

文章编号:1000-582X(2003)04-0135-04

# PM<sub>10</sub>治理措施有效性的灰色关联评价及实证分析\*

何梅<sup>1</sup>, 林勇<sup>2</sup>

(1. 重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学校长办公室, 重庆 400044)

**摘要:**大气环境是一个复杂的、多因素相互作用的开放系统。区域大气环境受整个大气环境影响的同时,更与区域内经济发展水平、工业布局、环境治理实效等因素密切相关。如何有效地监测和控制大气环境中的PM<sub>10</sub>污染,已经成为全球及区域大气环境治理的重点和难点。PM<sub>10</sub>在时间、空间和数量上的不确定性以及大气治理措施的不稳定性等系列特征,使大气治理措施与PM<sub>10</sub>在区域环境中的分布和运动现状构成了一个灰色关联系统。首次将斜率关联分析法应用于PM<sub>10</sub>治理措施有效性的评价,并实证分析重庆市“九五”期间各大气环境治理措施与PM<sub>10</sub>污染的相对有效性。

**关键词:**大气颗粒物;治理;评价

**中图分类号:**X513

**文献标识码:**A

大气环境是一个复杂的、多因素相互作用的开放系统。大气环流的运动、污染物质的生成转化、控制措施的制定和实施,以及气候、地理特征的影响使大气环境中所有组分的数量和存在方式始终处于“灰色”状态,即“既含有已知又含有未知的或非确知的信息”的状态<sup>[1]</sup>。PM<sub>10</sub>在时间、空间和数量上的不确定性以及大气治理措施的不稳定性等系列特征,使大气治理措施与PM<sub>10</sub>在区域环境中的分布和运动现状构成了一个灰色关联系统。

区域大气环境是整个大气环境的有机组成部分。同时,区域大气环境受到局部地区生产力发展水平、社会生活方式、工业及人口布局等因素的影响而具有地区典型特征。如北方大部分地区冬季的空气大多是煤烟型污染<sup>[2]</sup>,平时则以可吸入颗粒物的污染为主。

重庆市作为西部地区长江上游的工业重镇,火力发电、机械制造、钢铁、化工在国民生产总值中占有相当大的比重,由此产生大量污染物排放,形成长时间漂浮在空气中,空气动力学直径在10 μm(DP ≤ 10 μm)以下的气溶胶粒子,简称PM<sub>10</sub>。这些细微粒子大多数含有有毒成分或者携带有毒物质,通过呼吸道被人体吸收而进入人体,带来机理更加复杂、难以消除的危害<sup>[3]</sup>。

PM<sub>10</sub>作为空气污染的重要影响成分,其复杂的理化组成、多相反应方式、纷繁的来源以及对人体和环境

产生的危害,成为近年来环境工作者共同关注的焦点问题。美国早在1987年就用PM<sub>10</sub>取代TSP作为大气颗粒物监测标准,并于1996年制定出PM<sub>2.5</sub>的24 h和年平均限值环境质量标准;2000年我国部分城市把PM<sub>10</sub>纳入环境监测的常规项目。由于PM<sub>10</sub>在时间、空间与数量上的随机性和不确定性,增加了政府与企业如何选择有效的、经济的治理措施以降低大气中PM<sub>10</sub>含量的难度。如何准确、动态评价区域内各种大气污染的治理措施在实现控制大气可吸入颗粒物中的有效性,成为一个重要的多学科综合的大气环境科学问题。但精确描述每一个环境、社会因素对区域大气污染的贡献是不现实的。特别是对于PM<sub>10</sub>,由于其监测数据的不完整和不确定,更加无法建立各因素与PM<sub>10</sub>污染之间一一对应的函数关系。

笔者考虑区域环境中PM<sub>10</sub>分布状况与大气环境治理措施这2个系统在发展运动过程中的相对变化特征,尤其是PM<sub>10</sub>在时间、空间和数量上的不确定性以及大气治理措施的不稳定性,对区域环境大气污染治理与PM<sub>10</sub>分布和运动共同构成的灰色关联系统,运用斜率关联分析模型,定量分析PM<sub>10</sub>治理措施的有效性。在实证分析中,将表征大气中PM<sub>10</sub>污染的指标作为子因素,把影响这些污染的因素作为母因素,对重庆市“九五”期间大气环境治理措施与PM<sub>10</sub>污染的相对有效性做分析与评价。

\* 收稿日期:2002-12-11

作者简介:何梅(1975-),女,四川宜宾人,重庆大学硕士,主要从事环境工程的研究。

# 1 PM<sub>10</sub>治理措施有效性的灰色关联分析模型

## 1.1 关联分析模型描述<sup>[4]</sup>

设有自然数序列  $X(t)$ 、 $Y(t)$ , 即:

$$X_i(t_k) = \{X_i(t_1), X_i(t_2), \dots, X_i(t_n)\}$$

$$Y_j(t_k) = \{Y_j(t_1), Y_j(t_2), \dots, Y_j(t_n)\}$$

$$i, j, k = \{1, 2, \dots, N\}, t \in T。$$

则有  $X(t)$ 、 $Y(t)$  两数列在  $t$  时刻的关联系数  $\gamma_{ij}(t)$ :

$$\gamma_{ij}(t) = \frac{1}{1 + \left| \frac{\Delta x(t)}{\sigma_{xi}} - \frac{\Delta y(t)}{\sigma_{yj}} \right|}, t \in T \quad (1)$$

其中:

$$\Delta x(t) = x(t+1) - x(t) \quad (2)$$

$$\Delta y(t) = y(t+1) - y(t) \quad (3)$$

$$\sigma_{xi} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [x_i(t) - \bar{x}_i]^2} \quad (4)$$

$$\sigma_{yj} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y_j(t) - \bar{y}_j]^2} \quad (5)$$

## 1.2 斜率关联分析法进行 PM<sub>10</sub> 治理有效性评价的特点

对区域内大气治理措施与 PM<sub>10</sub> 的分布和运动现状构成的灰色关联系统, 运用斜率关联分析法评价

表 1 子因素和母因素数据表<sup>[5]</sup>

因 素	1996	1997	1998	1999	2000
X <sub>1</sub> (环保投资)/万元			9 892	10 733	
X <sub>2</sub> (原煤用量)/万 t	2 134.2	2 668.7	2 533.7	2 750	2 098.31
X <sub>3</sub> (燃油用量)/万 t	58.1	77.1	117.1	124.07	125.5
X <sub>4</sub> (人均绿地)/m <sup>2</sup>		2.08	2.29	2.37	2.42
X <sub>5</sub> (尾气治理率)/%	58.81	64.46	57.04	49.74	43.3
X <sub>6</sub> (粉尘量)/万 t	3.25	15.26	20	15.73	20.07
X <sub>7</sub> (民用车)/辆	254 406	282 865	329 972	366 645	429 500
Y <sub>1</sub> (SO <sub>2</sub> 浓度)/mg·m <sup>-3</sup>	0.321	0.208	0.183	0.171	0.156
Y <sub>2</sub> (TSP浓度)/mg·m <sup>-3</sup>	0.181	0.199	0.234	0.204	0.248
Y <sub>3</sub> (硫酸盐化速率)/(mg·SO <sub>3</sub> /100 cm <sup>2</sup> ·d)	1.78	1.58	1.69	1.58	1.03
Y <sub>4</sub> (NO <sub>x</sub> 浓度)/mg·m <sup>-3</sup>	0.041	0.067	0.056	0.062	0.068
Y <sub>5</sub> (呼吸系统疾病死亡率)/%	15.28	14.09	14.08	13.89	

数据来源:重庆市环境质量报告书 1996 - 2000 年;中国统计年鉴 1996 - 2000 年。

PM<sub>10</sub> 治理措施的有效性,具有以下特点:1) 模型所需的原始数据无须标准化和选择参考点,便于计算机处理;2) 原始数列中含有零或负值时,不影响评价效果;3) 通过滤波处理计算关联时,两序列均起作用;4) 模型所用数据量较一般的函数相关性分析和回归分析的要求较少而分辨率高,回避了不同指标的数量级和量纲,因此模型具有很好的扩展性和实用性。

## 2 实证分析

### 2.1 确定母因素函数 Y(t) 与子因素函数 X(t)

母因素函数  $Y(t)$  代表 PM<sub>10</sub> 污染,子因素函数  $X(t)$  代表大气污染治理措施。在此实证分析中,结合重庆市环境监测和环境数据获取的实际情况, $X(t)$  选择了环保投资、控制原煤用量和燃油消耗量、城区人均绿地面积、汽车尾气治理、实现锅炉烟尘达标排放以及控制民用车辆数量等 7 个指标;同时将 TSP、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、降尘、硫酸盐化速率以及呼吸系统疾病的死亡率作为重庆市“九五”期间 PM<sub>10</sub> 污染水平衡量指标的母因素函数。如表 1。

### 2.2 计算母因素函数与子因素函数 X(t) 的关联度

将表 1 中的数据代入式(1) ~ 式 5 中,通过计算机运算,得到  $Y(t)$  与  $X(t)$  两数列在  $t$  时刻的关联系数  $\gamma_{ij}(t)$ ,并将  $\gamma_{ij}(t)$  代入下列公式进行平均得到每个  $Y$  指标与  $X$  指标在  $t$  时间区间内的平均关联度大小:

$$R = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \gamma_{ij}(t) \quad (6)$$

由于 5 个  $X(t)$  指标与 7 个  $Y(t)$  指标在 5 个时间点总共有  $5 \times 7 \times (5 - 1) = 140$  个关联度数值,数据量大此处仅列出  $Y_1 - X(t)$  在各个时刻的关联度  $\gamma_{ij}(t)$ ,如表 2。

表 2 Y<sub>1</sub> - X(t) 的关联度表

因素	$\gamma_{ij}(1)$	$\gamma_{ij}(2)$	$\gamma_{ij}(3)$	$\gamma_{ij}(4)$	平均值 R
X <sub>1</sub>	—	—	0.357 53	—	0.357 53
X <sub>2</sub>	0.943 460	0.520 563	0.626 995	0.273 381	0.591 10
X <sub>3</sub>	0.449 887	0.493 165	0.952 604	0.831 999	0.681 914
X <sub>4</sub>	—	0.455 622	0.707 58	0.883 862	0.682 355
X <sub>5</sub>	0.465 965	0.411 750	0.456 112	0.470 225	0.451 013
X <sub>6</sub>	0.961 394	0.742 155	0.527 136	0.688 893	0.729 894
X <sub>7</sub>	0.407 842	0.747 200	0.719 605	0.567 528	0.610 544

同理可得其他各个因素关联度,分别计算  $X(t)$  对  $Y_2 \sim Y_5$  的关联度数值,即可以得到大气污染治理措施

与 PM<sub>10</sub> 污染程度的关联度矩阵。

$$\gamma_{ij} = \begin{bmatrix} & Y_1 & Y_2 & Y_3 & Y_4 & Y_5 \\ X_1 & 0.350 & 0.565 & 0.388 & 0.277 & 0.377 \\ X_2 & 0.591 & 0.527 & 0.573 & 0.334 & 0.731 \\ X_3 & 0.683 & 0.381 & 0.511 & 0.530 & 0.577 \\ X_4 & 0.682 & 0.393 & 0.421 & 0.539 & 0.586 \\ X_5 & 0.451 & 0.481 & 0.584 & 0.516 & 0.477 \\ X_6 & 0.730 & 0.302 & 0.604 & 0.569 & 0.630 \\ X_7 & 0.611 & 0.410 & 0.745 & 0.455 & 0.582 \end{bmatrix}$$

### 2.3 计算矩阵中 $\gamma_{ij}$ 的均值 $\bar{R}$

一般认为,当  $0 < \gamma \leq 0.35$  时,关联度强度为弱关联;当  $0.35 < \gamma \leq 0.65$  时,关联度强度为中;当  $0.65 \leq \gamma \leq 1.0$  时,为强关联度<sup>[6]</sup>。将图 1 中  $X(t)$  与  $Y(t)$  2 个数列在各个时刻的关联度代入下列公式进行平均:

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i \times j} \gamma_{ij}}{i \times j} \quad (7)$$

得到的关联系数的均值  $\bar{R} = 0.518$ ,此数据总体上量化各大气污染治理措施对 PM<sub>10</sub> 污染控制的有效性。并且说明,从整体而言,文中选择的大气环境治理措施与重庆市 PM<sub>10</sub> 污染水平之间的关联度表现为中等强度关联。

### 3 计算结果的分析与评价

根据由图 1 得出的  $\gamma_{ij}$  的大小,建立大气治理措施与 PM<sub>10</sub> 污染关联强度表。如表 3 所示。

表 3 大气治理措施——PM<sub>10</sub> 污染关联度强度表

因素	弱关联	中度关联	强关联
Y <sub>1</sub>	X <sub>1</sub> ;	X <sub>2</sub> ;X <sub>5</sub> ;X <sub>7</sub>	X <sub>3</sub> ;X <sub>4</sub> ;X <sub>6</sub>
Y <sub>2</sub>	X <sub>3</sub> ;X <sub>6</sub> ;	X <sub>1</sub> ;X <sub>2</sub> ;X <sub>4</sub> ;X <sub>5</sub> ;X <sub>7</sub>	—
Y <sub>3</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub> ;X <sub>3</sub> ;X <sub>4</sub> ;X <sub>5</sub> ;X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>
Y <sub>4</sub>	X <sub>1</sub> ;X <sub>2</sub> ;	X <sub>3</sub> ;X <sub>4</sub> ;X <sub>5</sub> ;X <sub>6</sub> ;X <sub>7</sub>	—
Y <sub>5</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>3</sub> ;X <sub>4</sub> ;X <sub>5</sub> ;X <sub>6</sub> ;X <sub>7</sub>	X <sub>2</sub>

在所有大气治理措施与表征 PM<sub>10</sub> 污染程度的指标中,强关联、中等关联、弱关联所占比率由强到弱依次为:20%、65.7%、14.3%。即中等强度关联占较大比重。在中等强度的大气环境治理因素中,又以 X<sub>4</sub>、X<sub>5</sub>、X<sub>7</sub> 占据的比率最多,占有所有中等关联度因素个数总和的 56.5%,反映出所选择的大气污染治理措施中,重点应该把握增加绿地面积,加大对汽车尾气治理力度以及控制民用车辆数量这 3 项措施。

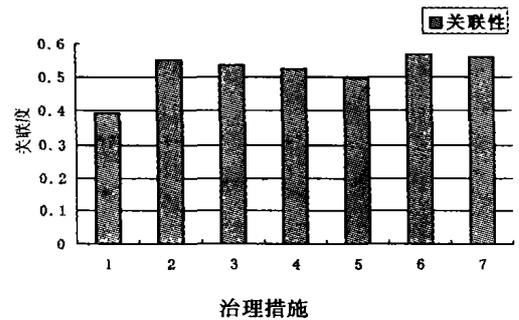
1) 单项大气治理措施在控制 PM<sub>10</sub> 污染中的贡献度比较。

平均图 1 每一行的数值得到  $\gamma_{ij}(i = 1, 2, \dots, 7)$ ,

即每项治理措施  $X_i(i = 1, 2, \dots, 7)$  总体上对 PM<sub>10</sub> 污染控制有效性大小为:

$$\gamma_{6j} > \gamma_{7j} > \gamma_{2j} > \gamma_{3j} > \gamma_{4j} > \gamma_{5j} > \gamma_{1j}$$

即粉尘排放排放量 > 控制汽车数量 > 控制原煤用量 > 控制燃油用量 > 城市绿化 > 汽车尾气治理 > 环保投资,如图 1 所示。



1. 环保投资;2. 原煤用量;3. 燃油用量;4. 人均绿地面积;5. 尾气治理率;6. 粉尘排放量;7. 汽车数量

图 1 大气污染治理措施与控制 PM<sub>10</sub> 的关联性

这从一个侧面反映了重庆市工业为主生产结构特点下的 PM<sub>10</sub> 污染特征,大量粉尘污染及由此形成的 PM<sub>10</sub> 衍生物是我市进行 PM<sub>10</sub> 污染治理必须首先或者重点考虑的因素。采取有效措施减轻粉尘污染,是防止 PM<sub>10</sub> 污染恶化的重要途径。

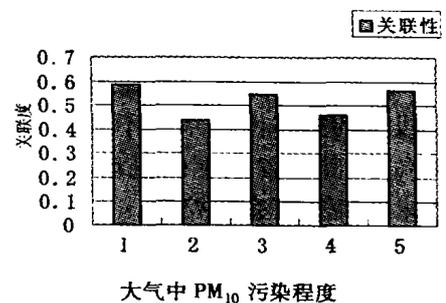
2) 各大气治理措施在控制 PM<sub>10</sub> 污染中的重点比较关联分析。

平均各列的关联度数值得到  $\gamma_{ij}(j = 1, 2, \dots, 5)$ ,即所有大气污染治理措施 Y<sub>j</sub> 的共同作用对每一 PM<sub>10</sub> 污染表现指标的有效控制程度依次为:

$$\gamma_{i1} > \gamma_{i5} > \gamma_{i3} > \gamma_{i4} > \gamma_{i2}$$

即各种大气污染治理措施对表征 PM<sub>10</sub> 污染的指标的有效性依次为:

控制 SO<sub>2</sub> 质量浓度 > 控制呼吸系统疾病死亡率 > 硫酸盐化速率 > 控制 NO<sub>x</sub> 质量浓度 > 控制 TSP 质量浓度,如图 2。

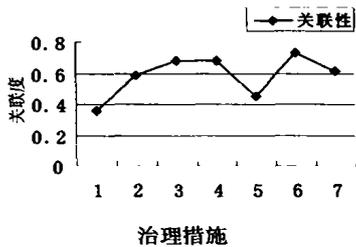


1. SO<sub>2</sub> 质量浓度;2. TSP 质量浓度;3. 硫酸盐化速率;4. NO<sub>x</sub> 质量浓度;5. 呼吸系统疾病死亡率

图 2 各污染治理措施对各环境指标的关联性

计算结果表明,重庆市“九五”期间,“一控双达标”、“五管齐下治天空”等措施在降低 SO<sub>2</sub> 污染浓度、降低硫酸盐化速率、降低呼吸系统疾病死亡率这 3 个方面起到了较为显著的作用。这些措施有力地削减了各种传统污染物进一步对空气环境中颗粒物污染的贡献度。通过本模型的计算还表明,重庆市现有大气污染治理措施对控制 TSP 的质量浓度的效果并不明显。

3) 对 SO<sub>2</sub> 质量浓度这一重点 PM<sub>10</sub> 污染表现指标的分析。



1. 环保投资;2. 原煤用量;3. 燃油用量;4. 人均绿地面积;  
5. 尾气治理率;6. 粉尘排放量;7. 汽车数量  
图 3 各项大气治理措施与 SO<sub>2</sub> 质量浓度的关联度

在实证分析所列的各项措施中,重点考查所有大气治理措施 X 与 SO<sub>2</sub> 的空气质量浓度 Y<sub>1</sub> 的关联度,如图 3。可以看出,模型所选的“九五”期间重庆市对 SO<sub>2</sub> 的浓度进行控制的措施中,除控制原煤用量与降低 SO<sub>2</sub> 浓度关联度较大以外,值得注意的是粉尘排放量 ( $\gamma_{61} = 0.730$ )、控制燃油用量 ( $\gamma_{31} = 0.683$ ) 与降低 SO<sub>2</sub> 质量浓度呈现显著关联。这说明重庆市粉尘、燃油的排放物中的硫含量还较高,提醒我们要进一步通过调整炼油生产装置结构,运用新型降烯烃催化剂和新的降烯烃工艺,降低汽油中的硫含量和烯烃含量,降低柴油中的硫含量,提高十六烷值,提高油品的燃烧效率,减少污染物的排放。力争早日使汽油中硫含量由目前的平均 1.2 mg/L 下降到 0.8 mg/L;柴油硫含量小于 0.5 mg/L<sup>[6]</sup> (达到国际 II 类燃油标准)。

另一方面,环保投资 X<sub>1</sub> 和汽车尾气治理率 X<sub>5</sub> 这两个方面的措施对 SO<sub>2</sub> 的空气质量浓度治理效果不如预期,原因可能在于:缺乏有效的规划和科学的指导而导致的环保投资的整体使用水平不高;汽车的尾气治理率有待提高,尤其是冒黑烟的机动车进入主城区营运的现象还未得到真正有效控制。

4) 绿地面积的变化 X<sub>4</sub> 与 PM<sub>10</sub> 污染的各个方面都表现出中等强度。这表明充分利用植物的生物吸附手段,加快城市绿化、美化工作,绿化、固化主城区的裸露地面,减少地面扬尘,以此控制浮尘、飘尘,可以收到较为明显的效果。

### 4 结论与建议

综上所述,实证分析从总体上表明重庆市“九五”期间采取“五管齐下治天空”,即:关闭采(碎)石场和小水泥厂,控制机动车排气污染,绿化硬化裸露地面,改造大型燃煤锅炉,使用洁净煤和关迁限改调重点大气污染企业,作为大气治理工作的重点取得了较为明显的成效。同时,根据实证分析结果,结合重庆市“十五”期间基础设施加大投入,城市建设加快,出现地面扬尘、建筑建材扬尘增多以及机动车尾气污染加剧的趋势,进一步明确新的“五管齐下”措施即控制道路扬尘,控制施工扬尘,控制工业粉尘,控制餐饮烟尘,建设“基本无煤区”,进一步加大对粉尘排放的控制力度是非常必须和及时的。

研究还表明,“九五”期间控制机动车排气污染并没有遏制住机动车尾气污染比例加剧的趋势,因此,要切实有效地维护重庆市的空气质量,必须一方面正视汽车数量迅速增长对环境带来的压力。同时加大汽车尾气控制力度,特别是重点车型、地段和时段的控制。

控制机动车数量才是从根本上解决未来可能出现的细微粒子大面积、严重污染的途径。分析可以看到,重庆市的空气污染状态具有从煤烟型污染向汽车型污染转化的趋势,汽车数量 (X<sub>7</sub>) 对 (Y<sub>1</sub>) 的关联度明显处于中等强度 ( $\gamma_{71} > 0.35$ ) 甚至高强度 ( $\gamma_{73} = 0.745$ )。因此,为了避免一种污染代替另一种污染,改变先污染后治理的老路,从现在起,必须重视控制汽车总量,或结合重庆城区山多路窄的地理特点,通过改善交通环境、维护交通秩序、提高尾气治理率等方法,降低单位面积内汽车尾气污染总量。

此外,不断深化与环境相关的经济、法律研究,从社会系统的高度,全面完善环境治理、保护、监督、管理,实现重庆市可持续发展是治本之策。

#### 参考文献:

- [1] 邓聚龙. 灰色控制系统 [M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1993.
- [2] 宋瑞金,崔九思. 我国五城市大气污染动态观察的研究 [J]. 卫生研究, 1996, 25(6): 341-342.
- [3] 车凤翔. 中国城市气溶胶危害评价 [J]. 中国粉体技术, 1999, 5(3): 4-5.
- [4] 高文华. 多层权重的灰色斜率关联度分析 [J]. 煤田地质与勘探, 1995, 23(128): 32-36.
- [5] 国家统计局. 中国统计年鉴 (1996~2000) [M]. 北京:中国统计出版社, 2001.
- [6] 陈和平,戴林. 规范和推广燃油清净剂是环境保护的必然趋势 [J]. 中国环保产业, 2002, (3): 20-21. (下转第 146 页)

## Fuzzy Analysis of Kind Gathering of Object Selection in Compatibility of Online Selling Products

SHAO Bing-jia, WANG Jun, CHEN Chang-yi

(College of Economy and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract :** By applying fuzzy mathematics, the authors bring forward the qualitative analysis the theory structure of economics and search cost, and quantitative analysis method applied in evaluating which kind of product are best suited for online selling. Then, six kinds of products are chosen to prove it that the method is effective. At last, the innovation in e-commerce model like online selling is also discussed.

**Key words:** E-commerce; online selling; fuzzy mathematics

(责任编辑 刘道芬)

~~~~~  
(上接第 138 页)

## Gray Linkage Appraising and Proof Analysis for Controlling Effectiveness of $PM_{10}$

HE Mei<sup>1</sup>, LIN Yong<sup>2</sup>

(1. College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. President Office, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Atmospheric circumstance is a huge, complex system with several elements influencing each other. Regional atmospheric circumstance is not only affected by the whole air environment but also has a close relationship with regional economic developing level, industry location and effectiveness of environmental protection, etc.. How to monitor and control  $PM_{10}$  in atmospheric pollution now is a focus. Because of the randomness and uncertainty of  $PM_{10}$  on time, space and quantity, and the unstable character of air protection, the relationship between the regulation measures and controlling  $PM_{10}$  pollution becomes a "gray system". The article uses the slope linkage analyze theory to appraise the corresponding effectiveness of each means of atmospheric prevention originally and take these as a proof in Chongqing city during the ninth Five-year Plan.

**Key words:** atmospheric particulate matter; control; appraise

(责任编辑 姚 飞)