

2006年大连沙尘天气机理分析

宋煜¹ 黄艇¹ 程相坤¹ 李丹²

(1. 辽宁省大连市气象局, 大连 116001; 2. 大连市环境监测中心)

提 要: 应用颗粒物质量浓度、降尘、卫星遥感以及激光雷达气溶胶消光系数监测等资料分析, 结合沙尘天气物理量场分析, 揭示出大连沙尘天气特征和动力机制。结果显示, 沙尘天气空气中可吸入颗粒物浓度显著增高, 沙尘对空气中总悬浮颗粒物浓度有显著贡献, 并且增加城市的自然降尘量。经过大连上空传输的沙尘高度一般在4km以下, 普遍分布在1~3km之间; 沙尘气溶胶消光系数最大值超过 2.0km^{-1} ; 沙尘影响地面时, 近地面附近气溶胶消光系数超过 0.5km^{-1} , 强沙尘过程超过 1.3km^{-1} 。大连的沙尘天气是在高空西风或西北风急流对沙尘的搬运前提下产生, 大连附近锋面后部的下滑运动是地面沙尘浓度增高的主要原因; 锋后下滑气流越强, 地面沙尘污染越重。

关键词: 沙尘 颗粒物 气溶胶消光系数 动力机制

Analysis on Mechanism Characteristic of Sand-dust Events Affecting Dalian in 2006

Song Yu¹ Huang Ting¹ Cheng Xiangkun¹ Li Dan²

(1. Dalian Municipal Meteorological Bureau, Dalian 116001; 2. Dalian Environment Inspect Centre)

Abstract: Based on the particle concentration, descending dust, satellite remote observation, the aerosol extinction coefficient derived from Lidar observational data and physical quantity of sand-dust weather process affecting Dalian, the characteristic and dynamical mechanism of sand-dusts invading Dalian were analyzed. The results show that the concentration of inhalational and total suspending particles was increased remarkably and the descending dusts added in sand-dusts. It transported at a level below 4 kilometers in Dalian, mostly located between 1 and 3 kilometers with the maximal aerosol extinction coefficient over 2.0km^{-1} . It exceeds 0.5km^{-1} near the ground and may be 1.3km^{-1} in the case of strong process. The precondition was that there were sand-dust transportations of west-wind or northwest-wind jet streams, the glide streams in the rear of the front near Dalian contributed mainly to the

rising of sand-dusts concentration near the ground. The stronger the glide streams moved, the heavier the pollution induced by sand-dusts near the ground.

Key Words: sand-dusts particle aerosol extinction coefficient dynamical mechanism

引 言

研究表明,沙尘暴的产生与气象要素关系密切,它与北方地区前期降水、气温以及冷空气的路径和强度等密切相关^[1-2],且多数是由发展强盛的蒙古气旋配合高低空急流引发^[3-5]。

大连的沙尘特征明显不同于上游的沙尘暴天气,它是以浮尘为主,沙尘的产生也具有同上游不同的动力学特征。春季频发的浮尘对大连这样一个比较清洁的城市产生很大影响,造成空气能见度降低,空气中悬浮颗粒物浓度严重超标,空气质量恶化,对交通、通讯和人、畜的身心健康造成很大危害;同时,大连又是韩国、日本等国城市天气的上游;一定浓度的沙尘粒子又是成云、成雾的凝结核,对降水、大雾天气、中和酸雨具有明显贡献。因而,研究大连的沙尘机理特征以及沙尘的传输沉降机制,对预防危害和天气预警具有重要意义。

1 资料来源

2006 年大连市的沙尘监测主要有颗粒物质量浓度监测、降尘监测、卫星遥感监测以及米散射激光雷达气溶胶消光系数监测等。

在沙尘天气中,激光雷达气溶胶消光系数是一个相当敏感的变量,其随沙尘的发生、发展和消亡表现出明显不同的日变化特征,且在其空间分布上与沙尘天气本身的空间分布变化具有很好的一致性,可以很好地反映沙尘输送过程。

应用来自大连市气象局和大连市环境监

测中心的可吸入颗粒物在线自动监测、总悬浮颗粒物观测、降尘观测、激光雷达气溶胶消光系数自动监测等资料,分析沙尘天气的机理特征;运用 NCEP 再分析资料计算沙尘天气的物理量场,分析其动力机制。

2 沙尘天气机理分析

2006 年大连共受到外来沙尘影响过程 9 次;因沙尘天气产生的污染日 12 天,占年总污染天数的 67%;沙尘影响时间共 253 小时。

2.1 可吸入颗粒物监测分析

强度较弱的沙尘影响时,大连的环境大气可吸入颗粒物(PM_{10})质量浓度 1 小时均值超过 $200\mu g \cdot m^{-3}$;明显的沙尘过程影响时, PM_{10} 浓度超过 $600\mu g \cdot m^{-3}$;当影响时间超过 6 小时即可构成一个污染日;重污染日特征是 1 小时均值超过 $1000\mu g \cdot m^{-3}$ 。2006 年最严重的沙尘天气出现在 4 月 8 日,大连 PM_{10} 日均值达 $730\mu g \cdot m^{-3}$;10 个子站中,小时最高值为 $2431\mu g \cdot m^{-3}$ (出现在金州子站),超出环境空气质量二级标准 15.2 倍。在 2006 年外来沙尘影响的 253 小时中有 31 小时各子站空气污染指数超过 500(环境空气质量二级标准为 $150\mu g \cdot m^{-3}$,空气污染指数 500 对应浓度为 $420\mu g \cdot m^{-3}$)。因此,外来沙尘天气对空气中可吸入颗粒物浓度有显著影响。

2.2 总悬浮颗粒物监测分析

在 3 月 10—11 日、4 月 7—9 日和 4 月 22—24 日的沙尘天气中,对较严重污染时段

的空气中总悬浮颗粒物(TSP)进行了同步监测。

3月10日9时至11日6时,星海三站子站 TSP 的监测结果为 $2350 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 超出环境空气质量日平均二级标准 6.8 倍, 对应时段 PM_{10} 浓度为 $596 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 即 TSP 是 PM_{10} 的 3.9 倍, 说明 3 月 10—11 日的沙尘天气中, 总悬浮颗粒物中大颗粒物的比例较大。

在 4 月 8 日 9—15 时星海三站子站 TSP 的监测结果为 $1180 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 超出日平均二级标准 2.9 倍, 对应时段 PM_{10} 为 $713 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 即总悬浮颗粒物是可吸入颗粒物的 1.7 倍。

在 4 月 23 日 14—18 时, 星海三站子站 TSP 的监测结果为 $1690 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 超出日平均二级标准 4.6 倍, 对应时段 PM_{10} 为 $757 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 即总悬浮颗粒物是可吸入颗粒物的 2.2 倍。

因此, 外来沙尘天气对空气中总悬浮颗粒物浓度有显著贡献。

2.3 自然降尘监测分析

在 3 月 10—11 日沙尘天气影响严重时段, 在星海三站点位, 对自然降尘进行了同步监测, 结果表明: 该次沙尘天气使星海三站附近自然降尘增加 $4 \text{t}/\text{km}^2$ 左右。在 3 月 24—26 日、4 月 7—9 日、4 月 11—12 日和 4 月 22—24 日的沙尘天气, 星海三站点位自然降尘分别增加 $3 \text{t}/\text{km}^2$ 、 $12 \text{t}/\text{km}^2$ 、 $3 \text{t}/\text{km}^2$ 和 $3 \text{t}/\text{km}^2$ 。所以, 仅几次影响较大的沙尘天气就使城市的自然降尘增加了 $25 \text{t}/\text{km}^2$ 左右。

2.4 激光雷达气溶胶消光系数监测分析

以 2006 年 4 月 23 日的沙尘监测资料为例进行分析。

根据 PM_{10} 观测, 沙尘从凌晨开始影响大连, 在早上 4 点至 6 点间有一次较弱的沙尘

过程落地(图 1a); 11 时左右主要的沙尘落地, 近地面 PM_{10} 最高浓度接近 $800 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 并且地面高浓度的降尘状态一直维持到 17 时, 到 18 时之后近地面 PM_{10} 浓度开始减小。

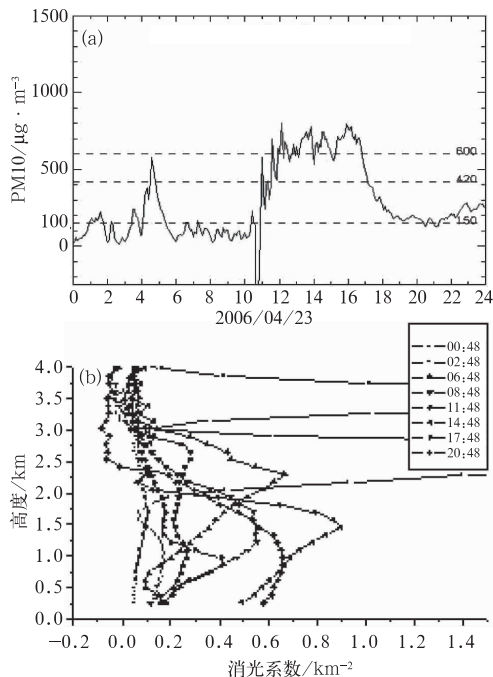


图 1 2006 年 4 月 23 日 PM_{10} 时间序列图(a)和激光雷达资料反演的气溶胶消光系数廓线图(b)

从激光雷达资料反演的气溶胶消光系数廓线随时间变化(图 1b)可以清楚地看到不同时刻沙尘气溶胶浓度的垂直分布。在早上 00:16, 沙尘气溶胶主要分布在 3~4km 高度范围内, 消光系数最大值超过 1.4km^{-1} ; 到 02:48, 沙尘层高度下移到 2~3km 的高度范围内; 到 05:48, 沙尘层高度继续下移, 广泛分布在 1~3km 的高度范围内, 消光系数峰值也有所降低, 并且近地面附近消光系数略增, 说明有少量沙尘落地; 到 08:48 消光系数峰值出现在 1~1.5km 处, 并且在此之前近地面附近消光系数最大值不超过 0.2km^{-1} ; 11:48 的廓线反映, 高浓度的沙尘气溶胶主要分布在 2km 以下, 并且落地, 地面消光系

数迅速从 0.12km^{-1} 上升至接近 0.6km^{-1} ; 到 14:48 时,地面附近仍维持沙尘的高浓度状态,消光系数仍超过 0.5km^{-1} ,但同时在 1.5km 的高度上又出现一个接近 0.9km^{-1} 的消光系数峰值,说明上游有源源不断的沙尘输送;到 17:48,地面附近消光系数回落到 0.2km^{-1} 以下,沙尘层厚度减小,主要分布在 0.5km 至 1.25km 处,消光系数峰值也开始减小,过程趋于结束。这与地面 PM_{10} 自动观测结果一致。

综合分析 2006 年的激光雷达资料,经过大连上空传输的沙尘高度一般都在 4km 以下,普遍分布在 $1\sim 3\text{km}$ 之间,消光系数最大值达到 2.0km^{-1} 以上,有的甚至超过 3.0km^{-1} 。沙尘影响地面时,近地面附近气溶胶消光系数从小于 0.2km^{-1} 上升至 0.4km^{-1} 以上,沙尘过程一般最大值均大于 0.5km^{-1} ,强沙尘过程气溶胶消光系数最大值大于 1.3km^{-1} ,甚至接近 1.5km^{-1} 。

3 沙尘天气动力机制分析

大连的沙尘天气产生需要有三个基本条件:(1)沙源地起沙并输送到高空;(2)沙尘传输途经大连上空;(3)在大连有沉降机制。研究表明,在沙尘源区强沙尘暴影响高度位于 $2500\sim 3200\text{m}$ 之间,弱沙尘暴影响高度在 $1000\sim 2500\text{m}$ 之间,沙尘暴高浓度区始终位于 700hPa 风切变最大的位置,之后伴随蒙古气旋的冷锋在大连过境时,才开始影响大连。大连沙尘天气有与上游不同的动力特征,我们以 2006 年污染最严重的两天为例进行分析。

3.1 3 月 10 日沙尘过程分析

2006 年 3 月 10 日,受来自西伯利亚强冷空气的影响,蒙古国、内蒙古地区生成的沙尘

暴,随着蒙古气旋、冷锋的东移南下,在大连过境,产生浮尘天气;极轨卫星遥感图上清晰可见大片沙尘区经过渤海北部而后到达大连,覆盖影响大连上空(图略)。地面 PM_{10} 五分钟平均自动监测显示(图 2a),从 10 日 10 时起, PM_{10} 质量浓度突然升高,地面高浓度状态一直维持到夜间,最高值接近 $1500\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,一直到 20 时,空气污染指数(API)均超出 500,浓度日均值为 $537.6\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

3 月 10 日是一个比较强的沙尘过程。高空急流携带大量沙尘向下游移动,在大连锋面过境前后所表现的垂直环流(图 2b)很强烈,锋前一致的上升气流,锋后 500hPa 以下几乎都是下降气流,直接把高空西风输送的沙尘带到地面,此时大连上空已经位于锋后较强的下降气流区。从垂直速度场看(图 2c), 700hPa 以下均有下降速度,而 800hPa 以下下降速度接近 0.4hPa/s ;从散度场看(图 2d), $700\sim 850\text{hPa}$ 是辐散场, 850hPa 到地面是辐合,辐散辐合的配对出现,也说明了有明显的向地面的输送气流。08 时锋面过境之前的垂直剖面特征是上升气流为主(图略),地面沙尘浓度也不高,因而下沉气流对地面高浓度的沙尘贡献很大。

3.2 4 月 7—9 日垂直环流分析

4 月 7—9 日的过程复杂些。根据 PM_{10} 自动监测显示,4 月 7 日 21 时至 4 月 8 日 14 时为污染最严重时段(图略),从垂直环流分析,同样有锋面过境下沉气流对沙尘的输送贡献;当下沉气流增强时,地面 PM_{10} 浓度出现一个高峰。另外,8 日过程后期出现较强的锋后下沉回流,地面以偏东或东南风为主,把已经过境移动到下游但还没有落地的浮尘又搬回本区沉降,即锋后下沉回流也成为一主要贡献。

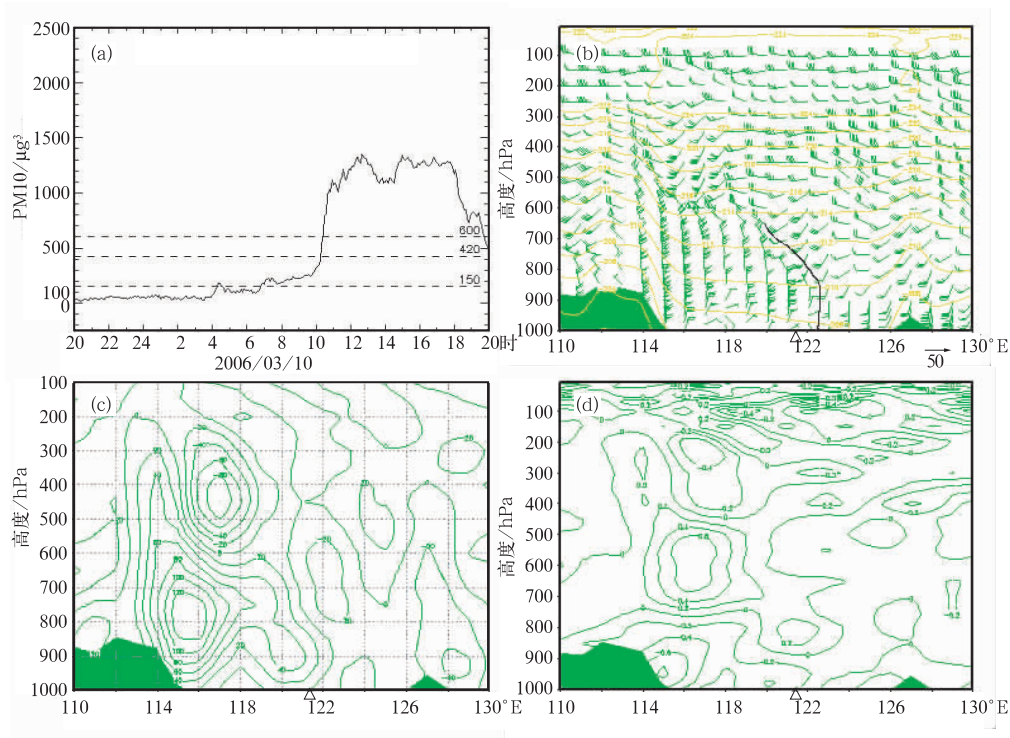


图 2 2006 年 3 月 10 日 PM_{10} 时间序列及物理量场垂直剖面图

(a) PM_{10} 浓度变化时间序列图, (b) 10 日 20 时 u 风及 w 风矢量合成沿 $39^\circ N$ 垂直剖面,
(c) 10 日 20 时垂直速度沿 $39^\circ N$ 垂直剖面 $\times 10^{-2} hPa/s$, (d) 10 日 20 时散度沿 $39^\circ N$ 垂直剖面 $\times 10^{-4} s^{-1}$
(\triangle 所指为大连所在地)

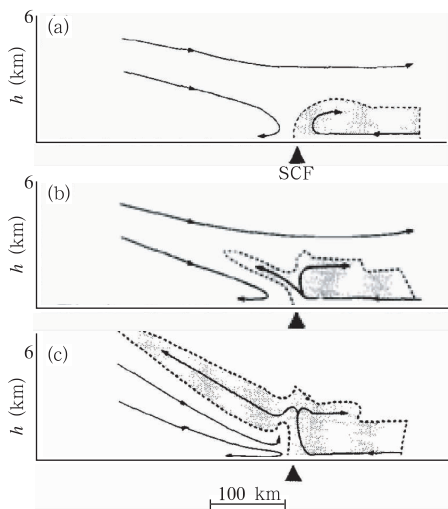


图 3 地面冷锋锋区垂直环流的概念模型^[6]

(a) 纯下滑冷锋, (b) 混合下滑-上滑冷锋,
(c) 上滑冷锋 (图中 SCF 表示冷锋)

3.3 动力机制分析

以上垂直环流特征正符合 Browning^[6]总结的大气中冷锋结构、环流的概念模型(图 3)。在三种冷锋的概念模型中,图 3a、b 正是产生沙尘的天气模型,它们的共同特征是锋面以下有一下滑运动,锋上临近锋处有上滑运动,正是锋后的下滑运动以及近地面锋后回流对地面的沙尘浓度增高起了主要贡献。

另外,在各种强度的沙尘天气中,都程度不同地伴随有近地面西或西北风对邻近的上游地区沙尘的搬运和影响。

因而,大连沙尘天气的动力机制主要表现是,在高空西风或西北风急流对沙尘的搬运前提下,在大连过境的冷锋后部下沉气流

向近地面输送沙尘为主,同时还伴有锋后下沉回流对沙尘的贡献,叠加近地面西或西北风对上游沙尘的输送。锋后下滑气流越强,地面沙尘污染越重。

4 总结

(1) 大连的沙尘天气空气中可吸入颗粒物浓度显著增高,明显的沙尘过程影响时,可吸入颗粒物 1 小时均值超过 $600\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,重污染日 1 小时均值超过 $1000\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;沙尘对空气中总悬浮颗粒物浓度有显著贡献,沙尘过程中,总悬浮颗粒物是可吸入颗粒物的 1~4 倍,并且增加城市的自然降尘量。

(2) 经过大连上空传输的沙尘高度一般都在 4km 以下,普遍分布在 1~3km 之间,沙尘气溶胶消光系数最大值达到 2.0km^{-1} 以上;沙尘影响地面时,近地面附近气溶胶消光系数最大值均大于 0.5km^{-1} ,强沙尘过程气溶胶消光系数最大值大于 1.3km^{-1} 。

(3) 大连的沙尘天气是在高空西风或西北风急流对沙尘的搬运前提下产生,大连附

近锋面后部的下滑运动对近地面的沙尘浓度增高起了主要贡献;锋后下滑气流越强,地面沙尘污染越重。锋后下沉回流、近地面西或西北风对上游沙尘的输送也对大连的沙尘有一定贡献。

致谢:感谢国家气象中心赵琳娜老师的悉心指导。

参考文献

- [1] 陆政,刘凑华. 中国北方沙尘暴与气象要素关系的初步研究[J]. 气象,2006,32(9):35-41.
- [2] 张晓玲,李青春,谢璞. 近年来北京沙尘天气特征及成因分析[J]. 中国沙漠,2005,25(3):417-421.
- [3] 赵琳娜,赵思雄. 一次引发华北和北京沙尘暴天气的快速发展气旋的诊断研究[J]. 大气科学,2004,28(5):722-734.
- [4] 申红喜,李秀连,石步鸢. 北京地区两次沙尘(暴)天气过程对比分析[J]. 气象,2004,30(2):12-16.
- [5] 张志刚,赵琳娜,矫梅燕,等. 一次引发强沙尘天气的快速发展蒙古气旋的诊断分析[J]. 气象,2007,33(5):27-35.
- [6] Browning K A. Some questions regarding the dry intrusions (DIS) associated with extratropical cyclones [R]. Proc Seventh Conf Mesoscale Processes, Reading, UK, September, 1996. 36-38.