

大气污染物的变化趋势及突变研究

Trends and Abrupt Analysis of Air Pollutants

陆 杰/LU Jie, 刘付程/LIU Fu-cheng², 魏晓平/WEI Xiao-ping¹

1. 中国矿业大学管理学院, 江苏徐州 221008

2. 淮海工学院, 江苏连云港 222000

1. School of Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu Province, China

2. Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222000, Jiangsu Province, China

[摘要] 运用非参数 Mann- Kendall 法对连云港市 3 个定位监测点近 10 年来的大气 SO₂、NO_x 和 TSP 序列数据进行了趋势检验和突变分析。结果表明, 连云港市大气 SO₂ 表现出明显的上升趋势, 而 TSP 则表现出显著的下降趋势; NO_x 总体变化不大, 但 NO_x 在住宅商业功能区表现为轻微的上升趋势, 而在工业功能区则有不显著的下降趋势。季节性 Mann- Kendall 法检验表明, 除工业功能区的 NO_x 外, SO₂ 和 NO_x 在夏季的增长趋势要较其他季节更为显著, 而 TSP 在一年四季中都表现为显著的下降趋势。突变分析表明, 除 NO_x 外, 大气污染物序列均出现了突变现象, 且突变主要发生在 2000 上半年到 2002 上半年之间。研究结果对于认识连云港市城市大气环境质量变化过程和科学制定环保决策具有重要意义。

[关键词] 大气污染物; 趋势分析; 突变分析; Mann- Kendall 检验;

[中图分类号] X51

[文献标识码] A

[文章编号] 1000- 7857(2006)09- 0028- 04

Abstract: A non- parameter Mann- Kendall test method was used to analyze the trends and abrupt of air pollutants series of SO₂, NO_x and TSP at three monitoring sites in Lianyungang city during the past 10 years. The results indicated that the SO₂ series had a significant increasing trend, while a significant decreasing trend was detected for TSP series. The NO_x series showed an uneven change with slightly increasing trend in residential, commercial area and an insignificantly decreasing trend in industrial area. According to seasonal Mann- Kendall test, there was relatively stronger increasing trend for SO₂ and NO_x in summer than in other seasons except for the pollutant of NO_x in the industrial area, while the TSP series decreased significantly in the four seasons. The analysis of the abrupt revealed that except NO_x, the air pollutants series had abrupt changes between early 2000 and early 2002. The results of the research would be helpful to recognize air quality change process and also be useful to make scientific environmental protection decisions for Lianyungang city.

Key Words: air pollutants; trend analysis; abrupt analysis; Mann- Kendall test

CLC Number: X51

Document Code: A

Article ID: 1000- 7857(2006)09- 0028- 04

城市作为一个具有多种社会和经济功能的综合体, 其环境质量一直是人们关注的焦点。连云港市作为我国首批 14 个沿海开放城市之一, 其城市化进程和经济发展迅速, 大气环境质量也随着城市规模的扩大而发生明显变化, 并在一定程度上影响着经济的可持续发展^[1]。因此, 分析连云港市大气污染物的趋势变化特征, 对了解城市大气环境质量变化过程和科学制定环保决策具有重要意义。

目前, 有关趋势分析的方法很多, 常用的有线性倾向估计、滑动平均、三次样条函数等参数估计方法。而在诸多的时间序列分析中, 使用非参数方法要比使用参数方法在非正态分布的数据和检验中更为适合^[2,268]。Mann- Kendall 秩相关法作为一种非参数检验方法, 在序列的趋势变化和突变分析方面有着明显的优势, 它计算简便, 样本数据无需遵从一定的分布, 且不受少数异常值的干扰, 因此在水文^[3-4]、气象^[5-6]以及环境^[7-8]等领域也得到了广泛应

用。本文采用 Mann- Kendall 法对近 10 年来连云港市大气主要污染物时间序列的趋势变化及突变性进行分析, 以期能揭示大气环境质量的变化规律。

1 数据和分析方法

1.1 数据来源与处理

选取了连云港市 3 个大气环境定位监测点的二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)和总悬浮颗粒物(TSP)日监测数据的月平均值作为基本分析指标。序列的时间跨度为 10 年(1996 年 1 月至 2005 年 12 月)。3 个监测点分别位于连云区的石油招待所、新浦区的市环境监测站和海州区的洪门派出所, 其观测结果基本代表了港口服务功能区、商业及居民生活功能区和工业功能区的大气环境质量状况。

由于在 2000 年以前大气氮氧化物和悬浮颗粒物的监测项目

收稿日期: 2006- 06- 15

作者简介: 陆 杰, 男, 江苏省连云港市朝阳中路 8 号连云港市环保局, 博士生, 主要从事环境管理的研究与实践工作;

E- mail: lyglujie@sina.com

魏晓平(通讯作者), 女, 中国矿业大学管理学院, 教授, 研究方向为资源环境管理; E- mail: weixp@163.com

是 NO_x 、TSP, 而 2000 年后改为 NO_2 、 PM_{10} (2000 年则同时对 NO_x 、TSP、 NO_2 、 PM_{10} 进行了监测), 因此序列数据存在不一致性。为保证大气氮氧化物和颗粒物序列数据的连续性, 本文将 NO_2 、 PM_{10} 分别折算成 NO_x 、TSP。折算方法是, 分别对 2000 年各月 NO_x 与 NO_2 、TSP 与 PM_{10} 的日观测数据进行线性拟合, 再依据各月的拟合方程分别将其 2000 年以后各年相应月份的 NO_2 和 PM_{10} 的实测数据折算为 NO_x 和 TSP, 据此再计算其各月 NO_x 、TSP 的平均值。线性拟合方程的 R^2 都在 0.98 以上, 表明 NO_2 与 NO_x 、 PM_{10} 与 TSP 之间存在很好的线性关系, 因而序列的连续性也得到了应有的保证。

1.2 分析方法

1.2.1 趋势检验

主要采用非参数 Mann- Kendall 趋势分析法^[27]来分析大气污染物序列的趋势变化, 同时也辅以线性拟合趋势分析法加以说明。

M-K 趋势检验通常用于检验趋势的显著性, 其原假设 H_0 表示随机变量 X 的数据样本与时间独立, 没有趋势存在, 可选假设 H_1 表示数据集 X 中存在一个单调趋势。其检验过程如下, 定义 S_i :

$$S_i = \sum_{j=1}^{i-1} \sum_{k=i}^n \text{sgn}(x_k - x_j) \quad (1)$$

式中, x_k 和 x_j 为样本数据值, n 为数据集长度。当 $x_k - x_j$ 大于、等于和小于 0 时, $\text{sgn}(x_k - x_j)$ 相应地分别等于 1、0、-1。当 $n \geq 8$ 时, 统计数 S 近似呈正态分布, 且其方差 $V(S)$ 可由下式计算得到^[2]。

$$V(S) = [n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^{n-1} t_i(t_i-1)(2i+5)]/18 \quad (2)$$

式中 t_i 是与观测值 x_i 相同的数据个数。相应地, M-K 趋势检验的统计量 Z_c 为:

$$Z_c = \begin{cases} (S-1)/[V(S)]^{1/2} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S+1)/[V(S)]^{1/2} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

对于给定的趋势检验显著性水平 α 如果 $|Z_c| > Z_{\alpha/2}$, 则否定原假设 H_0 , 表示变量数据集存在显著的单调趋势; 且当 Z_c 为正时, 表示变量 X 存在上升的趋势, 负值表示存在下降的趋势。

1.2.2 突变分析

当用 M-K 法来检验变量序列的突变时, 其检验过程如下^{[9][69]}。设有一时间序列 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 构造一秩序列 m, m 表示 $x_i > x_j$ ($1 \leq j \leq i$) 的样本累积数。定义 S_k :

$$S_k = \sum_{i=1}^{n-1} m_i(k=2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

S_k 的均值以及方差定义如下:

$$\begin{aligned} E(S_k) &= k(k-1)/4 \\ V(S_k) &= k(k-1)(2k+5)/72 \quad (k=2, 3, \dots, n) \end{aligned} \quad (5)$$

在时间序列独立的条件下, 定义统计量:

$$UF_k = [S_k - E(S_k)]/[V(S_k)]^{1/2} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

所有 UF_k 将组成一条曲线 UF 。把同样的方法引到反序列中, 得到另一条曲线 UB 。这里 UF_k 为标准正态分布, 给定显著性水平 α 查正态分布表得到临界值 t_0 。将统计量曲线 UF 、 UB 和 t_0 2 条直线绘制在一张图上, 若 $UF > 0$, 表明序列呈上升趋势, $UF < 0$ 则表明呈下降趋势; 当 $|UF_k| > t_0$ 时, 表明上升或下降趋势显著; 若 UF 和 UB 出现交点, 且交点位于 t_0 直线之间, 则交点对应的时刻便是突变开始的时间。为增强突变分析结果的可信度, 本文还辅以滑动 t 检验法来检验序列的突变^{[9][63]}。

2 结果与分析

2.1 大气污染物的多年总体趋势变化

图 1 给出了 3 种大气污染物浓度的月均值序列曲线及其相应的线性拟合方程。从曲线走势和拟合方程可以看出, 3 种污染物的变化趋势存在明显差异, SO_2 在 3 个监测点总体上都呈增加趋势, 而 TSP 则表现为下降趋势; NO_x 变化较为复杂, 除洪门派出所监测点有下降趋势外, 其他 2 个监测点都有增加的趋势。

表 1 给出了 3 个监测点污染物 M-K 趋势检验统计值 Z_c 。表中数据表明, SO_2 增加趋势和 TSP 的下降趋势在 3 个观测点都通过了 99% 的显著性检验, 反映了近 10 年来连云港市市区大气 SO_2 和 TSP 浓度的总体变化是十分显著的。 SO_2 的显著增长趋势可能与近些年来连云港市经济快速发展、促进能耗 (尤其燃煤) 的快速增长有关, 而 TSP 的显著下降趋势则是近些年来大力开展城市绿化、加强城市建筑扬尘管理等防尘措施的结果。表 1 还表明, NO_x 在三地的多年趋势变化都没有达到统计上的显著水平, 反映 10 年来市区大气 NO_x 排放量总体变化不大。石油招待所和市环境监测站两监测点的微弱增加趋势可能是机动车尾气排放总量增加的反映。这 2 个观测点位于商业及居民生活功能区, 交通流量大, 私家车的保有量持续增长, 汽车尾气排放也呈快速增加的

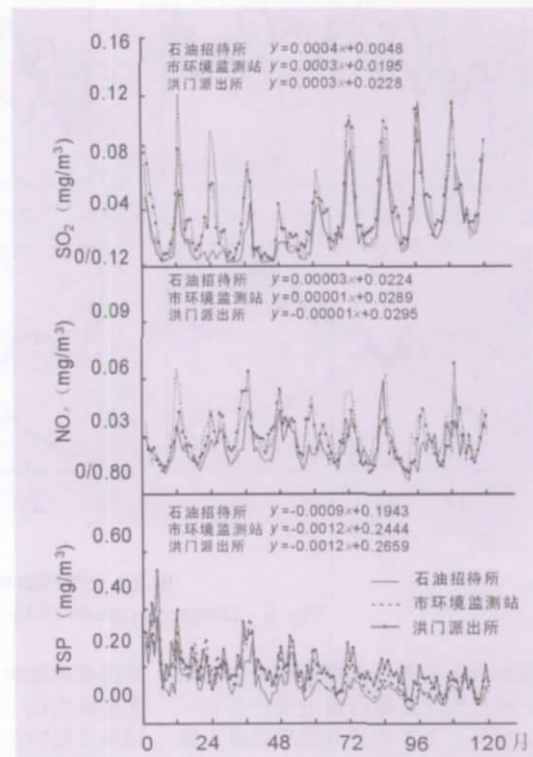


图 1 大气污染物的时间序列

Fig.1 Time series of air pollutants

表 1 大气污染物 M-K 趋势检验统计值 Z_c
Tbl. 1 Z_c value of air pollutants trends estimated by Mann- Kendall test

监测点	SO_2	NO_x	TSP
石油招待所	6.49***	1.03	-6.54***
市环境监测站	4.47***	0.49	-7.71***
洪门派出所	4.24***	-0.47	-6.86***

注: *** 表示通过 99% 的置信度检验

表 2 不同季节大气污染物 M-K 趋势检验统计值 Zc
Tbl. 2 Zc value of air pollutants trends estimated by Mann- Kendall test in different seasons

监测点	SO ₂				NO _x				TSP			
	冬	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	春	夏	秋
石油招待所	1.79*	2.15**	2.68***	2.33**	0.36	1.07	1.79*	1.79*	-3.52***	-2.33**	-2.33**	-2.15**
市环境监测站	1.43	1.97**	3.04***	2.50**	-0.36	0	1.61	0.36	-3.04***	-2.33**	-2.86***	-2.86***
洪门派出所	0.72	1.61	3.04***	2.86***	0.89	0.54	0	-0.89	-2.15**	-2.86***	-3.22***	-2.50**

注: * 表示通过 90% 的置信度检验; ** 表示通过 95% 的置信度检验; *** 表示通过 99% 的置信度检验。

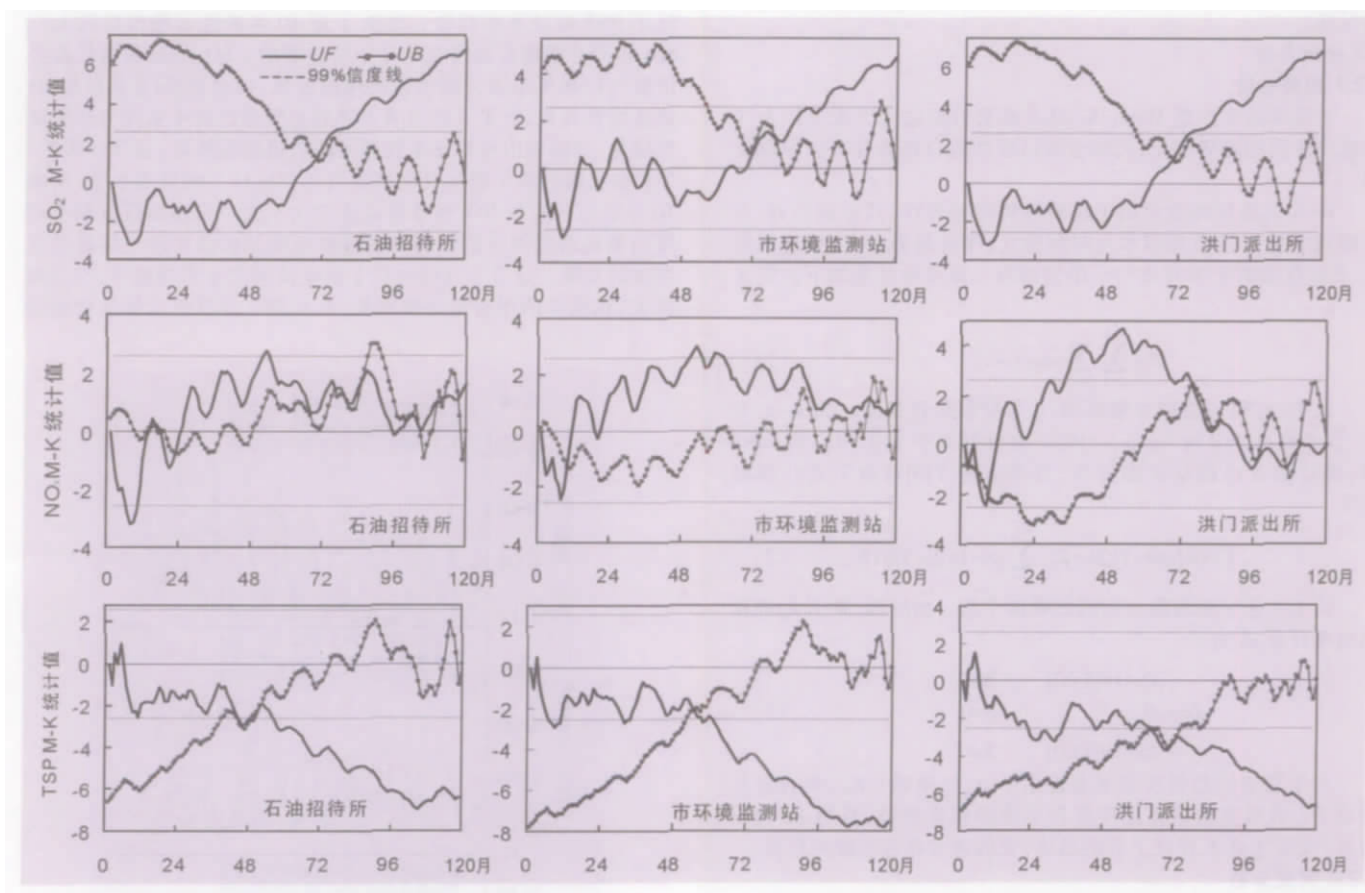


图 2 大气污染物序列 M-K 突变检验的统计量曲线

Fig. 2 Statistics curves of M-K abrupt analysis of air pollutants time series

趋势, 因而 NO_x 的排放在地也表现为增长趋势; 而近些年乙醇汽油的推广又在一定程度上减弱了 NO_x 的排放强度, 这可能是两地 NO_x 增势不够明显的原因。洪门派出所监测点位于工业功能区, 其 NO_x 主要来源于工业点源排放。点源排放易于从总量上加以控制, 因而受环保政策和技术革新影响大。连云港市从本世纪之初就开始加大了工业企业达标排放执行的力度, 这在一定程度上抑制了工业区大气污染物排放的增长势头。洪门派出所监测点 NO_x 微弱的降低趋势可能与这一政策有关。当然, 企业实行燃料结构调整及技术革新(如新海发电厂)也对降低 NO_x 排放具有积极意义。

2.2 大气污染物的季节趋势变化

受季节变化、气象条件和下垫面性质

等因素的影响, 大气污染物浓度多随季节变化而变化, 并在不同季节表现出不同的趋势变化特征。统计表明, 研究区域 3 个监测点的 3 种污染物浓度均以冬季 (12 月-2 月) 最高, 夏季 (6 月-8 月) 最低, 表现出明显的季节性变化特点 (图 1)。为阐述大气污染物近 10 年来不同季节的趋势变化特征, 表 2 给出了不同季节 3 个监测点污染物 M-K 趋势检验统计值 Zc。从表 2 可以看出, 3 个观测点 SO₂ 的夏季增长趋势最为明显, 都通过了 99% 的显著性检验; 而冬季的增长趋势最弱, 只有石油招待所观测点通过了 90% 的显著性检验; 春、秋两季的增长趋势则介于冬季和夏季之间, 且都通过 95% 的显著性检验。这表明, 研究区域大气 SO₂ 的多年总体增加趋势以夏季增长的贡献最

大, 冬季最小。而在近 10 年中, 3 个观测点的 TSP 在冬、春、夏、秋四季均呈显著下降的趋势 (通过 95% 或 99% 显著性检验), 且下降强度各季节之间差异不大。NO_x 的季节趋势变化较为复杂, 各观测点表现不一, 石油招待所四季都呈增长趋势, 但夏、秋季增长显著 (通过 90% 显著性检验), 而冬、春季则不明显。在市环境监测站和洪门派出所监测点, NO_x 各季节的趋势变化均不显著, 但前者在夏、秋季有较弱的增加趋势, 冬季则表现为较弱下降趋势; 而后者秋季下降, 冬、春季有不明显的上升趋势。总的来看, NO_x 的上升趋势也是夏季强于冬季, 而洪门派出所监测点则相反。

2.3 大气污染物序列的突变分析

利用 M-K 突变检验法对 1996-2005

年大气污染物月均值序列进行突变分析。结合给定显著性水平 $\alpha=0.01$, $t_0=\pm 2.576$, 将计算结果绘制成图 2。

由 UF 曲线可见, 2001 年前, 石油招待所和洪门派出所 2 个监测点的大气 SO_2 浓度是持续下降的, 而在市环境监测站则表现为波动变化特点; 此后三地大气 SO_2 浓度开始逐渐上升, 石油招待所监测点 2002 年春季以后增势十分明显(通过 99% 的显著性检验), 而另 2 个观测点的这种显著增势则出现在 2003 年冬季以后。从 UF 和 UB 曲线交点的位置可知, 市环境监测站和洪门派出所 2 个检测点的 SO_2 变化趋势在 2002 年夏季发生突变, 而石油招待所监测点的突变发生在 2001 年冬季。利用滑动 t 检验法对该序列进行突变检验也得出类似的结论。这说明研究区域大气 SO_2 浓度在 2002 年上半年出现了突发性上升, 进入一个相对较强的排放期, 这与连云港市在本世纪之初的经济快速发展有着直接联系。

图 2 中的 NO_x 序列的 M-K 突变分析曲线表明, 自 1996 年冬季开始, 石油招待所和市环境监测站的大气 NO_x 浓度均表现为持续上升; 而洪门派出所监测点的大气 NO_x 浓度也从 1997 年初开始持续升高, 并且在 1998 年冬到 2001 年夏期间增势最为显著, 而到了 2003 年夏秋之交, NO_x 浓度开始降低, 但降低的趋势不明显。从 UF 和 UB 曲线的走势来看, 3 个监测点的大气 NO_x 变化趋势均未出现明显的突变点, 这与滑动 t 检验法结果一致, 表明近 10 年来研究区域大气 NO_x 排放强度变化平缓, 总体差异不大。

从图 2 中 TSP 的 UF 曲线走势可知, 从 1996 年夏季以来, 研究区域大气 TSP 就表

现为持续下降的趋势; 并且从 2000 年末开始, 下降趋势超过了 99% 的信度线, 表示大气 TSP 下降显著。曲线 UF 和 UB 在 3 个监测点都出现了相交的现象, 表明在 99% 的信度下, 三地的大气 TSP 都发生了突发性下降, 大气质量也进入一个明显的改善期。但突变时间三地有一定差异, 石油招待所监测点突变发生在 2000 年初, 市环境监测站则出现在 2000 年夏前后, 而洪门派出所监测点则推迟到 2001 年夏, 滑动 t 检验法也有类似的结论(洪门派出所监测点出现在 2001 年夏, 另 2 个监测点则出现在 2000 年夏)。这种时间上的差异可能与 3 个监测点所处的功能区、局地小气候环境以及环保政策执行力度的差异有关。

3 结论

1) 近 10 年来, 连云港市区大气 SO_2 的浓度总体呈显著上升趋势, 而 TSP 则呈显著下降的趋势; NO_x 总体变化不显著, 在商业、居住及港口服务功能区有微弱的上升趋势, 而在工业功能区则表现为不显著的下陷趋势。

2) 在四季当中, SO_2 以夏、秋季上升的趋势最为显著, 冬季最弱, 且夏季的上升趋势对 SO_2 的多年总体上升趋势贡献最大。TSP 在 4 个季节中都表现出显著的下降趋势。 NO_x 的上升趋势总体上也表现为夏、秋季强于冬、春季, 但在工业功能区表现相反; 除港口功能区夏、秋季节 NO_x 增势显著外, 其他功能区 NO_x 各季节的变化趋势均不显著。

3) 大气污染物月均值序列的 Mann-Kendall 法突变分析表明, 研究区域大气 SO_2 浓度在 2002 年上半年发生了突变, 进

入一个强度相对较高的排放期; 而 3 个功能区大气 TSP 也分别在 2000 年和 2001 年的上半年出现了突发性下降的现象; NO_x 的总体变化相对较为平缓, 没有明显的突变期。

参考文献(References)

- [1] 陈妙红, 邹欣庆, 刘安麟. 连云港市大气、水环境污染经济损失初步估算[J]. 中国人口、资源与环境, 2004, 14(2): 88-93.
- [2] YUE S, PILON P, CZYADISA G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. Journal of Hydrology, 2002, 259(4): 254-271.
- [3] 秦年秀, 姜彤, 许崇育. 长江流域径流趋势变化及突变分析[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 14(5): 589-594.
- [4] ZHANG X, HARVEY K D, HOGG W D, et al. Trends in Canadian streamflow[J]. Water Resour. 2001, 37(4): 987-998.
- [5] 杨莲梅. 新疆极端降水的气候变化[J]. 地理学报, 2003, 58(4): 577-583.
- [6] ZHANG X, VINCENT L A, HOGG W D, et al. Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century[J]. Atmos. Ocean. 2000, 38(3): 395-429.
- [7] 胡国华, 武洪涛, 张震宇. 黄河小浪底水库水质趋势分析[J]. 地域研究与开发, 2003, 22(4): 85-87.
- [8] YU Y S, ZOU S, WHITEMORE D. Non-parametric trend analysis of water quality data of river in Kansas[J]. J. Hydrol. 1993, 150(1): 61-80.
- [9] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1993.

(责任编辑 李向荣)

·科技动态·

天体物理学家发现暗物质存在的直接证据

8月21日, 美国宇航局宣布, 天体物理学家利用钱德拉 X 射线望远镜和其他望远镜发现了暗物质存在的直接证据。这一发现证实了理论中预言的暗物质的确存在。

普通物质构成了恒星、行星以及我们自身, 而暗物质则是隐藏在星系中的看不见的物质。正是因为暗物质的引力作用, 许多星系和星系团才不至于崩离析, 这就是为什么天体物理学家从理论上认为暗物质必须存在。

美国亚利桑那大学的多·克劳(Doug Clowe)及其团队成员利用美国宇航局的钱德拉 X 射线望远镜对星系团 1E0657-56 进行了观测。这个星系团又名“子弹星系团”, 因为星系团中有一个酷似子弹形状的高温气体云。研究人员发现, 这个星系团中实际上存在大小两个星系团, 而这两个星系团正在发生碰撞。

观测表明, 星系团中的主要质量不是存在于星系团中的星系之内, 而是在星系之间发射 X 射线的炽热气体中。星系间的质量占到了整个星系团质量的 90%。两个星系团碰撞过程, 实际上是二者相互穿过的过程。在这个过程中, 星系团中的炽热气体发生碰撞, 相互间形成类似于空气阻力的作用, 炽热气体的运动因而受到拖曳, 产生减速。

而星系间的暗物质与普通物质不同, 除引力作用外, 它们不会与普通物质也不会与自身发生任何相互作用。这样一来产生的效果就是, 当普通物质受到拖曳的时候, 暗物质则能够畅通无阻。天体物理学家通过观测两个星系团中质量的分布就能够比较是不是真的有这样的情况在发生。克劳等人明确地观测到了这一现象。

该团队使用了钱德拉 X 射线望远镜 100 个

小时的观测时间, 配以哈勃太空望远镜、欧洲南方天文台的甚大望远镜以及麦哲伦望远镜的观测, 得到了上述结果。研究人员认为, 他们的结果排除了一些非主流的引力理论——这些理论的提出是为了消除令人困惑的暗物质, 而证实了暗物质在现实中的确存在。

现在天体物理学家们认为, 我们的宇宙是由 5% 的普通物质、25% 的暗物质以及 70% 的暗能量构成的。有专家评论说, 克劳等人的研究结果是未来的理论不得不面对的, 天体物理学家要进一步了解暗物质的真面目, 绝不能将其忽略的。同时, 新结果还令科学家们更加自信地认为, 牛顿引力定律在星系团这样的大尺度上仍然适用。克劳说: “我们离洞察这种不可见物质比以往更接近了一步, 并且, 我们将藉此一窥引力的本来面目。” (本刊记者 黄永明)