

# 大连沙尘天气特征与浮尘观测标准研究<sup>1</sup>

宋 煜

(大连市专业气象台, 辽宁 大连 116001)

## 摘 要

我国现行基于风速和能见度两个指标的浮尘天气观测标准难以满足业务和科研需求。在现代监测条件下, 迫切需要制定一套基于器测项目的客观、定量沙尘天气观测规范和分级标准, 直接记录沙尘天气的程度和影响时间, 减小记录误差。

本文基于大连近 4 年的可吸入颗粒物自动监测和气象资料, 研究了大连浮尘天气中 PM<sub>10</sub> 分布状况以及自动能见度、相对湿度、风向风速等气象要素分布状况。在 PM<sub>10</sub> 年平均污染为 102.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  的状况下, 浮尘影响特征明显, 质量浓度在近期平均状况下突然升高, 浮尘天气日平均和过程平均 PM<sub>10</sub> 浓度均超过 300  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 并且平均累积时间超过 16h; 相对湿度为 13–97%; 自动能见度监测在 1049–9002m 之间。频率最多的风向为北风, 风速在 0–12m/s 之间。

经过综合分析, 对比韩国和我国环保部门的基于颗粒物浓度的沙尘天气分级标准, 提出了沙尘暴下游台站的浮尘天气新观测标准建议: 浮尘天气为远处尘沙经高空气流传播而来, 本站 PM<sub>10</sub> 质量浓度在近期平均状况下突然升高, 并且小时平均浓度超过 300  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  达到 6h; 或者小时平均浓度超过 600  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  持续时间达到 2h; 或者小时平均浓度超过 420  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  的持续时间达到 4h; 同时本站相对湿度小于 80%, 自动能见度小于 10km (不界定风向和风速范围)。

基于颗粒物浓度的浮尘天气新标准建议既可以对远距离飘尘影响区进行定量评价, 又可与现有标准保持较好的一致性, 并可作为预测预报的依据, 有较强的实用性。此标准包含一个必要条件 (PM<sub>10</sub> 浓度在近期平均状况下突然升高) 和三个选择条件, 同时还规定了湿度和能见度等常规气象条件。对 25 个浮尘天气检验和 2005–2008 年逐日检验, 结果表明实用性很高, 可以修正人工观测漏记录或错误记录情况。

**关键词:** 浮尘天气, 特征, 可吸入颗粒物, 观测标准

沙尘暴由于其较强的致灾能力和较大的影响范围受到广泛关注<sup>[1–4]</sup>, 国内外学者对其强度的等级划分也做过较多研究, 但仅限于日平均值的对应分析, 并且多集中于风速和能见度两个指标<sup>[5–9]</sup>。该指标对沙尘源地及其附近区域具有较高的科学性, 但经过远距离输送后, 下游影响地区的浮尘标准相对模糊。地面气象观测规范<sup>[10]</sup>定义: “浮尘是指尘土、细沙均匀地悬浮在空中, 使水平能见度小于 10 km, 浮尘多为远处尘沙经上层气流传播而来, 或为沙尘暴、扬沙出现后尚未下沉的细粒悬浮空中而成”。在预报服务中采用的标准为<sup>[11]</sup>: “浮尘是指当天气条件为无风或平均风速 $\leq 3.0\text{m/s}$  时, 尘沙浮游在空中, 使水平能见度小于 10km 的天气现象”。浮尘与扬沙的区别在于“扬沙是指由于风大将地面沙尘吹到空中, 使空气相当混浊, 水平能见度在 1~10 km 以内”。在沙源地或附近的台站才会

<sup>1</sup> 本文发表在《中国沙漠》vol. 30, No. 5 (2010 年 9 月)

出现“风大将地面沙尘吹到空中”的现象，扬沙记录只应出现这些台站的记录中。在远离沙源地的影响区只应记录浮尘天气。但是考虑风速因素，当风速>3.0m/s 时诸多下游台站把浮尘记录成扬沙，存在混乱现象。

现行观测标准中除风速指标外，水平能见度由观测员利用目标物法观测,受人为、主观与客观条件影响强烈，如人的视力,环境光线照度等，易造成空、漏、错记情况。目前很多台站只有 6h 间隔的观测，甚至很多县级台站夜间无观测任务，由此产生浮尘观测的不连续和漏记现象。所以沙尘天气客观定量的观测标准仍是一个需要研究探讨的问题。

沙尘暴中“沙尘”的一个重要方面体现在空气中的含沙量,不同沙尘天气空气中沙尘的含量不同,相应造成大气的光学特性和遥感辐射特性发生显著变化,从而影响能见度、大气气溶胶光学厚度和地面辐射等。因此，除了观测能见度外，还可以通过卫星遥感、颗粒物监测、激光雷达气溶胶监测和浊度计等手段观测沙尘天气<sup>[12-14]</sup>。仪器测得的沙尘气溶胶含量更为客观、定量地反映沙尘天气的强度，与目测相比具有一定的优点。我国现行的环境空气质量标准以TSP和PM10为控制因子。杨青等人利用塔克拉玛干沙漠腹地塔中气象站5个月的PM10和能见度仪自动监测资料研究，给出强、中、弱沙尘暴等级的PM10浓度界限标准<sup>[15]</sup>。对受沙尘暴远距离输送影响的下游地区，相应标准研究较少。随着全国沙尘暴观测网的建立,对沙尘天气的监测手段有了很大的提高和发展。因此,在现代监测技术条件下,迫切需要制定与之相应的、基于器测项目的客观、定量沙尘天气观测规范和分级标准，通过直接记录沙尘天气的程度和影响时间减小记录误差,为继续深入研究沙尘问题、进行沙尘天气的监测预警提供科学的规范和标准。

我们在对大连浮尘天气研究的基础上<sup>[12, 16]</sup>，根据大连 PM10 颗粒物自动监测近 4 年的资料统计研究，结合气象要素分析，提出了基于 PM10 颗粒物自动监测的台站浮尘天气观测标准建议。

1 基于颗粒物浓度的现行国内外沙尘天气分级标准

1.1 韩国的沙尘天气分级和背景

2002年4月韩国环境部和气象厅制定了黄沙(沙尘天气) 强度预报标准及黄沙警报标准,并由气象厅发布黄沙预报及警报,具体内容见表1<sup>[17]</sup>。

表1 韩国黄沙强度预报标准及黄沙警报标准  
Tab 1 sand forecast and warning standards of Korea

| 黄沙强度预报标准 |                                                      | 发布警报类型                           |
|----------|------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 弱黄沙      | 因黄沙出现而使PM10小时平均浓度为200~300μg/m <sup>3</sup> 。         | 发布黄沙状况通报<br>发布黄沙注意警报<br>发布黄沙特别警报 |
| 一般       | 据估计因黄沙出现而使PM10小时平均浓度为300~500μg/m <sup>3</sup> 。      |                                  |
| 黄沙       | 因黄沙出现而使PM10小时平均浓度超过500μg/m <sup>3</sup> 并有可能持续2h以上。  |                                  |
| 强黄沙      | 因黄沙出现而使PM10小时平均浓度超过1000μg/m <sup>3</sup> 并有可能持续2h以上。 |                                  |

韩国将沙尘天气分为弱黄沙、一般黄沙和强黄沙三种,其标准以PM10 浓度取代了过去的能见度

标准, 环境学意义大于气象学意义。

(1) 韩国的沙尘天气分级与当地情况相适合, 韩国的各类黄沙天气一般与我国的“浮尘”天气相对应, 主要成分是沙尘暴源区通过远距离传输的细颗粒物。

(2) 韩国的沙尘天气分级和预警报标准主要考虑沙尘对人体健康的影响, 各级沙尘天气对应不同的户外活动限制级别。

(3) 对比我国现行观测标准, 此标准偏低。

1.2 我国环保部门执行标准

环保部门进行了多年的 PM10 自动监测, 规定在自动监测到  $PM_{10} \geq 600 \mu g/m^3$  且持续 2h 则启动 TSP 人工观测, 并且规定浮尘、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴为依次增强的沙尘天气。具体内容见表 2<sup>[13]</sup>。

表2 环保部门基于颗粒物浓度的沙尘天气分级标准 单位:  $\mu g/m^3$

Tab 2 sand-dust weather standard of environment department based on PM density

| 沙尘天气分级 | TSP 浓度限值(小时值)          | PM10 浓度限值(小时值)             | 持续时间     |
|--------|------------------------|----------------------------|----------|
| 浮尘     | 1000 $\leq TSP < 2000$ | 600 $\leq PM_{10} < 1000$  | 持续 2h 以上 |
| 扬沙     | 2000 $\leq TSP < 5000$ | 1000 $\leq PM_{10} < 2000$ | 持续 2h 以上 |
| 沙尘暴    | 5000 $\leq TSP < 9000$ | 2000 $\leq PM_{10} < 4000$ | 持续 1h 以上 |
| 强沙尘暴   | $TSP \geq 9000$        | $PM_{10} \geq 4000$        | 持续 1h 以上 |

按照此标准, 现行气象标准记录的浮尘天气将有近一半漏记, 此标准过高。

2 基于颗粒物浓度的浮尘天气研究

2.1 资料

资料来源于大连气象局观测场内布设的 RP-1400a 大气颗粒物(PM10)监测仪实时自动监测, 由每 5min 监测计算的逐小时平均资料; 自动能见度资料来自观测场内布设的芬兰 VAISALA 公司 FD-12 能见度仪, 由每分钟获得一个能见度数据计算小时平均; 气象资料来自同一观测场记录的天气、风向、风速、相对湿度、人工能见度逐时观测。时间长度为 2005-2008 年 4 年的逐时记录。

2.2 大连 PM10 平均特征

分析近 4 年的 PM10 逐时资料表明, 大连受冬季取暖期影响, 日变化特征明显(图 1a)。凌晨 4 时后供暖锅炉启动, PM10 浓度开始明显增大, 加之上班车辆出行高峰影响, 7、8 时前后 PM10 浓度达到最高峰; 之后开始呈波动状下降, 主要因为热力作用白天边界层增高, 污染物得到扩散, 到下午 14 时前后最低; 傍晚又开始增高, 到 21 时后下降。

季节变化特征也很明显(图 1b), 春季 PM10 平均浓度最高, 夏季最低。春季气候干燥, 风力大,

多受上游沙尘天气影响，易造成 PM10 较重污染；冬季污染次之，由逆温、静风等不利的气象条件造成污染物不能迅速扩散和迁移，加上冬季取暖期大气污染排放增加，使 PM10 浓度增大；夏季气温高，对流性天气及降水相对较多，对空气的净化作用比较明显，夏季污染最低；秋季污染高于夏季。大连 PM10 年平均浓度为  $102.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

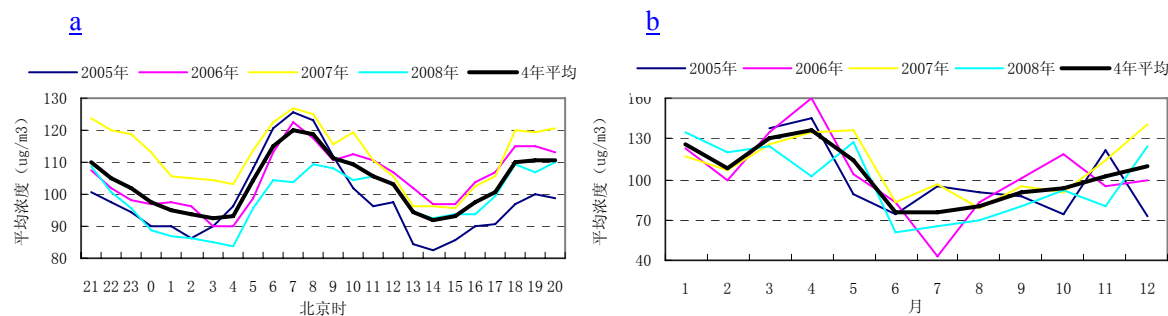


图 1 大连 PM10 日变化 (a) 和月变化 (b) 特征  
Fig 1 PM10 features in Dalian city. a: diurnal, b: monthly

### 2.3 浮尘天气 PM10 特征

大连位于东北亚沙尘暴影响区下游，附近无沙源，本地沙尘天气均由上游远距离传输而来的细颗粒物造成，应记录为浮尘。2005–2008 年共有 16 次沙尘过程、25 个浮尘天气。一般特征是，PM10 质量浓度突然上升，并且在 2–3 小时内持续升高，一般 2 小时浓度增加 3、4 倍以上。图 2 为 2005 年 4 月 10 日一次较弱沙尘影响过程 PM10 时间序列图，3–10 时为浮尘影响时段，特征明显。

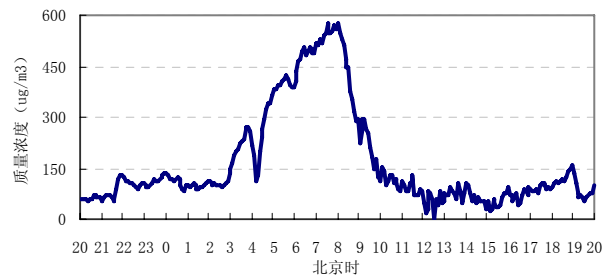


图 2 弱沙尘影响天气 PM10 典型特征  
Fig 2 typical PM10 distribution of weak sand-dust weather

统计 16 次过程、25 个浮尘天气的 PM10 记录（表 3），PM10 过程平均为  $456.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，过程平均最小值为  $292.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；日平均  $366.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。PM10 浓度  $>150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的持续时间平均 31.5h，最低累积时间 9h；PM10  $>300 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的持续时间平均 16.1h，最低累积时间 4h；PM10  $>420 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的持续时间平均 10.6h，最低持续时间 3h；PM10  $>600 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的持续时间平均 6h。（国家环境质量标准规定：日平均大于  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  为轻微污染；大于  $420 \mu\text{g}/\text{m}^3$  为重污染。）

表 3 浮尘过程 PM10 统计

Tab 3 PM10 statistics of dust-floating events

|    | 过程<br>平均<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 过程<br>最大<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 过程<br>最小<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 日平均<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | 日最大<br>( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) | PM10><br>150<br>$\mu\text{g}/\text{m}^3$<br>时间<br>(h) | PM10><br>300<br>$\mu\text{g}/\text{m}^3$<br>时间<br>(h) | PM10><br>420<br>$\mu\text{g}/\text{m}^3$<br>时间<br>(h) | PM10><br>600<br>$\mu\text{g}/\text{m}^3$<br>时间<br>(h) |
|----|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 平均 | 456.7                                    | 1176.4                                   | 78.4                                     | 366.4                               | 1027.7                              | 31.5                                                  | 16.1                                                  | 10.6                                                  | 6                                                     |
| 极大 | 1256.3                                   | 3154.1                                   | 125.3                                    | 1022.2                              | 3154.1                              | 56                                                    | 31                                                    | 24                                                    | 22                                                    |
| 极小 | 292.5                                    | 601.8                                    | 22                                       | 123.3                               | 464                                 | 9                                                     | 4                                                     | 3                                                     | 0                                                     |

2.4 浮尘天气气象要素特征

2.4.1 湿度、能见度特征

在浮尘天气中，能见度随着 PM10 浓度的升高而降低。相对湿度在浮尘天气开始时突然降低，2h 后接近或达到平均值，并且过程结束后仍维持较低水平，或者由于风向转为东南风，过程后期及过程结束后湿度升高。

我们统计每次过程中 PM10 小时平均浓度大于  $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$  时对应气象要素状况，先进行每次过程的平均、最大、最小要素统计，再进行所有过程的平均、最大、最小要素统计（表 4）。16 次过程平均相对湿度 42%，平均相对湿度最高为 77%，最小 24%；人工观测能见度在 800–26000m 之间；自动能见度平均 4153m，平均最大 5995m，平均最小 2556m。PM10 大于  $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$  时相对湿度在 13–97% 范围内；自动监测能见度在 1049–9002m 范围内。

表 4 PM10>250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  气象要素统计

Tab 4 meteorological elements statistics when PM10>250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

| PM10<br>>250<br>$\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 平均<br>相对<br>湿度% | 最大<br>相对<br>湿度% | 最小<br>相对<br>湿度% | 平均能<br>见度 m | 最高能<br>见度 m | 最低能<br>见度 m | 平均自<br>动能<br>见度 m | 最高自<br>动能<br>见度 m | 最低自<br>动能<br>见度 m | 平均<br>风速<br>m/s | 最大<br>风速<br>m/s | 最小<br>风速<br>m/s |
|------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 平均                                       | 42              | 72              | 25              | 10074       | 14000       | 6811        | 4153              | 6501              | 2591              | 4.2             | 7.3             | 1.6             |
| 极大值                                      | 77              | 97              | 61              | 21667       | 26000       | 15000       | 5995              | 9002              | 4348              | 8.3             | 12              | 5               |
| 极小值                                      | 24              | 43              | 13              | 5577        | 10000       | 800         | 2556              | 4605              | 1049              | 2.8             | 5               | 0               |

2.4.2 风向、风速特征

PM10>250  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  时对应风向状况统计表明：北风频率最高。西风、西北风、北风合计达 54.2%，为主导风向；东北风、东风、东南风合计占 29.8%，是对相对湿度提高有贡献的风向；南到西南风占 13.7%，静风占 2.3%。风速状况（表 4）显示，浮尘时平均风速 4.2m/s，平均最大 8.3 m/s，平均最小 2.8 m/s。风速在 0–12m/s 之间。因此大连产生浮尘天气时，风速较大，平均风速超过原来定义的 3.0 m/s，因下游浮尘天气主要由锋后下沉气流决定<sup>[8]</sup>，大连浮尘多伴随锋面过境后的偏北大风产生。

因此，综合考虑浮尘天气时，对应气象要素应该为：相对湿度小于 80%，自动能见度小于 10km，不界定风向和风速范围。

## 2.5 标准建议的制定

制定浮尘标准的基本原则要与现行的标准尽可能保持一致，以维持观测记录连续性，且便于实施。对于观测来说，浮尘天气要考虑影响强度和持续时间两个因素。PM10 也称为可吸入颗粒物，可直接进入人体，影响呼吸系统，其浓度的升高可导致患病率和死亡率的增加，即使相对较低的 PM10 浓度也能引起肺功能的改变，导致心血管和呼吸道(哮喘)疾病的增加，对人体健康危害很大，而且严重影响能见度。因此，浮尘的强度可以用 PM10 浓度表征；浮尘的持续时间越长，造成的危害越大，可以用达到某一浓度的持续时间来体现影响程度。

经过分析和反复试验，并兼顾环保部门的标准，我们初步将  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$  定为浮尘天气临界标准。并且规定：当 PM10 浓度在近期平均状况下突然升高，并且小时平均浓度超过  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$  达到 6h；或者小时平均浓度超过  $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$  持续时间达到 2h；或者小时平均浓度超过  $420 \mu\text{g}/\text{m}^3$ （重污染标准）的持续时间达到 4h，则可视为达到浮尘天气记录标准。

此标准包含一个必要条件（PM10 浓度在近期平均状况下突然升高）和三个选择条件。

## 3 应用检验

### 3.1 25 个浮尘天气检验

根据标准，设定条件 1 为：PM10 小时平均浓度超过  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$  达到 6h。条件 2：PM10 小时平均浓度超过  $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$  持续时间达到 2h。条件 3：PM10 小时平均浓度超过  $420 \mu\text{g}/\text{m}^3$  持续时间达到 4h。符合其中任一条件即认为是浮尘天气。

对 2005–2008 年 16 次过程、25 天检验结果显示（表略），25 个浮尘天气都符合条件，没有漏记录情况。其中条件 2 最为苛刻，只有 13 天符合；符合条件 3 有 19 天；符合条件 1 有 23 天。

### 3.2 2005–2008 年逐日检验

逐日检验 4 年中其余 1435 天，有 5 天满足条件标准。其中 2 天仅仅满足条件 2，为 2008 年春节期间燃放烟花爆竹造成的灰霾天气，可以排除；有 1 天符合条件 1，为严重灰霾天气，但不符合“PM10 质量浓度在近期平均状况下突然升高”的条件，予以排除；另外 2005 年 4 月 14 日和 2006 年 1 月 27 日，分别符合条件 2、3 和条件 1、2、3。根据天气系统判断，此两日也符合浮尘天气特征，属于人工观测漏记浮尘天气。因此根据制定的新标准条件判断浮尘天气，没有空记录情况。

在人工观测记录中，2006 年 3 月 25 日、2006 年 4 月 22 日大连记录浮尘天气，但不满足新标准的任何一个条件，根据天气系统判断也不是浮尘天气，应为灰霾天气，人工观测有错误记录情况；而根据本标准没有漏记录情况。

综合分析，基于 PM10 的台站浮尘观测标准实际可用性很高，基本没有空漏情况发生，并且可以修正人工观测漏记录或错误记录情况。

## 4 结论与建议

我国现行基于风速和能见度两个指标的浮尘天气观测标准难以满足业务和科研需求。在现代监测条件下,迫切需要制定一套基于器测项目的客观、定量沙尘天气观测规范和分级标准,直接记录沙尘天气的程度和影响时间,减小记录误差。

本文基于 PM<sub>10</sub> 和气象资料,研究了大连浮尘天气中 PM<sub>10</sub> 分布状况以及自动能见度、相对湿度、风向风速等气象要素分布状况。在 PM<sub>10</sub> 年平均污染为 102.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  的状况下,浮尘影响特征明显,质量浓度在近期平均状况下突然升高,浮尘天气日平均和过程平均 PM<sub>10</sub> 浓度均超过 300  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,并且平均累积时间超过 16h;相对湿度为 13-97%;自动能见度监测在 1049-9002m 之间。频率最多的风向为北风,风速在 0-12m/s 之间。

基于上述分析,提出了沙尘暴下游台站的浮尘天气新观测标准建议:浮尘天气为远处尘沙经高空气流传播而来,本站 PM<sub>10</sub> 质量浓度在近期平均状况下突然升高,并且小时平均浓度超过 300  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  达到 6h;或者小时平均浓度超过 600  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  持续时间达到 2h;或者小时平均浓度超过 420  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  的持续时间达到 4h;同时本站相对湿度小于 80%,自动能见度小于 10km(不界定风向和风速范围)。

基于颗粒物浓度的浮尘天气新标准建议既可以对远距离飘尘影响区进行定量评价,又可与现有标准保持较好的一致性,并可作为预测预报的依据,有较强的实用性。检验效果表明实用性很高,可以修正人工观测漏记录或错误记录情况。

## 参考文献 (References):

- [1]贾晓鹏 王海兵. 甘肃河西地区大气沙尘成分及影响分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1) :156-161.
- [2]许炯心. 黄土高原地区沙尘暴高发带的跃变现象[J]. 中国沙漠, 2008, 28 (1) :149 - 153.
- [3]岳平, 牛生杰, 刘晓云, 等. 浑善达克沙地春季沙尘暴期间沙尘启动及传输特性研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28 (2) :227-230.
- [4]陶健红. 西北地区沙尘天气的时空特征及影响因素分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29 (2) :327-334.
- [5]张广兴, 李霞. 沙尘暴观测及分级标准研究现状[J]. 中国沙漠, 2003, 23 (5) :587-588.
- [6]雷向杰, 王小宁, 李亚丽, 等. 对一些沙尘暴强度划分标准中存在问题的讨论[J]. 中国沙漠, 2006, 26 (2) : 273-277.
- [7]矫梅燕, 赵琳娜, 卢晶晶, 等. 沙尘天气定量分级方法研究与应用[J]. 气候与环境研究, 2007, 12 (3) :350-357.
- [8]邱玉 2, 牛生杰, 邹学勇, 等. 沙尘天气强度特征指数研究—以北京地区为例[J]. 自然灾害学报, 2008, 17 (1) :169-173.
- [9]Mc Naughton D L. Possible connect between anomalous anticyclones and sandstorms[J]. Weather, 1987, 42 (1) : 8 - 13.
- [10]中国气象局. 地面气象观测规范[S]. 北京:气象出版社, 2003:21-23.
- [11]中国气象局. 沙尘暴国家标准-沙尘暴天气等级 (GB/T 20480-2006) [S]. 北京:气象出版社, 2006:1-4.
- [12]宋煜, 黄艇, 程相坤, 等. 2006 年大连沙尘天气机理分析[J]. 气象, 2008, 34 (10) :34-39.
- [13]杨莲梅, 张广兴, 魏文寿, 等. 粒子散射系数在沙尘天气观测分级中的初步分析[J]. 中国沙漠, 2006, 26 (3) :380-383.
- [14]陶健红, 黄玉霞, 陆登荣. 河西走廊沙尘活动对兰州 PM<sub>10</sub> 浓度的影响及其评估[J]. 中国沙漠, 2007, 27 (4) :672 - 676.
- [15]杨青, 杨莲梅, 张广兴, 等. 能见度与空气质量的关系研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26 (2) :278-282.
- [16]宋煜, 曲晓波, 隋洪起, 等. 大连沙尘天气及预报模型分析[J]. 气象, 2008, 34 (11) :54-61.
- [17]万本太, 康晓风, 张建辉, 等. 基于颗粒物浓度的沙尘天气分级标准研究[J]. 中国环境监测, 2004, 20 (3) :8-11.