

文章编号:1000-694X(2006)05-0763-04

# 兰州城区 TSP 高浓度污染与自然降尘的关系

尉元明<sup>1</sup>, 潘峰<sup>2</sup>, 王静<sup>1</sup>, 牛磊<sup>1</sup>

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020; 2. 兰州大学 环境质量评价研究中心, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 从宁夏到甘肃中部有一个自北向南的少雨“干舌”, 在垂直速度场上形成一个从河西东部向南伸下来的下沉运动区, 冬季下沉运动区大而强烈, 有利于空气中的沙尘下沉堆积。经分析, 兰州城区自然降尘量占年降尘量的 54%。随着沙尘暴、扬沙和浮尘天气的出现, 自然降尘量由 1 月份的 32% 增大到 5 月份的 60%; 按春、夏、秋、冬四季划分, 城区 TSP 浓度中自然降尘量各占 58%、33%、28% 和 32%。全年中 11 月城郊浓度差值最大 0.59  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 其主要原因是 11 月刚进入采暖期, 除原有工业源外, 又增加了采暖锅炉和生活小炉灶, TSP 排放量增大, 加之该月风速最小、天气过程少, 是兰州市出现严重污染的主要原因。

**关键词:** TSP 浓度; 下沉气流; 来源

**中图分类号:** X513      **文献标识码:** A

兰州是以石油化工、机械制造、金属冶炼和毛纺织等工业为主的城市, 截止 2005 年底, 全市人口(含流动人口)约 300 万, 能源结构以燃煤为主, 燃煤占能源消耗的 80% 左右, 年耗煤 433 万 t。在冬季采暖期(5 个月), 除工业源每天依旧排放外, 城区还有 1 320 个采暖锅炉和 4 382 个食堂餐饮大灶以及 103 192 个生活小炉灶竞相排污, 这些生活源燃烧不完全、排放高度又低, 加之兰州市地处河谷盆地, 在特殊地形条件下形成了特殊的污染气象条件, 风速小(准静止风区), 逆温层厚, 污染物不宜水平输送和垂直扩散, 严重影响着兰州市城区的环境空气质量<sup>[1]</sup>。除了上述原因外, 由于兰州市位于黄土高原, 气候干燥、植被稀少, 自然和二次扬尘量较大, 在各种污染物中, 首要污染物是 TSP。我国 47 个重点城市空气质量周报的公布结果也充分说明了这一点。TSP 除来源于工业生产、燃料燃烧过程和人类活动引起的二次扬尘等外, 自然降尘量的大小对当地环境空气质量起着至关重要的作用。因此, 分析和研究 TSP 浓度变化和来源, 对防治和减轻 TSP 污染, 具有重要的意义。

## 1 问题的提出

自 1975 年开始环境监测以来, 兰州市 TSP 年平均浓度值均超过国家二级标准( $0.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )限值(图 1)。1977 年创浓度值最高( $1.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),

1980 年和 1987 年出现次峰值( $1.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), 分别超出国二级标准限值 5.3 和 3.3 倍。1990 年后 TSP 浓度基本维持在  $0.40 \sim 0.82 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  之间。从线性趋势线来看, TSP 年均浓度值的年际变化呈下降趋势, 下降速度约每年  $0.0251 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

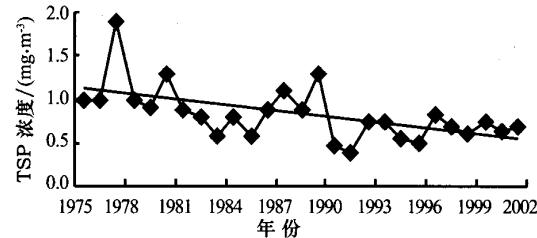


图 1 兰州城区 1975—2002 年 TSP 年平均浓度值年际变化

Fig. 1 Interannual variation of annual mean TSP concentration over Lanzhou city from 1975 to 2002

20 世纪 80 年代中期, 国家和当地政府为解决兰州市大气污染, 投入大量的资金, 在全市进行消烟除尘、集中供热、蓝天工程、绿化工程等<sup>[2]</sup>, TSP 排放量由 1990 年<sup>[3]</sup> 的 6.05 万 t 降至目前的 3.42 万 t, 下降了 56.5%。就 TSP 排放量而言, 兰州市与同等规模城市相比并不算大<sup>[4]</sup>, 除了地形、污染气象条件特殊, 还有什么原因导致 TSP 浓度在一定范围内波动, 这些污染物来自何方, 需要我们进行分析和研究。

收稿日期:2006-03-09; 改回日期:2006-03-23

基金项目:中国科技部社会公益研究专项项目“西北干旱区沙尘暴预警、服务系统研究”(2000DIA1003)资助

作者简介:尉元明(1955—),男,江苏镇江人,副研究员,主要从事干旱区环境方面的研究工作。E-mail: weiyuanm@yahoo.com.cn

万方数据

## 2 城区 TSP 来源分析

城区 TSP 主要由自然降尘和人类活动直接或间接产生的颗粒物组成<sup>[5]</sup>。大环境条件下的自然降尘可分为长期气候背景和短期天气过程。长期气候背景反映大的环流背景, 短期天气过程主要是指沙尘暴、扬沙和浮尘天气。

表 1 晚更新世黄土-古土壤厚度与当代气候  
Tab. 1 Late Pleistocene loess-paleosol thickness and climate of the present age

地名	北纬	东经	海拔/m	黄土厚度/m	年干燥度	年温/℃	年降水量/mm
九州台(兰州)	36°21'	103°56'	1 670	55	3.22	7.0	251
北塬(临夏)	35°35'	103°11'	1 919	35	1.73	6.8	502
薛塬(环县)	36°35'	107°18'	1 256	24	2.13	8.6	420
庆阳市	35°44'	107°38'	1 422	15	1.60	8.3	573
洛川	35°49'	109°30'	1 158	12	1.15	9.2	626
西安	34°18'	108°56'	398	10	1.25	13.4	573

兰州北边的九州台黄土层最厚, 达 55 m, 向东向南逐渐变薄。洛川和西安分别只有 12 m 和 10 m。薛塬比兰州更接近沙土源, 且位于来自沙漠的盛行风向——西北风的下风方, 为什么兰州附近黄土层最厚? 是因为风成黄土厚度的决定因素取决于风成黄土的沉积速率, 而不是与沙土源的距离。

徐国昌等人<sup>[7]</sup>通过多年天气气候分析发现, 从宁夏到甘肃中部有一个自北向南的少雨“干舌”, 正

### 2.1 风成黄土与长期气候背景

陈发虎等<sup>[6]</sup>在甘青地区的黄土地层学与第四纪冰川问题研究中得出: 兰州北边的九州台是全国、乃至全世界风成黄土层最厚的地区, 黄土总厚度 321 m, 其中风成黄土 297.2 m。表 1 给出了晚更新世以来各地黄土层厚度的统计结果。

好在“两西”贫困地区的所在地。后用多年平均各层风场资料, 进行了平均散度、涡度和垂直速度场计算<sup>[8]</sup>, 发现刚好在兰州“干舌”附近是边界层流场的辐散区和负涡度区, 因而在垂直速度场上形成一个从河西东部向南伸下来的下沉运动区(夏季), 冬季的下沉运动区很大, 且很强烈(图 2)。10 a 后, 吴统文等人<sup>[9]</sup>再次肯定了上述下沉运动区的存在。说明兰州附近盛行下沉气流, “干舌”是由盛行下沉气流造成的。

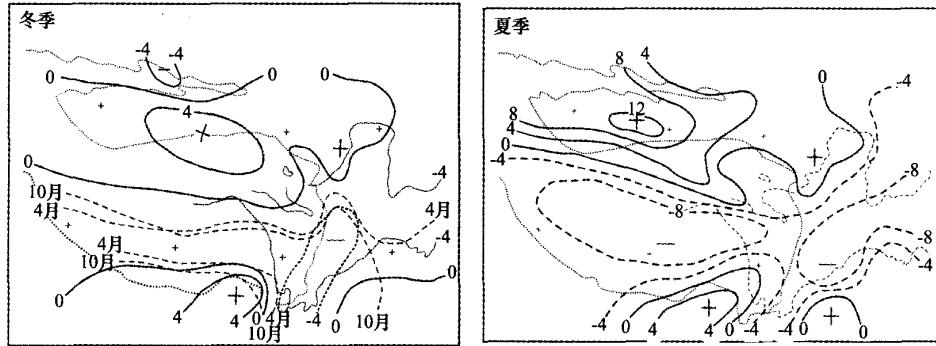


图 2 500 hPa 平均垂直速度场( $10^{-4}$  hPa · s<sup>-1</sup>)  
(正值为下沉运动区, 负值为上升运动区)

Fig. 2 The mean vertical velocity field of 500 hPa

兰州附近边界层辐散流场和盛行下沉运动是西北气流在青藏高原东北侧的反气旋式绕流和高原侧边界摩擦等动力作用造成的, 兰州附近盛行下沉气流是当代气候环流背景与青藏高原大地形相结合的产物<sup>[10]</sup>。由此可以解释兰州附近风成黄土堆积速率大的事实。从物理上讲, 边界层辐散流场所形成的弱风区和对流层下部盛行的下沉气流, 有利于空中的沙尘下沉堆积。并且得出, 少雨年北风强, 下万方数据

沉气流也强; 多雨年相反, 北风弱, 下沉气流也弱。由此可以推测, 少雨年黄土堆积多, 多雨年堆积少。第四纪冰期北风强, 不仅沙尘向南输送增加, 而且由于下沉气流的加强使黄土堆积速率加大。另据 2005 年 1~2 月大气边界层探测结果可知, 距兰州正北方向 120 km 的景泰县 200~3 000 m 盛行风向为偏北风, 其频率高达 36% 以上。这就是兰州附近风成黄土堆积最厚的主要原因, 也是自然降尘量较

大,TSP 浓度较高的主要原因所在。

## 2.2 自然降尘量

为量化自然降尘对城区 TSP 的影响, 分别统计了城区与对照点(距城区 50 km 的兴隆山森林公园)的年降尘量。由表 2 可见, 1995 年城乡年降尘量的差值最大  $17.0 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$ , 其次是 1993 年为  $15.6 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$ , 其余各年差值

在  $9.0 \sim 13.8 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$  之间, 14 a 平均为  $11.8 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{month}^{-1}$ 。城区与对照点百分比除 1993 年和 1995 年较低外, 其余各年均在 50%~60% 之间, 14 a 平均为 54%。按照环境监测规范, 可以把对照点的降尘量视为自然降尘, 那么自然降尘量占兰州市城区降尘量最大为 60%, 最小为 41%, 平均为 54%。该结果与魏群等<sup>[11]</sup>通过元素富集特征分析兰州市 TSP 组成结果基本一致。

表 2 城区与对照点年降尘量差值和百分比

Tab. 2 Difference and percentage of dust fall between city and county

时间(年度)	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	平均
$\Delta Ci / (\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{month}^{-1})$	10.2	9.7	9.0	9.3	12.3	15.6	12.0	17.0	9.4	10.0	12.0	12.6	13.8	12.6	11.8
$Pi / \%$	58	60	59	58	60	44	60	41	56	58	54	52	50	52	54

## 2.3 短期天气过程和人类活动

当地沙尘暴、扬沙和浮尘天气主要发生在春季(3月、4月、5月)<sup>[12~14]</sup>, 频率分别为 62%、48% 和 55%, 并以 4 月频率最高(26%、18%、21%)<sup>[15]</sup>。沙尘暴与 TSP 浓度研究结果表明<sup>[11~12]</sup>, 1998 年“3.27”, “4.18”和“4.26”, 在沙尘暴影响下兰州城区和对照点均出现了 TSP 高浓度污染, 与“3.27”对应的城区周日平均浓度值为  $0.996 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 超标

2.32 倍; 与“4.18”对应的周日平均浓度值为  $1.081 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 超标 2.60 倍; 与“4.26”对应的周日平均浓度值为  $1.132 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 超标 2.77 倍。经统计, 沙尘暴多发年兰州市 TSP 浓度值高, 反之沙尘暴少发年其浓度值也低。

从 2000 年城区与对照点 TSP 月平均浓度差值(表 3)可知, 全年月平均浓度 11 月差值最大  $0.59 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 8 月差值最小  $0.25 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 该结果与王式功等<sup>[16]</sup>两点差值在  $0.28 \sim 0.53 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  之

表 3 城区与对照点 TSP 浓度差值和百分比

Tab. 3 Difference and percentage of TSP concentration between city and county

时间/月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	平均
$\Delta Ci / (\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	0.33	0.34	0.28	0.32	0.28	0.30	0.29	0.25	0.29	0.39	0.59	0.33	33.25
$Pi (\%)$	32	40	55	60	60	36	32	32	36	27	21	25	38.0

间的研究结果一致。

从自然降尘量所占比列来看, 10~12 月自然降尘量所占比列最小, 在 21%~25% 之间; 此后随着沙尘暴、扬沙和浮尘天气的出现, 自然降尘量所占比列逐渐增大, 由 1 月份的 32% 增大到 5 月份的 60%; 进入夏季后维持在 32%~36% 之间。按春、夏、秋、冬四季划分, 兰州城区 TSP 浓度中自然降尘量分别占各季的 58%、33%、28% 和 32%。

造成 11 月城区与对照点浓度差值最大的主要原因是, 11 月城区进入采暖期, 除工业源每天依旧排放外, 又增加了 1320 个采暖锅炉和 103 192 个生活小炉灶, 这些生活源排放高度低, 严重的影响着兰州城区的环境空气质量。经统计, 冬季采暖期兰州市工业源和生活源加上居民小炉灶共排放 TSP 约 2.0 万 t, 占全年排放量的 58%, 加之 11 月平均风速最小(仅  $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )、天气过程少, TSP 浓度迅速增大; 12 月天气过程逐渐增多<sup>[17]</sup>, TSP 浓度又随之

降低。

## 3 小结

(1) 自有环境监测以来, 兰州市 TSP 年均浓度值均超过国家二级标准限值。经多年不断努力, 采取了一系列控制措施, 但 TSP 浓度仍在一定范围内波动, 严重影响着兰州市环境空气质量和投资环境。

(2) 从宁夏到甘肃中部有一个自北向南的少雨“干舌”, “干舌”附近是边界层流场的辐散区和负涡度区, 因而在垂直速度场上形成一个从河西东部向南伸下来的下沉运动区(夏季), 冬季的下沉运动区很大, 且很强烈。边界层辐散流场所形成的弱风区和对流层下部盛行的下沉气流, 有利于空气中的沙尘下沉堆积, 是兰州附近风成黄土堆积最厚的主要原因, 也是自然降尘量较大, TSP 浓度较高的主要原因所在。

(3) 自然降尘量占城区降尘量的百分比, 最大

为60%，最小为41%，平均为54%。全年月平均浓度11月差值最大 $0.59\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，8月差值最小 $0.25\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。造成11月城区与对照点浓度差值最大的主要原因是，进入采暖期，除工业源外，又增加了采暖锅炉和生活小炉灶，这些生活源排放高度低，冬季采暖期排放TSP约2.0万t，占全年排放量的58%，加之11月平均风速最小（仅 $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）、天气过程少，TSP浓度迅速增大，严重的影响着兰州城区的环境空气质量。

(4) 从自然降尘量所占比列来看，10~12月自然降尘量所占比列最小(21%~25%)，此后随着沙尘暴、扬沙和浮尘天气的出现，自然降尘量所占比列逐渐增大，由1月份的32%增大到5月份的60%；进入夏季后维持在32%~36%之间。按春、夏、秋、冬四季划分，兰州城区TSP浓度中自然降尘量分别占各季的58%、33%、28%和32%。

#### 参考文献(References):

- [1] 夏永久,陈兴鹏,李娜.西北半干旱城市经济增长与环境污染演进阶段及其互动效应分析[J].中国沙漠,2005,25(6):950~956.
- [2] 陈长和,黄建国,程麟生,等.复杂地形下大气边界层和大气扩散研究[M].北京:气象出版社,1996.
- [3] 乔世俊,张煦,赵爱平.兰州市城区大气污染物排放标准的研究[R].甘肃省环境保护研究所,1991.
- [4] 尉元明,许东蓓,张久林,等.兰州市TSP的变化特征与成因分析[J].高原气象,2001,20(增刊):87~91.
- [5] 权建农,奚晓霞,王鑫,等.兰州市2001年沙尘气溶胶质量浓度的特征分析[J].中国沙漠,2005,25(1):93~97.
- [6] 陈发虎.青藏地区的黄土地层学与第四纪冰川文题[M].北京:科学出版社,1996.154~232.
- [7] 徐国昌,张志银.青藏高原对西北干旱气候形成的作用[J].高原气象,1983,2(2):9~15.
- [8] 徐国昌.青藏高原东侧700毫巴切变线的天气气候特征[J].高原气象,1983,2(3):21~25.
- [9] 吴统文,钱正安.青藏高原北侧地区干湿年夏季垂直环流差异的对比分析及青藏高原的热力影响[J].气象学报,1996,54(5):558~567.
- [10] 徐国昌.中国干旱半干旱区气候变化[M].北京:气象出版社,1997.
- [11] 魏群,张宁.兰州市城关区大气TSP元素副集特征及污染源的研究[J].中国环境科学,1988,8(6):10~17.
- [12] 岳虎,王锡稳,李耀辉.甘肃强沙尘暴个例分析研究(1955—2002)[M].北京:气象出版社,2003.
- [13] 程海霞,丁治英.近5a我国沙尘暴与高空急流关系的统计分析[J].中国沙漠,2005,25(6):891~896.
- [14] 杨晓玲,丁文魁,钱莉,等.一次区域性大风沙尘暴天气成因分析[J].中国沙漠,2005,25(5):702~705.
- [15] 唐红玉,霍盈茂.中国北方春季沙尘暴频数与北半球500 hPa高度场的SVD分析家[J].中国沙漠,2005,25(4):570~576.
- [16] 王式功,祁斌,黄建国.兰州城区冬季空气污染预报研究[R].兰州大学大气科学系,1996.
- [17] 祁斌,张志元,朱学义,等.生态环境与空气污染[M].甘肃:甘肃民族出版社,2000.

## Relationship of Severe TSP Pollution and Natural Dustfall in Lanzhou City

WEI Yuan-ming<sup>1</sup>, PAN Feng<sup>2</sup>, WANG Jing<sup>1</sup>, NU Lei<sup>1</sup>

(1. Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorology Administration, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster, Lanzhou 730020, China; 2. Environmental Assessment Research Center, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** There is a ‘dry tongue’ (less rainfall) in north-south orientation between Ningxia Hui Autonomous region and middle part of Gansu province, forming a downwards moving region over the vertical velocity field from east of Hexi to south. The downwards moving region is intense and great in winter, which makes for air dustfall depositing. The result showed that the natural dustfall accounted for 54% of the total dust amount yearly. The natural dustfall ratio of different months are different due to sandstorm, blowing dust, and floating dust weather, such as the natural dustfall ratio increased from 32% of Jan to 60% of May. If differentiated by season, the natural dustfall accounted for 58% in spring, 33% in summer, 28% in autumn and 32% in winter in TSP concentration. The TSP concentration difference between city and suburb is the biggest in Nov, because all the heating equipment begin opening, and the wind velocity and the precipitation are very little, so the severe pollution weather come in this period generally.

**Key words:** TSP concentration; downdraft; source