



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



面向 21 世纪 课 程 教 材

Textbook Series for 21st Century

# 现代仪器分析

## 第三版

主编 刘约权

高等教育出版社



普通高等教育“十一五”国家



面向 21 世纪课程教材  
Textbook Series for 21st Century

# 现代仪器分析

XIANDAI YIQI FENXI

第三版

主编 刘约权

高等教育出版社·北京

## 内容简介

本书是教育部面向 21 世纪课程教材和普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

全书重点阐述了原子发射光谱法、原子吸收光谱法、分子发光分析法、紫外-可见吸收光谱法、红外吸收光谱法、核磁共振波谱法、质谱分析法、电位分析及离子选择性电极分析法、极谱与伏安分析法、气相色谱法、液相色谱法等重要的现代仪器分析方法；同时简要介绍了十几种与有关专业相关的其他分析方法，如 X 射线荧光及衍射分析法、激光动态光散射与激光拉曼光谱分析法、旋光色散及圆二色谱分析法、生物分子相互作用分析法、电导与库仑分析法、电化学生物传感器、超临界流体色谱法、高效毛细管电泳分析法，以及 GC-MS、LC-MS 等各种联用分析法。

为方便本书的使用，编者制作了与教材配套的多媒体光盘随书发行。本书可作为高等学校的非化学类专业（尤其适合农、林、水、轻工以及生物类、资源环境类、食品类等相关专业）开设“仪器分析”课程的主讲教材，也可供社会学习者阅读和参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

现代仪器分析 / 刘约权主编. --3 版. --北京：  
高等教育出版社，2015.4

ISBN 978-7-04-042234-4

I. ①现… II. ①刘… III. ①仪器分析-高等学校-  
教材 IV. ①O657

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 039611 号

策划编辑 郭新华  
插图绘制 郝林

责任编辑 郭新华  
责任校对 胡美萍

封面设计 杨立新  
责任印制 朱学忠

版式设计 马敬茹

出版发行 高等教育出版社  
社址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100120  
印刷 高教社(天津)印务有限公司  
开本 787mm×960mm 1/16  
印张 24.5  
字数 440千字  
购书热线 010-58581118  
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landaco.com>  
<http://www.landaco.com.cn>  
版 次 2001年12月第1版  
2015年4月第3版  
印 次 2015年4月第1次印刷  
定 价 41.20元(含光盘)

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物料号 42234-00

# 《现代仪器分析》(第三版)编委会

**主 编** 刘约权

**副主编** 李敬慈 杨丽华 张冬暖 崔朋雷  
臧晓欢 王 春 王玉军 刘海燕  
周冬香 周 欣 祁 超 陈 炜  
白 玲 唐然肖 高书涛 王俊敏  
胡 笳 杜 丽 高向阳

**编 委** (按姓氏笔画顺序排列)

冯 成 冯 涛 田璐洋 刘书静  
刘 宁 刘伟华 何红岩 李 芝  
李 莉 李 超 杨秀敏 张力红  
张帅华 张彩华 武伟红 赵 影  
郝云辉 常青云 银 鹏

## 第三版前言

本书自出版发行以来,受到了读者的广泛关注和欢迎,为了更好地服务读者,并进一步提高教材质量使之成为精品教材,我们对第二版教材进行了修订,现说明如下:

一、此次修订工作主要由原版编者中的用书单位完成。有些原版编委成员由于退休或不再从事本课程的教学工作或者其他原因,未能参与此次修订工作。但他们曾经为本教材付出了辛勤的劳动,在此,我们对第一、第二版的全体编委表示衷心的感谢,并希望他们继续对本书给予积极的关心和支持。

二、本书是在第二版的基础上修订而成,保留了原书的特点和风格。此次修订较大的变动是将各章的“思考题与习题”改为“复习与自测”,设置了“思考题、判断题、选择题、填空题、简答题、计算题和结构题”等内容,以帮助教师更有效地指导学生各章的教学内容,并深入探讨相关内容。借此,希望能够弥补第二版教材中存在的多数章节习题偏少、不便于指导学生复习和自测等不足。

三、由于篇幅所限,书中的复习题、自测题等均未附解题的参考答案,如有需要,请读者自行查阅与本书配套的《现代仪器分析学习指导与问题解答》(刘约权、李敬慈主编,高等教育出版社,2007年),该书收录了约1500道问题与试题,编制了20套模拟试卷并附有全部参考答案。

本书最后由主编通读定稿,如有错误及不妥之处,敬请读者批评指正,再次感谢广大读者对本书的关注与厚爱。

编者

2014年10月

## 第二版前言

仪器分析课程已受到越来越多高校的重视并已列入开课计划,这不仅因为它是一门实践性、技术性很强的综合性课程,而且它对培养学生的科学素质及创新意识、创新思路、创新精神和创新能力也起着重要的作用。

本教材第一版发行以来,备受关注,先后被列为教育科学“十五”国家规划课题——“21世纪中国高等学校农林类专业数理化基础课程的创新与实践”课题(编号 BIA010092-F)和高等教育出版社“高等教育百门精品课程教材建设计划”项目。为此,编委会 2004 年 12 月下旬组织十余所高校教学经验丰富的教授、副教授 20 多人对教材进行重新编写。参加编写的学校(以笔画为序)有上海水产大学、山东农业大学、大连水产学院、中南林学院、东北农业大学、江西农业大学、北京农学院、华中师范大学、华南农业大学、西北农林科技大学、吉林农业大学、河北农业大学、河南农业大学、南京林业大学以及海南大学等 15 所高校。

根据项目研究计划,此次再版主要进行了以下几方面工作。

### 1. 教材的立体化配套。

(1) 研制了多媒体光盘随书发行。为不断更新和提高教材的潜质,采用现代技术充实、丰富仪器分析教学,以便学生直观、生动、形象、自主地学习,进一步提高仪器分析课程的教学质量和教学水平,在高等教育出版社的大力支持下,河北农业大学开发研制了与本教材配套的多媒体光盘随书发行。为指导读者正确使用光盘,在教材的附录 1 中撰写了“现代仪器分析多媒体光盘及其使用方法简介”。

(2) 对可与本教材配套的实验教材——《实验化学》(下册,刘约权、李贵深主编,高等教育出版社)进行了再版修订(2005 年已出版发行第二版),使其更加贴近实际、贴近专业,更加适应仪器分析教学的需要。

(3) 编著出版本课程的教学辅导书——《现代仪器分析学习指导与问题解答》。

2. 编委会从教材编写大纲的制定,撰写的内容、体例、格式、语言文字,直至附录、索引及教材封面设计等各个方面都进行了精心的考虑和安排,保留了教材原有的特色和风格,以“适度、够用、适用”为原则,力求“内容精练,文字简捷,

语言通俗”,便于教师教学和学生自学。

3. 对教材内容进行了适当的充实、调整和增补,增加了其他光分析法和其他分离分析法,以适应更多的院校和专业的需要,进一步拓展教材的使用范围。

编委会根据非化学专业仪器分析课程的特点和要求,把教材限定在现有的篇幅,组织各高校教师精心撰写,严格把关,力争编写出适合非化学专业的仪器分析精品教材。尽管如此,书中仍会有不足甚至错误出现,敬请读者批评指正。

编写过程中参阅了部分文献和参考书,在此谨向有关作者表示感谢,并向使用和关注本教材的师生、读者致以深深的谢意。

编者

2005年8月

# 第一版前言

随着我国国民经济和科学技术的迅猛发展,现代仪器分析在农、林、水科学中的应用与日俱增,已成为农业化学、生物化学、食品化学、环境保护、作物营养诊断、生物资源利用、生命科学,以及农、林、水、牧副产品检验等进行科学研究不可缺少的重要检测手段,在实现社会主义农业现代化的进程中,发挥着越来越重要的作用,在 21 世纪的高等教育中,现代仪器分析在培养和提高学生科学素质方面起着不可忽视的作用。

20 世纪 80 年代开始,一些农、林、水高校已经把“现代仪器分析”作为部分专业的必修课或选修课。近年来,“现代仪器分析”内容逐渐有所更新和扩充,学习本门课程的学生也逐年增多,“仪器分析”越来越成为“分析化学”课程的主体。随着 21 世纪的到来,开设现代仪器分析课程的农、林、水高校和专业必将越来越多。为适应 21 世纪农、林、水高校对本科生人才的科学素质、化学知识和创新能力的要求,以及我国经济、科技发展和学生个性发展的需要,教育部高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革立项 04-8-8 课题组,组织河北农业大学、西北农林科技大学、中国农业大学、浙江大学、河南农业大学、吉林农业大学、华南农业大学、北京农学院、南京林业大学、中南林学院、山东农业大学、解放军军需大学、集美大学、江西农业大学、大连水产学院等 15 所高校共同编著了这本教材。

本教材是在刘约权教授主编的原《现代仪器分析》教材经过三轮以上试用取得成功经验的基础上,按照教育部 04-8 课题组制定的“高等农、林、水院校化学课程基本要求”中有关仪器分析的内容加以修改、完善,并考虑了目前多数农、林、水高校的实际情况和特点而编著的,以“适度”和“够用”为原则。

本教材着重介绍现代仪器分析的基础理论和基本方法,同时注意反映现代仪器分析中的新理论和新方法。尤其注重理论与实践相结合,书中收集了现代仪器分析在各农、林、水高校有关专业的应用实例,既有利于本门课程与专业的结合,也便于学生了解本门课程与生命科学的关联,既丰富了教材内容,也区别于其他仪器分析教材而具有农、林、水高校自身的特点。

本教材突出对学生化学素质和掌握现代仪器测试手段能力的培养,可与教育部“面向 21 世纪课程教材”——《实验化学》(下册)配套使用。



本教材为适应当前高校压缩教学时数的新形势,力求做到通俗易懂,深入浅出,有的章节可以少讲,有的可以不讲,学生通过自学即可触类旁通。

本教材在编著过程中,承蒙教育部高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革立项 04-8 课题主持人朱寿珩教授、农业部教学指导委员会化学专业组组长叶孟兆教授、河北大学孙汉文教授、北京大学张新祥教授审阅,并提出很好的意见和建议,特此致谢。

本书由主编、副主编审稿、修改,最后由主编通读、定稿。限于水平,书中欠妥乃至错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2001 年 4 月

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1-1 现代仪器分析的任务、作用和特点 .....	1
1-2 仪器分析方法和分类 .....	2
1-3 现代仪器分析的发展现状及在生命科学中的应用 .....	2
1-4 仪器分析方法的主要评价指标 .....	4
1-5 仪器分析试样的处理 .....	7
1-6 计算机在仪器分析中的应用 .....	10
复习与自测 .....	12
<b>第 2 章 光分析法导论</b> .....	16
2-1 概述 .....	16
2-2 光的性质及其与物质的相互作用 .....	16
2-3 光分析法的分类 .....	20
复习与自测 .....	23
<b>第 3 章 原子发射光谱法</b> .....	26
3-1 概述 .....	26
3-2 原子发射光谱法的基本原理 .....	27
3-3 原子发射光谱仪 .....	31
3-4 光谱定性及定量分析 .....	37
3-5 原子荧光分析法 .....	41
3-6 原子发射光谱法的应用 .....	43
复习与自测 .....	46
<b>第 4 章 原子吸收光谱法</b> .....	49
4-1 概述 .....	49
4-2 原子吸收光谱法的基本原理 .....	50
4-3 原子吸收分光光度计 .....	54
4-4 原子吸收光谱法的分析方法 .....	62
4-5 干扰及消除方法 .....	63
4-6 原子吸收光谱法的应用 .....	66
复习与自测 .....	69

<b>第 5 章 紫外 - 可见吸收光谱法</b> .....	73
5-1 概述 .....	73
5-2 紫外 - 可见吸收光谱法的基本原理 .....	75
5-3 紫外 - 可见吸收光谱与分子结构的关系 .....	76
5-4 紫外 - 可见分光光度计 .....	82
5-5 紫外 - 可见吸收光谱法的误差和测量条件的选择 .....	85
5-6 紫外 - 可见吸收光谱法的应用 .....	87
复习与自测 .....	95
<b>第 6 章 红外吸收光谱法</b> .....	99
6-1 概述 .....	99
6-2 红外吸收光谱法的基本原理 .....	100
6-3 红外吸收光谱与分子结构的关系 .....	104
6-4 红外吸收光谱仪 .....	112
6-5 红外吸收光谱法的应用 .....	115
复习与自测 .....	119
<b>第 7 章 分子发光分析法</b> .....	124
7-1 概述 .....	124
7-2 分子荧光分析法及其基本原理 .....	125
7-3 荧光分析仪器 .....	131
7-4 分子荧光定量分析方法 .....	133
7-5 化学发光分析法 .....	134
7-6 分子发光分析法的应用 .....	139
复习与自测 .....	142
<b>第 8 章 核磁共振波谱法</b> .....	147
8-1 概述 .....	147
8-2 核磁共振波谱法的基本原理 .....	147
8-3 核磁共振波谱仪 .....	149
8-4 NMR 谱的信息 .....	151
8-5 核磁共振氢谱及其应用 .....	160
8-6 $^{13}\text{C}$ 核磁共振波谱法简介 .....	164
复习与自测 .....	166
<b>第 9 章 其他光分析法</b> .....	171
9-1 X 射线分析法 .....	171
9-2 激光动态光散射与激光拉曼光谱法 .....	177
9-3 旋光色散及圆二色谱分析法 .....	181

---

9-4 生物分子相互作用分析法	185
复习与自测	188
<b>第 10 章 质谱分析法</b>	<b>191</b>
10-1 概述	191
10-2 质谱分析法的基本原理	191
10-3 质谱仪	193
10-4 质谱及其离子峰的类型	197
10-5 质谱法的应用	205
复习与自测	212
<b>第 11 章 电化学分析法导论</b>	<b>217</b>
11-1 概述	217
11-2 电化学分析基础	217
11-3 电极的分类	225
复习与自测	228
<b>第 12 章 电位分析及离子选择性电极分析法</b>	<b>232</b>
12-1 概述	232
12-2 离子选择性电极及其主要性能参数	233
12-3 离子选择性电极分析的仪器	243
12-4 电位分析及离子选择性电极分析的方法及应用	245
复习与自测	253
<b>第 13 章 极谱与伏安分析法</b>	<b>258</b>
13-1 概述	258
13-2 极谱分析法及其基本原理	258
13-3 极谱定量分析及其应用	263
13-4 极谱与伏安分析新方法	269
复习与自测	274
<b>第 14 章 其他电化学分析法</b>	<b>277</b>
14-1 电导分析法	277
14-2 库仑分析法	282
14-3 电化学生物传感器简介	286
复习与自测	288
<b>第 15 章 分离分析法导论</b>	<b>292</b>
15-1 概述	292
15-2 色谱分析法及其基本概念	292
15-3 色谱分析的基本理论	298

---

15-4 色谱定性和定量的方法 .....	303
复习与自测 .....	307
<b>第 16 章 气相色谱法 .....</b>	<b>312</b>
16-1 概述 .....	312
16-2 气相色谱仪 .....	313
16-3 气相色谱的固定相 .....	316
16-4 气相色谱检测器 .....	320
16-5 操作条件的选择 .....	324
16-6 毛细管柱气相色谱 .....	327
16-7 气相色谱法的应用 .....	328
复习与自测 .....	334
<b>第 17 章 高效液相色谱法 .....</b>	<b>338</b>
17-1 概述 .....	338
17-2 高效液相色谱仪 .....	338
17-3 高效液相色谱法的类型 .....	344
17-4 高效液相色谱法的应用 .....	351
复习与自测 .....	354
<b>第 18 章 其他分离分析法 .....</b>	<b>357</b>
18-1 超临界流体色谱法 .....	357
18-2 高效毛细管电泳分析法 .....	362
18-3 联用分离分析法 .....	368
复习与自测 .....	369
<b>附录 .....</b>	<b>373</b>
附录 1 现代仪器分析多媒体光盘及其使用方法简介 .....	373
附录 2 相对原子质量表 .....	375
<b>主要参考资料 .....</b>	<b>376</b>

## 绪 论

### 1-1 现代仪器分析的任务、作用和特点

研究物质的组成、状态和结构的科学,称为分析化学。分析化学一般可分为化学分析和仪器分析。现代仪器分析是在化学分析的基础上逐步发展起来的一类分析方法。通常,化学分析是利用化学反应及其计量关系进行分析的一类分析方法,而现代仪器分析则是以物质的物理性质或物理化学性质及其在分析过程中所产生的分析信号与物质的内在关系为基础,并借助于比较复杂或特殊的现代仪器,对待测物质进行定性、定量及结构分析和动态分析的一类分析方法。

仪器分析和化学分析是分析化学相辅相成的两个重要的组成部分。化学分析历史悠久,设备简单,应用广泛,主要用于测定含量大于 1% 的常量组分,是比较经典的基本分析方法。它是分析化学的基础。有了这个坚实的基础,才能进一步学习和掌握现代仪器分析的各种分析方法和操作技术。现代仪器分析具有准确、灵敏、快速、自动化程度高的特点,常用来测定含量很低的微、痕量组分,是分析化学的发展方向。

本课程以介绍现代仪器分析的基本理论及其对物质进行分析测定的基本原理、基本方法、基本技巧为主要内容,着重介绍各种现代仪器分析方法在农、林、水、轻工及其他各有关专业的实际应用。其主要任务是开拓学生的创新思维,学习现代仪器分析的测试手段,培养和提高学生的科学素质、创新意识、创新精神和获取知识的能力,以适应 21 世纪我国经济和科学技术发展对人才的需要和要求。在当今科学研究步入生物工程时代,人类开始从分子水平上认识和解决与生命科学有关的问题时,学习现代仪器分析课程,就具有更为重要的意义和作用。

## 1-2 仪器分析方法和分类

随着新技术新分析方法的不断涌现,现代仪器分析逐步演变为一门多学科汇集的综合性应用科学。仪器分析的方法不仅众多,而且各自比较独立,可以自成体系。常用的仪器分析方法根据分析的原理,通常可以分为以下几大类:

(1) 光分析法(optical analysis) 光分析法是利用待测组分的光学性质(如光的发射、吸收、散射、折射、衍射、偏振等)进行分析测定的一种仪器分析方法。其理论基础是物理光学、几何光学和量子力学。

光分析法通常包括吸收光谱法、发射光谱法、散射光谱法以及旋光(偏振光)分析法、折射(光)分析法、比浊分析法、光导纤维传感分析法、X射线及电子衍射分析法。

(2) 电化学分析法(electrochemical analysis) 电化学分析法是利用待测组分在溶液中的电化学性质进行分析测定的一种仪器分析方法,其理论基础是电化学与化学热力学。根据所测量的电信号不同可分为电位分析法、极谱与伏安分析法、电导分析法与电解分析法(库仑分析法)。

(3) 分离分析法(separable analysis) 分离分析法是利用物质中各组分间的溶解能力、亲和能力、吸附和解吸能力、渗透能力、迁移速率等性能方面的差异,先分离后分析测定的一类仪器分析方法。其主要理论基础是化学热力学和化学动力学。

分离分析法主要包括气相色谱法(GC)、高效液相色谱法(HPLC)、薄层色谱法(TLC)、离子色谱法(IC)、超临界流体色谱法(SFC)、高效毛细管电泳法(HPCE)、毛细管电动色谱法(CEC),以及色谱-光谱、色谱-质谱、毛细管电泳-质谱等联用方法。

(4) 其他分析法 除了以上三类分析方法外,还有利用热学、力学、声学、动力学性质进行测定的仪器分析法。其中最主要的有质谱法(MS),它是利用带电粒子质荷比的不同进行分离、测定的分析方法。另外,还有热分析法、动力学分析法、中子活化法、光声光谱分析法和电子能谱分析法等。

## 1-3 现代仪器分析的发展现状及在生命科学中的应用

随着现代科学技术的发展,各学科相互渗透、相互促进、相互结合,不断



开拓新领域,使仪器分析得到了迅速的发展。从分析对象上看,与生命科学、环境科学、新材料科学有关的仪器分析法已成为分析科学中最为热门的课题;从分析手段上看,多种方法相互融合使测定趋向灵敏、快速、准确、简便和自动化;从分析方法上看,计算机在仪器分析中的应用、化学计量学以及与各类仪器配套工作站的研制是最活跃的领域。以上课题和领域的研究、应用,推动了仪器分析的迅猛发展,老方法更趋于完善,新仪器不断涌现,新方法层出不穷。

在电化学分析方面,各种生物传感器和微电极伏安法扩展了电分析化学研究的时空范围,适应了生物分析及生命科学发展的需要,近 20 多年来发展的化学修饰电极、微电极、光谱电化学、生物电分析化学,使电化学分析从宏观深入到微观区域,从破坏试样测定到进行无损的活体分析,实现了新功能电极体系的分子设计及分子工程学研究,从分子水平探讨电化学界面区的组成、状态及结构,使分析化学进入了分子水平测定的新时代。

在光分析中,等离子体、傅里叶变换、激光技术和光导纤维传感技术的引入,出现了电感耦合高频等离子体原子发射光谱(ICP - AES)、傅里叶变换红外光谱(FT - IR)、电子耦合、等离子体质谱(ICP - MS)、激光光谱和化学发光光谱等一系列光谱分析新技术。目前,已有 80 多种光导纤维化学传感器探头(又称光极,optrode)用于临床分析、环境监测、生物分析及生命科学等领域。利用荧光素及其酶反应的光极甚至可以测定生物体中低至  $10^{-18}$  g 的磷酸三腺苷(ATP),使灵敏度得到极大的提高。而 ICP - MS 技术不但灵敏度高、干扰少,而且线性范围可达 5 ~ 6 个数量级,能够进行多种元素的同时分析,应用范围进一步扩大。新的二极管阵列过程分析仪(diode array process analyzer)可进行多组分气体或流动液体的在线分析,一秒钟内能够提供 1 800 种气体、液体或蒸气的分析结果,已应用于试剂、塑料、药物及食品工业生产过程中产品质量控制分析。

分离分析法是仪器分析发展、研究和应用十分活跃的领域之一,可以连续对试样进行浓缩、分离、提纯和测定。近 30 年来发展的气相色谱 - 质谱(GC - MS)联用技术、高效液相色谱、超临界流体色谱、离子色谱、毛细管区带电泳(CE)使分离分析领域充满了活力。尤其是毛细管区带电泳技术,具有分离效率高(柱效达 100 万理论板数  $\cdot$  m<sup>-1</sup>),试样用量小( $10^{-9}$  ~  $10^{-6}$  mL),灵敏度高(检出限低至  $10^{-20}$  ~  $10^{-15}$  mol  $\cdot$  L<sup>-1</sup>),分离速度快(小于 10 min)等特点,适用于离子型生物大分子,如氨基酸、核酸、肽及蛋白质分析,甚至细胞和病毒等的快速、高效测定,在生物分析及生命科学领域中有极为广阔的应用前景。超临界流体色谱法能在较低温度下分析热稳定性和挥发性差的大分子,柱效比