

# 青藏高原地区 TSP 分布特征及影响因素分析

祁栋林<sup>1\*</sup>, 李晓东<sup>1</sup>, 蔡永祥<sup>2</sup>, 肖宏斌<sup>1</sup>, 王力<sup>1</sup>, 黄建青<sup>2</sup>, 李德林<sup>2</sup>, 王剑琼<sup>2</sup>, 刘鹏<sup>2</sup> (1. 青海省气象科学研究所, 青海 西宁 810001; 2. 中国大气本底基准观象台, 青海 西宁 810001)

**摘要:** 利用大流量采样器采集了 2002 年 11 月~2009 年 8 月的瓦里关山地区 TSP 样品, 通过对数据的日、月、年和季节及后向轨迹等方法的分析处理, 揭示了瓦里关山地区 TSP 基本特征及影响因素: 2003~2008 年 TSP 质量浓度多年均值为  $0.076\text{mg}/\text{m}^3$ , 呈下降趋势。TSP 质量浓度的月际变化特征明显, 从秋初开始逐步增大, 至春季的 4 月出现峰值(多年平均值为  $0.195\text{mg}/\text{m}^3$ ), 在 5~8 月的变化中, TSP 质量浓度是逐渐下降, 9 月份达到浓度的最低值(多年平均值为  $0.029\text{mg}/\text{m}^3$ ); 多年平均值在 1~4 月均超过国家标准环境空气质量一级标准。季节变化: 春季最高, 其次是冬季和秋季, 夏季最低, 四季的 TSP 平均质量浓度分别为  $0.148, 0.091, 0.037, 0.035\text{mg}/\text{m}^3$ , 夏季呈下降趋势, 其余季节呈上升趋势。TSP 质量浓度明显受到局地气象因子降水量、温度、相对湿度、气压和风的控制。降雨量越小、温度越低、相对湿度越小、风速越小, 大气 TSP 浓度越高, 反之越低。春季背景大气 TSP 的质量浓度平均  $0.12\text{mg}/\text{m}^3$ , 大风天气为  $0.22\text{mg}/\text{m}^3$ , 浮尘天气为  $0.329\text{mg}/\text{m}^3$ , 扬沙天气  $0.382\text{mg}/\text{m}^3$ , 沙尘暴  $0.874\text{mg}/\text{m}^3$ , 分别为背景大气的 1.8、2.7、3.2 和 7.3 倍, 雨雪的清除效率分别为 33.9% 和 26.7%。气象后向轨迹模型分析瓦里关山地区沙尘暴的沙源地来源于新疆北部、甘肃西北部、内蒙古中西部及本省西北部的柴达木盆地。TSP 质量浓度远低于城市和区域本底站, 代表了全球大陆尺度的环境, 冬春季多风沙是造成 TSP 质量浓度较高的主要因素。

**关键词:** 分布特征; 质量浓度; 影响因素; 总悬浮颗粒物(TSP); 瓦里关山地区

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2012)12-2174-10

**Study on distribution characteristics and impact factors of TSP in Qinghai-Tibet Plateau.** QI Dong-lin<sup>1\*</sup>, LI Xiao-dong<sup>1</sup>, CAI Yong-xiang<sup>2</sup>, XIAO Hong-bin<sup>1</sup>, WANG Li<sup>1</sup>, HUANG Jian-qin<sup>2</sup>, LI De-lin<sup>2</sup>, WANG Jian-qiong<sup>2</sup>, LIU Peng<sup>2</sup> (Institute of Qinghai Meteorological Science Research, Xining 810001, China; 2. China Global Atmosphere Watch Baseline Observatory, Xining 810001, China). *China Environmental Science*, 2012,32(12): 2174~2183

**Abstract:** This study revealed distribution characteristics and impact factors of TSP through backward trajectory and other analysis methods based on TSP samples collected by large flow sampler in November 2002 to August 2009 in Waliguan Mountain. TSP mass concentration of mean annual was  $0.076\text{mg}/\text{m}^3$  and there was a downward trend in 2003 to 2008. TSP mass concentration increased from early autumn and reached the maximum in April and decreased from May to August and reached the minimum in September. Mean annual exceeded environmental air quality level 1 standard of National Standard. TSP mass concentration was in order of spring, winter, autumn, summer. Average TSP mass concentration of four seasons respectively was  $0.148, 0.091, 0.037$  and  $0.035\text{mg}/\text{m}^3$ . Rainfall, temperature, relative humidity, pressure and wind effected on TSP mass concentration. TSP mass concentration was higher if the rainfall, temperature, relative humidity and wind speed was smaller. The average TSP mass concentration of background value, the gale weather, the floating dust weather, the sand-blowing weather and the sandstorm were  $0.12, 0.22, 0.329, 0.382$  and  $0.874\text{mg}/\text{m}^3$  in spring, respectively. The average TSP mass concentration of the gale weather, the floating dust weather, the sand-blowing weather and the sandstorm were 1.8, 2.7, 3.2 and 7.3 times of background value. The elimination efficiency of rain and snow were 33.9% and 26.7%. The sand sources of sandstorm in area of Waliguan Mountain was from Northern Xinjiang, northwestern Gansu, Midwest Area of Inner Mongolia and the Qaidam Basin through backward trajectory model analyzing. It represented global continental scales environment that TSP mass concentration was lower than cities and regional background stations, frequent wind and rich sand were main factors caused TSP mass

收稿日期: 2012-04-09

基金项目: 国家自然科学基金基金项目(41161009, 41065001, 41065007); 公益性行业(气象)科研专项项目(GYHY201006053)

\* 责任作者, 高工, qidl007@163.com

concentration higher in winter.

**Key words:** distribution characteristics; mass concentration; impact factors; total suspended particulates (TSP); Waliguan Mountain

大气颗粒物在大气中的迁移、转化、输送和清除过程,以及其物理化学性质与颗粒物的粒径有非常密切的关系.按照颗粒物的当量直径大小,大气颗粒物分为降尘、总悬浮颗粒物、可吸入颗粒物等,其中总悬浮颗粒物(TSP)是指大气中粒径小于  $100\mu\text{m}$  的颗粒物的总称<sup>[1]</sup>.这些微颗粒物吸附的有毒污染物将对人类健康造成威胁.此外,TSP 浓度很高时,会大量吸收可见光降低大气能见度,吸收或吸附具有腐蚀性的化学物质,对建筑物和各种器械有一定的腐蚀作用,具有随时间、空间变化大的特点,其时空分布及其浓度与污染物排放源的分布、排放量及地形、地貌、气象等条件密切相关<sup>[2-3]</sup>.

在青藏高原地区,有关 TSP 的相关研究并不多,从其研究的内容特点看,采样点少、观测资料时间短,主要讨论青海地区沙尘天气气候特征及其影响方面和城市范围内 TSP 的来源和特征问题.周凌晞<sup>[4]</sup>、赵玉成等<sup>[5]</sup>分析了瓦里关山  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  的分布特征及其与气象条件的关系,魏鸿业等<sup>[6]</sup>分析了 2003~2004 年瓦里关山 TSP 浓度分布特征及于大气污染物排放的关系.因此,对瓦里关山地区这样一个清洁区进行长期连续采样的 TSP 资料的分布特征及影响因素等方面的研究,可为该区域的环境保护等提供科学依据.本文利用 2002 年 11 月至 2009 年 8 月瓦里关山地区 TSP 的观测资料,初步研究了瓦里关山地区 TSP 污染水平和季节变化特征及气象影响因子.

## 1 站点环境和样品采集

### 1.1 站点环境

观测地点为青海省瓦里关大气本底站,是世界气象组织全球大气监测网中个全球大气本底站之一,也是世界上惟一设在欧亚大陆腹地的全球大气本底站.瓦里关大气本底站位于青海省海南州的瓦里关山顶( $36^{\circ}17'\text{N}$ , $100^{\circ}54'\text{E}$ ,海拔 3816m),属于青藏高原东北边缘的青海南山山系,

呈西北-东南走向,一个孤立的纺锤状山体,相对高差约 600m,相对远离工业区和人口稠密区.青海省省会西宁市位于该山偏东方向约 90km 的湟水河谷地带,并有多座高于 4000m 的高山横亘其间,该山西侧约 20km 处河谷盆地的恰卜恰镇有人口 3 万余人,仅有少量毛纺和轻加工业.该山及周围广大地区的自然环境以浅草植被和干旱半干旱的荒漠草原及沙洲居多,除河谷地带少量农业外,全区以牧业为主;周围地区人口密度很低,平均为 6 人/ $\text{km}^2$ ,在西部方圆数百 km 的范围内,人烟稀少,除分散的居民点和小集镇外,没有大的人为污染源.

### 1.2 TSP 样品采集和处理

利用武汉市天虹仪表有限责任公司生产的 TH-1000C 型智能大流量总悬浮微粒采样器(工作流量为  $1.05\text{m}^3/\text{min}$ ,采样膜为玻璃纤维滤膜,滤膜面积为  $200\text{mm}\times 250\text{mm}$ )采集大气 TSP 样品.用国家环境保护部和国家技术监督局联合批准的《环境空气质量标准》(GB3095-1996)<sup>[7]</sup>重量法测定空气中 TSP 质量浓度含量.TSP 采样滤膜(采样前后)贮存在平衡箱中,干燥 48h 之后在精度为  $0.0001\text{mg}$  的德国赛多利斯分析天平上称重.瓦里关山大气本底站是 WMO 的大陆基准站,环境条件要求高,比较清洁,故 TSP 采样春季 3~4 月每张膜采集 47.5h,其他月份每张膜采集 71.5h,样品无白天和夜间之分.采样称重后的滤膜包上铝箔装入封口塑料袋存入冰箱冷藏,以备化学分析使用.

根据采样前后滤膜质量之差及采样体积,计算 TSP 的浓度  $C(\text{mg}/\text{m}^3)$ .

$$C = (W_1 - W_2) / V \quad (1)$$

式中: $W_1$  为采样后滤膜重量,mg;  $W_2$  为采前滤膜重量,mg;  $V$  为采样总体积,  $\text{m}^3$ .

### 1.3 数据收集处理

所用资料为瓦里关本底站 2002~2009 年的地面气象常规观测资料.选取表征下垫面热力、

大气不稳定、动力和干湿状况的相对湿度、降水量、平均风速、最大风速、平均气温、本站气压和垂直风速的逐日观测资料(垂直风速为气象塔 80m 处安装的螺旋桨式垂直风速仪(RMY27106T)测得)及对 TSP 直接影响的气象要素大风沙尘日数和反映气溶胶参数的能见度,统计得到各要素的月序列;2002 年 11 月至 2009 年 8 月总共采集 TSP 样品 833 个,每年春季 3~4 月每月平均 15 个,其他月份每月平均 10 个,统计计算得到月序列.运用 SPSS 和 EXCEL 统计分析软件对 TSP 平均质量浓度与气象要素作相关分析,在月时间尺度上讨论气象因子对瓦里关 TSP 质量浓度的影响程度.

2 结果与分析

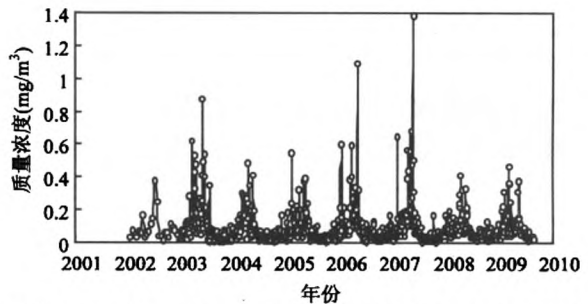


图 1 2002 年 11 月至 2009 年 8 月瓦里关山地区 TSP 的日平均浓度

Fig.1 TSP daily average concentration from November, 2002 to August, 2011 in Waliguan Mountain

图 1 是 2002 年 11 月到 2009 年 8 月间瓦里关山地区大气中 TSP 的日平均浓度.由图可见,瓦里关山地区大气中 TSP 有两种变化趋势,即一种缓慢季节波动变化和迭加其上的周期 3~5d 不等的 TSP 急剧上升的变化.长期波动变化基本上反映了瓦里关山地区 TSP 的一种本底变化趋势,浓度值一般都低于 0.1mg/m<sup>3</sup>,说明该地区 TSP 的局地排放源较少,本底浓度较低;而经常出现的气溶胶浓度急剧上升的变化,有时其峰值浓度可高达 1.3mg/m<sup>3</sup>,其周期也与天气过程活动周期基本吻合,反映出该地区大气受到了明显的污染气团或外来沙尘影响.在冬春季,气溶胶浓度出现急剧增高的现象(变化曲线起伏非常大)表现得尤为

明显和突出,一方面这种急剧增高所达到的峰值明显高于其他季节;而另一方面在这些峰值的间歇期间,气溶胶日平均浓度一般都保持在 0.1 mg/m<sup>3</sup> 以下低水平.这是因为冬春季出现大风沙尘天气过程,TSP 质量浓度都会迅速上升,并且浓度值非常高,随着沙尘天气的结束,TSP 质量浓度也随之下降.

2.1 TSP 质量浓度年际变化特征

图 2 给出了 2003~2008 年瓦里关山地区 TSP 平均质量浓度年际变化,从图中可以看出:2003~2008 年瓦里关山地区 TSP 的年均值为 0.076mg/m<sup>3</sup>,在 0.068~0.089mg/m<sup>3</sup> 之间变化.2006 年是瓦里关山地区 TSP 年平均质量浓度最高的一年,平均为 0.089mg/m<sup>3</sup>,2007 年为次高值,平均为 0.085mg/m<sup>3</sup>,2006 年和 2007 年超过国家标准环境空气质量一级标准.其余年份达到国家标准环境空气质量一级标准.2004 是瓦里关山地区 TSP 年平均质量浓度最低,为 0.068 mg/m<sup>3</sup>.

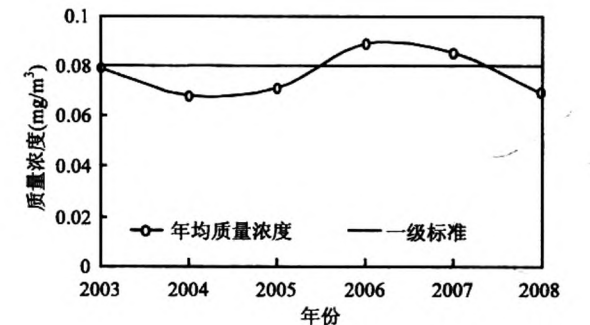


图 2 2003~2008 年瓦里关山地区 TSP 质量浓度年际变化

Fig.2 The annual variation of TSP mass concentration from 2003 to 2008 in Waliguan Mountain

采用 Daniel<sup>[8]</sup>趋势检验定量分析其逐年变化:

$$\gamma_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i}{N^3 - N} \quad (2)$$

式中:  $\gamma_s$  为 spearman 秩相关系数;  $N$  为时间周期; $a$ ;  $d_i$  为变量  $X_i$  和变量  $Y_i$  之差;  $X_i$  对应各时间周期按浓度值从小到大排列的序号;  $Y_i$  对应各时间周期按时间排列的序号.  $\gamma_s$  为负,呈下降趋势;反之则为上升趋势.若  $|\gamma_s| > W_p$  (秩相关系数统计表中

的临界值),表明变化趋势有显著意义.此处样本数  $N=6$ ,  $W_{0.01}=1$ ,经检验,  $\gamma_s=-0.14$ ,说明 2003~2008 年瓦里关山地区 TSP 浓度呈下降趋势,但趋势不显著.

2.2 TSP 质量浓度月、季变化

我国现行的《环境空气质量标准》<sup>[7]</sup>中只有 TSP 的年、日标准,而无月、季标准.本文采用指数法<sup>[9]</sup>确定了月、季标准值:

$$\frac{C_1}{C_2} = \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^a \quad (3)$$

式中:  $C_1$  为年标准值;  $C_2$  为日标准值;  $T_2$  为标准时间,取 365;  $T_1$  为日标准时间,取 1.将 TSP 的年、日标准质量浓度值及时间值代入式中,得  $a$ ,再分别将季、月时间值代入相应的式中即可得其季、月标准质量浓度值(表 1).

表 1 指数法确定的 TSP 月、季标准值( $\text{mg}/\text{m}^3$ )  
Table 1 Monthly and seasonal TSP standard value determined with index method ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )

| 级 别 | 年    | 日    | 月     | 季     |
|-----|------|------|-------|-------|
| 一 级 | 0.08 | 0.12 | 0.095 | 0.088 |
| 二 级 | 0.20 | 0.30 | 0.237 | 0.220 |
| 三 级 | 0.30 | 0.50 | 0.372 | 0.339 |

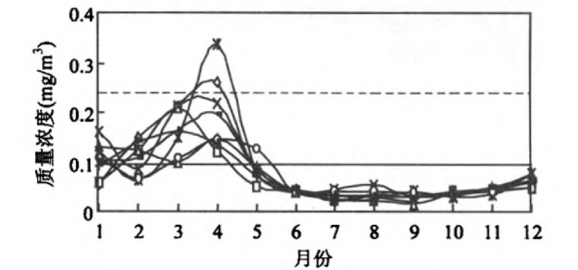
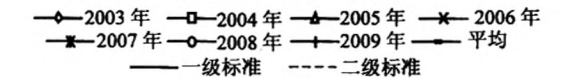


图 3 瓦里关山地区 TSP 质量浓度的月平均变化  
Fig.3 The monthly variation of TSP mass concentration in Waliguan Mountain



从瓦里关山地区 2002~2009 年 TSP 质量浓度月平均变化看出(图 3),瓦里关山地区 TSP 质量浓度的月动态变化特征明显:从秋初开始逐步增大,至春季的 4 月出现峰值(变化范围在 0.122~

0.335 $\text{mg}/\text{m}^3$ ,多年平均值为 0.195 $\text{mg}/\text{m}^3$ ),在 5~8 月,TSP 质量浓度逐渐下降,9 月份达到最低值(0.017~0.042 $\text{mg}/\text{m}^3$ ,多年平均值为 0.029 $\text{mg}/\text{m}^3$ );多年平均值在 1~4 月均超过国家标准环境空气质量一级标准.从 2003~2009 年的各年 TSP 的月变化情况,各年月平均变化与多年变化相一致,但各年变化起伏各有不同;各年 1~5 月月均值超过国家标准环境空气质量一级标准的情况与多年情况也不完全相同:1~2 月份有 4 年超过国家标准环境空气质量一级标准(1 月:2005~2008 年,2 月:2003~2005、2009 年),3 月份 7 年全部超过国家标准环境空气质量一级标准,4 月份有 5 年超过国家标准环境空气质量一级标准(2004~2006、2008~2009 年)和 2 年超过国家标准环境空气质量二级标准(2003、2007 年);5 月份仅有 1 年超过国家标准环境空气质量一级标准(2008 年).从各月的标准偏差来看,冬春季各月的标准偏差较大,夏秋季较小,这说明冬春季 TSP 质量浓度变化波动比较大,夏秋季比较平稳.

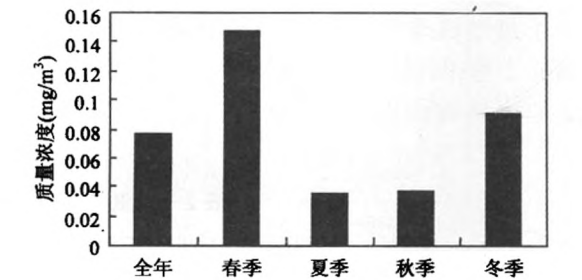


图 4 瓦里关山地区 TSP 质量浓度的季节变化  
Fig.4 The seasonal variation of TSP mass concentration in Waliguan Mountain

图 4 为瓦里关山地区 TSP 平均质量浓度的季节变化.整体上,春季 TSP 质量浓度最高,其次是冬季和秋季,夏季最低,四季的 TSP 平均质量浓度分别为:0.148,0.091,0.037,0.035 $\text{mg}/\text{m}^3$ ,四季的变化范围分别为 0.111~0.189 $\text{mg}/\text{m}^3$ 、0.075~0.109 $\text{mg}/\text{m}^3$ 、0.018~0.063 $\text{mg}/\text{m}^3$ 和 0.029~0.046 $\text{mg}/\text{m}^3$ ,这是因为该地区影响 TSP 质量浓度的主要因素是大风和沙尘天气,而大风和沙尘天气日数变化规律也为春季>冬季>夏季>秋季.

春季和冬季均超过国家标准环境空气质量一级标准,从各年的季节情况来看:春季 2003~2009 年均超过国家标准环境空气质量一级标准,冬季仅有 2002、2005、2006 年达超过国家标准环境空气质量一级标准.造成上述季节差异的原因与本区上空大气环流形势的变化有密切关系,还与该地区的地理环境、地形条件以及下垫面状况等有关.瓦里关山地区的冬、春季,高空受南支西风急流(38°N 以南)控制,地面常出现大风天气,降水较少,气候干燥,地表植被覆盖少,特别是春季,地表开始解冻,土质疏松,此时大风的出现有利于扬沙、沙尘暴的发生,大量的尘埃粒子被吹起带到空中,导致大气中的自然尘埃气溶胶含量增高,形成了一年中 TSP 的高值期.夏季高原上空的西风急流北移至 40°N 以北,强度也随之减弱,再则此时正值牧草生长旺季,地表植被覆盖度大,大风和扬沙天气明显减少,进入大气中的尘埃粒子也大大减少.同时,这个季节也正是高原雨季,由于降水对气溶胶的冲刷作用,使空气中的 TSP 含量降低,成为一年中的低值期.秋季是过渡季节,此时南支西风急流虽南移到高原上空,但强度弱,大风扬沙天气仍然不多,加之地表植被尚未全部枯死,进入大气的尘埃粒

子不多,因此,秋季的 TSP 仍然较小.由上述分析可知,进入本区大气中的气溶胶粒子主要是由地表沙尘通过大风扬尘的途径进入大气.这与文献[10-11]提出的沙尘是季节气溶胶的主要来源,并由此影响 TSP 变化的观点是一致的.

对各季节逐年趋势检验定量分析得知:瓦里关山地区 TSP 浓度夏季呈下降趋势,其他各季节均呈上升趋势,但趋势均不显著(春季: $\gamma_s=0.22$ ,  $W_{0.05}=0.786$ ,夏季: $\gamma_s=-0.35$ ,  $W_{0.05}=0.738$ ,秋季: $\gamma_s=0.07$ ,  $W_{0.05}=0.786$ ,冬季: $\gamma_s=0.48$ ,  $W_{0.05}=0.738$ ).

2.3 TSP 质量浓度分布特征

将 TSP 质量浓度分为 5 个档次:  $TSP < 0.04\text{mg/m}^3$ 、 $0.04 \leq TSP < 0.08 \text{ mg/m}^3$ 、 $0.08 \leq TSP < 0.12\text{mg/m}^3$ 、 $0.12 \leq TSP < 0.18\text{mg/m}^3$ 、 $TSP \geq 0.18\text{mg/m}^3$ , 5 个档次的 TSP 质量浓度出现频率见表 2,全年和各季节 TSP 浓度质量浓度在各档次出现的频率是不完全相同的,全年 TSP 质量浓度达到国家标准环境空气质量一级标准的频率为 66.2%,超过国家标准环境空气质量一级标准的频率为 33.8%;春夏秋冬四季 TSP 质量浓度达到国家标准环境空气质量一级标准分别为 33.5%、85.7%、95.0%和 59.6%.超过国家标准环境空气质量一级标准的频率分别为 66.5%、14.3%、5.0%和 40.4%.

表 2 瓦里关山地区 TSP 浓度的分布特征(%)  
Table 2 Distribution characteristics of TSP mass concentration in Waliguan Mountain (%)

| 季节 | TSP 范围( $\text{mg/m}^3$ ) |                        |                        |                        |                 |
|----|---------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------|
|    | $TSP < 0.04$              | $0.04 \leq TSP < 0.08$ | $0.08 \leq TSP < 0.12$ | $0.12 \leq TSP < 0.18$ | $TSP \geq 0.18$ |
| 春季 | 7.3                       | 26.2                   | 20.2                   | 17.2                   | 29.1            |
| 夏季 | 60.3                      | 25.4                   | 9.1                    | 2.6                    | 2.6             |
| 秋季 | 67.7                      | 27.3                   | 2.5                    | 2.5                    | 0.0             |
| 冬季 | 27.4                      | 32.2                   | 19.2                   | 13.5                   | 7.7             |
| 全年 | 38.5                      | 27.7                   | 13.3                   | 9.6                    | 10.9            |

2.4 TSP 与主要气象要素的关系

2.4.1 TSP 与气象要素的相关性分析 空气质量除与污染源的排放量有关外,还与自然地理环境及气象条件有密切关系.气象条件改变影响着污染物的扩散、稀释、积聚和滞留,有利的条件可以减小污染,不利的气象条件会加重空气污染.当污染物排放量变化不大的情况下,风、降水、

气压、温度等气象要素直接影响空气质量,使空气污染指数差别很大.

表 3 给出了瓦里关山地区大气 TSP 质量浓度与气象因子的相关关系,从表 3 可以看出:与 TSP 月平均质量浓度呈显著负相关的当月气象因子有相对湿度、降水量、平均气温和本站气压,显著正相关的当月气象因子有平均风速、垂直风速、大风

沙尘日数和月最大风速.与 TSP 月平均质量浓度呈量、平均气温和本站气压,呈显著正相关的有平均显著负相关的上月气象因子有相对湿度、月降水量、风速、垂直风速、大风沙尘日数和月最大风速.

表 3 瓦里关山地区大气 TSP 质量浓度与气象因子的相关关系

Table 3 Correlation coefficient between TSP mass concentration and meteorological factors in Waliguan Mountain

| 月份 | 相对湿度<br>(%) | 降水量<br>(mm) | 平均风速<br>(m/s) | 平均气温<br>(℃) | 本站气压<br>(hPa) | 垂直<br>风速(m/s) | 大风沙尘日数<br>(d) | 月最大风速<br>(m/s) | 能见度<br>(km) |
|----|-------------|-------------|---------------|-------------|---------------|---------------|---------------|----------------|-------------|
| 当月 | -0.56***    | -0.51***    | 0.56***       | -0.37***    | -0.54***      | 0.58***       | 0.75***       | 0.56***        | -0.37***    |
| 上月 | -0.63***    | -0.62***    | 0.38***       | -0.62***    | -0.66***      | 0.60***       | 0.52***       | 0.55***        | 0.06        |

注:\*\*\*为通过0.001检验,\*\*为通过0.01检验,\*为通过0.05检验

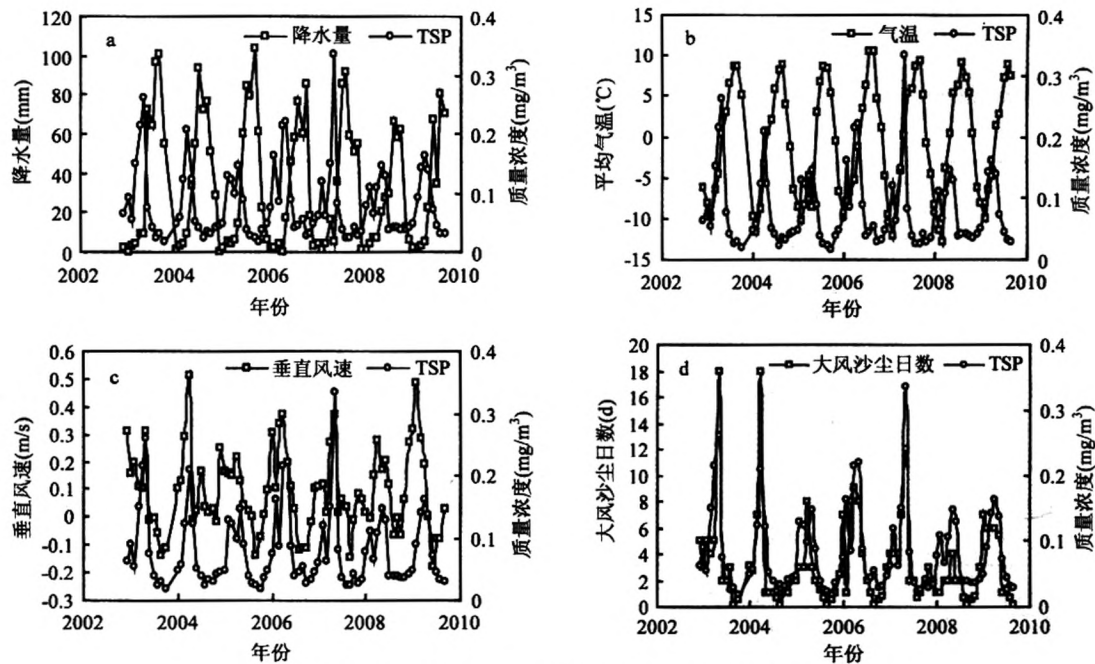


图 5 瓦里关山地区 TSP 质量浓度与气象要素的变化关系

Fig.5 Change relation of TSP mass concentration and meteorological factors in Waliguan Mountain

图 5 给出了瓦里关山地区大气 TSP 质量浓度与部分气象因子的变化关系,从图 5 可以看出:相对湿度、降水量、气温和气压与 TSP 质量浓度变化表现出相反的趋势,且有一定的滞后效应.风速、垂直风速和大风沙尘日数与 TSP 质量浓度变化基本一致.而能见度与 TSP 质量浓度变化表现出相反的趋势,没有滞后效应.

从当月和上月各气象因子与 TSP 月平均质量浓度的相关系数数值变化情况来看,与风有关的平均风速、大风沙尘日数和月最大风速都变小,而相对湿度、月降水量、平均气温、本站气压都

增大,这说明当月平均风速、大风沙尘日数和月最大风速对 TSP 当月平均质量浓度的影响是直接的;相对湿度、月降水量、平均气温、本站气压不仅仅对当月 TSP 月平均质量浓度有影响,而且上月的相对湿度、月降水量、平均气温等干湿气象条件对该地区的下垫面表层土壤环境的干湿状况有明显的影 响,从而导致大气环境中的颗粒物发生变化.

瓦里关山地区 TSP 与能见度在当月呈现显

著的负相关,与上月无相关关系.能见度和气溶胶的关系与其他气象要素的关系不同,是反映沙尘气溶胶的较好参数.能见度并未对沙尘气溶胶浓度的分布产生影响.能见度的高低反映了空气质量的好坏,能见度的下降是由于空气中的颗粒污染物对光的吸收和散射造成的.能见度高,说明大气中的 TSP 较少,空气质量较好,相反,能见度低,说明大气中的 TSP 相对较多,空气质量较差.

为了进一步说明气象条件对 TSP 的影响,对 TSP 质量浓度和各气象因子进行分级,分析气象

因子对不同级别的 TSP 质量浓度和不同级别的气象因子对 TSP 的影响.其中 TSP 质量浓度按《环境空气质量标准》月一级标准分成 2 个级别,气象因子中相对湿度和降水量分为 3 个级别(按多年平均值 $\pm 1$  倍标准偏差),其他气象因子分为 2 个级别(气温按冰点摄氏 0℃分为零上和零下两级,垂直风速按 $>0\text{m/s}$  为上升气流,  $<0\text{m/s}$  为下沉气流来分级,其他因子按多年平均值来分级),分别统计分析了气象因子对 TSP 变化的影响(表 4, 表 5).

表 4 瓦里关山地区 TSP 分级质量浓度与气象因子的相关关系

Table.4 Correlation coefficient between classification of TSP mass concentration and meteorological factors in Waliguan Mountain

| 项 目                        | 相对湿度<br>(%) | 降水量<br>(mm) | 平均<br>风速(m/s) | 平均气温<br>(℃) | 本站气压<br>(hPa) | 垂直风速<br>(m/s) | 大风沙尘日<br>数(d) | 月最大风速<br>(m/s) | 能见度<br>(km) |
|----------------------------|-------------|-------------|---------------|-------------|---------------|---------------|---------------|----------------|-------------|
| TSP<0.095mg/m <sup>3</sup> | -0.66***    | -0.49***    | 0.53***       | -0.53****   | -0.55***      | 0.49***       | 0.58***       | 0.50***        | 0.30**      |
| TSP>0.095mg/m <sup>3</sup> | -0.31       | -0.11       | 0.31          | 0.36        | 0.22          | 0.50*         | 0.69***       | 0.52**         | -0.63***    |

注:\*\*\*为通过0.001检验,\*\*为通过0.01检验,\*为通过0.05检验

表 5 瓦里关山地区不同分级的气象因子对 TSP 质量浓度的影响分析

Table 5 Research on influence of TSP mass concentration on different classification of meteorological factors in Waliguan Mountain

| 气象因子         | 相关<br>系数 | 气象因子         | 相关<br>系数 |
|--------------|----------|--------------|----------|
| 相对湿度<40 %    | 0.40     | 气压<640 hPa   | 0.01     |
| 40%<相对湿度<75% | -0.63*** | 气压>640 hPa   | 0.42**   |
| 相对湿度>75%     | -0.47    | 垂直风速<0m/s    | 0.32     |
| 降水量<5 mm     | 0.10     | 垂直风速>0m/s    | 0.50***  |
| 5<降水量<65mm   | -0.58*** | 月最大风速<10m/s  | 0.18     |
| 降水量>65mm     | -0.50*   | 月最大风速>10 m/s | 0.43**   |
| 风速<5 m/s     | 0.42**   | 大风沙尘日数<3d    | 0.33     |
| 风速>5m/s      | 0.40*    | 大风沙尘日数>3d    | 0.66***  |
| 气温<0℃        | 0.14     | 能见度<25km     | -0.60**  |
| 气温>0℃        | -0.60*** | 能见度>25km     | -0.21    |

注:\*\*\*为通过0.001检验,\*\*为通过0.01检验,\*为通过0.05检验

从表 4 可见,在 TSP<0.095mg/m<sup>3</sup> 时,TSP 与相对湿度、降水量、气温和气压存在显著负相关,相关系数分别为-0.66、-0.49、-0.53 和-0.55,与平均风速、垂直风速、大风沙尘日数、月最大风速和能见度存在显著正相关,相关系数分别为

0.53、0.49、0.58、0.50 和 0.30;而 TSP>0.095mg/m<sup>3</sup> 时,与 TSP 存在显著相关的气象因子只有大风沙尘日数、垂直风速、月最大风速和能见度,相关系数分别为 0.69、0.50、0.52 和-0.63.TSP>0.095mg/m<sup>3</sup> 时与平均风速无相关关系,可能是由于平均风速不能准确反映风速的实际大小.可见,在 TSP 较大时,大气中的 TSP 与风速存在显著的相关关系,风速越高,TSP 的浓度越大.在 TSP 较小时,TSP 主要受相对湿度、降水量、平均气温、本站气压、平均风速、垂直风速、月最大风和垂直风速的多重因子的共同影响.

由表 5 可见,当相对湿度小于 40%,两者间呈正相关,而当相对湿度大于等于 40%时,两者间呈负相关,只有相对湿度在 40%~75%间与 TSP 的相关关系通过显著性检验,其他 2 个级别没有通过显著性检验.降水量小于 5mm,与 TSP 浓度呈现正相关关系,而降水量在 5~65mm 和>65mm 时,与 TSP 浓度呈现显著的负相关关系;气温>0℃和气压>640hPa 时与 TSP 质量浓度的分别呈现显著的负相关和正相关;垂直风速、风速、月最大风速和大风沙尘日数与 TSP 均呈现正相关,但只

有垂直风速 $>0\text{m/s}$ (上升气流)、月最大风速 $>10\text{m/s}$ 和大风沙尘日数 $>3\text{d}$ 时均通过著性检验.风速 $<5\text{m/s}$ 和风速 $>5\text{m/s}$ 与 TSP 质量浓度的均呈通过显著检验.这说明在一定风速下 TSP 质量浓度随风速的增大而增大,但风速达到起沙风速后,风速又对沙尘起动有一定的影响,地表的沙尘会被风带入空中,造成沙尘天气,能见度下降,使得总悬浮颗粒物质量浓度增大,减弱了风速对 TSP 的扩散和稀释;能见度与 TSP 质量浓度呈负相关,只有能见度小于  $25\text{km}$  通过显著性检验.

**2.4.2 降水天气过程对 TSP 的影响** 为了定量地分析雪和雨 2 种降水现象对 TSP 质量浓度的清除作用,选择 2006~2007 年 2 年内 5 月和 7 月分别作为雪和雨两种降水现象,根据单次观测时段内,以没有出现雨(或雪)现象的观测时段内 TSP 质量浓度作为背景值,以出现雨(或雪)现象的作为雨(或雪)天气现象的 TSP 质量浓度.表 6 给出了降水对 TSP 的清除效率.清除效率的定义为:(雨雪 TSP 质量浓度-背景值)/背景值 $\times 100$ .

从表 6 可以看出:瓦里关山地区 2006 和 2007 年雪和雨的清除效率分别为 26.7%和 33.9%.

表 6 瓦里关山地区雨和雪 2 种天气现象降水量对 TSP 的影响

| Table 6 Influence of TSP mass concentration on rainfall of rain and snow in Waliguan Mountain |       |                                    |                                        |             |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------------------------------------|----------------------------------------|-------------|----------|
| 天 气                                                                                           | 时间(d) | 变化范围<br>( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) | TSP 质量浓度<br>( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) | 清除效<br>率(%) | 减少倍<br>数 |
| 无雪<br>(背景)                                                                                    | 8     | 0.059~0.105                        | 0.086                                  |             |          |
| 无雨<br>(背景)                                                                                    | 6     | 0.021~0.090                        | 0.059                                  |             |          |
| 下雪                                                                                            | 7     | 0.029~0.117                        | 0.063                                  | -26.7       | 0.7      |
| 下雨                                                                                            | 19    | 0.010~0.132                        | 0.039                                  | -33.9       | 0.7      |

**2.4.3 沙尘天气过程对 TSP 的影响** 为了定量分析比较不同大风沙尘天气对 TSP 质量浓度的影响,选择出现沙尘天气比较频繁的 2003、2006 和 2007 年这 3 年的 4 月份,根据单次观测时段内的 TSP 质量浓度和出现的天气现象,以没有出现大风和沙尘天气的 TSP 质量浓度作为背景值,以单独出现天气现象的 TSP 质量浓度作为该单独

天气现象的变化浓度值,出现 2 种以上天气现象的以影响最大的作为该天气现象的 TSP 质量浓度.按大风、浮尘、扬沙和沙尘暴四种天气现象分别进行统计对 TSP 的影响(表 7),增加效率的定义为:(大风沙尘 TSP 质量浓度-背景值)/背景值 $\times 100$ .

表 7 瓦里关山地区大风、浮尘、扬沙和沙尘暴 4 种天气现象对 TSP 的影响

| Table 7 Influence of TSP mass concentration on gale, floating dust, blowing sand and Sandstorm in Waliguan Mountain |           |                                    |                                        |             |          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------------------------------|----------------------------------------|-------------|----------|
| 天 气                                                                                                                 | 时间<br>(d) | 变化范围<br>( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) | TSP 质量浓<br>度( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) | 增加效率<br>(%) | 增加倍<br>数 |
| 背景<br>天气                                                                                                            | 22        | 0.044~0.260                        | 0.12                                   |             |          |
| 大风                                                                                                                  | 7         | 0.067~0.390                        | 0.22                                   | 88.3        | 1.8      |
| 浮尘                                                                                                                  | 7         | 0.132~0.535                        | 0.329                                  | 174.2       | 2.7      |
| 扬沙                                                                                                                  | 8         | 0.253~0.559                        | 0.382                                  | 218.3       | 3.2      |
| 沙尘暴                                                                                                                 | 4         | 0.553~1.386                        | 0.874                                  | 628.3       | 7.3      |

从表 7 可以看出:在大风沙尘天气影响时,其对 TSP 质量浓度的增加是非常显著的.瓦里关山地区 2003、2006 和 2007 年这 3 年大风、浮尘、扬沙和沙尘暴增加效率分别为 88.3%、174.2%、218.3%和 628.3%;与兰州<sup>[12]</sup>和北京<sup>[13]</sup>地区 TSP 质量浓度对比发现,瓦里关山地区 4 种天气现象 TSP 的质量浓度之间的倍数关系比兰州地区略轻,比北京地区大,但增加趋势一致.

2.5 后向轨迹分析

春季频繁发生的沙尘天气导致 TSP 的月质量浓度显著上升.资料分析表明,4 月份 TSP 月平均浓度,属全年最高.导致瓦里关山地区沙尘天气的沙尘主要来源于西部荒漠地区<sup>[14-15]</sup>,而沙尘的远距离输送主要取决于大气的平流运动,根据空气的运动轨迹可以判断沙尘的来源.美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的 HYSPLIT 4 拉格朗日后向轨迹模式计算<sup>[16]</sup>,采用美国国家环境预测中心(NCEP)全球资料同化系统(GDAS)数据(时间和水平分辨率分别是 6h 和  $1\times 1$  经纬度),根据 2006 年和 2007 年冬春季分别发生的总共 7 次较严重的沙尘天气,推算了 100m 和 1000m 高度

120h 气流的后向轨迹,图 6 给出了 2006 年 4 月 15 日和 2007 年 4 月 4 日的气团轨迹图(其余略).从计算的后向轨迹可以推断,来自新疆以西的气流或蒙古国以北贝加尔湖附近的气流将沿途沙尘源地的沙尘向下游输送,造成了瓦里关山地区的沙尘天气,沙尘源地位于新疆北部、甘肃西北部、内蒙古中西部及本省西北部的柴达木盆地.

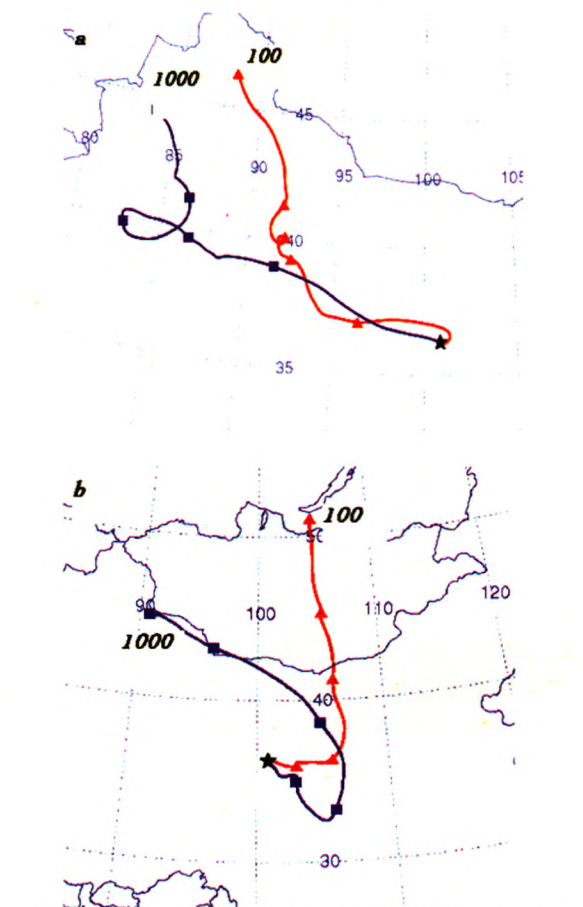


图 6 利用 HYSPLIT4 后向轨迹模拟计算的 2006 年 4 月 15 日(a)和 2007 年 4 月 4 日(b)的气团轨迹  
Fig.6 Air mass trajectory based on HYSPLIT4 Backward Trajectory model in April 15, 2006 (a) and April 4, 2007(b)

2.6 与国内城市(或地区)对比

表 8 给出了瓦里关山地区与国内部分城市(或地区)TSP 质量浓度的多年平均值对比,新疆塔里木盆地、乌鲁木齐、兰州、西安、沈阳、成都和重庆的 TSP 质量浓度很高,香港 TSP 质量浓度较低.新疆塔里木盆地处于沙漠边缘,乌鲁木

齐、兰州、西安和沈阳为北方城市,春季多风沙、冬季燃煤取暖和稳定的大气环境,是造成 TSP 质量浓度较高的原因.重庆与成都处于西南地区,空气湿度大,重庆多山、成都是盆地,不利于大气颗粒物扩散,这说明城市规模、城市地形对 TSP 浓度水平有很大的影响.香港在沿海地区,大气扩散条件优于其他城市,因此 TSP 质量浓度较低.

表 8 瓦里关山地区与国内城市(或地区)<sup>[17-19]</sup>TSP 质量浓度的对比  
Table 8 The Comparison Study of TSP mass concentration in Wari Guan Mountain and domestic cities (regions)

| 城市或地区  | 时 间         | 质量浓度<br>(mg/m <sup>3</sup> ) | 备 注  |
|--------|-------------|------------------------------|------|
| 瓦里关山   | 2002~2009 年 | 0.076                        | 全球   |
|        | 2003~2009 年 | 0.069                        | 本底站  |
|        | 10 月、1 月平均  |                              |      |
| 黑龙江龙凤山 | 1994 年 10 月 | 0.0662                       | 区域   |
|        | 1995 年 1 月  |                              | 本底站  |
| 浙江临安   |             | 0.0946                       |      |
| 哈密     |             | 0.229                        |      |
| 新疆塔中   | 2004~2007 年 | 1.222                        | 沙漠边缘 |
| 喀什     |             | 1.499                        |      |
| 兰 州    | 1995~2003 年 | 0.449                        | 城区   |
| 乌鲁木齐   | 2009 年      | 0.4687                       | 城区   |
| 西 安    | 2005 年      | 0.3312                       | 城区   |
| 成 都    | 2006 年      | 0.3880                       | 城区   |
| 重 庆    | 2005 年      | 0.2062                       | 城区   |
| 沈 阳    | 2002 年      | 0.3520                       | 城区   |
| 香 港    | 1998 年      | 0.1231                       | 城区   |

气溶胶质量浓度分布特征显示出 3 个本底站(黑龙江龙凤山和浙江临安 TSP 质量浓度为月平均值)所代表的不同尺度的环境,大气环境质量最好的当属基准站—瓦里关山站,它代表了全球大陆尺度的环境,对周围环境条件要求极严,海拔高而又位于我国西部不发达地区,其周围大环境以自然景观为主,故该站受人类活动影响为最轻;龙凤山作为中国东北农业区区域尺度环境的代表,临安代表中国东南沿海发达地区的区域尺度环境,受人类活动影响较大.

3 结 论

3.1 瓦里关山地区 TSP 质量浓度多年平均值为

0.076mg/m<sup>3</sup>,呈下降趋势。月际变化和季节变化特征明显,从秋初开始逐步增大,至春季的4月出现峰值(多年平均值为0.195mg/m<sup>3</sup>),在5~8月,TSP质量浓度逐渐下降,9月份达到浓度的最低值(多年平均值为0.029mg/m<sup>3</sup>);春季最高,其次是冬季和秋季,夏季最低,四季的TSP平均质量浓度分别为:0.148、0.091、0.037和0.035mg/m<sup>3</sup>,夏季呈下降趋势,其余季节呈上升趋势。

**3.2 大气 TSP 浓度明显受到局地气象因子降水量、温度、相对湿度和风速的控制。**降雨量越小、温度越低、相对湿度越小、风速越小,大气 TSP 浓度越高,反之越低。

**3.3 春季背景大气 TSP 的质量浓度平均 0.12mg/m<sup>3</sup>,大风天气为 0.22mg/m<sup>3</sup>,浮尘天气为 0.329mg/m<sup>3</sup>,扬沙天气 0.382mg/m<sup>3</sup>,沙尘暴 0.874 mg/m<sup>3</sup>,分别为背景大气的 1.8、2.7、3.2 和 7.3 倍,雨雪的清除效率分别为 33.9%和 26.7%。**

**3.4 气象后向轨迹模型分析瓦里关山地区沙尘暴的沙源地来源于新疆北部、甘肃西北部、内蒙古中西部及本省西北部的柴达木盆地。**

**3.5 TSP 质量浓度远低于北方城市、沿海城市和区域本底站,代表了全球大陆尺度的环境。冬春季多风沙是造成 TSP 质量浓度较高的主要因素。**

位移特征 [J]. 中国沙漠, 2012,32(2):454-457.

- [11] 吕艳丽,刘连友,屈志强,等.中国北方典型沙尘天气特征研究 [J]. 中国沙漠, 2012,32(2):447-453.
- [12] 奚晓霞,李 杰,权建农.兰州市春季沙尘气溶胶质量浓度的若干研究 [J]. 干旱区研究, 2004,21(2):112-116.
- [13] 徐晓峰,王京丽,程丛兰,等.2002 年北京风沙季节颗粒物测值分析 [J]. 气象科技, 2006,34(6):662-666.
- [14] 赵 强,李江英.青海省沙尘暴天气过程中风速变化规律的研究 [J]. 青海科技, 2003,5:32-34.
- [15] 李 林,赵 强.青海沙尘暴研究 [J]. 气象科技, 2002,30(4): 218-221.
- [16] Draxler R R.Description of the HYSPLIT\_4 Modeling System [R]. NOAA Technical Memorandum.24.1997.Ref Type Report.
- [17] 李海华.成都市城东区大气颗粒物污染特征研究 [D]. 成都:成都理工大学, 2007:1-30.
- [18] 刘新春,钟玉婷,何 清,等.乌鲁木齐市 TSP 分布特征及影响因素分析 [J]. 生态环境学报, 2011,20(11):1706-1712.
- [19] 杨东贞,于晓岚,房秀梅,等.区域站和基准站气溶胶的分析 [J]. 应用气象学报, 1996,7(4):396-404.

**作者简介:** 祁栋林(1967-),男,青海乐都人,高工,主要从事大气成分观测和研究.发表论文 5 篇.

## 参考文献:

- [1] GB3095-82 大气环境标准 [S].
- [2] 刘咸德,李 军,赵 越,等.北京地区大气颗粒物污染的风向因素研究 [J]. 中国环境科学, 2010,30(1):1-6.
- [3] 范雪波,刘 卫,王广华,等.杭州市大气颗粒物浓度及组分的粒径分布 [J]. 中国环境科学, 2011,31(1):13-18.
- [4] 周凌晔,温玉璞,李金龙,等.地面风对瓦里关山大气 CH<sub>4</sub> 本底浓度的影响分析 [J]. 应用气象学报, 2004,15(3):257-263.
- [5] 赵玉成,温玉璞,德力格尔,等.青海瓦里关大气 CO<sub>2</sub> 本底浓度的变化特征 [J]. 中国环境科学, 2006,26(1):1-5.
- [6] 魏鸿业,张国庆,张加昆,等.瓦里关山 TSP 浓度分布特征及与大气污染物排放的关系 [J]. 青海环境, 2008,18(2):53-57.
- [7] GB3095-1996 环境空气质量标准 [S].
- [8] 中国环境监测总站.环境资料汇编 [M]. 北京:中国科学出版社, 1998:98-99.
- [9] 国家环境保护局,中国环境科学院.城市大气污染物总量控制方法手册 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 1991:105-106.
- [10] 韩兰英,张 强,郭 锐,等.中国西北地区地区沙尘天气的时空