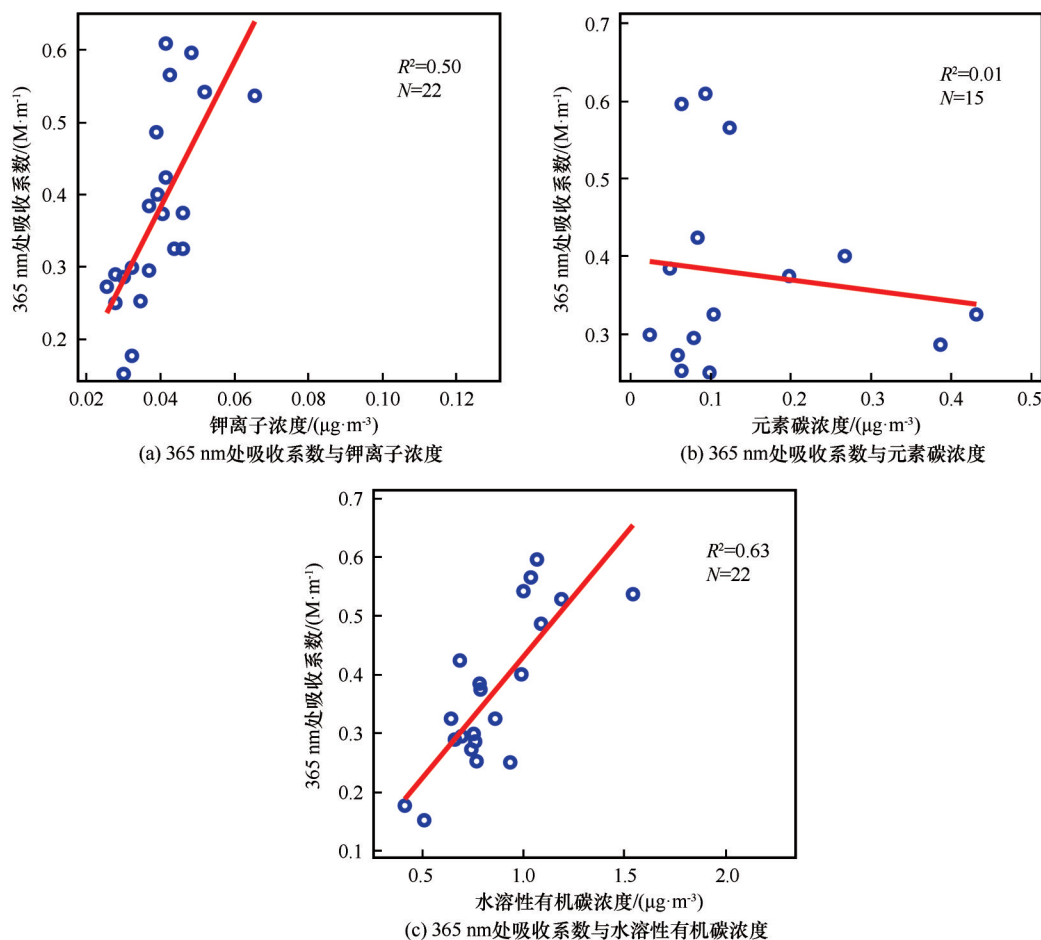


图7 365 nm处吸收系数与钾离子(a)、元素碳(b)及水溶性有机碳(c)之间的相关性

Fig. 7 Correlation of the absorption coefficient at 365 nm with potassium ion (a), elemental carbon (b) and water-soluble organic carbon (c)

(c)]. 相关性分析表明, 珠峰冬季水溶性棕色碳可能源于生物质燃烧和二次反应。

2.3.2 质量吸收效率(MAE)、吸收波长指数(AAE)在 300~400 nm 波长范围内计算出珠峰冬季

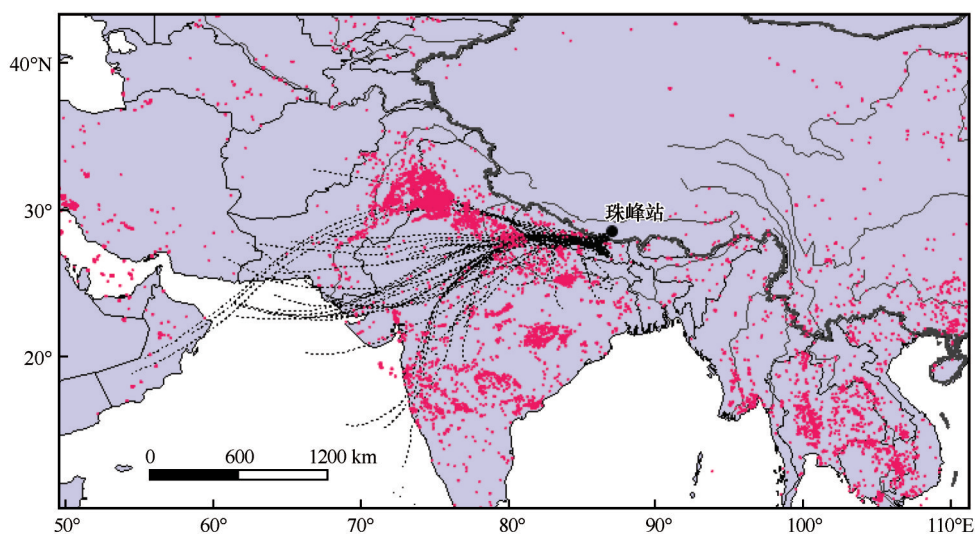
AAE 值, 范围为 2.74~10.61 [平均值为 (4.60 ± 1.47) , 图 6(b)]。该值约为新鲜排放 BC 的 AAE 值 (AAE=1.0)^[26] 的 4~5 倍, 体现了水溶性吸光物质 (WS-BrC) 与 BC 完全不同的吸光性质。同时, 此研

究与喜马拉雅和青藏高原地区其他基于水萃取方法的研究所报导的 AAE 值相当,如金字塔站(4.90 ± 0.70)^[42]、纳木错站(6.19 ± 0.19)^[22]、哥达瓦里(5.35 ± 0.40)^[24]。

本研究中 MAE_{365} 为 $0.30 \sim 0.73 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值为 $(0.45 \pm 0.13) \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。比纳木错站 $[(0.38 \pm 0.16) \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}]$ ^[22] 略高。然而,与喜马拉雅山南坡金字塔站 $[(0.57 \pm 0.10) \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}]$ ^[42] 和哥达瓦里 $[(0.83 \pm 0.09) \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}]$ ^[24] 等地区相比,珠峰大气气溶胶中 WS-BrC 的光吸收能力较弱。Zhang 等^[22] 使用 HR-ToF-AMS 数据说明了偏远的纳木错地区低 MAE_{365} 值可能是由于该地区有机气溶胶的高度氧化 [O/C 值为 (0.83 ± 0.18)]。此外,Chen 等^[20] 研究发现,南京冬季 MAE_{365} 随着 WSOC 平均氧化状态增大而呈现下降趋势,表明冬季气溶胶的老化过程可能导致棕色碳发生“光漂白”。因此,可大致推测青藏高原偏远地区 MAE_{365} 呈现更低值可能与气溶胶在传输和老化过程中发生“光漂白”有关。

2.4 气溶胶来源分析

为了解珠峰冬季大气气溶胶的潜在来源以及传输路径,在 2017 年 11—12 月期间,利用基于 HYSPLIT 模型发展的 Trajstat,每 6 h 计算一次每个采样时间点对应的 72 h 气团后向轨迹。这些后向轨迹显示如图 8 所示,绝大部分气团来源于尼泊尔中、东部地区,跨过喜马拉雅山脉到达珠峰地区,相对较少的西风途径中亚、印度西北部、尼泊尔西部等地区向珠穆朗玛峰地区远距离输送。之前研究表示,珠峰地区季风期气团来自孟加拉国和印度东北部,而非季风期为强西风经过尼泊尔西部、印度西北部和巴基斯坦到达珠峰地区^[30]。这与本研究中结果大致相符,但区别在于珠峰站冬季相比于其他季节,更多受到较短距离处(尼泊尔地区)气团的影响。为进一步了解 QOMS 冬季气溶胶的来源,利用 MODIS 的火点数据验证观测时期的燃烧活动的影响。Terra 卫星观测到采样期间的月平均火点数据叠加在轨迹图上(图 8),可以清晰地看到,气团传输过程中途经地区存在明显的燃烧活动。



注: 玫红色点代表采样期间的月平均火点信息

图 8 珠峰站 72 h 气团后向轨迹图

Fig. 8 The 72-hour air mass backward trajectory map at the Qomolangma Station (the pink dots represent the average monthly fire information during the sampling period)

3 结论

本文通过野外采样和实验室分析,对喜马拉雅山北坡珠峰地区冬季大气细颗粒物的化学组分、光学性质及来源进行了研究,初步结论如下:

(1) 在观测期间,气象条件呈现为寒冷且干燥多风,白天风向以下坡风为主(西南风向)且风速

大,将喜马拉雅南坡污染气团输送至珠峰地区。

(2) 珠峰站冬季 $PM_{2.5}$ 分析成分 (WSIs+OM+EC) 的总质量浓度平均值 $(3.36 \pm 1.06) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 比季风前低。与生物质燃烧相关的离子 K^+ 所占比例为 1.2%。无机离子组分中二次离子 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 平均占所有无机离子的 65.2%。由水溶性离子间

相关性分析推测,样品中 SO_4^{2-} 主要是二次源, NO_3^- 则与生物质燃烧以及矿尘表面非均相化学反应形成的二次有机气溶胶(SOA)相关。

(3)有机碳(OC)、元素碳(EC)和水溶性有机碳(WSOC)的浓度分别为 $(1.10 \pm 0.38) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $(0.13 \pm 0.12) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(0.84 \pm 0.24) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,OC和EC的质量分数分别占总组分的68.5%和5.1%,碳质气溶胶为珠峰冬季大气细颗粒物的主要成分。较高的OC/EC、WSOC/OC值,以及OC与EC($R^2=0.35$)、OC与WSOC($R^2=0.40$)、WSOC与 K^+ ($R^2=0.46$)之间的相关性分析表明,二次有机气溶胶和生物质燃烧是珠峰冬季气溶胶的重要来源。

(4) Abs_{365} 、AAE、MAE平均值分别为 $(0.38 \pm 0.13) \text{M} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 (4.60 ± 1.47) 、 $(0.45 \pm 0.13) \text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。根据对比以往 MAE_{365} 的研究,大致推测珠峰站冬季 MAE_{365} 呈现较低值可能与气溶胶在传输和老化过程中发生“光漂白”有关。通过分析365 nm处的吸收系数与WSOC浓度、EC浓度、 K^+ 浓度的相关性($R^2=0.63, 0.10, 0.50$),表明珠峰冬季水溶性棕色碳可能源于生物质燃烧和二次反应。

(5)根据MODIS卫星火点数据、气团后向轨迹分析以及风场分析得知,尼泊尔地区冬季的燃烧活动是珠峰地区碳质气溶胶的重要来源。同时,喜马拉雅山脉地区独特的局地风场是污染物跨境传输至珠峰地区的重要原因。

参考文献(References):

- [1] Chow J C, Watson J G, Lowenthal D H, et al. PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ compositions in California's San Joaquin Valley [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1993, 18(2): 105-128.
- [2] Yao Xiaohong, Chan C K, Fang Ming, et al. The water-soluble ionic composition of $\text{PM}_{2.5}$ in Shanghai and Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(26): 4223-4234.
- [3] Xu J Z, Zhang Q, Wang Z B, et al. Chemical composition and size distribution of summertime $\text{PM}_{2.5}$ at a high altitude remote location in the northeast of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau: insights into aerosol sources and processing in free troposphere [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(9): 5069-5081.
- [4] Jacobson M C, Hansson H C, Noone K J, et al. Organic atmospheric aerosols: review and state of the science [J]. *Reviews of Geophysics*, 2000, 38(2): 267-294.
- [5] Andreae M O, Schmid O, Yang Hong, et al. Optical properties and chemical composition of the atmospheric aerosol in urban Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(25): 6335-6350.
- [6] Bond T C, Bhardwaj E, Dong R, et al. Historical emissions of black and organic carbon aerosol from energy-related combustion, 1850-2000 [J/OL]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(2) [2019-07-01]. <https://www.researchgate.net/publication/251436903>.
- [7] Mkoma S L, Chi X G, Maenhaut W. Characterization of carbonaceous materials in $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} size fractions in Morogoro, Tanzania, during 2006 wet season campaign [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2010, 268(10): 1665-1670.
- [8] Balachandran S, Pachon J E, Lee S, et al. Particulate and gas sampling of prescribed fires in South Georgia, USA [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 81: 125-135.
- [9] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis: summary for policymakers [M]. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [10] Xu Baiqing, Cao Junji, Hansen J, et al. Black soot and the survival of Tibetan glaciers [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(52): 22114-22118.
- [11] Ji Zhenming. Advances and prospects of research on simulating transboundary black carbon and their climatic effects over the Tibetan Plateau [J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(4): 465-475. [吉振明. 青藏高原黑碳气溶胶外源传输及气候效应模拟研究进展与展望 [J]. *地理科学进展*, 2018, 37(4): 465-475.]
- [12] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon [J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(4): 221-227.
- [13] Bond T C, Doherty S J, Fahey 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): 5380-5552.
- [14] Wang Junfeng, Zhang Qi, Chen Mindong, et al. First chemical characterization of refractory black carbon aerosols and associated coatings over the Tibetan Plateau (4 730 m a. s. l.) [J]. *Environmental Science and Technology*, 2017, 51(24): 14072-14082.
- [15] Ji Zhenming. Modeling black carbon and its potential radiative effects over the Tibetan Plateau [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2016, 7(3): 139-144.
- [16] Andreae M, Gelencsér A. Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6(10): 3131-3148.
- [17] Bahadur R, Praveen P S, Xu Yangyang, et al. Solar absorption by elemental and brown carbon determined from spectral observations [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(43): 17366-17371.
- [18] Cappa C D, Onasch T B, Massoli P, et al. Response to comment on "Radiative absorption enhancements due to the mixing state of atmospheric black carbon" [J]. *Science*, 2013, 339(6118): 393.
- [19] Pokhrel R P, Wagner N L, Langridge J M, et al. Parameterization of single scattering albedo (SSA) and absorption angstrom exponent (AAE) with EC/OC for aerosol emissions from biomass burning [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(15): 9549-9561.
- [20] Chen Yanfang, Ge Xinlei, Chen Hui, et al. Seasonal light absorption properties of water-soluble brown carbon in atmospheric fine particles in Nanjing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 187: 230-240.
- [21] Kirillova E N, Marinoni A, Bonasoni P, et al. Light absorption properties of brown carbon in the high Himalayas [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(16): 9621-9639.

- [22] Zhang Yange, Xu Jianzhong, Shi Jinsen, et al. Light absorption by water-soluble organic carbon in atmospheric fine particles in the central Tibetan Plateau[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(26): 21386-21397.
- [23] Wu Guangming, Wang Xin, Gao Shaopeng, et al. Humic-like substances (HULIS) in aerosols of central Tibetan Plateau (Nam Co, 4 730 m asl): abundance, light absorption properties and sources[J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, 52(13): 7203-7211.
- [24] Wu Guangming, Ram K, Fu Pingqing, et al. Water-soluble brown carbon in atmospheric aerosols from Godavari (Nepal), a regional representative of South Asia[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019, 53(7): 3471-3479.
- [25] Cheng Yuan, He Kebin, Engling G, et al. Brown and black carbon in Beijing aerosol: implications for the effects of brown coating on light absorption by black carbon[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 599/600: 1047-1055.
- [26] Bond T C. Spectral dependence of visible light absorption by carbonaceous particles emitted from coal combustion[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(21): 4075-4078.
- [27] Cheng Yuan, Engling G, He Kebin, et al. Biomass burning contribution to Beijing aerosol[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(15): 7765-7781.
- [28] Moise T, Flores J M, Rudich Y. Optical properties of secondary organic aerosols and their changes by chemical processes [J]. *Chemical Reviews*, 2015, 115(10): 4400-4439.
- [29] Bonasoni P, Laj P, Marinoni A, et al. Atmospheric brown clouds in the Himalayas: first two years of continuous observations at the Nepal climate observatory-pyramid (5 079 m)[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(15): 7515-7531.
- [30] Cong Zhiyuan, Kang Shichang, Kawamura K, et al. Carbonaceous aerosols on the south edge of the Tibetan Plateau: concentrations, seasonality and sources [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(3): 1573-1584.
- [31] Zhang Xinghua, Xu Jianzhong, Kang Shichang, et al. Chemical characterization of long-range transport biomass burning emissions to the Himalayas: insights from high-resolution aerosol mass spectrometry [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(7): 4617-4638.
- [32] Rupakheti D, Kang Shichang, Rupakheti M, et al. Identification of absorbing aerosol types at a site in the northern edge of Indo-Gangetic Plain and a polluted valley in the foothills of the central Himalayas [J]. *Atmospheric Research*, 2019, 223: 15-23.
- [33] Shrestha A B, Wake C P, Dibb J E, et al. Seasonal variations in aerosol concentrations and compositions in the Nepal Himalaya [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(20): 3349-3363.
- [34] Ma Yaoming, Wang Yongjie, Zhong Lei, et al. The characteristics of atmospheric turbulence and radiation energy transfer and the structure of atmospheric boundary layer over the northern slope area of Himalaya [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2011, 89A: 345-353.
- [35] Chen Xuelong, Su Zhongbo, Ma Yaoming. Analysis of land-atmosphere interactions over the north region of Mt. Qomolangma (Mt. Everest) [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2012, 44(4): 412-422.
- [36] Chow J C, Watson J G, Chen L W, et al. The IMPROVE_A temperature protocol for thermal/optical carbon analysis: maintaining consistency with a long-term database [J]. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 2007, 57(9): 1014-1023.
- [37] Fung K, Chow J C, Watson J G. Evaluation of OC/EC speciation by thermal manganese dioxide oxidation and the improve method[J]. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 2002, 52(11): 1333-1341.
- [38] Hecobian A, Zhang X, Zheng M, et al. Water-soluble organic aerosol material and the light-absorption characteristics of aqueous extracts measured over the southeastern United States [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(13): 5965-5977.
- [39] Turpin B J, Huntzicker J J. Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS [J]. *Atmospheric Environment*, 1995, 29(23): 3527-3544.
- [40] Cong Zhiyuan, Kawamura K, Kang Shichang, et al. Penetration of biomass-burning emissions from South Asia through the Himalayas: new insights from atmospheric organic acids [J/OL]. *Scientific Reports*, 2015, 5 [2019-07-01]. <https://www.nature.com/articles/srep09580>. ris.
- [41] Pathak R K, Wang Tao, Wu Wan Shing. Nighttime enhancement of PM_{2.5} nitrate in ammonia-poor atmospheric conditions in Beijing and Shanghai: plausible contributions of heterogeneous hydrolysis of N₂O₅ and HNO₃ partitioning [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 45(5): 1183-1191.
- [42] Decesari S, Facchini M C, Carbone C, et al. Chemical composition of PM₁₀ and PM₁ at the high-altitude Himalayan station Nepal climate observatory-pyramid (NCO-P) (5 079 m a. s. l.) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10: 4583-4596.
- [43] Kaushal D, Kumar A, Yadav S, et al. Wintertime carbonaceous aerosols over Dhauladhar region of north-western Himalayas [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25(8): 8044-8056.
- [44] Chow J C, Watson J G, Lu Zhiqiang, et al. Descriptive analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, 30(12): 2079-2112.
- [45] Watson J G, Chow J C, Houck J E. PM_{2.5} chemical source profiles for vehicle exhaust, vegetative burning, geological material, and coal burning in northwestern Colorado during 1995 [J]. *Chemosphere*, 2001, 43(8): 1141-1151.
- [46] Psichoudaki M, Pandis S N. Atmospheric aerosol water-soluble organic carbon measurement: a theoretical analysis [J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, 47(17): 9791-9798.
- [47] Vikram C, Prashant R, Dharmendra K S, et al. Light absorption characteristics of brown carbon during foggy and non-foggy episodes over the Indo-Gangetic Plain [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2018, 9(3): 494-501.

Chemical composition and optical properties of the atmospheric aerosols during wintertime in the Mount Qomolangma region, the Himalayas

ZHONG Miao^{1,2}, XU Jianzhong¹, ZHANG Xinghua^{1,3}, FENG Lin⁴

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China; 4. Aba Teachers University, Wenchuan 623002, Sichuan, China)

Abstract: To study the chemical composition, optical characteristics and sources of atmospheric aerosols on the north slopes of the Himalayas (the south edge of the Tibetan Plateau), 22 samples were collected daily from November 2017 to December 2017 at Qomolangma Station for Atmospheric and Environmental Observation and Research (QOMS, 28.36° N, 86.95° E, 4 276 m a. s. l.). The total mass concentrations of identified species (WSIs+OM+EC) were $(3.36 \pm 1.06) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. The average concentrations of organic carbon (OC), elemental carbon (EC) and water-soluble organic carbon were $(1.10 \pm 0.38) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $(0.13 \pm 0.12) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $(0.84 \pm 0.24) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively, lower than that in pre-monsoon. The carbonaceous matter (OM+EC) was the dominated contributor, accounting for 73.6%, which was similar to the previous research. Absorption coefficient at 365 nm (Abs_{365}) of $\text{PM}_{2.5}$ water-soluble components, typically used as a proxy for water-soluble brown carbon (WS-BrC), correlated well with the WSOC and K^+ concentration ($R^2=0.63, 0.50$), but weak correlation with EC ($R^2=0.01$), indicates that they probably originated from biomass burning and secondary formations. The values of AAE and MAE of the water extract of $\text{PM}_{2.5}$ were (4.60 ± 1.47) , $(0.45 \pm 0.13) \text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. Moreover, the fire spots observed by MODIS and backward air-mass trajectories further demonstrated that in winter, fires in Nepal were most likely sources of carbonaceous aerosol at QOMS. Meanwhile, the unique local wind field on the Himalayas was an important channel for air-pollutant transport.

Key words: north slopes of the Himalayas; Qomolangma Station (QOMS); $\text{PM}_{2.5}$; chemical composition; water-soluble brown carbon (WS-BrC); analysis of sources

(责任编辑: 张强弓; 编辑: 武俊杰)