

21世纪高校心理学教材

认知神经科学

◎ 韩世辉 朱滢 编著 广东高等教育出版社

认知神经科学



21世纪高校心理学教材

认知神经科学

◎ 韩世辉 朱 滢 编著
广东高等教育出版社·广州

图书在版编目 (CIP) 数据

认知神经科学/韩世辉, 朱滢编著. —广州: 广东高等教育出版社,
2007. 5

(21 世纪高校心理学教材)

ISBN 978 - 7 - 5361 - 3465 - 2

I. 认… II. ①韩… ②朱… III. 认知科学 - 高等学校 - 教材
IV. B842. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 165209 号

广东高等教育出版社出版发行

(地址: 广州市天河区林和西横路 邮编: 510500)

佛山市浩文彩色印刷有限公司印刷

开本: 787 mm × 960 mm 1/16 印张: 22.25 字数: 388 千字

2007 年 5 月第 1 版 2007 年 5 月第 1 次印刷

印数: 1 ~ 5 000 册

定价: 38.00 元

21 世纪高校心理学教材

编 委 会

主 任（排名不分先后）：

陈烜之（香港中文大学心理系讲座教授，前系主任）

莫 雷（华南师范大学心理学教授、副校长，中国心理学会副理事长）

杨治良（华东师范大学心理系教授、前系主任，中国心理学会副理事长）

王 垒（北京大学心理系教授、前系主任，教育部高等学校心理学教学指导委员会主任）

委 员（按姓氏笔画排序）：

马剑虹（浙江大学心理与行为科学系教授、副系主任）

叶浩生（南京师范大学心理研究所教授、所长）

乐国安（南开大学社会心理学系教授、系主任）

朱 滢（北京大学心理系教授、前系主任）

孙时进（复旦大学心理研究中心教授、主任）

张 卫（华南师范大学心理系教授）

郑 雪（华南师范大学教育心理系教授、系主任）

罗冠中（华南师范大学、澳大利亚墨多克大学心理学教授，香港考评局研究部主任）

温忠麟（华南师范大学心理系教授）

韩世辉（北京大学心理系教授、系主任）

总序

由于社会的迫切需要,最近十余年我国心理学专业的学生和从业人员数量急剧增长,专门的心理学系和研究机构也从20世纪80年代末的十余个(所)发展到当前的百余个(所),不论在政治、经济、文化、教育、体育、管理、健康服务、社区服务、危机处理等领域,还是在学校、企业、医院、行政、司法、军队等部门都发挥着巨大的功能,放射出耀眼的光芒。而从学科内部来看,当前不论国外还是国内的心理学研究均在迅速发展,各种新的理论和思想此起彼伏,各种新的研究、技术和方法不断涌现,使心理学各个领域在宏观的行为层面以及微观的脑基础层面都取得了丰富的新成果与长足进步,从而使心理学的面貌发生了极大的改变。

因此,为了反映当前国内外心理学各个领域的变化与发展,进一步深化高等院校心理学教学改革,加强心理学专业学生的理论素养以及能更好地培养适应新时期社会需要的实用技能与能力,促进我国心理学学科的进一步发展和建设,我们组织国内外心理学各领域有影响的专家、学者编写了这套反映当前心理学科发展和成果的“21世纪高校心理学教材”,其中包括《普通心理学》、《实验心理学》、《认知心理学》、《心理与教育统计》、《心理与教育测量》、《教育心理学》、《发展心理学》、《社会心理学》、《管理心理学》、《心理咨询与治疗》、《人格心理学》、《认知神经科学》、《西方心理学理论与流派》、《心理学研究方法》14部。

我们在编写本套教材时力图体现以下四个特色:

第一,科学性与实用性的结合。一方面,在内容的选择上,既确保知识的科学性、正确性,注重科学研究、科学数据对心理现象的说明作用,强调理性对感性的超越,同时,也注重科学原理对日常经验、生活事实的解释作用,体现教材内容对“活生生”社会、生活实际的实用性。另一方面,在材料的组织上,注意处理好学科科学性和教材科学性的关系,既强调学科体系的科学性、系统性、完整性,同时也从有利于学生学习的角度出发,注重学科的基本结构,注意把握学科体系与教材体系的关系,突出有利于学生学习与掌握的实用性。

第二,前沿性与经典性的结合。虽然科学的心理学从冯特、詹姆斯等人到现在也不过只有一百二十余年的历史,但在这短短的一百二十余年中,心理学

家们已从事过无数的研究,获得了无法计量的数据和结果,生产了无法遍读的宏论或微言。因此,作为主要面向大学生的教材,我们需要,也只能在科学性、系统性的原则指导下,突出各领域的经典性研究、经典性方法与核心概念和原理,用经典或权威的研究、数据阐述学者们的核心思想与代表性研究。而由于最近十余年心理学界的研究和思想都正在和已经发生了巨大的变化,因此,本套教材在继承历史的基础上,更希望面向现在和未来,强调尽可能多地吸收和反映当前各学科领域的最新成果和进展,力图做到前沿与经典、历史与现在甚至未来相结合。

第三,国际化与本土化的结合。科学的心理学起源于欧洲,成长和壮大于北美,直到今天,欧美心理学仍在当今国际心理学界占据着主导地位。但中国国内外的华人心理学工作者在过去的百年中,也在学习和借鉴西方心理学研究成果的基础上探索着自己的生存和发展之路,取得了不少重要和有影响的成果,尤其最近十余年,随着我国社会、民众对心理学的需要和重视,中国以及华人心理学工作者更是取得了不少令国际同仁刮目相看的新成就。因此,本套教材一方面注重较全面反映国际心理学各领域研究和发展的轨迹、前沿,同时也尽可能结合中国(华人)心理学界的研究与成果,注意反映中国及华人社会特有的心理现象与特点。

第四,学术性与易读性的结合。作为主要面向 21 世纪新时代大学生的教材,在编写过程中,我们既注重专业教材的学术性和科学性,同时也尽量顾及当代人学习和阅读的心理特点,不论在内容编选还是在写作风格、编排体例上,均强调教材的易读性、生动性和形象性,力图做到学术性与易读性的结合,希望使这套教材能成一套教师认为好用、学生认为好学的专业教材。

本套教材作者来自国内外二十余所大学知名的心理学系或研究机构。各书的主编或著者大多是国内相关领域较有影响的专家和学者,在各自的领域从事过相当长时间的研究和高校教学工作,不少人先前编写的相应教材都是国内最有影响的教材,而其他作者也大多都在各自相应领域学有精专、有着相当丰富的高校教材编写经验。因此,我们期盼,在大家的精诚合作与努力下,这套教材将能以其独特、新颖的个性被社会悦纳,为我国心理学人才的培养和心理学事业的发展做出一定的贡献。

21 世纪高校心理学教材编委会

2004 年 8 月

(324)	.....	真经	卷二第
(325)	.....	真经	卷三第
(328)	.....	真经	卷四第
目 录			
(365)	.....	真意	卷十第
第一章 导言	.....		(1)
(370)	.....	真经	卷二第
第二章 认知神经科学的脑成像技术	.....		(6)
第一节 事件相关电位	.....		(7)
第二节 脑磁图简介	.....		(39)
第三节 功能磁共振成像和正电子断层扫描技术	.....		(45)
第四节 透颅磁刺激	.....		(61)
(395)	.....	真经	卷三第
第三章 视知觉	.....		(88)
第一节 视觉加工的神经基础	.....		(88)
第二节 视知觉加工的神经机制	.....		(102)
第三节 物体识别	.....		(118)
第四节 具有等级结构的复杂图形知觉	.....		(127)
第四章 注意	.....		(141)
第一节 注意研究的基本问题和实验范式	.....		(141)
第二节 空间选择性注意调控感知觉加工的神经机制	.....		(149)
第三节 参与空间选择性注意调控的神经网络	.....		(162)
第四节 基于客体的选择性注意	.....		(170)
第五章 记忆	.....		(180)
第一节 工作记忆	.....		(181)
第二节 情景记忆与语义记忆	.....		(193)
第三节 自传记忆	.....		(210)
第六章 思维	.....		(218)
第一节 思维与情绪情感、语言和心理表征的关系	.....		(219)

第二节	运算	.....	(224)
第三节	推理	.....	(229)
第四节	顿悟	.....	(238)
目 录			
第七章	意识	.....	(262)
(一)	第一节 意识的神经相关物	.....	(263)
(二)	第二节 视觉意识和视觉皮层通路	.....	(270)
(三)	第三节 视觉觉与意识的分离	.....	(277)
第八章	自我识别和自我表达	.....	(286)
(一)	第一节 自我的一般概念	.....	(286)
(二)	第二节 自我面孔识别	.....	(290)
(三)	第三节 自我参照效应	.....	(298)
参考文献	.....	(308)	
(101)	.....	第二章	
(118)	.....	第三章	
(137)	.....	第四章	
(141)	.....	第五章	
(141)	.....	第一章	
(149)	.....	第二章	
(165)	.....	第三章	
(170)	.....	第四章	
(181)	.....	第五章	
(181)	.....	第一章	
(193)	.....	第二章	
(210)	.....	第三章	
(218)	.....	第六章	
(219)	.....	第一章	



“51” 公共图书馆数字资源建设不...
公共图书馆建设其

第一章 导言



认知神经科学研究主要包括感知觉、注意、记忆、语言、运动控制、意识以及社会认知等各层次大脑认知功能的神经机制，它是在认知心理学、神经心理学、认知科学、神经生物学、计算机科学和脑成像技术等多门学科和技术基础上发展起来的一门交叉学科，它的目的在于利用各种实验手段，在细胞和脑组织等多个水平阐明大脑如何通过其神经活动获得对外界环境的主观经验，并据此对外界刺激采取适当的行为。

认知神经科学的发展起始于 20 世纪 70 年代末，研究智力的神经生物学基础、研究大脑与认知的关系是其主要目的。然而，人类探索大脑特定区域与智力关系的努力却可以追溯到 19 世纪初期，当时以 Gall F. J. 和 Spurzheim J. G. 为代表的颅相学家就试图说明某种心理活动是由特定的脑区参与完成的。如图 1-1 所示，他们首先认为大脑具有 35 个左右的独立功能，如友谊、好斗、崇拜、自尊、希望、谨慎、记忆等，这些独特的功能由大脑特定的区域完成，而且，如果大脑经常使用某一功能，那么支持这一功能的脑区会增大，从而导致相应的颅骨部分隆起。颅相学家们相信通过对颅骨形状的分析就可以描述一个人的人格特征。从现代心理学研究的角度看，颅相学家们试图建立脑区与脑功能关系的努力至少存在两个问题。首先，他们确认特定脑功能时主要依赖日常生活中对心理活动的一种直觉的理解，缺乏科学的分析和实验验证。比如“自尊”虽然是一种重要的心理活动，但它内在的心理机制却不可能简单地用“自尊”一个词来准确地描述。再比如“记忆”这一大脑最重要的功能之一，它实际上由多个功能子模块组成（详见本书第五章），并且各个子功能的实现是由不同的脑区共同参与完成的。其次，对特定心理活动的功能定位仅仅是一种猜测，缺乏充分的科学根

的脑损伤如何影响特定的认知功能，研究者是从神经心理学的实验发现去推断（而不是直接观察）正常人大脑认知功能的定位。

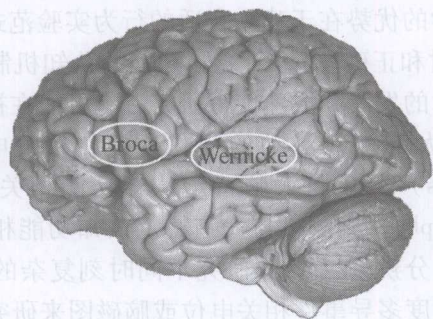


图 1-2 Broca 区和 Wernicke 区在大脑中位置的示意图

20 世纪 50 年代中期兴起的认知心理学从信息加工的角度研究大脑的心理活动，它把大脑与计算机类比，把大脑当作一个信息加工系统，把心理活动看作是一系列信息的获得、存贮、加工和使用的过程。认知心理学侧重研究的是大脑内部信息加工的规则，不太关心在硬件上如何实现这些信息加工过程。认知心理学研究提出的一些概念，如串行加工、并行加工、自上而下和自下而上加工等，对于分离和准确地描述大脑的认知功能机制起到了重要的作用，对后来确定认知功能神经基础的研究有指导意义。认知心理学发展的一些心理学实验范式对于研究认知功能的神经基础也具有十分重要的意义，比如在研究注意中广泛使用的视觉搜索和线索化范式等，对于理解注意的机制产生了巨大的影响，也被现在认知神经科学的脑成像研究广泛使用。

神经生物学家的对认知神经科学的发展也起到了极大的推动作用。神经生物学最重要的实验技术之一是多导细胞电活动记录，这一技术可以记录高等哺乳动物的大脑特定部位的神经细胞在特定认知加工过程中的反应特性，确定认知功能在细胞水平上的神经生物学基础。在这类研究中首先要训练动物（如猴子）完成指定的任务，这些任务中包括研究者感兴趣的某种认知功能。训练结束后，当动物在清醒状态下完成指定的任务时记录某些脑区的神经元的反应特性。神经生物学研究的范围很广，诸如视觉皮层的感受特性如何受邻近刺激的影响、大脑颞叶皮层神经元如何参与复杂图形的识别、选择性注意如何调制视觉皮层神经元的反应、大脑前额叶神经元如何参与对空间信息的工作记忆等。这些研究发现揭示了神经细胞如何参与特定的认知加工，对于建立相关的认知或计算模型提供了神经生物学依据。

对于认知神经科学的产生具有最大贡献的是脑成像技术的发展。脑成像技术的优势在于无创性地实时观察人的大脑完成某些认知功能时的活动。我们知道, 认知心理学的优势在于建立合适的行为实验范式, 通过测量被试的行为反应 (如反应时和正确率), 研究脑功能的认知机制, 建立相关的理论模型。而脑成像技术的发展和成熟使得研究者有可能在被试完成特定的任务过程中去直接观察大脑神经活动的变化。事件相关电位 (ERPs, event-related brain potentials) 测量与大脑特定认知功能相关的电活动, 脑磁图 (magnetoencephalography) 则测量与大脑特定认知功能相关的磁场变化, 它们都能以很高的时间分辨率 (ms) 研究不同时刻复杂的大脑活动的空间过程, 并通过记录高密度多导事件相关电位或脑磁图来研究大脑神经活动的空间信息。功能磁共振成像 (fMRI, functional magnetic resonance imaging) 测量大脑血液动力学指标 (主要是血氧含量的变化), 以很高的空间分辨率 (mm) 对复杂的大脑认知活动进行空间定位。穿颅磁刺激 (TMS, transcranial magnetic stimulation) 用短暂的具有一定强度的磁场干扰大脑特定部位的神经活动, 观察这些干扰与特定的认知功能变化的关系, 从而确定认知功能的神经基础。认知心理学与这些脑成像技术的结合, 使得认知神经科学经过十几年的发展取得了丰硕的研究成果, 为从时间和空间两个方面阐明特定认知活动的神经机制, 为建立相关的具有生物学基础的特定认知功能的理论模型作出了重要的贡献。

目前除了 Science 和 Nature 这样的综合学术刊物经常发表认知神经科学领域的研究论文, 还有专门的认知神经科学刊物, 如 Journal of Cognitive Neuroscience, NeuroImage, Human Brain Mapping 等, 每年都有大量的研究论文发表。近年来也有数部用英文编写的认知神经科学专著出版, 如 MIT 出版社于 1995 年出版由 Michael S. Gazzaniga 主编的 *The Cognitive Neuroscience* (此书已有中译本), 1997 年出版由 Michael D. Rugg 主编的 *Cognitive Neuroscience*; W. W. Norton & Company 公司于 2002 年再版由 Michael S. Gazzaniga, Richard B. Ivry 和 George R. Mangun 主编的 *Cognitive Neuroscience: the Biology of the Mind* 等。目前用中文编写的认知神经科学教科书不多。本书作为高年级本科生和研究生的教学参考书, 选择性地介绍关于知觉、注意、记忆、思维、意识等领域的一些基本问题和近年来认知神经科学在这些领域内取得的一些研究成果, 希望读者通过阅读本书既能获得对认知神经科学的一般认识, 也能对某个特殊领域的研究有深入的理解。本书选择这些领域有两个原因, 一是因为这些领域反映了目前人们所熟知的大脑

的最主要的认知功能，是目前认知神经科学研究的热点；二是因为国内有学者在相关领域开展了相当深入的研究工作，参与本书编写的作者分别在脑成像技术、知觉、注意、记忆、思维以及意识等领域有数年的研究经历，并取得了被国际同行认可的研究成果。这些学者参与本书的编写工作，有可能把各自研究领域的最新研究进展介绍给读者。

本书第二章的第一、二和四节由中国科学院研究生院范思陆教授编写，第二章的第三节由中国科学院生物物理所北京磁共振脑成像中心卓彦研究员编写，主要介绍目前在认知神经科学研究中广泛使用的事件相关电位、脑磁图、正电子断层扫描、功能磁共振成像和透颅磁刺激等技术的基本原理，以及如何把这些无创性脑成像技术应用到认知神经科学研究中。第三章和第四章由北京大学心理学系韩世辉教授编写，介绍关于知觉组织、物体识别、基于空间和客体的选择性注意等研究的基本问题，以及关于这些问题的认知心理学和认知神经科学的研究方法和较近的研究结果，并讨论这些研究结果对于澄清某些关于知觉和注意的理论问题的贡献。第五章由北京大学心理学系朱滢教授编写，介绍记忆的基本过程（编码和提取）的神经基础，不同记忆模块及其由脑成像研究的神经基础。第六章由中科院心理所罗劲研究员编写，介绍关于计算、推理、顿悟等思维活动研究中的基本概念、研究方法和最近的研究结果。第七章由北京大学心理学系耿海燕副教授编写，主要介绍意识研究的基本问题，意识与其他认知功能的关系，以及关于意识神经基础的研究工作。第八章由北京大学心理学系朱滢教授编写，介绍人类最复杂的社会认知功能之一即自我表达、自我意识等方面的基本概念和研究方法，以及相关的认知神经科学研究。应该指出的是，不同作者的研究背景有很大的差异，其思想方法和写作风格也有很大的差别，因此本书的不同章节的组织 and 行文风格略有不同。希望读者能理解这些，能接受并感受不同研究者的不同风格。

认知神经科学发展的历史很短，目前在中国的发展也只有十几年的时间。因此，由于对认知神经科学问题的认识、对各种研究手段的掌握以及研究工作的水准的限制，尽管参与本书编写的作者都已尽了最大的努力，但本书的最后文稿难免存在一些问题。我们真诚地希望广大读者对我们的工作提出批评和建议。希望本书的出版能够对那些对认知神经科学感兴趣的读者有一定的帮助，同时也希望对更多的有关认知神经科学研究的学术专著的出版起到抛砖引玉的作用。

第二章

认知神经科学的脑成像技术

认知神经科学将认知心理学的实验方法与各种用来检测大脑功能如何支持心理活动的技术结合起来，主要以正常人为对象（当然也可对病人和动物）进行研究。认知神经科学的脑功能成像技术包括正电子发射层析照相（PET, positron emission tomography），磁共振成像（MRI, magnetic resonance imaging），以事件相关电位（ERPs, event-related brain potentials）为主的脑电图（EEG, electroencephalography）、脑磁图（MEG, magnetoencephalography）等。人类认知研究面临的一个重要挑战，就是发展和应用这些手段，将认知过程与相关的神经活动联系起来。对认知的功能解剖学的完整了解，取决于对从单个神经元水平到皮层功能区域水平的知识的全面掌握。当然，这种程度的了解，还是一个遥远的目标。作为一个新兴领域，功能神经成像正在向认知科学研究的各个方面渗透，特别是在那些已有其他方法揭示认知功能的解剖对应的特定问题上。脑功能成像的任务可以简单明确地描述为：识别与一个精心设计的任务中的行为表现相关联的脑区及其时序关系。脑功能成像的优势就在于它是完成这项工作的独特的手段，而且适用于我们最感兴趣的脑——人的大脑。

本章讨论的脑成像技术是无创性的、可用于人类研究的神经科学技术，它们能够在细胞集合水平上，实时、定位地观察相应于认知功能的脑内活动。它们特别适于结合认知心理学的行为实验模式，适于脑内功能模块复杂联系的研究，并适于最终建立具有脑机制约束的理论模型。必须强调的是，这个领域方兴未艾，正在日新月异地发展变化。而且，将多种认知神经科学技术互补地结合起来，包括高时间分辨率低空间分辨率的事件相关电位与高空间分辨率低时间分辨率的功能磁共振成像的结合，是这一领域的又一特

征。因此，在认知神经科学的现代进展中，一个无创性的、互补的认知神经科学技术群正在形成，它已有的贡献是突出的，它在未来发展中，更是不可或缺的。

第一节 事件相关电位

在现代脑成像技术中，事件相关电位的历史最为久远，可以追溯到1929年第一篇人类脑电图论文的发表。在后来七八十年的发展历程中，它几经坎坷盛衰，至20世纪90年代掀起功能性神经图像发展高潮之际，它不但没有被取代，反而展现出高时间分辨率的优势，并借助神经图像的思想与技术，成为现代主要的脑成像技术之一。在心理学以及认知神经科学领域，ERPs的使用已经十分广泛与深入，其系统化与理论化的进程也在逐渐加快。本节内容只侧重于提供理解ERPs或从事ERPs所最需要的基本知识，提供对ERPs实验与ERPs波形的基本认识。

一、细胞电生理基础

(一) 神经冲动与动作电位

1. 静息电位 (resting potential)

神经细胞(神经元)是一种可兴奋细胞，其细胞内外的离子不但分布不同，而且细胞膜两侧离子的透膜运动也不相同。与生物电起源关系密切的阳离子是钠(Na^+)和钾(K^+)， Na^+ 主要分布在细胞外，而 K^+ 主要分布在细胞内，但由于生物体内 Na^+ 的总量远远超过 K^+ ，再加上细胞内带负电荷的蛋白质与氯离子，因此，细胞外的正电荷也远远高于细胞内的正电荷。当细胞活动处于休止状态时，一方面，依赖钾钠泵的作用才能穿透细胞膜的 Na^+ 透膜运动很少，另一方面， K^+ 既因浓度梯度而自细胞内移向细胞外，又因电梯度而自细胞外移向细胞内，从而达到一种动态平衡的极化状态，此时，细胞内对细胞外的电位差可达 $-65 \sim -90 \text{ mV}$ ，这种膜电位就是静息电位。

2. 动作电位 (action potential)

当神经细胞因刺激而转入兴奋状态时，膜透性发生剧烈变化，特别是出现 Na^+ 由外向内的大量离子透膜运动，以及 K^+ 相反方向的运动，最终，平

衡的极化状态被破坏，膜电位的极性被翻转，即由负的静息电位变成细胞内可达 +40 mV 左右的动作电位，亦即产生了一次放电或动作电位。

动作电位是由不同的时相所组成的。首先是总合传入刺激，但尚未达到放电阈值的时相，它是放电前不到 0.5 ms 的时间，称作潜伏总合期；接着是 0.5 ~ 1 ms 的短暂放电，快速的极性翻转产生一个高耸的电位峰，称作锋电位，这是一个遵从“全或无”定律的去极化过程，此时神经细胞的兴奋性状态处于绝对不应期，而这些特性的重要生物学意义在于神经冲动的独立性与神经传导的单向性；然后是大约持续 5 ~ 15 ms 的负后电位和再后大约持续 50 ~ 80 ms 的正后电位。总之，经历 80 ~ 100 ms 后，神经细胞才完全恢复正常状态。负后电位开始后，神经细胞即结束绝对不应期而进入相对不应期，它包括在恢复正常兴奋性以前持续较长的低常期，以及在低常期之前插入的短暂超常期，这些时相与放电后的复极化过程相关。

（二）神经传导与突触后电位

神经冲动一旦发生，就会沿着神经细胞树突、细胞体、轴突进行传导，而且，简单地以同样形式的神经冲动进行传导。但对于细胞之间的传导，却要通过突触，并采取不同的传导形式。当神经冲动到达突触时，会在突触后膜上产生一个突触后电位，这是一种可以总合的递增性电位，它既可以是在同一个树突上连续的时间总合，也可以是在同一个神经细胞但不同树突上的空间总合，当总合使这突触后电位达到放电阈值时，即产生了这个神经细胞的动作电位，从而完成一次神经细胞之间的神经传导（图 2-1）。

突触后电位因极性不同，对于总合过程既可以是递增性的，也可以是递减性的，前者称为兴奋性突触后电位（EPSP, excitatory postsynaptic potential），后者称为抑制性突触后电位（IPSP, inhibitory postsynaptic potential），在神经传导中，分别对神经细胞活动产生兴奋或抑制作用。突触后电位在神经细胞内液与神经细胞外液中均产生电场，在细胞内由于细胞膜造成的相对封闭环境，还形成了细胞内环形电流。这种因突触后电位而导致的神经细胞外液电场与神经细胞内环形电流，分别是脑电与脑磁产生的细胞电生理基础。

（三）电活动的记录

同样反映神经系统功能的电活动，可以表现在单细胞与细胞集合两个不同的水平上，而不同水平电活动的记录与研究，则主要依赖记录电极的不同，也与放大记录系统特性的不同有关。



图 2-1

突触后电位 (PSP) 的时间与空间积累以及动作电位的触发。纵坐标是跨膜电位 (mV); 横坐标是时间; 虚线是触发动作电位的阈值水平。1. 兴奋性 PSP; 2. 兴奋性 PSP 的时间积累; 3. 时间积累触发的动作电位; 4. 空间积累触发的动作电位; 5. 抑制性 PSP; 6. 静息电位

引自 Fig. 3.3, Kalat JW. (2001) *Biological Psychology* (7th edition).

Wadsworth, Thomson Learning.

1. 微电极记录

记录单个神经细胞的各种电活动, 必须使用微电极。细胞外记录的微电极直径多为几 μm , 而细胞内记录则需小于 $0.5 \mu\text{m}$ 。此外, 由于技术的进步, 还允许对相邻多个细胞同时进行单细胞记录, 或者同步对不同部位进行多导单细胞记录。

2. 大电极记录

常见的大电极记录是无创性的头皮外记录, 多为直径 $\leq 1 \text{ cm}$ 的片状电极。与微电极完全不同, 它只在细胞集合水平上记录神经细胞的综合电活动。记录同类电活动的, 还有可直接置于大脑皮层上的皮层电极, 以及可插入脑组织内部的深部电极。此外, 深部电极也允许多重电极记录(一个电极