基于系留气球的藏东南大气黑碳垂直分布

王莱^{1,2}, 徐柏青^{1,2*}, 杨松¹, 高晶^{1,2}, 张泰华³, 何泽青³, Matjaž Kobal⁴, A.D.A. Hansen⁵

1. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101;

3. 中国科学院光电研究院, 北京 100094;

4. Aerosol d.o.o., Ljubljana, SI-1000, Slovenia;

5. Magee Scientific Co., Berkeley, CA 94704, USA

* 联系人, E-mail: baqing@itpcas.ac.cn

2019-05-27 收稿, 2019-07-12 修回, 2019-07-15 接受, 2019-08-29 网络版发表

国家自然科学基金(41771091)、中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA20070100)和中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC037)资助

摘要 在青藏高原东南部地区开展大气黑碳垂直分布的探测对研究黑碳跨境传输过程及其气候环境影响具有重要的意义. 本研究利用系留气球观测平台获得青藏高原大气黑碳浓度的垂直廓线. 观测结果显示, 稳定大气边界层黑碳浓度为 $1000 \pm 750 \text{ ng/m}^3$, 生物燃烧源贡献为 $44\% \pm 37\%$; 剩余层黑碳浓度为 $140 \pm 50 \text{ ng/m}^3$, 生物燃烧源贡献为 $16\% \pm 6\%$; 自由大气黑碳浓度为 $120 \pm 50 \text{ ng/m}^3$, 生物燃烧源贡献为 $14\% \pm 5\%$. 此外, 本项研究表明稳定大气边界层和剩余层大气黑碳主要来源于局地排放, 而自由大气黑碳则主要受西风急流长距离传输的影响.

关键词 青藏高原, 黑碳, 垂直分布, 系留气球, 生物燃烧源

黑碳气溶胶(BC)对可见光具有强烈的吸收作用, 进而可改变地球地-气系统的辐射收支平衡, 在区域和全球尺度产生一系列气候环境效应^[1]. 黑碳气溶胶的气候效应有赖于其在大气中的垂直分布及其与云层的位置关系^[2-7]. 辐射传输模式结果显示, 若全球20%黑碳气溶胶位于低空云上方, 其在全球产生的辐射强迫比重可占50%^[5]; 另有研究显示, 当黑碳气溶胶在平流层底部时所产生的直接辐射强迫同其在地表相比可增强10倍^[8]; 在大气边界层内, 黑碳垂直分布对云的形成和消散具有重要影响, 进而在地-气界面产生辐射强迫^[9]; 利用全球气溶胶模式评估黑碳辐射平衡, 结果发现20%的不确定性源于黑碳气溶胶在大气中的垂直分布结构^[4]. 由此可见, 黑碳气溶胶在大气中的垂直分布是评估其气候影响的关键指标, 是最大的不确定性因子之一^[10].

在大气气溶胶垂直分布的观测研究中, 研究学者逐渐发现黑碳气溶胶在大气中呈多层分布. 利用飞机平台在北极开展了大气黑碳浓度垂直观测, 结果显示地表大气的抬升作用可使高层大气黑碳含量显著高于地表^[11,12]. 研究学者在1991年4月通过采集日本上空对流层顶部至平流层底部大气气溶胶样品发现, 黑碳颗粒占气溶胶颗粒数量百分比大于50%, 他们认为这可能是科威特油田大火排放长距离传输的结果^[13]. 另有研究通过在全球大部分地区采集对流层顶部至平流层底部大气黑碳气溶胶样品发现, 在海拔20 km大气中仍可观测到高含量的黑碳, 并指出这是飞机排放的黑碳颗粒向更高海拔传输的结果^[14]. 过去的20年中, 在南亚大陆和北印度洋开展了多次大气综合观测实验, 其中在印度洋实验(INDOEX)中发现, 厚度达3~5 km的大气

引用格式: 王莱, 徐柏青, 杨松, 等. 基于系留气球的藏东南大气黑碳垂直分布. 科学通报, 2019, 64: 2949–2958

Wang M, Xu B Q, Yang S, et al. Black carbon profiles from tethered balloon flights over the southeastern Tibetan Plateau (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 2949–2958, doi: [10.1360/TB-2019-0101](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0101)

棕色云中黑碳占细颗粒物质量百分比约为14%^[15]；而在气溶胶-气体-净辐射综合观测(ICARB)中发现，来自印度西北部和亚洲西部干旱区的颗粒物可在北印度洋上空4.2 km高度形成气溶胶污染层^[16,17]。另有研究学者在南亚利用气球平台开展大气黑碳浓度廓线观测。他们意外地发现在最大海拔高度近9 km的廓线中，黑碳浓度在海拔约4.5 km高度和8.5 km以上的大气中均出现显著的峰值^[18]。这不但可增强大气辐射强迫和大气的稳定性，同时会对黑碳颗粒在大气中向上运移、寿命延长等方面具有重要的作用。更重要的是，黑碳颗粒与其他大气微粒相比更易于向高海拔大气运移和富集。已有研究显示，黑碳在总颗粒物中的比例随海拔升高而升高，通过观测发现黑碳颗粒更易受边界层内湍流运动的影响，向高海拔大气传输^[16,19-21]。由此可见，利用大气黑碳浓度地面观测结果来评估辐射强迫将低估其影响。

在青藏高原开展大气黑碳垂直分布的研究，获得第一手探空资料，具有重要的科学价值。青藏高原具有接近大气背景的环境，而其周边则是黑碳气溶胶排放最为严重的区域之一^[22-25]。在青藏高原开展大气黑碳浓度廓线观测对研究黑碳气溶胶跨境传输过程和机制，评估其对青藏高原气候环境的影响具有重要的指导意义。然而，目前对青藏高原黑碳气溶胶大气垂直结构的直接观测仍是空白。鉴于此，以青藏高原第二次综合科学考察研究为契机，2017年11~12月在位于青藏高原海拔3300 m的藏东南地区开展高空气球探测，进行大气黑碳浓度垂直廓线观测和分布结构的研究。本研究不但获得了大气黑碳浓度的垂直分布结构，也分析了其生物燃烧源垂直分布的特征。

1 研究区概况和观测方法

系留气球发放实验在海拔3300 m的中国科学院藏东南高山环境综合观测研究站(94°44'E, 29°46'N)开展。该站位于鲁朗河谷的山间谷地，距离鲁朗镇6 km，紧邻318国道。其南坐落着色季拉山，其东为加拉白垒峰和南迦巴瓦峰，周围山脉平均海拔约4500~5000 m。当地黑碳排放主要有两大来源：(1) 居民生活使用的木柴、牛粪等生物质燃烧排放；(2) 交通运输汽车尾气排放。长距离传输的主要来源为在西风和季风作用下南亚排放^[23,24]。本次观测使用的系留气球为非流线型气柱，直径7.45 m，长30 m，体积1100 m³。气球观测平台搭载有探空仪以获得温度、相对湿度和气压数据。

1.1 大气黑碳观测

本项研究利用黑碳仪(Model AE-33, Magee Scientific®, USA)以获取大气黑碳气溶胶浓度(ng/m³)和生物燃烧源贡献(%)。该仪器将大气颗粒物采集在光学纤维滤膜上，通过测量颗粒物在7个波长($\lambda=370, 470, 520, 590, 660, 880, 950$ nm)所引起的光学衰减(ATN)，根据黑碳气溶胶在880 nm的质量吸收系数(mass absorption efficiency, MAE)，计算黑碳气溶胶浓度。该仪器对生物燃烧源贡献的计算则根据生物燃烧源气溶胶所产生的光学衰减对波长显著的依赖性。这种依赖性可利用气溶胶吸收系数(absorption coefficient, b_{abs})与波长幂函数拟合，即： $b_{\text{abs}}=k\lambda^{-\text{AAE}}$ (k 为常数)，获得的吸收埃斯特朗指数(Ångström exponent, AAE)来量化。已有研究表明，化石燃料燃烧(例如：汽车尾气)排放的气溶胶AAE接近1，而生物燃烧排放增加时AAE更高^[26-28]。黑碳仪对生物燃烧源贡献的计算主要基于Sandradewi等人^[27]的模型。假设生物燃烧源气溶胶埃斯特朗指数AAE_{bb}为2，化石燃料燃烧源气溶胶埃斯特朗指数AAE_{ff}为1，那么黑碳气溶胶生物燃烧源贡献(BB, %)可由下述系列等式计算获得：

$$\frac{b_{\text{abs}}(470 \text{ nm})_{\text{ff}}}{b_{\text{abs}}(950 \text{ nm})_{\text{ff}}} = (470/950)^{-\text{AAE}_{\text{ff}}}, \quad (1)$$

$$\frac{b_{\text{abs}}(470 \text{ nm})_{\text{bb}}}{b_{\text{abs}}(950 \text{ nm})_{\text{bb}}} = (470/950)^{-\text{AAE}_{\text{bb}}}, \quad (2)$$

$$b_{\text{abs}}(\lambda) = b_{\text{abs}}(\lambda)_{\text{ff}} + b_{\text{abs}}(\lambda)_{\text{bb}}, \quad (3)$$

$$\text{BB}(\%) = b_{\text{abs}}(950 \text{ nm})_{\text{bb}} / b_{\text{abs}}(950 \text{ nm}), \quad (4)$$

其中， $b_{\text{abs}}(\lambda)_{\text{bb}}$ 为生物燃烧源波长 λ 的吸收系数， $b_{\text{abs}}(\lambda)_{\text{ff}}$ 为化石燃料燃烧源波长 λ 的吸收系数。

在本项研究中，将一台黑碳仪搭载在气球观测平台内进行大气垂直廓线观测；另一台黑碳仪布设在地面以上约10 m高度，自2017年11月26日起开展地面同步观测。

1.2 系留气球飞行情况

本项野外观测实验共选择了3个静风的夜晚实施气球飞行实验，飞行高度分别为地面以上500, 850和1950 m。需要指出的是，在第2次飞行开始不久，黑碳仪出现故障，很遗憾地未能获得气球飞行过程中大气黑碳浓度数据。因此下文将主要讨论第1次和第3次飞行

实验获得的结果。在第1次飞行实验中, 气球观测平台于2017年11月25日夜间22:29时开始上升, 次日(11月26日)凌晨3:00时结束(探空仪结束工作的高度为地面以上340 m)。在第3次飞行实验中, 气球观测平台于12月2日夜间23:23时开始上升, 次日(12月3日)清晨9:47时落地。在第3次飞行期间, 气球于1:59时到达最大高度, 停止上升并开始处于悬浮状态, 至5:39时开始下降。

2 结果和讨论

本项研究中第3次飞行实验历时较长, 飞行高度较高, 飞行过程完整, 因此本文将重点分析和讨论第3次飞行实验结果。根据气球达到最大高度的时间将第3次飞行划分为上升(23:23~次日1:59)和下降(1:59~9:47)过程, 分别用“F3-ASC”和“F3-DES”表示。第1次飞行实验历时较短, 飞行高度较低, 因此汇总为一个过程讨论, 用“F1”表示。

本项研究根据位温廓线来确定大气边界层高度和稳定边界层高度^[29]。由于大气边界层顶存在一个明显的顶盖逆温, 这一逆温层的位置可用来确定大气边界层顶高度。在夜间地面净辐射为负值, 下垫表面冷却, 导致大气边界层从下往上降温, 形成逆温层结的稳定大气边界层。本项研究利用地面逆温层厚度来确定稳定边界层高度。根据F3-ASC, F3-DES和F1三个过程的位温廓线, 将大气由低至高划分为稳定边界层(SBL)、剩余层(RL)和自由大气(FT)。3个过程的SBL, RL和FT的划分高度可参见表1。根据已有研究, 青藏高原地区大气边界层高度通常为1500~4000 m^[30-34], 有的观测研究中甚至达到近5000 m^[35], 普遍显著地高于平原地区大气边界层高度(1000~1500 m)。然而本项研究获得的边界层高度(即: 950 m)显著低于以往青藏高原高地区大气边界层的观测结果; 稳定边界层高度也普遍低于

以往研究^[35-37]。这可能由观测区域和观测季节的差异造成。

2.1 大气黑碳垂直分布特征

大气BC浓度的垂直廓线如图1所示, 可以发现BC浓度在稳定边界层最高, 其最大值出现在地面以上~100 m高度, 随海拔的升高BC浓度快速降低并基本稳定在100~200 ng/m³水平。稳定边界层BC浓度在F3-ASC, F3-DES和F1过程中分别为470±170, 1750±590和640±210 ng/m³(表1); 剩余层BC浓度则分别为130±30, 150±50和220±80 ng/m³。需要说明的是, 由于F1的飞行高度未达到自由大气, 这可能使本研究中F1剩余层BC浓度值偏离实际值。自由大气BC浓度在F3-ASC和F3-DES过程分别为120±50和120±40 ng/m³。地面观测显示在F3-ASC和F3-DES过程时段, 地表BC平均浓度分别为360±120和1210±2010 ng/m³。由于地面观测的BC浓度分别为F3-ASC和F3-DES过程全时段的平均值, 而气球观测平台对稳定边界层BC浓度的观测仅包含各过程稳定边界层内时段, 因此地面观测BC浓度与气球观测平台所得稳定边界层BC浓度具有一定的差异。

生物燃烧源(BB)贡献廓线如图2所示, 在F3-ASC和F3-DES的稳定边界层中, BB贡献显著大于剩余层和自由大气; 而在F1中没有这种结构特征。稳定边界层BB贡献在F3-ASC, F3-DES和F1过程中分别为34%±11%, 57%±15%和14%±7%; 剩余层则分别为16%±6%, 16%±6%和13%±4%; 自由大气BB贡献在F3-ASC和F3-DES过程中分别为11%±5%和16%±5%。地面观测的结果显示, 在F3-ASC和F3-DES过程时段, 地表BB贡献平均为35%±14%和44%±30%。同样地, 地表观测BB贡献与气球观测平台所得稳定层BB贡献之间的差异主要是由二者观测时间跨度的差异造成。

表 1 在F3-ASC, F3-DES和F1过程中稳定边界层、剩余层和自由大气地面高度、黑碳浓度(BC)和生物燃烧贡献(BB)^{a)}

Table 1 Heights (H) of stable boundary layers, residual layers and free troposphere, and corresponding mean black carbon concentrations (BC) and mean biomass burning contributions (BB) during the flight segments F3-ASC, F3-DES and F1

	F3-ASC过程			F3-DES过程			F1过程		
	高度(m)	BC(ng/m ³)	BB(%)	高度(m)	BC(ng/m ³)	BB(%)	高度(m)	BC(ng/m ³)	BB(%)
SBL	210	470±170	34±11	140	1750±590	57±15	180	640±210	14±7
RL	950	130±30	16±6	950	150±50	16±6	N.A.	220±80	13±4
FT	N.A.	120±50	11±5	N.A.	120±40	16±5	N.A.	N.A.	N.A.

a) N.A.表示无数据

图 1 在F3-ASC(a), F3-DES(b)和F1(c)过程中大气黑碳浓度(BC)、位温(θ)和相对湿度(RH)垂直廓线. 水平虚线示意稳定边界层(SBL)和残余层(RL)的高度, 垂直虚线为各层大气黑碳平均浓度. 下三角为地面观测大气黑碳平均浓度

Figure 1 Profiles of BC concentration (BC), potential temperature (θ) and relative humidity (RH) during the flight segments F3-ASC (a), F3-DES (b) and F1 (c). The horizontal gray dash lines show the corresponding tops of the stable boundary layers (SBL) and residual layers (RL). The vertical gray dash lines show the corresponding mean BC concentrations in the SBL, RL and FT (free troposphere). The black inverted triangles mark the mean BC concentrations measured at ground level during these flight segments

图 2 在 F3-ASC(a), F3-DES(b)和 F1(c)过程中生物燃烧源对黑碳的贡献(BB)、位温(θ)和相对湿度(RH)垂直廓线。水平虚线示意稳定边界层(SBL)和剩余层(RL)的高度,垂直虚线为各层大气生物燃烧源平均贡献。下三角为地面观测生物燃烧源贡献

Figure 2 Profiles of biomass burning contribution (BB), potential temperature (θ) and relative humidity (RH) during the flight segments F3-ASC (a), F3-DES (b) and F1 (c). The horizontal gray dash lines show the corresponding tops of the stable boundary layers (SBL) and residual layers (RL). The vertical gray dash lines show the corresponding mean BB in the SBL, RL and FT (free troposphere). The black inverted triangles mark the mean BB contributions measured at ground level during these flight segments

在F3-ASC和F3-DES过程中, 稳定边界层BC浓度和BB贡献均显著大于剩余层和自由大气, 且在该层大气内BC浓度和BB贡献的垂直廓线变化最为强烈. 稳定边界层中平均BC浓度和BB贡献均与地面观测结果相近, 且表现出一致的日变化信息, 即: 清晨高夜间低. 由此可见, 稳定边界层主要受局地地面净辐射和人类活动的影响, 反映的是当地的排放.

在F3-ASC和F3-DES过程中, 剩余层内BC浓度和BB贡献在垂直方向上均匀稳定; 且在F3-ASC, F3-DES和F1三个过程之间无明显差异. 这表明剩余层中BC气溶胶很稳定; 而剩余层BC浓度(100~200 ng/m³)和BB贡献(16%)很可能代表了当地大气背景情况. 从F3-ASC, F3-DES过程的垂直廓线看, 剩余层大气BC浓度和BB贡献与自由大气相当, 这表明即使当地排放的黑碳在白天强烈的湍流作用下向高层大气传输, 其对自由大气的贡献十分微弱. 此外, 尽管剩余层和稳定边界层黑碳气溶胶主要受局地排放影响, 在F3-ASC和F3-DES过程中剩余层BB贡献显著低于稳定边界层(在F1中未见这种特征). 这可能反映了生物燃烧源排放的黑碳颗粒与化石燃料源排放(本研究区内主要贡献因子为汽车尾气)相比具有更大的粒径^[1,38], 因而更易受到沉降作用影响.

研究区自由大气黑碳气溶胶主要来源于长距离传输. 从F3-ASC和F3-DES过程的垂直廓线看, 尽管自由大气BC平均浓度与剩余层相比未见显著差异, 但在3个飞行过程的垂直廓线中, 自由大气BC浓度达到最低值(约120 ng/m³). 青藏高原自由大气BC浓度比南亚地区观测的自由大气BC浓度(200~1000 ng/m³)相比更低^[18,39], 而同北极地区海拔8~10 km自由大气BC浓度(小于100 ng/m³)相比略高^[11,12]. 此外, 自由大气BB贡献达到最低值, 这一方面可能反映了黑碳气溶胶排放源区所固有的燃烧结构; 另一方面则可能反映了生物燃烧源同化石燃烧源(例如: 汽车尾气或工业生产等)相比所排放的颗粒物在长距离传输中更易沉降.

在F3-DES过程中, 位温和相对湿度在海拔4850 m以上有大幅波动, 与此同时大气BC浓度和BB贡献发生相应的波动. 可以看出当位温降低、相对湿度增加时, BC浓度低于自由大气平均水平, 生物燃烧源贡献亦有降低趋势. BC浓度和BB贡献在自由大气中的变化将在本文第2.2节详细讨论. 值得注意的是, 位温和相对湿度发生波动的海拔高度恰恰与研究区山脉高度一致, 表明该区域山地地形阻挡了自由大气的水平输送. 在F3-DES过程中海拔4850 m以上自由大气的温湿变化表明,

研究区山地地形之上, 有更暖、干的气团在自由大气水平传输作用下进入观测区上空.

利用Hysplit后向轨迹模式分析稳定边界层、剩余层和自由大气的气团传输轨迹. 图3显示了在第3次系留气球飞行中, 当地时间2017年12月3日06:00时不同地面高度气团24 h后向轨迹结果. 若地面以上150, 500和2000 m高度分别代表本次观测中的稳定边界层、剩余层和自由大气, 那么可以看出稳定边界层和剩余层气团传输距离较短、气团轨迹地面高度较低, 反映的是当地气团影响; 而自由大气气团传输距离较长, 气团轨迹地面高度普遍在1000 m以上, 显示了西风急流水平方向上长距离传输的影响.

2.2 气团对自由大气黑碳的影响

如上所述, 在本项研究中当系留气球处于自由大气中时(地面高度950 m以上, 00:38~08:46时), 位温和相对湿度发生了明显的波动(图4). 特别突出的是在01:52~02:40和03:56~07:47时间段, 位温显著地升高, 而相对湿度则相应地显著降低. 根据这种变化, 将自由大气悬浮阶段划分为5个时间段, 分别为: P1(00:38~01:52), P2(01:52~02:40), P3(02:40~03:56), P4(03:56~07:47)和P5(07:47~08:46). 其中, 在P2和P4时间段位温

图3 当地时间2017年12月3日06:00时地面高度150, 500和2000 m气团24 h后向轨迹. 黑色五角星标识了气球飞行试验的地点

Figure 3 24-h backward trajectories starting at 6:00 local time on December 3, 2017, computed using the HYSPLIT model at 150, 500 and 2000 m a.g.l. The experimental location is marked with a black star

图4 系留气球观测平台位于自由大气中时,生物燃烧源贡献(BB)、黑碳浓度(BC)、相对湿度(RH)、位温(θ)和气球飞行海拔高度(Elevation)时间序列。阴影区划分了本文2.2节中的5个时间段(P1~P5)

Figure 4 Time series of (a) biomass burning contribution (BB), (b) BC concentration (BC), (c) relative humidity (RH), (d) potential temperature (θ) and (e) elevation (m) when the balloon was above the stable boundary layer (SBL) in the 3rd Flight. P2 and P4 with obviously sharp changes of potential temperature and relative humidity are noted by gray shadow boxes. Five time periods (P1–P5) are described in detail in Section 2.2 in the present study. Horizontal dash lines in (a) and (b) show the mean BB contribution and mean BC concentration above the SBL.

和相对湿度发生了强烈的反相位变化,这明确地指示了不同气团的影响。大气 BC 浓度、 BB 贡献在时间上具有与位温、相对湿度同步的变化。总体上,当位温升高、相对湿度降低时,即P2和P4时段, BC 浓度普遍低于自由大气平均 BC 浓度水平,而生物燃烧源贡献则呈增加趋势。这反映了不同的气团所携带的黑碳气溶胶浓度和燃烧源具有较明显的差异。

3 结论

本研究利用系留气球平台首次获得青藏高原大气黑碳垂直分布结构,结果显示研究区大气黑碳浓度的垂直结构呈“稳定边界层显著大于剩余层,剩余层略

大于自由大气”的特征。结合生物燃烧源贡献廓线和气团后向轨迹,结果表明稳定边界层和剩余层黑碳气溶胶突出地反映了局地的排放,而自由大气黑碳气溶胶则主要受西风急流长距离传输的影响。稳定边界层受地面净辐射和人类活动影响较大,黑碳浓度高($1000 \pm 750 \text{ ng/m}^3$),呈现明显的日变化特征;剩余层黑碳浓度低($100 \sim 200 \text{ ng/m}^3$)且稳定,与自由大气相比无显著差异,表明青藏高原受当地人类活动影响较弱;自由大气黑碳浓度约为 120 ng/m^3 ,略高于北极自由大气,显著低于南亚。

通过本研究可以看出,大气黑碳地面观测结果,特别是地势较低的山谷地区观测结果,不能代表青藏

高原大气黑碳本底水布显著不均匀性, 为深入理解黑碳气溶胶垂直分布规律, 探明跨境传输过程和机制, 降

低气候环境影响评估中的不确定性, 建议在高海拔、无人值守偏远地区加强多手段系统性的野外观测。

参考文献

- 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 Geophys Res Atmos*, 2013, 118: 5380–5552
- Haywood J M, Shine K P. Multi-spectral calculations of the direct radiative forcing of tropospheric sulphate and soot aerosols using a column model. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 1997, 123: 1907–1930
- Haywood J M, Ramaswamy V. Global sensitivity studies of the direct radiative forcing due to anthropogenic sulfate and black carbon aerosols. *J Geophys Res*, 1998, 103: 6043–6058
- Samset B H, Myhre G, Schulz M, et al. Black carbon vertical profiles strongly affect its radiative forcing uncertainty. *Atmos Chem Phys*, 2013, 13: 2423–2434
- Zarzycki C M, Bond T C. How much can the vertical distribution of black carbon affect its global direct radiative forcing? *Geophys Res Lett*, 2010, 37: L20807
- Seinfeld J. Black carbon and brown clouds. *Nat Geosci*, 2008, 1: 15–16
- Sun Y L. Vertical structures of physical and chemical properties of urban boundary layer and formation mechanisms of atmospheric pollution (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 1375–1389 [孙业乐. 城市边界层理化结构与大气污染形成机制研究进展. 科学通报, 2018, 63: 1375–1389]
- Samset B H, Myhre G. Vertical dependence of black carbon, sulphate and biomass burning aerosol radiative forcing. *Geophys Res Lett*, 2011, 38: L24802
- McFarquhar G M, Wang H. Effects of aerosols on trade wind cumuli over the Indian Ocean: Model simulations. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 2006, 132: 821–843
- IPCC. Climate change 2013: The physical science basis. In: Stocker T F, ed. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013
- Hansen A D A, Rosen H. Vertical distributions of particulate carbon, sulfur, and bromine in the Arctic haze and comparison with ground-level measurements at Barrow, Alaska. *Geophys Res Lett*, 1984, 11: 381–384
- Hansen A D A, Novakov T. Aerosol black carbon measurements in the Arctic haze during AGASP-II. *J Atmos Chem*, 1989, 9: 347–361
- Okada K, Ikegami M, Uchino O, et al. Extremely high proportions of soot particles in the upper troposphere over Japan. *Geophys Res Lett*, 1992, 19: 921–924
- Blake D F, Kato K. Latitudinal distribution of black carbon soot in the upper troposphere and lower stratosphere. *J Geophys Res*, 1995, 100: 7195–7202
- Ramanathan V, Crutzen P J, Lelieveld J, et al. Indian Ocean Experiment: An integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo-Asian haze. *J Geophys Res*, 2001, 106: 28371–28398
- Moorthy K K, Satheesh S K, Babu S S, et al. Integrated campaign for aerosols, gases and radiation budget (ICARB): An overview. *J Earth Syst Sci*, 2008, 117: 243–262
- Satheesh S K, Moorthy K K, Babu S S, et al. Climate implications of large warming by elevated aerosol over India. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L19809
- Babu S S, Moorthy K K, Manchanda R K, et al. Free tropospheric black carbon aerosol measurements using high altitude balloon: Do BC layers build “their own homes” up in the atmosphere? *Geophys Res Lett*, 2011, 38: L08803
- Novakov T, Hegg D A, Hobbs P V. Airborne measurements of carbonaceous aerosols on the East Coast of the United States. *J Geophys Res*, 1997, 102: 30023–30030
- Mayol-Bracero O L, Gabriel R, Andreae M O, et al. Carbonaceous aerosols over the Indian Ocean during the Indian Ocean Experiment (INDOEX): Chemical characterization, optical properties, and probable sources. *J Geophys Res*, 2002, 107: 8030
- Tripathi S N, Srivastava A K, Dey S, et al. The vertical profile of atmospheric heating rate of black carbon aerosols at Kanpur in northern India. *Atmos Environ*, 2007, 41: 6909–6915
- Xu B, Cao J, Hansen J, et al. Black soot and the survival of Tibetan glaciers. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106: 22114–22118
- Xu B Q, Wang M, Joswiak D R, et al. Deposition of anthropogenic aerosols in a southeastern Tibetan glacier. *J Geophys Res*, 2009, 114: D17209
- Wang M, Xu B, Cao J, et al. Carbonaceous aerosols recorded in a southeastern Tibetan glacier: Analysis of temporal variations and model estimates of sources and radiative forcing. *Atmos Chem Phys*, 2014, 15: 1191–1204
- Zhang R, Wang H, Qian Y, et al. Quantifying sources, transport, deposition, and radiative forcing of black carbon over the Himalayas and Tibetan Plateau. *Atmos Chem Phys*, 2015, 15: 6205–6223
- Sandradewi J, Prévôt A S H, Weingartner E, et al. A study of wood burning and traffic aerosols in an Alpine valley using a multi-wavelength Aethalometer. *Atmos Environ*, 2008, 42: 101–112

- 27 Sandradewi J, Prévôt A S H, Szidat S, et al. Using aerosol light absorption measurements for the quantitative determination of wood burning and traffic emission contributions to particulate matter. *Environ Sci Technol*, 2008, 42: 3316–3323
- 28 Drinovec L, Močnik G, Zotter P, et al. The “dual-spot” Aethalometer: An improved measurement of aerosol black carbon with real-time loading compensation. *Atmos Meas Tech*, 2015, 8: 1965–1979
- 29 Stull R B. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. London: Kluwer Academic Publishers, 2012
- 30 Ye D Z, Gao Y X. *Tibetan Plateau Meteorology* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1979 [叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学. 北京: 科学出版社, 1979]
- 31 Zhou M Y, Xu X D, Bian L G, et al. *Observational Analysis and Dynamic Study of Atmospheric Boundary Layer on Tibetan Plateau* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2000 [周明煜, 徐祥德, 卞林根, 等. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究. 北京: 科学出版社, 2000]
- 32 Liu H Y, Miao M Q. Preliminary analysis on characteristics of boundary layer in Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). *J Nanjing U (Nat Sci)*, 2001, 37: 348–357 [刘红燕, 苗曼倩. 青藏高原大气边界层特征初步分析. 南京大学学报(自然科学版), 2001, 37: 348–357]
- 33 Song X Z, Zhang H S, Liu X J, et al. Determination of atmospheric boundary layer height in unstable conditions over the middle Tibetan Plateau (in Chinese). *Acta Sci Nat Univ Peking*, 2006, 42: 328–333 [宋星灼, 张宏升, 刘新建, 等. 青藏高原中部地区不稳定大气边界层高度的确定与分析. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42: 328–333]
- 34 Wang Y J, Xu X D, Zhao T L, et al. Structures of convection and turbulent kinetic energy in boundary layer over the southeastern edge of the Tibetan Plateau. *Sci China Earth Sci*, 2015, 58: 1198–1209 [王寅钧, 徐祥德, 赵天良, 等. 青藏高原东南缘边界层对流与湍能结构特征. 中国科学: 地球科学, 2015, 45: 843–855]
- 35 Xu G R, Cui C G. Observational analysis on atmospheric boundary layer height over eastern Qinghai-Tibet Plateau and its downstream key area (in Chinese). *Torrent Rain Disaster*, 2009, 28: 112–118 [徐桂荣, 崔春光. 青藏高原东部及下游关键区大气边界层高度的观测分析. 暴雨灾害, 2009, 28: 112–118]
- 36 Li M S, Dai Y X, Ma Y M, et al. Analysis on structure of atmospheric boundary layer and energy exchange of surface layer over Mount Qomolangma region (in Chinese). *Plateau Meteorol*, 2006, 25: 807–813 [李茂善, 戴有学, 马耀明, 等. 珠峰地区大气边界层结构及近地层能量交换分析. 高原气象, 2006, 25: 807–813]
- 37 Lü Y Q, Ma Y M, Li M S, et al. Study on characteristic of atmospheric boundary layer over lake Namco region, Tibetan Plateau (in Chinese). *Plateau Meteorol*, 2008, 27: 1205–1210 [吕雅琼, 马耀明, 李茂善, 等. 青藏高原纳木错湖区大气边界层结构分析. 高原气象, 2008, 27: 1205–1210]
- 38 Schwarz J P, Gao R S, Spackman J R, et al. Measurement of the mixing state, mass, and optical size of individual black carbon particles in urban and biomass burning emissions. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L13810
- 39 Safai P D, Raju M P, Maheshkumar R S, et al. Vertical profiles of black carbon aerosols over the urban locations in South India. *Sci Total Environ*, 2012, 431: 323–331

Summary for “基于系留气球的藏东南大气黑碳垂直分布”

Black carbon profiles from tethered balloon flights over the southeastern Tibetan Plateau

Mo Wang^{1,2}, Baiqing Xu^{1,2*}, Song Yang¹, Jing Gao^{1,2}, Taihua Zhang³, Zeqing He³, Matjaž Kobal⁴ & A.D.A. Hansen⁵¹ Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;² Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;³ Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;⁴ Aerosol d.o.o., Ljubljana, SI-1000, Slovenia;⁵ Magee Scientific Co., Berkeley, CA 94704, USA* Corresponding author, E-mail: baqing@itpcas.ac.cn

Black carbon (BC) can change the energy budget of the earth system by strongly absorbing solar radiation: both suspended in the atmosphere, incorporated into cloud droplets, or deposited onto high-albedo surfaces. BC's direct radiative forcing is highly dependent on its vertical distribution. However, due to large variabilities and the small number of vertical profile measurements, there is still large uncertainty in this forcing value. Moreover, the vertical profile of BC and its relative elevation to clouds determine BC's lifetime in the atmosphere and its transport and removal processes. Experimental measurements of BC vertical profiles over the Tibetan Plateau are very important: not only for studies of BC effects on regional climate, but also for studies of BC transport from surrounding regions with strong anthropogenic emissions. In November-December 2017, a series of tethered balloon flights was launched at the Southeast Tibet Observation and Research Station for the Alpine Environment of the Chinese Academy of Sciences ("SETORS", located at 29°46'N, 94°44'E, 3300 m a.s.l.). A cylindrical balloon with a diameter of 7.9 m and maximum volume of 1100 m³ was used. A 7-channel Aethalometer (Model AVIO-33, Magee Scientific[®], USA) was installed in the gondola attached to the balloon, together with several other instruments including a GPS for altitude, and sensors for temperature and relative humidity. The airborne Aethalometer measured BC mass concentration (ng/m³) on a 1-second timebase at 7 wavelengths ranging from 370 nm to 950 nm. Meanwhile, another Aethalometer (Model AE-33, Magee Scientific[®], USA) was used to monitor BC mass concentration near the surface, at a height of about 10 m above the ground. From the tethered balloon flights, we derived three profiles designated as "F1", "F3-ASC", and "F3-DES". The maximum height for the F1 flight was 500 m a.g.l., namely 3800 m a.s.l.; while the maximum height for the F3 flight was 1950 m a.g.l., namely 5250 m a.s.l. Based on the potential temperature and relative humidity data, the profiles were divided into three layers: the stable boundary layer (SBL), the residual layer (RL), and the free troposphere (FT). The vertical distribution of BC shows a prominent peak within the SBL. The mean BC concentration in SBL (1000±750 ng/m³) was one order of magnitude higher than in RL and FT, which were 140±50 ng/m³ and 120±50 ng/m³, respectively. The BC concentration measured in the present study in FT over the southeastern Tibetan Plateau is comparable to measurements in Arctic regions, but lower than values in South Asia. Analysis of the wavelength dependence of the data yields an estimate of the biomass burning contribution. This showed a maximum value in SBL of 44%±37%, and was 16%±6% in RL and 14%±5% in FT. Analysis of 24-h isentropic back trajectories showed that BC in SBL and RL was dominated by local sources, while in the FT, BC is mainly influenced by mid- to long-distant transport by the westerlies. In addition, analysis of the variations of BC concentration and biomass burning contribution on a high-resolution time scale showed that BC concentrations and the nature of their sources are largely influenced by air mass origins and transport. To our knowledge, this is the first ever *in situ* measurement of BC concentration over the Tibetan Plateau in the atmospheric boundary layer and free troposphere up to 5000 m a.s.l.

Tibetan Plateau, black carbon, vertical distribution, tethered balloon, biomass burningdoi: [10.1360/TB-2019-0101](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0101)