

贾瑞,李君,祝清哲,等.中国西北地区气溶胶的三维分布特征及其成因[J].中国沙漠,2021,41(3):34-43.

中国西北地区气溶胶的三维分布特征及其成因

贾瑞^{1,2},李君²,祝清哲¹,李妍²,田云菲²,李阳²,徐征豹³

(1.兰州大学 西部生态安全省部共建协同创新中心,甘肃 兰州 730000; 2.淄博市气象局,山东 淄博 255000;
3.山东理工大学,山东 淄博 255000)

摘要: 利用CALIPSO卫星遥感资料研究中国西北地区气溶胶的三维分布,分区域按类别讨论气溶胶的出现频率和气溶胶光学厚度(AOD),并在此基础上,结合MERRA-2再分析数据探讨形成原因。结果表明:中国西北地区气溶胶含量较高,以沙尘和污染性沙尘为主,主要分布在塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠和甘肃-内蒙古一带。气溶胶的出现频率季节变化不大,大气中气溶胶含量及其三维分布则有明显的区域性差异和季节变化。夏季,由于大气上升运动明显,气溶胶分布较高,部分气溶胶可以被输送到天山山脉、青藏高原主体,甚至8 km的高空。塔克拉玛干沙漠的气溶胶以自然沙尘为主,主要分布在4 km以下,受地形影响该地区局地环流明显,三维分布主要取决于局地排放和垂直输送,AOD的季节变化与沙尘排放一致,春季>夏季>秋季>冬季。古尔班通古特沙漠和甘肃-内蒙古一带的气溶胶消光系数较小且分布零散,气溶胶种类复杂,除了自然沙尘还有大量的污染性沙尘(出现频率约为0.15,AOD约为0.03,甚至可以大于自然沙尘)、污染性大陆气溶胶和烟尘。这是因为,这些地区受局地排放和远距离输送的共同影响,上游气溶胶在西北风的作用下输送而来和局地排放的气溶胶混合并继续向下游输送,沙尘气溶胶经过远距离输送变性为污染性沙尘。

关键词: 中国西北地区;气溶胶分类;三维分布;排放;输送

文章编号: 1000-694X(2021)03-034-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00008

中图分类号: X513

文献标志码: A

0 引言

中国西北地区位于欧亚内陆,属于干旱半干旱气候区,地貌和下垫面特征复杂多样,降水稀少,沙尘频发^[1-2],气候复杂多变^[3-4]。中国西北地区不但是全球气候变化的敏感地带,也是生态环境脆弱区,对气候变化的适应能力较差,具有明显的敏感性和摆渡性^[5-7]。全球变暖背景下,中国西北地区呈现整体暖干化、局部暖湿化的变化特征^[8-9],气候变化正在改变着当地的土壤水分和气候生产力格局^[10]。虽然部分地区降水有所增加^[4],由于气温持续升高蒸发增加,中国西北地区干旱的严重程度和空间范围仍呈现增加趋势^[11-12]。冰川退缩、湿地退化、水资源短缺等生态环境恶化问题已经严重影响了当地人民的生存生活和经济发展^[13-14],该地区的气候变化和生态环境演变问题引起了广泛的

关注^[15-16]。

相比温室效应,在较短的时间尺度上,气溶胶导致的局部强迫和内部反馈过程在气候暖干化和冰川退缩中发挥着更重要的作用^[17-18],气溶胶的气候效应更加局地化、分布不均一,且具有一定的突发性。排放到大气中的气溶胶可以通过直接、间接和半直接辐射效应改变大气热力结构、影响云的发生发展和降水过程^[19-21]。边界层内的气溶胶足以在中尺度天气系统中发挥重要作用,引发气温、风场和降水分布的大规模变化^[22]。气溶胶还可以作为有毒有害的金属、有机物等化学物质和微生物的输送和反应的载体影响大气环境^[23]。目前中国西北地区气溶胶间接辐射效应的评估还存在很大的不确定性^[24-25]。气候变暖背景下,气溶胶的变化使得中国西北地区气候变化和生态环境演变研究面临

收稿日期:2020-11-29; 改回日期:2021-01-15

资助项目:甘肃省省级引导科技创新发展专项资金项目(2019ZX-06);兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(1zujbky-2020-kb31);山东省气象局气象科学技术研究项目(2019sdqxm14)

作者简介:贾瑞(1987—),女,山东菏泽人,博士研究生,工程师,研究方向为大气物理学与大气环境。E-mail: 597271309@qq.com

通信作者:李君(E-mail: 25222980@qq.com)

着新的挑战,获得气溶胶的精确三维分布是降低其气候效应和生态环境效应研究中不确定性的必要条件^[26-27]。

中国西北地区是东亚沙尘气溶胶的主要源区和输送通道^[28-29],大气中气溶胶含量较高,许多学者已从沙尘事件的爆发^[30]、演变趋势^[31]以及气溶胶的理化特性^[32-33]等方面进行了研究。目前,对中国西北地区气溶胶及其光学特性时空分布的研究主要是基于传统的气象观测和卫星遥感监测。传统的地基观测可以给出特定站点气溶胶的详细变化^[32,34],但是无法研究大尺度气溶胶的时空分布;被动式卫星遥感可以在全球尺度上观测气溶胶却难以获得其垂直分布信息^[33,35];而基于主动卫星遥感资料研究气溶胶的垂直分布主要基于个例分析^[36],关于中国西北地区气溶胶及其分类三维分布的研究则相对较少。

本文利用 CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) 卫星遥感资料研究中国西北地区气溶胶的三维分布,并在此基础上结合 MERRA-2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2) 再分析数据探讨其形成原因,对研究中国西北地区气溶胶的气候效应有重要意义。

1 资料与方法

1.1 MODIS

MODIS(中分辨率成像光谱仪)是搭载在 Terra 和 Aqua 卫星上的一个重要的传感器,其中 Terra 为上午轨道卫星, Aqua 为下午轨道卫星。MODIS 观测宽度为 2 330 km,每 1—2 d 就可以观察整个地球,可以持续地在全球尺度上给出陆地、海洋和大气的观测数据。MCD12C1 产品是 Terra 和 Aqua 卫星观测所得的数据经过处理得到的地表覆盖类型,包括水、常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、落叶阔叶林、混交林、稠密灌木丛、稀疏灌木丛、热带稀树草原、稀树草原、草地、永久湿地、农用地、城市和建筑区、农用地-天然植被、雪和冰、荒漠/稀疏植被等 17 个主要类型,可以给出植被类型的空间分布,分辨率为 0.05°(约为 5 600 m)。

1.2 MERRA-2

第二代现代研究和应用回顾性分析(MERRA-2)

是来自美国国家航空航天局(NASA)的最新大气再分析数据集,提供了持续的近实时气候分析。由于戈达德地球观测系统模型(Goddard Earth Observing System Model-5, GEOS-5)、对观测数据偏差的矫正方案、资料同化等技术的进步以及对大气、水循环中物理过程理解的加深, MERRA-2 数据集相比原来的 MERRA,减少了与观测系统有关的虚假趋势和误差,减少了水循环中由于降雨跃迁带来的偏差^[37]。MERRA-2 是第一个卫星时代的全球再分析数据集,考虑了气溶胶与气候系统中其他物理过程的相互作用,包括气溶胶分析场、气象场、辐射收支和臭氧等产品^[37]。本文用到的数据有气溶胶诊断产品和气象资料,包括 tavgm_2d_adg_Nx 产品提供的气溶胶排放量、tavgm_2d_aer_Nx 产品提供的气溶胶光学厚度和质量通量以及 instM_3d_asm_Np 产品提供的气象场资料。MERRA-2 数据的时间段从 1980 年开始到现在,为了跟卫星数据匹配,本文对 2007 年之前不作分析。数据的水平分辨率为 0.625°(经度)×0.5°(纬度)。

1.3 CALIPSO

2006 年由美国宇航局发射升空的 CALIPSO 卫星可以在全球尺度上提供气溶胶和云特性的垂直分布^[38-39],增强了对气溶胶和云的监测能力,填补了气溶胶、云三维分布研究的空白。CALIPSO 2 级气溶胶产品包括层(ALay)、廓线(APro)和垂直特征(VFM, Vertical Feature Mask)产品,本文用到的是 APro 和 VFM 产品。APro 产品提供了卫星轨道上的气溶胶消光系数廓线,VFM 产品提供了大气中云和气溶胶类型及其分布信息,将气溶胶分为海盐、洁净的大陆气溶胶、污染性大陆气溶胶、沙尘、污染性沙尘、烟尘、火山灰等几类。针对中国西北地区,本文对含量较少的火山灰和海洋性气溶胶不做探讨,主要研究来自沙漠的矿物质粉尘(沙尘以及污染性沙尘)、由生物质燃烧产生的含碳气溶胶(烟尘)以及硫酸盐、硝酸盐、有机碳和铵盐等背景气溶胶(大陆气溶胶以及污染性大陆气溶胶)。

1.4 方法

图 1 给出了构建气溶胶三维分布的方法,图中斜线表示 CALIPSO 卫星经过中国西北地区的轨迹(红线表示白天,蓝线表示夜间)。首先构建一个 1°×1°×500 m(经度×纬度×高度)分辨率的三维矩

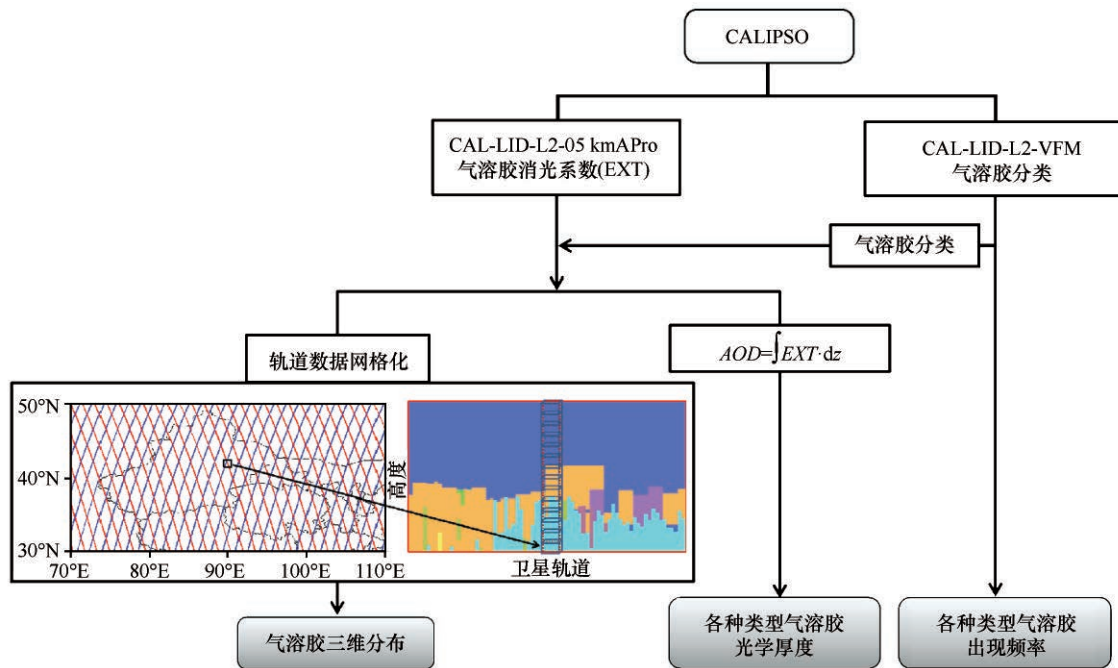


图1 研究方法示意图

Fig.1 Structure schematic of the research method

阵^[38],对于一个特定单元格将CALIPSO卫星轨道上该单元格范围内的气溶胶消光系数取平均,构建中国西北地区气溶胶的三维分布。基于VFM产品给出的气溶胶类型分析中国西北地区各类气溶胶的出现频率、垂直分布。结合VFM产品给出的气溶胶类型和APro产品给出的气溶胶消光系数廓线对特定类型的气溶胶消光系数(EXT)在垂直方向上积分,得到该类型的气溶胶光学厚度(AOD)。研究时段为2007—2017年。

2 结果

2.1 区域概况

中国西北地区包括新疆、青海、甘肃、宁夏、陕西和内蒙古的西部,绝大部分地区属于温带大陆性气候。该地区海拔较高、地形复杂,以高原、山地和盆地为主(图2A),植被类型以荒漠/稀疏植被和草地为主,此外还有少量的农用地和稀疏灌木,生态脆弱(图2B)。

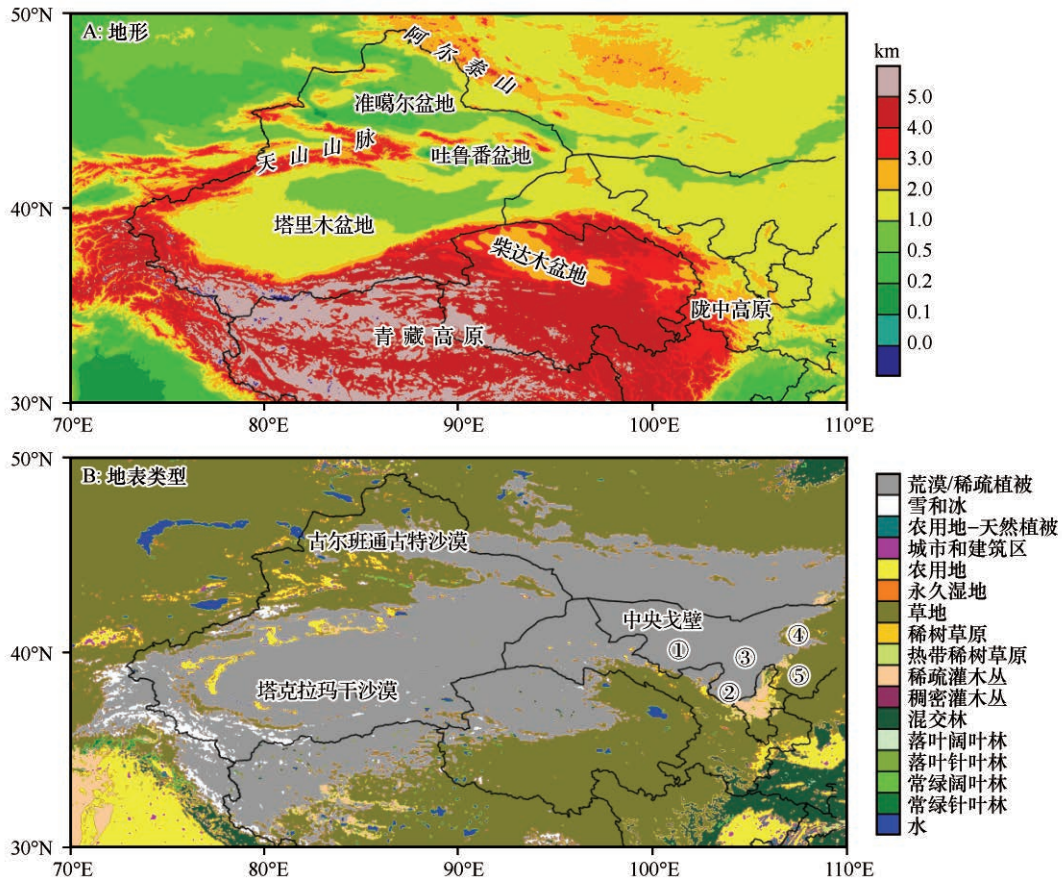
从图3可知,中国西北地区气溶胶含量较高,年平均AOD可以高达0.4,主要分布在新疆南部的塔里木盆地、新疆北部的准噶尔盆地以及甘肃-内蒙古一带,为本文的重点研究区域。塔里木盆地是一个大型封闭性山间盆地(图2),这里分布着中国最大的沙漠——塔克拉玛干沙漠;准噶尔盆地是中国

第二大的内陆盆地(图2),有中国八大沙漠之一的古尔班通古特沙漠;而甘肃-内蒙古一带则分布着巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、乌兰布和沙漠、库布齐沙漠等多个沙漠(图2)。因此,对中国西北地区气溶胶的研究多关于沙尘气溶胶,但是随着中国西北地区经济和社会迅速发展,大气污染日益严重,大气中纯自然沙尘的出现频率较低^[40],有必要分区域、按类别讨论中国西北地区气溶胶的时空分布特征。

2.2 气溶胶的时空分布

如图4所示,新疆南部的塔克拉玛干沙漠气溶胶主要分布在4 km以下,消光系数随高度增加而减小,春、夏两季气溶胶消光系数较大(约为 0.5 km^{-1}),秋、冬两季气溶胶消光系数较小($0.1\text{—}0.3 \text{ km}^{-1}$)且垂直分布较低。新疆北部的古尔班通古特沙漠气溶胶消光系数较小且季节变化不大(约为 0.12 km^{-1})。甘肃-内蒙古一带气溶胶消光系数较大、分布零散,且春夏>秋冬,部分地区甚至超过了 0.36 km^{-1} ,春夏季节气溶胶垂直分布较高,部分地区气溶胶甚至可以延伸到8 km的高空。值得指出的是,夏季天山山脉和青藏高原主体上空也有气溶胶的存在。

从图5可知,中国西北地区气溶胶出现频率季节变化不大(冬季略低),沙尘和污染性沙尘气溶胶出现频率最高,其次是大陆气溶胶,污染性大陆气溶胶和烟尘出现频率较低。人烟稀少的塔克拉玛



① 巴丹吉林沙漠; ② 腾格里沙漠; ③ 乌兰布和沙漠; ④ 库布齐沙漠; ⑤ 毛乌素沙地

图 2 中国西北地区的地形(A)和植被类型(B)

Fig.2 Topography (A) and vegetation type (B) of Northwest China

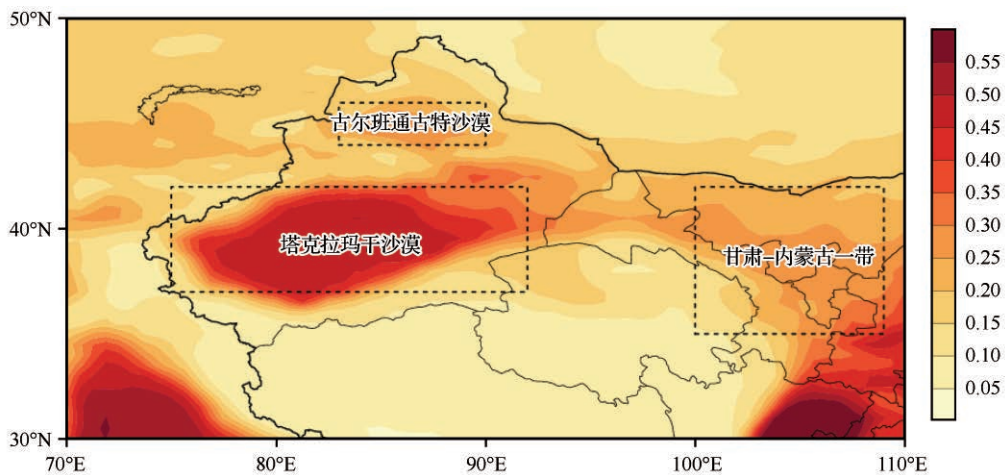


图 3 中国西北地区的气溶胶光学厚度(AOD)

Fig.3 Aerosol optical depth (AOD) over Northwest China

干沙漠,沙尘气溶胶出现频率最高(约0.2),主要分布在5 km 及以内;大陆气溶胶、烟尘出现频率较低且分布较高(5—7 km),应该是远距离输送而来的。人类活动相对频繁的新疆北部和甘肃-内蒙古一带,污染性沙尘气溶胶出现频率较高(约0.15),与沙

尘气溶胶相当。值得指出的是,新疆北部有明显的烟尘气溶胶出现(约0.1),分布较低,这些气溶胶很可能是局地排放的。

中国西北地区气溶胶以沙尘和污染性沙尘气溶胶为主,AOD呈现春夏高、秋冬低的分布特征(图6)。

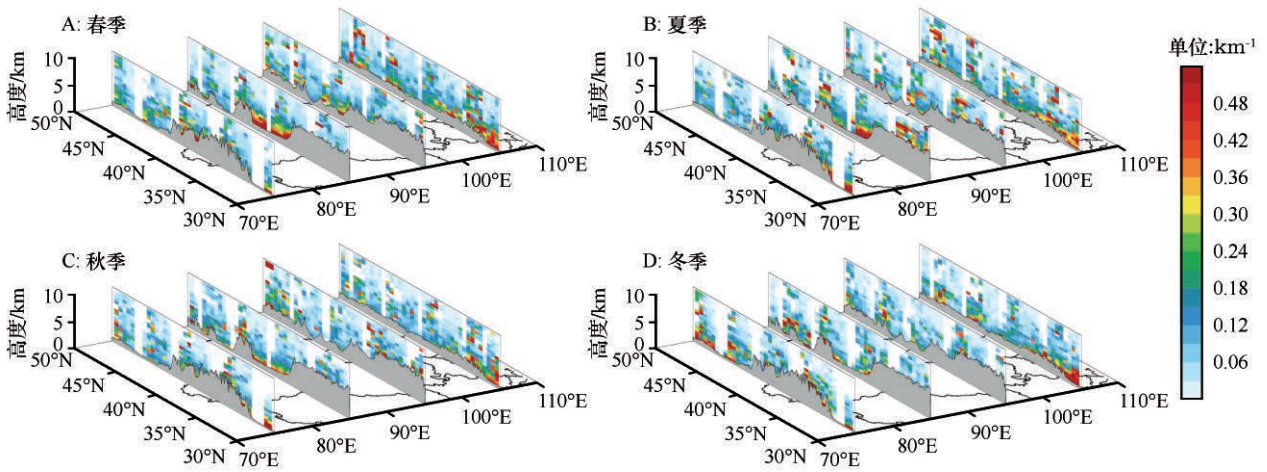


图4 春(A)、夏(B)、秋(C)、冬季(D)中国西北地区气溶胶消光系数的三维分布
 Fig.4 Three-dimensional distribution of aerosol extinction coefficient over Northwest China in spring (A), summer (B), autumn (C), and winter (D)

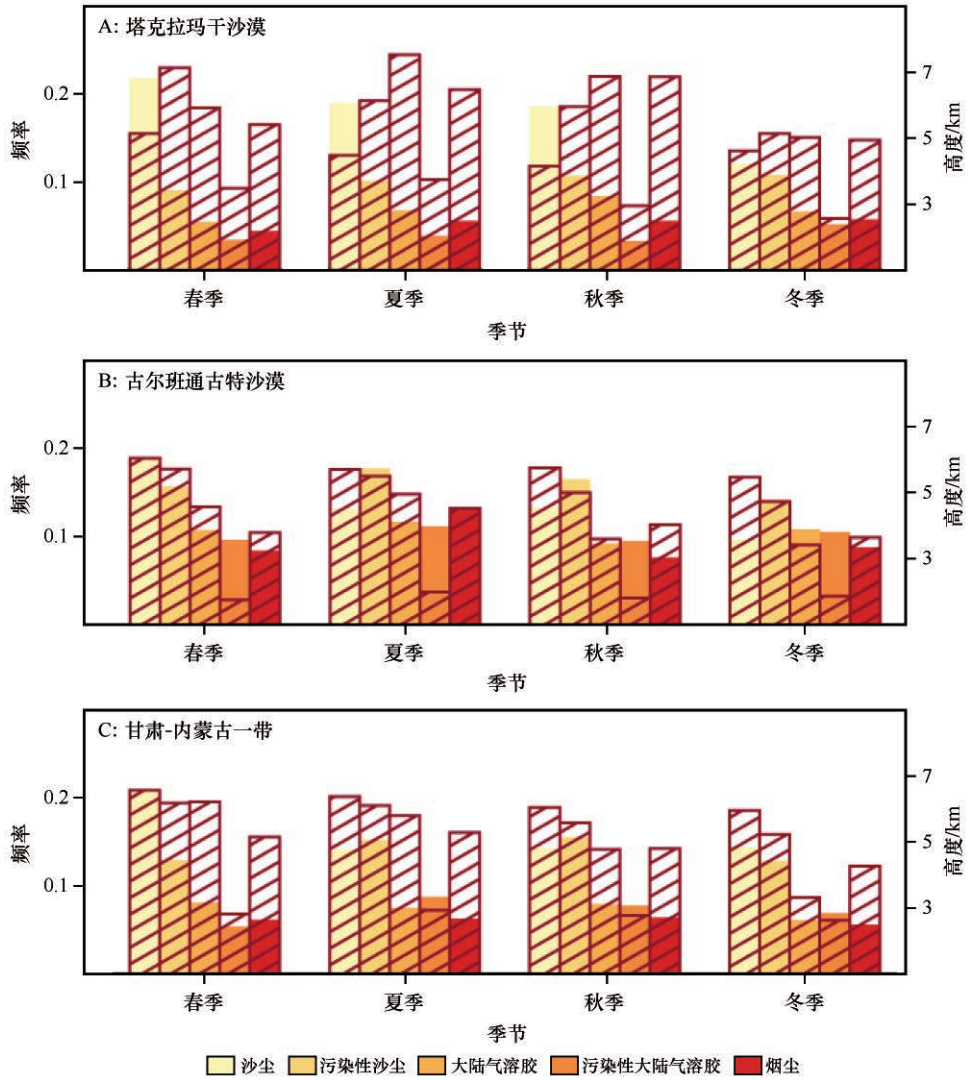


图5 中国西北地区各种类型气溶胶的平均出现频率和分布高度
 Fig.5 The averaged frequency and distribution height of aerosols over Northwest China

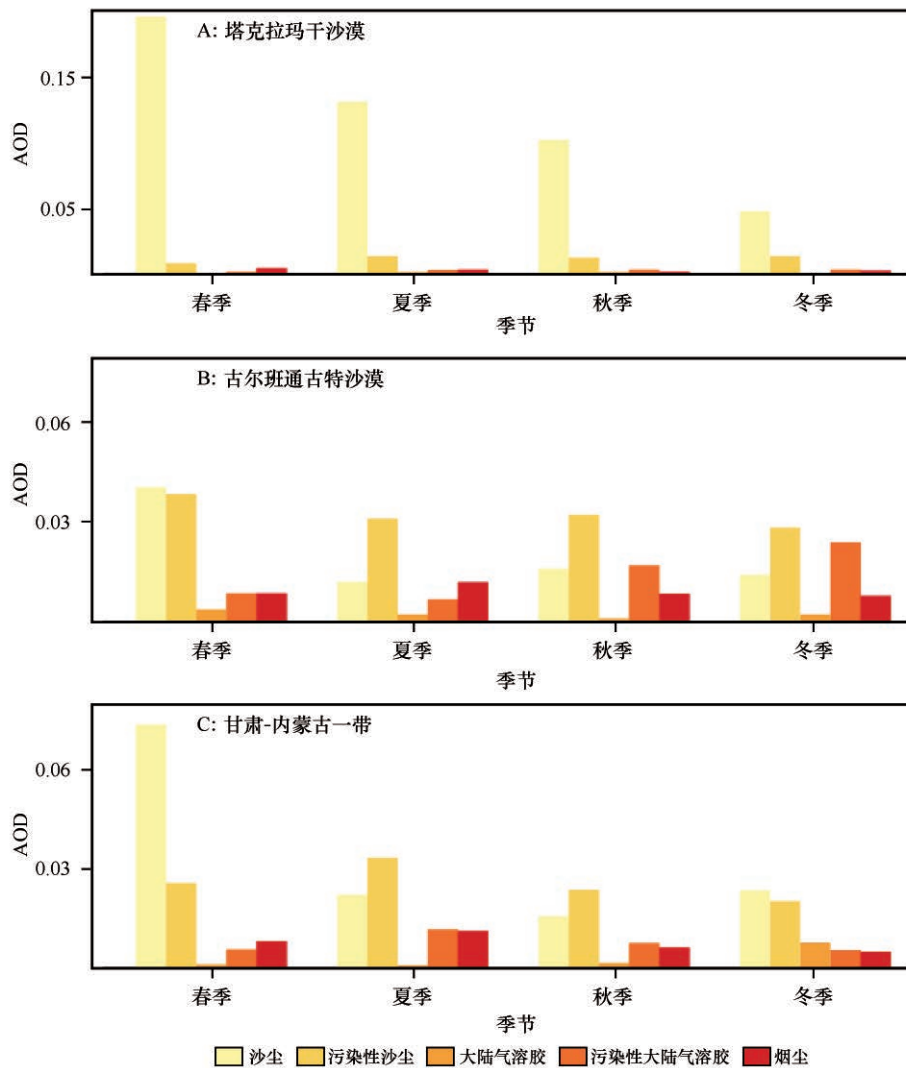


图6 中国西北地区各种类型气溶胶的平均光学厚度

Fig.6 The averaged AOD over Northwest China

洁净的大陆气溶胶虽然出现频率不低, AOD却较小, 说明在大气中浓度较低。塔克拉玛干沙漠气溶胶以沙尘为主, AOD季节变化明显, 春季>夏季>秋季>冬季, 且明显高于古尔班通古特沙漠和甘肃-内蒙古一带。古尔班通古特沙漠和甘肃-内蒙古一带受人类活动影响较大, 除了甘肃-内蒙古一带的春季沙尘 AOD 高于污染性沙尘之外, 污染性沙尘 AOD 大于沙尘或与之相当(0.03), 此外还有大量的污染性大陆气溶胶和烟尘, 尤其是古尔班通古特沙漠的秋冬季节。

2.3 成因

中国西北地区气溶胶以沙尘、污染性沙尘、污染性大陆气溶胶和烟尘为主, 洁净大陆气溶胶几乎可以忽略, 而污染性大陆气溶胶垂直分布较低(古

尔班通古特沙漠 2 km 以下, 甘肃-内蒙古一带 3 km 以下), 主要受局地排放影响。本节主要分析沙尘和污染性沙尘气溶胶。

从空间上看, 沙尘气溶胶的排放主要分布在塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠和甘肃-内蒙古一带(图 7), 且春季>夏季>秋季>冬季, 相比塔克拉玛干沙漠, 古尔班通古特沙漠沙尘气溶胶排放相对较低而且分布集中。春季, 当大风掠过温暖干燥、植被稀少的地表, 引起大量起沙并在西北风的作用下往东输送; 夏季, 由于夏季风盛行以及高大地形的阻挡, 沙尘气溶胶输送较弱; 秋季和冬季, 沙尘气溶胶排放低, 气溶胶输送也比较弱。

塔克拉玛干沙漠位于一个大型封闭性山间盆地(塔里木盆地), 受此影响该地区局地环流明显(图 8), 气溶胶远距离输送弱, 该地区气溶胶的三维

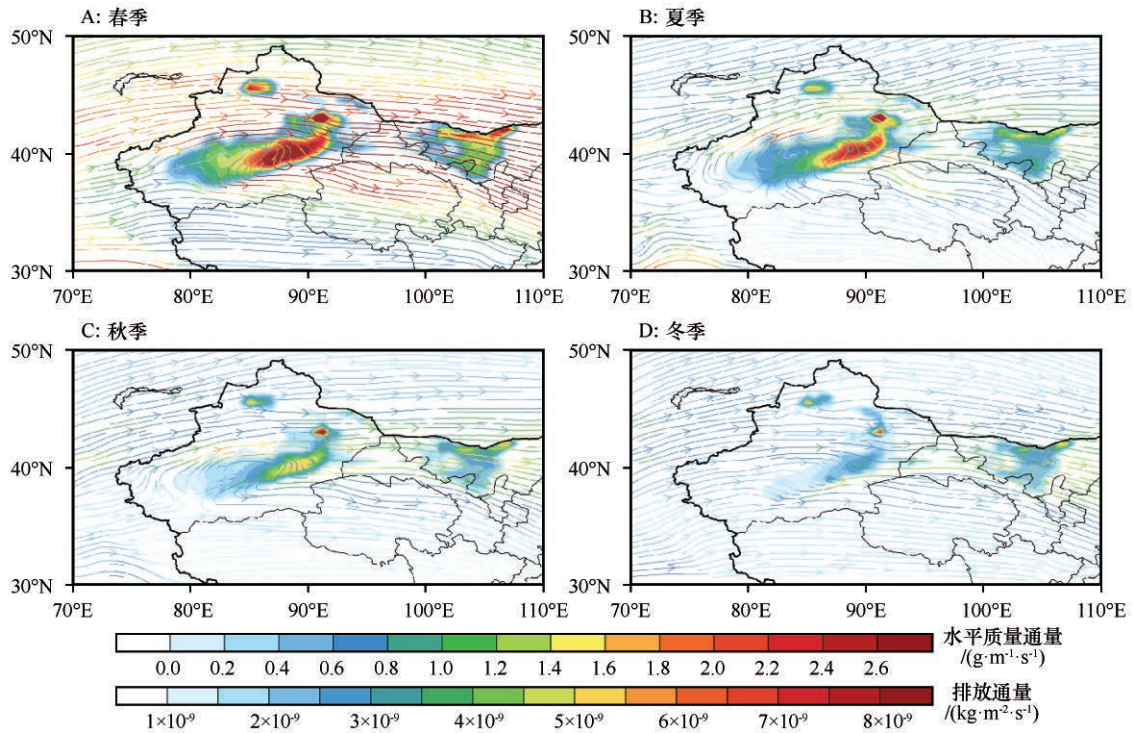


图7 春(A)、夏(B)、秋(C)、冬(D)季中国西北地区的沙尘气溶胶排放通量和柱水平质量通量

Fig.7 Dust aerosol emission flux and column mass flux over Northwest China in spring (A), summer (B), autumn (C), and winter (D)

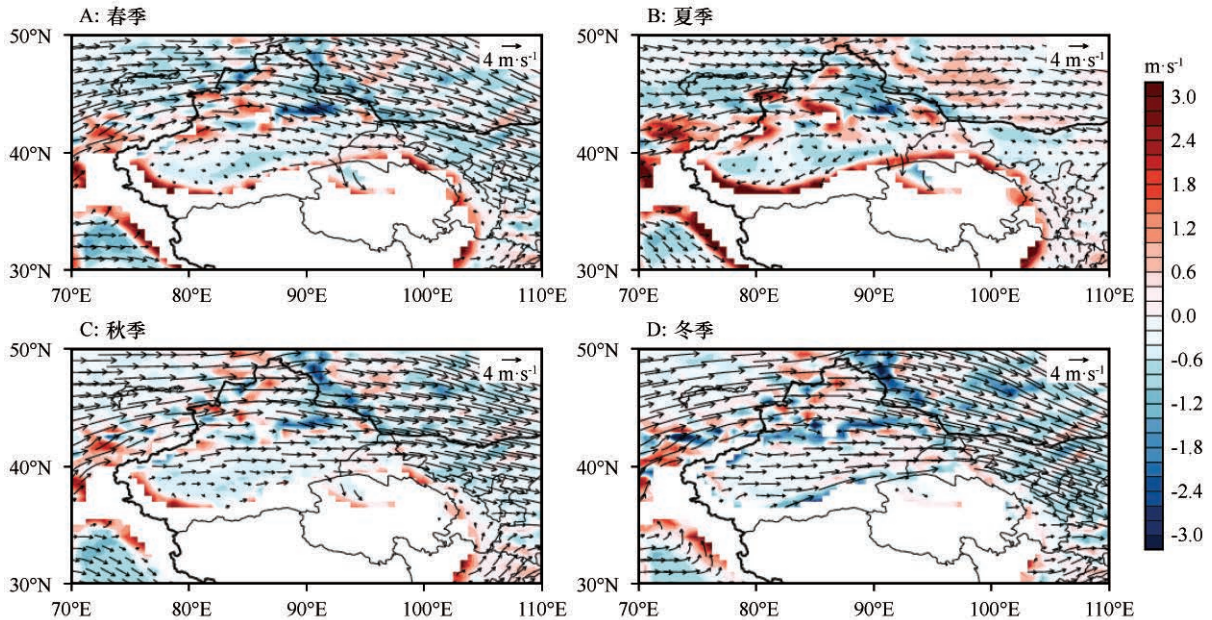


图8 春(A)、夏(B)、秋(C)、冬(D)季中国西北地区的700 hPa风场(箭头表示水平风场,底色表示垂直速度)

Fig.8 Wind field at 700 hPa over Northwest China in spring (A), summer (B), autumn (C), and winter (D)

分布主要取决于局地排放和垂直输送。春夏季节, 由于高原热力泵效应, 青藏高原周围和天山山脉附近有明显的上升运动, 部分气溶胶受此影响输送到了天山山脉和青藏高原主体上空。与此类似, 甘肃境内也有明显的上升运动(青藏高原东北边缘), 甘

肃-内蒙古一带气溶胶垂直分布也较高。与塔克拉玛干沙漠不同的是, 甘肃-内蒙古一带沙尘气溶胶水平输送较强, 除了沙尘排放较强的春季, 秋、冬季在西北风作用下沙尘气溶胶也有较强的东向输送, 该地区不但受到局地排放的气溶胶影响, 上游排放

的气溶胶在西北风作用下输送而来并且继续向东输送影响下游地区(图8)。古尔班通古特沙漠起沙量较小而集中,春夏季节会有大量沙尘气溶胶沿着西风带从中亚输送而来,输送过程中沙尘和其他类型气溶胶混合变性为污染性沙尘气溶胶(图8)。

3 结论

中国西北地区气溶胶含量较高,主要分布在新疆南部的塔克拉玛干沙漠、新疆北部的古尔班通古特沙漠和甘肃-内蒙古一带,以沙尘和污染性沙尘气溶胶为主,且AOD呈现春夏高、秋冬低的分布特征。污染性大陆气溶胶和烟尘气溶胶受人类活动影响较大,主要分布在人类活动频繁的新疆北部和甘肃-内蒙古一带。大气中洁净的大陆气溶胶含量较少,几乎可以忽略。中国西北地区气溶胶出现频率季节变化不大,AOD和消光系数的三维分布则有明显的季节变化。

塔克拉玛干沙漠受地形影响,局地环流明显,气溶胶远距离输送较弱,其三维分布主要取决于局地排放和垂直输送。该地区沙尘排放量高,大气中的气溶胶以沙尘为主,AOD的季节变化与沙尘气溶胶排放一致,春季>夏季>秋季>冬季。这些沙尘气溶胶主要分布在4 km以下,消光系数随高度增加而减小,夏季气溶胶分布较高甚至会有一些输送到青藏高原上空。污染性大陆气溶胶、大陆气溶胶和烟尘出现频率低(约为0.05)、含量较小(AOD小于0.02)、垂直分布较高(5—7 km),主要由远距离输送而来,会与局地排放的沙尘气溶胶混合(即污染性沙尘气溶胶)。

古尔班通古特沙漠气溶胶消光系数较小(约 0.12 km^{-1});甘肃-内蒙古一带气溶胶消光系数相对较大、分布零散,且春夏>秋冬。类似于塔克拉玛干沙漠,夏季古尔班通古特沙漠的气溶胶也会输送到天山山脉上空,甘肃-内蒙古一带气溶胶垂直分布也较高(8 km的高空)。和塔克拉玛干沙漠相比,古尔班通古特沙漠和甘肃-内蒙古一带由于人类活动频繁,气溶胶种类较为复杂,大气中有大量的污染性沙尘、污染性大陆气溶胶和烟尘。该地区不但受到局地排放的气溶胶影响,还会受到上游排放的气溶胶影响,这些气溶胶在西北风作用下输送而来,与局地排放的气溶胶混合并继续向下游地区输送。沙尘气溶胶沿着西风带输送而来,经过远距离输送变性为污染性沙尘气溶胶,污染性沙尘气溶胶要占

相当大的比重(出现频率约为0.15,AOD约为0.03),其含量甚至可以大于沙尘气溶胶。

虽然CALIPSO卫星可以实现在全球尺度上长时间连续探测,且在探测气溶胶的垂直分布方面具有独特的优势^[17,38],可以很好地研究大范围气溶胶的三维分布情况,但是也有其不可忽视的缺点。作为一个极轨卫星,CALIPSO观测间隔长、轨道间隔大,不能获得同一地区连续的观测资料,可能会遗漏短时间、小尺度的沙尘活动,长时间平均在一定程度上弥补了这些缺点^[40],将多种卫星数据和地面常规观测站资料结合起来才能更加真实地反演出气溶胶的三维分布。

参考文献:

- [1] 陈亿,尚可政,王式功,等.内蒙古半干旱区沙尘天气特征及其与地表特征的关系[J].中国沙漠,2013,33(4):1131-1137.
- [2] 韩兰英,张强,郭锐,等.中国西北地区沙尘天气的时空位移特征[J].中国沙漠,2012,32(2):454-457.
- [3] 王芝兰,李耀辉,王素萍,等.1901-2012年中国西北地区东部多时间尺度干旱特征[J].中国沙漠,2015,35(6):1666-1673.
- [4] 周雪英,贾健,刘国强,等.1997-2017年塔克拉玛干沙漠腹地降水特征[J].中国沙漠,2019,39(1):187-194.
- [5] 丁一汇,王守荣.中国西北地区气候与生态环境概论[M].北京:气象出版社,2001.
- [6] 王玉朝,赵成义.绿洲-荒漠生态脆弱带的研究[J].干旱区地理,2001,24(2):182-188.
- [7] Huang J, Ma J, Guan X, et al. Progress in semi-arid climate change studies in China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36: 922-937.
- [8] 张强,张存杰,白虎志,等.西北地区气候变化新动态及对干旱环境的影响[J].干旱气象,2010,28(1):1-7.
- [9] 王素萍,张存杰,李耀辉,等.基于标准化降水指数的1960-2011年中国不同时间尺度干旱特征[J].中国沙漠,2014,34(3):827-834.
- [10] 张强,邓振镛,赵映东,等.全球气候变化对我国西北地区农业的影响[J].生态学报,2007,28(3):1210-1218.
- [11] Wei K, Wang L. Reexamination of the aridity conditions in arid northwestern China for the last decade[J]. Journal of Climate, 2013, 26: 9594-9602.
- [12] 马鹏里,韩兰英,张旭东,等.气候变暖背景下中国干旱变化的区域特征[J].中国沙漠,2019,39(6):209-215.
- [13] 秦大河,王绍武,董光荣.中国西部环境特征及其演变[M].北京:科学出版社,2002.
- [14] 秦大河,王苏民.环境演变对中国西部发展的影响及对策[M].北京:科学出版社,2002.
- [15] 马柱国,符淙斌,杨庆,等.关于我国北方干旱化及其转折性变化[J].大气科学,2018,42:951-961.
- [16] 张磊,王春燕,潘小多.基于区域气候模式未来气候变化研究综述[J].高原气象,2018,37(5):301-309.

- [17] Jia R, Liu Y, Hua S, et al. Estimation of the aerosol radiative effect over the Tibetan Plateau based on the latest CALIPSO product [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2018, 32(5): 707–722.
- [18] Lau W K M, Kim M K, Kim K M, et al. Enhanced surface warming and accelerated snow melt in the Himalayas and Tibetan Plateau induced by absorbing aerosols [J]. *Environmental Research Letters*, 2010, 5(2): 25204.
- [19] Huang J, Minnis P, Yan H, et al. Dust aerosol effect on semi-arid climate over Northwest China detected from A-Train satellite measurements [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10(14): 6863–6872.
- [20] Huang J, Wang T, Wang W, et al. Climate effects of dust aerosols over East Asian arid and semiarid regions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2014, 119(19): 11398–11416.
- [21] Huang J, Bing L, Minnis P, et al. Satellite-based assessment of possible dust aerosols semi-direct effect on cloud water path over East Asia [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(19): L19802.
- [22] Kawecki S, Henebry G M, Steiner A L. Effects of urban plume aerosols on a mesoscale convective system [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73(12): 4641–4660.
- [23] Huang K, Zhuang G, Lin Y, et al. Relation between optical and chemical properties of dust aerosol over Beijing, China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: D00K16.
- [24] 沈凡卉, 王体健, 庄炳亮, 等. 中国沙尘气溶胶的间接辐射强迫与气候效应 [J]. *中国环境科学*, 2011, 31(7): 1057–1063.
- [25] 李仑格, 李富刚, 王广河, 等. 西北地区气溶胶遥感及其气候效应研究综述 [J]. *中国沙漠*, 2008, 28(3): 579–585.
- [26] Lee S S, Guo J, Li Z. Delaying precipitation by air pollution over the Pearl River Delta. Part II: model simulations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2016, 121: 11739–11760.
- [27] Chen Q, Yin Y, Jin L, et al. The effect of aerosol layers on convective cloud microphysics and precipitation [J]. *Atmospheric Research*, 2011, 101: 327–340.
- [28] 陈思宇, 黄建平, 李景鑫, 等. 塔克拉玛干沙漠和戈壁沙尘起沙、传输和沉降的对比研究 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(8): 939–957.
- [29] 贾瑞, 刘玉芝, 吴楚樵, 等. 2007–2017年中国沙尘气溶胶的三维分布特征及输送过程 [J]. *中国沙漠*, 2019, 39(6): 108–117.
- [30] 李岩瑛, 杨晓玲, 王式功. 河西走廊东部近 50 a 沙尘暴成因、危害及防御对策 [J]. *中国沙漠*, 2002, 22(3): 283–287.
- [31] 丁瑞强, 王式功, 尚可政, 等. 近 45 a 我国沙尘暴和扬沙天气变化趋势和突变分析 [J]. *中国沙漠*, 2003, 23(3): 306–310.
- [32] 刘明哲, 魏文寿, 周宏飞, 等. 中国西北沙尘源区与日本沉降区大气气溶胶粒子理化特征及对比 [J]. *中国沙漠*, 2003, 23(4): 408–414.
- [33] 赵仕伟, 高晓清. 基于 MODIS 数据的西北地区气溶胶光学厚度和 Angström 波长指数的研究 [J]. *大气与环境光学学报*, 2017, 12(5): 321–331.
- [34] 于杰, 车慧正, 陈权亮, 等. 2010–2012年我国西北地区沙尘个例气溶胶特征分析 [J]. *气象与环境科学*, 2016, 39(2): 33–40.
- [35] 胡蝶, 张镭, 王宏斌. 黄土高原干旱半干旱地区气溶胶光学厚度遥感分析 [J]. *高原气象*, 2013, 32(3): 654–664.
- [36] 郑有飞, 刘贞, 刘建军, 等. 中国北部一次沙尘过程中沙尘气溶胶的时空分布及输送特性 [J]. *中国沙漠*, 2013, 33(5): 1440–1452.
- [37] Gelaro R, McCarty W, Max J S, et al. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(14): 5419–5454.
- [38] Adams A M, Prospero J M, Zhang C. CALIPSO-derived three-dimensional structure of aerosol over the Atlantic Basin and adjacent continents [J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(19): 6862–6879.
- [39] 茹建波, 王天河, 李积明, 等. 东亚沙尘源区晴空和云上沙尘气溶胶特征 [J]. *中国沙漠*, 2018, 38(2): 372–383.
- [40] 白冰, 张强, 陈旭辉, 等. 中国西北干旱半干旱区气溶胶分类及特征 [J]. *中国沙漠*, 2019, 39(5): 109–114.

Three-dimensional distribution and formation causes of aerosols over Northwest China

Jia Rui^{1,2}, Li Jun², Zhu Qingzhe¹, Li Yan², Tian Yunfei², Li Yang², Xu Zhengbao³

(1. Collaborative Innovation Center for Western Ecological Safety, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Zibo Meteorological Bureau, Zibo 255000, Shandong, China; 3. Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong, China)

Abstract: Using the CALIPSO observations and MERRA-2 data, the three-dimensional distribution of aerosols over Northwest China are constructed, and the aerosol occurrence frequency and aerosol optical depth (AOD) are also discussed by region and category. On this basis, the formation causes are explored. There are a large amount of aerosols over Northwest China, mainly dust and polluted dust, which are primarily distributed over the Taklimakan Desert, Gurbantunggut Desert and Gansu-Inner Mongolia. The occurrence frequencies of these aerosols vary little with season, but there are obvious regional and seasonal variations of aerosol content and its three-dimensional distribution in the atmosphere. In summer, the vertical distributions of these aerosols are high due to the obvious ascending movements and some aerosols can be transported to the Tianshan Mountains, the Tibetan Plateau, and even the altitude of 8 km. The aerosols over the Taklimakan Desert are dominated by natural dust, mainly distributed below 4 km. Affected by the topography, the local circulation over the Taklimakan Desert is obvious, and thus the three-dimensional distribution of aerosols is mainly caused by local emission and vertical transport. The seasonal change of AOD is consistent with the dust emission, spring>summer>autumn>winter. In contrast, the aerosol extinction coefficients over the Gurbantonggut Desert and Gansu-Inner Mongolia are small and scattered. The aerosol types are complex. In addition to natural dust, there are a large amount of polluted dust aerosols (with occurrence frequency of 0.15 and AOD of 0.03, even larger than natural dust), polluted continent aerosols and smoke. These areas are not only affected by local emissions, but also by long-distance transport. The upstream aerosols transported by the northwest wind mix with the local aerosols and continue to transport downstream. The natural dust aerosols are transformed into polluted dust during the long-distance transport.

Key words: Northwest China; aerosol classification; three-dimensional distribution; emission; transport