

● 医学成人高等学历教育专科教材 ●

生物化学

主 编 李亚娟 李 萍 闻宏山



人民军医出版社

•医学成人高等学历教育专科教材•

生 物 化 学

SHENGWU HUAXUE

主 编 李亚娟 李 萍 闻宏山

副主编 张 动 欧钢卫 陈治文
岳秀兰

编 者 (以姓氏笔画为序)

王桂云 王桂兰 田丽梅

任中秀 李 萍 李亚娟

吴莉利 谷兆侠 初彦辉

陈治文 张 动 张丽莉

岳秀兰 孟令云 欧钢卫

人 民 军 医 出 版 社

北 京

(京)新登字 128 号

图书在版编目(CIP)数据

生物化学/李亚娟等主编. —北京:人民军医出版社,1999.2

医学成人高等学历教育专科教材

ISBN 7-80020-867-2

I. 生… II. 李… III. 生物化学-医学-成人教育:高等教育-教材 IV. Q5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 30544 号

人民军医出版社出版

(北京市复兴路 22 号甲 3 号)

(邮政编码:100842 电话:68222916)

北京京海印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所发行

*

开本:787×1092mm 1/16·印张:18.75·字数:449 千字

1999 年 2 月第 1 版 1999 年 2 月(北京)第 1 次印刷

印数:00001~10100 定价:20.00 元

ISBN 7-80020-867-2/R·796

[99 秋教目:5436-7]

(购买本社图书,凡有缺、倒、脱页者,本社负责调换)

医学成人高等学历教育专科教材 编审委员会名单

主任委员 郑宗秀

常务副主任委员 高体健

副主任委员 (以姓氏笔画为序)

王南南	王庸晋	刘文弟	刘湘斌	孙新华
李鸿光	何宏銓	余满松	张 力	金东洙
胡永华	郝瑞生	闻宏山	高永瑞	常兴哲
程本芳				

委员 (以姓氏笔画为序)

马洪林	马槐舟	王南南	王庸晋	王德启
左传康	司传平	刘文弟	刘晓远	刘湘斌
孙新华	纪道怀	李治淮	李鸿光	何宏銓
余满松	辛 青	张 力	张凤凯	金东洙
郑宗秀	赵启超	赵富玺	胡永华	郝瑞生
闻宏山	钱向红	倪衡建	高永瑞	高体健
常兴哲	韩贵清	董艳丽	程本芳	雷贞武

医学成人高等学历教育专科教材

学科与主编名单

1.《医用化学》	涂剑平	郑信福	杨洁茹
2.《医学遗传学》	王德启	孙惠兰	杨保胜
3.《系统解剖学》	杨镇洙	丁文龙	郭志坤
4.《局部解剖学》	杨文亮	秦登友	韩东日
5.《组织胚胎学》	王淑钗	朱清仙	顾栋良
6.《生物化学》	李亚娟	李 萍	闻宏山
7.《生理学》	金秀吉	周定邦	李东亮
8.《病理学》	和瑞芝	王 斌	张祥盛
9.《病理生理学》	张建龙	王佐贤	赵子文
10.《药理学》	孙瑞元	曹中亮	于肯明
11.《医学微生物学》	赵富玺	姜国枢	
12.《医学免疫学》	高美华	许化溪	
13.《人体寄生虫学》	陈兴保	仇锦波	严 涛
14.《预防医学》	胡怀明	郝恩柱	王洪林
15.《医学统计学》	袁兆康	马洪林	
16.《诊断学》	汪及元	黄正文	马国珍
17.《内科学》	王庸晋	黄永齐	
18.《外科学》	席鸿钧	周荣科	程庆君
19.《妇产科学》	雷贞武	蔡莉珊	
20.《儿科学》	郭学鹏	贾汝贤	
21.《传染病学》	乔汉臣		
22.《眼科学》	李贺敏		
23.《耳鼻咽喉科学》	蔡一龙		

- | | |
|----------------|-------------|
| 24.《口腔科学》 | 杨佑成 王海潮 |
| 25.《皮肤性病学》 | 张信江 |
| 26.《神经病学》 | 苏长海 |
| 27.《精神病学》 | 成俊祥 吕路线 |
| 28.《急诊医学》 | 刘仁树 严新志 |
| 29.《医学影像学》 | 廉道永 |
| 30.《中医学》 | 韩贵清 刘云峣 陈忠义 |
| 31.《护理学概论》 | 陈继红 李玉翠 计惠民 |
| 32.《医学心理学》 | 张开汉 |
| 33.《医学伦理学》 | 郑宗秀 |
| 34.《医学文献检索和利用》 | 常兴哲 |
| 35.《医学写作》 | 高体健 刘雪立 |
| 36.《医师接诊技巧》 | 高体健 杨盛轩 李永生 |

前 言

为了深化教育改革,提高教学质量,适应医学成人高等教育的需要,我们参照国家教委对有关生物化学的基本要求,结合各校在医学成人教学中的实践经验,由牡丹江医学院、新疆医学院、蚌埠医学院等 13 所院校编写了本教材。全书共分十八章,包括生物高分子蛋白质、核酸及酶的结构与功能,糖、脂类、蛋白质及核酸等的物质代谢,基因信息和细胞间信息的传递与调控,以及与临床密切相关的血液生化、肝胆生化、钙磷代谢和营养生化四部分。

医学成人高等教育的任务主要是培养实用型高级医学专门人才。因此,我们在编写本教材时,结合当前生物化学发展趋势和成人特点,对教学内容的深度和广度作了调整,力求做到内容精炼,既有基本理论知识,又包含较成熟的新进展和与临床密切相关的内容,使教材具有系统性、逻辑性,由浅入深,层次清楚。

本书在编写过程中,虽经多次研讨与修改书稿,反复审阅稿件,但由于水平与时间关系,难免有不当及错误之处,望同行不吝指教。

李亚娟 李 萍 闻宏山

1998 年 5 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 生物化学的任务和内容	(1)
第二节 生物化学与医学的关系	(3)
第二章 蛋白质化学	(5)
第一节 蛋白质的分子组成	(5)
第二节 蛋白质的分子结构	(10)
第三节 蛋白质的理化性质	(16)
第四节 蛋白质的分类	(18)
第三章 酶	(19)
第一节 概述	(19)
第二节 酶的结构与功能	(20)
第三节 酶促反应动力学	(24)
第四节 酶的分类与命名	(32)
第五节 酶与临床医学的关系	(33)
第四章 糖代谢	(38)
第一节 糖的消化和吸收	(38)
第二节 糖的分解代谢	(39)
第三节 糖原的合成与分解	(51)
第四节 糖异生作用	(55)
第五节 血糖	(58)
第六节 糖代谢紊乱	(61)
第五章 生物氧化	(63)
第一节 概述	(63)
第二节 生物氧化中二氧化碳的生成	(66)
第三节 生物氧化中水的生成	(67)
第四节 生物氧化中能量的转变	(74)
第五节 非线粒体氧化体系	(83)
第六章 脂类代谢	(86)
第一节 脂类的生理功能及消化与吸收	(86)
第二节 脂肪的代谢	(88)
第三节 磷脂的代谢	(102)
第四节 胆固醇的代谢	(106)
第五节 血浆脂蛋白的代谢	(113)
第七章 氨基酸代谢	(119)

第一节	氨基酸的来源	(119)
第二节	氨基酸的一般代谢	(121)
第三节	氨基酸的特殊代谢	(128)
第八章	核酸化学与核苷酸代谢	(137)
第一节	核酸的组成	(137)
第二节	核酸的分子结构	(141)
第三节	核苷酸的代谢	(148)
第四节	核苷酸代谢与医学的关系	(154)
第九章	复制	(157)
第一节	参与 DNA 复制的酶类	(158)
第二节	DNA 复制过程	(161)
第三节	逆转录过程	(162)
第四节	DNA 的损伤与修复	(163)
第十章	转录	(166)
第一节	模板和酶	(166)
第二节	转录过程	(168)
第三节	转录后的修饰	(172)
第十一章	翻译	(175)
第一节	参与蛋白质生物合成的物质	(175)
第二节	蛋白质生物合成的过程	(178)
第三节	翻译后加工	(181)
第四节	蛋白质生物合成与医学的关系	(182)
第十二章	基因表达调控	(184)
第一节	原核生物基因表达调控	(184)
第二节	真核生物基因表达调控	(189)
第三节	癌基因	(196)
第十三章	基因重组与基因工程	(201)
第一节	自然界的基因重组	(201)
第二节	基因工程	(203)
第三节	聚合酶链反应	(210)
第四节	基因工程与基因扩增在医学上的应用	(213)
第十四章	细胞间信息传递	(217)
第一节	细胞间信息传递途径	(217)
第二节	信息分子与受体	(218)
第三节	主要信息传递途径	(222)
第十五章	血液	(231)
第一节	血液的化学成分	(231)
第二节	红细胞的代谢	(234)
第十六章	肝胆生化	(241)

第一节	肝脏在物质代谢中的作用·····	(241)
第二节	肝脏的生物转化作用·····	(244)
第三节	胆汁酸的代谢·····	(249)
第四节	胆色素代谢·····	(251)
第五节	肝功能检查·····	(257)
第十七章	钙磷代谢·····	(259)
第一节	钙磷的含量、分布及生理功能·····	(259)
第二节	钙磷的一般代谢作用·····	(260)
第三节	钙磷代谢的调节·····	(263)
第四节	钙磷代谢失常·····	(266)
第十八章	营养生化基础·····	(269)
第一节	营养和营养需要·····	(269)
第二节	能量与基础代谢·····	(271)
第三节	食物蛋白质的营养价值·····	(272)
第四节	微量元素·····	(273)
第五节	维生素·····	(276)

第一章 绪 论

生物化学(biochemistry)是从分子水平研究活细胞及生物体的化学组成和生命活动过程中的化学变化及其规律的一门科学。其本质是从分子水平探讨生命的奥秘。

医学生学习的生物化学是以人体为主要研究对象,也称人体生物化学。

第一节 生物化学的任务和内容

一、生物化学的任务

生物化学的任务是研究生物体的化学组成、生物分子的结构与功能、生物体的物质代谢及其调控,并从分子水平阐明生命活动的机制,揭示生命现象的本质,从而为人类健康、生产和生活服务。

二、生物化学的发展

生物化学的研究有 100 多年的历史。18 世纪中期,瑞典化学家 Scheele 研究了生物体(植物、动物)各种组织的化学组成。Lavoisier 于 1785 年证明,在呼吸过程中,吸进的氧气被消耗,呼出二氧化碳,同时放出热能。1828 年德国化学家 Wohler 在实验室里,将无机物氰酸铵合成了有机物尿素。德国著名化学家 Fischer 应用有机物化学的方法对生物体内的糖类、脂类、蛋白质、氨基酸等化合物进行了比较详尽的研究,他确定了蛋白质是由小分子的构件分子(building block molecule)氨基酸通过肽键连接起来,后来,他又成功地用化学方法合成了由 18 个氨基酸组成的肽,在酶与底物的相互作用上提出了“锁钥”学说,证明了酶催化的高度特异性。他还首先确定了嘌呤和嘧啶的结构。而另一位德国的生理学家 Hoppe Seyler 对血液、软骨、脓液和其他生物组织进行了大量的化学分析,成功地从血液中分离出血红蛋白并制成结晶。这一阶段主要是客观地描述生物体的化学组成,习惯上称为叙述生物化学阶段。

应该提及的是,我国古代劳动人民在饮食、营养、医、药等方面的创造和发明,也在实践上为生物化学的诞生和萌芽作出了奉献。例如,早在公元前 23 世纪夏禹时,仪狄已能作酒。以曲为媒使五谷为酒,就是利用酒母作为媒介物,促进谷物中糖类转化为酒。公元前 12 世纪,已能运用发酵的原理,运用酶的作用,制造酱、醋等食品。公元前 2 世纪汉淮南王刘安会制豆腐,说明我们祖先在当时已会从豆类中提取蛋白质。公元 4 世纪的晋代,用含碘丰富的海藻酒作为医治瘰病(缺碘引起的地方性甲状腺肿)的特效药。公元 7 世纪,唐代孙思邈则首先用富含维生素 A 的猪肝治雀目。用富含维生素 B₁ 的车前子、防风、杏仁、大豆、槟榔等治疗脚气病。公元 10 世纪起,我国开始用动物的脏器治疗疾病,例如用紫河车(胎盘)作强壮剂,用蟾酥(蟾蜍皮肤疣的分泌物)治创伤,羚羊角治中风,可见古人对含内分泌物质的脏器在临床上的应用,已有一定的感性认识。明朝李时珍(1522~1596 年)所著的《本草纲目》中,详细记载了人体的血液、精液、乳汁、尿、粪等体液、分泌物和排泄物的性质。综上所述,我国古代在生物化学的发

展上,做出了积极的贡献。

细胞内的物质代谢是动态的化学变化过程,它随着酶的发现和深入研究而向前发展。1926年 Sumner 从刀豆提纯了脲酶,制成结晶纯品,首次证明酶的化学本质是蛋白质。1932年英国化学家 Krebs 等人提出了合成尿素的鸟氨酸循环的多酶反应途径。1937年 Krebs 又公布了三羧酸循环的研究成果,这是糖、脂类、氨基酸彻底氧化的多酶反应途径。1940年德国生物化学家 Embden 和 Meyerhof 公布了糖酵解途径。随后,脂肪酸氧化和核苷酸代谢等途径也相继被阐明。在这一时期,我国生物化学家吴宪等提出的蛋白质变性学说,是当时最完备的学说,其基本论点至今仍然是正确的。他在血液化学方面创立的无蛋白血滤液的制备方法及血糖的测定等方法,迄今还为人们所采用。20世纪上半叶,体内各种主要物质的代谢途径均已基本研究清楚,人们将这个时期称为动态生物化学阶段。

1953年 Watson 和 Crick 提出了 DNA 分子结构的双螺旋模型,首次从分子水平揭开了遗传的秘密。与此同时, Sanger 发现了胰岛素分子中氨基酸的排列顺序,揭示了多肽链中氨基酸的特定序列是蛋白质分子结构的重要特征。1965年我国王应睐等人用化学方法合成了有生物活性的牛胰岛素,实现了世界上首次人工合成蛋白质。1983年王德宝等人用化学方法合成了有生物学功能的酵母丙氨酸转运核糖核酸,标志着我国生物化学的研究处于世界领先水平。70年代 DNA 重组技术的研究使人类开始用基因工程解决 21 世纪面临的各种难题。

三、人体生物化学研究的主要内容

(一)人体的化学组成及生物分子

1. 元素组成 构成人体的元素主要有碳、氢、氧、氮、钙、磷、钾、硫、钠、氯、镁、铁等,此外尚有占体重 0.01% 以下的微量元素,如:锌、铜、硒、锰、碘、钴、钼、氟、钒、铬、镍、锶、硅等。

2. 化合物

(1)水:约占人体体重的 55% ~ 67%。

(2)有机物:人体内的有机物主要有蛋白质(约占体重的 15% ~ 18%)、脂类(约占体重的 10% ~ 15%)、糖类(约占体重的 1% ~ 2%)、核酸(约占体重的 2%)等,它们都是大而复杂的高分子化合物,称为生物分子。

(3)无机盐:约占体重的 4% ~ 5%。

(二)物质代谢及调节

物质代谢又称新陈代谢,是生命现象的最基本特征。人体的物质代谢主要包括糖、脂类、蛋白质、水和无机盐等的代谢。机体不断从环境中摄取上述营养物质,经过将生物分子消化成小分子化合物如氨基酸、单糖、甘油、脂肪酸而吸收入体内。进入组织细胞内的营养物质经过合成代谢和分解代谢以及伴随着能量的释放和利用、物质间的相互转化,构成了机体的代谢过程。物质代谢的调节,包括酶的调节、激素的调节和神经-体液体的调节使机体更适应于环境的变化。

(三)结构与功能

物质的结构与功能密切相关。如:DNA 分子中碱基的排列顺序,决定了蛋白质多肽链氨基酸的排列顺序。近年来对蛋白质、核酸、酶等生物分子以及生物膜的结构与功能研究进展十分迅速,这对我们了解亚细胞结构和功能、掌握和认识细胞的相互识别、接触抑制、细胞间的粘合、信息传递及抗原性十分重要。

(四)遗传信息及其表达

DNA 是生物遗传的物质基础。DNA 通过复制、转录和翻译,从 DNA 到蛋白质,用基因的遗传信息在细胞内合成有功能意义的各种蛋白质,进行基因表达。

第二节 生物化学与医学的关系

生物化学是现代医学发展的重要支柱,是医学实践和医学科学研究的重要理论基础和手段,而医学又为生物化学的发展开辟了广阔道路。

一、生物化学与医药卫生各学科的关系

生物化学是从有机化学及生理学发展起来的一门边缘学科。至今,生理学仍运用生物化学的知识和方法以解释许多生理现象。

在疾病的防治中起重要作用的分子免疫学,主要采用了生物化学的原理及技术手段。

微生物学在研究病原微生物的代谢以及防治方面都要应用生物化学的理论和技術。

近代药理学往往以酶的活性、激素的作用及代谢途径等为其发展的依据,在研究药物的代谢转化、药物与生物分子相互作用机制以及生化药物的临床运用中都离不开生物化学。

病理生理学运用生物化学的原理及方法研究生理功能的失调及代谢紊乱,从分子水平阐述疾病发生的病因及发生、发展规律。

组织学技术与生物化学技术的结合产生了组织化学技术。

毒理学所研究和阐明的内容,就是毒物作用于机体的生物化学反应及防治。

当前,由于医药卫生各学科的研究逐渐深入至分子水平,与生命科学相关的各学科之间旧界限已被打破,生物化学逐渐渗透到各有关学科内,在它们中处于十分重要的地位。

二、生物化学与医学的关系

未来的 21 世纪将是医学和生命科学的新世纪,原有的医学模式将完全被生物—心理—社会—环境医学模式所代替;基础医学将向分子量子化的微观研究和生物圈、宇宙与人群之间的宏观领域研究发展;分子生物学技术和信息技术可能成为医学的主导技术,从而引起疾病的诊断、治疗、康复一系列技术的更新和变化。

(一)生物化学与诊断

生物化学为临床医学提供了大量的现代诊断技术,如:通过测定血清酶及同工酶谱、血液化学成分测定,大大提高了疾病的诊断水平。随着分子遗传学和医学分子生物学的发展,基因诊断技术不仅用于产前诊断、遗传疾病的诊断,而且由于癌基因的发现,探讨控制癌基因的激活或异常表达已成为当前癌症研究的热点。

(二)生物化学与治疗

如生化药物和基因药物在治疗危害人类的新陈代谢疾病、内分泌腺疾病,抗病毒、抗感染、抗肿瘤及预防乙型肝炎方面都有着物美价廉的作用。利用基因重组技术,以恢复糖尿病病人生产胰岛素的能力,补偿某些病人的遗传缺陷,以治疗多种遗传病等,都会在不远的将来付诸于医疗实践。

(三)生物化学与保健、康复

人类的营养素可分为空气、水、糖类、脂类、蛋白质、无机盐及维生素等七类。运用营养生的知识,指导人们合理均衡摄取营养、甚而食疗,对抵御疾病、延缓衰老、保证身体健康、使病人病体早日康复有重要的作用。此外,利用基因工程生产优质蛋白、优质水果等显然对人类健康是有利的。

综上所述,生物化学是一门重要的医学基础课程,医学院校的学生必须学好这门课程。

(李亚娟 吴莉利)

第二章 蛋白质化学

蛋白质(protein)是生命的物质基础,是组成一切细胞和组织的重要成分。从最低等的病毒到人类,凡是生物体无不含有蛋白质,蛋白质约占人体干重的45%。蛋白质种类繁多,但其基本组成单位均为氨基酸,氨基酸在不同蛋白质中出现的种类、数量和排列顺序不同,如同26个英语字母可组成成千上万个单词和句子一样,组成了成千上万种不同的蛋白质,生物界蛋白质的种类估计在 $10^{10} \sim 10^{12}$ 之间。每种蛋白质各具有不同的特殊功能,例如:体内新陈代谢所进行的各种化学反应几乎都需要酶的催化,酶是蛋白质;参与物质代谢调节的蛋白质,如:胰岛素、生长激素等;免疫球蛋白、干扰素对机体的免疫作用以及其它诸如运输、肌肉收缩、血液凝固、损伤修复、生长、繁殖、遗传、变异以及遗传信息的调控、细胞膜通透性等生命现象均与蛋白质有密切关系。近代分子生物学的研究还表明,高等动物的记忆、识别、思维、感觉等都与蛋白质有关。

第一节 蛋白质的分子组成

一、蛋白质的元素组成

大多数蛋白质的元素组成很接近,都含碳(50%~55%)、氢(6%~8%)、氧(19%~24%)、氮(13%~19%),部分蛋白质含硫(0~4%),有些蛋白质含磷或金属元素铁、铜、锰、钴、钼等,个别蛋白质含有碘。

蛋白质元素组成的特点是含氮,各种蛋白质所含氮量相近。蛋白质的平均含氮量约为16%(13%~19%),动植物组织内的含氮物质以蛋白质为主,所以只要测出生物样品中的含氮量,就可以大致算出样品中蛋白质的含量。

$$\begin{aligned}\text{样品中蛋白质含量} &= \text{样品含氮量} \times \frac{100}{16} \\ &= \text{样品含氮量} \times 6.25\end{aligned}$$

上式中的6.25为含氮量换算成蛋白质含量的换算系数。

二、蛋白质的组成单位——氨基酸

氨基酸(amino acid)是组成蛋白质的基本结构单位,用酸、碱或蛋白酶水解蛋白质,可以得到20种不同的氨基酸。

(一)氨基酸的结构通式

组成天然蛋白质的20种氨基酸虽然结构各不相同,但它们之间有共性。除了脯氨酸为亚氨基酸外,在 α -碳原子上都有一个氨基和一个羧基,均属于 α -氨基酸,其中除甘氨酸没有不对称碳原子外,其余所有氨基酸的 α -碳原子均为不对称碳原子,故可有L和D两种构型。目前已知的天然蛋白质中的氨基酸(除脯氨酸和甘氨酸外)都是L型氨基酸,即氨基位于 α -碳原子

的左侧。下式为氨基酸通式,其中 R 表示侧链。



D-氨基酸不存在于蛋白质分子中,大多来自细菌产生的抗生素和植物里的生物碱。

(二)氨基酸的分类

自然界存在的氨基酸约 300 余种,但构成蛋白质分子的氨基酸只有 20 种,氨基酸的分类方法有多种,常按侧链的理化性质分类,将 20 种氨基酸分为四类(表 2-1):

1. 侧链具有游离基团的氨基酸(7 种) 其中天冬氨酸和谷氨酸为酸性氨基酸,其侧链上的羧基,在水溶液中能电离出 H^+ 而带负电荷;赖氨酸、精氨酸和组氨酸为碱性氨基酸,其侧链上的氨基、胍基或咪唑基,在水溶液中能结合 H^+ 而带正电荷。
2. 侧链具有非游离基团的氨基酸(4 种) 其侧链有酰胺基或羟基,这些基团有亲水性,但在水溶液中不电离。
3. 侧链为非极性、疏水性的氨基酸(9 种) 侧链有烃链、吲哚环或甲硫基等非极性基团。
4. 碱性侧链氨基酸(3 种) 侧链上的氨基、胍基或咪唑基,在水溶液中能结合 H^+ 而带正电荷。

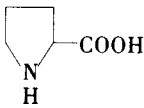
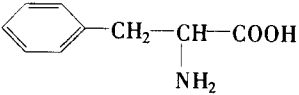
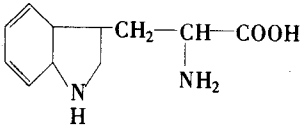
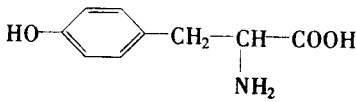
20 种氨基酸的结构差异在于 α-碳原子上的 R 基不同。

以上 20 种氨基酸均有各自的遗传密码,是蛋白质生物合成的基本结构单位,故称之为编码氨基酸。为表达蛋白质结构的需要,氨基酸的名称常使用三字母的缩写符号,有时也使用单字母符号(表 2-1)。

表 2-1 氨基酸的分类

氨基酸名称 及缩写	结 构 式	pK ₁ α-COOH	pK ₂ α-NH ₃ ⁺	pK ₃	pI
1. 非极性侧链氨基酸					
甘氨酸(甘, Gly, G)	$ \begin{array}{c} \text{H}-\text{CH}-\text{COOH} \\ \\ \text{NH}_2 \end{array} $	2.34	9.60		5.97
丙氨酸(丙, Ala, A)	$ \begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{CH}-\text{COOH} \\ \\ \text{NH}_2 \end{array} $	2.34	9.69		6.02
缬氨酸(缬, Val, V)	$ \begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{CH}-\text{CH}-\text{COOH} \\ \quad \\ \text{CH}_3 \quad \text{NH}_2 \end{array} $	2.32	9.62		5.97
亮氨酸(亮, Leu, L)	$ \begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{COOH} \\ \quad \quad \\ \text{CH}_3 \quad \quad \text{NH}_2 \end{array} $	2.36	9.60		5.98
异亮氨酸(异亮, Ile, I)	$ \begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}-\text{CH}-\text{COOH} \\ \quad \quad \quad \\ \quad \quad \text{CH}_3 \quad \text{NH}_2 \end{array} $	2.36	9.68		6.02

续表

氨基酸名称 及缩写	结 构 式	pK ₁ α-COOH	pK ₂ α-NH ₃ ⁺	pK ₃	pI
甲硫氨酸(或称蛋氨酸) (甲硫或蛋, Met, M)	$\text{CH}_3-\text{S}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_2}{\text{CH}}-\text{COOH}$	2.28	9.21		5.50
脯氨酸(脯, Pro, P)		1.99	10.60		6.30
苯丙氨酸(苯丙, Phe, F)		1.83	9.13		5.48
色氨酸(色, Trp, W)		2.39	9.39		5.89
2. 非电离极性侧链氨基酸					
天冬酰胺(天胺, Asn, N)	$\text{H}_2\text{N}-\underset{\text{O}}{\underset{\parallel}{\text{C}}}-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_2}{\text{CH}}-\text{COOH}$	2.02	8.80		5.41
谷氨酰胺(谷胺, Gln, Q)	$\text{H}_2\text{N}-\underset{\text{O}}{\underset{\parallel}{\text{C}}}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_2}{\text{CH}}-\text{COOH}$	2.17	9.13		5.65
丝氨酸(丝, Ser, S)	$\text{HO}-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_2}{\text{CH}}-\text{COOH}$	2.21	9.15		5.68
苏氨酸(苏, Thr, T)	$\text{CH}_3-\underset{\text{OH}}{\text{CH}}-\underset{\text{NH}_2}{\text{CH}}-\text{COOH}$	2.09	9.10		5.60
酪氨酸(酪, Tyr, Y)		2.20	9.11	10.07 苯酚基	5.66
半胱氨酸(半胱, Cys, C)	$\text{HS}-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_2}{\text{CH}}-\text{COOH}$	1.96	8.18 巯基	10.28 α-NH ₃ ⁺	5.07
3. 酸性侧链氨基酸					
天冬氨酸(天, Asp, D)	$\text{HOOC}-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_2}{\text{CH}}-\text{COOH}$	1.88	3.65 β-COOH	9.60 α-NH ₃ ⁺	2.77