

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

吉振明

(中山大学大气科学学院, 广东 珠海 519082)

摘要:青藏高原毗邻全球大气污染物排放增长最快速的地区,受西风和南亚季风的影响,中亚、南亚等高原周边排放的污染物通过大气环流传输,进入高原并对其气候环境产生重要影响。观测事实表明:近几十年青藏高原东部和南部雪中黑碳含量呈显著上升趋势,这可能导致冰川加速融化和积雪持续时间缩短,最终影响青藏高原的水循环过程。前人对青藏高原黑碳的外源输送,特别是南亚大气污染物的贡献及其对高原气候、冰冻圈变化的影响,还没有较清晰和统一的认识。青藏高原污染物定点监测网络的发展及高分辨率区域气候—大气化学模式的应用,为定量评估高原污染物外源输送及气候效应提供了契机。本文在国家自然科学基金青年科学基金项目“南亚黑碳气溶胶跨境传输及其对青藏高原气候影响的数值模拟研究”的资助下,在以下三个方面取得了进展:①系统性论证了高分辨率区域气候—大气化学模式在高原的适用性,模拟了青藏高原及周边区域黑碳时空分布、传输和沉降过程;②揭示了污染物扩散的机制,评估了大气黑碳的气候及雪冰效应,并对比了自然源粉尘和人为源黑碳对青藏高原气候的影响;③定量估算了不同区域排放对高原黑碳外源输送的贡献率,其中来自南亚的黑碳对青藏高原外源输送的贡献率最高,在非季风期为61.3%,季风期为19.4%。本文揭示了外源输送黑碳对青藏高原气候的影响,为提高一带一路核心区冰冻圈与水资源的管理及预测能力,制定应对环境变化策略及国家气候外交谈判提供科学依据。

关键词:黑碳;传输;气候效应;青藏高原

1 引言

青藏高原有丰富的冰川和积雪资源,被称为“亚洲水塔”,是东亚和南亚的江河源,也是对全球气候变化响应最敏感的地区之一。基于当前观测事实,青藏高原近几十年气温显著增加(Kang et al, 2010),升温加速了高原的雪冰消融,进而对气候环境产生重要影响(陈德亮等, 2015)。青藏高原是地球上最为洁净的地区之一,区域内自身工农业污染排放较少,但是与其毗邻的南亚是全球大气污染物排放增长最快速的地区之一。受不同尺度大气环流的影响,污染物通过远距离传输进入青藏高原。

目前,基于地面和遥感监测数据(Xia et al, 2011),并结合中尺度区域气候模式的模拟(Lüthi et al, 2015),识别出南亚大气污染物远距离跨境传输事件与大气环流过程,明确了南亚污染物对高原环境带来的显著影响。

青藏高原周边区域中,南亚的大气污染最为严重,其中最典型的是冬、春季频繁爆发的亚洲棕色云(图1)。大气棕色云中的细颗粒物中有10%~30%的成分为黑碳(Black Carbon, BC)和棕碳(Brown Carbon, BrC)类吸光性气溶胶,这些物质对太阳短波辐射有较强的吸收吸收作用,能强烈改变大气和地表的辐射能量平衡,导致气候进一步变暖,影响

收稿日期:2018-02-28;修订日期:2018-04-10。

基金项目:国家自然科学基金项目(41301061, 41630754) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41301061, No.41630754]。

作者简介:吉振明(1983-),男,江苏无锡人,博士,副教授,硕导,主要从事气候变化归因和数值模拟研究, E-mail: jizhm3@mail.sysu.edu.cn。

引用格式:吉振明. 2018. 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, 37(4): 465-475. [Ji Z M. 2018. Advances and prospects of research on simulating transboundary black carbon and their climatic effects over the Tibetan Plateau[J]. Progress in Geography, 37(4): 465-475.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.04.002

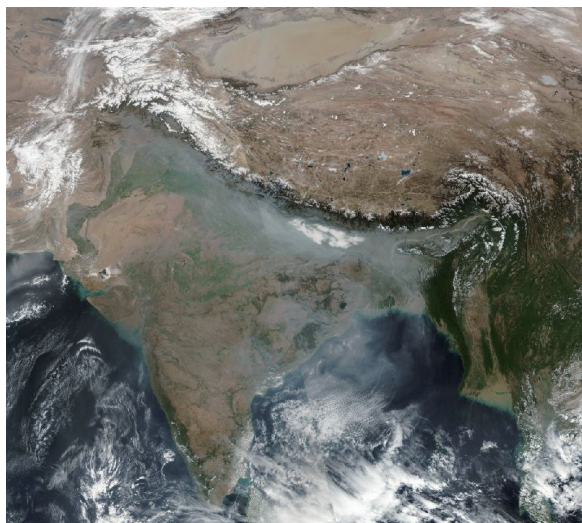


图1 2018年1月22日亚洲大气棕色云图,数据来源为 Aqua/MODIS 与 Terra/MODIS

Fig.1 The satellite image of Asian brown cloud in Jun 22, 2018, the data was derived from Aqua/MODIS and Terra/MODIS

南亚季风气候与青藏高原的水循环过程 (Ramanathan et al, 2007; Ji et al, 2011)。另外,中亚地区近10年石油工业发展产生的排放,也是青藏高原地区大气污染物不可忽视的外部来源(Li et al, 2016),然而相关的研究仍非常有限,对污染物跨境传输的过程、贡献量及其影响缺乏系统和全面的认识。

观测表明,近几十年青藏高原东部和南部雪冰中污染物含量呈显著上升的趋势,而冰芯和湖芯记录则表明整个青藏高原的大气污染物都在增加 (Cong et al, 2013; Kang, Cong et al, 2016; Kang, Huang et al, 2016; Matthew et al, 2016; 张玉兰等, 2017)。大气污染物中的吸光性颗粒物(包括黑碳、生物有机质、矿物粉尘等)随气流进入高原,通过干、湿沉降到雪冰表面之后形成吸光性杂质,这些吸光性杂质对可见光波段有较强烈的吸收作用,并且能够降低雪冰表面反照率,提高雪冰对太阳辐射的吸收效率(Zhang et al, 2018)。近期研究指出,雪冰中的吸光性杂质是冰冻圈加速消融的重要因素之一(Flanner et al, 2011)。而青藏高原雪冰中的吸光性杂质,则可能直接影响“亚洲水塔”的水循环过程(Qian et al, 2015)。之前的研究多数关注气溶胶的监测与时空分布特征,而对于此类吸光性物质的影响缺乏较系统和清晰的认识。

基于“青藏高原大气污染物的外源(特别是南

亚地区)输送的过程、贡献量及其气候效应如何”这一科学问题,同时关注到黑碳气溶胶对大气及冰冻圈不可忽视的作用,作者申请了国家自然科学基金青年科学基金项目“南亚黑碳气溶胶跨境传输及其对青藏高原气候影响的数值模拟研究”(项目批准号:41301061;起止年月:2014年1月-2016年12月)。此项研究旨在通过高分辨率区域气候—大气化学模式的模拟,从气候动力学角度揭示南亚黑碳气溶胶的跨境传输过程,定量评估黑碳跨境传输的贡献率及其对青藏高原及周边地区气候的影响。准确评估污染物外源输送的过程,是认识青藏高原现代环境变化的重要环节,揭示大气污染物对青藏高原气候变化的影响机制,对提高一带一路核心区冰冻圈与水资源的管理和预测能力,并为制定应对环境变化策略及国家气候外交谈判提供科学依据。本文是该研究项目成果的综述与讨论。

2 方法与资料

以往气溶胶传输及气候效应的研究多数基于耦合气溶胶辐射传输模块的全球大气环流模式(Ramanathan et al, 2008; 王志立等, 2009)。全球模式能够很好地反映出人为强迫对气候系统的影响,可用于评估全球尺度大气污染物(如粉尘、汞, POPs等)的传输过程。通常全球模式的水平网格点分辨率一般在125~400 km,无法捕捉到局地强迫的影响,比如不能适当描述复杂地形对污染物的阻挡作用等。在青藏高原地区,全球模式对区域气候的模拟效果并不非常理想(Ji et al, 2013)。相对于一般的全球模式,高分辨率的区域气候模式能够提供较高时空分辨率的气候模拟特征。Ji等(2013)使用区域气候模式RegCM3针对青藏高原地区进行10 km分辨率的动力降尺度试验,结果表明模拟分辨率的提高可有效地改进模式中模拟气温偏低问题。因此,将全球气候模式得到的结果降尺度到区域级尺度,是研究青藏高原气候变化及其归因的一个重要的方法。

2.1 模式简介

本文使用国际理论物理中心新版的区域气候模式RegCM4.0,该版本是RegCM2和RegCM3(Pal et al, 2007)的改进版,发布于2010年(Giorgi et al, 2012)。模式主要的物理过程和子模块包括:NCAR CCM3 辐射方案;大尺度云和降水方案(SU-

BEX);海表通量方案;Holtslag 行星边界层方案;陆面过程包括陆面过程的2种选项,BATSle(生物圈—大气圈传输方案)和 Common Land Model (CLM)。RegCM4 模式采用MPI 标准编写代码,计算效率较高,可进行高分辨率和长时间段的连续积分模拟。

RegCM4.0 耦合的大气化学过程(气溶胶模块),其传输过程包括水平和垂直平流输送、水平和垂直湍流扩散,积云对流输送,地面排放,大尺度和对流降水清除(湿沉降),干沉降以及物理化学过程中的生成和耗损等。在考虑各种类型气溶胶的辐射特性时,模式给定了单位质量各种类型气溶胶(硫酸盐、水溶性 BC 和 OC、非水溶性 BC 和 OC)不同波长的质量削光效率因子、单次散射反照率和非对称因子参数。其中在计算硫酸盐、水溶性 BC 和 OC 气溶胶的光学特性时,考虑了湿度的影响,并且对于不同类型气溶胶采用不同的拟合公式计算其亲水增长。目前模块中只激活了气溶胶的直接辐射效应的模块,其间接效应和半间接效应的耦合模块正在开发中。多年以来,RegCM 系列模型已被广泛应用于全球不同地区气溶胶传输及气候效应的模拟研究(Zhang et al, 2009; Marcella et al, 2010; Ji et al, 2011, 2016; Nair et al, 2012; Solmon et al, 2012; Gao et al, 2017),是评估区域尺度气溶胶传输及气候效应的有效方法。

2.2 试验设计

通过在模式中设计不同的敏感试验获取青藏高原黑碳外源传输的贡献率。具体试验方案在表1中给出。试验共包含6组模拟试验,其中参考试验(RF)在模式中考虑了整个模拟区域完整的BC排放清单,试验结果用于验证评估模式的模拟性能。SEN1-SEN5 分别代表不同的敏感试验。敏感试验 SEN1 中关闭了模拟区域人为排放的 BC, RF 与 SEN1 之间的差别(RF-SEN1)用来代表 BC 在整个模拟区域内产生的气候效应。在 SEN2 试验中将南亚

地区的 BC 排放源关闭, RF 与 SEN2 之差(RF-SEN2)被视为南亚 BC 的气候效应, (RF-SEN2)/RF 作为南亚区域 BC 对整个模拟区域的贡献。由于 BC 的排放及传输存在显著的区域分布特征,因此,增加了中亚 (SEN3)、中国东部 (SEN4) 及青藏高原以北 (SEN5) 区域 BC 排放三组敏感试验,用于和南亚区域的模拟结果进行对比。

2.3 数据

观测数据主要用于验证模式的模拟性能,这也是本文的难点之一。由于青藏高原及周边气溶胶观测站点较少,空间分布不均匀,持续较短且不连续,因而较难将这些资料使用于气候学意义上多年模式结果检验。相对而言卫星遥感资料在空间和时间的连续性较好,因此使用卫星反演(MISR、MODIS)的气溶胶光学厚度(AOD)对比模式模拟值,从空间上验证模式的模拟能力。同时结合地面 Aeronet 站点数据和大气污染与冰冻圈变化观测网 (Atmospheric Pollutants and Cryospheric Change, APCC)的野外台站的监测数据来检验模拟结果。

3 主要结论

3.1 区域气候—大气化学模式的验证

验证模式的模拟能力是整个研究工作的基础。气溶胶的传输和沉降过程与大尺度大气环流、局地扰流、湍流和降水有关。因此,模式对气象要素模拟的准确性直接决定了气溶胶模拟结果的可信度。利用耦合大气化学模块的区域气候模式模拟青藏高原及其周边区域人为排放碳质气溶胶(黑碳、有机碳)的传输和沉降过程。结果表明,模式对青藏高原气温、降水、环流及极端气候事件等要素有较好的模拟能力(Ji et al, 2015),并能合理地再现高原及周边区域人为源气溶胶的时空分布特征(Ji et al, 2015)。大气黑碳湿沉降通量在高原南部季风期(5-9月)大于非季风期(一年中除季风期之外的其他月份),而在高原北部和西部地区则相反。在季风期,南亚 BC 通过高层大气传输进入青藏高原。干沉降主要受地形的影响,从高原外缘至内陆表现为递减的空间分布特征。BC 导致对流层大气产生正短波辐射强迫(图 2a, 2b),而在近地面产生负短波辐射强迫(图 2c, 2d),辐射强迫绝对值从南向北呈递减趋势,最高值位于南亚地区,数值达到 $2W \cdot m^{-2}$;

表 1 试验设置

Tab.1 Black carbon emission scenario of the experiments	
试验	设置
RF	模拟考虑整个区域完整的 BC 排放清单
SEN1	整个区域 BC 排放设置为 0
SEN2	将南亚区域的 BC 排放设置为 0
SEN3	将中亚区域的 BC 排放设置为 0
SEN4	将中国东部地区的 BC 排放设置为 0
SEN5	将青藏高原以北区域的 BC 排放设置为 0

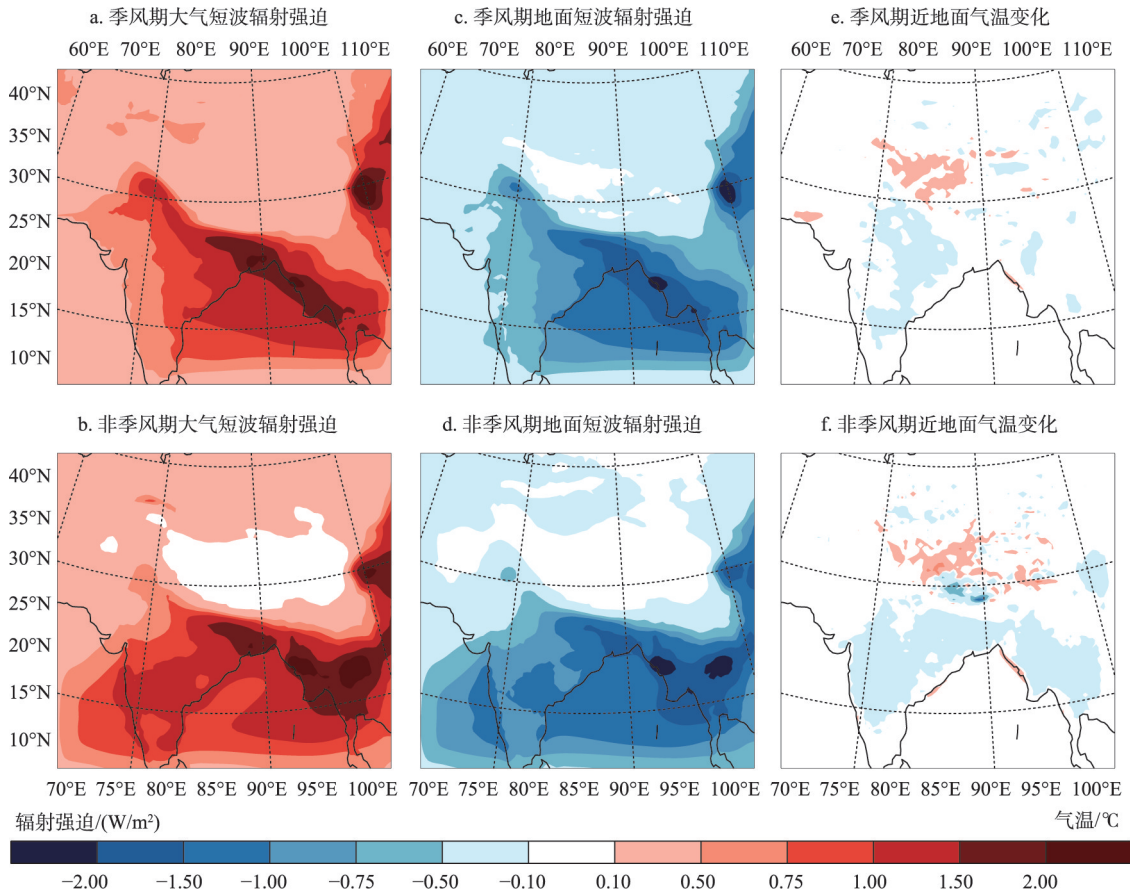


图2 碳质气溶胶大气(a, b)、地面(c, d)短波辐射强迫及对气温的影响(e, f), 季风期(a, c, e); 非季风期(b, d, f)
(据 Ji 等(2015)图 10 修改)

Fig.2 The shortwave radiative forcing of carbonaceous aerosols in the atmosphere (a, b) and surface (c, d), also their effects on the surface temperature (e, f). a, c, e were in monsoon season; b, d, f were in non-monsoon season
(Modified from Figure 10 of Ji et al, 2015)

最低值位于青藏高原,范围在 $0.1\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 以内。季风期含碳气溶胶引起高原西部及中部 $0.1\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ 的增温(图2e);而非季风期除青藏高原南部外,大部地区表现为 $0.1\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ 的增温(图2f)。

3.2 南亚黑碳的大气传输过程

大气环流是气溶胶传输的主要驱动力,青藏高原的阻挡作用造成低空西风带分为南、北两支气流。北支气流相对而言表现为常年稳定的西风;南支气流由于夏半年西风带北抬、南亚季风北进而表现出冬季强夏季弱的特征。总体上,青藏高原的西部地区常年受西风带的控制,南部和东南部受到(雨季)南亚/西南季风和西风(旱季)交替控制,而东北部受到东亚夏季风和冬季风交替影响。研究结果表明(Ji et al, 2015; Yang et al, 2018):受西风影响(图3a, 3b),高原西部及北部地区的BC主要来自于中亚地区(图4b),这可能与近些年中亚石油开采业

的发展有密切的关系。虽然青藏高原以东(河西走廊,四川盆地)也存在高排放区,但处于青藏高原西风带的下游,从气候平均态角度,该区域大气污染物通过大尺度环流输送进入高原的概率很低。青藏高原南部及喜马拉雅山地区的污染物主要来自南亚地区,其动力传输主要受到西风及南亚季风的共同作用(图3c, 3d),污染物传输高度可至4 km以上(图4a)。

另外,大气混合层的湍流过程也直接影响污染物的扩散。大气混合层是由于温度层结不连续导致上下层间的湍流不连续而形成。下层空气湍流强,上层空气湍流弱,这就造成不连续面以下能发生强烈的湍流混合。青藏高原地区地表状况复杂,受地形的影响,其大气混合层特征与南亚平原地区存在显著的差异。混合层高度受到不同的气象条件、热力结构和天气过程的影响,具有明显的随时

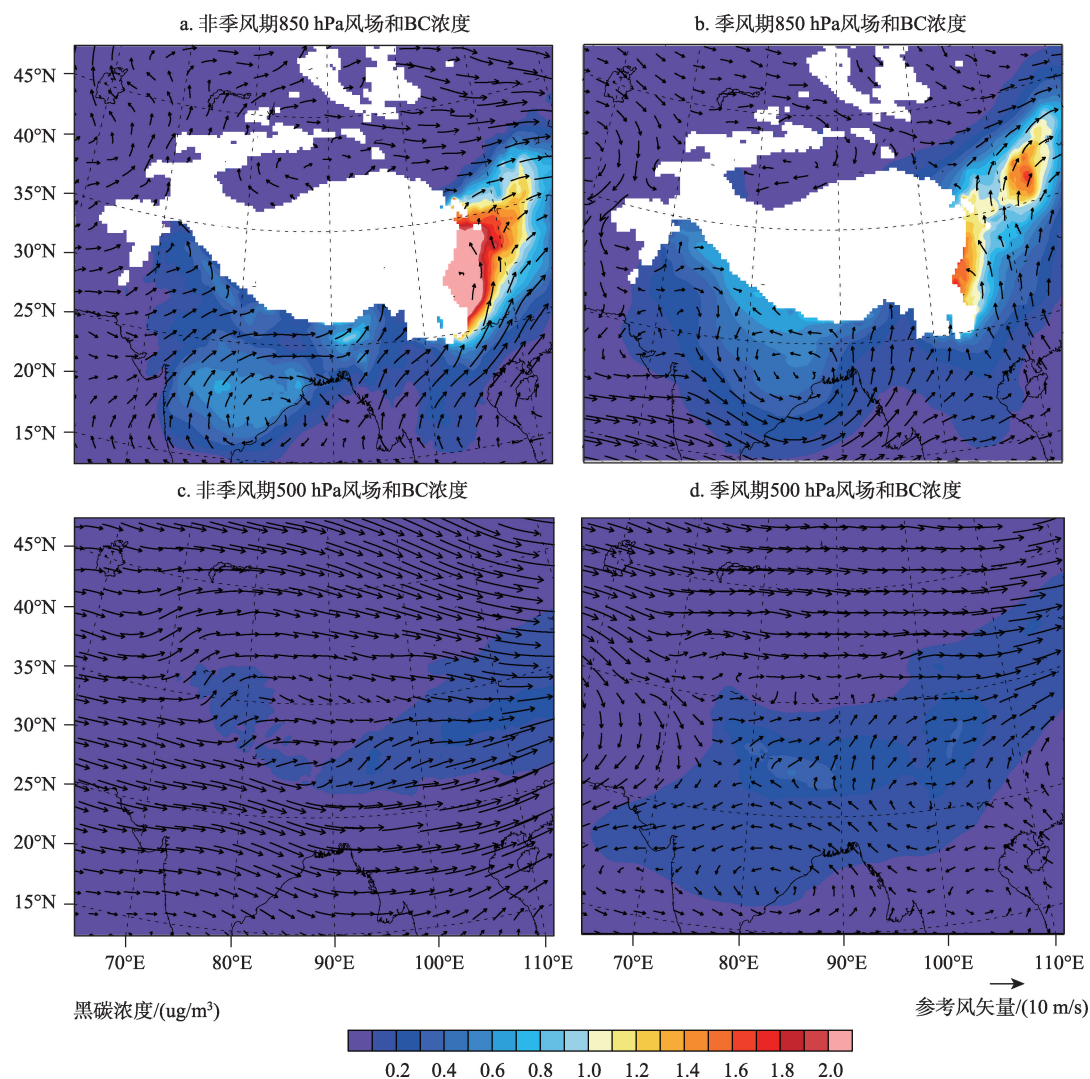


图3 非季风期(a, c)、季风期(b, d) 850hPa (a, b)和500hPa(c, d)BC浓度与风场(据Yang等(2018)图10修改)

Fig.3 Black carbon concentration and winds at 850hPa (a, b) and 500hPa (c, d) levels in monsoon season (b, d) and non-monsoon season (a, c) (Modified from Figure 10 of Yang et al, 2018)

间变化特征。有学者提出高原地区的深对流系统可将混合层污染物垂直快速地输送到对流层上层,甚至直接进入平流层,从而影响更大区域范围(卞建春等, 2011),这也给我们提出了新的问题:青藏高原及南亚大气混合层不同的结构对污染物的扩散有何影响? 基于WRF-CHEM模式模拟结果表明(Yang et al, 2017),南亚大气污染物中的黑碳可加热对流层中低层大气(图5a),导致边界层趋于稳定,扩散条件减弱,大气污染将进一步加剧。而青藏高原地区由于气溶胶浓度较低,大气边界层中BC的加热效应不足以导致边界层的热力结构产生较大的变化(图5b),由南亚传输进入高原的大气污染物通过中高层对流交换、传输、沉降的方式很快被扩

撒。对污染物大尺度环流输送及垂直扩散过程的了解,有助于厘清青藏高原大气污染物的传输过程,为定量评估污染物外源输送的贡献率奠定基础。

3.3 黑碳对青藏高原积雪消融的影响

虽然大气中BC可产生直接辐射效应,但由于高原BC的浓度仍较低,高原大气气溶胶的气候效应相对较小。而BC通过干、湿沉降过程降落到雪冰表面形成杂质,由于吸光性杂质和雪冰颗粒之间质量消光系数的巨大差异,少量杂质就能显著地降低雪冰反照率。反照率降低意味着雪冰对太阳辐射吸收增强,温度升高,从而加速雪冰消融。但之前模拟研究大多数未关注吸光性杂质对雪冰的辐

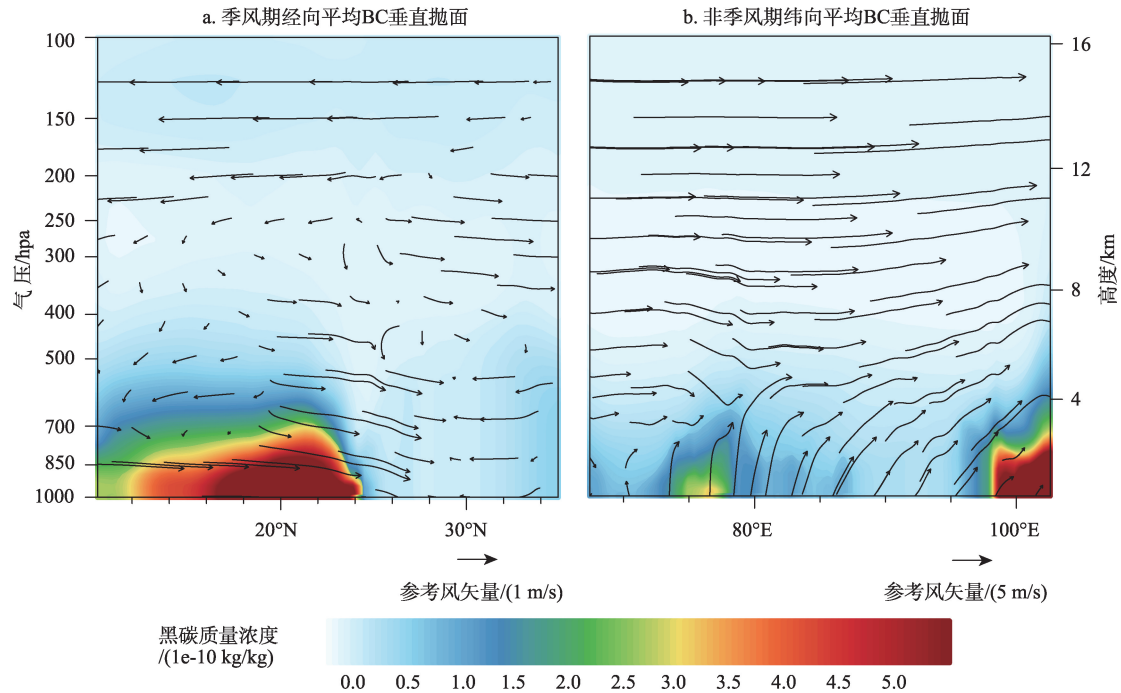


图4 季风期经向(a)、非季风期纬向(b)平均BC质量浓度垂直抛面与风场叠加(据Ji等(2015)图8,9修改)

Fig.4 Meridional average of black carbon mass concentration and wind profile in monsoon season (a); zonal average of black carbon mass concentration and wind profile in non-monsoon season (b) (Modified from Figure 8 and Figure 9 of Ji et al, 2015)

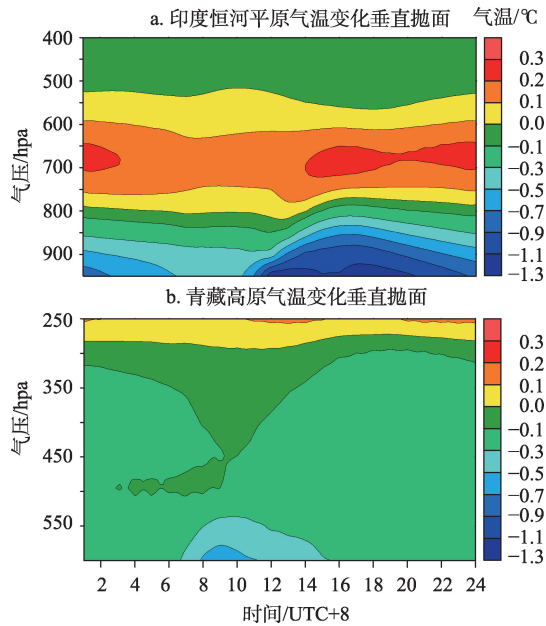


图5 BC引起的印度恒河平原(a)、青藏高原(b)气温变化垂直抛面(据Yang等(2017)图8修改)

Fig.5 The changes of temperature profile induced by black carbon on the Indian Ganges Plain (a) and Tibetan Plateau (b) (Modified from Figure 8 of Yang et al, 2017)

射反馈效应,因此我们在区域气候模式RegCM4.3中耦合了雪冰—气溶胶辐射传输模块,以评估青藏

高原雪冰吸光性杂质对气候的影响,扩展了模拟评估吸光性物质对雪冰影响的新技术方法。结果表明,非季风期BC和有机质的沉降通量显著高于季风期,季风期高原西部及喜马拉雅山地区的BC与有机质沉降通量显著高于高原其他地区,非季风期雪冰中BC与有机质的沉降通量在高原地区呈现外缘高,内陆低的空间分布特征。这种分布特征由于青藏高原自身的排放极低,而大气中污染物主要由高原以外的地区的远距离传输进入,受到地形阻挡,形成了外缘高中间低的空间格局。BC导致雪冰反照率降低,季风期在高原西部产生的辐射强迫为 $3.0\sim 4.5\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (图6a);非季风期喜马拉雅地区黑碳—雪冰辐射强迫为 $5.0\sim 6.0\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (图6b);对于青藏高原西部及喜马拉雅地区,黑碳—雪冰辐射效应可导致近地面增温 $0.1\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ (图6c, 6d),雪水当量减少 $5\sim 25\text{ mm}$ (图6e, 6f)(Ji, 2016)。

除人为源气溶胶外,作为自然源的粉尘也是雪冰杂质的重要组成部分,模拟结果表明(Ji et al, 2016),高原内陆及雅鲁藏布江大峡谷的起沙通量在过去20年呈减弱的趋势,这与高原地面风速减弱有一定关系。粉尘干、湿沉降受地形和南亚季风的影响较为显著,呈现出不同的季节和空间分布特征。在大气

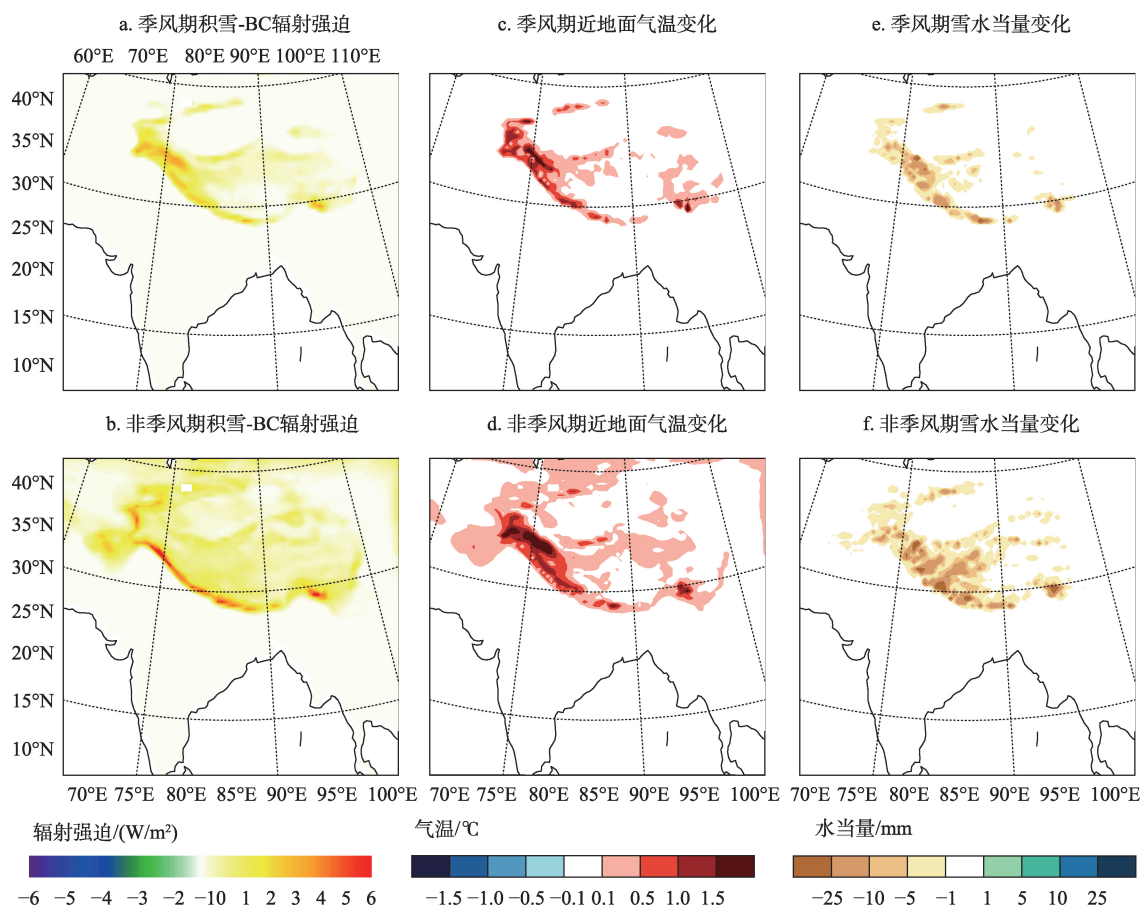


图6 季风期黑碳导致雪冰辐射强迫(a), 气温(c) 和雪水当量(e)的变化 (b, d, f 同 a, c, e 但表示非季风期) (据 Ji (2016) 图2修改)

Fig.6 The changes of surface snow radiative forcing (a), temperature (c), and snow water equivalent (e) induced by black carbon in monsoon season and non-monsoon (b, d, f) (Modified from Figure 2 of Ji, 2016)

和雪冰中粉尘的共同作用下,青藏高原西部及昆仑山地区,春季地面升温 $0.1\sim 0.5^{\circ}\text{C}$ 。在冬春季,粉尘导致高原西部、帕米尔、喜马拉雅地区的雪水当量减少 $5\sim 25\text{ mm}$ 。本项研究为丰富吸光性气溶胶对青藏高原气候系统及水循环过程的影响机理提供了理论依据。

3.4 青藏高原黑碳外源传输的贡献率

通过敏感性试验分析,发现青藏高原BC主要来自于南亚的人为排放(Yang et al, 2018)。非季风期青藏高原近地面BC的人为来源显著高于季风期,青藏高原有 $40\%\sim 80\%$ (图7a)(区域平均为 61.3%)的BC来自于南亚的人为排放;季风期(图7b)南亚的人为排放BC的贡献率为 $10\%\sim 50\%$ (区域平均为 19.4%)(图8)。中国中东部人为排放主要影响高原东部地区,季风期祁连山地区外源输送使BC浓度最大增加 $0.21\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$,贡献率最高达 50% 。非季风期中亚人为排放对高原西部BC的贡献率最高

达 30% (平均为 5.7%),与季风期的贡献率接近。中国北部人为排放对青藏高原近地面BC的影响不显著。高原BC的传输过程主要受气流影响,在非季风期,西风将中亚和印度北部的污染物传输进入高原。季风期,南亚地区存在辐合上升气流,将下层的气溶胶向上输送到中高层,随西南风翻越喜马拉雅山脉,进入到高原内陆。来自南亚的BC可导致青藏高原大气气温发生变化。非季风期,大气层在 500 hPa 整个高原表现为增温(图7c);而季风期在高原北部为降温,南部及喜马拉雅山地区表现为增温(图7d),在 200 hPa 高度(图7e),BC在季风期对大气有显著的增温作用(图7f)。

4 青藏高原大气污染物数值模拟研究面临的挑战

以青藏高原为主体的第三极地区,是地球上除

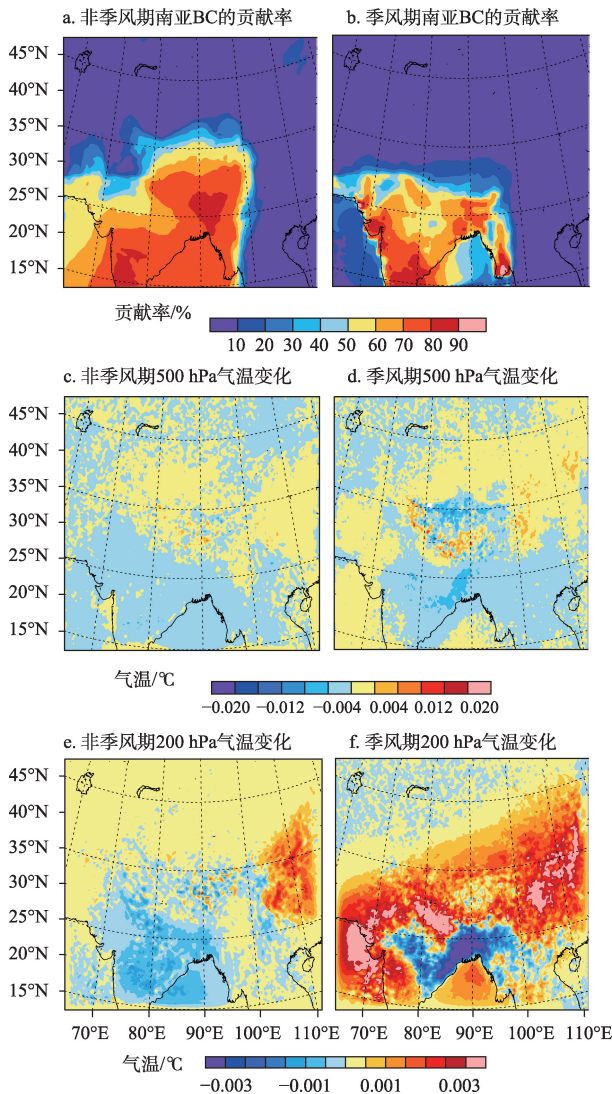


图7 非季风期南亚BC的贡献率(a)及对500 hPa(c), 200 hPa(e)气温的影响, (b, d, f同a, c, e但表示非季风期)
(据Yang等(2018)图9, 12修改)

Fig.7 Contribution rate of black carbon from South Asia (a) and its climatic effects on temperature at the 500 hPa (c) and 200 hPa (e) levels in monsoon (b, d, f) and non-monsoon season (a, c, e) (Modified from Figure 9 and Figure 12 of Yang et al, 2018)

南北极之外最洁净的区域,但也不可避免受污染物的影响,跨境输入的污染物已成为威胁本区域环境和生态系统不可忽视的重要因素之一。基于模式模拟方法,青藏高原大气黑碳外源输送及其气候效应的研究取得了一些初步的进展,但仍面临诸多亟需解决的问题:

(1) 模式的性能亟待提高。随着计算机技术的发展,模式的物理过程、分辨率及计算并行效率较

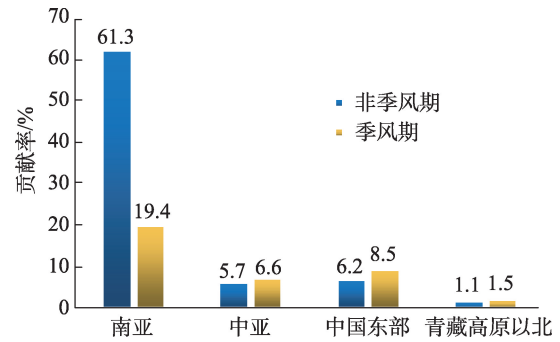


图8 非季风期、季风期南亚、中亚、中国东部及青藏高原以北地区BC输入青藏高原的贡献率。

Fig.8 The concentration rates of black carbon transported from South Asia, Central Asia, eastern China, and the area north of the Tibetan Plateau

之前有了大幅度的提升,然而仍存在一些不足,包括:降水的模拟效果较差;模式陆面过程较粗糙;缺少气溶胶间接和半间接效应等。以上问题直接影响到气溶胶模拟的准确性,同时导致模拟结果存在较大的不确定性。因此,未来基于模式开展本区域大气气溶胶传输及气候效应的模拟研究,应从以下四个方面入手提升模式的模拟精度:a) 构建覆盖第三极地区的高分辨率大气污染物排放清单。排放清单是模式模拟污染物浓度分布和传输的输入数据,由于青藏高原及其周边区域长期缺乏监测数据,目前模式中使用的排放清单存在较大的偏差。b) 改进模式的参数方案:包括陆面过程、积云对流和边界层参数。改进陆面过程和积云对流参数,可在一定程度上提高模式对降水的模拟能力;对边界层参数的优化主要是针对第三极地区复杂的地形条件与特殊的边界层结构,通过观测资料对混合层参数化方案中的一些经验参数进行优化,改进模式对气溶胶模拟的精度。c) 丰富模式的物理过程。如通过在线/离线耦合的方式,考虑气溶胶对冰川消融的影响及气溶胶—云相互作用等,以上过程在过去的研究中涉及较少,但这些物理过程作为区域气候的影响因子是不可忽视的。d) 进一步提高模式分辨率。特殊地形(如山地、高原),往往造成区域气候的特殊变化规律,模拟分辨率的提高可使模式捕捉到复杂地形环境下局地强迫的影响,从而对青藏高原气候有更好的再现和模拟能力。

(2) 开展多尺度污染物的数值模拟研究。大气污染物的传输过程在空间上既包括大尺度也包括

中小尺度,而当前的研究中多数只考虑单一尺度的传输过程。如在有限区域内使用动力降尺度的方法,虽然分辨率提高后较全球模式能更好地显示地形对污染物的阻挡作用,但并不适用于全球尺度传输的大污染物。另外,虽然区域模式的分辨率较高,但难以体现精细化的地表过程。如在喜马拉雅山脉南坡,白天盛行从下向上的谷风,将污染物从低海拔地区输送到高海拔地区;而在喜马拉雅山脉北坡,由于分布着大面积的冰川,导致下沉的冰川风克服了上升的谷风,南北坡的局地环流使山谷成为污染物传输的可能通道。目前模拟手段都难以捕捉到污染物沿着山谷迁移的过程,无法判定其输入通量,难以量化山谷输送与高空翻越这两种途径对于污染物跨境迁移的相对贡献。因此,只有综合不同尺度和分辨率的模式,才能考虑不同高度、路径乃至不同种类污染物的传输过程。

(3) 观测数据和模拟方法的紧密结合。模式的评估和改进与观测数据的质量密切相关。用于订正参数化方案的观测数据大多是通过短期内的加密外场观测获得,在青藏高原及周边地区此类数据非常少,使得基于平原地区的参数化方案在高原并不适用。这些观测通常被认为是过程研究,通过将现场观测与遥感观测、过程模拟连接起来,系统地解决限制气候模式改进的关键问题。区域气候变化的成因是多方面的,如大尺度背景场的影响在某种程度上起主导作用,但特殊地形(如山地、高原)往往造成区域气候的特殊变化规律,亟需依托跨境观测网络,开展大气污染物多参数测试,为定量评估跨境污染物的输入奠定基础。目前迫切需要将多观测手段和模式模拟综合集成,最终给出全面、精确的来源和传输过程及机理,厘清各种污染物传输的影响范围。

参考文献 (References)

卞建春, 严仁熾, 陈洪滨. 2011. 亚洲夏季风是低层污染物进入平流层的重要途径[J]. 大气科学, 35(5): 897-902. [Bian J C, Yan R C, Chen H B. 2011. Tropospheric pollutant transport to the stratosphere by Asian summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 35(5): 897-902.]

陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 2015. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来[J]. 科学通报, 60(32): 3025-3035. [Chen D L, Xu B Q, Yao T D, et al. 2015. Assess-

ment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 60(32): 3025-3035.]

王志立, 张华, 郭品文. 2009. 南亚地区黑碳气溶胶对亚洲夏季风的影响[J]. 高原气象, 28(2): 419-424. [Wang Z L, Zhang H, Guo P W. 2009. Effects of black carbon aerosol in South Asia on Asian summer monsoon[J]. Plateau Meteorology, 28(2): 419-424.]

张玉兰, 康世昌. 2017. 青藏高原及周边地区冰川中吸光性杂质及其影响研究进展[J]. 科学通报, 62(35): 4151-4162. [Zhang Y L, Kang S C. 2017. Research progress of light-absorbing impurities in glaciers of the Tibetan Plateau and its surroundings[J]. Chinese Science Bulletin, 62(35): 4151-4162.]

Cong Z Y, Kang S C, Gao S P, et al. 2013. Historical trends of atmospheric black carbon on Tibetan Plateau as reconstructed from a 150-year lake sediment record[J]. Environmental Science & Technology, 47(6): 2579-2586.

Flanner M G, Shell K M, Barlage M, et al. 2011. Radiative forcing and albedo feedback from the Northern Hemisphere cryosphere between 1979 and 2008[J]. Nature Geoscience, 4: 151-155.

Gao X J, Giorgi F. 2017. Use of the RegCM system over East Asia: Review and perspectives[J]. Engineering, 3(5): 766-772.

Giorgi F, Coppola E, Solmon F, et al. 2012. RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains[J]. Climate Research, 52: 7-29.

Ji Z M. 2016. Modeling black carbon and its potential radiative effects over the Tibetan Plateau[J]. Advances in Climate Change Research, 7(3): 139-144.

Ji Z M, Kang S C. 2013. Double nested dynamical downscaling experiments over the Tibetan Plateau and their projection of climate change under two RCP scenarios[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 70(4): 1278-1290.

Ji Z M, Kang S C. 2015. Evaluation of extreme climate events using a regional climate model for China[J]. International Journal of Climatology, 35(6): 888-902.

Ji Z M, Kang S C, Cong Z Y, et al. 2015. Simulation of carbonaceous aerosols over the Third Pole and adjacent regions: Distribution, transportation, deposition, and climatic effects [J]. Climate Dynamics, 45(9-10): 2831-2846.

Ji Z M, Kang S C, Zhang D F, et al. 2011. Simulation of the anthropogenic aerosols over South Asia and their effects on Indian summer monsoon[J]. Climate Dynamics, 36(9-10): 1633-1647.

- Ji Z M, Kang S C, Zhang Q G, et al. 2016. Investigation of mineral aerosols radiative effects over High Mountain Asia in 1990-2009 using a regional climate model[J]. *Atmospheric Research*, 178-179: 484-496.
- Kang S C, Cong Z Y. 2016. Atmospheric black carbon and its effects on cryosphere[J]. *Advances in Climate Change Research*, 7(3): 113-114.
- Kang S C, Huang J, Wang F Y, et al. 2016. Atmospheric mercury depositional chronology reconstructed from lake sediments and ice core in the Himalayas and Tibetan Plateau [J]. *Environmental Science & Technology*, 50(6): 2859-2869.
- Kang S C, Xu Y W, You Q L, et al. 2010. Review of climate and cryospheric change in the Tibetan Plateau[J]. *Environmental Research Letters*, 5(1): 015101.
- Li C L, Bosch C, Kang S C, et al. 2016. Sources of black carbon to the Himalayan-Tibetan Plateau glaciers[J]. *Nature Communications*, 7: 12574.
- Lüthi Z L, Škerlak B, Kim S-W, et al. 2015. Atmospheric brown clouds reach the Tibetan Plateau by crossing the Himalayas[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(11): 6007-6021.
- Marcella M P, Eltahir E A B. 2010. Effects of mineral aerosols on the summertime climate of southwest Asia: Incorporating subgrid variability in a dust emission scheme[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D18): D18203.
- Matthew J, Susan K, Kang S C, et al. 2016. Tibetan Plateau Geladaindong black carbon ice core record (1843-1982): Recent increases due to higher emissions and lower snow accumulation[J]. *Advances in Climate Change Research*, 7 (3): 132-138.
- Nair V S, Solomon F, Giorgi F, et al. 2012. Simulation of south Asian aerosols for regional climate studies[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D4): D04209.
- Pal J S, Giorgi F, Bi X Q, et al. 2007. Regional climate modeling for the developing World: The ICTP RegCM3 and RegCNET[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(9): 1395-1409.
- Qian Y, Yasunari T J, Doherty S J, et al. 2015. Light-absorbing particles in snow and ice: Measurement and modeling of climatic and hydrological impact[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 32(1): 64-91.
- Ramanathan V, Carmichael G. 2008. Global and regional climate changes due to black carbon[J]. *Nature Geoscience*, 1: 221-227.
- Ramanathan V, Ramana M V, Roberts G, et al. 2007. Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption [J]. *Nature*, 448: 575-578.
- Solomon F, Elguindi N, Mallet M. 2012. Radiative and climatic effects of dust over West Africa, as simulated by a regional climate model[J]. *Climate Research*, 52: 97-113.
- Xia X G, Zong X M, Cong Z Y, et al. 2011. Baseline continental aerosol over the central Tibetan plateau and a case study of aerosol transport from South Asia[J]. *Atmospheric Environment*, 45(39): 7370-7378.
- Yang J H, Duan K Q, Kang S C, et al. 2017. Potential feedback between aerosols and meteorological conditions in a heavy pollution event over the Tibetan Plateau and Indo-Gangetic Plain[J]. *Climate Dynamics*, 48(9-10): 2901-2917.
- Yang J H, Kang S C, Ji Z M, et al. 2018. Modeling the origin of anthropogenic black carbon and its climatic effect over the Tibetan Plateau and surrounding regions[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(2): 671-692.
- Zhang D F, Zakey A S, Gao X J, et al. 2009. Simulation of dust aerosol and its regional feedbacks over East Asia using a regional climate model[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(4): 1095-1110.
- Zhang Y L, Kang S C, Sprenger M, et al. 2018. Black carbon and mineral dust in snow cover on the Tibetan Plateau[J]. *The Cryosphere*, 12(2): 413-431.

Advances and prospects of research on simulating transboundary black carbon and their climatic effects over the Tibetan Plateau

JI Zhenming

(School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, Guangdong, China)

Abstract: The Tibetan Plateau is surrounded by regions of the fastest growing atmospheric pollutants. The westerlies and the South Asian monsoon circulation transport the pollutants from Central Asia and South Asia to the inland of the Tibetan Plateau, which have important effects on the regional climate and environment. The concentration of black carbon in the snow and ice showed a clearly increasing trend during the recent few decades in the eastern and southern Tibetan Plateau, which might be associated with accelerated melting of snow and glaciers, and directly affected the hydrological processes on the plateau. However, the amount of transboundary transport of black carbon from South Asia is not clear and the knowledge of its impact on climate and cryosphere over the Tibetan Plateau is still limited. The development of atmospheric pollutants monitoring network on the Tibetan Plateau and the application of the high-resolution regional climate-atmospheric chemistry coupled model provide an opportunity for quantitative assessment of external transported pollutants and their climatic effects on the plateau. The project of “Simulation of transboundary transport of black carbon from South Asia and its impact on climate over the Tibetan Plateau,” which was supported by the National Natural Science Foundation of China, focused on the following three aspects: (1) Systematic assessment of the high-resolution regional climate-atmospheric chemistry coupled model performance in the simulation for the Tibetan Plateau. Based on the simulation of distribution, transportation, and deposition processes of black carbon over the Tibetan Plateau and surrounding regions, the climatic effects were investigated; (2) Examination of the mechanism of pollutant diffusion, and evaluation and comparison of the climatic effects induced by the anthropogenic and natural sources; (3) Quantitative estimation of the contribution of external pollutants outside the Tibetan Plateau. The results show that the black carbon from South Asia provided the highest contribution, which was 61.3% in the non-monsoon period and 19.4% in the monsoon season. This study revealed the effect of transboundary black carbon on the Tibetan Plateau, which may provide a scientific basis for improved management and prediction of the cryosphere and water resources in the core region of the Belt and Road initiative, and for policy-making of climate change adaption and diplomatic negotiations.

Key words: black carbon; transportation; climatic effects; Tibetan Plateau