

# 丝绸之路经济带气溶胶的人为成份比例

张芝娟<sup>1ab</sup>, 陈斌<sup>1ab</sup>, 衣育红<sup>1c</sup>, 刘晶晶<sup>2</sup>, 贾瑞<sup>1ab</sup>, 黄建平<sup>1ab</sup>

(1. 兰州大学 a. 大气科学学院, b. 半干旱气候变化教育部重点实验室, c. 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710000)

**摘要:** 利用 MERRA-2( The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2) 再分析资料, 分析了 1980—2017 年丝绸之路经济带沿线区域( 30°—50°N, 10°—110°E) 硫酸盐、黑碳、有机碳、沙尘气溶胶的时空分布特征, 然后将沙尘分为自然沙尘和人为沙尘, 进而计算出自然气溶胶和人为气溶胶在不同季节的空间分布, 定量给出了人为气溶胶的贡献。结果表明: 在丝绸之路经济带沿线的东欧地区, 经济发达、工业活跃, 硫酸盐是最主要的气溶胶类型, 占总气溶胶光学厚度的 64%, 总气溶胶光学厚度每年下降 0.0035; 在地表裸露、沙尘活跃的 5 个欠发达地区, 沙尘是最主要的气溶胶类型, 占总气溶胶光学厚度的 46%~65%, 其中巴基斯坦-印度地区总气溶胶光学厚度每年增加 0.0059; 人为气溶胶对总气溶胶的平均贡献为 62%~65%; 6 个区域中北非地区人为气溶胶所占比例最小, 为 32.8%, 东欧地区最大, 为 73.5%; 随着人口密度的增加, 人为气溶胶的光学厚度也在增加。人为气溶胶占总气溶胶的比例很高, 而且与人口密度正相关。

**关键词:** 丝绸之路经济带; 人为气溶胶; 自然气溶胶; 贡献

文章编号: 1000-694X( 2019) 04-016-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2018.00098

中图分类号: P407

文献标志码: A

## 0 引言

2013 年 9 月, 中国国家主席出访中亚及东南亚等国家, 提出了“一带一路”( The Belt and Road, B & R) 重大倡议, 即“丝绸之路经济带”与“21 世纪海上丝绸之路”, 得到国际社会的广泛重视。2015 年 3 月 28 日, 国家有关部委联合发布了《推动共建丝绸之路经济带和 21 世纪海上丝绸之路的愿景与行动》。2017 年 5 月 14—15 日“一带一路”国际合作高峰论坛在北京举行, 习近平主席出席高峰论坛开幕式, 并主持领导人圆桌峰会。丝绸之路经济带合作的国家和地区包括中亚、西亚( 至波斯湾、地中海)、南亚、东南亚、印度洋、俄罗斯、欧洲( 波罗的海), 21 世纪海上丝绸之路的重点方向是南海、南太平洋、印度洋和欧洲。首先, 这一举措不仅可以为区域合作提供一个良好的互动平台, 有效增强区域内的沟通协作, 带动沿线地区经济发展, 也有助于通过国内市场与国际市场的深度融合提供外部监督, 从而提高政府的治理效率。其次, 更大规模的开放也可以促使中国进一步完善基础设

施建设, 倒逼国内深层次的改革, 实现产业结构的升级, 提高经济创新水平。最后, “一带一路”不仅是经济、资源上的互联互通, 也是人文交流的重要渠道。自倡议提出以来到 2018 年 4 月, 中国企业已经对新加坡、马来西亚、泰国等沿线 53 个国家非金融类直接投资 40 多亿美元, 建立亚洲基础设施投资银行, 帮助沿线地区完善交通、通信等基础设施, 取得了丰硕的成果。因此研究“一带一路”沿线区域具有重要的政治、经济意义。

气溶胶是指固体或液体微粒悬浮在空气中形成的多相体系, 是气候系统中最不确定的因子之一。它可以通过直接效应、间接效应( 包括第一间接效应和第二间接效应)、半直接效应和激励效应影响气候系统<sup>[1-2]</sup>, 对不同地区的温度、云和降水产生很大的影响<sup>[3-4]</sup>。另一方面, 它还可以影响空气质量以及人类的生存环境。除此之外, 它还可以在人类健康、流行病等方面对人类产生影响。气溶胶根据化学组分可被分为硫酸盐、黑碳、有机碳、海盐和沙尘。在丝绸之路经济带沿线的亚洲地区, 沙尘气溶胶非常丰富。人类活动( 例如农业活动、城市和工

收稿日期: 2018-07-12; 改回日期: 2018-09-04

资助项目: 国家自然科学基金项目( 41521004, 41375032, 41775021, 41305026)

作者简介: 张芝娟( 1990—), 女, 山西岢岚人, 博士研究生, 研究方向为卫星遥感。E-mail: zhangzj2010@lzu.edu.cn

通信作者: 黄建平( E-mail: hjp@lzu.edu.cn)

业活动)会产生一部分人为沙尘<sup>[5]</sup>。目前认为近一半的现代大气中的沙尘来源于受人类活动影响的土壤<sup>[6]</sup>。在过去的几十年中,在半干旱和半湿润地区更加温暖和干燥的冬季和春季变得更加频繁<sup>[7]</sup>,而且人类活动引起植被覆盖的变化也变得更加频繁,可能会导致人为沙尘排放的增加<sup>[6,8-9]</sup>。因此本文将沙尘分为自然沙尘和人为沙尘,而不是笼统地把它作为一个整体来进行研究。

最近几年,人为沙尘在国内外引起了广泛的关注。Huang等<sup>[10]</sup>指出人类活动(农业、工业活动、交通和过度放牧等)造成的人为沙尘气溶胶约占全球大陆沙尘总量的25%,而在这些人为沙尘气溶胶中,有53%以上来自半干旱和半湿润地区;在北美东部、印度、中国东部和欧洲等人口密集的农业地区,人为沙尘所占的比例均超过60%。Guan等<sup>[11]</sup>指出当人口密度超过 $100 \text{人} \cdot \text{km}^{-2}$ 时,人口密度对人为沙尘的产生有显著影响;当人口密度较大时,人为沙尘的标准偏差整体较大,而且人为沙尘的标准差在人口密度为 $400 \text{人} \cdot \text{km}^{-2}$ 以上的地区最高。此外,国内一些学者就沙尘源区沙尘气溶胶的光学特性进行了研究<sup>[12-15]</sup>。Chen等<sup>[16-17]</sup>结合模式和观测对比研究了塔克拉玛干和戈壁沙漠沙尘气溶胶的排放、传输、沉降及辐射效应。

利用1980—2017年MERRA-2(The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2)再分析资料中不同类型气溶胶光学厚度(Aerosol Optical Depth, AOD)和自然沙尘及人为沙尘光学厚度的数据,将海盐气溶胶、自然沙尘(Dust, DU)气溶胶归为自然气溶胶,将硫酸盐(Sulfate, SU)气溶胶、黑碳(Black carbon, BC)气溶胶、有机碳(Organic carbon, OC)气溶胶和人为沙尘气溶胶归为人为气溶胶,通过区分不同来源的气溶胶,开展了利用光学厚度来定量分析丝绸之路经济带沿线区域( $30^{\circ}$ — $50^{\circ}\text{N}$ ,  $10^{\circ}$ — $110^{\circ}\text{E}$ )人为气溶胶对总气溶胶贡献的工作。

## 1 数据

### 1.1 人口密度数据

人口密度数据来源于第4版的网格化世界人口数据集(<http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/gpw-v4>),它由国际地球科学信息网络中心和国际热带农业中心维护,描绘了全球人口的空间分布。它是一种网格化的数据产品,能够在全球范围内所需要的区域和尺度呈现人口数据的分布情

况,说明人口与全球环境之间的关系。这个数据集旨在提供与社会、经济和地球科学学科兼容的人口分布的数据。从2000年到2020年,每5a提供一份人口数据的评估。为了表明丝绸之路经济带沿线区域人口的分布情况,采用了2015年人口密度的数据,空间分辨率是 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。

### 1.2 降水数据

降水数据来源于东安格利亚大学气候研究室(Climate Research Unit, CRU),其中的全球气候数据集提供了气候学意义上除南极洲之外的全球陆地区域的月降水数据<sup>[18]</sup>。该数据集是基于对4000多个单独气象站记录的分析得来的,空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ,其中的降水量估算是针对全球80%~100%的陆地表面<sup>[19]</sup>。气候学月降水是用1961—1990年的平均值来定义的。采用降水数据来表征丝绸之路经济带沿线区域的气候状态。

### 1.3 NDVI 数据

NDVI(Normalized Difference Vegetation Index),归一化差分植被指数,是植被生长状态及植被覆盖度的最佳指示因子。采用的NDVI数据来源于MODIS(MODerate resolution Imaging Spectroradiometer),空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ,对2000年1月到2015年12月的月度数据进行平均得到丝绸之路经济带沿线区域植被的覆盖情况,用以表征该区域的气候状态。

### 1.4 MERRA-2

MERRA-2是由美国国家航空航天局全球模式和同化办公室提供的现代卫星时代(1980年以后)包括基本气象要素和气溶胶等在内的一套大气实时再分析资料<sup>[20]</sup>。MERRA-2首次提供了通过辐射耦合到大气中的气溶胶分析场。在校正光学厚度的误差时,MERRA-2在同化过程中包含了搭载在诸多卫星和地基的观测资料。MERRA-2的所有数据均在同一水平网格上,数据分辨率为 $0.625^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。所使用的数据为1980—2017年全球范围内硫酸盐、黑碳、有机碳、沙尘和总气溶胶(Total aerosol, TOT)光学厚度的月数据。

## 2 人为沙尘的识别方法

由于人为沙尘的产生与人类活动紧密相关,而人类活动基本在城市、农田和草地(牧场)边界层的内

部 因此人为沙尘也主要分布在这些下垫面的边界层内部。从光学特性来看,由于与其他污染性气溶胶的混合,人为沙尘具有较纯沙尘偏小的退偏比<sup>[10]</sup>。利用 Huang 等<sup>[10]</sup> 开发的基于 CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) 卫星资料在全球范围内识别人为沙尘的新方法,计算出自然沙尘、人为沙尘的光学厚度。识别方法分4步进行: 第一步利用 CALIPSO Level 2 卫星产品识别出总沙尘(包括自然沙尘和人为沙尘),通过最严格的质量控制识别出所有的沙尘气溶胶; 第二步确定沙尘的来源,即根据下垫面的类型,将城市、农田和草地(牧场)定义为人为地表,并作为识别人为沙尘的必要条件; 第三步确定行星边界层(Planetary Boundary Layer, PBL) 的高度<sup>[21]</sup>,由于人类活动主要集中在 PBL 以内,因此识别的人为沙尘高度必须在 PBL 以内; 对比人为沙尘的代表区域中国东部和自然沙尘的代表区域塔克拉玛干沙漠沙尘气溶胶的退偏比,发现人为沙尘与自然沙尘退偏比的阈值为 0.23,因此最后一步将 PBL 内退偏比小于 0.23 的沙尘判定为人为沙尘,识别原理及具体流程见图 1<sup>[10]</sup>。

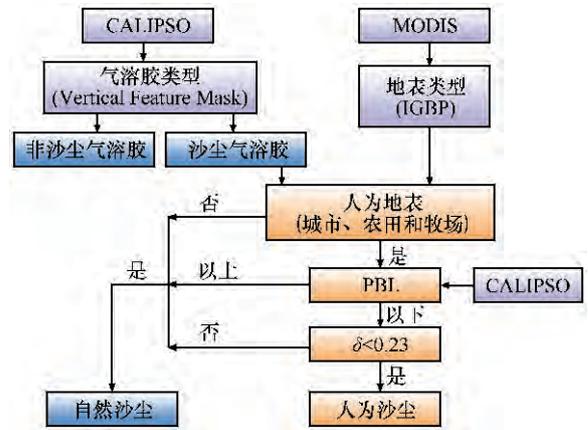


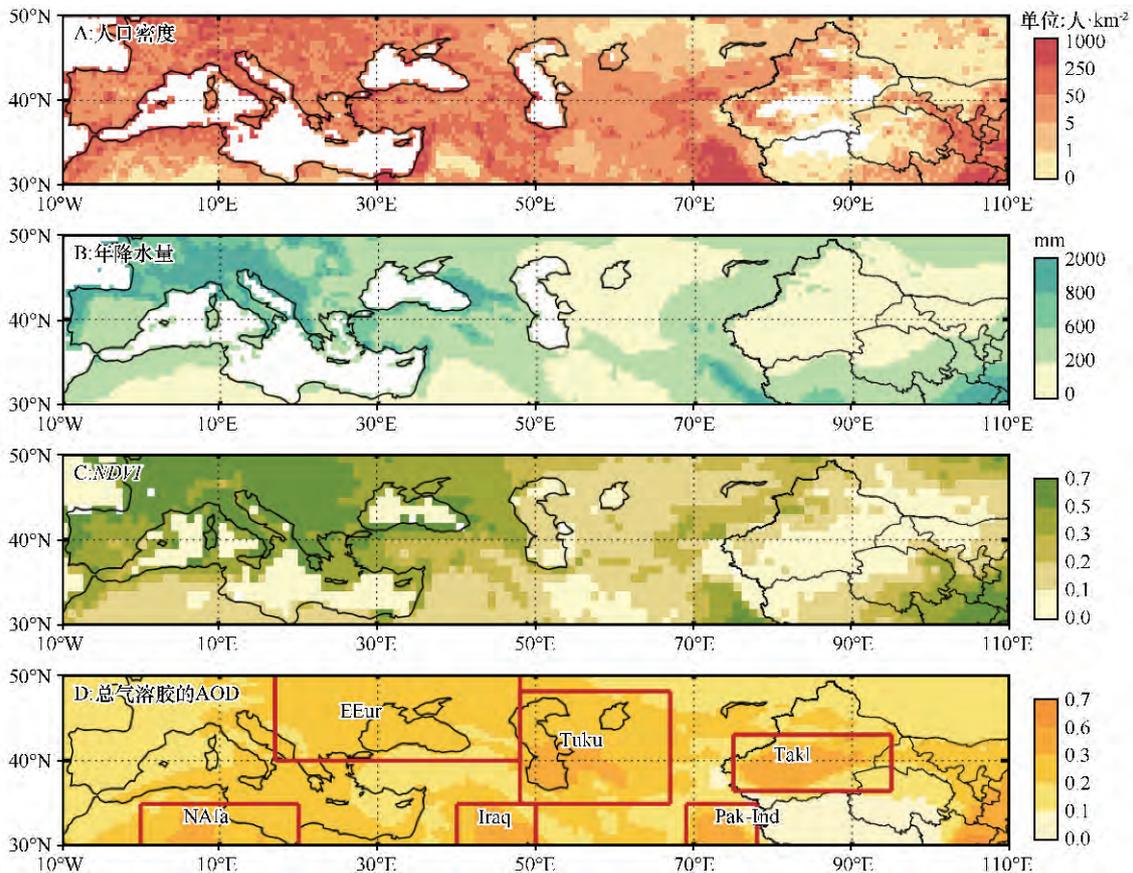
图 1 人为沙尘识别的具体流程<sup>[10]</sup>

Fig.1 Flow chart for the detection of anthropogenic dust<sup>[10]</sup>

利用上述方法识别人为沙尘后,再利用总沙尘的光学厚度减去人为沙尘的光学厚度得到自然沙尘的光学厚度,最后得出人为沙尘占总沙尘的百分比。

### 3 结果与分析

为了了解丝绸之路经济带沿线区域的气候及人口分布的状况,图2给出了该区域人口密度、年降水量



EEur 东欧地区; MAfa 北非地区; Iraq 伊拉克地区; Tuku 土库曼斯坦地区; Pak-Ind 巴基斯坦-印度地区; Takl 塔克拉玛干地区

图 2 丝绸之路经济带区域的人文及地理条件

Fig.2 Humanities and geographical conditions over the regions along the Silk Road Economy Belt

量、归一化差分植被指数和总气溶胶光学厚度气候态(1980—2017 年的年均值)的空间分布。从图 2A 可以看出,人口密度的高值中心在巴基斯坦印度的交界处、以色列、约旦和欧洲沿海地区,人口密度都大于 250 人·km<sup>-2</sup>。从图 2B 可以看出,欧洲地区的年降水量总体上高于亚洲地区。地中海以北的欧洲南部和格鲁吉亚年降水量较大,在 800 mm 以上。在亚洲地区,年降水量较小,基本在 600 mm 以下。从图 2C 可以看出,欧洲地区的 NDVI 整体比亚洲地区高,表明欧洲地区的植被覆盖较好。从图 2D 可以看出,总气溶胶 AOD 在中国塔克拉玛干沙漠地区、巴基斯坦-印度地区、中亚的广大地区、东欧及北非地区都有高值中心,其中在塔克拉玛干沙漠地区 AOD 最大,最高可达 0.67。

为了了解丝绸之路经济带沿线不同区域每种

类型气溶胶光学厚度的时间演变特征,根据图 2D 选取了 6 个区域并给出了每个区域硫酸盐、黑碳、有机碳、海盐、沙尘和总气溶胶 AOD 的时间序列(图 3) 6 个区域分别为东欧地区(East Europe,EEur)、北非地区(North Africa,NAfa)、伊拉克地区(Iraq)、土库曼斯坦地区(Tukumansit,Tuku)、巴基斯坦-印度地区(Pakistan-Indian,Pak-Ind)和塔克拉玛干地区(Taklamaka,Takl)。总气溶胶的光学厚度为 0.2~0.4,除去 1982 年和 1991 年两次火山活动的影响外,欧洲东部地区 AOD 在逐年下降,巴基斯坦-印度地区 AOD 在逐年上升,线性趋势分别为 0.0035 a<sup>-1</sup>和 0.0059 a<sup>-1</sup>,其他区域 AOD 随年份变化不明显。对于东欧地区,硫酸盐气溶胶的 AOD 是最大的,而其他 5 个区域,沙尘气溶胶的 AOD 是最大的,硫酸盐次之,其他类型气溶胶的

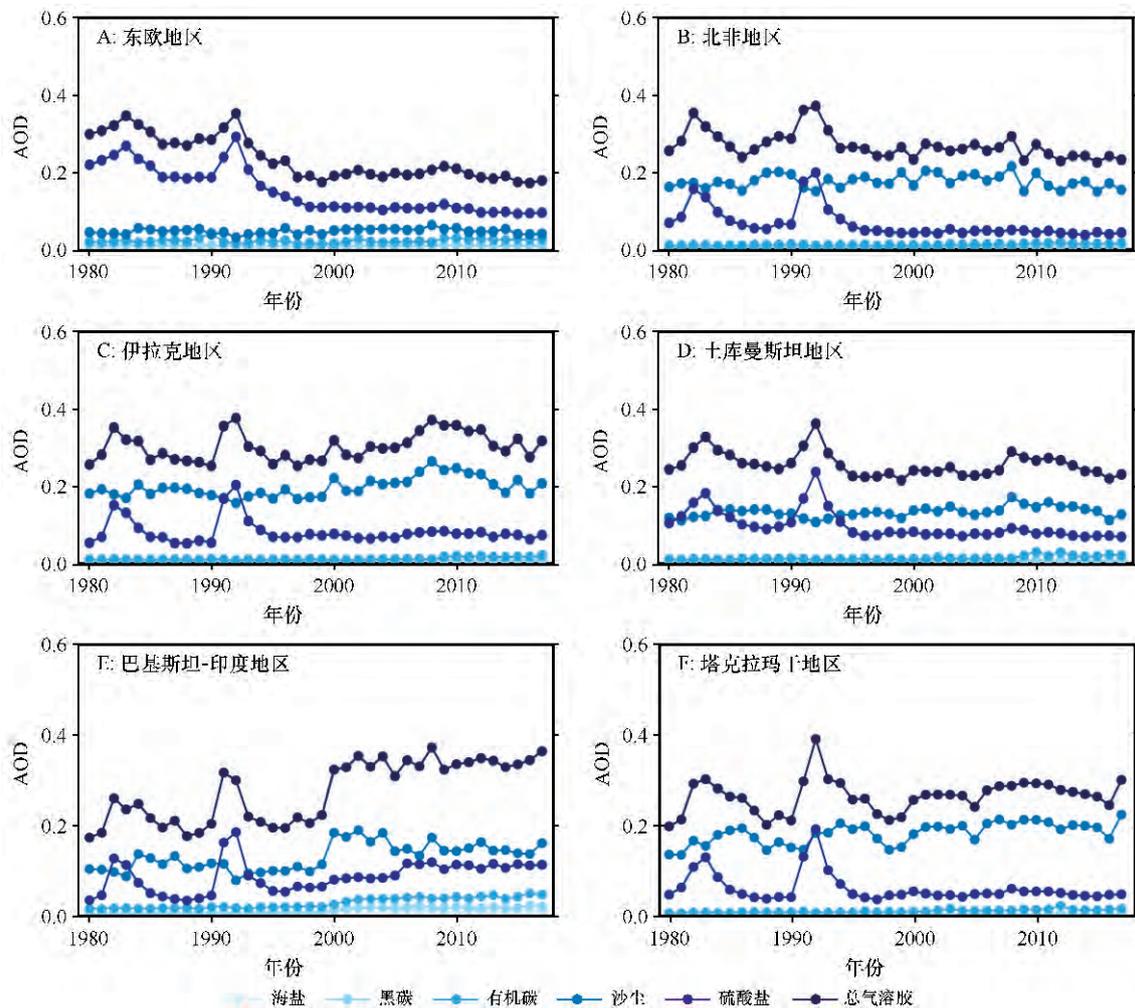


图 3 5 种类型气溶胶光学厚度(AOD)在丝绸之路经济带不同区域的时间序列

Fig.3 Times series of AOD for five types of aerosol over the regions along the Silk Road Economy Belt

AOD 都较小。

为了了解每种类型气溶胶的空间分布特征,

图 4 给出了硫酸盐、黑碳、有机碳和沙尘气溶胶 AOD 的空间分布。从图 4 可以看出,硫酸盐主要

分布在东欧 ,AOD 为 0.08 ~ 0.24; 其次在西亚及中亚也有一定的分布 ,但值比较小。黑碳气溶胶 AOD 的高值中心为巴基斯坦-印度地区 ,为 0.012 ~ 0.024。有机碳气溶胶 AOD 的高值中心为巴基斯

坦 ,为 0.02 ~ 0.06。沙尘气溶胶 AOD 的高值中心位于中国塔克拉玛干沙漠地区 ,为 0.24 ~ 0.4 ,其次是巴基斯坦、伊拉克、阿尔及利亚和土库曼斯坦 ,为 0.16 ~ 0.32。

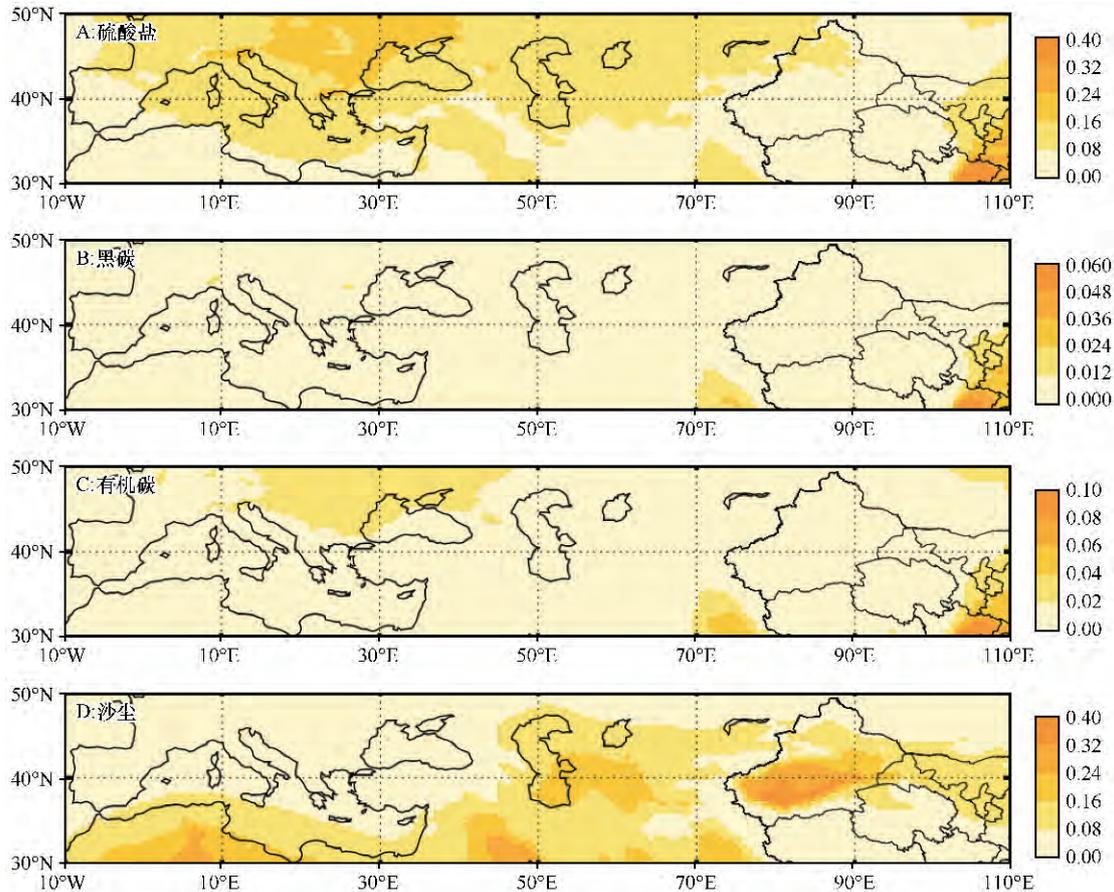


图4 丝绸之路经济带气溶胶光学厚度的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of AOD over the regions along the Silk Road Economy Belt

为了了解每个区域主导的气溶胶类型 ,图 5 给出了不同季节丝绸之路经济带沿线区域在总气溶胶 AOD 中贡献最大的气溶胶类型的空间分布 ,6 个区域贡献率的具体数值见表 1。从图 5 可以看出 ,在春季 ,里海以西、伊朗以北的地区对总气溶胶 AOD 贡献率最大的是硫酸盐气溶胶 ,而在其他地区最主要的气溶胶类型为沙尘气溶胶;在夏季、秋季、冬季 ,随着沙尘活动的减弱 ,硫酸盐气溶胶为主要气溶胶类型的区域不断向南、向东扩大 ,将范围广大的沙尘传输带“隔断” ,在空间上变为小片的沙尘主导区。综合来看 ,在丝绸之路经济带沿线区域 ,硫酸盐和沙尘是最主要的两种气溶胶类型 ,在经济发达、工业活跃的区域硫酸盐气溶胶是最主要的气溶胶类型 ,以东欧地区为例 ,硫酸盐气溶胶的贡献率最小为 45.8% ,最大为 72.9% ,平均值为

63.8%; 而在地表裸露、沙尘活跃的区域 ,沙尘气溶胶是最主要的气溶胶类型 ,以塔克拉玛干地区为例 ,沙尘气溶胶的贡献率最小为 35.4% ,最大为 80.7% ,平均值为 65%。

在沙尘气溶胶为主导的区域里 ,人类活动如农业活动、城市及工业活动会增加人为沙尘的排放。图 6 给出了丝绸之路经济带沿线区域总沙尘、自然沙尘、人为沙尘及人为沙尘占总沙尘比例的空间分布。由于人为沙尘是在一些特定的下垫面产生的 ,因此这里也只给出了城市、农田和草地 (牧场) 下垫面沙尘的空间分布。从图 6 可以看出 ,在人为地表下 ,总沙尘、自然沙尘和人为沙尘的高值中心在巴基斯坦-印度地区及伊朗高原西部 ,人为沙尘占总沙尘的比例基本超过一半 ,平均值约为 74%。

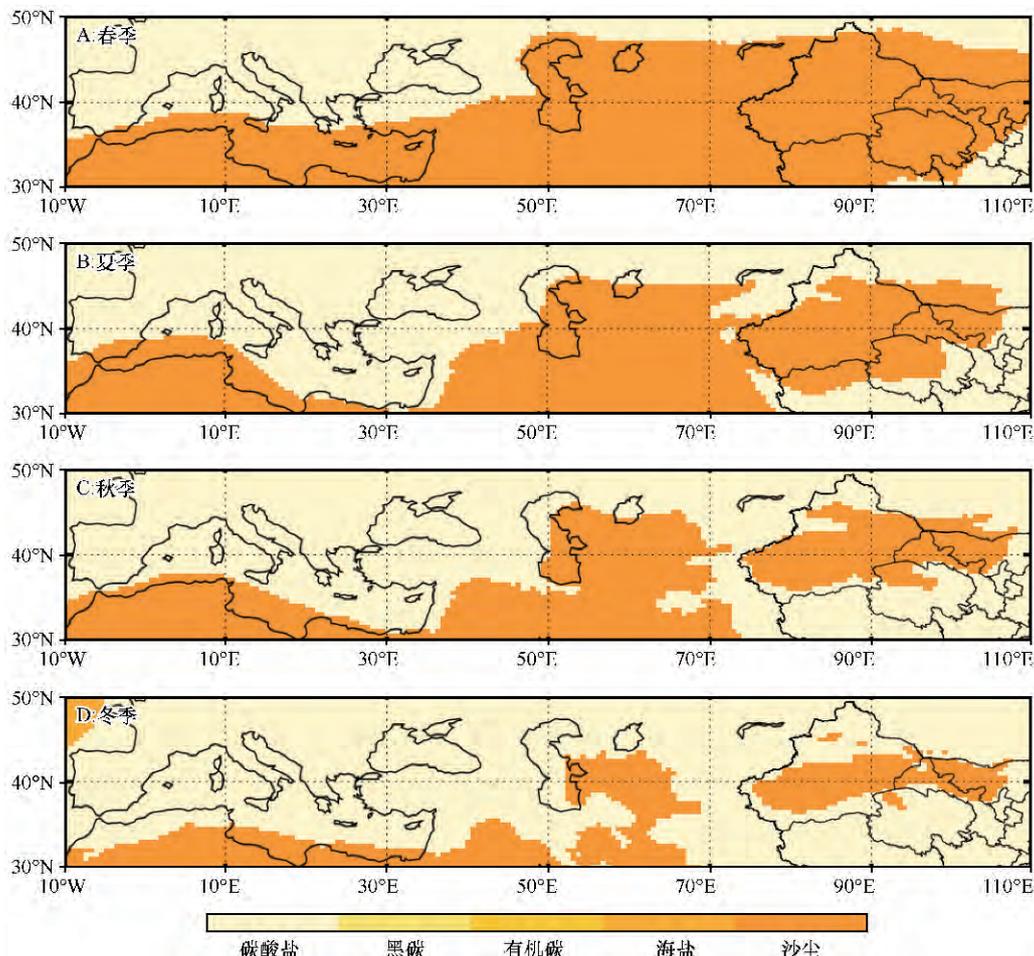


图 5 丝绸之路经济带对总气溶胶光学厚度贡献率最大的气溶胶类型的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of the dominant aerosol type over the regions along the Silk Road Economy Belt in ( A ) spring , ( B ) summer , ( C ) autumn , ( D ) winter

表 1 6 个区域不同类型气溶胶的平均贡献率 (%)

Table 1 Mean contribuion of different types of aerosol in six regions along the Silk Road Economy Belt (%)

气溶胶类型	东欧地区	北非地区	伊拉克地区	土库曼斯坦地区	巴基斯坦-印度地区	塔克拉玛干地区
硫酸盐	63.8	25.1	27.7	38.8	34.3	26.8
黑碳	3.5	1.9	2.1	2.3	4.9	2.0
有机碳	8.95	4.1	4.0	5.5	11.2	5.5
海盐	3.75	4.6	2.2	2.4	3.6	0.6
沙尘	20.05	64.3	63.9	51.0	46.0	65.0

图 7 和图 8 分别给出了自然气溶胶和人为气溶胶 AOD 在不同季节的空间分布。由图 7 可知,在人为地表下,自然气溶胶的 AOD 整体上都比较小,平均值为 0.10,且在春夏季节高于秋冬季节,高值中心为伊朗高原西部、阿富汗和巴基斯坦-印度交界处,它们与伊朗沙漠、印度沙漠相对应。由图 8 可知,在人为地表下,人为气溶胶的 AOD 都比较大,基本在 0.1 以上,平均值为 0.14,而且季节变化相对

较小,空间分布在四个季节基本相同,并且在春、夏、秋季的值基本不变,都大于冬季的。

图 9 给出了不同季节人为气溶胶占总气溶胶 AOD 百分比的空间分布,由图 9 知,人为气溶胶对总气溶胶 AOD 的贡献整体都比较大。春、夏、秋、冬季人为气溶胶的平均贡献率分别为 62.1%、65.4%、63.2%、63.3%,季节变化很小。人类活动在一年四季对丝绸之路经济带光学厚度的扰动都非常剧烈。

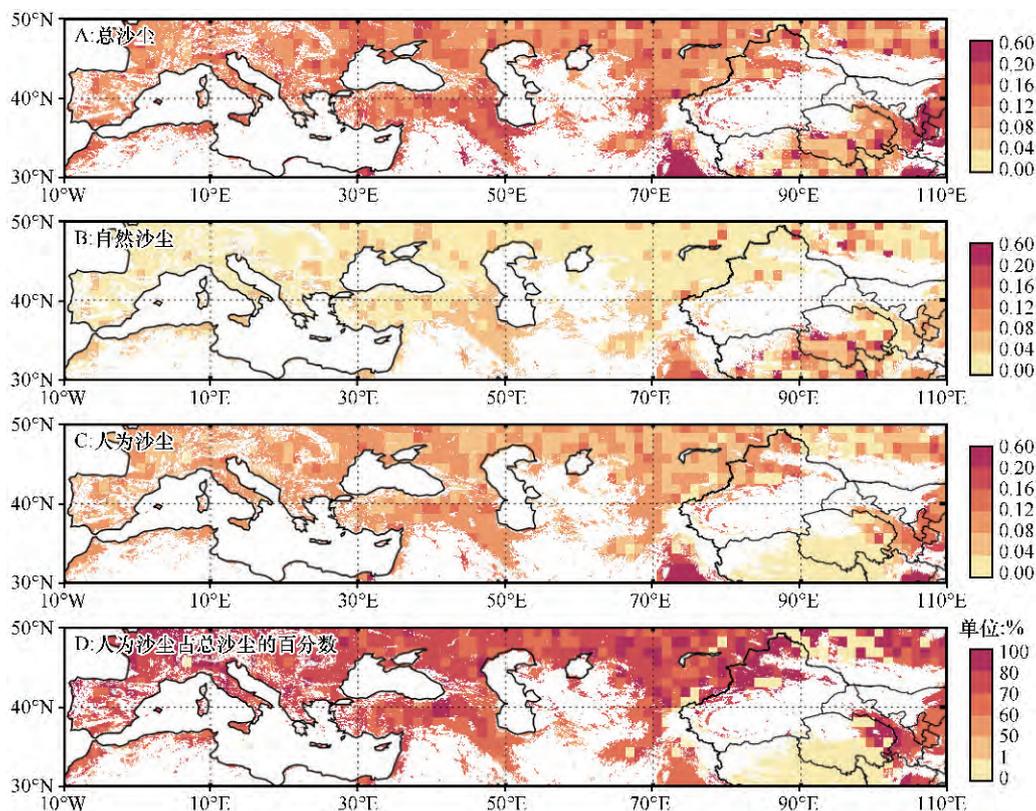


图6 丝绸之路经济带气溶胶光学厚度的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of AOD over the regions along the Silk Road Economy Belt

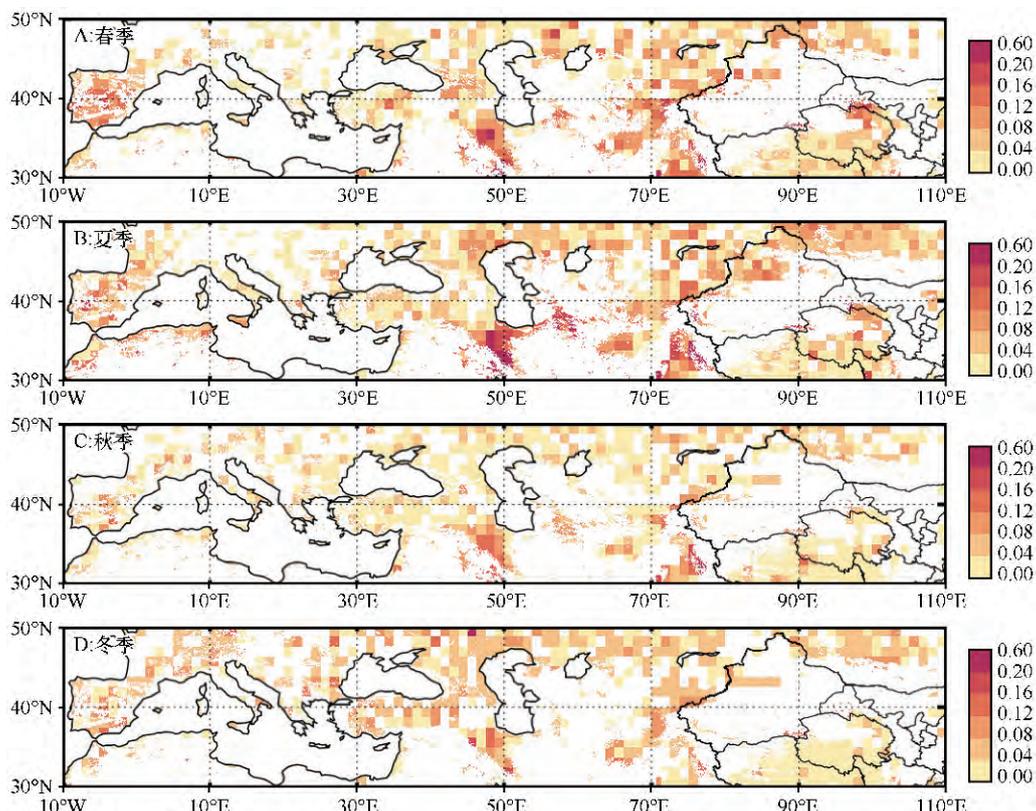


图7 丝绸之路经济带自然气溶胶光学厚度的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of AOD for natural aerosols over the region along the Silk Road Economy Belt in ( A) spring ,( B) summer ,( C) autumn ,( D) winter

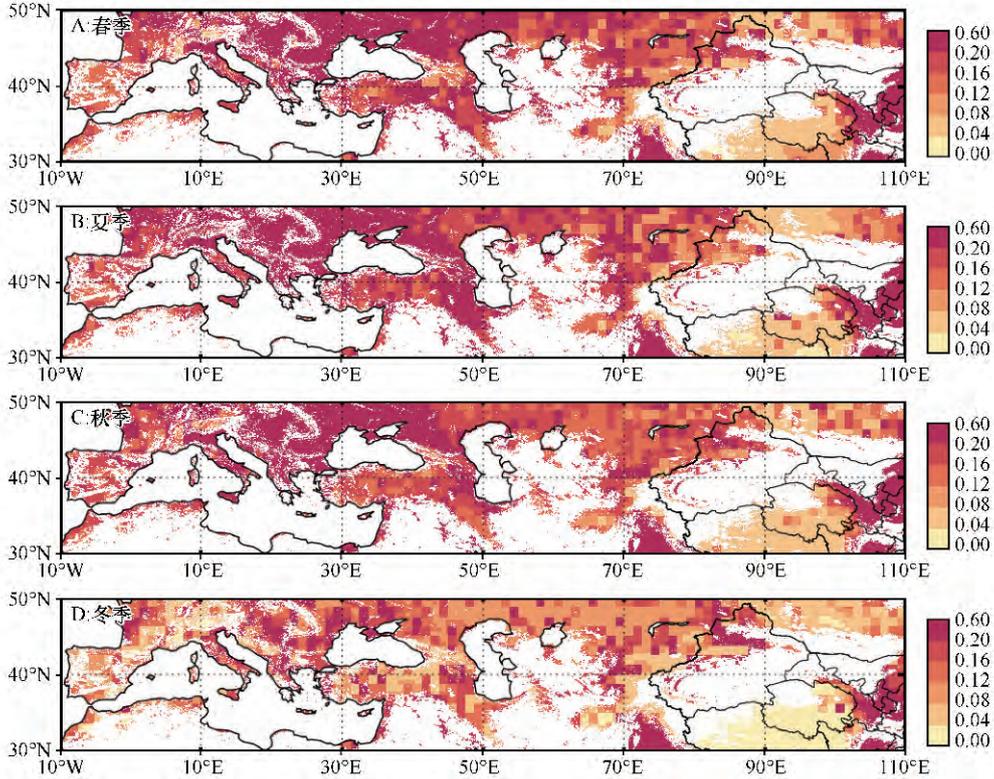


图 8 丝绸之路经济带人为气溶胶光学厚度的空间分布

Fig.8 Spatial distribution of AOD for anthropogenic aerosols over the regions along the Silk Road Economy Belt in ( A ) spring , ( B ) summer , ( C ) autumn , ( D ) winter

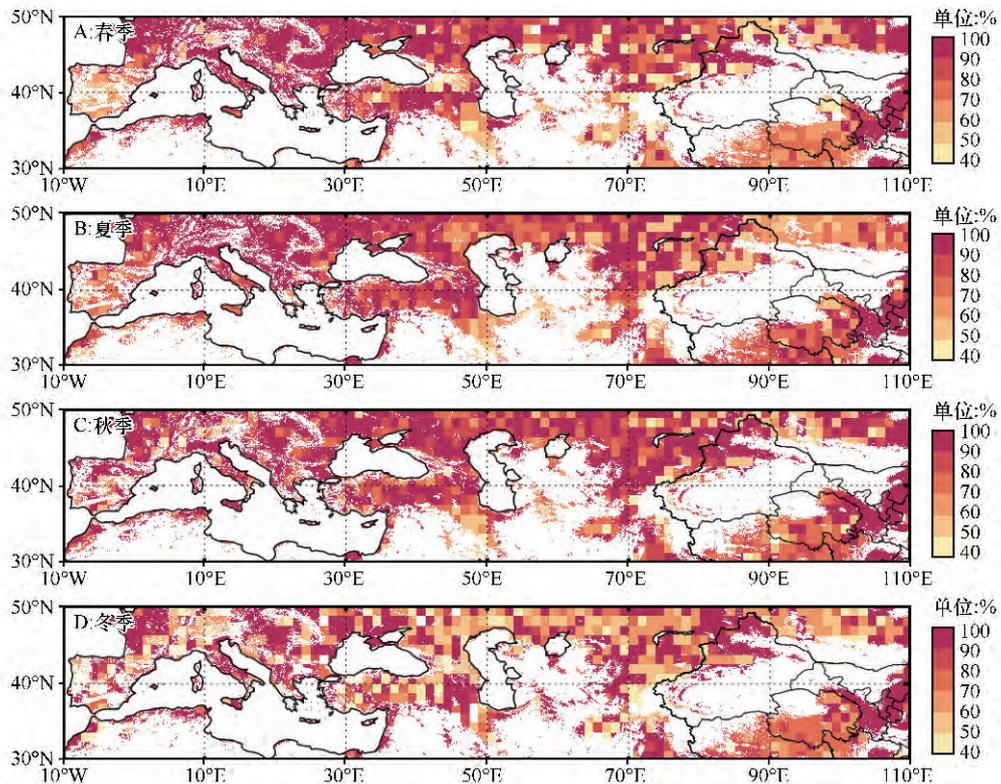


图 9 丝绸之路经济带人为气溶胶贡献的空间分布

Fig.9 Spatial distribution of the contribution of anthropogenic aerosols over the regions along the Silk Road Economy Belt in ( A ) spring , ( B ) summer , ( C ) autumn , ( D ) winter

图10给出了丝绸之路经济带6个区域人为气溶胶与自然气溶胶的AOD及其相对贡献,具体数据见表2。从图10可以看出,总气溶胶AOD在北非地区最小,为0.20,巴基斯坦-印度地区最大,为0.44;自然气溶胶AOD在东欧地区最小,为0.07,在伊拉克地区最大,为0.18;人为气溶胶AOD在北非地区最小,为0.07,在巴基斯坦-印度地区最大,为0.29;人为气溶胶所占比例在北非地区最小,为32.8%,在东欧地区最大,为73.5%。

为了了解人为气溶胶与人口密度的关系,图11给出了6个区域人为气溶胶的AOD与人口密度的分布情况。从图11可以看出,随着人口密度的增加,人为气溶胶的AOD也在增加。在塔克拉玛干、南非、

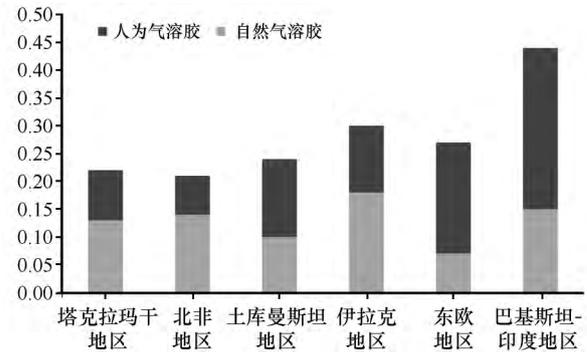


图10 丝绸之路经济带6个区域人为气溶胶光学厚度(AOD)与自然气溶胶光学厚度(AOD)及其比例  
Fig.10 AOD for anthropogenic aerosols and natural aerosols and their proportion for six regions along the Silk Road Economy Belt

表2 6个区域自然、人为气溶胶光学厚度(AOD)及其贡献

Table 2 AOD of natural aerosols, anthropogenic aerosols and the contribution of anthropogenic aerosols in six regions along the Silk Road Economy Belt

	塔克拉玛干地区	北非地区	土库曼斯坦地区	伊拉克地区	东欧地区	巴基斯坦-印度地区
自然 AOD	0.13	0.14	0.10	0.18	0.07	0.15
人为 AOD	0.09	0.07	0.14	0.12	0.20	0.29
总气溶胶 AOD	0.22	0.20	0.24	0.30	0.27	0.44
人为气溶胶的贡献/%	42.7	32.8	57.6	40.8	73.5	65.3

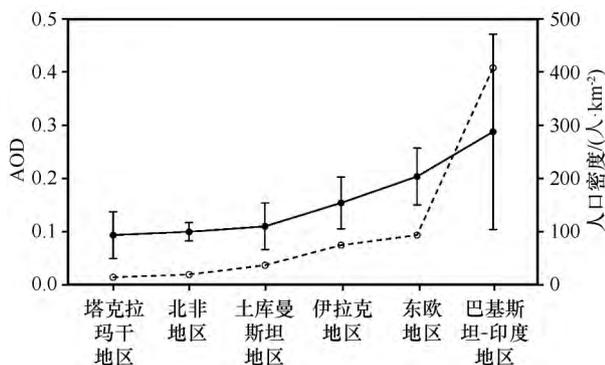


图11 丝绸之路经济带6个区域人为气溶胶光学厚度(AOD, 实线)与人口密度(虚线)的关系

Fig.11 The relationship between anthropogenic AOD (solid line) and population density (dotted line) for six regions along the Silk Road Economy Belt

土库曼斯坦、伊拉克、东欧和巴基斯坦-印度地区,人口密度分别为15、20、37、75、94、408人·km<sup>-2</sup>,人为气溶胶的AOD分别为0.09、0.10、0.11、0.15、0.20和0.29。人为沙尘与人口密度正相关的关系表明增加人口密度可能有助于人为沙尘的产生。

## 4 结论

在丝绸之路经济带沿线区域,欧洲地区人口密

度比亚洲大部分地区都大,年降水量也高,NDVI整体偏大,总气溶胶的AOD总体偏小。这表明欧洲地区自然环境优越,更加适宜人类居住,人口密度也高。但是在亚洲的大部分地区,自然环境较差,人类的宜居性也较差。

在丝绸之路经济带沿线6个区域不同类型气溶胶AOD的时间演变特征为:总气溶胶的光学厚度在0.2~0.4的范围内变化,欧洲东部地区总气溶胶的AOD在逐年下降,巴基斯坦-印度地区总气溶胶的AOD在逐年上升,线性趋势分别为每年0.0043和0.0049。

在丝绸之路经济带沿线区域,硫酸盐和沙尘是最主要的两种气溶胶类型,在经济发达、工业活跃的区域,硫酸盐气溶胶是最主要的气溶胶类型,以东欧地区为例,硫酸盐气溶胶贡献率的平均值为63.8%;而在地表裸露、沙尘活跃的区域,沙尘气溶胶是最主要的气溶胶类型,以塔克拉玛干地区为例,沙尘气溶胶贡献率的平均值为65.0%。

在丝绸之路经济带沿线区域,自然气溶胶AOD的平均值为0.10,且春夏季高于秋冬季,人为气溶胶AOD的平均值为0.14,且春、夏、秋季的值基本不变,都大于冬季的。从整体上来看,人为气溶胶占总

气溶胶 AOD 比例的平均值为 62%~65%。在丝绸之路经济带沿线的 6 个区域中,北非地区人为气溶胶所占比例最小,为 32.8%;在东欧地区最大,为 73.5%。随着人口密度的增加,人为气溶胶的 AOD 也在增加。

致谢:感谢兰州大学大气科学学院闭建荣老师及郭瑞霞、康丽泰、张艳婷和魏韵同学的帮助,感谢天津师范大学张芝芳同学的帮助,感谢美国航空航天局 Earthdata 提供的气溶胶光学厚度数据和 CALIPSO 数据。

#### 参考文献:

- [1] Li Z, Li C, Chen H, et al. East Asian studies of tropospheric aerosols and their impact on regional climate (EAST-AIRC): an overview [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2011, 116(4): 220-237.
- [2] 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-Atmospheres*, 2015, 119(19): 11398-11416.
- [3] Yan H, Li Z, Huang J, et al. Long-term aerosol-mediated changes in cloud radiative forcing of deep clouds at the top and bottom of the atmosphere over the Southern Great Plains [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2014, 14(14): 4599-4625.
- [4] Chen S, Huang J, Qian Y, et al. Effects of aerosols on autumn precipitation over mid-eastern China [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2014, 20(3): 242-250.
- [5] Prospero J M, Ginoux P, Torres O, et al. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product [J]. *Reviews of Geophysics*, 2002, 40(1): 1-31.
- [6] Tegen I, Werner M, Harrison S, et al. Relative importance of climate and land use in determining present and future global soil dust emission [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: L05105.
- [7] Huang J, Guan X, Ji F, et al. Enhanced cold-season warming in semi-arid regions [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2012, 12: 5391-5398.
- [8] Moulin C, Chiapello I. Evidence of the control of summer atmospheric transport of African dust over the Atlantic by Sahel sources from TOMS satellites (197-2000) [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: L018931.
- [9] Mahowald N M, Luo C. A less dusty future? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30: L017880.
- [10] Huang J, Liu J, Chen B, et al. Detection of anthropogenic dust using CALIPSO lidar measurements [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2015, 15: 10163-10198.
- [11] Guan X, Huang J, Zhang Y, et al. The relationship between anthropogenic dust and population over global semi-arid regions [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2016, 16(8): 5159-5169.
- [12] Bi J, Huang J, Holben B, et al. Comparison of key absorption and optical properties between pure and transported anthropogenic dust over East and Central Asia [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2016, 16: 1-37.
- [13] Bi J, Huang J, Shi J, et al. Measurement of scattering and absorption properties of dust aerosol in a Gobi farmland region of northwestern China—a potential anthropogenic influence [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2017, 17: 1-41.
- [14] 彭艳梅, 王舒, 肖高翔, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地塔中地区大气气溶胶散射系数影响因子 [J]. *中国沙漠*, 2018, 38(2): 384-392.
- [15] 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.
- [16] Chen S, Huang J, Jingxin L, et al. Comparison of dust emissions, transport and deposition between the Taklimakan Desert and Gobi Desert from 2007 to 2011 [J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(7): 1-18.
- [17] Chen S, Huang J, Kang L, et al. Emission, transport and radiative effects of mineral dust from the Taklimakan and Gobi deserts: comparison of measurements and model results [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2017, 17: 1-43.
- [18] New M, Hulme M, Jones P. Representing twentieth-century space-time climate variability. part I: development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology [J]. *Journal of Climate*, 1999, 12(12): 829-856.
- [19] Mitchell T D, Jones P D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids [J]. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(6): 693-712.
- [20] Gelaro R, McCarty W, Suárez M J, et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2) [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(14): 5419-5454.
- [21] Liu J, Huang J, Chen B, et al. Comparisons of PBL heights derived from CALIPSO and ECMWF reanalysis data over China [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2015, 153: 102-112.

## Anthropogenic Proportion of Aerosols over the Silk Road Economy Belt

Zhang Zhijuan<sup>1ab</sup>, Chen Bin<sup>1ab</sup>, Yi Yuhong<sup>1c</sup>, Liu Jingjing<sup>2</sup>, Jia Rui<sup>1ab</sup>, Huang Jianping<sup>1ab</sup>

(1. a. College of Atmospheric Sciences/b. Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education/c. College of Earth Environment Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. School of Mechanical and Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** The spatial and temporal distributions of sulfate, black carbon, organic carbon, and dust aerosols over the regions along the Silk Road Economic Belt (30°–50°N, 10°–110°E) from 1980 to 2017 were investigated by using MERARA-2 reanalysis dataset. Mineral dust was further divided into natural dust and anthropogenic dust. And we could study their seasonal variations and spatial distributions. Meanwhile, the contribution of anthropogenic aerosols to the total aerosol was described quantitatively. The results showed that sulfate was the dominant aerosol type over the highly-developed Eastern Europe region along the Silk Road Economic Belt, accounting for about 64% of the total aerosol optical depth (AOD), with a decreased rate of 0.0035 per year for total AOD. Mineral dust is the dominant aerosol type in five undeveloped regions where were covered with barren soil and accompanied by active dust activities, accounting for 46%–65% of the total AOD. Total AOD increased at a rate of 0.0059 per year over Pakistan-India region and the mean contribution of anthropogenic aerosol ranged between 62% and 65% in four seasons. Among six regions, the contribution of anthropogenic aerosol was the smallest in North Africa with a minimum of 32.8%, and the largest in Eastern Europe with a maximum of 73.5%. The optical depth of anthropogenic aerosols increased with the increase of population density. In summary, our results indicated that anthropogenic aerosols were predominated over the region along the Silk Road Economic Belt throughout the year and were positively related to population density.

**Key words:** Silk Road Economy Belt; anthropogenic aerosol; natural aerosol; contribution