大气污染物跨境传输及其对青藏高原环境影响

康世昌^{1,3,4*}, 丛志远^{2,3}, 王小萍^{2,3}, 张强弓^{2,3}, 吉振明^{5,6}, 张玉兰^{1,3}, 徐柏青^{2,3}

1. 中国科学院西北生态环境与资源研究院, 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000;
2. 中国科学院青藏高原研究所, 中国科学院青藏高原环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100101;
3. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101;
4. 中国科学院大学, 北京 100049;
5. 中山大学大气科学学院, 珠海 519082;
6. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 珠海 519000

* 联系人, E-mail: shichang.kang@lzb.ac.cn

2019-06-02 收稿, 2019-08-30 修回, 2019-09-02 接受, 2019-09-25 网络版发表

第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0605)和中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA20040501)资助

摘要 青藏高原拥有独特的多圈层环境系统与生态类型, 对我国乃至亚洲具有重要的生态安全屏障作用. 在青藏高原开展污染物跨境传输的科学考察研究, 既是地表多圈层相互作用研究的重要组成部分, 也是支撑国家生态环境安全的战略需求. 针对第二次青藏高原综合科学考察研究的“南亚通道”关键区, 结合长期站点监测和短期强化观测, 本文全面综述了青藏高原大气污染物时空分布、传输过程和机理, 以及污染物对气候和生态系统影响方面的新认识. 从历史趋势上看, 青藏高原黑碳和汞等记录, 自20世纪50年代以来呈现快速上升, 反映了亚洲区域大气污染物排放的快速增多. 从传输过程上看, 跨越喜马拉雅山的高空环流以及局地的山谷风是大气污染物跨境传输的重要途径. 大气气溶胶-雪冰辐射反馈效应对青藏高原的气候变化带来一定的影响, 外源污染物对青藏高原生态系统的负面影响业已凸显. 未来研究中, 亟待精确量化跨境污染物的输送量和影响范围, 预测未来情景下污染物排放与环境健康风险的变化趋势.

关键词 青藏高原, 人类活动, 大气污染物, 跨境传输, 环境效应, 风险评估

青藏高原拥有独特的地表多圈层(大气圈-水圈-冰冻圈-土壤圈-生物圈)环境系统与生态类型, 对我国乃至亚洲具有重要的气候环境效应和生态安全屏障作用^[1-3]. 尽管当地人类活动稀少, 大气环境洁净, 但周边区域大气污染物可以通过长距离传输进入青藏高原, 对脆弱的生态环境带来影响. 第一次青藏高原综合科学考察研究较少涉及外源污染物对高原环境影响的评估^[4], 而后期的各类研究也仅对外源污染进行了粗略探讨. 鉴于此, 在青藏高原开展大气污染物跨境传输的科学考察, 瞄准国家生态环境安全的长远战略问题, 评估

污染物对生态环境和人体健康的影响, 不但可以为青藏高原生态文明建设提供支撑, 还可为争取环境外交话语权提供科学基础. 此外, 从地球系统科学角度出发, 研究人类活动排放污染物向青藏高原的输入过程、机制及其带来的生态环境影响, 是青藏高原地表多圈层相互作用研究的纽带和关键环节^[5,6]. 这一科考任务将为全球变化和人类活动双重影响下的青藏高原可持续发展提出理论依据, 也是实现习总书记提出的第二次青藏高原综合科学考察研究核心目标的重要实践.

引用格式: 康世昌, 丛志远, 王小萍, 等. 大气污染物跨境传输及其对青藏高原环境影响. 科学通报, 2019, 64: 2876-2884

Kang S C, Cong Z Y, Wang X P, et al. The transboundary transport of air pollutants and their environmental impacts on Tibetan Plateau (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 2876-2884, doi: [10.1360/TB-2019-0135](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0135)

针对第二次青藏高原综合科学考察“南亚通道”关键区,结合长期站点监测和短期强化观测,本文全面总结了青藏高原大气污染物研究方面的新进展和新认识,包括大气污染物历史变化、现状与来源等诸多内容。在此基础上,聚焦南亚大气污染物跨境传输的过程与机理,评估了污染物的气候效应和生态环境影响。本文讨论的大气污染物主要包括气候环境效应突出的黑碳(black carbon, BC)、重金属和持久性有机污染物(persistent organic pollutants, POPs)等。

1 大气污染物历史变化、现状及来源

1.1 BC与重金属的历史变化

利用环境介质(如冰芯和湖泊沉积物)重建过去大气环境变化的历史,能够有效弥补大气污染物监测时间较短的缺陷。青藏高原不同地区的冰芯BC记录呈现出相似的历史变化趋势,西风带气候区冰芯(如慕士塔格)记录显示20世纪50年代以来BC含量出现明显的增长^[7]。而季风气候区(如珠穆朗玛峰)冰芯记录显示20世纪70年代以来BC含量快速的增长趋势(图1)^[8]。纳木错湖泊沉积物中的BC沉降通量在20世纪50年代以来持续升高(图1)^[9]。通过对比不同区域的BC历史排放清单,亚洲区域特别是南亚地区BC排放的持续加剧是导致高原BC增加的主要原因^[11]。

与BC类似,有毒污染物如Hg的冰芯记录也呈现了显著增长的趋势。Kang等人^[10]利用8支浅湖芯和1支深孔冰芯集成重建了过去500年来Hg的历史变化。指出青藏高原冰芯-湖芯共同记录了自工业革命以来,尤其是二战之后(20世纪50年代)(图1),大气Hg沉降通量快速增加与南亚地区近期人为Hg排放的增长相对应。这与欧美地区大气Hg沉降通量近几十年来呈现下降或保持稳定的趋势不一致,表明南亚人为排放污染物是影响高原大气Hg本底和沉降通量的主要原因。总之,历史变化趋势表明,大气污染物的全球传输对高原环境负荷的影响不容忽视。

1.2 大气气溶胶和降水的化学组成、来源及时空变化

通过高原典型站点的持续联网观测,获得了大气气溶胶的含量、粒径等基本特征^[12]。青藏高原大气气溶胶的质量浓度水平整体较低,阿里荒漠环境综合观测研究站、珠穆朗玛大气与环境综合观测研究站、纳木错多圈层综合观测研究站、藏东南高山环境综合观

图1 青藏高原冰芯和湖泊沉积物记录的大气黑碳和汞沉降历史。图中慕士塔格冰芯BC数据引自文献^[7], 珠峰东绒布冰芯BC数据引自文献^[8], 纳木错湖芯BC通量数据引自文献^[9], 纳木错湖芯和各拉丹冬冰芯Hg通量数据引自文献^[10]

Figure 1 The historical profile of black carbon and mercury reconstructed by ice cores and lake sediments across Tibetan Plateau. The BC data of Muztagh Ata ice core is adopted from Ref. [7], the BC data of Mt. Everest ice core is from Ref. [8], the BC deposition flux data of Nam Co lake sediments is from Ref. [9], and the mercury flux data of Nam Co lake sediment and Mt. Geladaindong ice core is from Ref. [10]

测研究站的细颗粒物($PM_{2.5}$)日均质量浓度依次为 18.2 ± 8.9 , 14.5 ± 7.4 , 11.9 ± 4.9 和 $11.7 \pm 4.7 \mu g m^{-3}$,且粒径上呈现积聚模态和粗模态的双峰模态。大气气溶胶的浓度存在明显的季节变化,表现为季风前期(春季)高、季风期(夏季)低,反映了南亚棕色气团爆发和夏季季风降水清除两个因素对区域气溶胶浓度的显著约束。连续在线气溶胶观测(黑碳和气溶胶光学厚度)也揭示了相似的季节变化特征。根据环保部门的城市空气质量数据,拉萨作为西藏最大的城市,空气质量综合指数在全国主要城市中排名靠前(在2017年,74个主要城市中排名第2), PM_{10} 年均值为 $54.19 \mu g m^{-3}$, $PM_{2.5}$ 为 $19.09 \mu g m^{-3}$ 。西藏地区城市常规大气污染物浓度较低的原因主要包括:独特的地理位置、第三产业为主的产业结构、以再生能源为主的能源结构,以及切实有效的政府管控治理措施^[13,14]。

青藏高原大气气溶胶中的水溶性离子组成中, SO_4^{2-} 是最主要的阴离子,其次是 NO_3^- ,而 Ca^{2+} 是最主

要的阳离子。这一特征既反映了人类污染物排放的影响,也体现了地表扬尘(地壳物质)的重要贡献。青藏高原降水均呈中性或弱碱性, pH均值范围在5.94~7.80之间^[6,15]。降水中的主要水溶性离子浓度与全球偏远地区处于同一水平,这反映出青藏高原大气环境整体洁净的特征。从微量元素组成看,高原气溶胶中Cr, Ni, Cu, Zn和Pb等元素的富集因子较高,说明这些元素受到了人类排放污染物的影响,而其他元素富集因子接近于1,表明它们主要来自地壳^[16]。

青藏高原不同区域有机碳(OC)和元素碳(EC或BC)的浓度水平存在差异^[17],但突出特征是OC的含量显著高于EC^[18];同时OC和EC浓度呈现“冬高夏低”态势。青藏高原南部和南亚大气气溶胶中,左旋葡聚糖与OC和EC具有显著的相关关系,说明生物质燃烧是碳质组分的重要来源。同时,雪冰中的左旋葡聚糖等痕量有机指示物揭示出,青藏高原受到周边地区生物质燃烧排放的影响,特别是印度北部的春季火灾能够引起青藏高原东南(简称藏东南)地区冰川雪冰中BC含量剧增^[19]。雪冰中黑碳的¹⁴C组成显示从高原边缘到内陆,生物质燃烧对黑碳的贡献逐渐增大(图2),证实生物质燃烧排放对青藏高原气候和冰冻圈具有重要的影响^[20]。

1.3 气态污染物的浓度与影响因素

认识青藏大气气态污染物的时空变化及来源,是揭示污染物区域和全球传输、沉降与归趋的重要基础,同时也是有效保护高原生态环境的重要前提。

臭氧是大气中最重要的痕量气体成分之一。臭氧主要存在于平流层,只有约10%存在于对流层。但臭氧在对流层诸多化学过程中起着重要作用,也是引起气候变化的重要因子之一。此外,对流层臭氧与人类、地表生物的健康有重要的影响。长期观测发现青藏高原主体与边缘区域的臭氧浓度较高,其中纳木错站年均浓度为47.6 ppb(标准气压下臭氧: 1 ppb=1.96 ng/m³)^[21]。瓦里关站和尼泊尔金字塔站浓度也分别达到50.9^[22]和49 ppb^[23],远高于诸多低海拔城市站点水平。青藏高原中部的站点(纳木错站、当雄和拉萨)地表臭氧于春末夏初达到峰值,并在峰值之后迅速下降到极低的水平。Yin等人^[21]利用ERA-Interim再分析资料发现,深度平流层入侵的纬度位置与纳木错和青藏高原其他站点地表臭氧浓度变化具有相关关系,各地入侵强烈时期对应当地地表臭氧高值,而南亚气团的传输也在一定程度影响青藏高原地表臭氧浓度变化。

图2 生物质和化石燃料燃烧排放对青藏高原雪坑BC的相对贡献(箭头代表不同区域的BC来源)^[20]

Figure 2 The relative contribution of biomass burning and fossil fuel combustion to the black carbon in snow samples in Tibetan Plateau^[20]. Arrow refers to BC source region

Hg是唯一主要以气态形式存在于大气中的金属,同时也是环境中毒性最强的重金属之一。纳木错站是我国已有大气汞长期观测网络中浓度最低的站点,代表了青藏高原洁净地区极低的大气汞浓度本底值^[24]。整体来看,高原内部大气汞遵循局地循环规律,地表汞释放是大气汞的主要来源之一。气态单质汞在太阳辐射和卤族元素化合物等氧化物作用下,能够转化为活性气态汞,并发生沉降进入青藏高原生态系统中,而空气垂直交换在活性气态汞形成过程中起到稀释的作用。高原边缘站点因离人类活动区域较近,受人为排放影响明显,大气汞在一定时段内呈现较高浓度。特别是来自南亚的人为汞排放,能够通过大气环流进入青藏高原内部,甚至影响到青藏高原北部的站点^[24]。

《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》规定了需要优先控制和削减的十几种POPs^[25]。但是目前,有机氯农药与多溴联苯醚等物质在亚洲(尤其是东亚和南亚)使用量巨大。为控制疟疾等通过蚊虫传播的传染病,在南亚和东南亚,诸如滴滴涕(DDTs)、六六六(HCHs)等杀虫剂至今仍未被禁用^[26]。对青藏高原、巴基斯坦及尼泊尔大气POPs的浓度水平调查显示,青藏高原大气POPs整体水平比周边源区,如尼泊尔和巴基斯坦等低1~2个数量级。典型POPs(如DDTs和HCHs等)浓度水平呈现从东南部向西北部递减的空间特征,在藏东南地区部分站点出现高值,表明雅鲁藏布大峡谷是南亚污染物进入青藏高原的重要通道之一^[27]。

2 大气污染物跨境传输过程和机制

2.1 大气气溶胶跨境传输的过程和机制

青藏高原受到周边污染排放的影响已经是不争的事实。青藏高原不同区域的大气环流不同,受到不同地区来源的污染物影响。大气观测、冰芯记录、模型模拟均显示南亚是大气污染物的主要源区,东亚、中亚以及高原自身的大气污染物也有一定贡献。在典型时段(尤其是春季),珠穆朗玛峰(简称珠峰)^[28,29]和纳木错^[30,31]等区域已清晰捕捉到大气污染物长距离跨境传输事件。

珠穆朗玛大气与环境综合观测研究站气溶胶长期监测结果显示,珠峰地区全年的地壳物质影响相对稳定,但OC、EC和水溶性有机碳(WSOC)以及主要离子(NH_4^+ , K^+ , NO_3^- 和 SO_4^{2-})均在季风前期表现出高值。与季风前期喜马拉雅山脉南侧密集的生物质燃烧(如农业秸秆焚烧和森林火灾)相对应,而且OC、EC和WSOC

的浓度与生物质燃烧的指示物 K^+ 和左旋葡聚糖具有显著的相关关系^[28,32]。这些现象均说明,珠峰地区季风前期受到南亚生物质燃烧的跨境传输影响。能够显示气溶胶垂直分布的CALIOP卫星观测,清晰表明大气污染物可传输到海拔6000 m以上的高度,进而翻越喜马拉雅山脉进入高原^[31]。除了大尺度的环流形式外,喜马拉雅山脉局地的山谷风也是造成大气污染物跨境传输的重要原因^[28,29,32]。在喜马拉雅山脉南坡,白天盛行自下向上的谷风,将污染物从低海拔地区输送到高海拔地区;而在山脉北坡,由于分布着大面积的冰川,导致强烈的下沉冰川风。南北坡的局地环流耦合在一起,使山谷成为污染物传输的有效通道。

2.2 跨境传输对青藏高原BC的贡献

Yang等人^[33]利用新一代耦合大气化学过程的中尺度模式WRF-Chem,定量评估了南亚人为源排放对青藏高原BC浓度的贡献率及其影响。相比于中国东部、中亚地区、中国西北部,南亚BC排放对青藏高原BC浓度贡献最多。其中,在非季风期南亚人为源BC对青藏高原的平均贡献达到了61.3%,而季风期为19.4%。非季风期南亚人为源BC对青藏高原的影响范围和强度更大。季风期降水较多,降水对BC具有湿清除作用,此时BC的来源以本地排放为主。

2.3 大气POPs的传输机制

以青藏高原POPs观测网多年观测为基础,结合遥感影像数据,建立了适用于喜马拉雅山区的Mountain-POP模型。突破了高海拔POPs传输模拟的瓶颈,发现山谷输送POPs的通量是高空翻越输入通量的5~10倍,通过上述两种途径进入青藏高原的POPs在2~100 t/a波动。POPs通过大气环流进入青藏高原后,经过雨雪等清除作用沉积在高原。青藏高原及周边区域雪冰POPs观测表明:南亚源为主的POPs自33°N(季风边界)向北逐步减弱。而欧洲源为主的POPs自35°N(西风边界)向南衰减。因此季风和西风输送POPs的影响范围分别为33°和35°N(化学边界),而33°~35°N为季风和西风的过渡区(图3)^[34]。

3 大气污染物的气候效应

3.1 大气气溶胶的气候效应

大气气溶胶-雪冰辐射反馈效应对青藏高原的气候变化带来一定的影响。季风前期及季风期硫酸盐、BC

图3 印度季风(红色区)和西风(绿色区)输送POPs的影响范围^[34]

Figure 3 The influence area of POPs driven by Indian monsoon (red) and westerly (green) over Tibetan Plateau and the surroundings^[34]

和OC气溶胶的综合辐射效应使得南亚地区大气增温。由于同期青藏高原为热源,气溶胶导致由北向南的温度梯度减弱,抑制南亚季风向北推进,可能引起喜马拉雅山地区近30年降水减少。当气溶胶排放浓度加倍时,南亚季风在印度次大陆的爆发时间将推迟5~10 d。由此,气溶胶与青藏高原热力作用共同导致印度季风减弱^[35]。Ji等人^[36]利用区域气候-大气化学模式中耦合雪冰-气溶胶辐射传输模块,揭示了青藏高原自然和人为源吸光性气溶胶对区域气候的影响机制。发现大气和雪冰中粉尘共同导致青藏高原西部及昆仑山地区春季地面升温0.1~0.5°C;同时导致高原西部、帕米尔、喜马拉雅地区冬春季雪水当量减少5~25 mm。高原西部及喜马拉雅地区,BC-雪冰辐射效应使近地面增温0.1~1.5°C和雪水当量减少5~25 mm。

3.2 对冰川和积雪消融的影响

BC等吸光性杂质降低冰川和积雪表面反照率,导致冰川和积雪的快速消融。当冰川发生消融时,BC在冰川表层富集,其浓度可以高出新降雪1~2个数量级。天山(科其喀尔冰川)以及高原北部地区(老虎沟12号冰川),冰川中BC和粉尘对反照率降低的贡献显著,总计可达40%以上,导致的瞬时辐射强迫可达100 W m⁻²以上。高原中部地区冰川老雪(粒雪)和附加冰中BC和粉尘对反照率降低的贡献分别达到52%和25%,总辐射强

迫可达97 W m⁻²^[37]。藏东南冰川上,老雪中BC的贡献可达20%,粉尘则为10%;BC和粉尘导致的总辐射强迫约为4.8~160 W m⁻²,对冰川消融量的贡献可达15%(约为350 mm w.e.,水当量)^[38]。总体上,在青藏高原不同区域,BC对冰川反照率降低的贡献高于粉尘。青藏高原东部和南部积雪中BC和粉尘对反照率降低的贡献分别约为37%和15%,导致的总辐射强迫可达32 W m⁻²,积雪期减少约3.1~4.4 d^[39]。随着人类排放BC等污染物的增加和冰川本身消融导致的BC和粉尘的不断富集,未来雪冰中吸光性杂质将进一步加速冰冻圈的消融,因此全球和区域协同减排势在必行。

4 污染物对地表生态环境的影响

大气污染物进入青藏高原后,通过干湿沉降等清除过程进入地表系统,进一步参与水圈、冰冻圈与生物圈的地球化学循环过程,使地表系统成为其重要的受体和汇,并对生态系统带来一定的影响和风险。

森林植被可以直接吸附大气污染物,是阻拦污染物自南亚向青藏高原传输的主要介质。尤其是在低温的高海拔地区,植物的吸收作用更明显。例如,喜马拉雅南坡植被污染物富集系数(即植物体内污染物浓度与大气浓度的比值)随海拔的升高而增加,体现了高海拔地区的森林拦截能力较强;同时,喜马拉雅山北坡的富集系数较南坡升高几倍到一个数量级,表明青藏高

原森林具有更强的拦截能力。但更强的拦截能力意味着更大的生态风险,以目前的大气沉降通量计算,由于植被的拦截作用,藏东南森林地区土壤中污染物的浓度(如DDT)可能会在50年之内超过土壤环境标准^[40]。

青藏高原多种动物体内已检测到污染物的存在。这些污染物经食物链逐级放大,最终聚集到高营养级生物体内。例如,经“大气-牧草-食草动物”食物链的传递,青藏高原牦牛体内部分有机污染物的富集系数(即牦牛体内污染物浓度与大气浓度的比值)超过 $1000 \text{ m}^3/\text{g}$ ^[41]。在水生生态系统中,由于生物体寿命较长、生长较慢,其生物富集能力更强。例如,纳木错湖中的鱼体内有机污染物浓度比水中高2~4个数量级,即具有强烈的食物链生物放大效果;青藏高原鱼体内的甲基汞浓度最高可达 1196 ng/g ,远高于环境质量标准的上限^[42]。由于高原的特殊环境,即便少量的污染物输入也有可能对高原生态系统产生较大影响,显示了高原环境对外源污染物输入极为敏感。在基于农作物、酥油和鱼的分析数据进行食物摄入健康风险评估后,发现目前青藏高原的环境污染尚不足以威胁到高原人体健康^[43]。

5 未来展望

第二次青藏高原综合科学考察研究正持续进行中,在现有研究基础和认识上,针对污染物的跨境传输与影响评估研究将侧重于以下几方面:

(1) 扩展观测内容与体系。在现有的观测指标基础上,观测体系需要进一步涵盖其他气态污染物,如 SO_2 和 NO_x 等。同时随着社会的不断发展,污染物的排放和污染特征也在不断变化,新的污染物不断被识别,相关的研究重点也在更新,因此需要加强新型污染物的监测与评估。从研究区域上看,现有研究侧重于高原南部和南亚地区,未来将进一步关注中亚、西亚和欧洲的传输影响。

(2) 提升研究方法手段。基于已经建立的青藏高原大气污染物观测网络,将卫星遥感技术和排放因子实际观测相结合,编制青藏高原及其周边地区典型污染物排放清单。综合新技术(无人机航测、颗粒物激光雷达与卫星遥感等)和大气化学指纹(同位素、分子标志物)信息,揭示高原区域强对流(垂直输送过程)对对流层下层气溶胶的影响。深入理解西风、季风和高原局地环流对污染物传输的作用机制,更为精确地量化不同大气环流形式下外源污染物在高原的输送量和影响范围。

(3) 加强未来情景的预估。在人口增长和社会经济发展的驱动下,人类能源消费所排放的污染物总量将持续增加。另一方面,全球变暖能够促使部分污染物在大气中的载荷与停留时间增加,进而增强其长距离传输的能力。鉴于这种持续增长的态势,亟待关注大气污染物对青藏高原影响的未来情景,预测不同升温和排放情景下环境健康风险的变化趋势。

参考文献

- 1 Yao T, Thompson L G, Mosbrugger V, et al. Third pole environment (TPE). *Environ Dev*, 2012, 3: 52–64
- 2 Chen D L, Xu B Q, Yao T D, et al. Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 3025–3035 [陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来. *科学通报*, 2015, 60: 3025–3035]
- 3 Sun H L, Zheng D, Yao T D, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2012, 67: 3–12 [孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. *地理学报*, 2012, 67: 3–12]
- 4 Sun H L, Li W H, Zhang M T, et al. The comprehensive scientific surveys of Qinghai-Xizang Plateau (in Chinese). *Resour Sci*, 1986, 8: 22–30 [孙鸿烈, 李文华, 章铭陶, 等. 青藏高原综合科学考察. *资源科学*, 1986, 8: 22–30]
- 5 Yao T, Xue Y, Chen D, et al. Recent Third Pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment: Multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2019, 100: 423–444
- 6 Kang S, Zhang Q, Qian Y, et al. Linking atmospheric pollution to cryospheric change in the Third Pole region: Current progress and future prospects. *Natl Sci Rev*, 2019, 6: 809–22118
- 7 Wang M, Xu B, Kaspari S D, et al. Century-long record of black carbon in an ice core from the Eastern Pamirs: Estimated contributions from biomass burning. *Atmos Environ*, 2015, 115: 79–88
- 8 Kaspari S D, Schwikowski M, Gysel M, et al. Recent increase in black carbon concentrations from a Mt. Everest ice core spanning 1860–2000 AD. *Geophys Res Lett*, 2011, 38: L04703
- 9 Cong Z, Kang S, Gao S, et al. Historical trends of atmospheric black carbon on Tibetan Plateau as reconstructed from a 150-year lake sediment record. *Environ Sci Technol*, 2013, 47: 2579–2586

- 10 Kang S, Huang J, Wang F, et al. Atmospheric mercury depositional chronology reconstructed from lake sediments and ice core in the Himalayas and Tibetan Plateau. *Environ Sci Technol*, 2016, 50: 2859–2869
- 11 Neupane B, Kang S, Chen P, et al. Historical black carbon reconstruction from the lake sediments of the Himalayan-Tibetan Plateau. *Environ Sci Technol*, 2019, 53: 5641–5651
- 12 Liu B, Cong Z, Wang Y, et al. Background aerosol over the Himalayas and Tibetan Plateau: Observed characteristics of aerosol mass loading. *Atmos Chem Phys*, 2017, 17: 449–463
- 13 Chen P, Yang J, Pu T, et al. Spatial and temporal variations of gaseous and particulate pollutants in six sites in Tibet, China, during 2016–2017. *Aerosol Air Qual Res*, 2019, 19: 516–527
- 14 Yin X, de Foy B, Wu K, et al. Gaseous and particulate pollutants in Lhasa, Tibet during 2013–2017: Spatial variability, temporal variations and implications. *Environ Pollut*, 2019, 253: 68–77
- 15 Liu B, Kang S, Sun J, et al. Wet precipitation chemistry at a high-altitude site (3326 m a.s.l.) in the southeastern Tibetan Plateau. *Environ Sci Pollut Res*, 2013, 20: 5013–5027
- 16 Kang S, Chen P, Li C, et al. Atmospheric aerosol elements over the inland Tibetan Plateau: Concentration, seasonality, and transport. *Aerosol Air Qual Res*, 2016, 16: 789–800
- 17 Cao J J, Xu B Q, He J Q, et al. Concentrations, seasonal variations, and transport of carbonaceous aerosols at a remote Mountainous region in western China. *Atmos Environ*, 2009, 43: 4444–4452
- 18 Wan X, Kang S, Wang Y, et al. Size distribution of carbonaceous aerosols at a high-altitude site on the central Tibetan Plateau (Nam Co Station, 4730 m a.s.l.). *Atmos Res*, 2015, 153: 155–164
- 19 You C, Yao T D, Xu C, et al. Levoglucosan on Tibetan glaciers under different atmospheric circulations. *Atmos Environ*, 2017, 152: 1–5
- 20 Li C, Bosch C, Kang S, et al. Sources of black carbon to the Himalayan-Tibetan Plateau glaciers. *Nat Commun*, 2016, 7: 12574
- 21 Yin X, Kang S, de Foy B, et al. Surface ozone at Nam Co in the inland Tibetan Plateau: Variation, synthesis comparison and regional representativeness. *Atmos Chem Phys*, 2017, 17: 11293–11311
- 22 Xu X, Tang J, Lin W, et al. The Trend and Variability of Surface Ozone at the Global GAW Station Mt. WALIGUAN, China. Second Tropospheric Ozone Workshop Tropospheric Ozone Changes: Observations, State of Understanding and Model Performances. WMO/GAW Report, WMO, Geneva, 2011
- 23 Putero D, Landi T C, Cristofanelli P, et al. Influence of open vegetation fires on black carbon and ozone variability in the southern Himalayas (NCO-P, 5079 m a.s.l.). *Environ Pollut*, 2014, 184: 597–604
- 24 Yin X, Kang S, de Foy B, et al. Multi-year monitoring of atmospheric total gaseous mercury at a remote high-altitude site (Nam Co, 4730 m a.s.l.) in the inland Tibetan Plateau region. *Atmos Chem Phys*, 2018, 18: 10557–10574
- 25 Wang Y W, Cai Y Q, Jing G B. Research processes of persistent organic pollutants (POPs) newly listed and candidate POPs in Stockholm Convention (in Chinese). *Sci Sin Chim*, 2010, 40: 99–123 [王亚韡, 蔡亚岐, 江桂斌. 斯德哥尔摩公约新增持久性有机污染物的一些研究进展. *中国科学: 化学*, 2010, 40: 99–123]
- 26 Zhang G, Chakraborty P, Li J, et al. Passive atmospheric sampling of organochlorine pesticides, polychlorinated biphenyls, and polybrominated diphenyl ethers in urban, rural, and wetland sites along the coastal length of India. *Environ Sci Technol*, 2008, 42: 8218–8223
- 27 Sheng J, Wang X, Gong P, et al. Monsoon-driven transport of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls to the Tibetan Plateau: Three year atmospheric monitoring study. *Environ Sci Technol*, 2013, 47: 3199–3208
- 28 Cong Z, Kawamura K, Kang S, et al. Penetration of biomass-burning emissions from South Asia through the Himalayas: New insights from atmospheric organic acids. *Sci Rep*, 2015, 5: 9580
- 29 Chen X, Kang S, Cong Z, et al. Concentration, temporal variation, and sources of black carbon in the Mt. Everest region retrieved by real-time observation and simulation. *Atmos Chem Phys*, 2018, 18: 12859–12875
- 30 Xia X, Zong X, Cong Z, et al. Baseline continental aerosol over the central Tibetan Plateau and a case study of aerosol transport from South Asia. *Atmos Environ*, 2011, 45: 7370–7378
- 31 Lüthi Z, Škerlak B, Kim S, et al. Atmospheric brown clouds reach the Tibetan Plateau by crossing the Himalayas. *Atmos Chem Phys*, 2015, 15: 1–15
- 32 Cong Z, Kang S, Kawamura K, et al. Carbonaceous aerosols on the south edge of the Tibetan Plateau: Concentrations, seasonality and sources. *Atmos Chem Phys*, 2015, 15: 1573–1584
- 33 Yang J, Kang S, Ji Z, et al. Modeling the origin of anthropogenic black carbon and its climatic effect over the Tibetan Plateau and surrounding regions. *J Geophys Res Atmos*, 2018, 123: 671–692
- 34 Wang X, Chen M, Gong P, et al. Perfluorinated alkyl substances in snow as an atmospheric tracer for tracking the interactions between westerly winds and the Indian Monsoon over western China. *Environ Int*, 2019, 124: 294–301
- 35 Ji Z M, Kang S C, Zhang D F, et al. Simulation of the anthropogenic aerosols over South Asia and their effects on Indian summer monsoon. *Clim*

- Dyn, 2011, 6: 1633–1647
- 36 Ji Z, Kang S, Cong Z, et al. Simulation of carbonaceous aerosols over the Third Pole and adjacent regions: Distribution, transportation, deposition, and climatic effects. *Clim Dyn*, 2015, 45: 2831–2846
- 37 Li X, Kang S, Zhang G, et al. Light-absorbing impurities in a southern Tibetan Plateau glacier: Variations and potential impact on snow albedo and radiative forcing. *Atmos Res*, 2018, 200: 77–87
- 38 Zhang Y, Kang S, Cong Z, et al. Light-absorbing impurities enhance glacier albedo reduction in the southeastern Tibetan Plateau. *J Geophys Res Atmos*, 2017, 122: 6915–6933
- 39 Zhang Y, Kang S, Sprenger M, et al. Black carbon and mineral dust in snow cover on the Tibetan Plateau. *Cryosphere*, 2018, 12: 413–431
- 40 Wang X, Xue Y, Gong P, et al. Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in Tibetan forest soil: Profile distribution and processes. *Environ Sci Pollut Res*, 2014, 21: 1897–1904
- 41 Wang C, Wang X, Yuan X, et al. Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in air, grass and yak butter from Namco in the central Tibetan Plateau. *Environ Pollut*, 2015, 201: 50–57
- 42 Zhang Q, Pan K, Kang S, et al. Mercury in wild fish from high-altitude aquatic ecosystems in the Tibetan Plateau. *Environ Sci Technol*, 2014, 48: 5220–5228
- 43 Wang C, Wang X, Gong P, et al. Residues, spatial distribution and risk assessment of DDTs and HCHs in agricultural soil and crops from the Tibetan Plateau. *Chemosphere*, 2016, 149: 358–365

Summary for “大气污染物跨境传输及其对青藏高原环境影响”

The transboundary transport of air pollutants and their environmental impacts on Tibetan Plateau

Shichang Kang^{1,3,4*}, Zhiyuan Cong^{2,3}, Xiaoping Wang^{2,3}, Qianggong Zhang^{2,3}, Zhenming Ji^{5,6}, Yulan Zhang^{1,3} & Baiqing Xu^{2,3}

¹ State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

² Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

³ Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

⁴ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁵ School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China;

⁶ Southern Laboratory of Ocean Science and Engineering (Guangdong), Zhuhai 519000, China

* Corresponding author, E-mail: shichang.kang@lzb.ac.cn

The Tibetan Plateau is the largest high altitude landform on Earth, with an area of over $2.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ and an average elevation of $\sim 4000 \text{ m}$ above sea level. With a unique multisphere environmental system, the Tibetan Plateau provides an important ecological sheltering function for China and other parts of Asia. The Tibetan Plateau is one of the world's most pristine regions, benefiting from a sparse population with negligible local influence on its environment. However, it is surrounded by some of the most polluted areas in the world, such as South Asia, East Asia, and Southeast Asia. With the atmospheric circulation, such pollutants may impact the Tibetan Plateau through long-range transport. Clearly, the scientific research on the transboundary transport of pollutants is not only important for the understanding of multisphere interactions on the earth surface, but also could meet the national strategic needs for ecological and environmental protection. Long-term monitoring combined with short-term intensive observation campaigns, were used to comprehensively summarize the latest research progress regarding the spatial-temporal distribution and transport mechanism of air pollutants, as well as their climate and ecological impacts, which were achieved during the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition.

With respect of historical trends reconstructed from environmental archives, e.g., glacial ice cores and lake sediments, the black carbon and heavy metals like mercury show a dramatic increase since 1950s, which reflect the enhanced emission of air pollutants in Asia. On-line observation data and WRF-Chem modeling indicate that upper air circulation and local mountain-valley breeze system are the main drivers of trans Himalaya air pollution from South Asia. A regional climate-chemistry model coupled with an aerosol-snow/ice feedback module was used to reveal the natural and anthropogenic light-absorbing aerosols' radiative effects over the Tibetan Plateau. Results indicated that the mineral dust both in the atmosphere and snow induced $0.1\text{--}0.5^\circ\text{C}$ warming over the western Tibetan Plateau and Kunlun Mountains in spring. Meanwhile, dust aerosols caused snow water equivalent to decrease by $5\text{--}25 \text{ mm}$ over the western TP, Himalayas and Pamir Mountains in winter and spring. The radiative effects of BC-in-snow induced surface temperature increased by $0.1\text{--}1.5^\circ\text{C}$ and snow water equivalent decreased by $5\text{--}25 \text{ mm}$ over the western Tibetan Plateau and Himalayas. According to the observations the black carbon and dust found in the snow and ice on the surfaces of glaciers were responsible for on average 20% of the albedo reduction within the TP region. Those atmospherically transported pollutants also have obvious negative impacts on the ecosystem in Tibetan Plateau. For example, bioaccumulation of DDTs have been found in Tibetan terrestrial and aquatic food chains, and newly emerging compounds such as polyfluoroalkyl substances and hexabromocyclodecanes have been widely detected in wild fish species. Therefore, the corresponding ecological risks are of great concern. In the future, it is necessary to quantify the extent of atmospherically transported pollution and model the pollutant fate under the future environmental scenarios as well as establish environmental and health risk.

Tibetan Plateau, anthropogenic activity, atmospheric pollutants, transboundary transport, environmental effect, risk assessment

doi: [10.1360/TB-2019-0135](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0135)