

张锦春, 赵明, 方峨天, 等. 2009 民勤近地面沙尘暴气溶胶浓度变化特征初探[J]. 环境科学学报, 29(3): 496– 504
Zhang J C, Zhao M, Fang E T, *et al.* 2009. Seasonal variations of sandstorm-aerosol concentration near the ground surface around Minqin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(3): 496– 504

民勤近地面沙尘暴气溶胶浓度变化特征初探

张锦春^{1 2 *}, 赵明^{1 2}, 方峨天^{1 2}, 詹科杰¹, 杨自辉^{1 2}, 张应昌¹, 郭树江¹

1 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 民勤 733300
2 甘肃省荒漠化防治重点实验室, 甘肃省治沙研究所, 武威 733000
收稿日期: 2008-04-11 修回日期: 2008-07-23 录用日期: 2008-12-26

摘要: 借助近地面沙尘暴监测系统对民勤沙尘源区不同沙尘天气的气溶胶浓度进行了监测, 初步分析了民勤近地面沙尘暴气溶胶浓度的变化特征. 结果表明: 沙尘暴气溶胶浓度春季最高, 为 $14.61\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$; 夏季逐渐降低, 为 $12.49\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$; 秋季无沙尘暴出现, 气溶胶浓度最小; 冬季趋于回升, 可达 $9.82\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 沙尘暴气溶胶浓度季节变化与沙尘暴发生频率相一致. 不同沙尘天气条件下沙尘气溶胶浓度表现为强沙尘暴最大, 为 $18.80\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$; 中沙尘暴次之, 为 $13.56\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$; 扬沙浮沉天气较小, 只有 $3.07\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 随着沙漠向绿洲的过渡, 沙尘暴气溶胶浓度明显降低, 沙漠、绿洲边缘、绿洲 3 个下垫面条件下沙尘暴气溶胶浓度依次为 $21.07\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $12.09\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $6.49\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 沙尘暴气溶胶浓度随观测高度变化遵循幂函数规律, 浓度梯度变幅表现为沙尘暴高发季节大于低峰季节, 沙尘暴天气大于扬沙浮尘天气, 沙漠下垫面大于绿洲下垫面; 不同下垫面条件下沙尘暴气溶胶浓度在 41 m 高度处趋于一致, 表明沙尘源区的沙尘浓度在约 40 m 范围内受地面影响较为显著.
关键词: 民勤; 近地面沙尘暴监测系统; 沙尘暴气溶胶浓度; 下垫面

文章编号: 0253-2468(2009)03-496-09 中图分类号: X513 文献标识码: A

Seasonal variations of sandstorm-aerosol concentration near the ground surface around Minqin

ZHANG Jinchun^{1 2 *}, ZHAO Ming^{1 2}, FANG Etian^{1 2}, ZHAN Kejie¹, YANG Zihui^{1 2}, ZHANG Yingchang¹, GUO Shujiang¹

1 Minqin National Studies Station for Desert Steppe Ecosystem, Minqin 730073
2 Key Laboratory for Desertification Combating of Gansu Province, Gansu Desert Control Research Institute, Wuwei 733000

Received 11 April 2008 received in revised form 23 July 2008 accepted 26 December 2008

Abstract In order to continuously monitor the sand-dust aerosol concentration in Minqin, a dust source area in China, a monitoring system was set up in 2005. The characteristics of the sandstorm-aerosol concentrations near the surface were determined from January to December 2006. The results showed that the concentration of aerosols in spring was the highest with an average value of $14.61\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. It reduced gradually to $12.49\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ in summer. There was no sandstorm in fall and the average concentration was $9.82\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ in winter. The sandstorm-aerosol concentration increased proportionally with the sandstorm intensity: the average concentration for strong, middle and weaker sandstorms was 18.80 , 13.56 , and $3.07\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ respectively. The sandstorm-aerosols concentration dropped sharply from desert to oasis and the corresponding concentrations were 21.07 , 12.09 and $6.49\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ in desert, at the edge of desert and oasis and in oasis respectively. Regardless of the type of ground cover, sandstorm-aerosol concentration reduced in power function with height. The range of the sandstorm-aerosol concentrations in the high-frequency season was larger than that in the low-frequency season. The sandstorm-aerosol concentrations were almost the same above a height of 41 m, regardless of the ground cover, indicating that the effects of different ground cover were only apparent to a height of 40 m in the Minqin area.

Keywords Minqin; near ground sandstorm monitoring system; sandstorm-aerosol concentration; ground cover

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 30872069); 甘肃省中青年基金 (No. 071HRJYH007); 国家公益性行业科研专项 (No. 200804031)
Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 30872069), the Gansu Province Young Science Foundation (No. 0711RJYH007) and the National Research Special of Commonweal Industry (No. 200804031)
作者简介: 张锦春 (1971—), 男, 副研究员; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: zhjcl@gsdcri.com
Biography: ZHANG Jinchun (1971—), male, associate researcher * Corresponding author E-mail: zhjcl@gsdcri.com

1 引言 (Introduction)

大气气溶胶是指悬浮在大气中固态、液态微粒的总称, 主要包括 6 大类 7 种气溶胶粒子: 沙尘暴气溶胶、碳气溶胶 (黑碳和有机碳气溶胶)、硫酸盐气溶胶、硝酸盐气溶胶、铵盐气溶胶和海盐气溶胶, 还可分为粒径 $< 100 \mu\text{m}$ 的总悬浮颗粒 (TSP)、粒径 $< 10 \mu\text{m}$ 飘尘和粒径 $> 10 \mu\text{m}$ 的降尘 (张小曳, 2007). 沙尘暴作为荒漠地区常见的一种灾害性天气现象, 通过地表沙尘释放及其输送成为大气气溶胶的重要来源, 并在全球物质循环和地球化学平衡中扮演着重要角色. 据估计, 全球每年进入大气的沙尘暴气溶胶达 $108 \sim 109 \text{ t}$ 几乎占对流层气溶胶总量的 50% (颜鹏等, 2004). 沙尘暴气溶胶造成了大气能见度及空气质量的下降, 对大气生态环境产生重大影响; 同时过高的沙尘浓度容易引起呼吸系统的疾病, 导致大型传染性疾患的传播, 对人类的健康造成威胁 (史培军等, 2000; 庄国顺等, 2001). 因此, 监测沙尘暴发生发展过程, 掌握沙尘气溶胶运动特征, 研究防治沙尘暴危害的措施, 减轻沙尘暴灾害带来的损失已是全球特别关注的重大课题.

国外有关沙尘暴的数据模拟研究较多. 如 Schutz (1977) 以二维稳态沙尘输送模式对撒哈拉地区沙尘输送进行了研究; Westphal 等 (1987) 利用动力学沙尘传输模式对沙尘气溶胶远距离输送过程开展了研究, 并真实模拟了撒哈拉沙尘在大气边界层中的许多特征; Joussame 等通过大气模式对大气中沙尘变化及大气幅射平衡进行了研究 (Joussame 1990; Tegen 1994); Nickovic (2001) 利用 SKIRO/Eta 模式和 Eta/NCEP 区域大气模式研究了沙尘在大气中的循环. 然而沙尘暴的起沙、传输、降尘是一个很复杂的过程, 受多种因素制约, 目前对此过程研究还处于模拟阶段, 至今尚未完全搞清沙粒从地表输送到大气过程、整个传输过程及最终的降尘过程. 国内通过光学粒子测量系统、粒子采样器 (仪) 及飞机探测和遥感探测等技术手段开展沙尘气溶胶粒子谱特征、理化特性及其时空分布特征等方面的研究较为普遍. 庄国顺 (2001) 利用 FA-3 型 Andersen 采样器对北京 2000 年 4 月 6 日沙尘暴进行了监测, 分析了沙尘暴期间沙尘气溶胶有关元素富集及组分来源, 给出了沙尘气溶胶质量浓度谱及其生消过程中谱分布的连续演变特征. 成天涛 (2005) 利用 PM SFssp 100 型激光粒子谱仪对浑善

达克沙地大气气溶胶进行了观测和数据统计分析, 初步得出不同天气条件下近地面沙尘气溶胶粒谱分布规律. 牛生杰 (2005) 将 APS-3310 型激光空气动力学气溶胶粒子谱仪安装在飞机上, 对中国西北沙漠地区上空气溶胶进行了探测; 结果显示, 高空沙尘气溶胶数浓度与下垫面状况密切相关, 沙漠地表上空的粒子数浓度高于植被覆盖较好的地区, 当在沙漠地区上空飞行轨迹为上升、平飞、下降时沙尘气溶胶粒子谱呈现出由单峰偏态、双峰、正态到单峰偏态等形式的演变. 这些研究虽然在沙尘暴监测方面已取得了显著的进展, 但沙尘监测是宏观和大范围的, 缺乏近地面范围内的定量和系统研究. 因为近地面 50 m 是雷达监测盲区, 又是沙尘暴发展变化剧烈、对社会经济与人类生存产生危害的主要区域, 加强对近地面沙尘暴系统的定量观测, 研究近地面沙尘暴气溶胶时空变化将对沙尘暴的预警预报、防治减灾具有重要的现实意义.

借助自行研制的近地面沙尘暴监测系统, 本研究组对沙尘暴气溶胶进行了监测, 考察了近地面沙尘暴发展规律, 填补了国内该项研究的空白 (张锦春等, 2008). 本研究中通过对不同下垫面条件下和不同高度层次上的沙尘暴气溶胶浓度时空变化特征进行分析, 探讨民勤沙尘源区风速、沙尘暴持续时间及下垫面条件对沙尘气溶胶浓度的影响, 旨在为区域荒漠化防治及生态防护林建设提供理论依据.

2 研究区概况及研究方法 (Study area and methods)

2.1 研究区概况

民勤西沙窝地处巴丹吉林沙漠东南缘, 地理位置为 $E102^{\circ}59'05''$, $N38^{\circ}34'28''$. 气候干旱, 年均降水 113.8 mm , 年均气温 7.6°C , 极端最高气温 39.4°C , 年均风速 $2.45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 瞬时最大风速 $22.35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 主导风向为 NW, 每年 8 级以上大风日数为 27.7 d. 土壤以风沙土为主, 风蚀严重. 常年来, 由于石羊河上游来水逐年减少, 地下水超量开采, 地下水位已下降至 20 m 以下. 荒漠植被以白刺、梭梭为主, 植被衰败、退化现象较为严重, 生态环境非常脆弱, 是我国干旱区荒漠化最严重的地区之一 (张克存等, 2004). 由于干燥的气候、不稳定的空气状态、稀疏的植被、丰富的沙源、因缺水和滥垦造成的疏松的地表物质使该区域成为我国境内的强沙源区中心之一, 也是入境沙尘暴的必经之路 (钱正安等,

1997, 邱新法等, 2001).

2.2 研究设备与布设

借助建立于民勤西沙窝的近地面沙尘暴监测系统对沙尘暴进行监测(图1). 沙尘暴监测系统包括沙尘暴观测塔、沙尘收集设备及小气候观测站. 沙尘暴观测塔3座, 塔高50 m, 沿主风方向呈直线穿越民勤绿洲和绿洲外围的沙漠, 分别位于绿洲区、绿洲边缘区和沙漠区. 绿洲区和绿洲边缘区塔间距

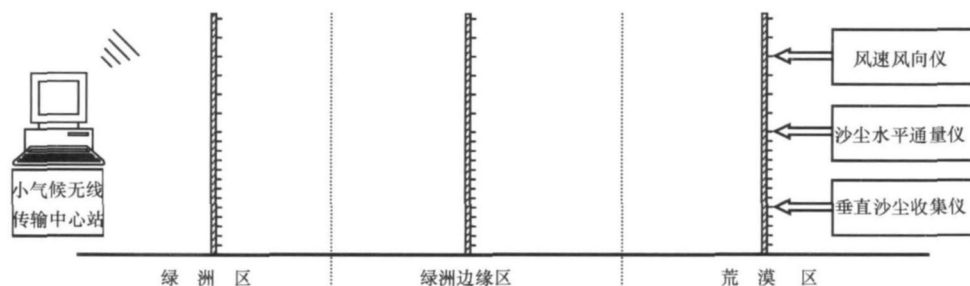


图1 近地面沙尘暴监测系统组成与布设

Fig. 1 The components and arrangement of the near ground sandstorm monitoring system

利用安装在沙尘暴观测塔上的风向跟踪滤袋式沙尘水平通量仪进行水平沙尘的收集与取样(赵明等, 2006). 该收集仪将双层纸质沙尘过滤膜制成袋状安装在可以跟踪风向的外壳内, 实现收集面正对风向的条件下自动采集沙尘. 利用滤袋的面积与进沙口面积之比控制滤袋对风的阻力. 经试验在风速为 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下, 滤袋面积与进沙口面积比值大于64时, 滤袋对气流的阻力趋近于零.

2.3 样品收集与数据处理

利用沙尘水平通量和通过沙尘收集仪气流的体积可计算出沙尘暴气溶胶的质量浓度. 取样前, 将双层滤膜袋在恒温恒湿箱内干燥12 h以上. 利用精密电子天平(精密度为0.0001 g)进行称重. 取样后, 将双层滤膜袋的收集样袋从仪器中取出, 带回实验室在 80°C 下烘干20 h后称重. 沙尘暴气溶胶的质量浓度 $C (\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$ 的计算公式为:

$$C = (W_2 - W_1) / (u \times H \times M) \quad (1)$$

式中, W_2 为采样后滤袋与沙尘样的质量 (mg), W_1 为采样前滤袋的质量 (mg), u 表示沙尘暴过程中的平均风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), H 表示沙尘暴过程持续时间 (s), M 表示沙尘收集仪集沙口横断面积 (m^2).

自2006年1月底开始, 对民勤沙尘源区沙尘暴过程进行长期定位观测. 每次沙尘暴结束后1~2 d内完成现场采样, 同时下载获取每次沙尘暴过程的风速数据, 利用近地表风速计算不同季节不同下垫

为3.5 km, 中间栽植以乔木为主的农田防护林和以灌木为主的防风固沙林; 绿洲边缘区和沙漠区塔间隔4.8 km, 中间分布着人工防风固沙林及天然灌木林. 每座塔均按相同梯度(25 m内每2 m一个梯度, 25 m以上每4 m一个梯度)装有沙尘水平通量仪和垂直降尘收集仪及风速风向仪, 能够采集一次沙尘暴的沙通量和降尘量及整个沙尘暴过程中不同高度的实时风速和风向(张锦春等, 2008).

面条件下的地表粗糙度, 分析风速、地表粗糙度与沙尘暴气溶胶浓度的关系. 地表粗糙度计算公式为:

$$\log Z_0 = (\lg Z_2 - A \lg Z_1) / (1 - A) \quad (2)$$

式中, Z_0 为地表粗糙度 (cm), Z_1 、 Z_2 为2个不同高度 (m); $A = V_1 / V_2$, 其中 V_1 、 V_2 分别为高度 Z_1 、 Z_2 处的风速.

共采集到2006年度16次典型沙尘暴样品及风速数据. 由于仪器安装或大雨天气的影响, 有3次沙尘暴数据未能完整采集, 故未作统计. 全部数据分析使用Microsoft Excel 2000办公软件进行处理.

3 结果 (Results)

3.1 沙尘暴气溶胶浓度季节分布

沙尘暴的发生会导致大气气溶胶浓度的急剧增加, 很大程度上影响空气质量. 利用民勤荒漠、绿洲边缘、绿洲3种下垫面条件下的沙尘暴观测数据统计沙尘暴气溶胶浓度平均值, 按季节分类统计沙尘暴气溶胶浓度见图2. 结果表明: 春季沙尘暴发生频率最高, 沙尘暴气溶胶浓度最大, 观测高度范围内平均沙尘浓度为 $14.61 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 为沙尘暴年均值的1.1倍; 夏季气溶胶浓度则随着沙尘暴的减少而减低, 平均 $12.49 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 为年均值的0.9倍; 秋季未发生沙尘暴; 冬季沙尘暴发生频繁增加, 气溶胶浓度回升, 平均为 $9.82 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 为年均值的0.7倍. 不同季节沙尘暴气溶胶浓度变化幅度春季最

大,在 8.37~66.35 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间;夏季有明显减小,为 7.97~51.36 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$;冬季更小,只有 6.33~30.40 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

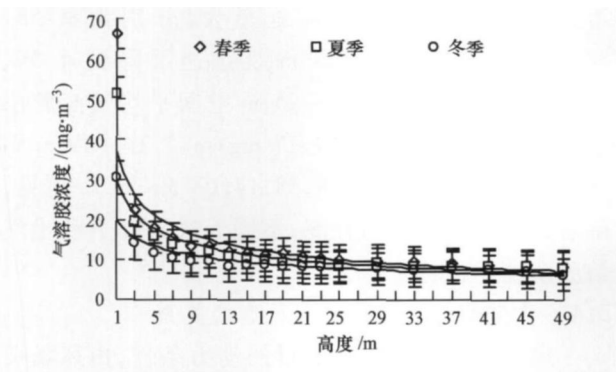


图 2 沙尘暴气溶胶浓度季节变化

Fig 2 Seasonal variations in sandstorm-aerosol concentrations

相同季节内,沙尘暴气溶胶浓度均随观测高度的增加而减小,浓度曲线遵循幂函数变化特征.通过回归分析,季节气溶胶浓度随高度变化的方程分别为:

春季: $y_1 = 37.169 x^{-0.510} (R^2 = 0.8584)$ (3)

夏季: $y_2 = 29.760 x^{-0.463} (R^2 = 0.8344)$ (4)

冬季: $y_3 = 19.961 x^{-0.361} (R^2 = 0.8433)$ (5)

式中, y 为气溶胶浓度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); x 为观测高度 (m).

回归分析结果显示,不同季节的沙尘暴气溶胶浓度在近地面 1 m 处最大,分别为春季 66.35 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、夏季 51.36 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、冬季 30.40 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 3 m 处已下降到 22.39、19.71、14.15 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 5~25 m 空间平均气溶胶浓度只有 12.49、10.86、9.14 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 29~49 m 则更小,为 9.00、8.42、7.35 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 季节气溶胶浓度随着观测高度的升高而趋于平稳.

3.2 不同下垫面条件下沙尘暴气溶胶浓度变化特征

下垫面状况是影响沙尘暴过程的地表因素,沙尘暴气溶胶浓度随下垫面条件的变化存在较大的差异.通过对民勤沙漠、绿洲边缘、绿洲 3 种下垫面条件下不同观测高度层次上的平均值进行统计分析(图 3),结果显示:随着沙漠向绿洲的过渡,沙尘暴气溶胶浓度明显降低,沙漠下垫面条件下平均为 21.07 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,绿洲边缘为 12.09 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,到绿洲内部只有 6.49 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

在沙漠和绿洲边缘下垫面条件下,气溶胶浓度随观测高度的上升呈显著下降趋势,下降的规律遵循幂函数关系,回归方程为:

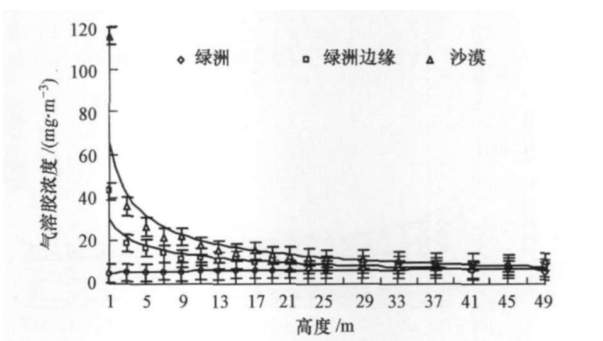


图 3 不同下垫面条件下沙尘暴气溶胶浓度变化

Fig 3 Sandstorm-aerosol concentrations above different ground surfaces

沙漠: $y_4 = 65.438 x^{-0.648} (R^2 = 0.906)$ (6)

绿洲边缘: $y_5 = 30.075 x^{-0.463} (R^2 = 0.904)$ (7)

式中, y 为气溶胶浓度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); x 为观测高度 (m).

回归结果显示,沙漠和绿洲边缘气溶胶浓度在 1 m 处呈现最大值,分别为 115.09 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 43.27 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 3 m 处下降为 36.13、19.13 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 5~25 m 平均气溶胶浓度为 16.96、11.57 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 29~49 m 更小,平均只有 10.58、8.07 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 沙漠及绿洲边缘气溶胶浓度随着观测高度的升高而趋于平稳.

在绿洲下垫面条件下,气溶胶浓度随高度增加呈缓慢上升趋势,变化特征也遵循幂函数关系,回归方程为:

绿洲内部: $y_6 = 5.223 x^{0.096} (R^2 = 0.742)$ (8)

式中, y 为气溶胶浓度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); x 为观测高度 (m). 绿洲下垫面曲线变化平稳,变幅很小,几乎呈直线分布.

3.3 不同天气过程沙尘气溶胶浓度变化特征

对于不同的沙尘天气过程,沙尘气溶胶浓度有明显的变化.依据沙尘暴分级标准(中国气象局,2003),利用民勤沙尘源区春夏季典型沙尘暴气溶胶浓度观测数据,统计出荒漠、绿洲边缘及绿洲区 8 次沙尘暴气溶胶浓度的平均值,并以相应的春夏季 3 次扬沙浮沉天气条件下的气溶胶浓度平均值作对比(图 4).分析结果表明:不同天气过程中扬沙浮沉天气条件下沙尘气溶胶浓度最小,为 3.07 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$;沙尘暴天气次之,为 13.56 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$;强沙尘暴天气最大,为 18.80 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$.不同的天气过程由于受风速及空间层次的影响,气溶胶浓度变化也存在着较大的差异,扬沙浮沉天气条件下气溶胶浓度变化幅度最小,在 2.22~9.58 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间变化;沙尘暴天气次之,为 7.76~58.38 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,强沙尘暴天气最大,为 13.77~59.99 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

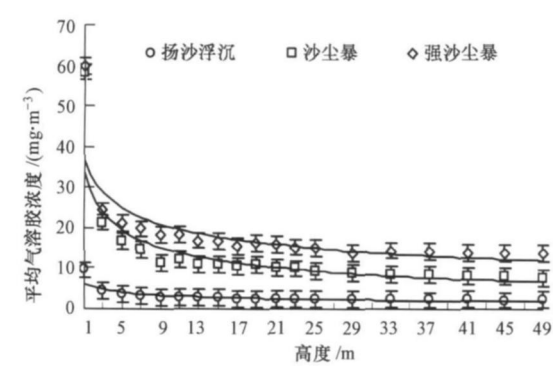


图 4 不同强度沙尘暴气溶胶浓度变化

Fig. 4 Sandstorm-aerosol concentrations in different intensities

不同天气条件下沙尘气溶胶浓度随观测高度升高呈下降趋势, 浓度曲线遵循幂函数, 回归方程为:

扬沙天气: $y_7 = 6.566x^{-0.405}$ ($R^2 = 0.8708$) (9)

沙尘暴: $y_8 = 36.004x^{-0.539}$ ($R^2 = 0.8857$) (10)

强沙尘暴: $y_9 = 38.381x^{-0.380}$ ($R^2 = 0.8285$) (11)

式中, y 为气溶胶浓度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); x 为观测高度 (m).

扬沙、沙尘暴和强沙尘暴天气条件下沙尘暴气溶胶浓度在近地面 1 m 处最大, 分别为 9.58 、 58.38 、 $59.99 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 3 m 处迅速下降到 4.59 、 21.36 、 $24.22 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 5~25 m 空间平均气溶胶浓度分别为 2.76 、 11.60 、 $17.17 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 29~49 m 则平缓下降, 平均为 2.30 、 8.38 、 $14.03 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 可见, 随着观测高度层次的升高, 不同天气条件下沙尘气溶胶浓度变化越易平缓.

3.4 沙尘暴气溶胶浓度与风速的关系

风是沙尘暴发生和运行的动力条件, 由风场引发的沙尘气溶胶浓度变化是沙尘暴强弱及其危害程度的直接体现. 通过民勤沙漠、绿洲边缘和绿洲 3 种下垫面条件下不同高度层次上的沙尘暴气溶胶浓度随风速关系的分析 (图 5). 结果显示: 在 3 种下垫面条件下不同高度层次上沙尘暴气溶胶浓度均随风速的增大而增高, 尤其在 1 m 高处沙尘暴气溶胶浓度随风速迅速增加. 通过回归分析多数情况下较严格地遵循一种指数关系 (表 1).

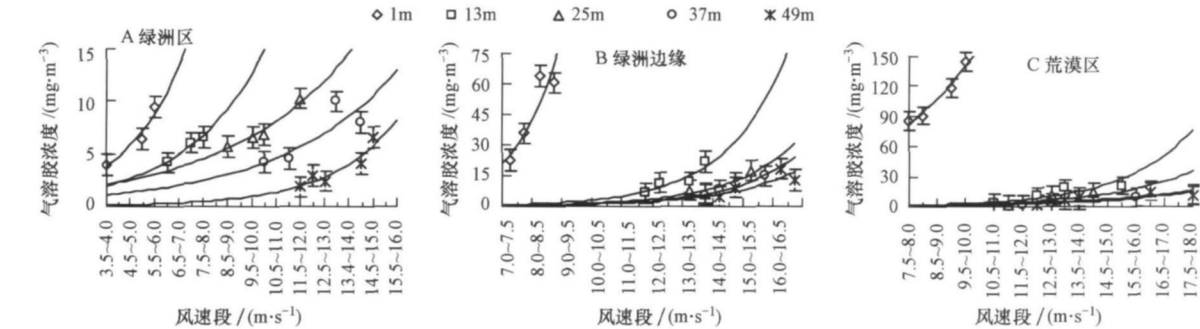


图 5 不同下垫面条件下沙尘暴气溶胶浓度与风速的关系

Fig. 5 Relationship between sandstorm-aerosol concentrations and wind velocity for different underlying surface conditions

表 1 三种下垫面不同层次沙尘暴气溶胶浓度与风速的关系方程

下垫面	不同观测层次的关系方程				
	1 m	13 m	25 m	37 m	49 m
沙漠	$Y = 72.078 e^{0.131X}$ ($R^2 = 0.971$)	$Y = 1.076 e^{0.203X}$ ($R^2 = 0.822$)	$Y = 0.924 e^{0.174X}$ ($R^2 = 0.701$)	$Y = 0.656 e^{0.148X}$ ($R^2 = 0.940$)	$Y = 1.066 e^{0.129X}$ ($R^2 = 0.634$)
绿洲边缘	$Y = 17.375 e^{0.353X}$ ($R^2 = 0.868$)	$Y = 0.607 e^{0.24X}$ ($R^2 = 0.820$)	$Y = 0.351 e^{0.223X}$ ($R^2 = 0.821$)	$Y = 0.220 e^{0.23X}$ ($R^2 = 0.981$)	$Y = 0.280 e^{0.205X}$ ($R^2 = 0.733$)
绿洲	$Y = 3.100 e^{0.208X}$ ($R^2 = 0.958$)	$Y = 1.654 e^{0.156X}$ ($R^2 = 0.975$)	$Y = 1.876 e^{0.098X}$ ($R^2 = 0.953$)	$Y = 0.973 e^{0.103X}$ ($R^2 = 0.795$)	$Y = 0.093 e^{0.179X}$ ($R^2 = 0.911$)

绿洲区各层次上沙尘暴气溶胶浓度随风速的变化曲线分布基本均匀, 呈现出曲线陡度随观测层次增高而降低的趋势. 不同层次上沙尘暴气溶胶浓

度随风速增加的速率不同. 近地面 1~13 m 高度受防护林作用的影响, 风速较小, 风速每增加 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 气溶胶浓度增幅由 1 m 处的 $2.31 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 减

小到 13 m 处的 $2.12 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 即随观测高度的增加, 沙尘暴气溶胶浓度随风速的变化幅度依次降低; 25 m 以上风速受防护林影响较小, 沙尘暴气溶胶浓度增幅随风速的增幅在 25 m 处为 $2.42 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 37m 处为 $2.39 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 49 m 处达到最小, 为 $2.18 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 即随着观测高度的增加, 气溶胶浓度增幅出现均匀的递减趋势。

沙漠区和绿洲边缘沙尘暴气溶胶浓度随风速的变化曲线分布不均匀, 根据曲线陡度分为 2 组, 一组为 1~13 m 层次, 另一组为 13 m 以上层次。1~13 m 范围内沙尘暴气溶胶浓度及其变化幅度较大, 沙漠区气溶胶浓度在 $81.14 \sim 143.82 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, 绿洲边缘气溶胶浓度在 $22.57 \sim 63.87 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间。13 m 以上范围内沙尘暴气溶胶浓度及其变化幅度较小, 沙漠区气溶胶浓度处于 $2.23 \sim 30.46 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, 绿洲边缘气溶胶浓度范围只有 $2.32 \sim 21.84 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 沙尘暴气溶胶浓度较 1~13 m 层次明显减小, 且浓度增幅明显变缓并随着观测层次的增高浓度变化趋于平稳。

3.5 地表粗糙度对沙尘暴气溶胶浓度的影响

下垫面状况主要控制沙尘暴天气的起沙, 它作

为沙尘物资的供体主要通过影响风场的运动间接影响沙尘暴的运动。地表粗糙度是定量描述下垫面状况的重要指标, 地表粗糙度由于地形的起伏状况、地表物质的覆盖程度及土壤结构不同而随着季节的更替发生较大的变化。在对民勤沙尘暴风速数据统计的基础上, 按季节和下垫面类型计算地表粗糙度。分析沙尘暴气溶胶浓度与地表粗糙度的关系表明 (表 2), 地表粗糙度对沙尘暴气溶胶浓度具有一定的影响。从沙漠到绿洲, 地表粗糙度由 0.023 m 增加到 2.121 m , 沙尘暴气溶胶浓度由 $19.225 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 减小为 $6.247 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 沙尘暴气溶胶浓度随地表粗糙度增加而迅速降低, 二者呈现较好的负比例关系。季节变化中, 春夏季地表裸露, 地表粗糙度较小, 年平均分别为 0.579 m 和 0.636 m ; 夏季为植被生长期, 地表粗糙度迅速增大, 年平均达到 1.010 m 。而沙尘暴气溶胶浓度以地表粗糙度最小的春季最大, 为 $14.592 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 地表粗糙度最大的夏季次之, 为 $12.677 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 以冬季最小, 只有 $9.799 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

表 2 沙尘暴气溶胶浓度与地表粗糙度的关系

季节	沙尘暴气溶胶浓度 / ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)				地表粗糙度 / m			
	沙漠	绿洲边缘	绿洲	平均	沙漠	绿洲边缘	绿洲	平均
春季	23.128	13.938	6.711	14.592	0.005	0.043	1.689	0.579
夏季	20.021	11.892	6.119	12.677	0.050	0.123	2.858	1.010
冬季	14.526	8.962	5.910	9.799	0.014	0.079	1.816	0.636
平均	19.225	11.597	6.247	12.356	0.023	0.082	2.121	0.742

4 讨论 (Discussion)

4.1 沙尘暴气溶胶浓度的变化特征

从季节变化看, 不同季节由于地表状况的差异, 风场的携沙能力不同, 沙尘暴发生频率及其气溶胶浓度也表现出明显的季节分布特征。春季干旱少雨, 气温回升迅速且温度偏高, 使解冻的地表土层疏松, 为沙尘暴发生提供了丰富的沙尘源, 沙尘易随风而起, 沙尘暴气溶胶沙尘浓度最大; 夏季林木展叶、农田作物旺盛生长提高了地表盖度, 沙尘释放受到抑制, 沙尘暴气溶胶浓度持续降低; 秋季降水量增多, 土壤及空气湿度增大, 再次抑制了地表沙尘的释放, 气溶胶浓度达到全年最低状态。分析结果显示: 民勤沙尘暴气溶胶浓度季节分布与沙

尘暴发生频率是相一致的 (张凯等, 2005)。春季是沙尘暴多发季, 沙尘暴气溶胶平均浓度高达 $14.61 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 夏季沙尘暴有所减少, 沙尘暴气溶胶浓度平均为 $12.49 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 秋季未发生沙尘暴; 冬季沙尘暴发生率开始增加, 气溶胶浓度回升到 $9.82 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。气候的季节变化促使了地表物质的形成, 加之风场的外应力作用, 使沙尘暴发生及其气溶胶浓度呈现明显的季节变化特征。

下垫面作为沙尘物资的供体, 由于地表覆盖、土壤松散程度不同, 加之风力的作用, 使地表沙尘释放进入大气中的沙尘量不同, 从而引起沙尘暴气溶胶浓度的较大变化。沙漠下垫面植被盖度小, 土壤松散, 在强大的风力作用下易形成风沙流, 地表粗沙粒也被卷入大气使沙尘暴气溶胶浓度高达

21.07 mg m^{-3} ; 绿洲受人工防护林的保护及农田作物的覆盖而降低了风速, 且土壤结构紧密, 使得地表沙尘释放量较小, 气溶胶浓度最小, 只有 6.49 mg m^{-3} ; 绿洲边缘下垫面状况介于绿洲和沙漠之间, 沙尘暴气溶胶浓度为 12.09 mg m^{-3} . 可见, 随着沙漠向绿洲的过渡, 沙尘暴气溶胶浓度有明显的降低. 这主要是由于植被盖度和植被高度引起的, 显示了植被, 特别是人工防护林对沙尘暴阻截和消减作用是十分显著的.

高空气流的气压梯度变化是形成风场的主要原因, 风速的强弱直接引起不同强度沙尘天气的发生, 从而导致了沙尘气溶胶浓度的显著变化. 从不同强度的沙尘暴气溶胶浓度比较分析来看, 引起强沙尘暴平均风速达到 16.11 m s^{-1} , 沙尘气溶胶浓度平均为 18.80 mg m^{-3} ; 沙尘暴平均风速为 15.05 m s^{-1} 时, 平均沙尘浓度为 13.56 mg m^{-3} ; 扬沙浮尘天气风速较小, 平均沙尘浓度只有 3.07 mg m^{-3} . 分析结果证明, 风是沙尘发生和运行的动能, 风速越大, 其起沙和携沙能力越强, 沙尘暴越强烈, 沙尘暴气溶胶浓度越大.

4.2 沙尘暴气溶胶浓度的空间分布

大气沙尘粒子不仅受到风场作用发生远渡, 而且受本身重力作用往下沉落, 使近地面沙尘暴气溶胶浓度分布呈现垂直梯度分布特征; 即随着距地面高度的增加, 大气中沙尘含量减少, 而且大颗粒沙尘所占的比例越少 (蔡旭晖等, 2004; 刘明哲等, 2003). 民勤沙尘源区沙尘暴气溶胶浓度大体上随观测高度的升高而减小, 这与前人分析的沙尘离子含量和粒度的梯度变化相吻合. 观测分析结果显示: 不同季节、不同强度、不同下垫面条件下的沙尘暴气溶胶浓度曲线遵循幂函数变化规律. 沙尘浓度在季节和强度变化中随高度的增加而减小, 近地面 1 m 处沙尘暴气溶胶浓度最大, 如春季高达 66.35 mg m^{-3} , 为观测高度层次平均浓度的 4.54 倍, 沙尘暴天气高达 58.38 mg m^{-3} , 为平均浓度的 4.31 倍. 3 m 以上沙尘暴气溶胶浓度迅速较小, 并随着观测高度层次的升高, 气溶胶浓度变化曲线越易平缓. 不同下垫面条件受防护林的影响差异较大, 观测到的沙尘暴气溶胶浓度梯度曲线符合幂函数变化, 但随观测高度变化的趋势不同, 且沙尘浓度增减幅度差异较大. 沙漠和绿洲边缘气溶胶浓度随观测高度的增加而减小, 不同高度层次上沙尘浓度变化幅度较大, 曲线随高度增加呈明显的下降趋势; 绿洲内

部沙尘浓度随观测高度增加而增大, 不同观测层次之间沙尘浓度变化幅度很小, 几乎呈直线分布, 并随高度增加呈缓慢上升趋势. 随着观测高度的升高, 沙漠和绿洲边缘气溶胶浓度逐渐下降及绿洲内部气溶胶浓度的缓慢上升, 图 2 中 3 条曲线在 41 m 高度处几乎重合, 说明近地面 40 m 范围内沙尘气溶胶浓度受下垫面的影响较为显著; 而 40 m 以上高空气溶胶浓度则主要受大范围的沙尘输送过程的影响.

4.3 影响沙尘暴气溶胶浓度变化的因素

下垫面状况和风场情况是沙尘暴天气发生的主要条件. 下垫面状况主要控制的是沙尘暴天气的起沙, 而风力控制的是沙尘暴的运动. 从沙尘暴过程的水平梯度分析, 不同下垫面地表粗糙度及风速大小不同, 沙尘暴气溶胶浓度表现出较大的差异. 沙尘暴从荒漠区到绿洲边缘, 地表粗糙度增加了 0.059 m , 风速减弱了 4.1% , 沙尘气溶胶平均浓度由 19.23 mg m^{-3} 减小到 11.60 mg m^{-3} ; 绿洲内部受防护林影响较大, 地表粗糙度增加到 2.121 m , 风速已减到 30.45% , 沙尘暴气溶胶平均浓度只有 6.25 mg m^{-3} . 沙尘暴气溶胶浓度表现为随地表粗糙度的增大和风速的降低而增加.

在空间梯度上, 沙尘暴气溶胶浓度均随风速的增大而增高, 各层次沙尘浓度随风速增加的幅度不同, 且层次越高增幅越低. 沙漠和绿洲边缘下垫面条件下, 沙尘暴气溶胶浓度随风速的变化曲线极不均匀, 沙尘气溶胶浓度及其变化幅度在近地面 1 m 处最大; 主要是由于该层次就地起沙, 沙尘粒径最大, 曲线陡度明显区别于其它层次, 表明风速对近地表沙尘暴气溶胶浓度影响强烈. 13 m 以上观测层次沙尘气溶胶浓度及增幅明显减小, 并随着观测层次的增高浓度变化趋于平稳. 绿洲主要受防护林的影响较大, 在 9 m 的有效防护高度范围内, 能产生大量的降尘 (张锦春等, 2008), 从而使防护范围内的沙尘气溶胶浓度减小, 近地面沙尘浓度明显低于荒漠和绿洲边缘, 表现出各层次沙尘气溶胶浓度随风速的变化曲线分布均匀.

时间梯度上, 春季地表裸露, 地表粗糙度最小, 沙尘暴气溶胶浓度最大; 夏季地表粗糙度迅速增加, 沙尘气溶胶浓度缓慢减小; 冬季地表粗糙度减小, 沙尘气溶胶浓度则开始缓慢增加. 地表粗糙度与沙尘暴气溶胶浓度在季节变化上存在一定的关系, 变化趋势不明显, 这主要是大气环流作用所致.

民勤处于西伯利亚冷高压寒潮向我国南方扩散的路径上,地面为沙漠地貌环境,地表裸露,沙面增温快,春夏季气温迅速增加,使下层空气获得加速度而上升,促使对流作用及湍流作用加强,形成以沙漠为中心的高温低压区,与西伯利亚冷高压形成明显的气流梯度(常兆丰等,1997),易引起沙尘暴的季节性发生。

5 结论 (Conclusions)

1) 民勤沙尘暴气溶胶浓度变化与沙尘暴发生频率、沙尘暴强度及下垫面条件有关。沙尘暴气溶胶浓度季节分布与沙尘暴发生频率相一致,即呈现出春高秋低的分布格局,春季最大,夏季次之,秋季最小,冬季又趋于回升;不同强度沙尘暴气溶胶浓度表现为强沙尘暴 > 沙尘暴 > 扬沙浮沉天气;随着沙漠、绿洲边缘向绿洲的过渡,沙尘暴气溶胶浓度呈现依次减小的趋势。

2) 民勤沙尘暴气溶胶浓度随观测高度的变化遵循幂函数规律,近地面 1 m 处沙尘暴气溶胶浓度最大,并随着观测高度层次的升高,气溶胶浓度变化曲线越易平缓。沙尘暴气溶胶浓度曲线在沙漠、绿洲边缘和绿洲 3 种下垫面条件下于 41 m 处几乎重合,可见近地面 40 m 范围内沙尘气溶胶浓度受下垫面的影响较为显著。

责任作者简介: 张锦春 (1971—),男,副研究员,主要从事于荒漠化防治方面的研究。

参考文献 (References):

蔡旭晖,陈家宜. 2004. 沙尘重粒子在对流边界层中的扩散模拟 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 43(6): 939—949

Cai X H, Chen J Y. 2004 Numerical simulation of heavy dust-particle dispersion in convective boundary layers [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis 43(6): 939—949(in Chinese)

常兆丰,刘虎俊,纪永福. 1997 河西走廊最近一次强沙尘暴的调查分析 [J]. 中国沙漠, 17(4): 110—114

Chang Z F, Liu H J, Ji Y F. 1997 Investigation and analysis to the latest strong sand dust storm occurred in Hexi corridor [J]. Journal of Desert Research, 17(4): 110—114(in Chinese)

成天涛,吕达仁,陈洪滨,等. 2005 浑善达克沙地沙尘暴气溶胶的粒谱特性 [J]. 大气科学, 29(1): 148—153

Cheng T T, Lu D R, Chen H B, et al. 2005. The size distribution of dust aerosol particles in Ongin Daga sand land China [J]. Journal of Atmospheric Sciences, 29(1): 148—153(in Chinese)

Joussame S. 1990. Three-dimensional simulations of the atmospheric cycle of desert dust particles using a general circulation model [J].

Geophys Res 95 1909—1941

刘明哲,魏文寿,周宏飞. 2003. 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, 23(4): 74—80

Liu M Z, Wei W S, Zhou H F. 2003. Physicochemical properties of atmospheric aerosol particles over sand-dust source areas and sedimentary areas in Asia [J]. Journal of Desert Research, 23(4): 74—80(in Chinese)

Nickovic S, George K, Anastassios P, et al. 2001. A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere [J]. Geophys Res 106 18113—18129

牛生杰,孙照渤. 2005 沙漠地区沙尘暴气溶胶物理特性的飞机观测 [J]. 高原气象, 24(4): 35—42

Niu S J, Sun Z B. 2005. Aircraft measurements of sand aerosol over Northwest China desert area in late spring [J]. Plateau Meteorology, 24(4): 35—42(in Chinese)

钱正安,蔡英,刘景涛,等. 2004. 中国北方沙尘暴研究的若干进展 [J]. 干旱区资源与环境, 18(1): 1—8

Qian Z A, Cai Y, Liu J T, et al. 2004. Some advances in dust storm researches in Northern China [J]. Journal of Arid Resources and Environment 18(1): 1—8(in Chinese)

钱正安,樊慧霞,瞿章,等. 1997. 我国西北地区沙尘暴的分级标准、个例谱及其统计特征 [A] // 方宗义编. 中国沙尘暴研究 [C]. 北京: 气象出版社, 1—10

Qian Z A, He H X, Qu Z, et al. 1997. Classification criterion of dust-storm in Northwest China. Case list and their statistical features [A] // Fang Z Y. China dust-storm research [C]. Beijing: Meteorological Press, 1—10(in Chinese)

钱正安,宋敏红,李万元. 2002 近 50 年来中国北方沙尘暴的分布和变化趋势分析 [J]. 中国沙漠, 21(2): 106—111

Qian Z A, Song M H, Li W Y. 2002. Analyses on distribution and variation trend of sand-dust storms in North China in recent 50 years [J]. Journal of Desert Research, 21(2): 106—111(in Chinese)

邱新法,曾燕,缪启龙. 2001. 我国沙尘暴的时空分布规律及其源地和移动路径 [J]. 地理学报, 56(3): 316—322

Qin X F, Zeng Y, Miao Q L. 2001. Temporal-spatial distribution as well as tracks and source areas of sand-dust storms in China [J]. Acta Geographica Sinica, 56(3): 316—322(in Chinese)

Schutz L. 1977. Saharan dust transport in the NE-tradewind region over the North Atlantic Ocean [J]. Proc Sym Radiat, 1: 68—70

史培军,严平,高尚玉,等. 2000. 我国沙尘暴灾害及其研究进展与展望 [J]. 自然灾害学报, 9(3): 72—77

Shi P J, Yan P, Gao S Y, et al. 2000. The dust storm desert in China and its research progress [J]. Journal of Natural Disasters, 9(3): 72—77(in Chinese)

Sviridenkov M A, Gillette D A, Isakov A A, et al. 1993. Size distributions of dust aerosol measured during the Soviet-American experiment in Tadzhikistan 1989 [J]. Atmospheric Environment 27: 2481—2486

Tegen I, Fung I. 1994. Modeling of mineral dust in the atmosphere. Sources, transport and optical thickness [J]. Geophys Res 99 22897—22914

Tegen I, Hollrig P, Chin M, et al. 1997. Contribution of different

- aerosol species to the global aerosol extinction optical thickness Estimates from Model Results [J]. Journal of Geophysical Research 102: 23895—23915
- 王炜, 方宗义. 2004 沙尘暴天气及其研究进展综述 [J]. 应用气象学报, 19(3): 366—381
- Wang W, Fang Z Y. 2004. Review of dust-storm weather and research progress [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 19(3): 366—381(in Chinese)
- Westphal D L, Toon O B, Carlson T N. 1987. A two-dimensional numerical investigation of the dynamics and microphysics of Saharan dust [J]. J geophys Res 192: 3027—3049
- 颜鹏, 毛节泰, 杨东贞, 等. 2004 临安一次沙尘暴过程影响气溶胶物理化学特性演变的初步分析 [J]. 第四纪研究, 24(4): 437—446
- Yan P, Mao J T, Yang D Z, *et al* 2004 The characterization of aerosol physical and chemical properties at Lin'an station during the transport of a sandstorm [J]. Quaternary Sciences 24(4): 437—446(in Chinese)
- 赵明, 方峨天, 张锦春, 等. 2006 风向跟踪滤袋式沙尘水平通量仪 [P]. 中国: 200610104691. 2007-03-21
- Zhao M, Fang E T, Zhang J C, *et al* 2006 The level dust flux instrument with filter bags of tracking wind direction [P]. China 200610104691. 2007-03-21(in Chinese)
- 张锦春, 赵明, 方峨天, 等. 2008 民勤沙尘源区近地面降尘特征研究 [J]. 环境科学研究, 21(3): 17—21
- Zhang J C, Zhao M, Fang E T, *et al* 2008 The study on character of dustfall near the ground in Minqin dust source regions [J]. Research of Environmental Sciences 21(3): 17—21(in Chinese)
- 张凯, 高会旺, 张仁健, 等. 2005. 我国沙尘的来源、移动路径及对东海海域的影响 [J]. 地球科学进展, 22(6): 627—636
- Zhang K, Gao H W, Zhang R J *et al* 2005. Sources and movement routes of sand-dust aerosols and their impact probabilities on China seas in 2000—2002 [J]. Advance in Earth Sciences 22(6): 627—636(in Chinese)
- 张克存, 屈建军, 马中华. 2004 近 50 年来民勤沙尘暴的环境特征 [J]. 中国沙漠, 24(3): 257—260
- Zhang K C, Qu J J, Ma Z H. 2004. Environmental characteristics of sandstorm in Minqin county in recent 50 years [J]. Journal of Desert Research, 24(3): 257—260(in Chinese)
- 张小曳. 2007 中国大气气溶胶及其气候效应的研究 [J]. 地球科学进展, 22(1): 12—16
- Zhang X Y. 2007. Aerosol over China and the climate effect [J]. Advances in Earth Science, 22(1): 12—16(in Chinese)
- 中国气象局. 2003. 地面气象观测规范 [M]. 北京: 气象出版社, 20—32
- Meteorological Bureau of China 2003. Criterion of ground meteorological observation [M]. Beijing Meteorological Press 20—32 (in Chinese)
- 庄国顺, 郭敬华, 袁蕙, 等. 2001. 2000年我国沙尘暴的组成、来源、粒径分布及其对全球环境的影响 [J]. 科学通报, 46(3): 191—197
- Zhuang G S, Guo J H, Yuan H, *et al* 2001. Composition source and size-distribution of Chinese sand-dust storm and impact on global environment in 2000 [J]. Chinese Science Bulletin, 46(3): 191—197(in Chinese)