

基于红外光谱探针的腈类溶液结构分析

王央, 傅云鹏, 刘萧骥, 张国涛, 李国斌, 刘万强*, 汪靖伦*

湖南科技大学化学化工学院, 化工与材料国家级实验教学示范中心, 湖南 湘潭 411201

摘要: 在化学、材料和生物等领域, 溶液是常见的反应环境, 探索溶液结构与性质的相互关系有着重要意义, 然而在本科生实验中却鲜有涉及溶液结构的化学实验。本文利用腈类化合物作为红外光谱探针, 通过衰减全反射-傅里叶红外光谱仪对溶液中分子-离子间相互作用进行测试, 通过改变溶质的浓度和调控溶剂的诱导效应、空间位阻效应以及配位效应, 进而分析其对溶液结构的影响。本实验涉及仪器分析、物理化学和有机化学相关综合理论知识, 同时可拓展红外吸收光谱仪的应用范围, 且实验操作便捷、综合性较强, 有利于更好地培养学生的探究能力和创造性思维, 可以作为大学生创新性实验开展。

关键词: 溶液结构; 红外吸收光谱; 探针; 分子-离子间相互作用

中图分类号: G64; O6

Structural Analysis of Nitrile Solutions Based on Infrared Spectroscopy Probes

Yang Wang, Yunpeng Fu, Xiaoji Liu, Guotao Zhang, Guobin Li, Wanqiang Liu*, Jinglun Wang*

National Experimental Teaching Demonstration Center for Chemical Engineering and Material, School of Chemistry and Chemical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan Province, China.

Abstract: Solutions serve as a common reaction environment across various fields such as chemistry, materials science, and biology. Understanding the relationship between the structure and properties of solutions is of significant importance; however, undergraduate laboratory courses often lack experiments that focus on solution structure. This study employs nitrile compounds as infrared spectral probes to investigate molecular-ion interactions in solution using Attenuated Total Reflection-Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR). By varying the solute concentration and modulating the solvent's induction effect, steric hindrance, and coordination, we analyze their impact on the solvation structure. This experiment integrates knowledge from instrumental analysis, physical chemistry, and organic chemistry, while also expanding the applicability of infrared spectroscopy. Moreover, the straightforward experimental procedures enhance students' investigative skills and creative thinking, making it a valuable addition to innovative undergraduate laboratory courses.

Key Words: Solution structure; Infrared absorption spectroscopy; Probes; Molecular-ion interactions

溶液是溶质和溶剂以分子或离子形式分散的均相、稳定的分散体系, 是化学、材料和生物等学科领域常见的反应环境。目前, 各高校开设的化学实验教学课程中, 有许多与溶液性质相关的化学实验, 例如化学热力学中的凝固点、电化学中的离子迁移率、表面化学中的表面张力以及物理化学

收稿: 2024-06-27; 录用: 2024-09-30; 网络发表: 2024-11-01

*通讯作者, Emails: wanqiangliu@hnust.edu.cn (刘万强); jlwang@hnust.edu.cn (汪靖伦)

基金资助: 湖南省普通高校青年骨干教师培养项目(H22105); 2024年度湖南省普通本科高校教学改革研究项目(202401000882); 2023年度省级大学生创新创业训练计划项目(S202310534062)

中的过饱和度等, 这些实验让学生充分了解到溶液性质的重要性。但溶液性质是由溶液结构决定的, 对溶液结构的研究有助于深入理解溶液性质和过程原理。通过实验探索溶液结构, 有利于学生从微观层面分析溶液中溶质、溶剂分子的存在形式和溶质与溶剂的相互作用, 有助于培养学生的宏观辨识与微观辨析核心素养。其次, 通过改变溶质的浓度和调控溶剂的诱导效应、空间位阻效应以及配位效应对溶液结构的影响, 能够观察到溶质与溶剂分子-离子间相互作用变化的规律, 这不仅可以激发学生对化学实验的兴趣, 还可以培养学生的逻辑思维能力和探索精神。然而, 在本科生实验中, 基础实验和专业实验却鲜有涉及探索溶液结构的实验。

分析溶液结构就是分析溶质与溶剂之间的相互作用, 虽然通过质谱、X射线散射、核磁共振波谱等技术都能得到相互作用的部分信息, 但也都存在一定的局限性, 例如质谱对凝聚相结构的稳定性要求较高^[1]、X射线散射要求待测物中缔合体稳定性较好^[2]、核磁共振波谱仪较贵且普及率不高等问题^[3]。傅里叶红外光谱仪(Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FTIR)具有操作简单、试样用量少、扫描速度快、谱图特征性强、准确度和分辨率高等特点, 尤其是衰减全反射(Attenuated Total Reflection, ATR)附件的FTIR具有特殊样品测试易操作、无破坏性、对微量成分的分析方便且快捷等优点, 将其用作溶液结构分析的手段引起了广泛的关注^[4]。探针分子红外光谱法是研究分子间相互作用十分有效的一种方法, 将探针分子引入到待测体系中, 通过红外振动监测其特征吸收光谱, 可提供有关其周围分子的信息, 包括溶剂、配体或反应物分子的相互作用, 从而获得溶液结构和反应机理等信息。红外探针分子的种类较多, 常见的红外探针分子主要含有羰基($-C=O$)^[5]、叠氮($-N_3$)^[6]、腈基($-CN$)^[7]等基团。其中 $-CN$ 作为红外探针具有独特魅力, 其伸缩振动频率位于 $2100-2300\text{ cm}^{-1}$ 范围, 与其他红外吸收峰基本不发生重叠, 并且峰的强度比较大。最重要的是, $-CN$ 对环境的变化非常敏感, 当溶液结构发生改变时, $-CN$ 的红外峰变化明显。

基于本实验团队前期利用ATR-FTIR研究氟腈类电解液的溶剂化结构和电池性能表现^[7], 本文设计以双三氟甲烷磺酰亚胺锂(LiTFSI)为溶质和乙腈(CH_3CN , AN)为溶剂的模型溶液体系, 分析不同浓度的LiTFSI (1.0 、 3.0 和 $4.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$)对AN溶液结构变化的影响; 通过分别采用氯乙腈(ClCH_2CN , CAN)、三甲基乙腈($(\text{CH}_3)_3\text{CCN}$, TMAN)和3-甲氧基丙腈($\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{CN}$, MON)为溶剂, 分析诱导效应、空间位阻效应以及配位效应对溶液结构的影响。本实验的开展不仅有利于学生分析溶液结构和理解分子-离子间相互作用, 还有助于培养学生发散性思维和了解仪器的多功能性。

1 实验目的

- (1) 了解溶液结构和溶液中分子-离子间的相互作用;
- (2) 分析不同浓度溶液的结构变化, 以及溶剂的诱导效应、空间位阻效应和配位效应对溶液结构的影响;
- (3) 掌握红外光谱仪的工作原理、使用方法及谱图的解析;
- (4) 利用傅里叶红外光谱仪测试腈类溶液结构, 拓展对仪器多功能性和适用范围的认识;
- (5) 掌握利用Origin进行数据处理和绘图的方法;
- (6) 从多层次、多角度培养大学生汲取知识、发现问题、分析问题以及解决问题的能力, 培养将物理化学、有机化学、分析化学等学科交叉的思维能力。

2 实验原理与方法

2.1 实验原理

红外光谱法是指用一定频率的红外光照射分子, 当分子中某个基团的振动频率与红外辐射的频率一致时, 光的能量可通过分子偶极矩的变化传递给分子, 吸收该频率的红外光并产生振动能级跃迁。不同的化学键或官能团吸收频率不同, 对应不同的红外吸收峰位置, 从而获得分子中化学键或官能团的信息^[8]。分子中化学键的强度以及偶极矩的变化直接影响红外光谱中吸收峰的强度和位置,

临近基团诱导效应、空间位阻效应以及配位效应等内部因素和溶剂效应、特异性相互作用等外部因素均对红外吸收峰的强度和位置产生影响^[4]。

溶液中分子间相互作用是影响溶液结构的重要因素,在利用红外吸收光谱仪对溶液进行测试时,溶液中各分子的种类和浓度不同,其分子相互作用也不同,导致分子振动频率发生变化、红外吸收峰的位置发生相应移动。当分子振动频率降低时,对应的光谱线向低波数方向移动,称为红移;而当分子振动频率升高时,对应的光谱线向高波数方向移动,称为蓝移。

2.2 试剂与材料

实验试剂:本实验使用试剂名称、纯度及购买厂家如表1所示。

表1 实验使用试剂

试剂名称	试剂简称	纯度	购买厂家
乙腈	AN	99%	上海泰坦科技股份有限公司
氯乙腈	CAN	99%	上海泰坦科技股份有限公司
三甲基乙腈	TMAN	99%	上海泰坦科技股份有限公司
3-甲氧基丙腈	MON	99%	上海泰坦科技股份有限公司
双三氟甲烷磺酰亚胺锂	LiTFSI	98%	苏州多多化学科技有限公司
无水乙醇	-	99.7%	上海泰坦科技股份有限公司

实验材料:透明样品瓶(10.0 mL)、移液器(10–100 μL)、黄色吸头(200 μL)、以及医用脱脂棉(甲级)均购自上海泰坦科技股份有限公司。

2.3 仪器和表征方法

本实验使用到ATR-FTIR,其仪器型号为Nixlet 6700,生产厂商为美国Nicolet。

本实验中,分辨率、波数和扫描次数的设置分别为4 cm^{-1} , 400–4000 cm^{-1} 和32次。

2.4 实验步骤

2.4.1 溶液配制

本实验需分别配制1.0、3.0、4.2 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的LiTFSI/AN溶液,以及溶质与溶剂摩尔比均为1:10的LiTFSI/AN溶液、LiTFSI/CAN溶液、LiTFSI/TMAN溶液和LiTFSI/MON溶液。在5 mL腈类溶剂中加入一定质量的LiTFSI,待锂盐完全溶解,即溶液配制完成,各溶液中溶质具体用量如表2所示。

表2 溶液配制具体用量

溶液名称	LiTFSI 质量/g
1.0 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ LiTFSI/AN	1.44
3.0 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ LiTFSI/AN	4.32
4.2 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ LiTFSI/AN	6.05
LiTFSI/AN (1 : 10, by mol)	2.75
LiTFSI/CAN (1 : 10, by mol)	2.27
LiTFSI/TMAN (1 : 10, by mol)	1.3
LiTFSI/MON (1 : 10, by mol)	1.59

2.4.2 红外光谱的测试

(1) 仪器准备:依次将稳压电源、光学台、电脑开机,预热10–30 min。

(2) 设置实验参数:将ATR附件安装好,打开电脑电源,双击打开桌面上的OMNIC软件,跳出一个窗口选择“Smart ITR diamond ATR”点击确定。点击菜单栏中的“实验设置”,在“采集”页面依次设置:扫描次数设置为32次,分辨率设置为4 cm^{-1} ,最终格式选择“%透射率”,文件处理选

择“保存干涉图”，背景处理选择“采集样品前采集背景”，点击“确定”。

(3) 清洗ATR晶体：用无水乙醇润湿的医用脱脂棉对ATR晶体表面进行擦拭。

(4) 试样的测定：待ATR晶体表面的酒精挥发后，点击菜单栏中的“样品采集”开始采集背景，待采集结束跳出一个窗口时，此时用移液器取10 μL AN溶液，滴加到ATR附件的晶体表面，点击窗口中的“是”开始采集样品，待测试结束后，系统自动扣除背景，所测样品的谱图显示在图谱窗口，将实验结果存盘SPA格式。

(5) 将ATR晶体上的溶液用酒精擦拭干净。

(6) 其余的溶液，重复(3)和(4)步骤，进行测量和数据存盘，直至全部溶液测试完成。

(7) 结束工作：测试结束后，将ATR晶体表面测试干净、ATR附件拆下放回原处、关闭电脑和仪器、清理台面。

2.4.3 数据处理

用OMNIC软件打开实验数据，对所测数据进行平滑、基线校正和标峰处理，最后保存为SPA和CSV两种格式；用Origin软件对CSV格式的数据进行分峰处理。

2.5 实验注意事项

(1) 做好预习并书写实验预习报告，实验前检查实验器材完整性和可靠性。

(2) 实验时应穿戴实验服和手套，防止腈类溶剂与皮肤接触。

(3) 实验时取完溶液后应立刻将样品瓶盖盖好，防止腈类溶剂挥发。

2.6 测试结果处理

采集浓度分别为1.0、3.0、4.2 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的LiTFSI/AN溶液、溶质与溶剂摩尔比均为1 : 10的LiTFSI/AN溶液、LiTFSI/CAN溶液、LiTFSI/TMAN溶液，以及LiTFSI/MON溶液的红外光谱，如图1(a)和图1(c)所示。截取 $-\text{CN}$ 的特征吸收波段数据(2200–2340 cm^{-1} 范围)用Origin软件进行分峰绘图，如图1(b)和图1(d)所示，后续各分峰图中各溶剂的 $-\text{CN}$ 基团初始的伸缩振动峰用($-\text{CN}_{\text{free}}$)表示， Li^+ 与溶剂中 $-\text{CN}$ 配位的伸缩振动峰用($-\text{CN}_{\text{bond}}$)表示。最后从溶液浓度，诱导效应、空间位阻效应、配位效应几个方面对溶液中分子-离子间的相互作用进行对比分析。

3 结果与分析

3.1 浓度对LiTFSI/AN溶液结构的影响

如图2(a)所示，纯AN溶剂分子在2200–2340 cm^{-1} 波数范围内有 $\nu_1 = 2252.6 \text{ cm}^{-1}$ 和 $\nu_2 = 2293.7 \text{ cm}^{-1}$ 的两个红外吸收峰，分别对应AN分子($-\text{CN}_{\text{free}}$)的 $-\text{CN}$ 伸缩峰和对称 $\text{C}-\text{H}$ 变形与 $\text{C}-\text{C}$ 伸缩振动作用产生的费米共振峰^[9]。加入LiTFSI后，在 $\nu_3 = 2275.6 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\nu_4 = 2308.8 \text{ cm}^{-1}$ 处新增两个吸收峰，这来源于 Li^+ 与AN配位($-\text{CN}_{\text{bond}}$)相应产生的 $-\text{CN}$ 振动带^[9]，且 ν_3 、 ν_4 的峰随LiTFSI浓度的增加向高波数方向移动。图中 A_f 为 $-\text{CN}_{\text{free}}$ 峰面积、 A_b 为 $-\text{CN}_{\text{bond}}$ 峰面积、 A_s 为 A_f 和 A_b 的峰面积之和，通过分析比较不同浓度LiTFSI/AN溶液红外谱图的 $-\text{CN}$ 伸缩振动：

(1) 1.0、3.0、4.2 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ LiTFSI/AN溶液中 $-\text{CN}_{\text{free}}$ 峰面积百分比分别为63.5%、45.3%、39.6%， $-\text{CN}_{\text{bond}}$ 峰面积百分比分别为36.5%、54.7%、60.4%，随着锂盐浓度增加， $-\text{CN}_{\text{free}}$ 峰面积百分比逐渐减小，而 $-\text{CN}_{\text{bond}}$ 峰面积百分比逐渐增加，表明锂盐浓度增加使得溶液中 Li^+ 与 $-\text{CN}$ 配位的比例增加，如图2(a)所示；

(2) 当LiTFSI/AN溶液为稀溶液时的游离 $-\text{CN}$ 数较多，该浓度下 Li^+ 的稳定溶剂化结构为与3或4个AN分子配位^[10]，溶液结构示意图如图2(b)所示；

(3) 当LiTFSI/AN溶液为高浓度时(4.2 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ LiTFSI/AN，AN : LiTFSI的摩尔比为2 : 1)，溶剂化结构中几乎不存在游离 $-\text{CN}$ ，溶剂化结构中阴离子数目大幅度增加^[10]，一个 Li^+ 平均与两个AN分子和一个TFSI⁻配位形成接触离子对(Contact Ion Pair)，甚至会形成一个TFSI⁻与两个 Li^+ 和四个乙腈分子结合的聚集体形态(Aggregate)^[11]，此浓度下溶液结构如图2(c)所示。

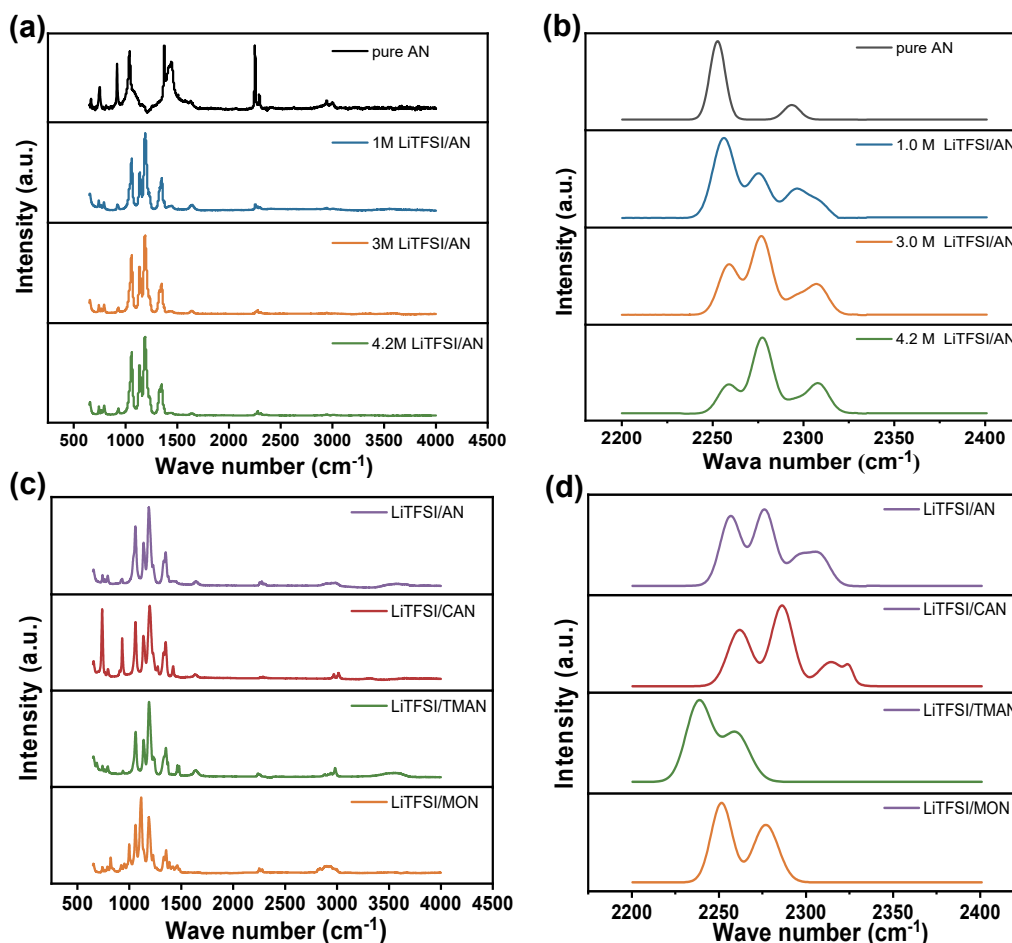


图1 不同锂盐浓度的LiTFSI/AN溶液的红外全谱图(a)和-CN的红外光谱图(b); 不同取代腈类溶剂的LiTFSI溶液的红外全谱图(c)和-CN的红外光谱图(d)

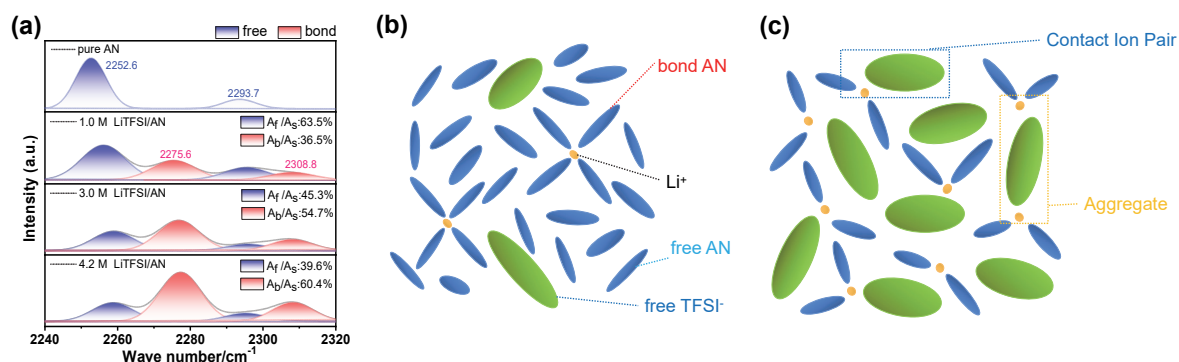


图2 (a) 不同锂盐浓度的LiTFSI/AN溶液在-CN伸缩振动区域的红外光谱拟合曲线比较; 稀溶液(b)和高浓度溶液(c)的溶剂化结构示意图

3.2 LiTFSI/CAN的溶液结构分析——诱导效应

如图3所示, 纯CAN溶剂分子在2200–2340 cm^{-1} 波数范围内有 $\nu_5 = 2259.4 \text{ cm}^{-1}$ 和 $\nu_6 = 2316.6 \text{ cm}^{-1}$ 的两个红外吸收峰, 分别对应CAN分子($-\text{CN}_{\text{free}}$)的 $-\text{CN}$ 伸缩峰和对称的 $\text{C}-\text{H}$ 变形与 $\text{C}-\text{C}$ 伸缩振动作用产生的费米共振峰。CAN是AN分子中甲基的一个氢原子被氯原子取代, 由于氯原子的电负性比

氢原子高, 故CAN中 $-CN$ 电子云密度降低, 分子振动频率减小, 纯CAN的 $-CN_{\text{free}}$ 吸收峰蓝移。加入LiTFSI后, 在 $\nu_7 = 2286.3 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\nu_8 = 2324.8 \text{ cm}^{-1}$ 处新增两个吸收峰, 这来源于 Li^+ 与CAN配位($-CN_{\text{bond}}$)产生的 $-CN$ 振动带。通过比较LiTFSI/AN溶液与LiTFSI/CAN溶液红外谱图的 $-CN$ 伸缩振动, LiTFSI/AN溶液和LiTFSI/CAN溶液中 $-CN_{\text{free}}$ 峰面积百分比分别为47.8%、51.1%, $-CN_{\text{bond}}$ 峰面积百分比分别为52.2%、48.9%; LiTFSI/CAN溶液中不但 $-CN_{\text{bond}}$ 发生蓝移, 而且 $-CN_{\text{bond}}$ 峰面积百分比相对减小。这是由于氯原子电负性较高产生的吸电子诱导效应, 使CAN分子的 $-CN$ 电子云密度降低, 从而导致 $-CN$ 与 Li^+ 配位数减少。

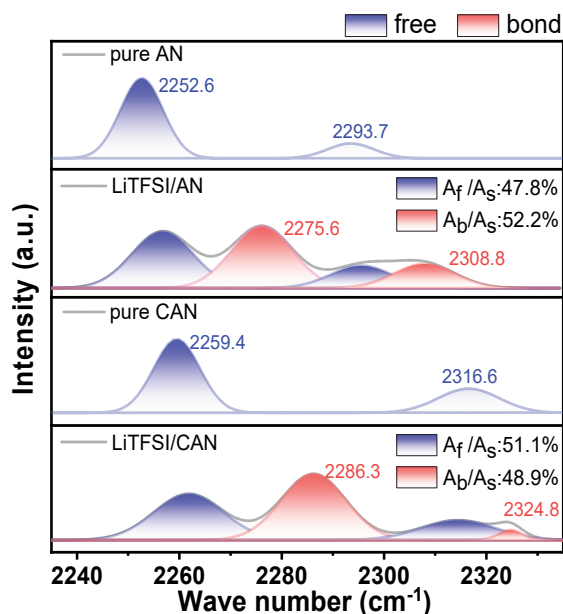


图3 诱导效应对 $-CN$ 伸缩振动区域产生影响的红外光谱拟合曲线

3.3 LiTFSI/TMAN的溶液结构分析——空间位阻效应

如图4所示, 纯TMAN溶剂分子在 $2200\text{--}2340 \text{ cm}^{-1}$ 波数范围内仅有 $\nu_9 = 2235.1 \text{ cm}^{-1}$ 的吸收峰, 对应CAN分子($-CN_{\text{free}}$)的 $-CN$ 伸缩峰; TMAN是AN中甲基被叔丁基所取代, $-CN$ 邻位的 $C-H$ 键被甲基取代, 故相应的费米共振峰消失。叔丁基是给电子基团, 故TMAN链上的 $-CN$ 电子云密度增加, 分子振动频率增大, 纯TMAN的 $-CN_{\text{free}}$ 吸收峰红移; 加入LiTFSI后, 在 $\nu_{10} = 2260.63 \text{ cm}^{-1}$ 处新增一个吸收峰, 这来源于 Li^+ 与TMAN配位($-CN_{\text{bond}}$)产生的 $-CN$ 振动带。通过比较LiTFSI/AN溶液与LiTFSI/TMAN溶液红外谱图的 $-CN$ 伸缩振动, LiTFSI/AN溶液和LiTFSI/TMAN溶液中 $-CN_{\text{free}}$ 峰面积百分比分别为47.8%、59.9%, $-CN_{\text{bond}}$ 峰面积百分比分别为52.2%、40.1%。LiTFSI/TMAN溶液中 $-CN_{\text{bond}}$ 峰面积百分比相对减小, 这是由于叔丁基产生的空间位阻效应, 使TMAN分子链上的 $-CN$ 与 Li^+ 配位减少。

3.4 LiTFSI/MON的溶液结构分析——配位效应

如图5所示, 纯MON溶剂分子在 $2200\text{--}2340 \text{ cm}^{-1}$ 波数范围内有 $\nu_{11} = 2250.9 \text{ cm}^{-1}$ 的吸收峰, 对应MON分子($-CN_{\text{free}}$)的 $-CN$ 伸缩峰。加入LiTFSI后, 在 $\nu_{12} = 2276.7 \text{ cm}^{-1}$ 处新增一个吸收峰, 这来源于 Li^+ 与MON配位($-CN_{\text{bond}}$)产生的 $-CN$ 振动带。

通过比较LiTFSI/AN溶液与LiTFSI/MON溶液红外谱图的 $-CN$ 伸缩振动, LiTFSI/AN溶液和LiTFSI/MON溶液中 $-CN_{\text{free}}$ 峰面积百分比分别为47.8%、53.3%, $-CN_{\text{bond}}$ 峰面积百分比分别为52.2%、46.7%。LiTFSI/MON溶液中 $-CN_{\text{bond}}$ 峰面积百分比相对较小, 这是由于MON分子中甲氧基($\text{CH}_3\text{O}-$)的氧原子的孤对电子也可以与 Li^+ 进行配位, 从而使 $-CN$ 与 Li^+ 配位减少。

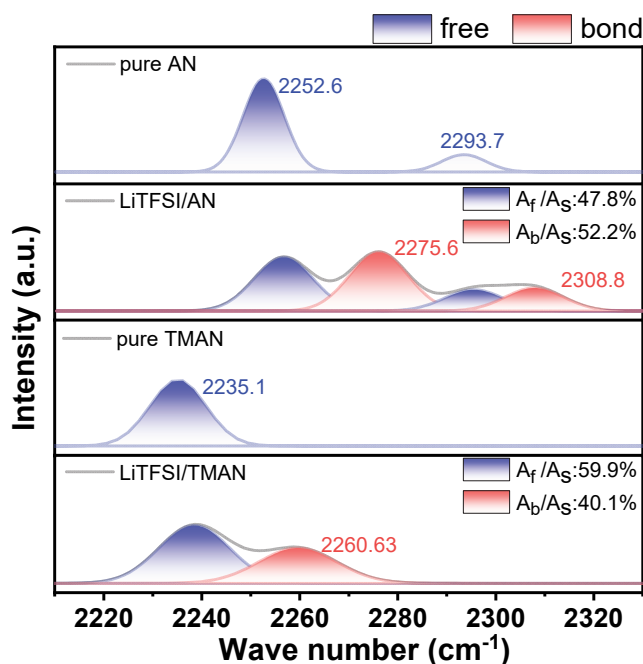


图4 空间位阻效应对—CN伸缩振动区域产生影响的红外光谱拟合曲线

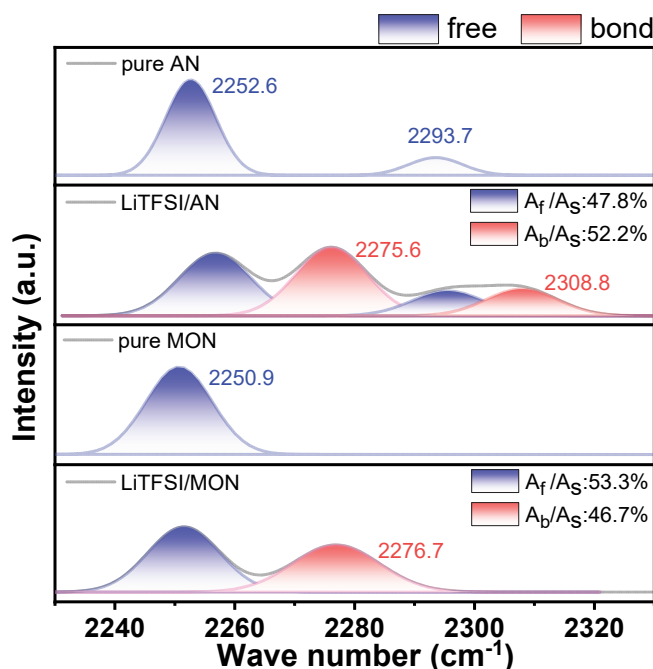


图5 配位位阻效应对—CN伸缩振动区域产生影响的红外光谱拟合曲线

4 实验教学的组织开展与实施

本实验面向化学专业高年级本科生开设，每班10组学生，课堂教学时长2.5 h，每组准备11个待测样品，并测试所有待测样品的傅里叶红外光谱图。具体安排如表3所示。

为了培养学生的科学思维，加深其对理论知识的理解，进一步提出实验内容可能涉及的其他化学和材料知识，并进行思考：(1) 在本实验中，使用到的溶质LiTFSI相比其他锂盐有什么优势？(2) 是否还有其他基团分子可以作为分子探针？(3) 溶液结构不一样会对溶液哪些性质有影响。

表3 教学组织与实施安排

教学环节	时间安排	具体内容
课前预习	课前1周	要求学生阅读傅里叶红外光谱的相关文献资料, 理解傅里叶红外光谱仪的工作原理, 了解红外光谱制样方法以及傅里叶红外光谱仪常用附件, 熟悉常见官能团的特征吸收频率、影响红外吸收光谱的因素, 并完成实验预习报告
课堂教学 (3 h)	1 h	教师详细介绍傅里叶红外光谱仪及附件的工作原理, 根据LiTFSI和腈类化合物的结构特点, 分析采用LiTFSI和腈类化合物作为测试材料的原因, 帮助学生解决在课前预习中所遇到的问题; 讲解具体实验过程和实验注意事项
	2 h	学生根据预习和教师讲解, 完成所需集中待测溶液的配制; 待配制好的溶液完全溶解后, 对其进行红外测试, 并将各个测试结果分别保存为SPA和CSV格式; 测试完成后, 按照要求关闭实验仪器和电源, 整理实验桌面, 保持实验室干净整洁
课后复习	课后1周内	学生对测试结果进行数据处理, 并进行相关的分析和总结, 完成实验报告和思考题

5 结语

液态物质较气态物质和固态物质而言, 其分子间相互作用是最为复杂的。通过本实验, 学生对红外光谱图将有更加深入的理解, 对溶质与溶剂的相互作用也将有进一步的认识。另外, 通过本实验对腈类溶液进行红外吸收光谱测定和分析的操作, 可将物理化学中的溶液结构、有机化学中的诱导效应、空间位阻效应以及诱导效应, 以及分析化学中的红外光谱分析相关理论知识紧密结合。学生通过红外光谱对分子-离子间相互作用进行分析, 探索溶液结构的变化, 可以培养学生的宏观辨识与微观辨析核心素养。并且在提高学生的操作能力的同时, 锻炼学生将理论知识应用于实际分析, 有利于更好地培养学生的探究能力和创造性思维。

参 考 文 献

- [1] Schultz, M.; Parker, S. L.; Fernando, M. T.; Wellalage, M. M.; Thomas, D. A. *J. Am. Soc. Mass Spectrom.* **2023**, *34* (4), 745.
- [2] 王美玲, 李非, 王旭阳, 朱含钰, 乔梦丹, 袁俊生. 光谱学与光谱分析, **2023**, *43* (6), 1838.
- [3] Yu, Z.; Wang, H.; Kong, X.; Huang, W.; Tsao, Y.; Mackanic, D. G.; Wang, K.; Wang, X.; Huang, W.; Choudhury, S.; *et al.* *Nat. Energy.* **2020**, *5* (7), 526.
- [4] 徐静. 基于超额红外光谱的溶液结构和探针研究[博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2019.
- [5] Chapman, N.; Borodin, O.; Yoon, T.; Nguyen, C. C.; Lucht, B. L. *J. Phys. Chem. C* **2017**, *121* (4), 2135.
- [6] Zhang, X. Q.; Ji, A. Y.; Wang, Z. M.; Lou, H. Y.; Li, J. F.; Zheng, L. L.; Zhou, Y. J.; Qu, C. R.; Liu, X. D.; Chen, H.; *et al.* *J. Med. Chem.* **2021**, *64*, 11543.
- [7] Dereka, B.; Lewis, N. H.; Keim, J. H.; Snyder, S. A.; Tokmakoff, A. *J. Phys. Chem. B.* **2022**, *126* (1), 278.
- [8] Zhou, X.; Peng, D.; Deng, K. Q.; Chen, H. Z.; Zhou, H.; Wang, J. L. *J. Power Sources* **2023**, *557* (15), 232557.
- [9] 白玲, 石国荣, 王宇昕. 仪器分析实验. 北京: 化学工业出版社, 2017: 51.
- [10] Kwon, Y.; Lee, C.; Park, S. *Chem. Phys.* **2014**, *445* (5), 38.
- [11] Yamada, Y.; Furukawa, K.; Sodeyama, K.; Kikuchi, K.; Yaegashi, M.; Tateyama, Y.; Yamada, A. *J. Am. Chem. Soc.* **2014**, *136* (13), 5039.