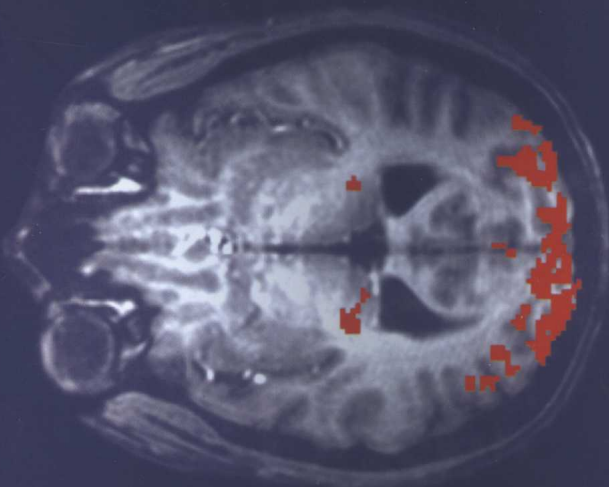


生命科学名著

J. G. 尼克尔斯 A.R. 马丁 著
B.G. 华莱士 P.A. 富克斯
杨雄里 等 译



神经生物学

FROM NEURON
TO BRAIN

从神经元到脑

FOURTH EDITION



科学出版社
www.sciencep.com

神经生物学

从神经元到脑

J. G. 尼克尔斯 A. R. 马丁 著
B. G. 华莱士 P. A. 富克斯

杨雄里 等译

科学出版社

北京

图字：01-2001-4996

内 容 简 介

本书是神经生物学领域内的一本世界级名著，本版为跨世纪的第4版。内容涵盖了神经生物学的许多重要方面，系统介绍了神经生物学的基本概念、神经系统的功能及其细胞和分子机制。作者应用许多生动的实例，通过严密的逻辑组织起来，以展示神经生物学的发展脉络。结合300余幅制作精良的插图，为读者提供了这门重要学科的一幅有内在联系的全景图。全书把神经生物学的基本原理和近年进展紧密结合起来，文笔流畅，深入浅出，对相关领域的学生、教授和研究人员均是一本有用的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

神经生物学——从神经元到脑/ (美) 尼克尔斯 (Nicholls, J. G.) 等著; 杨雄里等译. —北京: 科学出版社, 2003.4

(生命科学名著)

原书名: From Neuron to Brain, Fourth Edition

ISBN 7-03-010990-2

I. 神… II. ①尼…②杨… III. 人体生理学: 神经生理学
IV. R338

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 096643 号

责任编辑: 马学海 王 静/责任校对: 柏连海

责任印制: 刘士平/封面设计: 槐寿明

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年4月第一版 开本: 787×1092 1/16

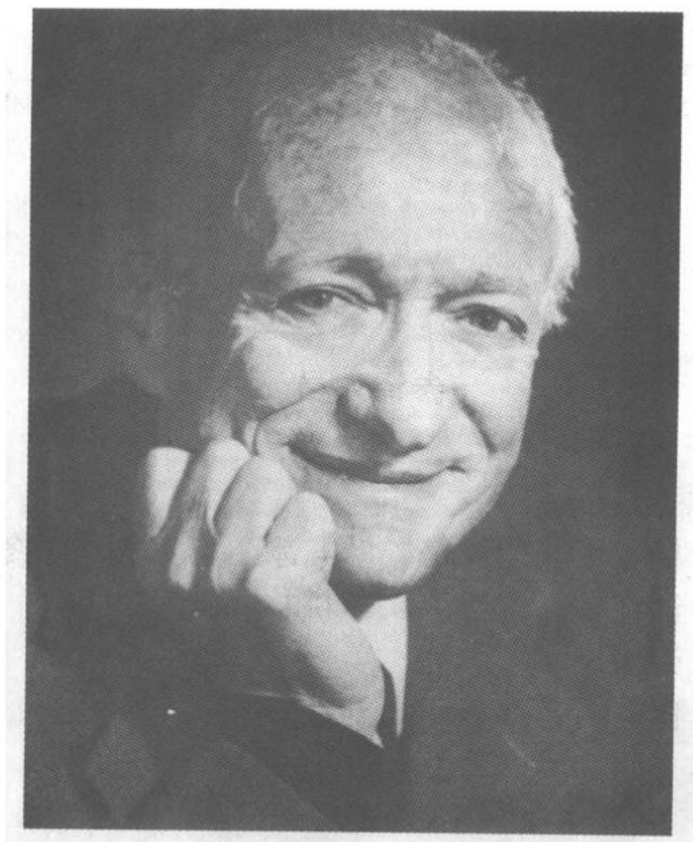
2003年4月第一次印刷 印张: 53 插页 10

印数: 1—3 000 字数: 1 215 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

谨以此书纪念我们的朋友和同事史蒂芬·库福乐



在长达 40 年的科学生涯中，史蒂芬·库福乐（Stephen Kuffler）对若干基本的问题进行了实验研究，为未来的研究铺平了道路。他的研究工作的一个特点是，他总是能抓准问题，并应用合适的标本来回答。他对去神经、牵张感受器、离中控制、抑制的研究，对 γ -氨基丁酸和肽作为神经递质的研究，对视网膜中整合、神经胶质细胞的研究，对突触传递的分析均为佳例。他的论文以论述清晰和插图精美见长，蕴涵的激情可力透纸背。此外，他所描述的每一个实验，都是他亲自动手做的。S. 库福乐的工作引入了对神经系统多学科的研究途径，堪称典范。在哈佛大学，他建立了第一个神经生物学系，把来自不同学科的具有创新思维的科学家聚集在一起。在其友人的记忆中，他融宽容、坚定、善良和恒久的幽默感于一身，给人留下了独特的印象。他曾是哈佛大学 J.F. Enders 大学讲座教授，与伍茨霍尔（Woods Hole）海洋生物实验室过从甚密。他曾获多种荣誉，包括英国皇家学会国外院士。

7BA 01 / 01

John G. Nicholls, A. Robert Martin, Bruce G. Wallace, Pawl A. Fuchs

From Neuron to Brain, Fourth Edition

Copyright © 2001 by Sinauer Associates, Inc.

All rights reserved.

参译人员

翻译：

杨雄里	谭德培	叶冰	蒋正尧	罗冬根
许红平	赵经纬	李耕林	刘剑	黄海
许丽娅	董静	姜宏	沈吟	陈凌
田苗	陆欣华	刘丹婷	禹永春	

校阅：

杨雄里

《神经生物学——从神经元到脑》第四版

中文版序

撰写这样一本书的动机是复杂的。我的同事和我原来的目的是写一本有可读性的著作，把生物系和医学系学生引入神经系统的研究领域。我们曾希望，不仅是本领域的研究人员，而且其他学科（如物理学、分子生物学和工程学）的工作者也会乐于读这本书。但是，当所有均付诸实现时，人们真正期望的是一本为广泛的读者易于理解的著作，从而使人们能先翻阅一遍，然后决定是否值得阅读。虽然英语已经成为现代科学所使用的语言，已不可避免地成为每位学生的必修课程，但阅读一本非母语的作品，在最佳的情况下是可以对付过去，而在最糟情况下，则无异于一场折磨。除非读者能十分应付裕如，否则失去的正是我们试图在本书中所传递的科学的华美、实验的优雅，以及在过去所进行的基础研究和正向我们展现的前景之间的自然的联系。

有鉴于此，本书第4版的中文版的问世，令马丁、华莱士、富克斯和我本人感到非常的愉快。已故 S. 库福乐（本书初版的共同作者）曾一直希望本书能译成其他语种，以供非英语国家的读者阅读。本书第2版于1984年问世后，我们的朋友，北京大学张人骥教授将之译成中文，令人高兴。从那时起，我们对脑及其机制的认识已有了许多重要的进展，书的许多内容已陈旧了，而且对中文译本的需要也大大增加了。中国著名的神经科学家早些年曾对脑的生物物理、神经化学，以及高级功能的认识做出了杰出的贡献。冯德培、张香桐、张锡钧是其中的三位。他们在突触传递、皮层机制和乙酰胆碱酯酶的作用等方面的基础研究，为这些领域的现代进展架设了舞台，他们的名字至今仍具影响，并在有关研究中被引述。他们在教学和建立第一流研究所方面所做的贡献，也促进了中国神经科学的繁荣；对于在中国受到训练，而在中国、美国和欧洲做出极出色工作的研究者的培养，起到了不可或缺的作用。

我最初是在 S. 库福乐的实验室中遇见冯德培的，曾领略其超常的活力、尊严、智慧、能力和美德。之后，德培（T.P）和我曾在加州、瑞士 Basel 和中国多次相遇。他和张香桐给我留下了极深的印象；其实，所有有机会听他们述说自己的科学生涯和在中国不安定时期遭遇的人都会有如此的印象。我与中国神经科学家的第一次实际的联系始于张人骥教授，他来到斯坦福大学与我一起工作；之后，我们的合作在北京大学继续进行。我们一起发表了一些很好的论文，并在北京给研究生和本科生作了一系列讲座。学生中有几位在 Basel 与我工作过，并且继续了他们杰出的研究生涯。如果这些学生在发展的早期阶段便能用母语读到本书，我想一定会使他们受益匪浅。

我们一如既往地感谢我们的出版商 Andy Sinauer，他帮助了原书和中文版的出版。我们也向我们的朋友杨雄里教授——冯德培教授的继承者表示深切的谢意。他和他的同事、学生所作的巨大努力和奉献，使本书能为中国的学生和研究人员所阅读。我们希

望，他的新译本会有助于激发对这一领域进一步的兴趣；这个领域还在继续迅速发展，而我们中国的同事们正在为此做出重要的贡献。

A handwritten signature in cursive script, reading "John Nicholls".

J. 尼克尔斯

PREFACE TO THE CHINESE TRANSLATION OF *FROM NEURON TO BRAIN* (4th EDITION)

The motivation for writing a book like *From Neuron to Brain* is complex. My colleagues and I aimed at producing a readable volume that would introduce biology and medical students to the study of the nervous system. We hoped that the book might be read with pleasure by research workers in the field as well as by people from other disciplines, such as physics, molecular biology and engineering. But when all is said and done, what one really wishes for is widespread accessibility, so that people can see the book, leaf through the pages and decide whether it is worth reading. Although English has clearly become the language of modern science, and although it has inevitably become part of every student's curriculum, to read a text in a language that is not one's own is at best manageable and at worst an ordeal. Unless the reader is very sophisticated what gets lost is exactly the quality that we have tried to convey in this book: the beauty of science, the elegance of experiments, the narrative link between fundamental work done in the past and horizons that are opening up today.

Accordingly, that there should be a new Chinese translation of this 4th edition of *From Neuron to Brain*, is a source of immense satisfaction to Bob Martin, Bruce Wallace, Paul Fuchs and myself. Stephen Kuffler, who was co-author of the first edition, always hoped that the text would be translated for non-English speaking peoples. The Chinese translation of the 2nd edition, which dated from 1984, was made by our friend Professor Renji Zhang of Peking University, a labour of love. Since that time so many major advances have been made in our understanding of the brain and its mechanisms, that the text has now out lived its usefulness. In that time also the need for a book in the Chinese language has greatly increased. Distinguished neuroscientists in China in the early years made extraordinary contributions to our understanding of biophysics, neurochemistry, and higher functions. T. P. Feng, Hsiang Tung Chang, and Hsi-Chun Chang are three of the names still to be conjured with, and referred to in relation to the fundamental research that set the stage for modern advances in work on synaptic transmission, cortical mechanisms and the role of acetylcholinesterase. Their contribution, in terms of teaching and in building up first-rate institutes, is also responsible for the flowering of neuroscience in China and for the indispensable role of research workers trained in China for the most advanced work being done in China and in the USA and Europe.

I first had the chance to know and appreciate the extraordinary vigour, dignity, wisdom, skill and humanity of T. P. Feng when I met him in Stephen Kuffler's laboratory.

T. P and I met often afterwards in California, in Basel and in China. He and H. S. Chang made the deepest impression on me, as indeed they did on all who had the chance to be with them, and to hear about their lives in science and in China in times of turmoil. My first practical links with Chinese neuroscientists were made through Professor Ren Ji Zhang who came to work with me at Stanford University. Our collaboration continued later in his laboratory in Peking University. We published some fine papers together and gave intensive courses to graduate, and undergraduate students in Beijing. Several of those people worked with me in Basel and have gone on to have distinguished careers. Those students would have loved to have the book to read in their own language at early stages of their development.

As always we thank our publisher Andy Sinauer who has been instrumental in making the original version and this translation possible. We owe our friend Professor Xiong-Li Yang, the successor of T. P. Feng, immense gratitude for the pains he, his colleagues and students have taken, and for their dedication to producing a book that can be read by students and research workers in China. We hope that his new translation may help to stimulate further interest in a field that is still growing so rapidly and in which our Chinese colleagues are making such major contributions.



John Nicholls

第 4 版序

此新版《神经生物学——从神经元到脑》的目的，仍然与 25 年前问世的初版相似。在初版前言中，曾这样介绍本书的目的：“描述神经细胞如何完成其信号的传递，这些信号如何整合，而脑的高级功能又是如何由这种整合而产生的。本书所面向的读者，对神经系统如何工作有浓厚的兴趣，但并不非有特殊的生物科学背景知识。我们用精选的实例来说明其要点……”。

我们的写作风格依然一仍旧章。尽管新的实验事实、技术和概念层出不穷，必须要对正文和插图作完全的修订，但我们所注重的还是实验本身，以及完成实验的方式。如前一样，在正文中列有参考文献，作为我们陈述的依据；附录则置于书后，希望有助于对神经系统不熟悉的读者，使他们易于了解重要而又有点枯燥的事实和定义。

新版的一个主要任务是，在保持叙述式行文的前提下，既使本书跟上研究的进展，又不使篇幅过于庞大。我们所循的脉络是：先介绍一种新思想最初是如何引入的，然后跟踪至如今正在进行的研究。当经典的材料已经成为常识时，就不再把它置于优先的地位。因此，不可避免，我们必须改变许多章节的重点，删去某些高水平的、但已嫌过时的实验的描述。主要是回应于读者对本书的评论，书的体例和格式已经作了改变。特别是，我们把段落的长度缩短了，增加了更多标题；至于插图，则通过全彩印刷和着意的删繁就简使之变得更一目了然。

本书初版问世时，神经生物学的书籍寥寥无几，而现在情况已迥然不同，出现了不少优秀的、内容全面的教科书、概论和专著。我们希望本书将继续作为一册具有良好可读性的著作，以一种融汇贯通的方式，向读者阐述细胞水平和分子水平的研究途径如何能深入地阐明脑的活动。我们并不试图把所有目前已知的全告诉读者，而是想向读者传递某些研究所蕴涵的优美和优雅，以及在学术界所引起的激奋，这些研究应用了目前拥有的各类技术，从神经元的基因表达和分子事件推进至脑的最高级功能。

以怀念 S. 库福乐（本书初版的作者之一）来作结语仍然是最合适的。本书第二版前言的结尾写道：“回应需要而对书进行修订，可以期待愉悦和满足，但是这种期待由于我们的朋友和同事 S. 库福乐的去世而黯然失色。我们所努力做的是，修订后的本书仍能无愧其英名。”

J. G. 尼克尔斯 B. G. 华莱士
A. R. 马丁 P. A. 富克斯
2000 年 10 月

（杨雄里 译）

致 谢

我们谨对许多同事表示谢意，他们给予我们鼓励，并影响了我们的思想。我们特别感谢 Ken Miller 和 Randall Houce 博士，他们阅读了所有章节；阅读部分章节的有：Drs. W. Adams, H. Arechiga, J. Eugenin, J. Fernandez, F. Fernandez de Miguel, M. Lepre, J. Luque, A. Ribera, T. Shallice 和 R. Wehner。

我们希望感谢向我们提供原始图的同事们，这些插图或引自己发表的工作，或引自未发表的工作，这些均已在图注中注明。我们特别感谢与以下各位的讨论，以及所提供的原始图版，他们是：Drs. W. Almers, H. Arechiga, W. Betz, A. Brown, J. Black, R. Boch, F. Bonhoeffer, T. Bonhoeffer, A. M. Butt, W. Chen, M. Cohen, R. Costanzo, A. M. Craig, M. Crair, N. Davis, J. Driver, D. Furness, U. Garcia, A. W. Gehring, C. Gilbert, N. Hadjikhani, J. Hildebrand, V. Honrubia, J. Hortin, M. Hubener, A. Kaneko, N. Kanwisher, S. Kierstead, J. Kinnamon, C. -P. Ko, S. R. Levinson, J. Lichtman, R. Llinás, U. J. McMahan, R. Michaels, K. Muller, E. Newman, M. M. Poo, M. Rijntjes, S. Roper, M. Ruegg, P. Sargent, E. Shooter, P. Shrager, P. Sterling, M. Stryker, M. Tessier-Lavigne, W. Thompson, R. Tootell, Y. Tsukamoto, K. Uğurbil, D. Vaney, R. Vassar, S. Waxman, R. Wehner, A. Young 和 H. Young。

我们还要向《生理学杂志》、《神经生理学杂志》、《神经科学杂志》、《神经元》的编者致谢，许多插图摘自这些杂志。

J. G. 尼克尔斯希望向 I. Wittker 小姐表示谢意，感谢她在本书撰写的初期所给予的文秘方面的协助。

像前几版一样，我们感到极其荣幸以 Andy Sinauer 作为我们的出版者、顾问和朋友，他自始至终注视着本书的撰写，并总是在需要时给予帮助和处理各种问题。他娴熟的技巧、高超的鉴赏力、深通人情的练达和真知灼见，使我们间的合作成为乐事。我们也感谢 Kerry Falvey，她怀着极大的耐心、彬彬有礼地对正文进行了编辑，消除了行文的前后不一。我们也感谢 Christopher Small（制作部经理）和 Jefferson Johnson, Joan Gemme，他们为本书编了页码。我们对图片和插图编制部的同事深表谢意，他们把我们粗糙的草图和图表变成了优雅的、令人赏心悦目的艺术品，从而使本书大为增色。

(杨雄里 译)

作者简介



J.G. 尼克尔斯

A.R. 马丁

B.G. 华莱士

P.A. 富克斯

J. G. 尼克尔斯 (John G. Nicholls)

意大利 Trieste 国际高级研究院生物物理学教授。1929 年生于伦敦，在 Charing Cross 医院获医学学位，后在伦敦大学院生物物理系 Bernard Katz 爵士指导下进行研究，获生理学博士。他曾在伦敦大学院、牛津大学、哈佛大学、耶鲁大学、斯坦福大学及瑞士 Basel 生物研究中心工作。与 S. 库福乐一起进行了有关神经胶质细胞的实验，并撰写了本书的第一版。他是英国皇家学会会员、墨西哥医学科学院院士，曾获委内瑞拉 Andres Bello 勋章，曾在美国伍茨霍尔、冷泉港，以及许多国家的大学中开设过神经生物学的理论和实验课程，这些国家包括阿根廷、澳大利亚、巴西、智利、中国、印度、以色列、马来西亚、墨西哥、尼日利亚、菲律宾、斯里兰卡、乌拉圭和委内瑞拉。他的研究工作专注于神经系统损伤后的再生，最初是对无脊椎动物水蛭进行研究，现在则是以未成熟的哺乳动物脊髓为标本。

A. R. 马丁 (A. Robert Martin)

美国科罗拉多大学医学院生理系荣誉教授。1928 年生于加拿大 Saskatchewan，在 Manitoba 大学主攻数学和物理。之后在伦敦大学院在 Bernard Katz 爵士指导下从事哺乳动物肌肉的突触传递的研究，1955 年获得博士学位。1955~1957 年，在加拿大蒙特利尔神经学研究所 Herbert Jasper 实验室当博士后，从事运动皮层单细胞特性的研究。他曾任教于麦吉尔大学、犹太大学、耶鲁大学和科罗拉多大学医学院，并为 Monash 大学、爱丁堡大学和澳大利亚国立大学客座教授。他的研究对阐明突触传递作出了贡献，包括神经递质释放的机制、突触的电耦合、突触后离子通道的性质。

B. G. 华莱士 (Bruce G. Wallace)

美国科罗拉多大学医学院生理和生物物理学教授。1947 年生于美国新泽西州普兰

菲尔德, 在 Amherst 学院主攻物理学。之后在哈佛大学与 Edward Kravitz 合作研究神经递质的生化特性, 1974 年获神经生物学博士学位。1974~1977 年在斯坦福大学 J. 尼克尔斯实验室当博士后, 研究水蛭神经系统突触的功能和再生。曾任教于斯坦福大学和科罗拉多大学医学院。他以对突触形成的分子机制的研究著称, 其中包括与 U. J. McMahan 的合作, 鉴定了聚集蛋白, 并对聚集蛋白在调节突触后特化区分化中的作用进行了研究。

P. A. 富克斯 (Paul A. Fuchs)

美国约翰·霍普金斯大学医学院听觉科学中心耳科-头、颈部外科学教授, 生物医学工程学教授和神经科学教授。1951 年生于美国密苏里州圣路易, 在 Read 学院主攻生物学。之后, 在斯坦福大学, 在 Donald Kennedy 和 Peter Getting 的指导下, 从事螯虾神经肌肉接头的突触前抑制研究, 1979 年获神经、生物行为科学博士学位。1979~1981 年在斯坦福大学 J. 尼克尔斯实验室当博士后, 研究水蛭神经元的突触形成。1981~1983 年在剑桥大学与 Robert Fettpiece 和 Andrew Crawford 合作, 研究耳蜗毛细胞的传出性抑制。曾任教于科罗拉多大学医学院和约翰·霍普金斯医学院。其研究专注于电压门控和配体门控离子通道在耳蜗毛细胞功能中的作用, 揭示了功能分化的一些细节, 并鉴定了毛细胞中胆碱能抑制的机制。

(杨雄里 译)

译者简介

杨雄里

中国科学院院士 (1991 年)。1982 年获日本学术博士学位, 1988~1999 年任中国科学院上海生理研究所所长。2000 年任复旦大学神经生物学研究所所长。长期从事神经生物学研究。国家重点基础研究规划项目《脑功能和脑重大疾病的基础研究》首席科学家。“Progress in Neurobiology”、“Japanese Journal of Physiology” 顾问编委。

初版前言摘录

我们的目的是描述神经细胞如何完成其信号的传递，这些信号如何整合，而脑的高级功能又是如何由这种整合而产生的。本书面向的读者，对神经系统如何工作有浓厚的兴趣，但并不是非有特殊的生物科学背景知识不可。我们用精选的实例来说明其要点，这些实例主要选自我们有第一手经验的研究工作。这样做会掺入明显的个人偏爱，并必定有疏漏。

我们并不试图对神经系统作全面的阐述，也并不试图在文献和背景材料方面做到完备无缺。我们宁愿采取一种有个性的、因而有局限性的观点，循着由若干研究者的工作所推动的发展的脉络，来叙述过去几十年中取得的某些进展。检视本书的目录就会发现，许多重要和吸引人的领域遗漏了，如小脑、听觉系统、眼动、运动系统、胼胝体等。我们惟一的口实是，为了说明细胞水平的研究途径的有效性，通过选择几个相关的主题来提供一幅有内在联系的全景，似乎是比较合适的。

通览全书，我们所描述的，或是对单个细胞的实验，或是对神经元的简单集群的分析，实验动物范围很广。在有些情况下，分析已达到分子水平，从而能以特异的分子来讨论神经和肌肉膜的某些功能特性。幸运的是，在所有已研究的动物脑中，神经信号运作的原理存在明显的一致性，因此，在龙虾或水蛭所获得的结果，可以与我们自身的神经系统关联起来。作为生理学家，我们必须抓住这种一致性，因为我们相信，在每一个看起来极复杂、难以解决的问题的背后，总是存在一种简化的原理，从而使谜底得以揭开。例如，人脑由数百亿个细胞组成，而其连接还要多得多，似乎很难完全了解。这种复杂性经常被误以为是杂乱无章，但事实并非如此。我们能够显示，脑是按照一种高度有序的设计而组构起来的，系由相对简单的部件所组成。为实施其功能，脑仅使用几种信号和一种定型的重复活动模式。因此，对神经细胞较少的采样，有时就能揭示连接组构的概貌，视觉系统就是这样的情况。

我们也论及前景未卜的主题，这些领域正在发展之中，因此其方向是不确定的。人们可以期待，这些主题在现时难以纳入一种清晰的框架之中，但我们希望，它们会使人们产生这样一种感觉：研究有时就像一系列的探险。

《从神经元到脑》，既表达了我们的思路，也表达了我们的目的。我们主要从事关于神经元功能机制的研究。对神经系统有兴趣的学生几乎总是跟我们说，他们的好奇心源于他们渴望了解感知、意识、行为，或脑的其他高级功能。当他们知道我们主要是研究分离的神经细胞或简单神经系统的活动时，他们常常为我们也是怀着相似的动机起步而感到惊奇；他们对我们一直保持着那种兴趣甚至更加惊奇。事实上，我们相信，我们正在走向这一目标，而在这一方面，我们与大多数同事和前人并无二致。本书的目的在于

使这种观点变得更有份量，同时，正如我们所希望的，本书的论述也将显示我们所引导的是正确的方向。

S. 库福乐 J. G. 尼克尔斯

1975年8月

(杨雄里 译)

目 录

第 1 部分 引 言

第 1 章 信号运作和组构原理 3

- 简单神经元回路中的信号运作 4
- 与高级功能相关的复杂神经元回路 4

视网膜的组构 5

- 神经元的外形和连接 6
- 细胞体、树突和轴突 8
- 鉴定神经元和追踪其连接的技术 9
- 非神经元细胞 10
- 细胞按功能集群 10
- 与功能相关的细胞亚型 10
- 连接的汇聚和发散 10

神经细胞的信号传递 11

- 电信号的分类 11
- 电信号的普遍性 12
- 用电极记录神经元信号的技术 12
- 记录神经元活动的无创伤技术 13

局部分级电位的扩布和神经元的被动电学特性 14

在双极细胞和光感受器中电位变化的扩布 16

动作电位的特性 16

动作电位沿神经纤维传播 17

动作电位作为神经密码 17

突触：细胞间通讯的部位 17

化学介导的突触传递 18

兴奋和抑制 18

电传递 20

突触效率的调制 20

整合机制 21

由动作电位传送的信息的复杂性 22

神经元的细胞、分子生物学 23

神经系统发育的信号 24

神经系统损伤后的再生 25

第 2 部分 神经系统中的信号传递

第 2 章 离子通道和信号传递 29

离子通道的特性 30

- 神经细胞膜 30
- 离子通道的物理特征 30
- 通道选择性 31
- 通道的开放和关闭状态 31
- 通道激活模式 32

单通道电流的测量 33

- 膜片钳记录 33
- 膜片钳电极记录形式 35
- 微电极细胞内记录 36
- 细胞内记录通道噪声 37
- 通道电导 37
- 电导和通透性 38

平衡电位 39

Nernst 方程 40

驱动力 40

非线性电流-电压关系 41

离子通道的通透 42

离子通道的生理意义 42

专题 2.1 通道电导的测量 41

第 3 章 离子通道的结构 45

烟碱型 ACh 受体 47

ACh 受体的物理特性 48

ACh 受体亚基的氨基酸序列 48

高级化学结构 49

通道的结构和功能 52

哺乳动物肌肉中胎儿和成体 ACh 受体 53

哪些亚基构成了 ACh 受体孔道的内衬? 53	内向氯转运 80
ACh 受体的高分辨率成像 54	神经递质的转运 81
ACh 受体的开放和关闭状态 54	转运入突触前囊泡 81
神经元性 ACh 受体亚基的多样性 54	递质摄取 81
神经元性 ACh 受体的亚基组成 55	转运体的分子结构 82
受体的超家族 55	ATP 酶 84
GABA、甘氨酸和 5-HT 受体 55	钠-钙交换器 84
配体门控通道的离子选择性 56	其他离子转运体 84
电压激活通道 57	神经递质的转运分子 84
电压激活钠通道 57	转运机制的重要性 85
钠通道的氨基酸序列和三级结构 57	第 5 章 静息膜电位的离子基础 89
电压激活钙通道 58	模式细胞 89
电压激活的钾通道 58	离子平衡 90
多少亚基构成一个钾通道? 60	电中性 91
电压激活通道的孔道形成 60	胞外钾和氯对膜电位的影响 92
钾通道的高分辨率成像 61	鸟贼轴突的膜电位 93
其他通道 62	钠通透性的影响 95
电压激活氯通道 62	恒场方程 96
内向整流钾通道 64	静息膜电位 97
ATP 激活通道 64	氯的分布 98
谷氨酸受体 64	膜的电路模型 98
环核苷酸激活通道 65	膜电位的预测值 99
亚基的多样性 65	钠-钾泵对膜电位的贡献 100
结论 65	与静息电位关联的离子通道 100
专题 3.1 受体和通道的克隆 46	膜电位的变化 100
专题 3.2 氨基酸的分类 51	第 6 章 动作电位的离子基础 103
专题 3.3 受体和通道在爪蟾卵母细胞中的表 达 52	钠电流和钾电流 103
第 4 章 跨细胞膜转运 71	在一次动作电位期间有多少离子进出? 104
钠-钾交换泵 72	电导变化中的正、负反馈 105
钠-钾 ATP 酶的生化特性 72	电导的测量 106
泵是生电性的实验证据 72	电压钳实验 106
离子转位的机制 74	电容电流及漏电流 106
钙泵 74	钠和钾携带的电流 107
肌浆网和内质网的钙 ATP 酶 75	钠通道和钾通道的选择性毒剂 109
质膜钙 ATP 酶 76	离子电流对膜电位的依赖性 110
钠-钙交换 76	钠电流的失活 111
NCX 转运系统 77	钠、钾电导作为电位的函数 112
Na-Ca 交换的逆转 77	钠、钾电导的定量描述 113
视网膜视杆细胞的钠-钙交换 79	动作电位的重构 114
氯转运 79	阈值和不应期 114
氯-碳酸氢根交换 79	门控电流 116
钾-氯共转运 80	单通道的激活与失活 117
	激活和失活的分子机制 118