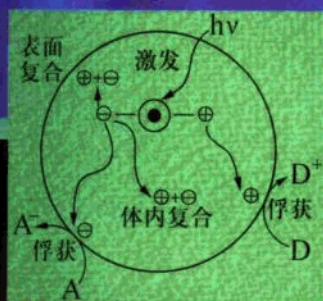


庆祝杜尧国教授执教五十周年
学术论文选集

环境污染物的光化学反应 及其在纳米粒子上的 光催化反应研究

杜尧国 徐自力 等 著

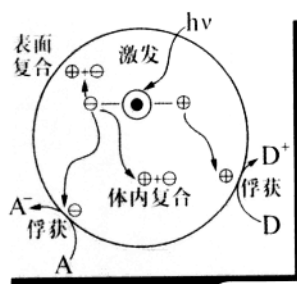


吉林大学出版社

PDG

环境污染物的光化学反应 及其在纳米粒子上的 光催化反应研究

杜尧国 徐自力 等 著



吉林大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

庆祝杜尧国教授执教 50 周年学术论文集: 环境污染物的光化
反应在纳米粒子上的完全催化反应研究/杜尧国著. —长春: 吉
林大学出版社, 2002. 8

ISBN 7-5601-2744-4

I. 庆... II. 杜... III. ①杜尧国—文集②环境监测—文集
③环境保护—文集 IV. X-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 058762 号

环 境 污 染 物 的 光 化 学 反
应 及 其 在 纳 米 粒 子 上 的
光 催 化 反 应 研 究

杜尧国 徐自力著

责任编辑、责任校对: 陈 静

封面设计: 孙 群

吉林大学出版社出版
(长春市解放大路 125 号)

吉林大学出版社发行
吉林农业大学印刷厂印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16

2002 年 9 月第 1 版

印张: 16.5 插页: 3

2002 年 9 月第 1 次印刷

字数: 429 千字

印数: 1—300 册

ISBN7-5601-2744-14/Z·171

定价: 25.00 元



作者简介

杜尧国，男，1932年12月出生，江苏省昆山市人。

吉林大学博士生导师，教授。1953年毕业于复旦大学化学系。1980年前在吉林大学从事无机化学领域的教学和科研工作，后转入环境科学领域，1987年创建吉林大学环境科学系，任系主任至1993年。兼任国家教委理科环境学科教学指导委员会委员，吉林省化学会常务理事、秘书长，吉林省环境科学学会副理事长、顾问多年。1989年获吉林省环境保护先进工作者光荣称号。1992年被评为国务院特殊政府津贴专家。1993年被评为吉林大学博士生导师，1998年被批准建立环境科学专业博士点。五十年来，出版专译著教材13部，《无机化学》（第二版）获国家教委优秀教材一等奖，先后出版的《无机化学实验》、《无机化学习题集》、《高等无机化学》、《无机化合物的合成与鉴定》等书，为培养学生掌握基础、拓宽加深知识领域以及提高学生思维能力和加强学生动手能力做出了贡献，1992年出版的《环境化学》弥补了当时国内教材的短缺状况。

几十年来，获得科学研究成果16项，其中6项获国家教委、吉林省科技进步奖。现主要从事大气、水环境光化学与光催化反应和空气无动力采样技术研究。曾在国内外发表学术论文110余篇。



1985 年摄
在日本国千叶大学访问期间，与铃木伸教授一起参加第 26 届大气污染学术会议



1989 年摄
在北京出席第二届全球大气污染化学会议（左侧为徐自力）



1990 年摄
在上海参加第三届国际
大气科学学术会议



1999 年摄
在对学生作《大气
无动力采样器》的
学术报告



2001 年摄
在处理实验数据

前 言

岁月匆匆，50年弹指一挥间。回顾执教50年和70古稀，聊以自慰。自问在教书育人，耕耘科研，建设学科专业中尽了自己的微薄之力。取得的业绩，要归因各部门的支持和资助，更要归因于我的同事和间学生们孜孜不倦地努力工作。作者迄今已发表学术论文110余篇；出版专著13部，其中获奖两项；取得科研成果16项，其中获奖6项；培养出已取得学位的硕士生26名和博士生7名。

上世纪80年代初，由于国内环境、教育工作的形势和我校教学工作的需要，我毅然地服从组织安排，从原来十分熟悉的无机化学领域转向非常陌生又比较薄弱的环境化学领域，在化学系负责组建环境化学教研室，不言而喻，困难是相当大的。经过8年的共同奋斗，教学过关，科研起步，师资成长，设备初具规模。1987年又在此基础上建成了环境科学系。随后，人员、设备又得到进一步充实，教学、科研和创收工作得到良性循环，相继建立了环境科学专业硕士点和博士点，完善了培养层次，具有相当的知名度。

作者向郎佩珍教授致以衷心的感谢，由于她的大度和善意，我们才得以参加我省的第二松花江中有机污染物的研究课题协作组，使我们在环境科研工作起步时受益匪浅，为我们以后以第二松花江为背景研究水中有机污染物的光化学反应奠定了基础。众所周知，大气中无机和有机污染物的光化学反应是干、湿沉降化学的重要基础，在研究水环境的同时开展了大气环境的同类问题研究。纳米材料的特性越来越受到人们的关注，将其引入光化学反应的研究而开展对有机污染物的光催化氧化研究已成为当今热点和前沿。光催化氧化有机污染物在对它的治理方面具有明显的潜在可能性。

作者在研究工作中，坚持在基础理论研究的同时进行新工艺、新产品的开发工作，例如无动力采样器的开发和推广应用，它为基础理论研究提供了研究经费并在开发中解决急需的理论与实际问题，相辅相成，互相促进。

作者希望，本文集的问世将对环境化学基础理论的发展，以及污染控制与治理的实践有所促进，对拓展科研道路有所启迪。

郭海忱教授、刘星娟教授、康春莉副教授以及刘春明博士、尚静博士、王英博士等为本书的出版作了重要的贡献。在本书编校过程中还得到了高福民高级工程师、杜利萍工程师以及郭晓静工程师的大力帮助，特此一并致谢。

杜尧国

2002年2月

目 录

第一章 空气中气相有机污染物的监测及时空分布	(1)
1. GC 及 GC/MS 分析大气中气相有机污染物	
..... 杜尧国 徐自力 郭海忱 (3)	
2. 长春市大气气相有机污染物探查	
..... 徐自力 杜尧国 郭海忱 (9)	
3. 长春市空气中 NMHC 污染物监测点位的优化	
..... 刘春明 徐自力 杜尧国 康春莉 (13)	
4. Analyses of volatile organic compounds concentrations and variation trends in the air of Changchun, the northeast of China	
..... Chunming Liu Zili Xu Yaoguo Du Haichen Guo (18)	
5. 长春市空气中苯系物的分布规律	
..... 刘春明 杜尧国 徐自力 郭海忱 (28)	
第二章 空气中气相有机污染物与 SO₂ 的光化学反应	(33)
1. 大气光化学反应研究 (I)——SO ₂ 与 1-己烯的光化学反应	
..... 杜尧国 赵晓明 郭海忱 (35)	
2. 大气光化学反应研究 (II)——SO ₂ 与异戊烷的光化学反应	
..... 杜尧国 张 颖 徐自力 郭海忱 (40)	
3. 二氧化硫与庚烯-1 的光化学反应——大气光化学反应研究 (III)	
..... 杜尧国 郝国仑 徐自力 郭海忱 (45)	
4. 二氧化硫与环己烷的光化学反应	
..... 杜尧国 郭海忱 张连社 徐自力 (50)	
5. GC 和 GC/MS 法研究 SO ₂ 与正己烷的气相光化学反应——大气化学反应模拟研究 (V)	
..... 杜尧国 郭海忱 廖朝晖 徐自力 (55)	
6. 二氧化硫与 1-己烯的光化学反应动力学	
..... 郭海忱 杜尧国 林 君 徐自力 (61)	
7. SO ₂ 与二烯烃的光化学反应	
..... 杜尧国 林 君 徐自力 郭海忱 (68)	
8. SO ₂ 与甲苯的气相光化学反应	
..... 徐自力 杜尧国 刘春明 康春莉 谢忠雷 郭海忱 廖朝晖 温克明 (71)	
9. 正戊烷与 SO ₂ 气相光化学反应自由基机理的 ESR 验证	
..... 徐自力 尚 静 刘春明 杜尧国 王 玲 郭海忱 董凤霞 李文艳 (75)	

10. 庚烷与二氧化硫的光化学反应研究	徐自力 杜尧国 王 玲 郭海忱 郭晓静 (79)
第三章 空气中气相有机污染物的光催化反应	(85)
1. TiO_2 纳米粒子气-固复相光催化氧化 VOCs 作用的研究进展	尚 静 徐自力 杜尧国 (87)
2. The Preparation and Characterization of TiO_2 Ultrafine Particles	Zili Xu Jing Shang Chunming Liu Chunli Kang Haichen Guo Yaoguo Du (97)
3. TiO_2 纳米粒子制备方法对其光催化活性的影响	尚 静 徐自力 杜尧国 李静敏 (102)
4. TiO_2 纳米粒子的结构、表面特性及其光催化活性研究	尚 静 徐自力 杜尧国 李静敏 (108)
5. TiO_2 纳米粒子的光催化活性与光伏响应特性研究	朱连杰 王德军 谢腾峰 尚 静 徐自力 杜尧国 (114)
6. 超细粉 TiO_2 光催化氧化 SO_2 的研究	尚 静 徐自力 杜尧国 郭海忱 (118)
7. 金属氧化物半导体对庚烷的气固复相光催化反应	徐自力 郭晓静 杜尧国 尚 静 井立强 冯文一 张家骅 (121)
8. Photocatalytic Reaction of Sulfur Dioxide with Heptane in the Gas-phase over Titanium Dioxide	Du Yao-guo Shang Jing and Xu Zi-li (125)
第四章 空气无动力采样器的研制及其应用	(131)
1. 徽章型大气无动力采样器的研制	杜尧国 李俊奇 黄继国 徐自力 (133)
2. 室内空气 NO_2 污染——扩散式 NO_2 简易检测器的应用	杜尧国 李俊奇 黄继国 (138)
3. 大气 NO_x 无动力采样与检测技术的研究	杜尧国 李俊奇 冯 流 徐自力 (140)
4. PTIO 的合成及其对 NO 的氧化特性	杜尧国 李润博 冯 流 李绍民 (143)
5. S-2 型空气 SO_2 无动力采样器	杜尧国 王 勇 徐自力 李绍民 田星叶 (147)
6. N-2 型空气 NO_2 无动力采样器	杜尧国 李润博 徐自力 康春莉 蔺守仁 车瑞卿 杨吉兴 (150)
7. 扩散式 CO 检测器的研制	杜尧国 全相春 李俊奇 (153)
8. Simple Oxidant Monitor II. The Reaction of Triethanolamine with Iodine	Yao-guo Du Osamu Koga Nobutoshi Horiuchi and Shin Suzuki (155)
9. Simple Oxidant Monitor III. The Reaction of Ethanolamine with Ozone	Yao-guo Du Nobutoshi Horiuchi Osamu Koga and Shin Suzuki (161)

第五章 水中有机污染物的监测与分析	(167)
1. 天青 I 萃取-光度法测定地表水中的阴离子表面活性剂 刘星娟 杜尧国 王大宁 刘毓琪 周中祥	(169)
2. 用 GDX-104 富集天青 I 比色测定天然水体中的阴离子表面活性剂 刘星娟 杜尧国 刘毓琪 孟凡敏 何永钜	(175)
3. 同步荧光光谱直接测定混合物中的苯并 (a) 芘 (Bap) 李静红 于连生 杜尧国	(179)
4. Application of Second-derivative Synchronous Fluorescence Spectrometry for the Determination of Benzo(a)pyrene in Air Particulate Samples Without Pre-separation Yao-guo Du Lian-sheng Yu Jing-hong Li Shin Suzuki	(183)
5. 第二松花江中 PCBs 与有机氯农药的迁移和分布 李敏学 岳贵春 高福民 杜尧国	(188)
6. 交流示波极谱滴定法在环境监测水质分析中的应用(II)——测定溶解氧及生化需氧量的研究 杜尧国 罗 刚 都昌杰	(194)
7. A New Extraction Spectrophotometric Method for the Determination of Phenol in Water Kang Chun-li Wang Ying Du Yao-guo Li Run-bo Li Jun Zhou Li-ming	(199)
8. 水体中挥发酚测定方法的改进 康春莉 王 英 杜尧国 李润博 李 军 梁玲珊	(204)
9. A Modified Spectrophotometric Method for the Determination of Trace Amounts of Phenol in Water Chunli Kang Ying Wang Runbo Li Yaoguo Du Jun Li Bowen Zhang Yuzhong Du	(208)
第六章 水中有机污染物的光降解	(219)
1. 水环境中有机污染物的光化学研究——第二松花江水中酚的光诱导降解模拟 刘星娟 杜尧国 王 义 柴向东	(221)
2. 天然水中十二烷基苯磺酸钠(DBS)的光解作用 刘星娟 杜尧国 许 峰 何永钜 王 义	(226)
3. 水环境中氨基酚的光降解模拟 杜尧国 刘星娟 周 珊	(230)
4. 氯苯类在地面水中的光降解研究 杜尧国 刘星娟 李雷鸣	(235)
附 录	(239)

第一章

空气中气相有机污染物的监测及时空分布

原书空白

GC 及 GC/MS 分析大气中气相有机污染物

杜尧国 徐自力 郭海忱

随着工业及交通业的发展,气相有机污染物在城市大气中普遍存在,它不仅直接污染环境,危害人体健康,而且在紫外光照下, NO_2 、 SO_2 等与其还会发生光化学反应,进一步产生二次污染物,如臭氧、醛、过氧化硝酸脂、烷基硝酸脂、气溶胶等,造成比一次污染更大的危害.因此在考虑大气污染时,大气中存在的气相有机污染物是一种不容忽视的重要因素.

大气气相有机污染物的测定通常采用气相色谱及气相色谱-质谱分析技术.由于大气气相有机污染物含量很低(ppm 甚至 ppb 级),因此,测定前常需对样品中被测成分进行浓缩处理.适用于大气气相有机污染物浓缩的方法有三种:溶剂吸收法^[1]、低温冷凝法^[2,3]及固体吸附剂吸附法^[4,5].溶剂吸收法由于浓缩对象有一定的局限性,所以在污染物种类复杂的情况下,后两种方法效果更好些;如把低温冷凝法和固体吸附剂吸附法结合起来,则效果更加理想.为了得到较好的分离效果和色谱峰形^[6],进行了第二次浓缩及解吸,然后使用气相色谱仪以及气相色谱-质谱仪进行定性和定量分析.

实 验 方 法

1. 试剂

GDX-102 高分子微球,天津化学试剂二厂;

高氯酸镁,北京南尚乐化工厂;

标样:甲烷、戊烷、戊烯、己烷、环己烷、苯、庚烷、辛烷等,天津化学试剂二厂产色谱纯试剂.

2. 仪器及其操作条件

3700 气相色谱仪(配 FID 检测器),美国 Varian 公司生产;

3390A 积分记录仪,美国 HP 公司生产;

4510 色-质联用仪,美国 Finnigan-MAT 质谱公司生产;

石英毛细管柱,美国 J·W 公司生产:30 m × 0.245 mm DB-5 石英毛细管柱,15 m × 0.245 mm DX-1 石英毛细管柱;

色谱操作条件:汽化室温度 150 °C, FID 检测器温度 200 °C,柱初始温度 25 °C,柱终止温度 140 °C,升温速度 2 °C/min,载气 N_2 流速 1 ml/min,分馏比 1:30,氢气流速 22 ml/min,空气流速

150 ml/min.

色谱-质谱仪操作条件:电子轰击型离子源,电子能量 70 eV,发射电流 0.25 mA,电子倍增器电压 1000 V,分辨率 2000,质量扫描范围(m/e)33 ~ 650,扫描时间间隔 1 s.

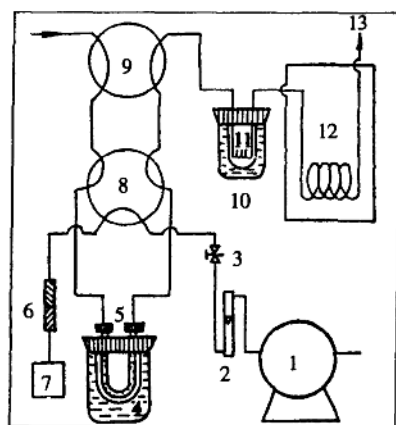


图1 浓缩分析装置图

1—机械泵；2—浮子流量计；3—针形调节阀；4, 10—液氮；5—吸附管；6—干燥管；7—气袋；8—六通阀；9—四通阀；11—铜毛细管；12—石英毛细管柱

3. 测定方法

将采有 10 L 气体的采样袋按图 1 与分析系统连接,切换六通阀与四通阀,使它们处于进样位置,用液氮预冷装有 GDX-102 微球的 U 型吸附管(长 110 mm,内径 4 mm 的玻璃管,GDX-102 微球在使用前于 150 °C 条件下通入经过脱氧的高纯氮气净化 8 h),开启机械泵,使被分析的气体以 0.4 L/min 的流速通过干燥管(装有高氯酸镁和碱石棉的长 150 mm 和 内径 5 mm 的玻璃管)和吸附管.抽气完毕,切换六通阀和四通阀,使它们处于热解吸位置,以保证吸附管处于一封闭系统.取走液氮,在 120 °C 条件下加热吸附管,10 min 后,切换六通阀和四通阀,使它们处于进样位置.此时,载气经过吸附管,将已脱附的样品带入经预冷的铜毛细管,这样品进行第二次冷凝浓缩.2 min 后,用沸水加热铜毛细管,至此被浓缩的有机物全部进入毛细管气相色谱或气相色谱-质谱仪进行分析测定.

曾用高纯氮气做过空白实验,未发现杂质峰.利用质谱及部分色谱标样的相对保留值进行定性分析,并采用外标法进行定量分析.

结果与讨论

1. 最佳操作条件的选择

(1) 第二次冷凝浓缩对分析测定的影响

图 2、3 表明,第二次冷凝浓缩可减少样品组分在柱内的纵向扩散,改进了峰形,从而提高

了分辨率和灵敏度。

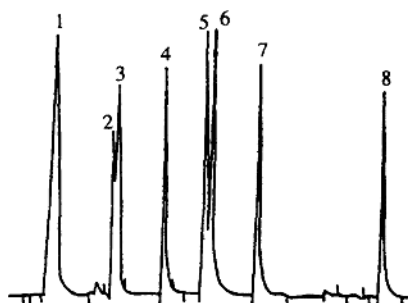


图2 样品经第二次冷凝浓缩所得的 GC 图

1—甲烷, 2—戊烯, 3—戊烷, 4—己烷, 5—苯,
6—环己烷; 7—庚烷; 8—辛烷

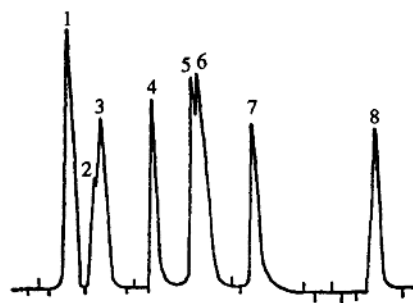


图3 样品未经第二次冷凝浓缩所得的 GC 图

1—甲烷; 2—戊烯; 3—戊烷; 4—己烷; 5—苯;
6—环己烷; 7—庚烷; 8—辛烷

(2)低温冷凝时采样速度对分析的影响

为了考察不同采样速度对分析的影响,分别选用了 1.0、0.6、0.4 L/min 三个流速,对甲烷、戊烯、戊烷、己烷、苯、环己烷、庚烷、辛烷标准气样进行了二次冷凝浓缩分析,并以回收率为参数来选择合适的采样速度,结果如表 1 所示.采样速度为 1.0 L/min 时吸附不完全,测定灵敏度较低.随着采样速度的降低,吸附效率逐渐增高.但采样速度不宜过低,因为低的采样速度,会使分析时间拖得过长,从而影响测定.采样速度为 0.4 L/min 时吸附效率已令人满意,故选择此采样速度.

表 1 不同采样速度下的回收率

采样速度 (L/min)	回收率(%)							
	甲 烷	戊 烯	戊 烷	己 烷	苯	环己烷	庚 烷	辛 烷
1.0	61.53	63.21	62.32	62.52	63.02	57.28	56.12	42.31
0.6	82.81	83.56	82.15	83.32	84.16	83.87	80.53	70.02
0.4	99.01	99.97	99.21	99.98	100.5	96.83	92.81	79.32

(3)气体干燥剂的选择

空气中存在着大量的水及 CO₂,它们严重干扰气相有机物的气相色谱分析,并降低吸附剂对有机气体的吸附效率,因此在吸附柱前安装除水及除 CO₂ 的干燥管.我们比较高氯酸镁、碳酸钾、碱石棉、碱石灰的干燥效果.碱石灰颗粒大时,二氧化碳去除不净,严重干扰分析;颗粒小时,对样品吸附严重.碳酸钾为粉末状物质,吸水后易结块,使采样系统阻力增大,影响采样,同时它也吸附有机物.实验结果表明,选择高氯酸镁和碱石棉为干燥剂效果最好.

(4)被吸附的有机物热解吸时间的选择

为了考察被吸附有机物热解吸时间对分析的影响,选择热解吸时间分别为 5、10、15 min 对标准气体戊烷、己烷、庚烷、辛烷进行了二次冷凝浓缩测定,结果如表 2 所示.

表 2 不同热解吸时间的回收率

解吸时间 (min)	回收率(%)			
	戊 烷	己 烷	庚 烷	辛 烷
5	107.83	106.54	87.46	36.76
10	99.21	99.98	92.82	79.32
15	47.16	65.56	74.96	94.80

表 2 表明,热解吸时间以 10 min 为宜,时间短不利于高碳数有机物的回收,时间长则不利

于低碳数有机物的回收。

2. 分析方法精密度和准确度的检验

利用标准气体进行二次冷凝浓缩分析,对分析结果进行了精密度和准确度的检验。从表 3 看,变异系数均小于 2.00%。对于环境样品,这样的精密度是符合要求的。查 t 分布表,当显著性水平 $\alpha = 0.01$ 时, $t_{0.01} = 4.60$,而所求得的 t 均小于 $t_{0.01}$,故可认为这种分析方法准确可靠。

表 3 分析方法的精密度和准确度

物 质	配制浓度 (mg/m^3)	五 次 测定平均值	标准偏差	变异系数 (%)	t 值
1-戊烯	0.06982	0.07175	0.00133	1.85	3.06
戊 烷	0.07954	0.07862	0.00060	0.76	3.21
己 烷	0.08128	0.07813	0.00127	1.63	3.40
苯	0.11691	0.11516	0.00084	0.73	3.29
环己烷	0.11345	0.11225	0.00141	1.26	1.58
庚 烷	0.10909	0.11147	0.00123	1.10	1.31
辛 烷	0.11891	0.11633	0.00186	1.60	3.21

3. 实际气样分析

为了提高低碳有机物及复杂环境气样的分离效果,我们把两根石英毛细管柱用自制的金属接头连接起来,对长春市某交通要道大气中 $\text{C}_4 \sim \text{C}_{11}$ 的有机物进行了分析。

利用标样和质谱分别在 DB-5(60 m $\times$ 0.245 mm)和 DX-1(30 m $\times$ 0.245 mm)石英毛细管柱上进行了定性分析,共鉴定了 110 种有机物,测定的色谱图见图 4、5。从测定结果看,尽管 DX-1(30 m)的柱长较 DB-5(60 m)短一倍,但 DX-1 的分离效果优于 DB-5。从 GC/MS/DS 分析结果来看,DB-5 的分析结果均是碳氢化合物,而 DX-1 分析结果既包括 DB-5 测得的碳氢化合物,又出现了部分极性较强的化合物。DB-5 柱的固定液为聚甲基苯基乙烯基硅氧烷,极性较弱,DX-1 柱的固定液为经交联的甲基硅酮固定的聚乙二醇,对分析复杂的大气气相有机物,DX-1 柱优于 DB-5 柱。从定性结果看,有 5 种物质属于美国环境保护局特别规定的必须监测和控制的 37 种挥发性气体^[7]。它们分别是:甲苯、二甲苯、四氯化碳、氯仿及二氯甲烷。

利用外标法对 40 种有机物进行了定量分析,结果如表 4 所示。从定量结果看,大气气相有机物浓度大多数处于 1 ~ 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 范围。

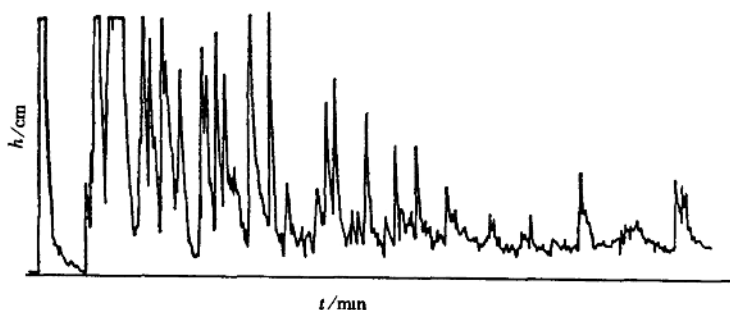


图 4 DB-5 柱测实际大气样品的 FID 气相色谱图

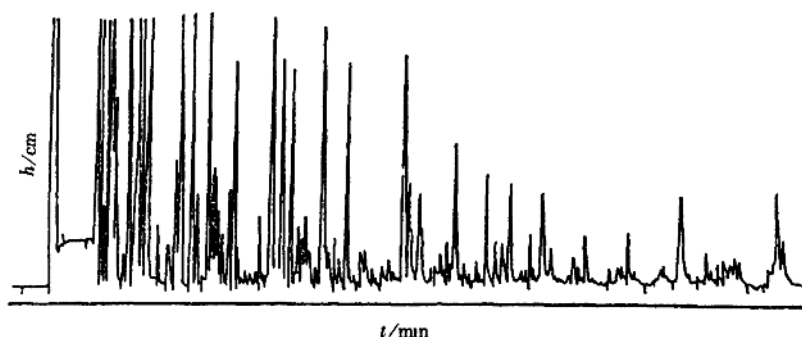


图 5 DX-1 柱测实际大气样品的 FID 气相色谱图

表 4

实际大气样品定量分析结果

序 号	化合物名称	浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	序 号	化合物名称	浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	丁 烷	13 46	21	甲基环己烷	108 2
2	2-丁烯	13 71	22	2,2,3,4-四甲基戊烷	3.501
3	2-甲基丁烯-1	90 27	23	5-甲基己烯-1	28 64
4	2-甲基丁烷	134 7	24	1,5-二甲基环戊烯	8.071
5	戊 烷	72 46	25	5-甲基庚烯-1	23 35
6	2-戊烯	77 46	26	甲 苯	53 88
7	2,3-二甲基丁烷	120 3	27	3-甲基庚烷	51 81
8	2-甲基戊烷	22 53	28	1-甲基,3-乙基环戊烷	3 366
9	3-甲基戊烷	49 82	29	1,2-二甲基环己烷	6 750
10	己 烷	40 53	30	2,4-二甲基己烷	41 56
11	2-乙基丁烯-1	11 47	31	辛 烷	41 97
12	3,3-二甲基环丁烯	9 842	32	2,4-二甲基庚烷	87 41
13	甲基环戊烷	49 38	33	乙基环己烷	21 44
14	亚甲基环戊烷	3 457	34	1,1,3,3-四甲基环己烷	77 34
15	苯	36 86	35	3,7-二甲基辛烯-1	48 63
16	2-甲基己烷	36 48	36	邻二甲苯	66 34
17	3-甲基己烷	32 54	37	4-乙基庚烷	22 23
18	1,3-二甲基环戊烷	18 60	38	2,3-二甲基-3-乙基戊烷	13 14
19	1,2-二甲基环戊烷	2 672	39	4-甲基壬烷	40 13
20	庚 烷	180 2	40	2,6-二甲基壬烷	12.97

结 论

本方法可测定 ppb 级的 $\text{C}_4 \sim \text{C}_{11}$ 的大气气相有机污染物,灵敏度较高,变异系数小于 2.00%,符合环境样品的分析要求.测量方便,从浓缩样品到色谱分析完毕,共需时间约 90 min.我们利用 GC-MS 及部分色谱标样对 110 种城市大气气相有机污染物进行了定性分析,并