

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源 张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)

FTIR对大气颗粒物PM_{2.5}中硝酸盐的定量分析 刘娜, 魏秀丽, 高闽光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程巴阳 (3347)

福建茫荡山地区春季大气O₃、HONO、HCHO、H₂O₂对·OH的贡献率研究 刘昊, 王会祥 (3352)

水体类固醇雌激素污染现状研究进展 都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)

嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查 闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)

上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征 姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)

水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究 张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)

四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用 徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)

光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响 李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)

围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较 庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)

长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征 赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)

长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究 李胜男, 史小丽, 谢薇薇, 龚伊, 孔繁翔 (3416)

峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析 黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)

九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义 鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)

氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律 陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)

石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究 张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)

杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究 邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)

滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究 谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)

自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响 张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)

J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价 李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)

水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响 吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)

重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究 胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)

聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究 刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)

镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制 桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)

钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究 欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)

以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征 宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)

氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究 赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)

缓释碳源滤池用于二级出水的深度脱氮 唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)

微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N₂O产生量的研究 陈丽丽, 高大文 (3532)

Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究 马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)

高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性 唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)

内蒙古温带草原氮沉降的观测研究 张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)

湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究 刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈永稳, 叶长城 (3557)

蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究 王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)

密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价 于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)

西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义 许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)

复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究 王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)

湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征 何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌霄, 胡瑶 (3595)

安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较 王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)

三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响 叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)

二氯甲烷降解菌 *Methylobacterium rhodesianum* H13 的分离鉴定及降解特性研究 刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)

引物选择对污泥微生物多样性分析的影响 徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)

钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO₂储存性能研究 曹琳, 王海滨, 解强 (3627)

基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究 袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)

重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文

多证据分析技术在场地重金属污染评价中的应用研究 姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)

我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源 李晓燕, 刘艳青 (3648)

黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价 张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)

青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究 朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)

某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险 郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)

某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响 周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)

某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究 岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)

原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究 张建荣, 李娟, 许伟 (3684)

淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究 朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)

铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析 任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)

超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究 王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)

摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价 杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)

土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究 郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)

无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究 曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)

《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)

FTIR对大气颗粒物PM_{2.5}中硝酸盐的定量分析

刘娜,魏秀丽*,高闽光,徐亮,焦洋,李胜,童晶晶,程巳阳

(中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学中心,环境光学与技术重点实验室,合肥 230031)

摘要:大气细颗粒物PM_{2.5}作为复合型大气污染的核心污染物之一备受人们关注,NO₃⁻作为其中水溶性离子的主要成分之一,对大气降水和人体健康有着重要影响,因此实现对其快速可靠的检测是一项重要的研究工作.基于傅里叶变换红外光谱技术的优点,采用液态制膜的方法测量比较了颗粒物中NO₃⁻和NH₄NO₃中NO₃⁻的红外光谱图,结果保持一致.在此基础上测量了一系列不同质量NO₃⁻的红外光谱,拟合其吸光度与质量,相关性达到0.994 8,线性范围为7.82~73.78 μg,实现了对其定标.然后利用样品溶液与采样膜样品质量的对应关系,直接测量采样膜上样品的红外谱图,分析了合肥地区2012-03-20~2012-04-20为期1个月的硝酸根质量浓度,平均质量浓度为4.171 3 μg·m⁻³.

关键词:PM_{2.5};硝酸盐;FTIR;定量分析;水溶性离子

中图分类号:X132;X51 **文献标识码:**A **文章编号:**0250-3301(2013)09-3347-05

Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM_{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy

LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, XU Liang, JIAO Yang, LI Sheng, TONG Jing-jing, CHENG Si-yang

(Key Laboratory of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Airborne fine particulate matter PM_{2.5} as one of composite core pollutants of air pollution is concerned and NO₃⁻ as one of the main components of water-soluble ions has an important impact on precipitation and human health, so searching a method of rapid and reliable detection is an important work. According to advantages of the Fourier transform infrared spectroscopy technology, the infrared spectrum of NO₃⁻ in NH₄NO₃ was compared with PM_{2.5} by a sampling method of making film. The result shows that their spectra are consistent with each other. A range of infrared spectra of different masses of NO₃⁻ were measured and the absorbance was fitted with mass, correlation and mass range of which are 0.994 8 and 7.82~73.78 μg, respectively. According to the corresponding relationship of mass between solution and sample film, the FTIR of the sample film was measured directly and mass concentrations of NO₃⁻ in a month (between 2012-03-20 and 2012-04-20) of Hefei area are listed and the average is 4.171 3 μg·m⁻³.

Key words:PM_{2.5}; nitrate; FTIR; quantitative determination; water-soluble ions

大气颗粒物由于其粒径范围、形状、相态及化学组成复杂,其来源、时空分布、大气过程及寿命等变化大,被认为是最为复杂的大气污染物^[1].NO₃⁻作为其大气颗粒物中水溶性离子的主要成分之一^[2~4],是由N₂O、NO、NO₂等经过光化学反应生成的^[5],同时也是形成酸雨的主要成分之一,对大气降水和人体健康有着极为重要的影响^[6,7];其吸湿性影响云凝结核的浓度,从而引起间接的辐射强迫作用^[8].因此研究NO₃⁻的浓度和分布规律可以用来分析大气中二次粒子的来源和形成规律,找到原生粒子的排放源,从而提高对大气气溶胶污染的输运方式及其影响的认知,为制定应急处理措施提供技术支持.

目前对大气颗粒物中NO₃⁻的检测方法已经有很多^[9~13],其中较成熟的方法为IC法^[14~17],但是这种方法有着其自身的缺点:它耗时长,需要很长的

前处理,是一种破坏性分析方法.基于以上问题,FTIR光谱技术作为一种非破坏性的检测方法,简便、快速,有着其独特的优势.自从Cunningham等^[18]用傅里叶变换红外光谱研究气溶胶化学成份以来,大气气溶胶化学成分定性和定量方面的研究日益增多^[19~21].Rosenoern等^[22]用红外光谱研究了多组分气溶胶颗粒的湿度增长特性.台湾的Tsai等^[23]利用漫反射红外光谱对气溶胶无机水溶性离子进行了分析,借助色谱进行了定量分析,得到了不同粒径下大气气溶胶无机水溶性离子浓度分布特征.北京大学梁咏梅等^[24]用七级撞击式采样器在野外收集大气气溶胶样品,利用KBr压片制样对大

收稿日期:2012-12-09;修订日期:2013-01-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41105022)

作者简介:刘娜(1986~),女,博士研究生,主要研究方向为气溶胶红外光谱技术,E-mail:nliu@aiofm.ac.cn

* 通讯联系人,E-mail:xlwei@aiofm.ac.cn

气溶胶的无机离子进行了定量分析. 虽然这些实验都取得了一些成果,但是实验操作复杂,周期长.

本研究采用液态制膜的制样方法,通过测量整个基片上样品膜的红外光谱图,建立硝酸根离子的质量与其吸收度的线性关系,实现对其进行定标;然后利用基片上样品质量与采样薄膜上样品质量的一致性,通过直接测量采样薄膜上样品的红外光谱图反演其质量浓度,为对大气颗粒物的连续监测建立基础. 实验中利用该方法测量了合肥地区为期一个月的硝酸根质量浓度,并分析了其变化趋势.

1 材料与方法

1.1 仪器与药品

光谱仪采用 Bruker 公司生产的 TENSOR27 傅里叶变换红外 (FTIR) 光谱仪,其探测器为 MCT (Mercury Cadmium Telluride) 探测器,分辨率为 4 cm^{-1} ,扫描次数为 64 次平均,测量波段为 $400 \sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$,实验用基片为 Ge 片,直径为 3 cm,采样器为自制 $\text{PM}_{2.5}$ 采样器,采样膜为玻璃纤维滤膜,实验中所用药品 NH_4NO_3 为分析纯.

1.2 实验方法

1.2.1 大气颗粒物样品的采集与其 FTIR 光谱的测量

利用 $\text{PM}_{2.5}$ 采样器采集合肥市的大气颗粒物,采样地点为合肥市董铺水库科学岛实验楼 7 楼楼顶,距离地面高度为 20 m,单次采样时间为 6 h,每天连续采样 4 次,采样间隔为 9 s,采样流速为 $16.7\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,采样时间段为 2012-03-20 ~ 2012-04-20,每天采样完成后测量样品的红外光谱图.

1.2.2 大气颗粒物水溶液基片薄膜的 FTIR 光谱的测量

将样品膜浸泡在适量纯净水中进行超声振荡萃取,先萃取 20 min,提取萃取液,再加入适量纯净水继续萃取 20 min,然后放在 10 mL 的容量瓶中定容,得到颗粒物的水溶液. 用移液枪移取一定量的水溶液滴在 Ge 片上,室温下自然挥发至形成薄膜,待薄膜形成后测量其红外光谱图. 等体积累积滴加,以获取滴定体积与其特征峰吸光度之间的线性关系,即 A-V 曲线,从而通过定标曲线反演出水溶液中 NO_3^- 的质量浓度.

1.2.3 NO_3^- 离子的定标

将与气溶胶样品膜同样大小的空白采样膜用上述方法进行超声振荡萃取,配成 10 mL 水溶液,作为背景底液待用. 称取一系列不同量的 NH_4NO_3 纯样品,各自溶解在背景底液中,配成一系列不同质量浓度的 NH_4NO_3 水溶液. 各自将水溶液等体积滴加在 Ge 片上,室温下自然挥发至形成薄膜,然后测量其基片薄膜的红外光谱图,得到一系列不同质量的 NH_4NO_3 的红外光谱图,然后根据朗博比尔定律做 NO_3^- 离子特征峰吸光度与其质量的定标曲线. NH_4NO_3 混合溶液中 NO_3^- 的质量浓度见表 1.

表 1 NO_3^- 的质量浓度

标号	NO_3^- 的质量浓度/ $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$
1	0.043 92
2	0.083 84
3	0.120 29
4	0.153 71
5	0.184 45
6	0.039 12
7	0.074 68
8	0.107 15
9	0.136 92
10	0.164 3
11	0.044 66
12	0.085 25
13	0.122 31
14	0.156 29
15	0.187 55

2 结果与讨论

2.1 大气颗粒物的红外光谱图

从 $\text{PM}_{2.5}$ 的样品红外光谱图 (图 1) 中可以看出, NO_3^- 的吸收峰出现在 830 cm^{-1} 和 $1\,331\text{ cm}^{-1}$ 左右,这与文献[25]报道的相一致,见表 2. 在 $1\,331\text{ cm}^{-1}$ 的吸收峰为 NO_3^- 的反对称伸缩振动吸收峰,在 830 cm^{-1} 的吸收峰为 NO_3^- 的面内弯曲振动吸收峰, 830 cm^{-1} 的吸收峰虽然相对较弱,但是无干扰, $1\,331\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰强于 830 cm^{-1} 处的吸收峰,但是受到 NH_4^+ 吸收峰的干扰,有时两个峰难以区分,所以本研究采用 830 cm^{-1} 处的吸收峰作为 NO_3^- 定量分析的吸收峰.

表 2 NH_4NO_3 中 NO_3^- 离子的基团频率

振动方式	对称伸缩振动	面内弯曲振动	反对称伸缩振动	面外弯曲振动
类别	ν_1	ν_2	ν_3	ν_4
频率/ cm^{-1}	1 070 ~ 1 010	850 ~ 800	1 500 ~ 1 300	770 ~ 715

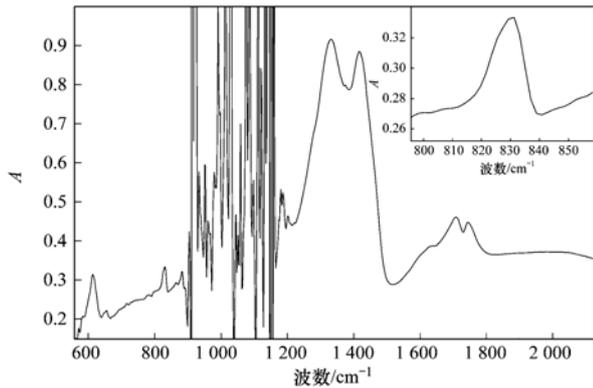


图 1 大气颗粒物的傅里叶变换红外光谱

Fig. 1 FTIR absorption spectrum of atmospheric particulates

2.2 大气颗粒物水溶液的基片薄膜的红外光谱图

在对样品进行无损测量之后,萃取样品膜上的水溶性离子,配成水溶液,滴定使其成膜,其基片薄膜的红外光谱图如图 2 所示,从中可以看出随着 NO₃⁻ 滴定量的增加吸光度也在不断地增加,将吸光度(A)与滴定量(V)进行拟合,拟合曲线见图 3,拟合方程为:

$$A = 0.04771 V + 0.00293, \quad R = 0.9987$$

从拟合结果可以看出吸光度与滴定量之间呈线性相关,遵从朗博比尔定律,因此可以应用此拟合方程对其质量浓度进行反演。

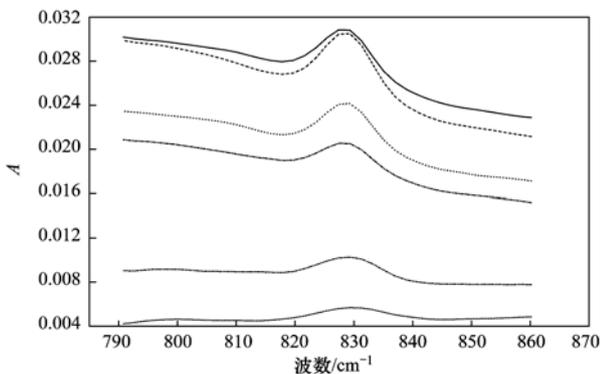


图 2 大气颗粒物水溶液的基片薄膜的傅里叶变换红外光谱图

Fig. 2 FTIR of substrate film of the aqueous solution of atmospheric particulates

2.3 NO₃⁻ 的标定结果

为了探讨背景底液对 NO₃⁻ 的吸收峰的影响,实验中称量了一定量的 NH₄NO₃ 溶解在颗粒物水溶液中,用同样的方法实验,将其基片薄膜红外谱图与空白膜水溶液做底液的 NH₄NO₃ 水溶液基片薄膜的红外谱图和大气颗粒物水溶液基片薄膜的红外谱图做了对比,结果如图 4 所示,图中实线代表大气颗粒物水溶液,点线代表大气颗粒物水溶液做底液的

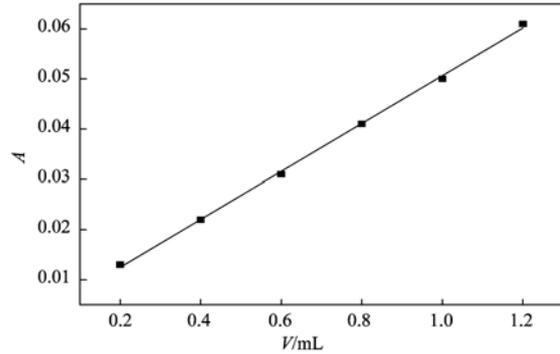


图 3 滴定量与吸光度的拟合曲线

Fig. 3 Fit curve of titer and absorbance

NH₄NO₃ 水溶液,破折线代表空白膜水溶液做底液的 NH₄NO₃ 水溶液. 结果显示,三者的峰位和峰型基本保持一致,因此大气颗粒物水溶液中 NO₃⁻ 的质量浓度可以用 NH₄NO₃ 的 NO₃⁻ 的标定曲线来进行计算。

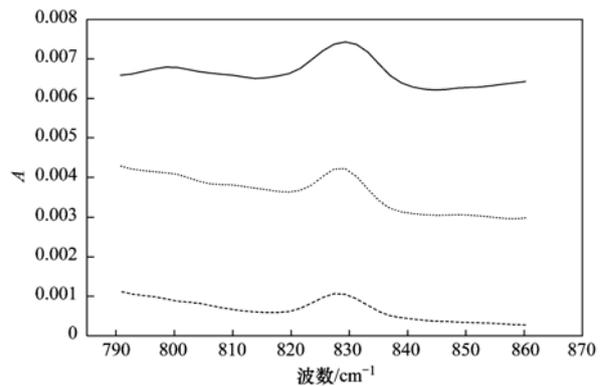


图 4 气溶胶和 NH₄NO₃ 的红外光谱图的比较

Fig. 4 Comparison of FTIR between aerosol and NH₄NO₃

将 NH₄NO₃ 的光谱图中 NO₃⁻ 吸收峰的吸光度(A)与滴定的 NO₃⁻ 质量(m)进行拟合,拟合曲线见图 5,拟合方程为:

$$A = 1.4083 m - 0.0003, \quad R = 0.9948$$

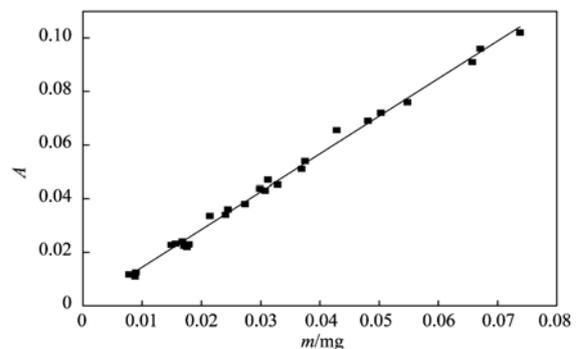


图 5 吸光度与质量的拟合曲线

Fig. 5 Fit curve of absorbance and mass

从拟合结果可以看出其吸光度与质量呈现很好的相关性,遵从朗博比尔定律,可以将其作为 NO_3^- 的标定曲线,其标定范围为 $7.82 \sim 73.78 \mu\text{g}$. 在标定曲线上反演出 1 mL 大气颗粒物水溶液中 NO_3^- 质量为 $36.17 \mu\text{g}$,在其标定范围内. 所以大气颗粒物采样膜中 NO_3^- 的总质量为 0.3617 mg ,即空气中 NO_3^- 的质量浓度为 $15.04 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 此种方法为以后直接连续测量大气颗粒物中 NO_3^- 的质量浓度提供了基础,简单快速.

2.4 合肥地区 2012-03-20 ~ 2012-04-20 期间大气颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NO_3^- 的质量浓度

从以上数据中可以得知,当样品背景与测量条件一致时,其吸光度与质量呈线性相关,直接连续测量空气样品膜的红外光谱图,以上述空气样品膜的质量浓度为标准,计算出合肥地区为期一个月内的 NO_3^- 质量浓度的相对值,将其变化趋势作图,见图 6,其中的质量浓度值为 6 h 平均值. 从图 6 中可以看出 3 月的质量浓度高于 4 月的质量浓度,这可能是由于进入 4 月后温度升高,二次气溶胶中 NO_3^- 的质量浓度相对降低的缘故. 此地区一个月内的平均质量浓度为 $4.1713 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,质量浓度相对较低,这是因为此地区地处郊区,被水库环绕,周围植被较多,空气相对洁净,可能的污染来源为车辆的尾气排放、煤气的燃烧和二次颗粒物的迁移.

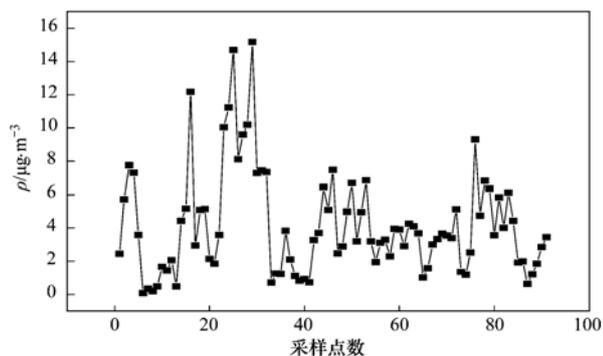


图 6 合肥地区 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NO_3^- 在一个月内的质量浓度变化

Fig. 6 Mass concentration of NO_3^- in $\text{PM}_{2.5}$ of Hefei area in a month

3 结论

(1) 本研究基于傅里叶变换红外光谱技术,采用液态制膜的制样方法,分析比较了 NH_4NO_3 中 NO_3^- 和颗粒物中 NO_3^- 的红外光谱图,结果表明两者基本一致.

(2) 在此基础上应用此方法测量了一系列不同量 NO_3^- 的红外光谱,将 NO_3^- 的质量与其吸光度进行拟合,相关性达到 0.9948 ,线性范围为 $7.82 \sim$

$73.78 \mu\text{g}$,实现了对大气颗粒物中 NO_3^- 的定标.

(3) 根据定标曲线计算出了采样膜上样品的质量,并反演出空气颗粒物中 NO_3^- 的质量浓度. 观测了合肥地区一个月内空气颗粒物中 NO_3^- 的质量浓度及变化趋势,4 月的质量浓度低于 3 月的质量浓度,平均质量浓度为 $4.1713 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

参考文献:

- [1] 贺克斌,杨复沫,段凤魁,等. 大气颗粒物与区域复合污染[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 1-23.
- [2] Tsai Y I, Cheng M T. Characterization of chemical species in atmospheric aerosols in a metropolitan basin[J]. *Chemosphere*, 2004, **54**(8): 1171-1181.
- [3] Tsai Y I, Kuo S C. $\text{PM}_{2.5}$ aerosol water content and chemical composition in a metropolitan and a coastal area in southern Taiwan[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(27): 4827-4839.
- [4] Verma S K, Deb M K. Nondestructive and rapid determination of nitrate in soil, dry deposits and aerosol samples using KBr-matrix with diffuse reflectance Fourier transform infrared spectroscopy (DRIFTS)[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2007, **582**(2): 382-389.
- [5] Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(12-14): 2063-2101.
- [6] Auger F, Gendron M C, Chamot C, et al. Responses of well-differentiated nasal epithelial cells exposed to particles; Role of the epithelium in airway inflammation [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2006, **215**(3): 285-294.
- [7] Jonsson P, Bennet C, Eliasson I, et al. Suspended particulate matter and its relations to the urban climate in Dar es Salaam, Tanzania[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(25): 4175-4181.
- [8] Shine K P, Forster P M D. The effect of human activity on radiative forcing of climate change: a review of recent developments[J]. *Global and Planetary Change*, 1999, **20**(4): 205-225.
- [9] Voisin D, Smith J N, Sakurai H, et al. Thermal desorption chemical ionization mass spectrometer for ultrafine particle chemical composition [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2003, **37**(6): 471-475.
- [10] Slanina J, Ten Brink H M, Otjes R P, et al. The continuous analysis of nitrate and ammonium in aerosols by the steam jet aerosol collector (SJAC): extension and validation of the methodology [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(13): 2319-2330.
- [11] Yang H, Yu J Z, HO S S H, et al. The chemical composition of inorganic and carbonaceous materials in $\text{PM}_{2.5}$ in Nanjing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(20): 3735-3749.
- [12] Xia L L, Gao Y. Chemical composition and size distributions of coastal aerosols observed on the US East Coast [J]. *Marine Chemistry*, 2010, **119**(1-4): 77-90.
- [13] Timonen H, Aurela M, Carbone S, et al. High time-resolution

- chemical characterization of the water-soluble fraction of ambient aerosols with PILS-TOC-IC and AMS [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2010, **3**(4): 1063-1074.
- [14] 余学春, 贺克斌, 马永亮, 等. 气溶胶水溶性无机物及有机物的离子色谱测定[J]. *环境化学*, 2004, **23**(2): 218-222.
- [15] 徐宏辉. 北京及周边地区大气气溶胶的质量浓度和无机组分的特征及其来源研究[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2007. 67-90.
- [16] Chen M L, Chen L T, Wang Y N, *et al.* Characteristics of acid aerosols in the geothermal area of metropolitan Taipei, Taiwan [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(15): 2061-2067.
- [17] Louie P K K, Watson J G, Chow J C, *et al.* Seasonal characteristics and regional transport of $PM_{2.5}$ in Hong Kong[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(9): 1695-1710.
- [18] Cunningham P T, Johnson S A. Spectroscopic observation of acid sulfate in atmospheric particulate samples[J]. *Science*, 1976, **191**(4222): 77-79.
- [19] Chan Y C, Simpson R W, McTainsh G H, *et al.* Characterization of chemical species in $PM_{2.5}$ and PM_{10} aerosols in Brisbane, Australia[J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(22): 3773-3785.
- [20] Coury C, Dillner A M. A method to quantify organic functional groups and inorganic compounds in ambient aerosols using attenuated total reflectance FTIR spectroscopy and multivariate chemometric techniques [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(23): 5923-5932.
- [21] Blando J D, Poreja R J, Turpin B J. Issues in the quantitation of functional groups by FTIR spectroscopic analysis of impactor-collected aerosol samples[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2001, **35**(5): 899-908.
- [22] Rosenoern T, Schlenker J C, Martin S T. Hygroscopic growth of multicomponent aerosol particles influenced by several cycles of relative humidity [J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2008, **112**(11): 2378-2385.
- [23] Tsai Y I, Kuo S C. Development of diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy for the rapid characterization of aerosols[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(10): 1781-1793.
- [24] 梁咏梅, 王美蓉, 孙庆瑞, 等. 大气气溶胶酸式硫酸盐的 FTIR 研究[J]. *环境科学*, 1997, **18**(6): 9-12, 15.
- [25] Allen D T, Palen E J, Haimov M I, *et al.* Fourier transform infrared spectroscopy of aerosol collected in a low pressure impactor (LPI/FTIR): method development and field calibration [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1994, **21**(4): 325-342.

CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM _{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O ₃ , HONO, HCHO and H ₂ O ₂ in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaying	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg(II) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epiclorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum(III)-magnesium(II)-sulfate	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO ₃	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N ₂ O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, ZHANG Bin, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Jia-wei, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i>	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO ₂ over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations	YUAN Jing, LI Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-minget <i>al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-yong, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd ²⁺ on Biochar from Aqueous Solution	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行