

紫外荧光法测定天然气中总硫含量的精密度研究

丁思家¹ 周理² 刘鸿¹ 沈琳² 杜爽¹ 李晓红²

1. 中国石油西南油气田公司输气管理处 2. 中国石油西南油气田公司天然气研究院

摘 要 为了对紫外荧光法测定天然气中总硫含量的精密度要求作一个独立研究, 在 8 家实验室用不同的紫外荧光总硫含量分析仪分别对同一批次 22 个样品进行了重复测试, 根据 ISO 4259:2006《石油产品 试验方法精密度数据的确定和应用》对数据进行了处理, 得到了紫外荧光法测定总硫含量的精密度要求。研究表明: 在重复性/再现性条件下, 在 95% 的置信区间里, 获得的两次独立测试结果的差值不超过相应浓度范围内的重复性限/再现性限。该研究成果为紫外荧光法总硫含量测试的结果判定提供了参考, 也为相应的 ISO 标准“总硫/紫外荧光法”的编制提供了直接的技术支撑。与现行的 GB/T 11060.8—2012《天然气 含硫化合物的测定 第 8 部分: 用紫外荧光光度法测定总硫含量》中精密度要求相比, 该研究成果总体上更为优越, 并建议开展上述国家标准的修订研究工作。

关键词 天然气 紫外荧光 总硫含量 精密度 再现性 重复性 国家标准 ISO 标准

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2017.09.014

Detection precision of the total sulfur contents in natural gas by the ultraviolet fluorescence method

Ding Sijia¹, Zhou Li², Liu Hong¹, Shen Lin², Du Shuang¹ & Li Xiaohong²

(1. Gas Transmission Division, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu, Sichuan 610213, China;
2. Natural Gas Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu, Sichuan 610213, China)
NATUR. GAS IND. VOLUME 37, ISSUE 9, pp.103-108, 9/25/2017. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: For the sake of independent study on the requirement of the detection precision of the total sulfur contents in natural gas by the ultraviolet fluorescence method, 22 samples of the same batch were tested repeatedly in eight laboratories by using different ultraviolet fluorescence total sulfur analyzers. Then, the experimental data were processed according to *The Code of Petroleum Products—Determination and Application of Precision Data in Relation to Test Methods* (ISO 4259:2006). And accordingly, the requirement of the detection precision of the total sulfur contents by the ultraviolet fluorescence method was determined. It is indicated that under the condition of repeatability/reproducibility, the difference between two independent test results should not exceed the limit of repeatability/reproducibility in the corresponding concentration range at the 95% confidence interval. This research result provides a reference for the result determination of total sulfur content tests by the ultraviolet fluorescence method, as well as a direct technical support for the preparation of the ISO standard "Total Sulfur/Ultraviolet Fluorescence Method". Compared with the precision requirement of the current *standard of Natural Gas—Determination of Sulfur Compound—Part 8: Determination of Total Sulfur Content by Ultraviolet Fluorescence Method* (GB/T 11060.8-2012), this research result is generally superior so as to be recommended to revise the above-mentioned national standards.

Keywords: Natural gas; Ultraviolet fluorescence; Total sulfur; Precision; Reproducibility; Repeatability; National standard; ISO standard

基金项目: 国际标准化组织 ISO 标准研究项目“天然气—含硫化合物的测定—紫外荧光光度法测定总硫含量”(编号: ISO/DIS 20729)、全国天然气标准化技术委员会研究项目“总硫/紫外荧光法国际标准的研究”(编号: 2015050064)。

作者简介: 丁思家, 1984 年生, 工程师, 硕士; 主要从事天然气分析测试、标准化及实验室认可体系管理等工作。地址: (601213) 四川省成都市华阳华府大道二段 595 号。电话: (028) 85601582。ORCID: 0000-0001-9090-7076。E-mail: dingsijia@petrochina.com.cn

天然气总硫含量是天然气产品质量技术指标的一项重要参数。早在1988年,我国就提出了石油行业标准SY 7514—1988《天然气》,1999年,中国石油西南油气田公司天然气研究院作为第一起草单位在此标准的基础上,牵头编制了强制性国家标准GB 17820—1999《天然气》,并于2012年对该标准做了进一步的完善,其中对一、二、三类气的总硫含量技术指标进行了修订。

目前直接用于测定天然气中总硫含量的方法有氢解—速率计比色法、林格奈燃烧法、氧化微库仑法和紫外荧光法,其中紫外荧光法测天然气总硫含量的应用时间比其他3种方法短,但是在多年的实际应用中,紫外荧光法具有干扰因素相对较少、操作简单的优点,是目前最为方便稳定的一种总硫测试方法,也是被业内普遍看好的一种重要方法^[1-2]。

GB/T 11060.8—2012《天然气含硫化合物的测定第8部分:用紫外荧光光度法测定总硫含量》^[3]是由中国石油西南油气田公司输气管理处作为第一起草单位编制的,于2013年3月正式发布实施的国家标准。在该标准中,精密度要求参考使用了美国材料与试验协会发布的标准ASTM D6667:2004《用紫外荧光法测定气态烃和液化石油气中挥发性总硫的标准实验方法》^[4]中的计算公式,由于精密度计算公式在ASTM D6667中是针对气态烃和液化石油气的,并且该精密度要求是在美欧国家的实验室间研究得到。因此,有必要对紫外荧光法测定天然气中总硫含量的精密度要求,根据我国的实际情况做一个独立的分析研究,并为ISO标准“总硫/紫外荧光法”的研究和编制提供重要的直接技术支撑。

1 检测方法

1.1 检测方法原理

将气体样品通过进样系统输送到一个高温燃烧管中,在富氧条件下,样品中的硫化物被氧化成二氧化硫。除去样品燃烧产生的水分后将燃烧产生的气体经过紫外光照射,其中的 SO_2 分子吸收紫外光中的能量转化为激发态的 SO_2^* 。当 SO_2^* 分子从激发态回到基态时会释放出荧光,所释放的荧光被光电倍增管所检测,而荧光的强度与样气中总硫浓度存在一定的关系,于是根据获得的信号可检测出样品中的总硫含量^[3-4]。

1.2 精密度概念

测量精密度是指在规定条件下,对同一被测对

象重复测量所得测得值的一致程度^[5]。重复性和再现性(也称复现性)是最重要的两个精密度度量,其中,重复性是指同一操作者在同一实验室中使用同一仪器在相同的操作条件下,在短时间内按照同一方法对相同的样品进行正确和正常操作所得独立结果之间的接近程度,其值等于或小于该条件下所得的两个单一实验结果的绝对差的置信水平为95%;再现性是指由不同操作者在不同实验室中用不同的仪器,按照同一方法对相同的样品进行正确和正常操作所得的实验结果之间的接近程度,其值等于或小于在不同实验室的操作者使用标准实验方法对同样实验材料所得的两个单一实验结果的绝对差值的置信水平为95%^[6-7]。

对给出的一个测试结果判定是否准确,精密度是测量准确度的先决条件。由于测量准确度是一个概念性的术语,不能够定量去表示,而测量精密度可以用数字的形式表示不精密度程度,如在规定的测量条件下的标准偏差、方差或变差系数等。但是,对于一个测试方法而言,如果给出的是该方法的精密度标准偏差、方差或变异系数,就会使得应用该方法所测得的两个结果无法直观看出是否满足测试要求,这就需要给出该方法的一个精密度限,即重复性限和再现性限,以帮助使用者判断两个测试结果是否满足精密度要求。因此,本研究基于ISO 4259:2006《石油产品 试验方法精密度数据的确定和应用》^[6]对精密度进行分析研究。

2 实验及数据处理

2.1 实验

2.1.1 实验总体方案

为了保证测试对象的同一性和均匀性,在8家实验室间按照统一的要求,使用紫外荧光法对同一批次22种不同浓度的标准气进行测试,并如实记录气体中的总硫测试含量。

2.1.2 仪器及试剂

1) 仪器:统一要求使用紫外荧光法这一检测原理的仪器。

2) 标准气:硫化氢标准气和硫氧化碳标准气均以氮气为背景气,容器容积为8 L,气体配制最高压力为10 MPa,容器内壁经过涂氟惰化处理,由中国石油西南油气田公司天然气研究院配制提供。建立校准曲线的浓度点如表1所示(单位以硫计)。

表 1 建立标准曲线用浓度点统计表 mg/m^3

序号	硫化氢	硫氧化碳
1	0	0
2	9.57	10.8
3	28.10	32.4
4	57.20	65.2
5	115	108
6	224	217

3) 样品气: 在校准曲线范围内配制了 22 瓶不同浓度的标准气当作样品气作为测试对象, 配制要求同标准气。

2.2 数据处理方法

2.2.1 以下文中使用的符合说明

S 表示样品个数 (n); L 表示实验室个数; 下标 i 表示实验室号码; 下标 j 表示样品号码; m 表示同一个样品的平均值; a 表示重复两个结果的和; e 表示重复两个结果的差; SS 表示每个单元值偏差的平方和 (a_{ij}/n_{ij})。

2.2.2 界外值检验

2.2.2.1 1 个样品重复性结果的检验

对全部样品在各实验室的重复结果, 先计算重复两个结果之差, 然后将最大差值的平方除以全部差值的平方和, 即按式 (1) 计算比值 (C):

$$C = \frac{e_{\max}^2}{\sum_{i=1}^L e_i^2} \quad (1)$$

将计算的 C 值与 1% 显著水平的科克伦 (Cochran) 规则的相应值进行比较, 如果 C 大于相应值, 则舍去这一对结果, 将 n 减 1, 重复这一检验过程, 直到没有舍弃值为止。但是这种舍弃数据不得超过 10%。

2.2.2.2 1 个样品再现性结果的检验

对某个实验室的某一样品是否存在界外值, 采用霍金斯 (Hawkins) 规则检验。先计算该样品在各个实验室重复结果的平均值, 然后计算该样品的总平均值, 再计算该样品在各个实验室构成的最大绝对偏差值以及该样品构成的平方和的平方根。按照式 (2) 进行计算比值 (B^*):

$$B^* = \frac{|m_j - a_{ij} / n_{ij}|}{\sqrt{SS}} \quad (2)$$

将计算的 B^* 值与 1% 显著水平的 Hawkins 临界值比较, 若 B^* 大于临界值, 则舍去该样品在某一实

验室的平均值, 重复这一过程, 但舍去的结果不得超过 10%。

2.2.3 标准偏差计算

当统计的实验结果经过各个样品的界外值检验后, 第二步就要计算出每一个样品的重复性和再现性标准偏差。

1 个样品的重复性标准偏差 (d_j) 按照式 (3) 计算:

$$d_j = \sqrt{\sum_{i=1}^L e_i^2 / (2L)} \quad (3)$$

1 个样品的再现性标准偏差 (D_j) 按照式 (4) 计算:

$$D_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^L \left(\frac{a_i}{2}\right)^2 - \left[\sum_{i=1}^L \left(\frac{a_i}{2}\right)\right]^2 / L}{L-1} + \frac{d_j^2}{2}} \quad (4)$$

2.2.4 采用归纳法表达精密度

对于稳定性方差, 可归纳成总的标准偏差, 然后再求其精密度。对于非稳定性方差, 可采用分段合成其标准偏差, 对合成的总的标准偏差 (D_T 或 d_T) 按照式 (5) 和式 (6) 计算:

$$d_T = \sqrt{\sum_{j=1}^S d_j^2 / S} \quad (5)$$

$$D_T = \sqrt{\sum_{j=1}^S D_j^2 / S} \quad (6)$$

最后计算得到重复性限 ($r = 2.8d_T$) 和再现性限 ($R = 2.8D_T$)。

3 实验结果及数据处理

在重复性和再现性条件下, 分别在 8 家实验室中对同一批硫化氢标准气和硫氧化碳标准气进行现场比对实验, 在每次测试过程中均确保仪器状态正常, 在操作正确的情况下连续测试 11 次有效结果, 按照 ISO 4259: 2006^[6] 要求选取连续测试的 2 次结果进行计算, 测试原始数据如表 2、3 所示。

采用 2.2 数据处理方法中的公式对表 2、3 中的数据进行界外值检验, 并计算每个样品的重复性和再现性的标准偏差, 结果见表 4、5。

对于硫化氢和硫氧化碳样品在 8 家实验室中进行的测试, 其重复性检验临界值 $C = 0.794 5$, 再现性检验临界值 $B^* = 0.859 6$, 经过计算, 上述两个表中对应的 C 值和 B^* 值均小于其临界值, 故认为所得测定结果均有效, 均要纳入重复性和再现性结果计算。

对表 4、5 中的重复性标准偏差 (d) 和再现性标准偏差 (D) 按照数据接近的原则进行分段, 按照 2.2.4

表2 硫化氢精密度实验数据表

mg/m³

实验室	样品										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	0.94	6.34	19.02	20.72	39.98	58.69	78.49	100.18	155.69	193.16	194.27
	1.73	5.28	15.33	18.34	42.78	56.99	82.12	103.85	153.13	197.56	198.80
B	2.08	6.50	15.50	22.01	37.54	57.27	81.08	102.33	153.55	187.46	192.79
	1.95	6.29	16.29	20.10	40.82	58.02	79.19	99.64	155.12	191.04	191.30
C	1.59	6.00	15.08	19.61	40.83	60.07	80.27	100.37	151.32	188.54	192.17
	1.76	5.74	15.75	20.21	41.52	59.15	80.97	101.36	152.32	191.12	187.45
D	1.43	5.80	14.50	18.70	38.80	57.10	81.80	102.00	160.00	200.00	198.00
	1.35	5.69	13.80	18.90	36.00	57.80	80.30	98.40	158.00	195.00	193.00
E	1.67	5.89	14.93	20.15	40.70	57.97	88.67	102.10	158.70	190.30	189.97
	1.39	5.79	15.13	19.97	40.41	57.18	83.34	103.46	152.73	188.78	186.86
F	2.37	6.62	15.00	19.71	40.77	61.25	83.12	103.75	154.03	194.79	194.62
	2.55	6.36	15.12	19.21	41.49	61.63	84.31	105.50	150.70	197.31	195.66
G	1.54	5.84	14.80	20.00	39.80	56.00	81.50	100.20	150.50	187.10	190.70
	1.44	5.62	15.10	19.80	37.00	54.90	83.40	103.50	152.20	189.80	188.70
H	1.48	4.32	11.60	18.40	39.80	61.10	80.10	98.20	148.40	184.20	191.80
	1.95	5.65	13.70	20.80	42.20	57.20	83.90	102.40	153.40	192.40	195.70

注：mg/m³单位以硫计，下同

表3 硫氧化碳精密度实验数据表

mg/m³

实验室	样品									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	1.06	5.24	14.68	19.16	38.20	60.92	79.50	100.44	157.01	208.12
	1.68	6.21	12.93	18.42	36.59	62.81	83.47	104.99	150.91	200.24
B	1.26	5.61	14.72	20.44	40.39	65.16	80.87	104.71	153.23	203.53
	1.39	5.91	15.29	20.84	41.05	64.08	80.17	101.00	153.66	204.76
C	1.72	6.08	15.38	20.41	40.60	64.59	78.42	98.73	144.96	198.07
	1.56	5.92	15.14	20.61	40.78	64.95	79.46	98.37	146.94	196.63
D	1.43	5.62	14.50	19.40	39.10	63.70	80.50	99.50	144.00	200.00
	1.46	5.72	14.80	19.80	38.60	63.00	81.40	101.00	150.00	201.00
E	1.68	5.96	15.34	20.82	40.63	66.13	87.92	111.16	156.60	216.93
	1.39	5.81	15.69	20.58	44.57	66.99	85.38	105.72	163.43	210.63
F	2.21	5.95	14.65	20.09	40.57	64.08	83.04	100.95	154.18	206.97
	2.02	5.75	14.81	19.73	38.30	64.79	81.97	101.61	154.76	209.86
G	1.51	6.03	15.40	20.40	41.00	65.00	79.80	101.00	150.00	197.60
	1.58	5.85	15.00	20.60	40.60	65.80	82.90	99.90	152.00	201.60
H	1.98	6.10	14.90	20.40	40.30	64.10	80.90	101.20	152.90	209.50
	1.91	6.28	15.50	21.00	39.80	66.30	82.50	106.10	155.00	213.20

表 4 硫化氢精密度实验处理结果表

样品编号	单个样品的平均值 $/(mg \cdot m^{-3})$	重复性检验值	再现性结果检验值	单个样品的重复性标准偏差 $/(mg \cdot m^{-3})$	单个样品的再现性标准偏差 $/(mg \cdot m^{-3})$
1	1.70	0.611 8	0.765 0	0.251 1	0.414 4
2	5.86	0.564 3	0.717 6	0.442 6	0.556 1
3	15.04	0.688 7	0.691 9	1.109 8	1.523 6
4	19.79	0.357 9	0.154 1	0.993 5	0.952 2
5	40.03	0.261 4	0.660 0	1.603 3	1.884 0
6	58.27	0.692 8	0.671 6	1.171 4	1.968 8
7	82.03	0.421 4	0.746 1	2.052 6	2.480 7
8	101.70	0.259 0	0.748 2	2.063 0	2.075 6
9	153.74	0.402 1	0.731 8	2.353 7	3.187 3
10	191.78	0.457 4	0.565 6	3.031 1	4.380 2
11	192.61	0.250 2	0.484 0	2.498 9	3.536 3

表 5 硫氧化碳精密度实验处理结果表

样品编号	单个样品的平均值 $/(mg \cdot m^{-3})$	重复性检验值	再现性结果检验值	单个样品的重复性标准偏差 $/(mg \cdot m^{-3})$	单个样品的再现性标准偏差 $/(mg \cdot m^{-3})$
1	1.61	0.690 8	0.675 1	0.188 2	0.308 6
2	5.88	0.785 5	0.705 5	0.271 8	0.255 0
3	14.92	0.728 6	0.792 2	0.512 3	0.645 2
4	20.17	0.370 0	0.758 3	0.306 6	0.720 6
5	40.07	0.636 9	0.652 5	1.234 2	1.777 6
6	64.52	0.401 3	0.713 4	0.868 2	1.536 7
7	81.76	0.415 9	0.047 2	1.538 9	2.483 3
8	102.27	0.321 2	0.055 7	2.399 8	3.440 5
9	152.47	0.351 5	0.125 0	2.880 2	4.926 6
10	204.91	0.429 7	0.047 5	3.003 0	6.209 9

章节中的式(5)、(6)进行计算,并得到重复性限和再现性限,结果如表6所示。

表 6 不同浓度范围内的精密度要求表 mg/m^3

浓度范围	重复性标准偏差	再现性标准偏差	重复性限	再现性限
1 ~ 6	0.303 4	0.400 4	0.8	1.1
6 ~ 20	0.727 9	0.919 6	2.0	2.6
20 ~ 100	1.464 2	1.939 5	4.1	5.4
100 ~ 200	2.626 8	4.154 7	7.4	11.6

根据表6的分段处理结果,得到一个重复性限和再现性限数据表,在重复性条件/再现性条件下,在95%的置信区间里,获得两次独立测试结果的差值不应超过表6中给出的重复性限和再现性限,超过重复性限和再现性限的概率不超过5%。

4 精密度研究成果与国家标准的对比分析

国家标准 GB/T 11060.8—2012 中对测试结果的精密度要求如下:

1) 重复性:在重复性条件下,两个实验结果的差异不应超过 r 值, $r = 0.115 2X$, 其中, X 为两个测试结果的平均值。

2) 再现性:在再现性条件下,两个独立的测试结果不应超过 R 值, $R = 0.313 0X$, 其中, X 为两个独立测试结果的平均值。

研究成果与国家标准精密度要求的最大允许偏差对比结果如表7所示。

从表7可知,本实验的精密度研究成果与国家标准 GB/T 11060.8 相比,在低浓度范围内(1 ~ 6

mg/m³), 重复性的最大允许偏差要略高于国家标准, 这可能是由于本实验中用的标准物质是气体标准物质而国家标准中用的是液体标准物质, 气体标准物质没有液体标准物质稳定, 也容易被吸附在进样管线内壁, 从而导致低浓度样品测试的重复性的最大允许偏差要

略高于国家标准; 在大于 6 mg/m³ 的浓度范围内, 重复性和再现性的最大允许偏差要明显低于国家标准, 并且国家标准中的再现性所允许的最大偏差显得过大, 不利于实验室间样品测试的横向比对。综合比较, 本研究成果的精密度要求总体上要优于国家标准。

表 7 本研究成果与国家标准精密度要求的最大允许偏差对比表

总硫含量 (mg · m ⁻³)	本研究成果精密度要求		GB/T 11060.8 精密度要求	
	重复性最大允许偏差	再现性最大允许偏差	重复性最大允许偏差	再现性最大允许偏差
6	14.2%	18.7%	11.5%	31.3%
20	10.2%	12.9%	11.5%	31.3%
100	4.1%	5.4%	11.5%	31.3%
200	3.7%	5.8%	11.5%	31.3%

5 结束语

通过在 8 家实验室间用不同的紫外荧光总硫分析仪分别对同一批次 22 个样品进行测试, 根据 ISO 4259:2006 对数据进行处理得到紫外荧光法测定总硫含量的精密度要求, 即在重复性/再现性条件下, 在 95% 的置信区间里, 获得的两次独立测试结果的差值不超过相应浓度范围内的重复性限和再现性限, 为该方法总硫测试的结果判定提供了参考, 也为相应的 ISO 标准“总硫/紫外荧光法”的研究提供了重要的直接技术支撑。

与现行的 GB/T 11060.8—2012 中精密度要求相比, 本研究成果总体上更为优越, 建议对该国家标准的修订工作进行研究。

本课题在研究和实验过程中得到以下单位和个人的大力帮助: 全国天然气标准化技术委员会的罗勤、许文晓, 中国石油大庆油田工程有限公司的侯学智、宋守国、李飞雪, 中国石化天然气分公司计量研究中心的裴全斌、林敏、夏宝丁, 中国石油西南油气田公司重庆气矿的李珍义、郑健康, 中国石油西南油气田公司川中油气矿的黄纯虎, 中国石油西南油气田公司蜀南气矿的詹进先、袁杰, 中国石化中原油田普光分公司的刘超。对于上述单位和个人的帮助以及老专家陈庚良等文中未能提到但一直关心和帮助本课题研究的单位和个人在此一并表示感谢!

参 考 文 献

- [1] 尚丽平. 紫外荧光法测定烟气中 SO₂ 浓度的研究[J]. 传感技术学报, 2001, 14(2): 162-165.
Shang Liping. Study on ultraviolet fluorescent measurement for the concentration of sulphur dioxide in flue-gas[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2001, 14(2): 162-165.
- [2] 监雄. 基于荧光技术检测二氧化硫浓度的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.

Jian Xiong. Research on sulfur dioxide concentration based on fluorescent technology[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013.

- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 天然气 含硫化化合物的测定 第 8 部分: 用紫外荧光光度法测定总硫含量[S]: GB/T 11060.8—2012. 北京: 中国标准出版社, 2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China & Standardization Administration of the People's Republic of China. Natural gas—Determination of sulfur compound—Part 8: Determination of total sulfur content by ultraviolet fluorescence method: GB/T 11060.8-2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [4] ASTM. Standard test method for determination of total volatile sulfur in gaseous hydrocarbons and liquefied petroleum gases by ultraviolet fluorescence: ASTM D6667-04[S]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 2004.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 测量不确定度评定与表示: JJF 1059.1—2012[S]. 北京: 中国标准出版社 2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Evaluation and expression of uncertainty in measurement: JJF 1059.1-2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [6] ISO. Petroleum products—Determination and application of precision data in relation to methods of test: ISO 4259: 2006[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.
- [7] 张凌玮. 二氧化硫、氮氧化物空气自动监测仪器精密度、准确度分析[C]// 中国环境科学学会 2013 年学术年会论文集. 昆明: 中国环境科学学会, 2013.
Zhang Lingwei. Precision and accuracy analysis of automatic monitoring instrument for sulfur dioxide and nitrogen oxides[C]// Proceedings of the Annual Meeting of the Chinese Society for Environmental Science. Kunming: CSES, 2013.

(修改回稿日期 2017-07-12 编辑 何明)