

元天刚,陈思宇,康丽泰,等. 1961—2010年中国北方沙尘源区沙尘强度时空分布特征及变化趋势[J]. 干旱气象, 2016, 34(6): 927–935, [YUAN Tiangang, CHEN Siyu, KANG Litai, et al. Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Change Trends of Dust Intensity in Dust Source Regions of Northern China During 1961–2010[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(6): 927–935], DOI:10.11755/j.issn.1006–7639(2016)–06–0927

1961—2010年中国北方沙尘源区沙尘强度 时空分布特征及变化趋势

元天刚,陈思宇,康丽泰,陈子琦,罗源,邹倩

(兰州大学大气科学学院,甘肃 兰州 730000)

摘要:利用1961—2010年我国北方沙尘源区134个地面气象站沙尘暴、扬沙和浮尘发生频率逐月资料,结合定义的沙尘指数,系统地分析了中国北方7大主要沙尘源区沙尘强度的时空分布特征及变化趋势。结果表明:西部的塔克拉玛干沙漠沙尘强度最高,多年平均沙尘指数高达235,其次是中部的阿拉善高原和鄂尔多斯高原沙漠群(182),东北部的呼伦贝尔沙地沙尘强度最小,多年平均沙尘指数仅为23。总体来看,近50a来中国沙尘源区的沙尘强度呈明显减小趋势,沙尘指数在1972、1987和2000年出现突变。其中,中部的阿拉善高原和鄂尔多斯高原沙漠群沙尘强度减小趋势最为显著(-6.3 a^{-1}),其次是西部的塔克拉玛干沙漠(-5.9 a^{-1})。EOF分析结果表明,中国北方沙尘源区各地的沙尘强度整体变化一致,塔克拉玛干沙漠、阿拉善高原和鄂尔多斯高原沙漠群是沙尘强度变化中心;在此基础上,东西部地区的沙尘强度呈明显的反相变化;此外,中国北方沙尘源区的沙尘强度在1980年代后期发生显著变化,沙尘指数至今处于较低值。

关键词:沙尘指数;时空分布;年际变化趋势;塔克拉玛干沙漠;阿拉善高原与鄂尔多斯沙漠群

文章编号:1006–7639(2016)–06–0927–09 DOI:10.11755/j.issn.1006–7639(2016)–06–0927

中图分类号:P445.4

文献标识码:A

引言

作为对流层气溶胶的主要成分,沙尘气溶胶可以通过直接、间接和半直接效应对整个地—气系统产生重要影响。一方面,沙尘气溶胶可通过直接散射和吸收短波辐射来改变地球系统辐射收支。另一方面,沙尘粒子可通过间接或半直接效应来改变云的微观物理过程,进一步影响降水甚至整个水循环^[1–22]。沙尘天气还会引发一系列生态与环境问题,沙尘暴的风蚀作用会加速地表荒漠化,进而对于旱气候产生影响^[23–25]。沙尘中有毒物质、病菌等可通过呼吸系统进入人体且在体内积累,损害人体器官,引发各种疾病。另外,沙尘暴可使大气能见度降低,影响交通安全;通过沙埋、狂风袭击、降温霜冻等方式,使农作物大幅度减产甚至绝收,造成巨大经济损失^[26–27]。因此,沙尘研究对社会经济发展及人类生活都至关重要。

中国每年有大量沙尘物质被传输到位于下风向的日本、韩国,还可穿越太平洋传播到美国、加拿大甚至北极地区^[28–30]。为了更好地预报和预测沙尘天气,需要对其特征分布及发生发展规律有一个清楚认识。近年来,国内外科学家利用地面、卫星数据及数值模拟等手段在我国沙尘气溶胶时空分布特征、变化趋势、机制分析以及沙尘—气候—生态环境相互作用等方面都取得了非常显著的成果^[31–39]。其中,地面观测的沙尘资料因其观测时间长、观测地点密集等优点一直被广为使用^[40–50]。一系列针对1950年代到20世纪末的研究^[40–43]发现,我国北方沙尘暴和扬沙日数总体呈下降趋势,其中沙尘暴和扬沙平均日数都是在1950年代最高,1960年代减少,1970年代又有所回升,1980年代再次开始减少,1990年代减小到最少。沙尘天气日数的时空变化成因^[44–45]主要是大气环流的周期性变化,此外生态

收稿日期:2016–05–30;改回日期:2016–09–05

基金项目:国家自然科学基金(41405003)资助

作者简介:元天刚,男,主要从事沙尘地面观测和数值模拟研究。E-mail: yuantg14@lzu.edu.cn

通讯作者:陈思宇,女,博士,主要从事沙尘地面观测和数值模拟研究。E-mail: chensiyu@lzu.edu.cn

环境的整体恶化对沙尘天气的产生仍起着积极作用。钱正安等^[46]指出虽然中国北方地区沙尘暴在1950年代到20世纪末期间总体呈波动减少的趋势,但2000年有回升现象,并预测未来可能将进入新一轮沙尘暴活动的活跃期。最近研究^[47-48]发现,21世纪初沙尘暴确实有所增加,然而相对于1960—1980年代仍偏少。已有研究大多是针对沙尘暴、扬沙、浮尘3类沙尘事件单独进行讨论,主要研究区域为塔克拉玛干沙漠和内蒙古戈壁沙漠地区,而对中国沙尘源区整体的沙尘强度及其变化趋势的研究较少。

为了定量地反映沙尘源区沙尘强度的变化,Wang等^[51]根据牛生杰等^[52]对3类沙尘事件的观测结果,定义了塔克拉玛干沙漠的沙尘指数(TDI)和内蒙古戈壁沙漠的沙尘指数(GDI)。康林等^[53]利用上述沙尘指数进一步分析了欧亚大气环流对中国北方春夏季沙尘天气的影响,同时Kang等^[54]也

将该指数引入青藏高原沙尘强度的变化趋势及其成因研究中。因此,本文利用长序列的沙尘观测数据,结合Wang等^[51]定义的沙尘指数(Dust Index, DI),深入系统地分析1961—2010年中国7个主要沙尘源区沙尘强度的时空分布特征及其变化趋势。

1 中国北方沙漠分区

我国沙尘天气的发生区域主要集中在塔克拉玛干沙漠、内蒙古戈壁沙漠、巴丹吉林沙漠等广大沙漠地区^[50]。此外,东亚的沙漠和戈壁是东亚地区沙尘排放量和贡献量的高值区,也是研究沙尘变化趋势的代表性地区,对区域气候具有重要影响^[55-58]。综合考虑沙尘事件发生频数以及沙尘排放量2个因素,本文将沙漠及其附近地区作为研究区域,根据中国沙漠分布位置以及沙尘事件发生频数的空间分布,将中国北方沙尘源区划分为具有代表性的7大部分(表1)。

表1 中国北方7大主要沙漠分布区域
Tab. 1 Locations of seven main deserts in China

编号	区域	沙漠	简称	位置
1	塔里木盆地	塔克拉玛干沙漠	TD	74.5°E—90.12°E, 35.5°N—42.8°N
2	准格尔盆地	古尔班通古特沙漠	GTD	80°E—91.2°E, 43.5°N—49°N
3	柴达木盆地	柴达木盆地沙漠	QB	90.16°E—97°E, 36°N—41°N
4	阿拉善高原和鄂尔多斯高原地区	毛乌素沙地、巴吉丹林沙漠、乌兰布和沙漠、库布齐沙漠和腾格里沙漠	AOP	97.1°E—110.5°E, 36.5°N—43°N
5	内蒙古锡林郭勒草原南部	浑善达克沙地	HS	111°E—117°E, 41.55°N—46°N
6	西辽河流域	科尔沁沙地	KS	117.56°E—125°E, 41°N—45.1°N
7	呼伦贝尔西南部	呼伦贝尔沙地	HuS	116.15°E—120.43°E, 47°N—49.7°N

2 资料及方法

利用中国7个沙尘源区134个气象站1961—2010年沙尘暴、扬沙和浮尘日数逐月资料,该资料来自中国气象局气候资料中心。所选站点中缺测1a、6a和9a的均有1个,缺测10a的有2个,所有缺测数据均作为缺失值处理。

采用了Wang等^[51]定义的沙尘指数进行中国北方沙尘源区的沙尘强度研究,其公式为:

$$DI = FD + BD \times 3 + DS \times 9 \quad (1)$$

其中,FD、BD和DS分别是浮尘、扬沙和沙尘暴出现的天数,单位:d。

3 结果分析

3.1 沙尘指数的时空分布

图1给出1961—2010年中国北方沙尘源区年和季节平均沙尘指数分布。由图1a可以看出,塔克拉玛干沙漠(TD,区域1)沙尘强度最高,多年平均DI高达235,其次是阿拉善高原和鄂尔多斯高原沙漠群(AOP,区域4)和柴达木盆地沙漠(QB,区域3),多年平均DI分别为182和162,而呼伦贝尔沙地(HuS,区域7)沙尘强度最小,多年平均DI仅为23。从图1b看出,春季TD的平均DI最大,约为118,其次为AOP(92)和QB(80),最小的是古尔班通古特沙漠(GTD,区域2);夏季,TD的DI仍最大,

QB 的 DI 略大于 AOP, 中国东部地区科尔沁沙地 (KS, 区域 6) 的 DI 最小, 甚至低于 10; 秋季, 各沙漠区的 DI 相对较小, 且差异最小, 其中 TD 仍最高为 28, AOP 和 QB 的 DI 约为 20; 冬季, TD 的 DI 继续减小, 而 QB 和 AOP 的 DI 较秋季有所升高, 分别为 45 和 37, 且超过 TD (20)。此外还发现, TD 和 GTD、HuS 的 DI 季节变化较为一致, DI 自春、夏、秋、冬季依次减小, QB 和 AOP、浑善达克沙地 (HS, 区域 5) 的变化较为一致, DI 春季最大、秋季最小, 而 KS 的 DI 春季最大、夏季最小。可见, 各沙尘源区的沙尘强度均是春季最大。

图 2 给出我国北方沙尘源区不同季节平均沙尘指数的空间分布。可以看出, 春季是我国沙尘频发的季节^[59], 沙尘源区春季沙尘强度最高, 夏、冬、秋季依次减小。其中, 春季 TD、QB、AOP 和 HS 的沙尘

强度最大, 所有站点的 DI 均在 36 以上; KS 中西部的沙尘强度较高, 而东北部相对较弱; GTD 和 HuS 的 DI 较小, 且分布较为均匀, 基本在 20 以下。夏季, TD 北部站点的 DI 低于南部, 差值超过了 20; AOP 除西南和东北部 DI < 5 外, 其他区域均在 30 以上; QB 的外围 DI 较高, 而中部相对较低; KS 和 HuS 大部分站点 DI 值在 0~2 范围内, 而 HS 则相对较高, 大多数站点 DI 在 12 左右; GTD 的 DI 分布基本与春季相同。秋季, TD 南部和 AOP 中西部的 DI > 30, 而我国东部的 HS、HuS、KS 和西北部 GTD 的 DI 均 < 20。冬季, TD 南部地区有个别站点 DI 在 30 以上, 其余大多站点的 DI < 20, 而 AOP 地区 DI > 30 的站点较秋季增多, 尤其是 AOP 的中南部地区更为明显; QB 的 DI 较秋季也有所增加, 尤其是靠近 AOP 地区的站点, 其 DI > 30。可见, 冬季 AOP 地区的沙尘事件影响最大。

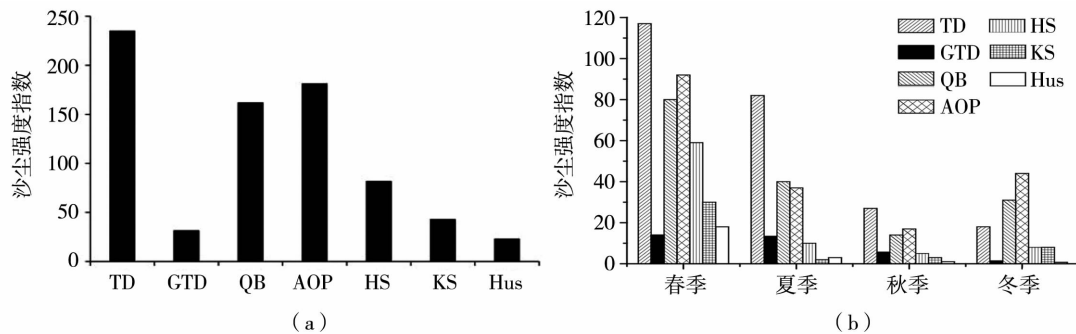


图 1 1961—2010 年中国北方 7 个沙尘源区年(a)和季节(b)平均沙尘指数分布

Fig. 1 Annual (a) and seasonal (b) average dust index (DI) in seven dust source regions of Northern China during 1961–2010

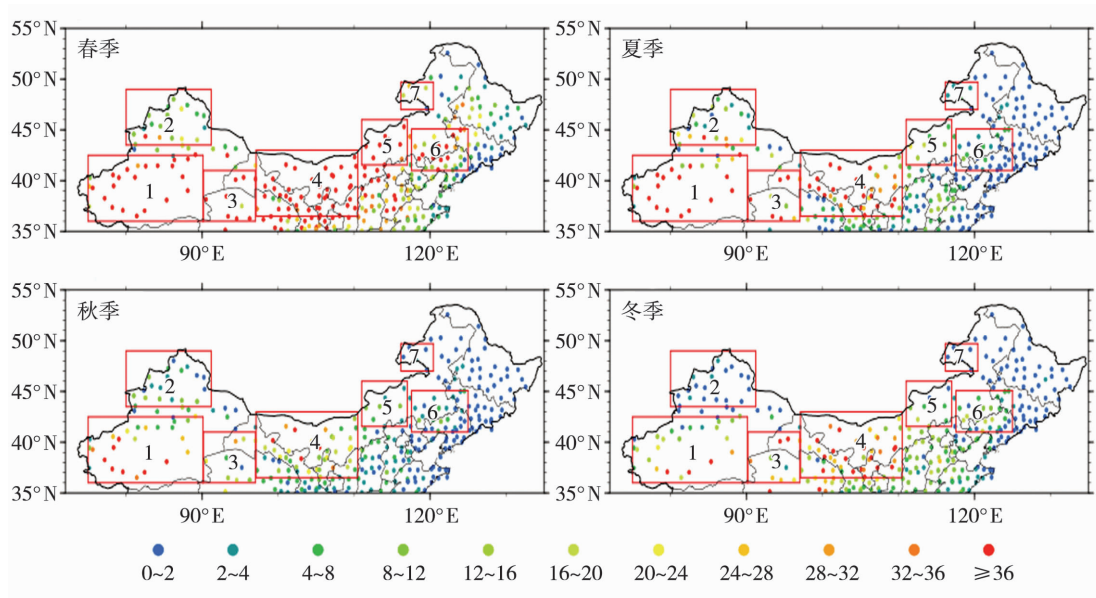


图 2 1961—2010 年中国北方四季平均沙尘指数的空间分布
(编号 1—7 为各沙尘源区, 下同)

Fig. 2 The spatial distribution of DI in four seasons in Northern China during 1961–2010
(The number 1 to 7 represent seven dust source areas, the same below)

3.2 沙尘指数的变化趋势

图3给出1961—2010年中国北方7个沙尘源区沙尘指数的线性变化趋势。可以看出,近50a来我国7大沙尘源区的沙尘强度均呈显著减小趋势,且都通过了0.05的显著性检验,中部AOP的DI减小速率最大(-6.3 a^{-1}),其次是西部的TD(-5.9 a^{-1}),东部的HuS最小(-0.8 a^{-1})。从不同季节DI线性变化趋势的空间分布来看(图4),除7个沙尘源区个别站点外,其余站点各季节DI的变化趋势较为一致,中西部的TD、AOP和QB在各季节均为DI减小速率最快的地区(尤其是AOP),且大部分站点通过了0.05的显著性检验,而东部HuS的DI变化趋势

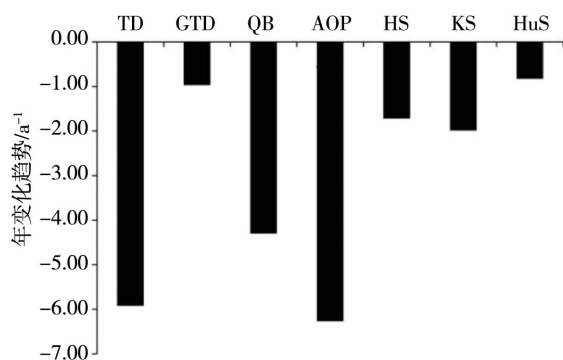


图3 1961—2010年中国北方7个沙尘源区DI的线性变化趋势

Fig. 3 Linear change trends of DI in seven dust source regions of Northern China during 1961–2010

未通过显著性检验。春季,TD、AOP和QB绝大部分站点以及KS中部站点的DI线性变化趋势 $< -1.8\text{ a}^{-1}$,而GTD的线性变化趋势最小,约为 -0.3 a^{-1} 。夏季,TD、AOP和QB的DI线性变化趋势 $< -1.8\text{ a}^{-1}$ 的站点数量较春季略有减少,大部分站点的下降率较高,仅AOP西南部站点变化率较小;KS、HS的DI线性变化趋势均较春季有所减弱,且前者下降速率较后者慢;GTD各站点的DI减小速率与春季相差不大。秋季,TD、AOP和QB的DI线性变化趋势显著减小,除少数站点DI的变化速率在 $-1.8\sim -1.5\text{ a}^{-1}$ 之间,其余大部分站点约为 -0.6 a^{-1} ,其中TD南北差异较明显,TD北部的速率约为 -0.3 a^{-1} ,而南部的速率为 -1.2 a^{-1} 左右,约为北部的4倍;其他地区DI的线性变化趋势基本在 $-0.3\sim 0\text{ a}^{-1}$ 范围。冬季,各地区DI的减小速率较秋季有所差异,TD各站点DI的变化率差异仍较大,但整体较秋季有所减小,而QB和AOP各站点DI的减小速率有所增大,特别是AOP中部和南部的站点,其减小速率达 -1.8 a^{-1} 。综上可知,TD、AOP和QB作为我国主要沙尘源区,DI变化趋势具有明显的季节性特征,其中春季减小趋势最明显,夏季次之,TD在冬季减小速率最小,而AOP和QB在秋季减小速率最小。

3.3 沙尘指数的年际变化特征

为更直观地对比不同沙尘源区的沙尘强度,图5给出我国北方7个沙尘源区DI距平的月和年变化

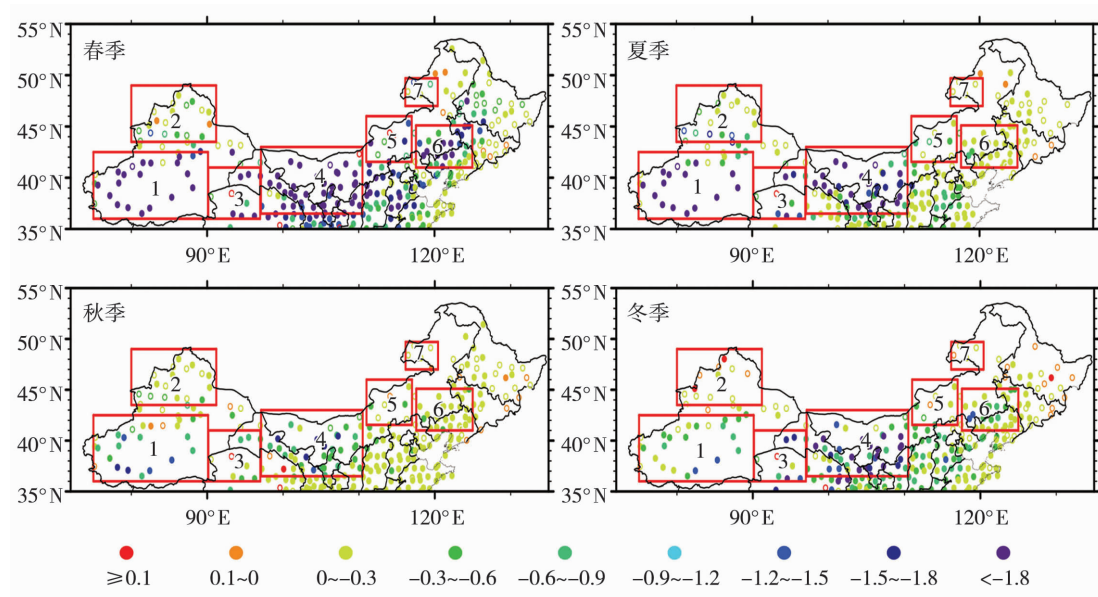


图4 1961—2010年中国北方7个沙尘源区各站点DI线性变化趋势的季节分布
(实心圆通过了0.05的显著性检验)

Fig. 4 Seasonal distribution of linear change trend of DI in seven dust source regions of Northern China during 1961–2010
(The solid circles passed the 0.05 confidence test)

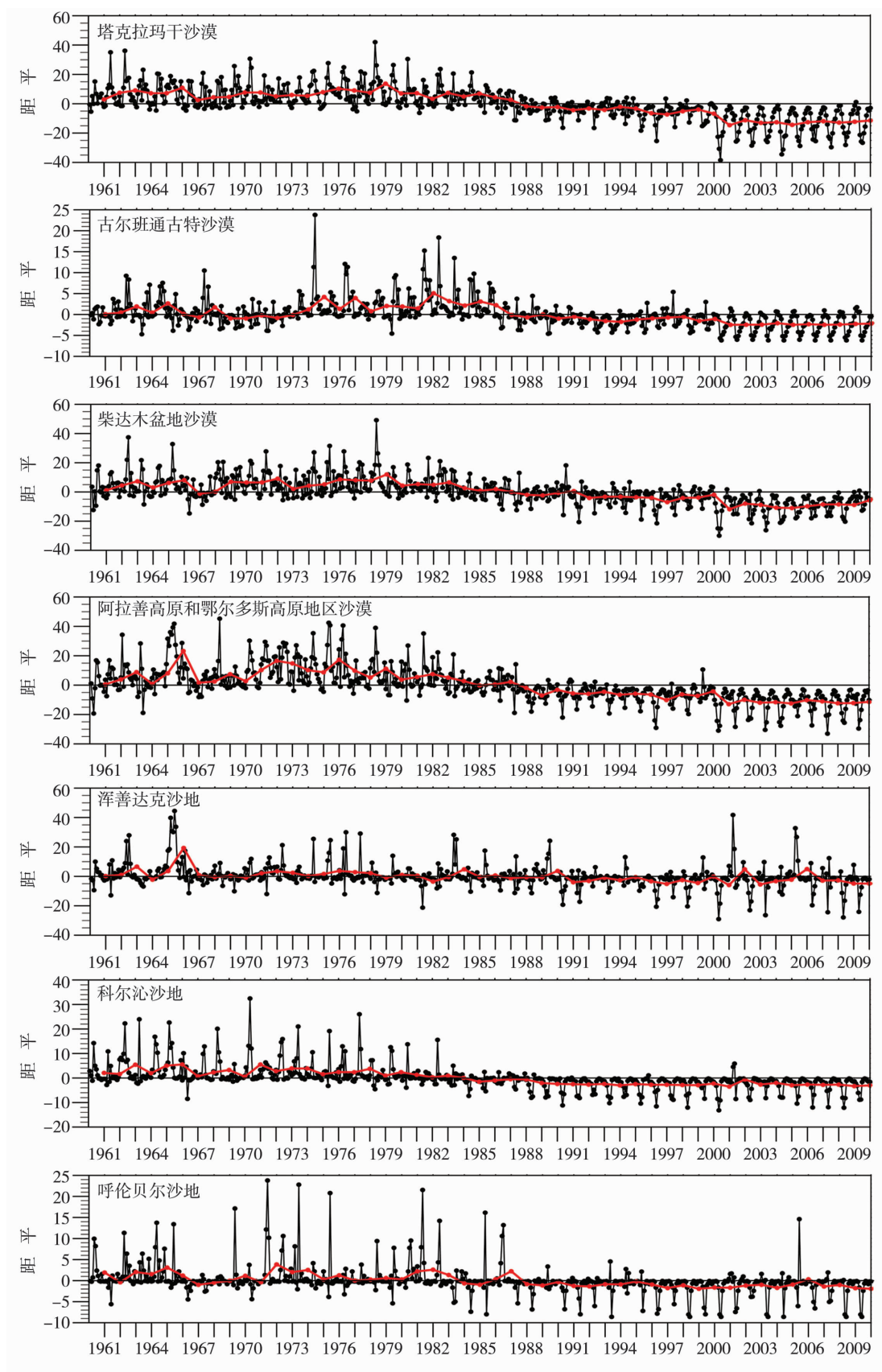


图5 1961—2010年中国北方7个沙尘源区DI距平的时间变化
(黑线为DI距平月变化,红线为DI距平年变化)

Fig.5 The monthly and annual variations of DI anomaly in seven dust source regions of Northern China during 1961 – 2010
(The black lines and red lines for the monthly and annual variation of DI anomaly, respectively)

特征。总体看来,各沙尘源区 DI 距平的时间变化特征大致上可划分为 3 类:(1)中西部沙尘源区,总体上 TD、GTD、QB 和 AOP 在 1960—1980 年代中期年平均 DI 为正距平,1980 年代末以后为负距平。其中,1961—1980 年距平值波动变化,1980 年代中期距平值由正转变为负,2000 年以后 DI 处于稳定高位的负距平。然而,这 4 个区域之间年平均 DI 距平变化也存在差异,主要表现在前期正距平阶段。其中,TD 年平均 DI 距平在 1979 年出现一峰值,之后开始缓慢下降,1987 年距平值由正转为负;GTD 年平均 DI 距平在 1970 年代中期以前处于正负波动变化,且距平值较低,1970 年代中期—1980 年代中期正距平较高,之后于 1987 年距平值由正转负;QB 年平均 DI 正距平在 1961—1980 年处于较高阶段,且期间出现了 1 次短暂的减小波动,1987 年由正值变为负值;AOP 年平均 DI 距平在 1965—1980 年间处于较高值,波动幅度较其他沙源区大,且在 1966 年出现峰值(24),由正值转为负值的时间仍为 1987 年。此外,从 DI 距平的月变化曲线发现,各沙尘源区 DI 主要由春季的 DI 决定,1980 年代以前沙尘天气频发,春季沙尘天气的 DI 也较高,而 1980 年代后春季和夏季 DI 减小最为显著,几乎与 DI 的年际变化同步。(2)东部沙尘源区,HS 的 DI 距平与其他 6 个区域不同,无明显的阶段性变化特征,且波动幅度很小,近 50 a 间距平值基本稳定在 0 左右,1966 年

出现了峰值(20)。(3)最东部沙尘源区,KS、HuS 的年平均 DI 距平可分为波动变化阶段和稳定阶段。其中,KS 年平均 DI 距平值在 1961—1984 年为正值,且在 0~5 之间变化,而 HuS 在 1987 年之前在 -1~4 之间浮动,二者变化都较小且距平值较其他区域低,整体由正值转为负值的时间分别为 1984 年和 1987 年;1980 年代末以后二者年平均 DI 较为稳定,且距平值为较小的负值。

3.4 沙尘指数的 EOF 分析及 t 检验

为了进一步展现我国北方沙尘源区沙尘强度的整体变化趋势,对 1961—2010 年中国北方所有站点的 DI 进行 EOF 分解,得到第 1 模态的方差贡献最大,为 65.0%,第 2 模态的方差贡献迅速减少,为 9.0%,其余 3 个模态方差贡献较小(表略)。因此,这里只给出前 2 个模态对应的特征向量空间分布及时间变化系数(图 6)。如图 6a 所示,第 1 特征向量场均为负值,说明近 50 a 我国 30°N 以北的地区沙尘强度的变化趋势一致,AOP 和 TD 是高值中心。结合对应的时间系数(图 6b)发现,中国北方各沙尘源区 DI 在 1961—1987 年为高值期,尤其是在 1960 年代和 1970 年代较为显著,1987 年左右发生转折,DI 显著减小,2000 年以后处于低值期。

图 6c 显示,第 2 模态的空间分布与第 1 模态有着明显的差异,除内蒙古以西的巴丹吉林沙漠、南部的毛乌素沙地和 TD 为正值外,其他地区基本为负值,

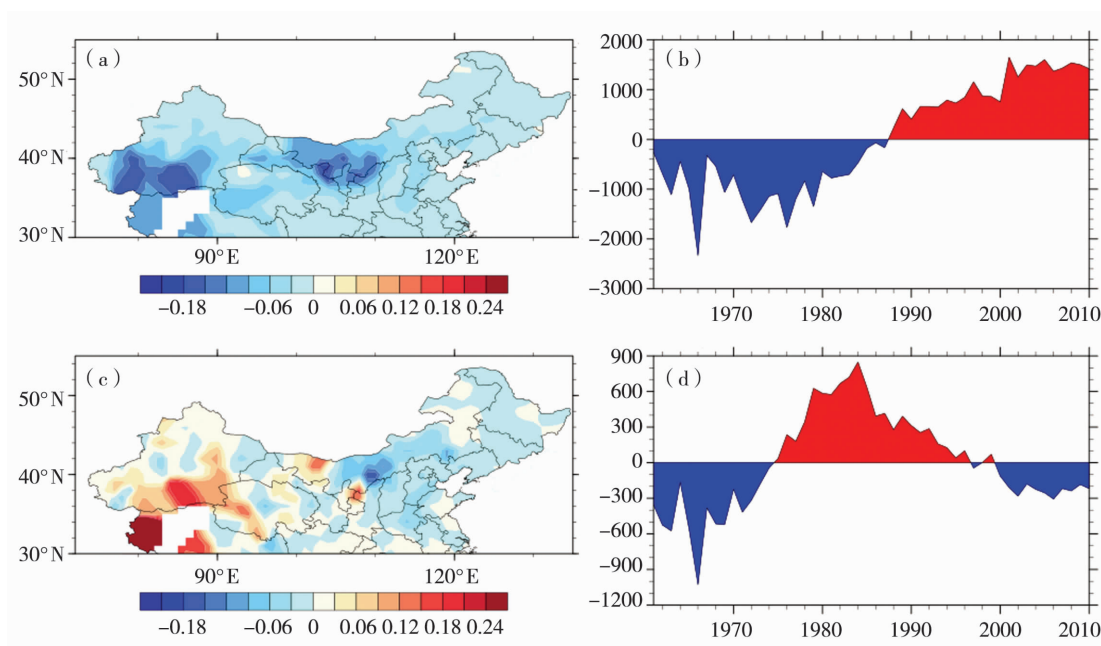


图 6 1961—2010 年中国北方 DI 的 EOF 分解第 1(a、b)、第 2(c、d)

特征向量场空间分布(a、c)及其对应的时间系数变化(b、d)

Fig. 6 The spatial distribution (a, c) of the first (a, b) and second (c, d) eigenvector fields and variations of corresponding time coefficient (b, d) decomposed by EOF in Northern China during 1961–2010

这反映了东西部 DI 基本呈反相的分布特征,这在王存忠等^[60]的研究中也得到了证实。结合对应的时间系数(图 6d)可知,DI 可能存在突变。为此,对 1961—2010 年的年平均 DI 进行了 5 a 滑动 t 检验^[61-62]。如图 7 所示,1961—2010 年 t 统计量有 3 处超过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平临界线,分别为 1972 年、1987 年和 2000 年。可见,近 50 a 来中国北方 7 大沙尘源区沙尘强度发生了 3 次显著突变,DI 在 1972 年发生了由少到多的突变,之后在 1987 年发生了由多到少的突变,2000 年再次出现了由多到少的显著突变。结合图 5 中 TD、GTD、QB 和 AOP 主要沙尘源区年平均 DI 的距平变化,发现 DI 距平在 1980 年代后期由正值转为负值,2001 年出现了 1 次显著减少趋势,这与突变时间较为一致,且 DI 突变时间与沙尘暴和扬沙的突变年份(分别为 1985 和 1984 年)较为符合^[50]。

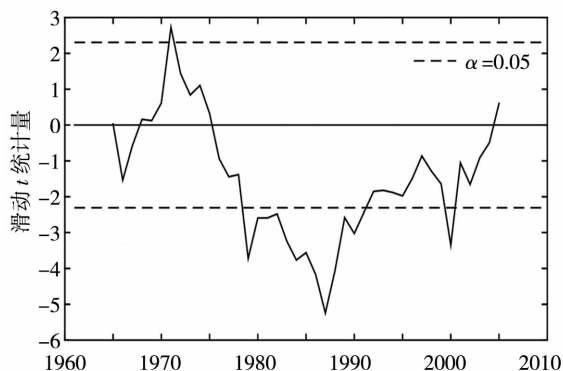


图 7 1961—2010 年中国北方沙尘源区 DI 的 5 a 滑动 t 检验

(虚线是 $\alpha=0.05$ 的显著性水平临界线)

Fig. 7 The 5-year sliding t -test of DI in dust source areas of Northern China during 1961–2010

(The dotted lines for the critical lines with the 0.05 significance level)

气象因素对中国沙尘源区沙尘强度变化的影响占主导地位^[46]。大风是起沙的动力条件。研究表明,我国西北地区大风日数与沙尘暴频数的正相关性极高,近 40 a 大风日数的减少几乎与沙尘暴的年代际变化同步^[23]。降水量的变化通过改变地表植被覆盖以及土壤湿度来抑制沙尘暴的发生。研究指出,中国西北地区在 1987 年左右发生了由暖干到暖湿的突变^[63-64]。温度变化与沙尘暴频数呈反相关关系^[65],北半球在 1970 年代开始增温,而中国地区在 1980 年代开始增温^[66]。北半球升温的结果是引起了中纬度大气温压结构和对流层上层西风环流特征的改变,从而导致温带气旋的减弱;同时造成了冬

春季节寒潮势力的减弱。综上所述,大风减弱、降水量增加、气温升高是导致中国北方地区沙尘强度减弱的重要原因。

4 结 论

(1) TD 是我国北方沙尘强度最高的地区,多年平均 DI 高达 235;其次是 AOP 和 QB,多年平均 DI 分别为 182 和 162;HuS 是年平均 DI 最小的地区。从季节分布上看,我国北方沙尘源区 7 个主要区域的沙尘强度均以春季最高,DI 最小的季节不同区域略有差异。

(2) 1961—2010 年间我国北方 7 个主要沙尘源区的年平均 DI 整体均呈显著下降趋势。TD 和 GD 是主要的沙尘强度变化中心,QB 次之,变化较小的是 HuS 和 GTD。就季节而言,春季中国北方各沙尘源区沙尘强度减小趋势最为明显,其余季节不同地区略有差异。近 50 a 中国北方沙尘源区 DI 在 1972 年发生由少到多的突变,沙尘事件频发,1987 年发生由多到少的突变,沙尘强度显著减小,2000 年再次出现由多到少的突变。

(3) 我国北方 7 大沙尘源区 DI 年际变化特征大致可分为 3 类:中西部源区(TD、GTD、QB 和 AOP),该地区总体上在 1960—1980 年代前期年平均 DI 为波动的正距平,1980 年代中期距平值由正变为负,1990 年代后负距平呈阶段性下降,2000 年代负距平更稳定;东部源区(HS),该地区的年平均 DI 距平整体呈波动变化特征,且浮动很小,距平值基本稳定在 0 左右,其中 1966 年距平达到峰值(20);东部偏东源区(KS 和 HuS),该地区年平均 DI 距平变化可分为波动变化阶段和稳定阶段,波动幅度小且距平值较其他区域低。

本文虽然对中国北方沙尘源区的沙尘强度变化特征进行了较深入的分析,但是对于沙尘强度变化的原因只根据前人研究成果给予了简单的解释,详细的原因将在今后的研究中进一步讨论。

参考文献

- [1] Zhang X Y, An Z S, Cao J J. Dust emission from Chinese desert sources linked to variations in atmospheric circulation[J]. Geophysical Research Letters, 1997, 102: 28041–28047.
- [2] Qian Y, Fu C B, Wang S Y. Mineral dust and climate change[J]. Advance in Earth Sciences, 1999, 14(4): 391–394.
- [3] Zhao T L, Gong S L, Zhang X P, et al. A Simulated Climatology of Asian Dust Aerosol and Its Trans-Pacific Transport. Part I: Mean Climate and Validation[J]. Journal of Climate, 2006, 19: 88–103.

- [4] Huang J P, Minnis P, Lin B, et al. Possible influences of Asian dust aerosols on cloud properties and radiative forcing observed from MODIS and CERES[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L06824. doi:10.1029/2005GL024724.
- [5] Huang J P, Minnis P, Yi Y, et al. Summer dust aerosols detected from CALIPSO over the Tibetan Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L18805.
- [6] Huang J P, Huang Z, Bi J, et al. Micro-pulse Lidar measurements of aerosol vertical structure over the Loess Plateau[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2008, 1: 8-11.
- [7] Huang J P, Minnis P, Chen B, et al. Long-range transport and vertical structure of Asian dust from CALIPSO and surface measurements during PACDEX [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: D23212. doi:10.1029/2008JD010620.
- [8] Huang J P, 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: 6863-6872.
- [9] Huang J P, Fu Q, Zhang W, et al. Dust and Black Carbon in Seasonal Snow Across Northern China[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, 92: 175-181.
- [10] Chen S, Huang J P, Zhao C, et al. Modeling the Transport and Radiative Forcing of Taklimakan Dust over the Tibetan Plateau: A case study in the summer of 2006[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(2): 797-812.
- [11] Chen S, Zhao C, Qian Y, et al. Regional modeling of dust mass balance and radiative forcing over East Asia using WRF-Chem [J]. *Aeolian Research*, 2014, 15: 15-30.
- [12] 陈思宇, 黄建平, 刘晶晶, 等. 利用 MODIS 和 OMI 资料研究中国半干旱地区沙尘气溶胶对暖云的影响[J]. *地球科学进展*, 2010, 25: 188-198.
- [13] Chen S, Huang J P, Qian Y, et al. Effects of aerosols on autumn precipitation over Mid-Eastern China[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2014, 28(3): 339-347.
- [14] Zhao C, Chen S, Leung L Y R, et al. Uncertainty in Modeling Dust Mass Balance and Radiative Forcing from Size Parameterization[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13: 10733-10753.
- [15] Qian Y, Giorgi F, Huang Y, et al. Regional simulation of anthropogenic sulfur over East Asia and its sensitivity to model parameters [J]. *Tellus Series B - Chemical and Physics Meteorology*, 2001, 53(2): 171-191.
- [16] 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.
- [17] 武威, 顾佳佳, 牛淑贞. 2013 年春季一次沙尘暴天气成因分析[J]. *气象与环境科学*, 2014, 37(4): 71-79.
- [18] 赵仕伟, 胥永文, 史燕, 等. 我国沙尘灾害遥感监测研究与展望[J]. *气象与环境科学*, 2009, 32(4): 65-68.
- [19] 孙强, 范学花, 夏祥鳌. 华北地区气溶胶垂直分布特征的观测与分析[J]. *气象与环境科学*, 2016, 39(1): 26-33.
- [20] 王金辉, 刘海涛, 王东, 等. 克州地区春季一次强风沙天气成因分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2012, 6(1): 41-45.
- [21] 高辉, 刘芸芸, 王勇. 冬季风异常对中国春季北方沙尘日数的影响[J]. *高原山地气象研究*, 2012, 32(1): 18-21.
- [22] 赵海珍, 买买提·阿布来提, 巴特尔·巴克, 等. 库尔勒市历年沙尘天气发生特性分析[J]. *高原山地气象研究*, 2012, 32(3): 50-53.
- [23] 李耀辉, 张书余. 我国沙尘特征及其与干旱关系的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(11): 1169-1176.
- [24] 狄潇泓, 张新荣, 刘新伟, 等. 甘肃省两次强沙尘暴天气对比分析[J]. *干旱气象*, 2014, 32(1): 81-86.
- [25] 张强, 胡隐樵, 曹晓彦, 等. 论西北干旱气候的若干问题[J]. *中国沙漠*, 2000, 20(4): 357-362.
- [26] 钱正安, 胡隐樵, 龚乃虎, 等. “93.5.5”特强沙尘暴的调查报告及其分析[M]. 北京: 气象出版社, 1997: 37-43.
- [27] 胡隐樵, 光田宁. 强沙尘暴发展与干绝线——黑风暴形成的一个机理分析[J]. *高原气象*, 1996, 15(2): 178-185.
- [28] Uno I, Satake S, Carmichael G R, et al. Numerical study of Asian dust transport during the springtime of 2001 simulated with the Chemical Weather Forecasting System (CFORS) model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: D19S24. doi:10.1029/2003JD004222.
- [29] Yumimoto K, Eguchi K, Uno I, et al. An elevated large-scale dust veil from the Taklimakan Desert: Intercontinental transport and three-dimensional structure as captured by CALIPSO and regional and global models[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9: 8545-8558.
- [30] Eguchi K, Uno I, Yumimoto K, et al. Trans-pacific dust transport: integrated analysis of NASA/CALIPSO and a global aerosol transport model[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9: 3137-3145.
- [31] 毛睿, 龚道义. 华北春季沙尘暴频次与环流年际变率的相关分析[J]. *高原气象*, 2007, 26(4): 1023-1030.
- [32] Mao R, Gong D Y, Bao J, et al. Possible influence of Arctic Oscillation on dust storm frequency in North China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(2): 207-218.
- [33] 陈勇航, 毛晓琴, 黄建平, 等. 一次强沙尘输送过程中气溶胶垂直分布特征研究[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(5): 449-454.
- [34] 刘冲, 赵天良, 熊杰, 等. 1991-2010 年全国沙尘气溶胶排放量气候特征及其大气环流影响因子[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(4): 959-970.
- [35] 刘建慧, 赵天良, 韩永翔, 等. 全球沙尘气溶胶源汇分布及其变化特征的模拟分析[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(10): 1741-1750.
- [36] Huang J, Ge J, Weng F. Detection of Asia dust storms using multisensor satellite measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 110(2): 186-191.
- [37] 徐超, 马耀明. 恒河流域和蒙古国南部 AERONET 站沙尘气溶胶光学物理特性对比分析[J]. *高原气象*, 2013, 32(4): 1000-1009.
- [38] 陈广善, 刘晓东, 陈葆德. 亚洲大陆 2000-2002 年春季大气沙尘时空特征的数值模拟[J]. *环境科学*, 2006, 27(1): 1-8.
- [39] 王式功, 王金艳, 周自江, 等. 中国沙尘天气的区域特征[J]. *地理学报*, 2003, 58(2): 193-200.
- [40] 王式功, 董光荣, 杨德保, 等. 中国北方地区沙尘暴变化趋势初

- 探[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(2): 86–94.
- [41] 周自江. 近45年中国扬沙和沙尘暴天气[J]. 第四纪研究, 2001, 21(1): 9–17.
- [42] 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.
- [43] Qian W H, Tang X, Quan L S. Regional characteristics of dust storms in China[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(29): 4895–4907.
- [44] 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 等. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 513–521.
- [45] 赵勇, 李红军, 何清. 塔里木盆地沙尘天气日数的变化及其与北大西洋涛动的联系[J]. 中国沙漠, 2012, 32(4): 1082–1088.
- [46] 钱正安, 宋敏红, 李万元. 近50年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J]. 中国沙漠, 2002, 22(2): 106–111.
- [47] 陈亿, 尚可政, 王式功, 等. 21世纪初中国北方沙尘天气特征及其与地面风速和植被的关系研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1702–1708.
- [48] 杨静. 中国北方1960–2007年沙尘暴特征及其自然影响因子关系探讨[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
- [49] 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): 444–457.
- [50] 王劲松, 任余龙, 陶建红, 等. 中国西北及青藏高原沙尘天气演变特征[J]. 中国环境科学, 2008, 28(8): 714–719.
- [51] Wang X, Huang J, Ji M, et al. Variability of East Asia dust events and their long-term trend[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42: 3156–3165.
- [52] 牛生杰, 孙继明, 陈跃, 等. 贺兰山地区春季沙尘气溶胶质量浓度的观测分析[J]. 高原气象, 2001, 20(1): 82–87.
- [53] 康林, 李明霞, 黄建平, 等. 欧亚大气环流对中国北方春季沙尘天气的影响[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5): 1453–1460.
- [54] Kang L, Huang J, Chen S, et al. Long-term trends of dust events over Tibetan Plateau during 1961–2010[J]. Atmospheric Environment, 2015, 125: 188–198.
- [55] 熊杰. 全球主要沙尘源区分布及其沙尘气溶胶变化特征的模拟分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013: 24–26.
- [56] 方小敏, 韩永翔, 马金辉, 等. 青藏高原沙尘特征与高原黄土堆积: 以2003–03–04拉萨沙尘天气过程为例[J]. 科学通报, 2004, 49(11): 1084–1090.
- [57] Zhang X Y, Gong S L, Zhao T L, et al. Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(24): 2272. Doi: 10.1029/2003GL018206.
- [58] 李富刚, 李仑格, 林春英, 等. 西北地区气溶胶的源和汇与沙尘暴研究综述[J]. 中国沙漠, 2008, 28(3): 586–591.
- [59] 郭萍萍, 杨建才, 殷雪莲, 等. 甘肃省春季一次连续浮尘天气过程分析[J]. 干旱气象, 2016, 33(2): 303–309.
- [60] 王存忠, 牛生杰, 王兰宁. 中国50年沙尘暴变化特征[J]. 中国沙漠, 2010, 30(4): 933–939.
- [61] 符涂斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482–492.
- [62] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 42–66.
- [63] 沙比提, 买买提, 欢乐希, 等. 1961–2014年乌鲁木齐地区气候特征及干湿区变化[J]. 干旱气象, 2016, 34(3): 448–455.
- [64] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 199–225.
- [65] Zhu C Y, Wang B, Qian W H. Why do dust storms decrease in northern China concurrently with therecentglobal warming[J]. Geophysical research letters, 2008, 35: L18702. Doi: 10.1029/2008GL034886.
- [66] 丁一汇, 戴晓苏. 中国近百年来的温度变化[J]. 气象, 1994, 20(12): 19–26.

Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Change Trends of Dust Intensity in Dust Source Regions of Northern China During 1961–2010

YUAN Tiangang, CHEN Siyu, KANG Litai, CHEN Ziqi, LUO Yuan, ZOU Qian

(College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the monthly dust days data of dust storm, floating dust and blowing dust at 134 surface weather stations in dust source regions of Northern China during 1961–2010, the spatial and temporal distribution characteristics and variation trends of dust intensity in seven major dust source regions of China were systematically analyzed by using the dust index (DI). The results showed that the dust intensity in Taklimakan Desert was the highest, with annual mean DI of 235, and then followed by Alashan Plateau and Ordos Plateau deserts, with annual mean DI of 182, while the least of dust intensity appeared in Hulunbeier Sand-land in northeast China, DI was only 23. In general, the dust intensity in seven dust source regions of Northern China decreased obviously in recent 50 years, and the mutation of DI occurred in 1972, 1987 and 2000, respectively. Especially, the dust intensity in Alashan Plateau and Ordos Plateau desert region and Taklimakan Desert decreased significantly during 1961–2010, and the change rates of DI were -6.3 a^{-1} and -5.9 a^{-1} , respectively. Meanwhile, EOF results showed that the change trends of DI in Northern China were consistent as a whole, and that in western China was opposite to eastern China, the higher change centers located in Taklimakan Desert and Alashan Plateau and Ordos Plateau region. Besides, the dust intensity in Northern China had changed significantly in the later 1980s, and so far DI has been still in a lower value.

Key words: dust index; temporal and spatial distribution; seasonal and annual variation; Taklimakan Desert; Alashan Plateau and Ordos Plateau deserts