

## 氨基酸的衍生及手性气相色谱分离创新实验

李润杰<sup>2</sup>, 刘航<sup>2</sup>, 王细胜<sup>2</sup>, 张万群<sup>1</sup>, 胡万群<sup>1</sup>, 杨凯平<sup>1</sup>, 周强<sup>1</sup>, 刘斯<sup>1</sup>, 朱平平<sup>2</sup>, 邵伟<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> 化学国家级实验教学示范中心(中国科学技术大学), 合肥 230026

<sup>2</sup> 中国科学技术大学化学与材料科学学院, 合肥 230026

**摘要:** 氨基酸是蛋白质的重要组成单元。氨基酸的手性分子对映体往往有着类似的物理性质, 但却具有完全不同的药理作用, 因此, 氨基酸的手性分离对于医药及生命科学有着极其重要的意义。手性气相色谱是氨基酸手性分离的重要手段。本实验使用氯甲酸乙酯(ECF)作为衍生化试剂, 将氨基酸衍生化方法及手性分离引入到研究生“综合仪器分析实验”教学之中, 可以让学生了解气相色谱从样品前处理、定性分析、定量检测到实验数据处理整个分析过程, 在掌握基本操作的基础上进行探究, 提升研究生的科研操作技能。

**关键词:** 氨基酸; 手性气相色谱; 氯甲酸乙酯; 衍生化

中图分类号: G64; O6

## Innovative Experiments on Amino Acid Derivatization and Chiral Gas Chromatographic Separation

Runjie Li<sup>2</sup>, Hang Liu<sup>2</sup>, Xisheng Wang<sup>2</sup>, Wanqun Zhang<sup>1</sup>, Wanqun Hu<sup>1</sup>, Kaiping Yang<sup>1</sup>, Qiang Zhou<sup>1</sup>, Si Liu<sup>1</sup>, Pingping Zhu<sup>2</sup>, Wei Shao<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (University of Science and Technology of China), Hefei 230026, China.

<sup>2</sup> School of Chemistry and Materials Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China.

**Abstract:** Amino acids serve as fundamental constituents of proteins, whose chiral enantiomers exhibit distinct pharmacological activities despite sharing analogous physical properties. This biological significance necessitates precise chiral separation methodologies in pharmaceutical and life science research. The present experiment employs ethyl chloroformate (ECF) as a derivatization reagent to develop an instructional module for graduate-level analytical chemistry education. Our pedagogical design incorporates amino acid derivatization techniques coupled with chiral gas chromatographic separation into the Comprehensive Instrumental Analysis Laboratory curriculum. Through systematic training encompassing sample pretreatment, qualitative identification, quantitative determination, and data interpretation, this experimental protocol enables students to master the complete gas chromatographic analytical workflow. The exercise emphasizes operational standardization while encouraging exploratory analyses, thereby enhancing graduate students' experimental proficiency in advanced analytical methodologies.

**Key Words:** Amino acids; Chiral gas chromatography; Ethyl chloroformate; Derivatization

收稿: 2024-07-11; 录用: 2024-12-09; 网络发表: 2025-03-26

\*通讯作者, Email: weishao@ustc.edu.cn

基金资助: 教育部首批虚拟教研室(大学化学实验课程群虚拟教研室)建设项目; 2024年中国科学技术大学研究生教研项目(2024ycjg02); 2022年度安徽省质量工程项目(2022jyxggvj023, 2022jyxm1822, 2022jyxm1827)

手性即不对称性，如同左右手的关系，互为镜像但无法叠合在一起。作为自然界的本质特征，小到手性分子、DNA螺旋结构，大到植物藤蔓的攀爬特点、大气气旋的方向乃至整个宇宙空间，手性现象在自然界中无处不在，体现了大自然的复杂性和特殊性。与手性有关的研究在生命、医药、食品、农业、材料、化学等领域都非常广泛，因此发展简单、快速、有效的手性识别及手性拆分技术具有极其重要的意义。本实验将氨基酸衍生化方法及手性分离引入到实验教学之中。可以让学生全面了解气相色谱从样品前处理、定性分析、定量检测到实验数据处理整个分析过程，培养学生解决复杂问题的能力，提升其科研操作技能。

## 1 实验背景

氨基酸是具有氨基(—NH<sub>2</sub>)和羧基(—COOH)结构的有机化合物的统称。自然界的氨基酸种类繁多，其中，组成人体蛋白的常见氨基酸有20种(表1)。除甘氨酸外，所有氨基酸都含有不对称的 $\alpha$ 碳原子，因此氨基酸可以作为镜像(对映体)存在，称为D型或L型。除少数外，与生物学有关的氨基酸大多以L型存在，少量的D型氨基酸主要存在于生理体液中，但通常不具有特定的功能。色谱法是氨基酸手性分离的重要手段，在进行气相色谱分离时，氨基酸需要进行衍生化。

表1 人体中的20种氨基酸及对应分子式

氨基酸	分子量 (Da)	结构式(pH7.0)	氨基酸	分子量 (Da)	结构式(pH7.0)
甘氨酸(GLY, G)	75.07	NH <sub>2</sub> —CH <sub>2</sub> —COOH	亮氨酸(LEU, L)	131.17	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> —CH—CH <sub>2</sub> —CH(NH <sub>2</sub> )—COOH
丙氨酸(ALA, A)	89.09	CH <sub>3</sub> —CH(NH <sub>2</sub> )—COOH	异亮氨酸(ILE, I)	131.17	CH <sub>3</sub> —CH <sub>2</sub> —CH(CH <sub>3</sub> )—CH(NH <sub>2</sub> )—COOH
丝氨酸(SER, S)	105.09	HO—CH <sub>2</sub> —CH(NH <sub>2</sub> )—COOH	谷氨酸(GLU, E)	147.13	HOOC—(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> —CH(NH <sub>2</sub> )—COOH
脯氨酸(PRO, P)	115.13	NH—(CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> —CH—COOH	谷氨酰胺(GLN, Q)	146.15	H <sub>2</sub> N—CO—(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> —CH(NH <sub>2</sub> )—COOH
缬氨酸(VAL, V)	117.17	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> —CH—CH(NH <sub>2</sub> )—COOH	赖氨酸(LYS, K)	146.19	H <sub>2</sub> N—(CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> —CH(NH <sub>2</sub> )—COOH
苏氨酸(THR, T)	119.12	CH <sub>3</sub> —CH(OH)—CH(NH <sub>2</sub> )—COOH	甲硫氨酸(MET, M)	149.21	CH <sub>3</sub> —S—(CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> —CH(NH <sub>2</sub> )—COOH
半胱氨酸(CYS, C)	121.16	HS—CH <sub>2</sub> —CH(NH <sub>2</sub> )—COOH	酪氨酸(TYR, Y)	181.19	HO—p—Ph—CH <sub>2</sub> —CH(NH <sub>2</sub> )—COOH
天冬酰胺(ASN, N)	132.12	H <sub>2</sub> N—CO—CH <sub>2</sub> —CH(NH <sub>2</sub> )—COOH	天冬氨酸(ASP, D)	133.10	HOOC—CH <sub>2</sub> —CH(NH <sub>2</sub> )—COOH
组氨酸(HIS, H)	155.16	NH—CH=N—CH=C—CH <sub>2</sub> —CH(NH <sub>2</sub> )—COOH	精氨酸(ARG, R)	174.20	HN=C(NH <sub>2</sub> )—NH—(CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> —CH(NH <sub>2</sub> )—COOH
苯丙氨酸(PHE, F)	165.19	Ph—CH <sub>2</sub> —CH(NH <sub>2</sub> )—COOH	色氨酸(TRP, W)	201.22	Ph—NH—CH=C—CH <sub>2</sub> —CH(NH <sub>2</sub> )—COOH

衍生气相色谱法是指将待测样品在适当条件下与所选试剂作用，使其转化为符合色谱分析要求的既定物质后，再进行色谱分析的方法。气相色谱试样的衍生化，不仅可以增加试样的挥发性和稳定性，扩大气相色谱的应用范围；还可以起到改善分离效果、提高检测灵敏度和定量可靠性的作用。衍生法种类很多，色谱试样处理常用的衍生法主要有硅烷化法、酯化法、酰化法、卤化法等等。

硅烷化法是使用较多的一种氨基酸衍生化方法。常见的硅烷化试剂主要有N-甲基-N-三甲硅基三氟乙酰胺(MSTFA)、N-O-双(三甲硅基)三氟乙酰胺(BSTFA)等。此类衍生化产物具有易于制备、衍生化后可直接进行气相色谱分析的特点。但是硅烷化衍生试剂易于水解，所以要求被处理样品必须完全干燥无水，而且衍生化反应必须在加热条件下长时间进行<sup>[1]</sup>。引入实验教学难度较大，因此本实

验采用氯甲酸乙酯(ECF)作为衍生化试剂, 衍生化过程可在10分钟内完成, 且产物稳定, 具有良好的定量效果。

## 2 教学目标与实验设计

本实验主要面向高年级本科生及研究生, 实验安排学时为4-5学时, 涉及知识点包括氨基酸衍生、手性分离、质谱分析、定量检测等。实验教学目标为:

- 1) 了解气相色谱及气质联用仪的工作原理及仪器结构;
- 2) 掌握气相色谱及气质联用仪的工作站操作及定性定量方法;
- 3) 学习氨基酸的衍生化方法;
- 4) 对手性异构及手性物质的分离有所了解。

实验基本环节及涉及的相关知识点如表2所示。

表2 实验环节及涉及知识点

实验环节	相关知识	能力培养
文献查阅	文献检索及实验方法筛选	发现问题、文献查阅
制订实验方案	样品前处理基本原则、分离理论	综合思维能力、团队合作
样品及试剂的准备	样品及试剂理化性质	规范操作、动手能力
氨基酸衍生化	有机酰氯反应知识	解决问题的能力、规范操作、安全意识
氨基酸分离定量	色谱分离理论	仪器操作、数据处理
实验记录与实验报告撰写	数据整理与总结	科技报告写作

## 3 实验原理

### 3.1 分子的手性与旋光性

手性是由分子的三维取向所引起的。当分子结构中四面体碳原子上连接的4个原子或基团互不相同, 该原子就称为手性中心或不对称中心, 手性一般是由碳原子的 $s$ 即杂化中心的存在而引起的。分子的三维结构称为构型。19世纪末, 为了表示手性化合物的构型, Fischer将尽可能多的手性化合物与一个标准化合物的构型相关联, 用这个方法推导这些化合物的构型。在绘制氨基酸的Fischer投影式(Fischer projection)时, 令顶部为羧基, 底部为侧链, 如果胺基位于碳链的右侧, 则化合物为D型如果胺基位于左侧, 则分子为L型(图1)。

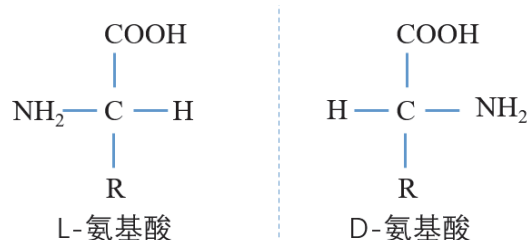


图1 氨基酸的Fischer投影式<sup>[2]</sup>

左旋体与右旋体: 能使偏振光的偏振面按顺时针方向旋转的对映体称为右旋体(dextrorotatory), 在分子前用 $d$ -或(+)-表示。反之则称为左旋体(levorotatory), 用 $l$ -或(-)-表示。外消旋体(racemate)则是由等量的左旋体和右旋体构成, 因此没有旋光性, 在分子前用 $(dl)$ -或 $(\pm)$ -表示。这种表示方法直观地反映了对映体之间光学活性的差别, 但是不能提供分子三维空间排列或绝对构型的信息。

### 3.2 手性物质的分离

利用色谱分离手性物质的方法有很多种，可以利用手性衍生化试剂，将对映体混合物衍生化成一一对映异构体，利用其理化性质的差异使用普通色谱柱进行分离；也可以选择手性固定相进行分离。1977年，Frank等研发了一款以二甲基硅氧烷、L-缬氨酸-叔丁基胺等共聚物做为固定相的手性柱<sup>[3]</sup>，商品名为Chirasil-Val，可在30–230 °C使用。这款色谱柱特别适合拆分氨基酸的衍生物，也可以拆分一些羟基酸、氨基醇、氨、醇的衍生物以及其他手性化合物。本实验将使用CP-Chirasil Val色谱柱对氨基酸进行手性拆分。

对映体在手性柱中的拆分机理可能相当复杂，一般根据Dalglish<sup>[4]</sup>提出的“三点相互作用”(three-point interaction)理论，从微观的角度解释手性选择剂对手性对映体的识别过程(图2)。两个对映体只能从一侧接近固定的手性表面。在这种情况下，某一种对映体的结构允许最多3个点同时与表面相互作用，但另一种对映体在给定时间内只能有1或2个相互作用点。因此，作用力弱的会先被洗脱。这里的相互作用可以是络合作用、 $\pi$ - $\pi$ 堆积作用、氢键、偶极堆积以及空间效应等<sup>[5]</sup>。

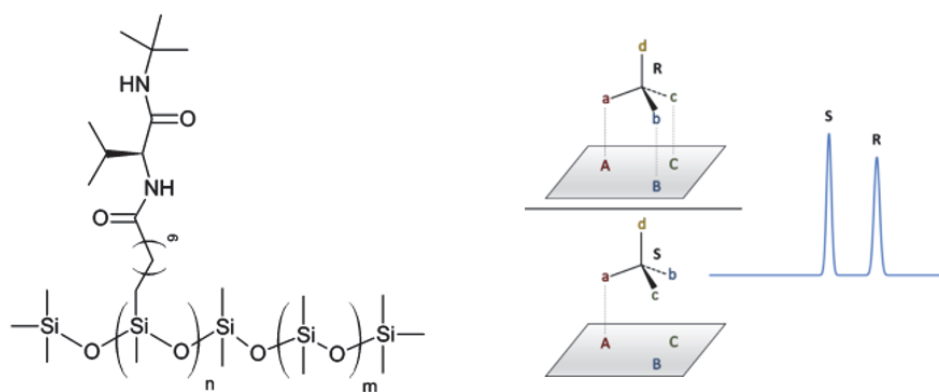


图2 左: Chirasil-Val固定相<sup>[6]</sup>; 右: 三点相互作用<sup>[7]</sup>

### 3.3 衍生气相色谱法

由于氨基酸分子极性较强，不适合直接应用于气相色谱分析。本实验选用氯甲酸乙酯(Ethyl chloroformate, ECF)作为衍生化试剂，衍生化的基本原理如图3所示。

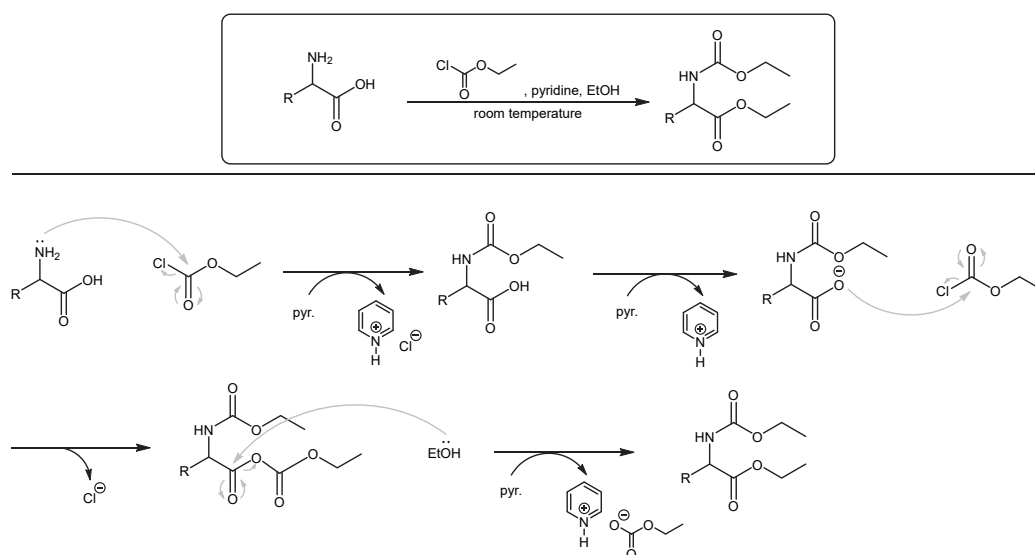


图3 氨基酸衍生化反应流程

本实验采用混合酸酐氯甲酸酯法进行羧酸的缩合反应, 氯甲酸酯(常用氯甲酸乙酯或异丁酯, 本实验采用氯甲酸乙酯), 形成混合酸酐, 更易接受亲核试剂(本实验采用乙醇)的进攻, 生成目标产物。其中, 吡啶被用作催化剂和缚酸剂, 既能提高反应速度, 又能通过吸附产生的质子来促进反应向正方向进行。

氯甲酸乙酯作为酯化试剂和酰化试剂, 具有较高的选择性和广泛的适用范围, 对于大位阻或者连有吸电子基团的底物也能很好地进行反应。此外, 该类反应的反应条件温和, 副产物少, 产率可观。

本实验利用氯甲酸乙酯对氨基酸进行衍生化处理, 并通过气相色谱-氢火焰离子化检测器(Gas chromatography-flame ionization detector, GC-FID)、气质联用仪(GC-MS)进行检测, 可以实现对L型和D型氨基酸含量的精确测定。

## 4 实验部分

### 4.1 仪器与试剂

所用气相色谱仪及色谱柱型号见表3。

表3 实验所用仪器及色谱柱

仪器名称	是否有自动进样器	型号	色谱柱
气相色谱仪1	无	Agilent 7890B GC, 美国安捷伦科技公司	TR-WAX 30 m × 0.32 mm × 0.25 μm 色谱柱
气相色谱仪2	无	Agilent 7890B GC, 美国安捷伦科技公司	CP-Chirasil Val 30 m × 0.32 mm × 0.25 μm 手性柱
气质联用仪	有	Thermo Fisher ISQ GCMS, 美国热电公司	CP-Chirasil Val 30 m × 0.32 mm × 0.25 μm 手性柱

其他仪器: 电子分析天平、离心机、超声清洗机、100–1000 μL 移液枪、20–200 μL 移液枪。

所用试剂: L和D-氨基酸标样、吡啶和乙醇配制成3:1的混合液; 氯甲酸乙酯, 三氯甲烷; 蒸馏水; 未知样: 复方氨基酸口服溶液;

耗材: 微量注射器、有机滤头、离心管、移液枪枪头、微量进样瓶等。

### 4.2 样品前处理

#### 4.2.1 氨基酸储备溶液的制备

称取一定质量的氨基酸对照品, 加入1.000 mL 0.1 mol·L<sup>-1</sup>稀盐酸溶液, 充分振荡至完全溶解, 制备得到摩尔浓度为0.100 mol·L<sup>-1</sup>的氨基酸标准储备溶液。

#### 4.2.2 氨基酸衍生化及标准溶液配制

取氨基酸储备溶液500 μL于4 mL离心管中, 加入乙醇: 吡啶 = 3:1的混合液250 μL, 充分摇匀, 加入氯甲酸乙酯50 μL, 盖紧瓶盖, 快速振荡30 s, 随后向离心管中加500 μL氯仿, 再次盖紧瓶盖多次振荡, 将衍生化的氨基酸萃取到有机相(氯仿)中, 离心, 分离有机相用于测试。

将萃取所得的有机相溶液逐级稀释, 配制成0.100 mol·L<sup>-1</sup>、0.0500 mol·L<sup>-1</sup>、0.0200 mol·L<sup>-1</sup>、0.00500 mol·L<sup>-1</sup>、0.00200 mol·L<sup>-1</sup>的标准溶液, 用于绘制标准曲线。

取某市售氨基酸口服液100 μL于4 mL离心管中, 加入900 μL蒸馏水进行稀释, 此后按照相同方法进行衍生化操作。

### 4.3 探究氨基酸的手性分离条件

使用手性柱: 设置进样口温度: 200 °C, 分流比10:1, 载气流速流速: 1.5 mL·min<sup>-1</sup>; 柱温箱升

温程序：初始温度为50 °C，第一梯度10 °C·min<sup>-1</sup>升温至135 °C，第二梯度2 °C·min<sup>-1</sup>升温至165 °C，第三梯度10 °C·min<sup>-1</sup>升温至180 °C，在此温度下保持2 min，检测器温度：250 °C。进样1.0 μL，记录左旋与右旋氨基酸衍生物保留时间。判断复方氨基酸注射液中是否有右旋氨基酸的存在。

使用TR-Wax柱，设定相同仪器参数，比较色谱图与手性柱分离谱图有何不同。

#### 4.4 氨基酸的定性与定量

设定气质联用仪参数，测试氨基酸衍生化样品，分析质谱图，观察衍生化是否成功。

选择一台仪器，按照4.3节所设参数运行标准样和氨基酸口服液衍生样品，分别记录对应氨基酸衍生物的峰面积，绘制标准曲线。根据标准曲线计算未知样目标氨基酸成分浓度。

## 5 结果与讨论

### 5.1 氨基酸手性分离效果评价

依照以上衍生化方法，分别对两种不同手性的氨基酸进行衍生化，分别进样，使用CP-Chirasil Val 30 m × 0.32 mm × 0.25 μm手性柱分离，能达到很好的分离效果，D-型氨基酸在L-型氨基酸之前流出。以缬氨酸为例，D型与L型缬氨酸的衍生物的保留时间分别为10.156 min与10.332 min (图4左)。要注意不同氨基酸衍生物的保留时间也各自不同，例如D型与L型苯丙氨酸的保留时间分别为17.654 min和18.121 min (图4右)，为了控制等待的时间，本实验主要对缬氨酸进行检测。

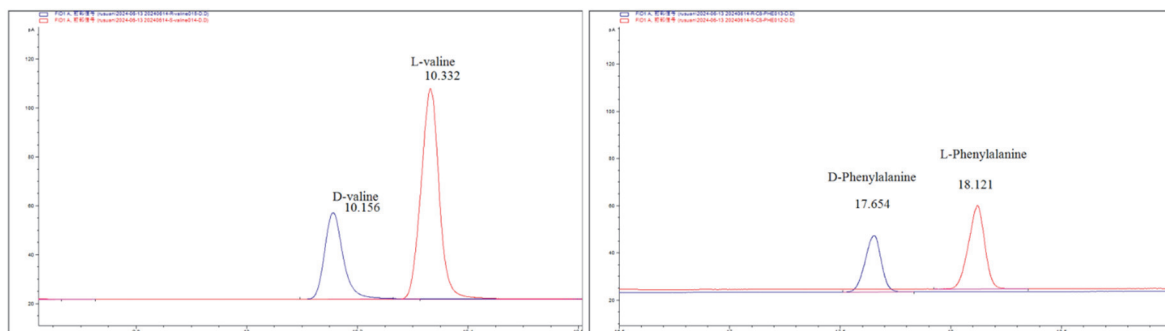


图4 左：缬氨酸衍生化产物色谱图；右：苯丙氨酸衍生化产物色谱图(CP-Chirasil Val色谱柱)

使用TR-wax色谱柱，设定同样的仪器参数，可以看到，在Wax柱上，缬氨酸的保留时间较短(4.694 min)，同时两种手性的氨基酸衍生物无法得分离(图5)。然而，在已经确定未知样为某一构型的氨基酸的前提下，使用气相色谱进行定量是可以的。

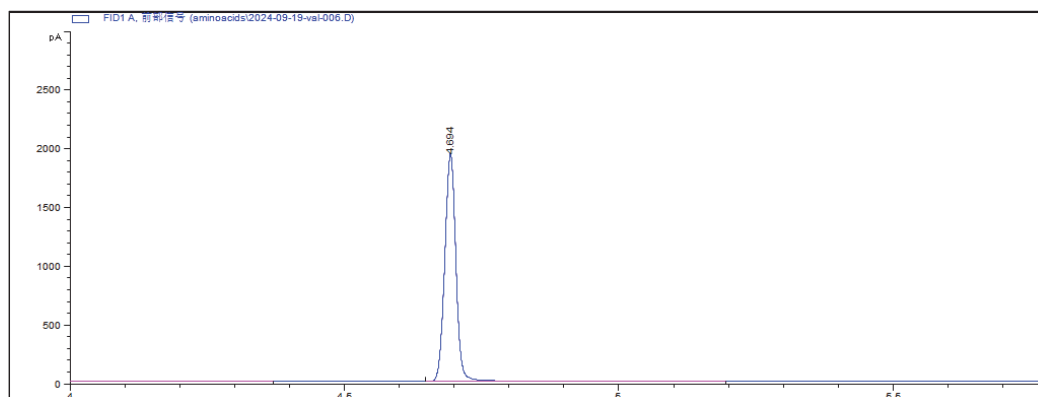


图5 缬氨酸衍生化产物色谱图(TR-wax色谱柱)

## 5.2 氨基酸衍生化效果评价

以缬氨酸为例，为了检验氨基酸衍生化是否成功，使用气质联用仪对衍生化产物进行分析，得到10.090 min处的物质质谱图如图6，经检索确定为缬氨酸衍生化产物的峰，说明衍生化是成功的。

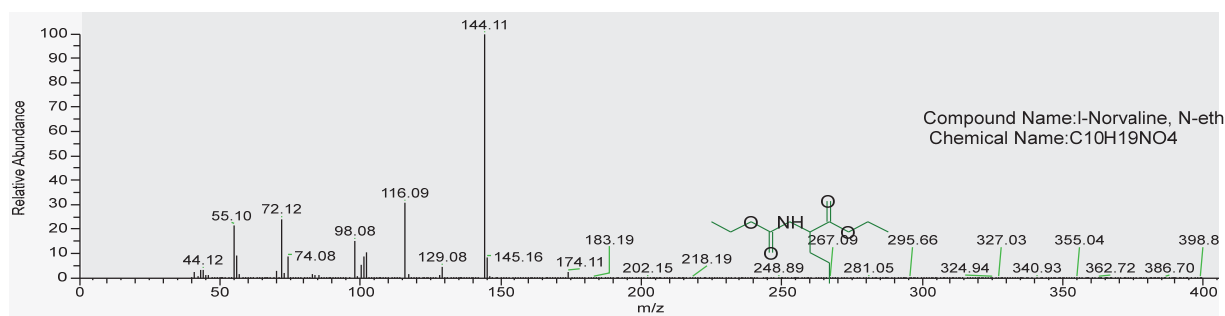


图6 缬氨酸衍生化产物质谱图(乙醇体系)

将实验体系中的乙醇替换为甲醇后，发现对应峰的保留时间略有提前，同时羧基上的氢取代基由乙基变为了甲基(如图7)，说明体系中的乙醇参与了反应。

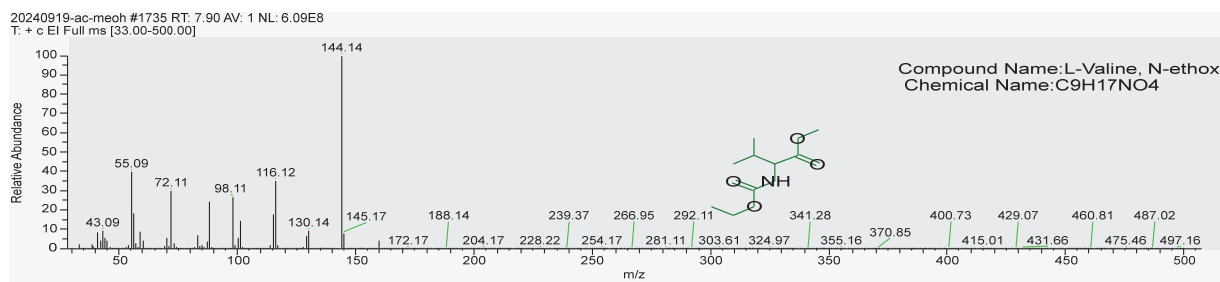


图7 缬氨酸衍生化产物质谱图(甲醇体系)

## 5.3 氨基酸定量结果评价

对市售氨基酸口服液衍生化产物进行测试，并与缬氨酸衍生化产物进行保留时间比对(图8)，发现市售氨基酸口服溶液所含缬氨酸为L-缬氨酸。

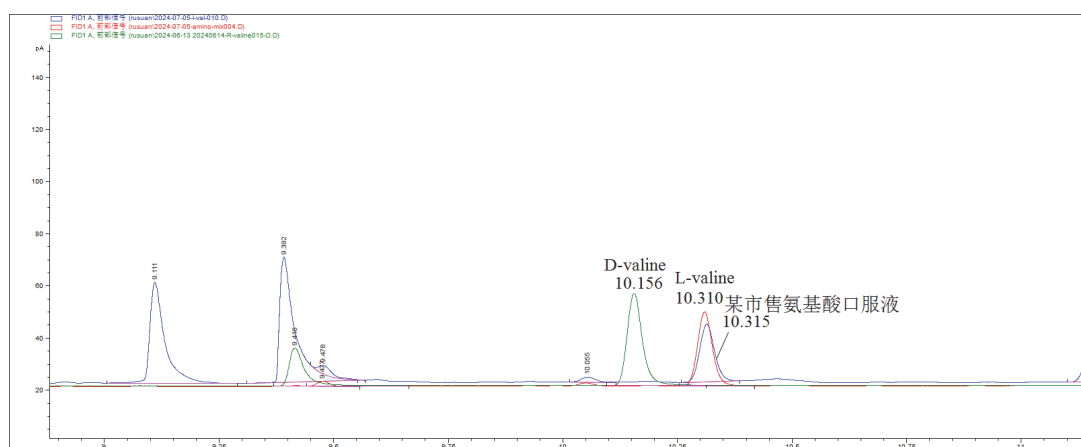


图8 市售氨基酸口服溶液与标准品进行对照

对缬氨酸衍生产物进行逐级稀释配制成 $0.100 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.0500 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.0200 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.00500 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.00200 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的溶液，使用自动进样器进样，记录峰面积(表4)并绘制标准曲线(图9)，相关系数为0.9995，可见线性良好；本实验反应较快，在快速震荡超过30 s后，由于反应已经比较完全，因此衍生化时间长短对产率并无明显影响。根据标准曲线与未知样的峰面积计算氨基酸口服溶液中L-缬氨酸的浓度为 $0.0291 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

表4 峰面积及浓度对照表

保留时间(min)	浓度( $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )	峰面积( $\text{pA}\cdot\text{s}$ )
10.331	0.00200	294.82
10.31	0.00500	778.74
10.372	0.0200	3477.63
10.339	0.0500	8589.29
10.310	0.100	16587.61
10.315	未知样	4990.35

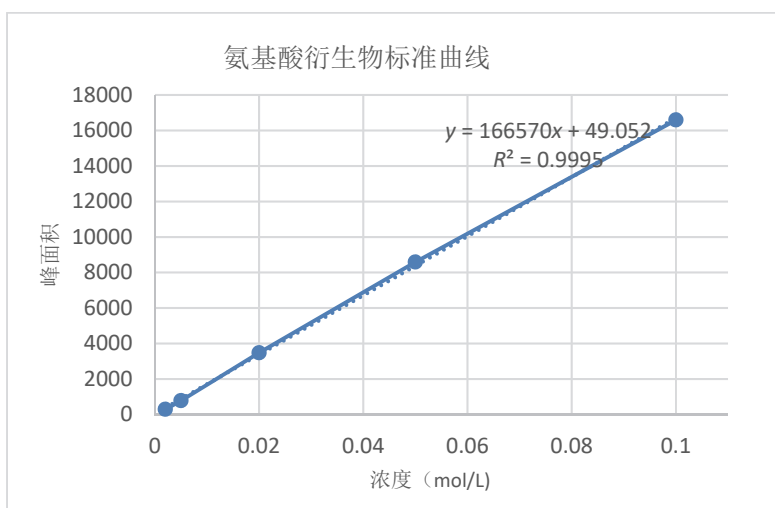


图9 氨基酸标准曲线

#### 5.4 实验总结

本实验是中心研究生“综合仪器分析实验”课程中开设的一个创新实验项目，研究生“综合仪器分析实验”作为基础实验和研究生科研项目的衔接内容，难度较高。本实验主要的重难点为氨基酸衍生化操作及手性分离。

研究生在进行科研实验时，常常由于实验环节过多，千头万绪，遇到困难时很容易产生挫败感。这时就需要将一个大的项目分解成小的课题，抽丝剥茧，探究问题所在。以本实验为例，可以将一个大的目标分成三个小目标(图10)，如果需要手性分离，必须要使用手性柱，然而在确定氨基酸口服溶液中的氨基酸是左旋氨基酸的前提下，也可以使用普通气相色谱进行定量；可以通过分组合作，统筹安排，缩短实验时间。在此过程中，学生需要自行设计实验方案，讨论每个环节需要注意哪些问题，也可以通过多种仪器验证自己的想法，处理实验过程中遇到的差错；在此过程中，可以锻炼其分析问题、处理复杂问题的能力及团队合作能力。

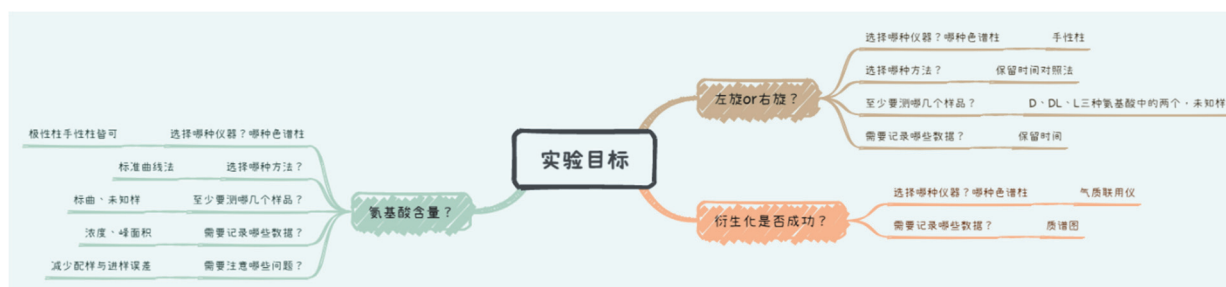


图10 实验路径思维导图

本实验主要选择缬氨酸作为目标物，令标准样的运行时间控制在12分钟以内，在4–5学时内能够完成实验。在学生掌握衍生化及仪器使用方法后，可选择其他氨基酸进行探究实验。在进行衍生化操作时，可改变加入的乙醇、吡啶或氯甲酸乙酯的量，或改变反应时间，观察反应产率是否有不同。也可以尝试改变色谱条件，观察对分离效果的影响。

本实验选课的学生有包括化学学院及校内其他学院，以及中科院科研院所代培的学生。大部分同学能够完成实验(图11)。同学们认为本实验设计合理、步骤清晰；部分同学表示，气相色谱和气质联用仪之前都是简单听过其原理和应用，本次实验是第一次仔细观察其构造并上手操作，通过此次课程了解了气相色谱和气质联用仪的工作原理、应用范围和选择标准等，学习了如何解析图谱和软件操作；也有一些同学在失败中获得经验，如参数设置错误，衍生化步骤投料顺序错误，进样误差等等，都可能对实验结果造成影响；同学们在分工合作的过程中增进了同学友谊，同时也对即将面临的科研工作有了一定程度的了解。



图11 实际实验过程

## 5.5 实验安全提示

- 1) 衍生化操作必须在通风橱内完成，学生必须配戴手套；
- 2) 前处理步骤完成之后，助教及时将所用有机试剂放入有机试剂柜并上锁，避免学生误拿；
- 3) 实验结束后，所用离心管、枪头、滤头、针头、进样瓶要分类回收；
- 4) 气相色谱实验结束后，要及时关闭氢气，实验台恢复原状。

## 6 结语

近年来,与手性相关的研究得到了深入的发展。手性与生命科学、环境科学、信息科学、材料科学、空间科学等深度交叉融合,在认识自然、诠释生命起源、呵护人类健康、保护环境等方面发挥着越来越重要的作用。手性对映异构体的分离曾是手性研究中的难题之一,相对于手性液相色谱而言,手性气相色谱操作简便,柱效更高;然而,衍生化操作对学生来说有一定挑战度,本实验将衍生化操作与手性分离引入实验教学,不仅有利于提升学生的科研技能与创造力,也有利于增强学生对于学科知识的理解。

## 参 考 文 献

- [1] 王桂臻,郝霞,刘磊,李震宇,秦雪梅,杜冠华,张翔,李科. *药学报*, **2017**, *52* (4), 615.
- [2] Hames, B. D.等,著. *生物化学*. 王镜岩,等,译. 北京: 科学出版社, 2000: 17–21.
- [3] Frank, H.; Nicholson, G. J.; Bayer, E. *J. Chromatogr. Sci.* **1977**, *15* (5), 174.
- [4] Dalgliesh, C. E. *J. Chem. Soc.* **1952**, 3940.
- [5] 章伟光,等. *手性固定相分离技术与应用*. 北京: 科学出版社, 2022: 379–380.
- [6] Levkin, P. A.; Levkina, A.; Schurig, V. *Anal. Chem.* **2006**, *78* (14), 5143.
- [7] Getting Started with Chiral Method Development. [2024-09-20]. <https://www.registech.com/blog/getting-started-with-method-development/>