

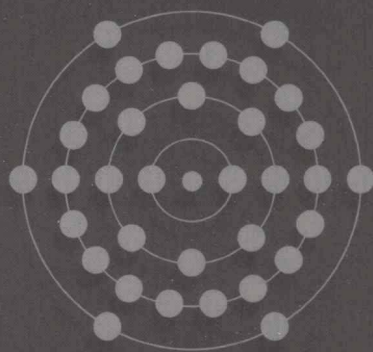
Selenium: Its Chemistry, Biochemistry
and Application in Life Science

硒
的

化学、生物化学
及其在生命科学中的应用
(第二版)

主 编 黄开勋 徐辉碧

副主编 刘 琼 刘红梅



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

Selenium: Its Chemistry, Biochemistry
and Application in Life Science

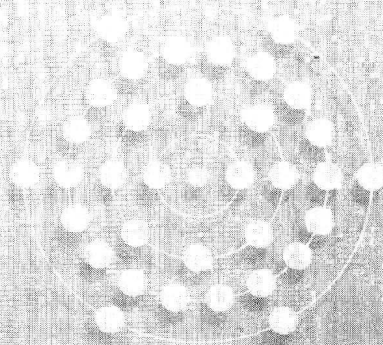
硒
的

化学、生物化学 及其在生命科学中的应用

(第二版)

主 编 黄开勋 徐辉碧

副主编 刘 琼 刘红梅



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

硒的化学、生物化学及其在生命科学中的应用(第二版)/黄开勋 徐辉碧 主编. —武汉: 华中科技大学出版社, 2009 年 6 月

ISBN 978-7-5609-5393-9

I. 硒… II. ①黄… ②徐… III. ①硒-研究 ②硒-微量元素缺乏病 IV. 0613.52
R591.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 084023 号

硒的化学、生物化学及其在生命科学中的应用(第二版) 黄开勋 徐辉碧 主编

责任编辑:胡 芬

封面设计:潘 群

责任校对:刘 竣

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉正风图文照排中心

印 刷:湖北新华印务有限公司

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:27.25

字数:606 000

版次:2009 年 6 月第 2 版

印次:2009 年 6 月第 2 次印刷

定价:58.00 元

ISBN 978-7-5609-5393-9/O · 487

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

《硒的化学、生物化学及其在生命科学中的应用(第二版)》编委

第二版序

倪嘉缙 中国科学院长春应用化学研究所、深圳大学

第一版序

王 夔 北京大学

参编人员(按姓氏笔画排序)

万江陵	华中科技大学	杨建国	中国科学院
甘 璐	华中科技大学	杨祥良	华中科技大学
朱玉山	南开大学	郑文杰	暨南大学
刘红梅	华中科技大学	贺海鹰	华中科技大学
刘俊秋	吉林大学	殷发强	华中科技大学
刘 琼	深圳大学	涂 欢	华中科技大学
何佳文	华中科技大学	高秋华	华中科技大学
肖 奕	华中科技大学	徐辉碧	华中科技大学
周井炎	华中科技大学	黄开勋	华中科技大学
范华汉	华中科技大学	彭 红	华中科技大学
陆 枫	华中科技大学	廖宝凉	华中科技大学
陈春英	中国科学院		

内 容 简 介

本书是在 1994 年出版的《硒的化学、生物化学及其在生命科学中的应用》一书基础上通过增新删旧后写成的。近十几年来,该书有关领域的研究一直在持续发展,特别是在硒的生物化学和分子生物学方面,积累了许多新的知识,这在本书中得到了充分体现。全书共 20 章,分为三个部分。第一部分涉及硒的化学基础,包括硒的无机化学、有机化学、分析化学。第二部分着重介绍了硒的生物化学和分子生物学,包括硒蛋白基因组学、硒蛋白的生物合成、几种重要硒蛋白的研究进展、硒蛋白的生物模拟等。第三部分介绍了硒在生命科学中的应用,包括硒与人体健康、硒与农牧业、硒与环境等。

本书可供高等院校、科研院所相关专业作为研究生和高年级本科生的教学参考书,并可供有关教师、研究人员和相关工作者参考。

第二版序

自 1957 年宣布硒是人类和动物必需的微量元素后,许多科学家对硒在人体内的作用机制进行了深入研究,先后发现了 20 多种硒酶和硒蛋白,其中以谷胱甘肽过氧化物酶和硫氧还蛋白还原酶为代表,在调节细胞氧化还原状态、清除体内产生的过量活性氧物种等方面发挥重要作用。随后,人们将硒的研究进一步发展到对疾病的预防方面。如美国亚利桑纳大学的 Larry Clark 教授进行的硒抗癌人群干预实验,他在对 1 000 多例癌症患者进行长时间补硒后于 1997 年发表了其研究结果:每天补充 200 μg 硒能使癌症患者死亡率下降 50%。该结果使硒与癌症的研究成为一个热点课题。目前,对血硒和谷胱甘肽过氧化物酶的含量与疾病的关系已有许多肯定的认识。我国在硒预防克山病、大骨节病及肝癌等方面所进行的成功试验也是一个范例。

中国既有富硒地区,也有大量的缺硒地区。富硒地区如湖北恩施、陕西紫阳和最近发现的海南省从海口市秀英区石山到永兴土壤含硒量均很高,缺硒地区包括从东北到西南的一条贫硒带。在富硒地区要防止硒中毒,而对广大的缺硒地区则需加强硒对人体健康及对重大疾病相关性的研究。因此硒的研究在我国更具有特殊的作用。

硒与疾病的关系涉及诸多领域,如医学、分子生物学、基因组学及蛋白质组学等。特别是 1986 年 Chamber 和 Zinoni 发现了由终止密码子 UGA 编码的硒代半胱氨酸,成为第 21 种氨基酸,UGA 在解码为硒代半胱氨酸时又需要特殊的 RNA 茎环结构——硒代半胱氨酸插入序列(SECIS)。这些发现从分子生物学角度为研究硒蛋白在体内的形成机制奠定了基础。目前,应用基因组及蛋白质组学研究硒与癌症的关系已有不少报道。国外 2000 年曾出版了硒与人体健康及硒的分子生物学方面的专著(*Selenium: Its Molecular Biology and Role in Human Health*),国内关于硒的专著除了 1994 年出版的《硒的化学、生物化学及其在生命科学中的应用》外尚不多见。这本专著出版后,受到读者和专家的欢迎。在本书售完后的几年中,仍不断有读者去信欲购。近三年,华中科技大学组织国内有关专家撰写了此书。为了使之尽快与读者见面,他们决定将硒蛋白的基因特点、克隆表达、生物功能及生物模拟等方面的论述与 1994 年出版的《硒的化学、生物化学及其在生命科学中的应用》相结合作为第二版。我相信此书的出版将对我国开展硒的分子生物学及硒在生命科学中的应用等具有积极的促进作用,主编嘱余为之序,特书此以志之。

倪嘉缙

2008 年 10 月于深圳

第一版序

微量元素与健康的关系是科学研究的热点,也是平民百姓关心的问题。对一种微量元素的生物必需性、生物活性机理、它与疾病发生发展的关系等等的正确认识是不断发展的,有时甚至是大起大落的。往往一个时期的局部的研究结果会在一般人中间引起误解,而后又为新的认识所澄清。硒曾经被认为是有毒的元素,其后一变为有益而无害的元素,其实都是片面的。这些认识都是从研究中得到的,每一种看法都有事实为依据,不能否定,但每一种看法又都是有条件的。例如,不能笼统地说硒这种元素的生物功能或生物效应如何如何,而应当说明它的某种化合物具有某种作用。即使我们说的某种化合物,如亚硒酸钠,也不能笼统地说它有害还是有益。浓度不同、共存物不同、反应位点不同等都会造成不同的生物效应。我们渐渐认识到,仅从调查统计得到某元素与某种疾病的发病率有相关性,不足以说明它的缺少或过多就是产生这种疾病(或毒性)的原因,必须认识它的化合物如何进入人体,如何通过代谢而转化,在什么部位通过什么反应影响什么生物过程等等之后,才能说清它与健康或疾病的因果关系。因此,研究硒的临床应用,必须与硒的生物化学,甚至是硒的化学结合起来。

对于硒的各种不同化合物的生物功能和生理效应的这种分子机理研究在近年内取得许多进展,在疾病防治方面也有了許多经验,现在对于硒的生物无机化学了解得更多了。徐辉碧教授和华中理工大学的同志们多年来从事这方面研究,成果甚多。现在他们编写这一专著,集国内外这一领域众多研究成果,对化学、生物医学、环境科学等方面的工作人员定能起到广泛的作用。书以此志之。

王 夔

1994 年 4 月

第二版前言

我们于 1994 年出版了本书的第一版。过去几年有不少读者来信或电话求购这本书,由于早已售完而不能满足这些读者。十多年来,硒的生物化学的研究又有了很大进展,尤其是新的硒蛋白的不断发现,它们的功能不断被揭示,硒蛋白的生物合成机理也逐步被阐明,显然对第一版进行重印并不适合。

硒作为一种必需微量元素,与人体健康具有十分密切的关系。我国很多地区缺硒,与缺硒相关的一些疾病曾经严重影响这些地区居民的身体健康。我国也有世界著名的高硒地区,具有丰富的硒资源。硒资源的开发利用,亦是硒在生命科学中的应用的研究内容。过去几十年来,我国许多科学家从事于这个领域,并作出了重要贡献,至今仍然有许多科学工作者耕耘于这个领域。因此,将硒的化学、生物化学及其在生命科学中应用的最新研究进展进行总结显然是一件有意义的工作。正是基于这一考虑我们决定出第二版。

第一版是华中科技大学生物无机化学研究室的成员结合自己的研究编写的。这次再版,除了原来的作者外,还请了国内部分从事硒的生物化学研究的教授参加编写。比较这两个版本,可以看出,第二版中对硒的化学部分增加了最新的进展,如硒的分析测定中加进了新的方法。就全书而言,主要是对硒蛋白及硒的分子生物学研究进展有了较大幅度的增加,这与国际硒的生物医学发展相一致。

本书的再版,得到了倪嘉缙院士的大力支持和指导,他在百忙之中还为本书写序;此外,我们还得到许多同行的支持和帮助,在此我们一并表示诚挚的感谢。

今年刚好是硒的营养作用发现 50 周年,本书的第二版即将交稿,我们谨以本书的再版纪念硒的营养作用发现 50 周年,同时也希望本书的再版对我们国家有关微量元素硒研究领域有所促进。由于硒的化学、生物化学及其在生命科学中的应用涉及面宽、内容丰富,加之编者知识及时间所限,难免存在错误之处,恳请读者指正。

黄开勋

2008 年 10 月

第一版前言

生物微量元素硒(Biotrace element selenium)是目前已知的 14 种必需微量元素之一。近 20 年来,它以旺盛的活力向生命科学各个领域渗透,发展迅速。20 世纪 70 年代,我国用硒(主要是亚硒酸钠)防治克山病取得了重大突破。以杨光圻教授为代表的预防医学科学院、以徐光禄教授为代表的西安医科大学共同荣获国际生物无机化学家协会颁发的 1984 年度 Klaus Schwarz 奖章,这是世界上对研究硒的生物学和医学有突出贡献的专项奖。20 世纪 80 年代,我国用硒防治大骨节病及肿瘤等方面取得了重大进展,例如,医学科学院于树玉教授用硒防治启东县的肝癌取得了从理论到临床应用的硕果。

世界上用硒防治疾病(如肿瘤、心血管病等)已做了不少研究,许多工作仍在进行中。

硒在营养、医药方面的成就,推动了硒的生物化学的确立和长足发展,这突出表现在,近 20 多年来,连续在哺乳动物中发现了四种硒酶。首先是 1973 年美国威斯康星大学 Rotruck 报道的细胞谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px),即通常所说的谷胱甘肽过氧化物酶,第一个硒酶的发现,为硒的生物化学奠定了基础。后来陆续发现的硒酶有血浆谷胱甘肽过氧化物酶、磷脂过氧化氢谷胱甘肽过氧化物酶和 I 型碘甲状腺原氨酸 5'-脱碘酶。硒的生物化学功能从主要是抗氧化作用扩展到对激素的作用,这方面的研究仍在深入发展中。近年来,与硒代半胱氨酸相对应的遗传基因密码子 TGA(mRNA 中的 UGA)在生物体内的发现,使对硒的生物化学本质有了更深刻的认识。与此同时,具有类似硒酶生物活性的小分子有机硒化合物 Ebselen 的出现,为硒的有机化学、药物化学开辟了新的研究领域。硒的痕量分析研究也随之有了较大进展。

近十几年来,我们华中理工大学生物无机化学研究室持之以恒地研究硒的有关基础及应用,特别是系统地研究了硒化合物与活性氧自由基的相互作用,获得了许多有意义的结果,为阐明硒的生理生化功能提供了一定的依据。

为了系统地介绍硒的化学、硒的生物化学及其在生命科学中的应用,以推动这个学科更广泛更深入地发展,我们编写了这本专著。本书收集了国内外的有关最新研究成果,特别是我国在硒研究方面的突出成就,也包括作者自己的系列工作。

本书分为三部分:一是硒的化学,包括无机化学、有机化学、分析化学;二是硒的生物化学,包括硒的生物大分子化合物、硒的代谢、硒与活性氧自由基的作用和硒的毒性;三是硒在医学、药物、农业、环境中的应用。目前,在国内外,系统而全面地把化学和生物化学的基础理论与在生命科学中的实际应用结合而编写的硒的专著还不多见。

本书在编写过程中得到了中国科学院院士王夔教授对编书的指导思想的远见卓识的悉心指点,他还在百忙之中为我们作了序,这些鼓励着我们尽力把书写好。在此,我们对王夔教授表示由衷的感谢。

在初稿完成后,我们请到夏弈明教授、李芳生教授、施文赵教授对书稿进行审阅。他们抽出宝贵的时间,认真细致地进行了审稿,指出了存在的问题,提出了修改意见,这对于提高本书

的质量起到了良好的作用。在此,对以上几位教授表示深深的谢意。

参加本书编写的是华中理工大学化学系生物无机化学研究所的教授、副教授和博士研究生,他们是徐辉碧、周井炎、廖宝凉、范华汉、黄开勋、高秋华、何佳文、刘琼、杨祥良、涂欢、陈春英、贺海鹰、殷发强。这本书的编写体现了集体的智慧。

由于文献浩瀚,又是多学科的交叉,难免有错误和缺点,敬请读者指正。

徐辉碧

目 录

第 1 章 硒的无机化学	(1)
1.1 硫族元素性质概述	(1)
1.2 硒的存在与提取	(1)
1.2.1 硒的发现与存在	(1)
1.2.2 硒的提取	(2)
1.2.3 高纯硒的制取	(2)
1.2.4 硒的用途	(3)
1.3 单质硒的性质	(3)
1.3.1 硒的物理性质	(3)
1.3.2 硒的化学性质	(4)
1.4 硒的化合物	(6)
1.4.1 硒的氢化物	(6)
1.4.2 硒的氧化物	(8)
1.5 硒化镉和硒化镉/硫化锌核-壳量子点	(16)
1.5.1 量子点的制备	(17)
1.5.2 量子点诊断试剂的制备	(18)
1.5.3 前景与展望	(18)
第 2 章 硒的有机化学	(21)
2.1 有机化合物中引进硒原子的常用试剂及方法	(21)
2.1.1 单质硒	(21)
2.1.2 硒化氢	(22)
2.1.3 碱金属硒化物	(23)
2.1.4 常用的亲核硒试剂	(24)
2.1.5 简单的有机硒中间体	(24)
2.2 硒醇及其衍生物	(25)
2.2.1 硒醇	(25)
2.2.2 二硒化物	(27)
2.2.3 次硒酸及其衍生物	(28)
2.2.4 亚硒酸及其衍生物	(30)
2.2.5 硒酸	(32)
2.3 硒醚及其衍生物	(32)
2.4 硒杂环化合物	(33)
2.4.1 硒杂饱和环烷烃	(33)

2.4.2	硒吩·····	(34)
2.4.3	含有硒、氮的杂环·····	(36)
2.4.4	硒取代杂环化合物·····	(39)
2.5	含硒氨基酸·····	(41)
2.5.1	硒代半胱氨酸、硒代胱氨酸及其衍生物·····	(41)
2.5.2	硒代蛋氨酸·····	(43)
2.6	同位素标记硒化合物·····	(44)
2.6.1	同位素标记硒化合物的合成·····	(44)
2.6.2	同位素标记硒化合物在生物化学和放射医学中的应用·····	(47)
2.7	生物活性硒化合物·····	(49)
2.7.1	抗感染作用的硒化合物·····	(49)
2.7.2	作用于中枢神经系统的硒化合物·····	(51)
2.7.3	作用于自主神经系统的硒化合物·····	(52)
2.7.4	抗炎作用的硒化合物·····	(53)
2.7.5	作用于循环系统的硒化合物·····	(53)
2.7.6	抗癌作用的硒化合物·····	(54)
2.7.7	抗辐射损伤作用的硒化合物·····	(55)
2.7.8	含硒类固醇类化合物·····	(56)
2.7.9	抗组织胺作用的硒化合物·····	(56)
2.8	手性硒试剂及其在有机合成中的应用·····	(57)
2.8.1	手性亲电硒试剂的制备及其在有机合成中的应用·····	(57)
2.8.2	手性亲核硒试剂的制备及其在有机合成中的应用·····	(60)
2.8.3	手性硒催化剂及其在有机合成中的应用·····	(61)
第3章	硒的分析测定·····	(64)
3.1	样品的预处理·····	(64)
3.2	荧光光度法·····	(67)
3.3	原子吸收光谱法·····	(68)
3.3.1	石墨炉原子吸收法·····	(68)
3.3.2	氢化物发生原子吸收法·····	(68)
3.4	原子发射光谱法·····	(69)
3.5	原子荧光光谱法·····	(71)
3.6	色谱法·····	(72)
3.6.1	气相色谱法·····	(73)
3.6.2	高效液相色谱法·····	(74)
3.7	加速器质谱法·····	(75)
3.8	电感耦合等离子体质谱法·····	(77)
3.8.1	电感耦合等离子体质谱法·····	(77)
3.8.2	激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱法·····	(80)

3.9 中子活化分析法测定硒	(83)
3.10 硒的形态分析	(85)
3.10.1 电泳分离与检测	(86)
3.10.2 色谱分离与检测	(87)
3.10.3 不同硒形态的鉴别	(92)
3.11 微量含硒蛋白分离检测技术进展	(94)
3.11.1 基于凝胶电泳的含硒蛋白检测技术概述	(94)
3.11.2 LA-ICP-MS 检测凝胶分离后蛋白质中的硒	(95)
3.11.3 Cap HPLC-ICP-MS 和 Nano HPLC-ICP-MS 检测含硒蛋白	(96)
3.11.4 MALDI-TOF-MS 识别含硒蛋白	(97)
3.11.5 Nano HPLC ESI-MS/MS 鉴别含硒蛋白	(98)
3.11.6 存在的问题	(98)
第 4 章 硒蛋白基因组学	(106)
4.1 真核生物硒蛋白基因组学	(106)
4.1.1 真核生物硒蛋白基因中的 SECIS	(106)
4.1.2 果蝇硒蛋白基因组学的研究	(107)
4.1.3 哺乳动物硒蛋白基因组学的研究	(109)
4.1.4 昆虫类物种基因组中硒蛋白的计算机预测	(112)
4.2 原核生物硒蛋白基因组学	(113)
4.2.1 原核生物硒蛋白基因中的 SECIS	(114)
4.2.2 细菌硒蛋白基因组学	(117)
4.2.3 马尾藻类海草硒蛋白基因组学	(122)
4.2.4 古细菌硒蛋白基因组学	(123)
4.3 展望	(125)
第 5 章 硒蛋白生物合成的机理与相关因子	(127)
5.1 硒蛋白生物合成的机理	(127)
5.2 硒蛋白生物合成的相关调控因子	(129)
5.2.1 SelA——硒代半胱氨酸合成酶	(129)
5.2.2 SelB——硒代半胱氨酸延长因子	(132)
5.2.3 SelC——tRNA ^{Sec}	(133)
5.2.4 SelD——硒代磷酸合成酶	(137)
5.2.5 SBP2——SECIS 键合蛋白 2	(141)
第 6 章 谷胱甘肽过氧化物酶	(145)
6.1 细胞谷胱甘肽过氧化物酶(cGPx)	(145)
6.1.1 cGPx 的分布	(145)
6.1.2 cGPx 的晶体结构	(145)
6.1.3 cGPx 的催化过程	(146)
6.1.4 cGPx 在氧化还原调节中的作用	(147)

6.1.5	cGPx 在信号转导中的作用	(148)
6.1.6	cGPx 与肿瘤的关系	(149)
6.1.7	cGPx 与糖尿病的关系	(149)
6.1.8	cGPx 与其他慢性病的关系	(149)
6.2	胃肠道谷胱甘肽过氧化物酶(GPx-GI)	(150)
6.2.1	GPx-GI 的分布	(150)
6.2.2	GPx-GI 的表达调控	(150)
6.2.3	GPx-GI 与胃肠道疾病的关系	(151)
6.2.4	GPx-GI 与转录调控的关系	(152)
6.3	血浆谷胱甘肽过氧化物酶(PGPx)	(153)
6.3.1	PGPx 的性质	(153)
6.3.2	PGPx 的结构	(154)
6.3.3	PGPx 的分布和调控	(154)
6.3.4	PGPx 的功能	(155)
6.4	磷脂氢谷胱甘肽过氧化物酶(PHGPx)	(156)
6.4.1	PHGPx 的分布和结构	(156)
6.4.2	PHGPx 的种类	(157)
6.4.3	非线粒体型和线粒体型 PHGPx 在调控细胞方面的作用	(159)
6.4.4	线粒体磷脂氢谷胱甘肽过氧化物酶作为抗凋亡因子	(160)
6.4.5	PHGPx 与胚胎发育的关系	(161)
6.4.6	PHGPx 与雄性生育的关系	(161)
6.5	生物医学中对 GPx 关注的问题	(162)
6.5.1	GPx 作为生物标志物	(162)
6.5.2	GPx 与肿瘤	(162)
6.5.3	GPx 与神经疾病	(163)
第7章	碘甲腺原氨酸脱碘酶	(169)
7.1	1型碘甲腺原氨酸脱碘酶	(169)
7.1.1	D1 是硒酶的发现	(170)
7.1.2	基因结构、染色体位置、mRNA 和蛋白质性质及组织分布	(170)
7.1.3	亚细胞定位和拓扑学	(172)
7.1.4	酶学性质和构效关系	(173)
7.1.5	D1 合成调节	(175)
7.1.6	D1 失活/降解调节	(178)
7.2	2型碘甲腺原氨酸脱碘酶	(178)
7.2.1	D2 是含硒酶的发现	(178)
7.2.2	基因结构、染色体位置、mRNA 和蛋白质性质及组织分布	(179)
7.2.3	亚细胞定位和三级结构	(181)
7.2.4	酶学性质和构效关系	(182)

7.2.5	D2 合成调节	(183)
7.2.6	D2 降解调节	(184)
7.3	3 型碘甲腺原氨酸脱碘酶	(185)
7.3.1	基因结构、染色体位置、mRNA 和蛋白质性质及组织分布	(185)
7.3.2	亚细胞定位和拓扑学	(187)
7.3.3	酶学性质和构效关系	(187)
7.3.4	D3 合成调节	(187)
7.3.5	D3 降解调节	(188)
7.3.6	三种脱碘酶的相同点	(189)
7.4	碘甲腺原氨酸脱碘酶的主要生物学功能	(190)
7.4.1	维持甲状腺激素内稳态	(190)
7.4.2	胚胎发育	(191)
7.4.3	D2 在促甲状腺激素分泌反馈调节中的作用	(192)
7.5	碘甲腺原氨酸脱碘酶与疾病	(192)
7.5.1	脱碘酶与甲状腺疾病	(192)
7.5.2	低 T_3 综合征中 D1 活性降低	(193)
7.5.3	血管瘤中 D3 过度表达导致消耗性甲状腺功能减退	(193)
第 8 章	硫氧还蛋白还原酶	(200)
8.1	引言	(200)
8.2	TrxR 的基本性质与结构	(200)
8.2.1	硫氧还蛋白系统的基本性质	(200)
8.2.2	硫氧还蛋白还原酶的分布与基因特点	(202)
8.2.3	硫氧还蛋白还原酶的蛋白质结构	(204)
8.3	TrxR 的生物学活性	(205)
8.3.1	催化氧化还原反应	(205)
8.3.2	维持抗氧化剂再生	(207)
8.3.3	防御氧化损伤	(208)
8.3.4	调节细胞生长	(209)
8.3.5	参与信号传导	(209)
8.3.6	调节免疫应答	(211)
8.4	TrxR 与人类健康	(212)
8.4.1	TrxR 与肿瘤	(212)
8.4.2	TrxR 与 AIDS	(213)
8.4.3	TrxR 与其他疾病	(214)
第 9 章	硒蛋白 P	(221)
9.1	硒蛋白 P 的结构	(221)
9.2	硒蛋白 P 的功能及其生物化学性质	(223)
9.2.1	酶的活性	(223)

9.2.2	结合肝素活性	(224)
9.2.3	与重金属离子的结合	(224)
9.2.4	抗氧化作用	(225)
9.2.5	运输硒的功能	(225)
9.2.6	增强精子形成	(227)
9.3	疾病和补硒对血浆硒蛋白 P 水平的影响	(228)
第 10 章	硒蛋白的生物模拟	(231)
10.1	概述	(231)
10.2	硒酶的人工模拟	(232)
10.2.1	GPx 的化学模拟	(232)
10.2.2	化学修饰蛋白质模拟硒酶	(235)
10.2.3	基因工程方法转化蛋白质为含硒酶	(239)
10.3	硒蛋白模拟物抗氧化性质	(240)
第 11 章	硒蛋白相关生物信息二级数据库	(244)
11.1	建立硒蛋白相关生物信息二级数据库的必要性和可行性	(244)
11.2	硒蛋白相关生物信息二级数据库的材料与工具	(244)
11.2.1	硒蛋白相关生物信息二级数据库的数据来源	(244)
11.2.2	硒蛋白相关生物信息二级数据库的开发	(249)
11.3	硒蛋白相关生物信息二级数据库的内容	(253)
11.3.1	硒蛋白相关生物信息二级数据库概况	(253)
11.3.2	硒蛋白相关生物信息二级数据库的功能	(254)
第 12 章	硒的生物效应与活性氧自由基	(263)
12.1	生物体内的氧化损伤	(263)
12.2	非酶硒化合物的抗氧化作用	(264)
12.2.1	硒化合物与脂质过氧自由基的作用	(264)
12.2.2	硒化合物对羟基自由基的作用	(267)
12.2.3	硒化合物与单线态氧的作用	(268)
12.3	硒化合物毒性的自由基机理	(270)
12.4	硒生物效应的活性氧自由基机理	(273)
12.5	活性氧自由基作为第二信使分子在亚硒酸钠诱导的细胞凋亡中的作用	(274)
12.5.1	亚硒酸钠对 SW480 细胞胞内活性氧自由基含量的影响	(275)
12.5.2	NAC、CAT 抑制亚硒酸钠诱导的细胞线粒体膜电位($\Delta\Psi_m$)下降	(276)
12.5.3	NAC、CAT、RR 抑制亚硒酸钠产生的细胞毒性	(276)
12.5.4	NAC、CAT、RR 抑制亚硒酸钠诱导的细胞凋亡	(277)
第 13 章	硒的代谢	(281)
13.1	动物的硒代谢	(281)
13.1.1	动物对硒的吸收	(281)
13.1.2	硒在动物体内的分布	(282)

13.1.3	硒的排泄·····	(283)
13.1.4	动物体内硒代谢的途径·····	(284)
13.2	硒的生物利用度·····	(290)
13.2.1	硒的生物利用度的定义·····	(290)
13.2.2	评估硒生物利用度的方法·····	(292)
13.2.3	影响硒生物利用度的因素·····	(294)
13.3	微生物的硒代谢·····	(295)
13.3.1	硒-硫竞争与取代·····	(295)
13.3.2	还原与氧化·····	(295)
13.3.3	硒代氨基酸·····	(295)
13.3.4	挥发性甲基化化合物的形成·····	(297)
13.4	植物的硒代谢·····	(297)
13.4.1	硫-硒拮抗·····	(297)
13.4.2	硒代氨基酸的形成·····	(298)
13.4.3	挥发性硒化合物·····	(300)
13.5	硒代谢研究的新进展·····	(301)
第 14 章	硒的毒性 ·····	(305)
14.1	动物的硒中毒·····	(305)
14.1.1	家畜的硒中毒·····	(305)
14.1.2	实验动物的硒中毒·····	(306)
14.2	人的硒中毒·····	(308)
14.2.1	职业性硒中毒·····	(308)
14.2.2	地方性硒中毒·····	(308)
14.3	各种硒化合物的毒性·····	(309)
14.4	影响硒毒性的因素·····	(311)
14.5	硒化合物的毒性作用机理·····	(312)
14.6	硒中毒的预防和控制·····	(312)
14.7	硒毒性研究的新结果·····	(313)
第 15 章	微生物对硒的甲基化作用与对单质硒形成的调节作用 ·····	(319)
15.1	硒的生物甲基化·····	(320)
15.1.1	基本概况·····	(320)
15.1.2	硒的生物甲基化机制·····	(323)
15.1.3	硒的生物甲基化与生物修复·····	(324)
15.1.4	值得关注的问题·····	(327)
15.2	微生物对单质硒形成的调节作用·····	(328)
15.2.1	概况·····	(328)
15.2.2	单质硒的形成机制·····	(329)
15.2.3	单质硒的形成在生物修复中的应用·····	(333)