

生物化学技术的理论和实验

〔美〕约翰·F·洛比特 著
伯纳德·J·怀特



吉林大学出版社

生物化学技术的理论和实验

John F. Robyt

Bernard J. White

(美) 约翰·F·洛比特

伯纳德·J·怀特

著

罗贵民 张学忠

赵 荧 张兰田

译

吉 林 大 学 出 版 社

《生物化学技术的理论和实验》

内容简介

本书译自 J. F. Robyt 和 B. J. White 合著的由 Brooks/Cole 出版公司 1987 年出版的“Biochemical Techniques, Theory and Practice”一书。作者简明扼要地阐述了四大类生物分子(糖、蛋白质、核酸和脂)的分离纯化、定性定量和结构测定的各种方法的基本原理以及这些方法的基本操作。全书共分十章:实验数据的分析和报告;溶液的制备和性质;光谱方法;层析技术;电泳技术;放射性同位素的理论,测量和用途;测定生物分子的定性定量方法;生物制备;酶学;生物分子的结构分析。每章之后均附有引用的参考文献及供深入学习用的文献资料。书末附录还详细介绍了有关生化分析、方法和制备的各种期刊杂志。本书将生化实验技术的历史成果及 80 年代的最新进展融汇为一体,对生化专业、农林医有关专业的大学生及生化科技工作者颇具参考价值。

生物化学技术的理论和实验

(美)· 约翰·F·洛比特 著
伯纳德·J·怀特

罗贵民 张学忠 译
赵 荧 张兰田

吉林大学出版社出版 吉林大学出版社发行
(长春市东中华路 29 号) 长春大学印刷厂印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16 1991 年 12 月第 1 版
印张: 16.5 1991 年 12 月第 1 次印刷
字数: 416 千字 印数: 1-1000 册

ISBN 7-5601-1115-7/O·127 定价: 7.00 元

译者前言

生物科学的发展突飞猛进，新方法新技术不断涌现。科学上的每一重大进展无不与新方法新技术的开发有关，因此了解和掌握这些新技术无论对学生还是科研工作者都是至关重要的。目前国内虽有一些有关生物化学技术方面的图书，但能反映 80 年代最新成果的书籍还感缺乏。为此，我们翻译了 1987 年出版的由 J. F. 洛比特和 B. J. 怀特著的“生物化学技术的理论和实验”一书。

这本书对四大类生物分子——糖类、脂类、蛋白质(酶)和核酸的分离纯化、定性定量及其结构测定方法作了系统的全面的阐述，涉及到了生物化学的各个领域，其中既有经典的实验技术，也有 80 年代的新方法新技术。本书的特点是，基本概念和基础理论的阐述既简明扼要又深入浅出，同时还有可供实际操作的实验细节，因此适合于我国培养生物化学专业大学生和有关专业人员使用。

作者在叙述各种理论及现代研究成果之前，往往先介绍该领域研究的沿革，并着意阐述如何用本书提供的背景和技术，去设计和完成自己的实验。作者的思想是，科学家的成长不能光靠做实验，还必须靠自己能设计实验。本书用一章的篇幅论述了如何将所学到的知识运用到实践中去，相信对读者会有裨益的。

本书第一、三、五、九章由张学忠翻译；第四、七章由赵炎翻译；第六章由张兰田翻译；第二、八、十章及前言、附录由罗贵民翻译；安玉华、曹淑桂对全部译稿做了审校。书中的明显错处已由译者作了订正。但限于知识和翻译水平，仍难免有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

本书在翻译过程中得到了酶工程实验室领导的大力支持，特别是哈尔滨船舶工程学院的李玉琴同志为本书的翻译作出了重要贡献，在此一并表示感谢。

罗贵民

于吉林大学酶工程国家重点实验室

1989 年 5 月

前 言

历史证明,科学上的进展取决于新方法、新技术的开发。在 Emil Fischer 利用苯肼测定了糖类的结构,并且确定,蛋白质是由氨基酸组成的多肽链时,生物化学诞生了。与此同时, Buchner 兄弟分离了将糖类发酵成乙醇的酵母酶, Michaelis 和 Menten 研究了酶动力学并发展了关于酶执行催化作用方式的假说。

第二次世界大战初期,生物化学仍处在婴儿时期。然而,那时开发了两种技术,有力地推动了生物化学的发展进程。第一种技术是放射性同位素的生产及其定量测定。在生物化学实验中,可以利用 ^{14}C 标记的化合物作为定量示踪物。第二种技术是层析法,用这种方法可以分离化学性质和物理性质非常相近的生物物质(例如糖类或氨基酸的混合物)。60 年代初期,出现了两种非常重要的层析技术: Sober 和 Peterson 研制了弱离子交换纤维素,用于在温和条件下分级蛋白质混合物; Flodin 和 Porath 开发了交联葡聚糖,用它作分子筛可以按分子量的大小分离大分子。这些技术至今仍在生化研究中广泛应用。

在电场中分离带电分子的技术是由 Tiselius 在 30 年代首先研究成功的。溶液中的带电蛋白质在电流作用下会以不同的速度向两个电极中的一个移动,而且可用复杂的光学方法检测出来。多少年来,这种费时费力的溶液电泳法是定量分析复杂蛋白质混合物的唯一可用的方法。到了五十年代后期,研制了区带电泳。带电分子加到水合多孔固体支持物上,电流通过支持物时就可分离带电分子。60 年代初期, Ornstein 和 Davis 研制了聚丙烯酰胺凝胶区带电泳,为生物化学提供了一种分离带电大分子的简单而有效的电泳技术。聚丙烯酰胺可防止对流,大大提高对非常少量蛋白质的分辨力,只要用特殊的染色方法就能很容易检测出微量蛋白质。这个技术至今广泛用于蛋白质和核酸的定性、定量分离和分析。

使用放射线同位素、层析和电泳技术的同时,定量分光光度法也发展起来了,并应用于生物物质的测定。这些技术的应用使生物化学研究进入定量阶段。

本书阐述了生化实验课程和生化研究中的基本理论和实验。第一章讲的是数据测量及误差分析,用图表表达数据,以及实验报告的写作。第二章说明溶液的制备和性质,包括 pH 和缓冲溶液。对某些学生来说,可能已经在别的化学课程中学过第一、二章的内容。但我们发现,就是作为复习,这些内容通常也是需要的。第三章论述定性定量方法,包括紫外-可见分光光度法、荧光法、红外光谱法和核磁共振光谱法。第四章讲的是层析分析方法,分为两部分。第一部分讨论各类层析法的一般知识,第二部分说明层析法在分离糖类、氨基酸、蛋白质、核酸和脂类中的特殊应用。第五章阐述电泳分离法,重点是区带电泳,特别是聚丙烯酰胺凝胶电泳和琼脂糖凝胶电泳。第六章讨论放射性同位素的本质和性质以及定量测定放射性的技术:气体电离法、液体和固体闪烁光谱法,和放射自显影术。介绍了用放射性同位素标记生物物质的特殊方法及其在示踪实验中的应用。最后讨论了使用放射性同位素实验的设计及注意事项。第七章介绍了定性、定量测定糖类、氨基酸、蛋白质、核酸和脂类的各种常用方法,尽可能地说明方法的基本原理和方法局限性。第八章介绍各类生物物质的制备方法,包括细胞溶解、离心、过滤、浓缩、透析和发酵。还介绍了制备细胞器、蛋白质、糖类、核酸和脂类的特

殊方法。在每一类中，选择几个特殊的例子说明不同来源的样品，制备方法不同、生化性质也不同。例如，在蛋白质类，由于脲酶易于结晶，是历史上第一个得到的酶，所以描述了刀豆脲酶的制备；选择酵母醇脱氢酶是要说明各种不同类型的蛋白质纯化技术的配合应用；介绍人唾液 α -淀粉酶的原因是，这种酶易从人体获得，而且易于分析，在实验课中研究酶催化作用时经常采用；选择大肠杆菌碱性磷酸酶和淀粉液化型芽孢杆菌限制性核酸内切酶(BamI)的目的是，用它们来研究核酸的结构和顺序。第九章讨论酶学方面的课题，包括米氏动力学的理论和应用，酶分析方法学和抑制作用的类型。第十章介绍糖类、蛋白质、核酸和脂类的结构测定方法。用于分析DNA的方法包括使用质粒和噬菌体DNA寄主的克隆技术。第十章证明，第一至第九章介绍的各种技术可用于研究现代生化问题。

三类重要的资料放在书中的方框内：定义重要概念或推导结果的方程；强调一种特殊方法或技术如何应用计算的例子；设计实验方法或完成实验制备的说明。书中关于大多数仪器设备的特殊使用没有说明，因为每一种仪器都由很多厂家生产，型号各异，不可能作出详细说明。各种仪器的特殊使用说明由生产厂家提供。

很多生化实验课的指导者都有他们自己的一套实验设备，以便适应他们的需要。本书并不打算写成实验手册，但可与各别指导者已经制定的实验结合起来使用。作者试图为学生提供一本这样的书：学生们会保存并在他们选择的职业——生物学问题研究中使用。在适当的地方介绍某种技术的发展历史，列出关于经典实验主要资料的参考文献，让学生了解生化文献。本书除了提供背景材料，加深学生对生化实验课中实验的理解以外，还提供附加材料，供学生进一步探索与实验有关的高层次领域和技术。每章后都附有详细的参考资料，这样，学生可以进一步研究并获得有关实验方法和技术的细节。

作者的哲学是，科学家的成长不能光靠做实验，他还必须靠自己设计实验。“生物化学技术”这本书提供的背景和技术可供学生在实验课和他们自己的研究中设计和完成自己的实验。例如，用 ^{14}C -标记的葡萄糖喂养动物，则可从动物肝中分离出 ^{14}C -标记的糖原。糖原的近似分子量可由凝胶渗透层析法测定。然后，用人唾液 α -淀粉酶消化标记的糖原，再用薄层层析法和放射自显影术考查消化产物。这些实验的原理和特殊的实验技术可从第四章(层析技术)、第六章(放射性同位素的理论、测量和应用)、第八章(生物制备)、第九章(酶学)中获得。醇脱氢酶的研究是各章配合的另一例子：酶的分离和分析(第三、七、八、九章)；用聚丙烯酰胺凝胶电泳表征酶(第五章)；用凝胶渗透层析法测酶的分子量(第四章)；酶的动力学和抑制作用的测定(第九章)。学生们利用他们的想象力，根据本书提供的方法，同样可以开创很多其它实验。也许有些学生能研制出显著改变生物科学进程的新方法或新技术。

致谢

我们感谢衣阿华州立大学和生物化学与生物物理系提供学术气氛、促进本书的写作。我们还感谢 Pierre Robitaille, Jay-lin Jane 和 Paul Gollnik 阅读，评述各部分手稿，感谢 Laura Totaro 阅读部分手稿并帮助绘图，感谢 Steve Eklund 在整理手稿中给予的多方面有价值的协助。我们还要感谢 Brooks/Cole 出版公司的职员，特别是赞助编辑 Sue Ewing 的鼓励和制作编辑 Joan Marsh 的专门技巧。

我们向本书的下述评述人表示谢意：英国哥伦比亚大学的 Richard Barton；埃默牛尔学院的 Douglas Crandall；亚利桑那州立大学的 John Cronin；怀俄明大学的 Ivan Kaiser；旧金山州立大学的 Robert Lindquist；内布拉斯加大学的 Eric Manley；纽约-巴夫罗州立大学的 John

Moran: 堪萨斯大学的 Marjorie Newmark; Humboldt 州立大学的 Richard Paselk; 加利福尼亚 - 圣迭哥大学的 Dennis Revie; 佛罗里达州立大学的 Randolph Rill; Claremont 学院的 David Sadava; Grinnell 学院的 Elliott Uhlenhopp.

John F. Robyt

Bernard J. White

目 录

第一章 实验数据的分析和报告	1
1.1 实验数据的记录和处理	1
1.1.1 有效数字	1
1.1.2 科学记数法	2
1.1.3 单位	2
1.2 实验数据的分析	4
1.2.1 误差分析和精密度的判断	4
1.2.2 误差和数据的取舍	5
1.2.3 数学运算结果的不确定性的计算	5
1.2.4 精密度和测定次数之间的关系	6
1.3 表和图	6
1.3.1 表	6
1.3.2 图表中10的乘方的使用	7
1.3.3 制图规则	8
1.3.4 线性化	9
1.3.5 数值曲线拟合 最小二乘法	10
1.3.6 线性最小二乘法中的权重因子	11
1.3.7 曲线下面积的计算	11
1.4 对照和空白	11
1.5 命名的一般规则	12
1.6 实验室和研究报告	12
1.7 引用的文献	13
1.8 深入研究用的参考文献	13
第二章 溶液的制备和性质	14
2.1 测量方法	14
2.2 容量玻璃仪器	14
2.3 容量玻璃仪器的使用	17
2.3.1 清洗	17
2.3.2 弯月面的读法	17
2.3.3 校准	17
2.4 分析天平	18
2.5 浓度和稀释度的表达法	19
2.6 溶液的稀释	20
2.7 标准溶液	20
2.8 pH 和缓冲溶液	21

2.8.1	pH	21
2.8.2	缓冲溶液	22
2.8.3	缓冲液容量和离子强度	23
2.9	pH 测量	24
2.9.1	pH 计	24
2.9.2	测定 pH	25
2.10	引用的文献	25
2.11	深入研究用的参考文献	25
第三章	光谱学方法	26
3.1	电磁辐射和光谱	26
3.2	光吸收的定量	28
3.2.1	Lambert-Beer 定律	28
3.2.2	消光系数的定义	29
3.2.3	物质的紫外或可见光谱和最大吸收波长的测定	29
3.2.4	消光系数和浓度的测定	29
3.2.5	混合物中两种物质浓度的测定	31
3.2.6	差示光谱法	32
3.3	紫外和可见光谱测定法	32
3.3.1	仪器	32
3.3.2	紫外和可见光谱的应用	33
3.4	荧光光度法	33
3.4.1	荧光	33
3.4.2	仪器	33
3.5	红外光谱学	36
3.5.1	红外分光光度法	36
3.5.2	红外分光光度计	37
3.5.3	样品处理(用于红外光谱测定)	38
3.5.4	红外光谱的应用	38
3.6	核磁共振光谱测定法	39
3.6.1	质子 NMR 光谱测定法	41
3.6.2	^{13}C NMR 光谱测定法	43
3.6.3	其它核的 NMR 光谱	44
3.6.4	NMR 光谱在生物化学中的应用	45
3.7	引用的文献	46
3.8	深入研究用的参考文献	47
第四章	层析技术	48
第一部分	层析类型和层析技术	48
4.1	吸附层析	49
4.2	离子交换层析	51
4.3	液-液分配层析	53
4.4	纸层析	53

4.5 薄层层析	56
4.6 凝胶渗透层析	57
4.6.1 凝胶和柱的制备	61
4.6.2 凝胶渗透层析中的概念	62
4.7 亲和层析	62
4.7.1 惰性载体和配体	63
4.7.2 配体与固性载体的连接	63
4.7.3 疏水层析	64
4.8 气-液层析	64
4.9 高效液相层析	66
第二部分 层析的特殊应用	69
4.10 糖类	69
4.10.1 糖类的吸附层析	69
4.10.2 糖类的离子交换层析	69
4.10.3 糖类的纸层析	70
4.10.4 糖类的薄层层析	71
4.10.5 糖类的凝胶渗透层析	72
4.10.6 糖类的亲和层析	73
4.10.7 糖类的气-液层析	73
4.10.8 糖类的高效液相层析	73
4.11 氨基酸	73
4.11.1 氨基酸的离子交换层析	74
4.11.2 氨基酸的薄层层析	75
4.11.3 氨基酸的高效液相层析	76
4.12 蛋白质	76
4.12.1 蛋白质的吸附层析	76
4.12.2 蛋白质的离子交换层析	77
4.12.3 蛋白质的凝胶渗透层析	78
4.12.4 蛋白质的高效液相层析	78
4.13 核苷酸和核酸	78
4.13.1 核酸的离子交换层析	78
4.13.2 核酸的凝胶渗透层析	79
4.13.3 核酸的亲和层析	79
4.13.4 核酸的高效液相层析	80
4.14 脂类	80
4.14.1 脂类的吸附层析	80
4.14.2 脂类的离子交换层析	80
4.14.3 脂类的纸层析	80
4.14.4 脂类的薄层层析	80
4.14.5 脂类的气-液层析	81
4.14.6 脂类的高效液相层析	81
4.15 引用的文献	82

4.16 深入研究用的参考文献	85
第五章 电泳技术	86
5.1 理论	86
5.2 电泳类型	86
5.2.1 纸电泳和醋酸纤维素电泳	87
5.2.2 薄层电泳	88
5.2.3 凝胶电泳	88
5.2.4 免疫电泳	97
5.2.5 等电聚焦	99
5.3 特殊应用	99
5.3.1 蛋白质和肽	99
5.3.2 核酸和寡核苷酸	100
5.3.3 脂蛋白分离	102
5.4 引用的文献	102
5.5 深入研究用的参考文献	103
第六章 放射性同位素的理论、测量和使用	104
6.1 原子 同位素和放射性同位素的本质	104
6.2 放射性衰变的类型	105
6.2.1 负 β (电子)发射引起的衰变	105
6.2.2 正 β (电子)发射引起的衰变	105
6.2.3 捕获电子引起的衰变	105
6.2.4 γ -辐射引起的衰变	105
6.2.5 α -粒子发射引起的衰变	106
6.3 天然放射性同位素和人工生产的放射性同位素	106
6.4 放射性发射的性质	107
6.4.1 β -粒子发射的能量	107
6.4.2 β -粒子与其环境的相互作用	108
6.4.3 γ 辐射及其与物质的相互作用	108
6.4.4 放射性衰变的动力学	109
6.5 放射性测量中使用的单位	112
6.5.1 电子伏特	112
6.5.2 居里:放射性蜕变的单位	112
6.6 处理放射性同位素的特殊技术和安全措施	112
6.7 放射性同位素计数的统计学	113
6.8 气体电离法测定放射性	115
6.9 闪烁计数法测定放射性强度	117
6.9.1 液体闪烁计数法的原理	117
6.9.2 脉冲高分析和 β 能谱	118
6.9.3 在双标记混合物中每种同位素活力的测定	119
6.9.4 合剂组成和样品制备	120
6.9.5 淬灭和淬灭校正	121

6.10 γ - 辐射的固体闪烁计数	122
6.11 用放射自显影术检测	123
6.12 标记生物化学化合物的方法	125
6.13 放射性化学标记的类型	128
6.14 放射性同位素的应用	129
6.14.1 用放射性同位素定量测定化合物的含量	129
6.14.2 用同位素稀释分析法定量测定化合物	130
6.14.3 测定由一种标记前体形成的几种化合物的摩尔分数	132
6.14.4 应用放射性同位素的脉冲技术和追逐技术	132
6.14.5 放射性示踪剂在酶反应机制和代谢途径研究中的应用	133
6.14.6 放射免疫分析	134
6.15 放射性同位素实验的设计	135
6.16 引用的文献	137
6.17 深入研究用的参考文献	137
第七章 定性定量测定生物分子的方法	138
7.1 糖类	138
7.1.1 各类型糖的定性检验	138
7.1.2 糖类的定量测定	140
7.2 氨基酸 肽和蛋白质	145
7.2.1 氨基酸和蛋白质的定性试验	145
7.2.2 氨基酸的定量测定	146
7.2.3 蛋白质的定量测定	148
7.3 核苷酸和核酸	153
7.3.1 RNA 和 DNA 的定性测定	153
7.3.2 核苷酸和核酸的定量测定	154
7.4 脂类和类固醇	155
7.4.1 脂类在薄层层析图谱上的定性试验	155
7.4.2 类固醇的定性试验	157
7.4.3 脂类的定量测定	157
7.5 其它测定方法	158
7.5.1 无机磷的测定: 修改的 Fiske—Subbarow 法	158
7.5.2 特殊键合分析	158
7.6 引用的文献	160
7.7 深入研究用的参考文献	162
第八章 生物制备	163
8.1 起始材料	163
8.2 细胞溶解和抽提	163
8.3 制备生物材料的特殊技术	164
8.3.1 离心	164
8.3.2 密度梯度离心	166
8.3.3 过滤	166

8.3.4 溶液的浓缩	167
8.3.5 透析	167
8.3.6 用于生产生物物质的细菌培养	168
8.4 细胞成分和细胞器的亚细胞分级	169
8.4.1 肝线粒体的制备	169
8.4.2 叶绿体的制备	169
8.4.3 肝核的分离	169
8.4.4 大肠杆菌核糖体的制备	170
8.5 蛋白质的纯化	170
8.5.1 根据溶解度的分离	170
8.5.2 层析分离和电泳分离	171
8.5.3 蛋白质的结晶	171
8.5.4 个别蛋白质的分离和纯化	172
8.6 糖类的制备	175
8.6.1 一般分离 纯化方法	175
8.6.2 制备不同糖类的特殊方法	175
8.7 核酸的制备	177
8.7.1 一般分离纯化方法	177
8.7.2 制备各种核酸的特殊方法	178
8.8 脂类的制备	180
8.8.1 一般分离纯化方法	180
8.8.2 一般抽提 纯化步骤	181
8.8.3 制备脂类的特殊方法	181
8.9 引用的文献	184
8.10 深入研究用的参考文献	185
第九章 酶学	186
9.1 酶作用的动力学和理论	187
9.2 反应初速度 v_i 的测定	188
9.3 酶反应与pH的关系	189
9.4 酶反应与温度的关系	189
9.5 酶活力的测定	190
9.6 酶的米氏常数 K_m 最大反应速度 V_m 和转换数 k_2 的测定	192
9.7 酶的抑制作用	195
9.7.1 竞争性抑制作用	195
9.7.2 非竞争性抑制作用	196
9.7.3 混合抑制作用	197
9.7.4 反竞争性抑制作用	198
9.8 不遵循米氏动力学的别构酶	200
9.9 酶的专一性	201
9.10 引用的文献	201
9.11 深入研究用的参考文献	202

第十章 生物分子的结构分析	203
10.1 寡糖和多糖的结构测定	203
10.1.1 单糖组成的测定	204
10.1.2 寡糖结构的测定	204
10.1.3 多糖结构的测定	210
10.2 肽和蛋白质的一级结构测定	213
10.2.1 多肽链的形成和分离	213
10.2.2 蛋白质纯度的测定	213
10.2.3 氨基酸组成测定	214
10.2.4 末端分析	214
10.2.5 肽键裂解的特殊方法	216
10.2.6 肽的分离	218
10.2.7 肽的顺序分析	218
10.2.8 由重叠肽导出蛋白质的完整顺序	221
10.3 核酸结构的测定	221
10.3.1 DNA 的分离 纯化和克隆	222
10.3.2 DNA 的酶法裂解和限制性内切酶裂解图谱	223
10.3.3 DNA 的电泳分离及纯度鉴定	225
10.3.4 顺序分析的战略	225
10.3.5 大核酸完整顺序的导出	234
10.4 脂类结构的测定	234
10.4.1 脂类专一裂解成它的组成部分	236
10.4.2 脂成分的测定	236
10.4.3 蛋黄磷脂酰胆碱的鉴定——一个分析脂的例子	238
10.5 引用的文献	240
附录 A: 生化分析、生化方法和生化制备的文献资料来源	242
附录 B: 氨基酸、缩写和 DNA 三联码	244
附录 C: 某些市售限制性核酸内切酶及其 DNA 顺序专一性	245
附录 D: 制备不同浓度硫酸溶液用表	246
常用生物化学物质俗名缩写	247

第一章 实验数据的分析和报告

在科学方法中，人们用设计实验来回答一个问题或者给一个假说增加重要性和提供证据。实验方法常常涉及在一个量改变时测量另外一个量。例如，研究酶的一个经典实验是测定反应物浓度的变化对酶催化反应初速度的影响。实验要求测量反应初速度或速率，这就需要收集数据。作为实验结果所收集的数据和所获得的具体数字的重要性已经被 Lord Kelvin (William Thomson) 做了简明扼要的表述：当你能够测量而且能用数字表示你正在说的事情的时候，你就理解了它。当你不能用数字表示它的时候，就意味着你的知识是贫乏的，不能令人满意的。或许这可能是知识的开端，但在你的头脑中还没有达到科学的阶段。

在第一章中，我们要讨论实验数据的记录和处理，数据的误差和精度的分析，图表中的数据表示，对照和空白的准备，命名法的一般规则以及实验报告或研究报告的书写。

1.1 实验数据的记录和处理

1.1.1 有效数字

实验数据的收集仅仅是实验工作的一部分。处理和解释实验数据也同样是重要的。在实验数据的使用中，也必须小心谨慎，既不要超越测量的可靠性，也要充分利用数据的准确度。进行这样的判断是有准则可供使用的。实验者应该记录到可以准确测量的数字，最后一位数或者测量的最小增量是真实值的一种估计。这种方法叫作有效数字法。例如，用分析天平称量从细胞膜提取的脂的干样，记录的重量为 1.973g，则说这个测量有四位有效数字。最后一位数，3，是估计值。如果进行重复称量，假定天平能准确称量 1mg (0.001g)，那么可能得到的数值是 1.972g 或 1.974g。就这种情况而言，测量的有效数字位数是由所用天平的准确度决定的。(如果所称样品的重量为 1.970g，那么测量仍然含有四位有效数字，因为 0 是测量到的一个数字。)

考察称量脂重的另一种方式是：数 1.973g 的准确度为 0.001g 或 $0.001/1.973$ ，即 1973 份中的 1 份。用百分数表示则为： $1/1973 \times 100 = 0.05\%$ 。可以说称量的准确度是 $\pm 0.05\%$ 。在这个例子中，我们仅仅考虑了准确度的限制，而没有考虑由于其它实验误差所造成的影响。在 1.2 节中我们将考虑随机误差效应。

在涉及具有不同有效数字测量的计算中，对于如何使用有效数字已有确定的规则。

乘：两个或更多个测量值的乘积只能含有与有效数字最少的那个乘数一样多的有效数字。例如， $5.17\text{ml} \times 1.973\text{g/ml} = 10.20041\text{g}$ 或 10.2 (取三位有效数字)，因为虽然干重 (1.973g) 含有四位有效数字，但测量的体积 (5.17ml) 只含三位有效数字，是控制有效数字的一个数。

除：两个被测量的商只能有与含有最少有效数字那一项相同数目的有效数字。例如， $139.7 \mu\text{mol} \div 2.67\text{min} = 52.322 \mu\text{mol/min}$ 这个数应该取为 $52.3 \mu\text{mol/min}$ ，只有三位有效数字，因为含三位有效数字的 2.67min 是控制数。

正确确定有效数字位数的另一种方法是考察两次测量的各自偏差。在上面除法的例子中，偏差为 $0.1 \mu \text{ mol} / 139.7 \mu \text{ mol}$ 或 $1/1397$, $0.01 \text{ min} / 2.67$ 或者 $1/267$ 。那么，结果应当和最大的偏差具有相同的数量级，即是 $1/523$ ，而不是 $1/52322$ 。

加或减：两次测量的和或差的准确度不能超过任何单独测量的最小准确度。结果的有效数字一定要根据和或差的每一项的有效数字来定。例如，如果 1.5 ml 和 0.51 ml 相加，和为 2.01 ml ，那么最后一位数“1”不是有效的，因为 1.5 ml 在百分位上没有数。答案必定舍为 2.0 ml 。然而，假如装着样品的烧瓶重 4.199 g ，烧瓶本身重 3.387 g ，那么样品重应记为 0.812 g 。由于减数和被减数取到 0.001 g 或 1 mg ，因而，写出的答案 ($4.199 - 3.387 = 0.812$) 是可以接受的。应注意，差只有三位有效数字，而每一测量含有四位有效数字。

有两点需要进一步考虑：是否在计算的每一步都要舍掉非有效数字？一个合理的办法是使一个非有效数字通过一系列计算，只是在最后的答案中舍到有效数字的正确位数。可是，如果唯一的非有效数字是5怎么办？例如， $9.92 \text{ m mol} / \text{ml} \times 3.00 \text{ ml} = 29.75 \text{ m mol}$ 。对于这种情况，没有明确的规则，因而必须采取一致的办法，要么在所有的情况中都进上去，要么在所有的情况中都舍下来。如此， 29.75 m mol 应当进到 29.8 m mol ，或舍到 29.7 m mol 。如果5出现在一系列计算的中间一步，则应把它带到最后的答案并把它处理掉。

1.1.2 科学计数法

容易发生的有关有效数字的混淆可能出现在像下面的几个数中： 6100 mm , 0.00412 mol , 0.10 g 。然而，这些数可用1和10间的一个数与10的多少次幂的乘积来表示： 6100 为 $6.1 \times 10^3 \text{ mm}$, 0.00412 mol 为 $4.12 \times 10^{-3} \text{ mol}$ ，和 0.10 g 为 $1.0 \times 10^{-1} \text{ g}$ 。在头两个例子中，零不是有效数字，只起给小数点标位的作用。在第三个例子中，零仍然存在，因为它表明测量准确到第三个小数位或到 0.001 g 。

1.1.3 单位

国际测量系统，Système International d'Unités，缩写为SI，是基于MKS(米·千克·秒)系统。表1-1中列的是SI的基本单位。虽然千克是质量的基本单位，但是克也用的比较多。其它的SI单位是由这些基本单位派生的：例如，牛顿(N是 $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)为力的单位，焦耳(J是 $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$)是能量单位。像大气压，摄氏温度等一些非SI单位仍然继续使用。

人们常常使用复合和亚复合单位。在表1-2中列出了代表复合单位和亚复合单位的前缀。把一个前缀直接加到一个基本单位上，就得到了像毫秒(ms)，毫微摩尔(n mol)和微米($\mu \text{ m}$)这样一些缩写。表1-3列出了一些常用的基本测量单位。

表1-1 国际测量系统的基本单位

量	单位	缩写	量	单位	缩写
长度	米	m	温度	开尔温	K
质量	千克	kg	电流	安培	A
时间	秒	s	物质质量	摩尔	mol
			放射性	贝克勒	Bq

表 1-2 复合单位与亚复合单位的前缀

量	前缀	缩写	量	前缀	缩写
10^{12}	tera(垓)	T	10^{-3}	milli(毫)	m
10^9	giga(京)	G	10^{-6}	micro(微)	μ
10^6	mega(兆)	M	10^{-9}	nano(毫微)	n
10^3	kilo(千)	k	10^{-12}	Pico(微微)	P
1	——	——	10^{-15}	femto(毫微微)	f
10^{-1}	deci(分)	d	10^{-18}	atto(微微微)	a
10^{-2}	centi(厘)	c			

任何测量的量一定要包括测量单位。因此，“径长 = 10.0”是不能接受的，而“径长 = 10.0cm”是完整的表达。在进行数字计算时，最好让所有的数带上单位，然后再把所有的复合和亚复合单位转化成相同的基本单位。因此，在单一的计算中，不是把摩尔和毫摩尔或克和毫克混着用，而最好把所有的量转变成摩尔或毫摩尔(克或毫克)，然后再进行计算，在适当地方消掉某些单位得到有意义的最后结果。作为一个例子，让我们测定溶液中醇脱氢酶的摩尔浓度(M)，它的浓度是 10mg/ml。该酶的质量是 150 000g/mol。

$$\begin{aligned} \text{浓度} &= \frac{10\text{mg/ml} \cdot 1\text{g}/10^3\text{mg}}{1.5 \times 10^5\text{g/mol}} = \frac{10 \times 10^{-3}\text{g/ml}}{1.5 \times 10^5\text{g/mol}} \\ &= 6.7 \times 10^{-8} \frac{\text{mol}}{\text{ml}} \cdot \frac{10^3\text{ml}}{\text{L}} = 6.7 \times 10^{-5}\text{mol/L} = 6.7 \times 10^{-5} \text{M} \end{aligned}$$

表 1-3 基本的测量单位

名称	符号	定义	名称	符号	定义
长度单位			克	g	10^{-3}kg
米	m	基本单位	毫克	mg	10^{-6}kg
千米	km	10^3m	微克	μg	10^{-9}kg
厘米	cm	10^2m	毫微克	ng	10^{-12}kg
毫米	mm	10^3m	时间单位		
微米	μm	10^{-6}m	秒	s	基本单位
毫微米	nm	10^{-9}m	毫秒	ms	10^{-3}s
埃	\AA	10^{-10}m	分	min	60 s
体积单位			小时	h	60 min
升	l	基本单位	天	d	24 h
分升	dl	10^{-1}l	月	mo	28--31 天 d
毫升	ml	10^{-3}l	年	yr	12 月
微升	μl	10^{-6}l	放射性单位		
质量单位			贝克勒	Bq	每秒 1 个蜕变(dps)
千克	kg	基本单位	居里	Ci	$3.7 \times 10^{10} \text{Bq}$