DOI:10.13878/j.cnki.jnuist.2020.05.015

张小林[1,2]　姜欢[2]　汪赋坤[2]　何清[1]

塔里木盆地沙尘气溶胶的柱质量密度特性

摘要

气溶胶质量密度是气溶胶重要的参数,它影响着大气中复杂的化学反应,也与气溶胶的传输过程和空间分布息息相关.基于MERRA-2再分析资料提供的气溶胶柱质量密度数据,研究了我国塔里木盆地1980—2018年长时间序列的沙尘气溶胶柱质量密度的时空分布特征.结果表明,沙尘气溶胶和沙尘$PM_{2.5}$气溶胶柱质量密度有很大的变化范围,平均值分别为0.33和0.086 g/m^2,同时具有明显的年际、月和季节变化特征.沙尘气溶胶和沙尘$PM_{2.5}$气溶胶柱质量密度的年平均值在0.24~0.41和0.06~0.11 g/m^{2}范围内变化;春季最大,其平均值分别为0.47和0.12 g/m^2,冬季最小,其平均值分别为0.13和0.04 g/m^2;月平均值最大出现在5月,分别为0.57和0.14 g/m^2,最小在1月,分别为0.1和0.03 g/m^2.

关键词

沙尘气溶胶;柱质量密度;塔里木盆地;时空分布

中图分类号 X513

文献标志码 A

收稿日期 2020-05-14

资助项目 中国沙漠气象科学研究基金(SQJ2019012)

作者简介

张小林,男,博士,校聘教授,研究方向为大气环境、卫星遥感.xlnzhang@ nuist.edu.cn

1 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,乌鲁木齐,830002

2 南京信息工程大学 大气物理学院,南京,210044

0 引言

大气气溶胶作为悬浮在大气中各类固体和液体微粒的多相粒子体系,对地球气候、大气环境、人类健康和工程应用有着深远影响和重要意义[1].气溶胶粒子可以由自然过程产生,也可以由人类活动形成,而亚微米尺度的气溶胶是其主要部分[2].这些亚微米尺度粒子生命周期相对较长,有的能达几周.因为其尺度相对较小,不易被雨雪冲刷清除,又不是太小,不易被凝结碰并清除,亚微米尺度气溶胶特性一直是该领域的研究热点之一[3].沙尘作为一种吸收性气溶胶,由于地表风化作用,在干旱或半干旱地区含量较多,而塔里木盆地的塔克拉玛干沙漠则是沙尘气溶胶的重要来源[4].

气溶胶质量密度是描述气溶胶特性的重要物理参数之一,可以为大气中气溶胶的形成与变化过程提供信息.由于气溶胶粒子化学成分和形状的差异,通常采用有效质量密度[5]来描述.目前气溶胶质量密度测量主要有三种方式:通过气溶胶各化学组分的质量浓度和质量分数求得气溶胶的质量密度;根据气溶胶电迁移率粒径和质量求得有效密度;通过气溶胶空气动力学粒径和电迁移率粒径的关系计算有效密度[6].

有关气溶胶质量密度的测量已经开展了很多工作.Hu等[7]利用双差分迁移率粒径分析仪TDMPS-APS系统与微孔均匀沉降撞击器组合测量了$PM_{1.8}$、$PM_{1.8\sim10}$和PM_{10}的平均有效密度.de Carlo等[8]利用气溶胶电迁移率粒径和空气动力学粒径的测量来描述气溶胶质量密度.Schmid等[9]从气溶胶电迁移和空气动力学等效粒径反演出非球形粒子的有效质量密度.对于整层大气的气溶胶柱质量密度,周宝柱等基于温度梯度法计算出的大气温度信息,提出一种新的反演中高层大气密度的方法[10].虽然对气溶胶质量密度的研究已经开展了大量工作,但是有关气溶胶质量密度的时空分布特征的研究仍相对较少.

本文基于MERRA-2再分析资料提供的气溶胶柱质量密度数据,研究我国塔里木盆地1980—2018年长时间序列的沙尘气溶胶的柱质量密度的时空分布特征,以期为当地空气污染质量和空气质量预测提供参考.

1 数据与方法

塔里木盆地是中国内陆面积最大的盆地,位于中国新疆南部.南

北最宽处 520 km,东西最长处 1 400 km,面积约 40 多万 km^2.海拔高度 800~1 300 m,地势西高东低,有着十分丰富的油气资源和地下水资源.盆地北部为天山山脉,南部为昆仑山山脉和阿尔金山脉,盆地空间较为封闭,盆地内以东北风和西北风为主,水分主要由西风气流所供应,盆地内降水量稀少,盆地内除与山脉相接处外,大部分地区已沙漠化,形成了中国最大的塔克拉玛干大沙漠.本文研究区域为塔里木盆地地区 37°~42°N、75°~90°E 之间,如图 1 中黑框所示.图 1 为气溶胶吸收光学厚度的分布,可以看出:塔里木盆地气溶胶吸收光学厚度较强,这主要是由于该地区沙尘的吸收特性所导致.

本文所研究的气溶胶柱质量密度数据来源于 MERRA-2 再分析数据.它是由 NASA 所研制的新一代大气再分析资料,与 MERRA 相比,这一代在同化系统和能力方面都有了显著的提升,所使用的是 GEOS 5.12.4 版本,以 GEOS 大气模式和 GSI 变分方案为主体,用于在 MERRA 大气再分析数据和集合地球再分析系统 IESA 的中间进行过渡,包含了从 1980 年至今的大气数据,对于全球气候变化的观测研究都具有重要的意义[11].

2 结果与讨论

2.1 概况

图 2 为塔里木盆地 1980—2018 年日平均沙尘气溶胶和沙尘 $PM_{2.5}$ 气溶胶柱质量密度的变化情况.由图 2 可知,塔里木盆地日平均沙尘气溶胶和沙尘 $PM_{2.5}$ 气溶胶柱质量密度有很大的变化范围,其值分别在 0.05~0.8 和 0.02~0.2 g/m^2 范围内.这主要与当地的天气状况有关,特别是沙尘暴爆发的强度和频率有关.日平均沙尘气溶胶的柱质量密度是沙尘 $PM_{2.5}$ 气溶胶的柱质量密度的约 3 倍左右,表明沙尘

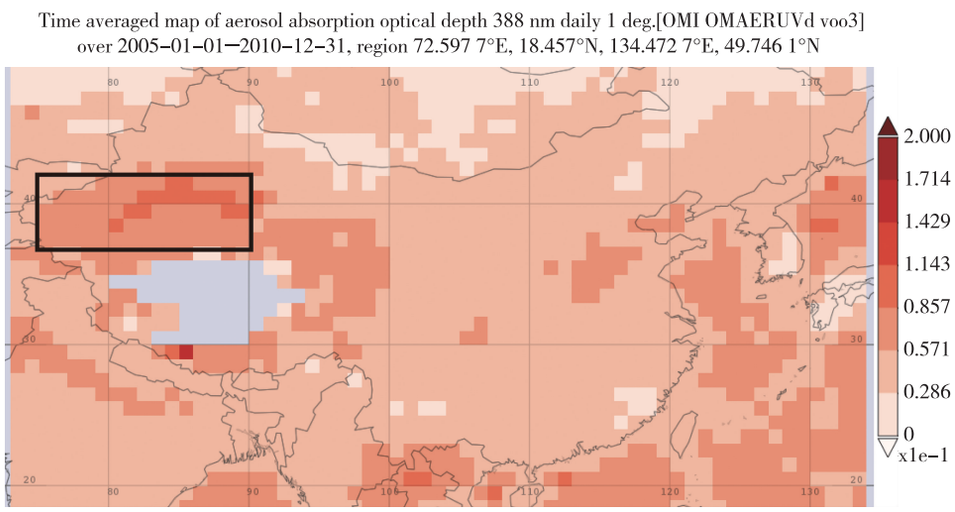


图 1 2005 年 1 月 1 日至 2010 年 12 月 31 日东亚大陆日平均气溶胶吸收光学厚度分布

Fig. 1 Aerosol absorption optical depth over eastern Asia from January 1,2005 to December 31,2010

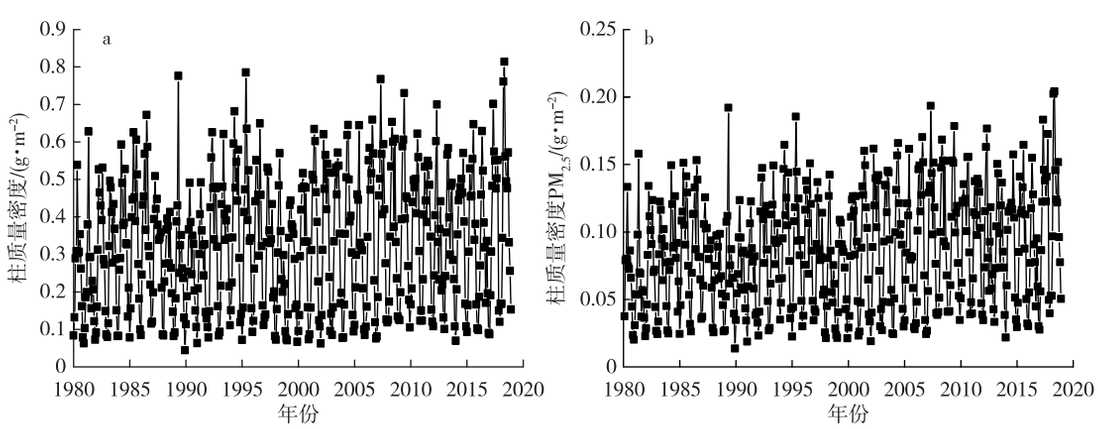


图 2 塔里木盆地地区 1998—2018 年沙尘气溶胶(a)和沙尘 $PM_{2.5}$ 气溶胶(b)日平均柱质量密度日变化

Fig. 2 Daily average of column mass densities of dust aerosol (a) and dust $PM_{2.5}$ aerosol (b) over the Tarim basin from 1998 to 2018

气溶胶主要是较大气溶胶粒子.

图 3 展示了 1980—2018 年日平均沙尘气溶胶和沙尘 $PM_{2.5}$ 气溶胶柱质量密度的频率分布柱状图.由图 3a 可知,在这 38 年中,塔里木盆地地区沙尘气溶胶柱质量密度的平均值为 0.33 g/m^2,标准差为 0.18 g/m^2,最大值为 0.81 g/m^2,最小值为 0.044 g/m^2,并且沙尘气溶胶柱质量密度值在 0.05 g/m^2 到 0.5 g/m^2 之间出现的天数最多,均为 40 次以上,0.2~0.3 与 0.4~0.45 g/m^2 之间的数据出现次数相对较低,达到了 30 次左右.由图 3b 可知沙尘 $PM_{2.5}$ 气溶胶柱质量密度的平均值为 0.086 g/m^2,标准偏差为 0.042 g/m^2,最大值为 0.2 g/m^2,最小值为 0.014 g/m^2,其质量密度值范围大多在 0.02~0.16 g/m^2 之间.

2.2 年际变化

图 4 为 1980 年至 2018 年沙尘气溶胶和沙尘 $PM_{2.5}$ 气溶胶柱质量密度的年际变化.可以看出,沙尘气溶胶和沙尘 $PM_{2.5}$ 气溶胶柱质量密度的年平均值在 0.24~0.41 和 0.06~0.11 g/m^2 范围内变化.总体上以 7~8 年为一个周期呈波动性变化,自 1980 年开始上升,1985 年达到极大值,随后开始下降,至 1987 年达到低值,1989—1996 年的变化趋势与 1980—1988 年相同.对于这一情况已经有不少学者开展过研究,对于沙尘天气的出现频率包括但不限于 8 年的周期,长的可达 40 年,短的周期为 4 年[12],而对于周期形成的原因探知较少,有人通过研究得出以 7 年为周期的沙尘天气对于最大风速的变化响应较好[13],不过真实原因犹未可知,还需进一步地调查研究.值得注意的是,自 2000 年开始,沙尘气溶胶柱和沙尘 $PM_{2.5}$ 气溶胶柱的质量密度年平均变化不再遵循周期变化的特征,而是整体在一个较高的水平线上波动,并有缓慢上升的趋势,这种情况的出现与人类的活动密不可分.随着经济不断发展,人口数量急剧上升,人类的物质需求也在不断提高,不合理的

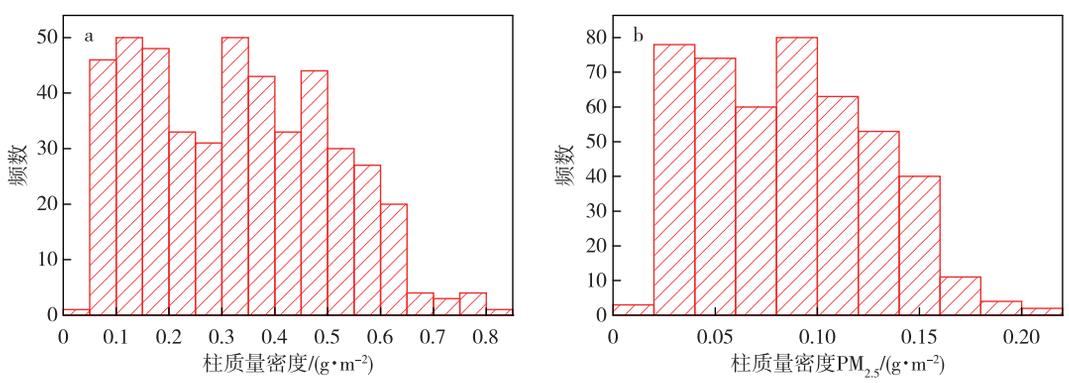


图 3 1980—2018 年每日塔里木盆地沙尘气溶胶(a)和沙尘 $PM_{2.5}$ 气溶胶(b)柱质量密度频数柱状图

Fig. 3 Frequency distribution of column mass densities of dust aerosol (a) and dust $PM_{2.5}$ aerosol (b) over the Tarim basin from 1998 to 2018

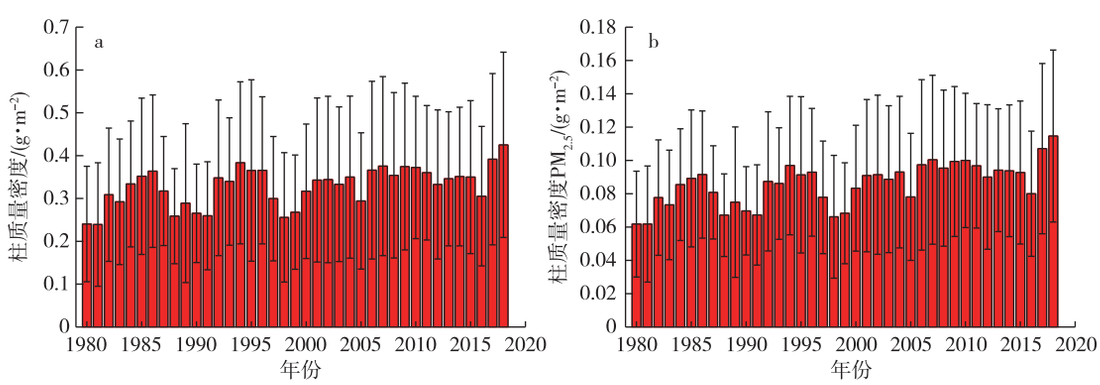


图 4 1980—2018 年塔里木盆地沙尘气溶胶(a)和沙尘 $PM_{2.5}$ 气溶胶(b)柱质量密度年际变化

Fig. 4 Annual variation of column mass densities of dust aerosol (a) and dust $PM_{2.5}$ aerosol (b) over the Tarim basin from 1998 to 2018

物质活动导致了生态环境遭到破坏,北方地区的沙漠化进程不断增加.不仅如此,全球气候变暖,北方大部分地区的气温相比同期增高 1~2 ℃,高温加剧了土壤内水分的蒸发,使得土壤内含水量低下,土质干燥疏松,不利于植被的生长,也为沙尘天气的产生提供了丰富的尘源,同时自 2000 年开始,春季的冷空气和气旋出现的异常频繁,二者的出现产生强大的风力,结合北部地区地面丰富的尘源,可以将沙尘卷起,极易产生沙尘天气[14].

2.3 月变化

图 5 展示了 1980—2018 年的沙尘气溶胶柱和沙尘 $PM_{2.5}$ 气溶胶柱质量密度的月平均变化.如图 5 所示,沙尘气溶胶柱与沙尘 $PM_{2.5}$ 气溶胶柱质量密度的每月均值变化趋势相同,均在 1—5 月逐渐递增,5—7 月减少,7—8 月小幅度增加,8—12 月逐渐减少,月平均极大值出现在 5 月和 8 月,月平均极小值出现在 1 月和 7 月,最小值在 1 月(0.1±0.026 和 0.03±0.008 g/m^2),最大值在 5 月(0.57±0.11 和 0.14±0.027 g/m^2),低值区在 11 月—次年 2 月,还能看出在一年中,沙尘气溶胶柱质量密度的变化幅度比较大,特别是在秋季和冬季.并且注意到从 1 月到 4 月初,气溶胶柱质量密度变化程度相对较大,主要是由于副热带西风急流的位置变化导致了这种季节上的变化特征[15],12 月—次年 2 月,西风急流大致在喜马拉雅山脉南边,此时为青藏高原地区的沙尘暴高发时期,随着时间流逝,季节变化,急流也逐渐向北移动,4 月移至藏北羌塘高原南部,冈底斯山和昆仑山中间,5 月急流继续向北移动到昆仑山和羌塘高原北部,此时原本绕高原干冷的南支气流被孟加拉湾的暖湿西南气流代替,大部分地区开始进入雨季,除柴达木盆地外,沙尘暴天气近乎消失.而沙尘暴发生的区域中心仍在塔里木盆地南部,北部边界则还是维持在古尔班通古特沙漠一线,这也解释了 5 月塔里木盆地沙尘气溶胶质量密度最高的原因.6—8 月急流北移到天山北部—巴尔喀什湖一带,高原周围有强劲的北支气流,但这股北支气流处于暖气团的控制下,而且高原地区基本处于雨季降水最大的月份,降水增加了土壤湿度,尘源减少,抑制了沙尘暴发生,这时盆地内部的沙尘暴天气渐渐减弱.此后至 12 月,西风急流逐渐向南移动,秋冬天气转冷,并且雨季刚过,地面有着较为稳定的空气层结,沙尘暴发生天气显著减少,使得 8 月开始平均质量密度逐渐降低.图 5 中可以看到在 7 月时沙尘气溶胶柱与沙尘 $PM_{2.5}$ 气溶胶柱的质量密度水平达到一个极小值,随后在 8—9 月有所回升,之后又开始下降,可以推测这也是由于雨季的原因.北方 7 月正值雨季中心,沙尘天气的出现也相应会在这个时间点达到低估,不过塔里木盆地蒸发量大,在 8—9 月雨季末期仍会有些许反弹,随后随温度降低回归减少的趋势.

2.4 季节变化

图 6 为 1980—2018 年的沙尘气溶胶柱和沙尘 $PM_{2.5}$ 气溶胶柱质量密度的季节变化情况.可以看出季节性变化特征较为显著,沙尘气溶胶和沙尘 $PM_{2.5}$ 气溶胶的质量密度最大值都出现在春季(0.47±0.13 和 0.12±0.03 g/m^2),随后随季节的更替逐次递减,夏季仅次于春季,高于秋季,在冬季达到最低值(0.13±0.05 和 0.04±0.014 g/m^2),这是因为春季为塔里木盆地的沙尘多发季,主要由于春季沙源丰富,大气层结不稳定,并且暖季时地面对大气有强烈感

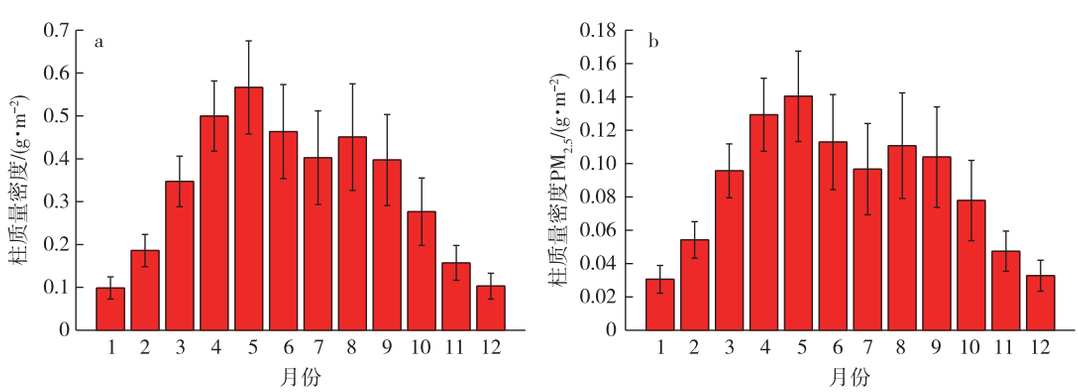


图 5 1980—2018 年塔里木盆地沙尘气溶胶(a)和沙尘 $PM_{2.5}$ 气溶胶(b)柱质量密度的月变化

Fig. 5 Monthly variation of column mass densities of dust aerosol (a) and dust $PM_{2.5}$ aerosol (b) over the Tarim basin from 1998 to 2018

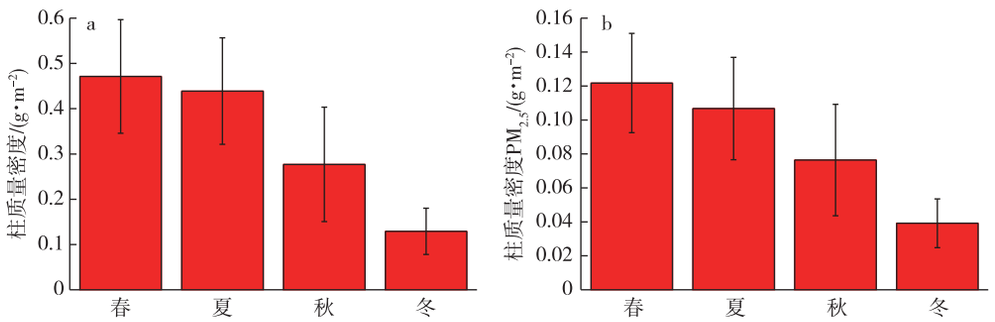


图 6　1980—2018 年塔里木盆地沙尘气溶胶(a)和沙尘 $PM_{2.5}$ 气溶胶(b)柱平均质量密度季节变化

Fig. 6　Seasonal variation of column mass densities of dust aerosol (a) and dust $PM_{2.5}$ aerosol (b) over the Tarim basin from 1998 to 2018

热加热作用,形成热低压,再配合强劲的风速,极易起沙[16].对于塔里木盆地地区季节内平均风速和风向变化的研究中可以发现,沙尘的质量密度与风速的变化呈正相关,塔里木盆地内风速主要特征为春季最高,夏季次之,秋季比冬季高,风速的变化直接影响到沙尘天气的变化,风向决定了沙尘的输送路径,多处地区在春季时的风向有利于沙尘暴的发生.例如和田地区[17]作为塔里木盆地内沙尘天气的高发区之一,其主要风向为西风或西南风,此方向对应昆仑山北坡,冰川研磨和侵蚀风化等作用下形成的大量物质被山顶冰川融化的水冲积出高山并在下方不断堆积,有着大量粉尘,即使风速较低,也极易引起沙尘天气,从而导致大量的沙尘气溶胶被输送至大气中,使得气溶胶柱质量密度上升,也解释了盆地内春季质量密度较高的原因.不过值得注意的是,降水量的大小整体对于塔里木盆地内部发生沙尘暴的时间影响不大,这是由于盆地内部极度干燥,并且每日蒸发量很高,降水无法对地表植被与土壤产生显著影响,因此也无法很好地抑制沙尘的产生.

3　结论

本文基于 MERRA-2 再分析资料提供的气溶胶柱质量密度数据,研究了我国塔里木盆地 1980—2018 年长时间序列的沙尘气溶胶柱质量密度的时空分布特征.结果表明,沙尘气溶胶和沙尘 $PM_{2.5}$ 气溶胶柱质量密度有很大的变化范围,平均值分别为 0.33 和 0.086 g/m^2,同时具有明显的年际、月和季节变化特征.沙尘气溶胶和沙尘 $PM_{2.5}$ 气溶胶柱质量密度的年平均值在 0.24~0.41 和 0.06~0.11 g/m^2 范围内变化.沙尘气溶胶和沙尘 $PM_{2.5}$ 气溶胶柱质量密度在春季最大,其平均值分别为 0.47±0.13 和 0.12±0.03 g/m^2,而在冬季最小,其平均值分别为 0.13±0.05 和 0.04±0.014 g/m^2.月平均值最大出现在 5 月,分别为 0.57±0.11 和 0.14±0.027 g/m^2,最小在 1 月,分别为 0.1±0.026 和 0.03±0.008 g/m^2.对可能造成此现象的多方面因素进行分析考虑,发现沙尘气溶胶柱质量密度水平与沙尘天气出现频率相关,本文的结果以期为当地空气污染防治和空气质量预测提供参考.

参考文献

References

[1] Kaufman Y J, Koren I, Remer L A, et al. The effect of smoke, dust, and pollution aerosol on shallow cloud development over the Atlantic Ocean[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005, 102(32): 11207-11212

[2] Krieger U K, Braun C. Light-scattering intensity fluctuations in single aerosol particles during deliquescence[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2001, 70(4/5/6): 545-554

[3] Brewer R, Belzer W. Assessment of metal concentrations in atmospheric particles from Burnaby Lake, British Columbia, Canada[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(30): 5223-5233

[4] 张小林.沙尘气溶胶粒子模型的线退偏比特性[J].光学学报,2016,36(8):280-285
ZHANG Xiaolin. Linear depolarization ratios characteristics of dust aerosol particles model[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 280-285

[5] Morawska L, Johnson G, Ristovski Z D, et al. Relation between particle mass and number for submicrometer airborne particles[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(13): 1983-1990

[6] 樊茹霞,孙俊英,张璐,等.大气气溶胶密度观测研究进展[J].冰川冻土,2018,40(5):925-933
FAN Ruxia, SUN Junying, ZHANG Lu, et al. Progress in observation studies of atmospheric aerosol density[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(5): 925-933

[7] Hu M, Peng J F, Sun K, et al. Estimation of size-resolved

ambient particle density based on the measurement of aerosol number, mass, and chemical size distributions in the winter in Beijing[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(18): 9941-9947

[8] de Carlo P F, Slowik J G, Worsnop D R, et al. Particle morphology and density characterization by combined mobility and aerodynamic diameter measurements. Part 1: theory[J]. Aerosol Science and Technology, 2004, 38(12): 1185-1205

[9] Schmid O, Karg E, Hagen D E, et al. On the effective density of non-spherical particles as derived from combined measurements of aerodynamic and mobility equivalent size[J]. Journal of Aerosol Science, 2007, 38(4): 431-443

[10] 周宝柱,陈金松,李清亮,等.一种反演中高层大气密度的新方法[J].电波科学学报,2017,32(6):687-693
ZHOU Baozhu, CHEN Jinsong, LI Qingliang, et al. A new method of measuring neutral atmospheric density in the upper mesosphere[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2017, 32(6): 687-693

[11] 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(13): 5419-5454

[12] 牛若芸,蔡芗宁,邹旭恺,等.2005年我国沙尘天气的若干特征分析[J].气候与环境研究,2007,12(3):358-364
NIU Ruoyun, CAI Xiangning, ZOU Xukai, et al. The characteristics of sand and dust weather events in China in 2005[J]. Climatic and Environmental Research, 2007, 12(3): 358-364

[13] 韩永翔,宋连春,奚晓霞,等.中国沙尘暴月际时空特征及沙尘的远程传输[J].中国环境科学,2005,25(增刊1):13-16
HAN Yongxiang, SONG Lianchun, XI Xiaoxia, et al. Monthly temporal-spatial character of sandstorms and long-distance dust transport in China[J]. China Environmental Science, 2005, 25(sup1): 13-16

[14] He L J, Lin A W, Chen X X, et al. Assessment of MERRA-2 surface PM2.5 over the Yangtze River Basin: ground-based verification, spatiotemporal distribution and meteorological dependence[J]. Remote Sensing, 2019, 11(4): 460

[15] 万的军,穆桂金,雷加强,等.塔里木盆地南缘近54年沙尘天气的变化特征及其未来趋势预测[J].干旱区资源与环境,2009,23(9):78-84
WAN Dejun, MU Guijin, LEI Jiaqiang, et al. The changing characteristic of sand-dust weather in recent 54 years and future trend forecast in the southern margin of Tarim Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(9): 78-84

[16] 王春学,秦宁生.中国北方春季沙尘暴周期变化特征及其对最大风速的响应[J].水土保持研究,2018,25(3):133-141
WANG Chunxue, QIN Ningsheng. Periodic variation characteristics of spring sandstorm in Northern China and the response to maximum wind speed[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(3): 133-141

[17] 李晋昌,董治宝,王训明,等.塔里木盆地沙尘天气的季节变化及成因分析[J].中国沙漠,2008,28(1):142-148
LI Jinchang, DONG Zhibao, WANG Xunming, et al. Seasonal distribution and causes of dust events in Tarim basin, China[J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(1): 142-148

Column mass density of dust aerosols over the Tarim Basin

ZHANG Xiaolin[1,2] JIANG Huan[2] WANG Fukun[2] HE Qing[1]

1 Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002

2 School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract As an important parameter of aerosols, mass density affects the complex chemical reactions in the atmosphere, and is closely related to the transport process and spatial distribution of aerosols. In this paper, column mass densities of dust aerosols and dust $PM_{2.5}$ aerosols in the Tarim Basin are studied over period of 1980-2018 based on the MERRA-2 data. Generally, the column mass densities of dust aerosols and dust $PM_{2.5}$ aerosols over the Tarim Basin show large variations with average values of 0.33 g/m^2 and 0.086 g/m^2, respectively, as well as distinctive annual, monthly and seasonal patterns. The annual average column mass densities of dust aerosols and dust $PM_{2.5}$ aerosols in the Tarim Basin vary in ranges of 0.24-0.41 g/m^2 and 0.06-0.11 g/m^2, respectively. As for their seasonal and monthly variations, the column mass densities are large in spring (0.47 g/m^2 and 0.12 g/m^2) and small in winter (0.13 g/m^2 and 0.04 g/m^2), which peak in May with values of 0.57 g/m^2 and 0.14 g/m^2, and lowest in January with values of 0.1 g/m^2 and 0.03 g/m^2, for dust aerosols and dust $PM_{2.5}$ aerosols, respectively.

Key words dust aerosol; column mass density; Tarim basin; spatial-temporal distribution