

信息学院人工智能专业方向

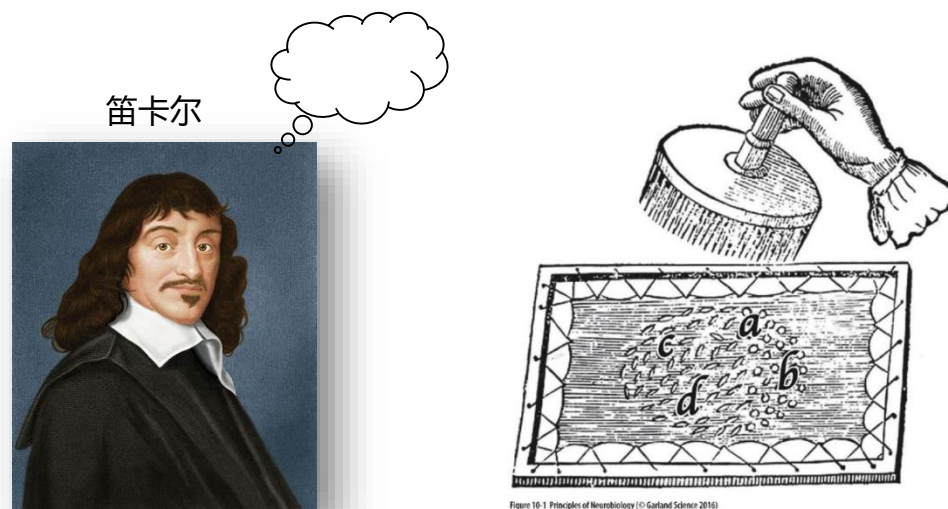
《脑与认知科学》

记忆和学习

- 注：本课程部分内容整理自课程教材、参考书籍或公共资源，特此致谢！

什么是记忆？

- 记忆：动物通过感受和反应的过程进行学习，并通过大脑神经结构带来持续性的改变，从而将所学知识存储起来的过程
- 记忆曾被认为类似于针穿过亚麻布后留下的印迹：一些针孔保持张开，另一些针孔虽然闭合，但却在那个位置留下了遗迹，使其之后能够更容易地被重新穿过



记忆的类型

- 感觉记忆(sensory memory): 几毫秒-几秒, 不需要特别注意
- 短期记忆(short-term memory): 几秒-几分钟, 短期内记忆信息
- 长期记忆(long-term memory): 几天-数年, 又分为长期陈述性记忆和长期非陈述性记忆

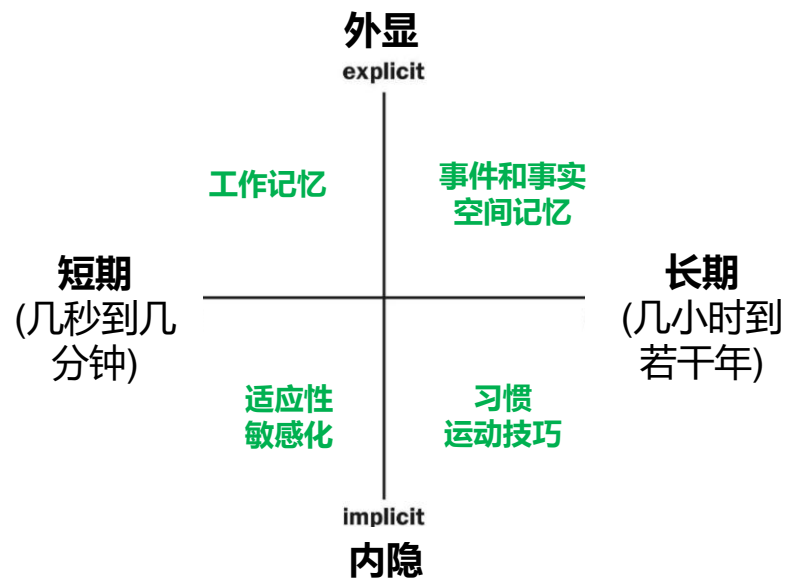
		记忆特征			
		时间历程	容量	有意注意?	丧失机制
记忆类型	感觉	几毫秒至几秒	高	否	主要为衰退
	短时和工作	几秒至几分钟	有限 (7 ± 2 个项目)	是	主要为衰退
	长时非陈述性	几天至几年	高	否	主要为干扰
	长时陈述性	几天至几年	高	是	主要为干扰

记忆的过程

- 记忆分为三个主要阶段：
 - 编码(coding): 对输入信息的处理和临时存储
 - 获得(acquisition): 经历或学习某项事物后记忆的最初形成阶段
 - 巩固(consolidation): 新获取的记忆被巩固加深
 - 存储(storage): 记忆被存储在神经系统某处的过程
 - 提取(retrieval): 回想已有记忆的过程
- 遗忘(forgetting): 记忆的遗忘是必要的, 记性太好也是病!

记忆的类型

- 在持续时间上，记忆可以分为短期记忆和长期记忆
- 工作记忆(working memory)是短期记忆的一种，指在认知过程中（如进行多步数学运算的过程，或在拨号前短暂记住某个电话号码）对信息和事物的短期存储



工作记忆

- 工作记忆的容量：一个人短时间内能记住的项目个数，正常人能记住5-9个项目

工作记忆测试

在40秒钟之内,记忆下列20个孤立的单词或数字,然后立即复述

黄河 算术 馒头 帽子 电影 农民 剪刀 良心 山峰 磁带

柏树 太阳 扫帚 钞票 火车 战士 公园 石油 小鸡 锣鼓

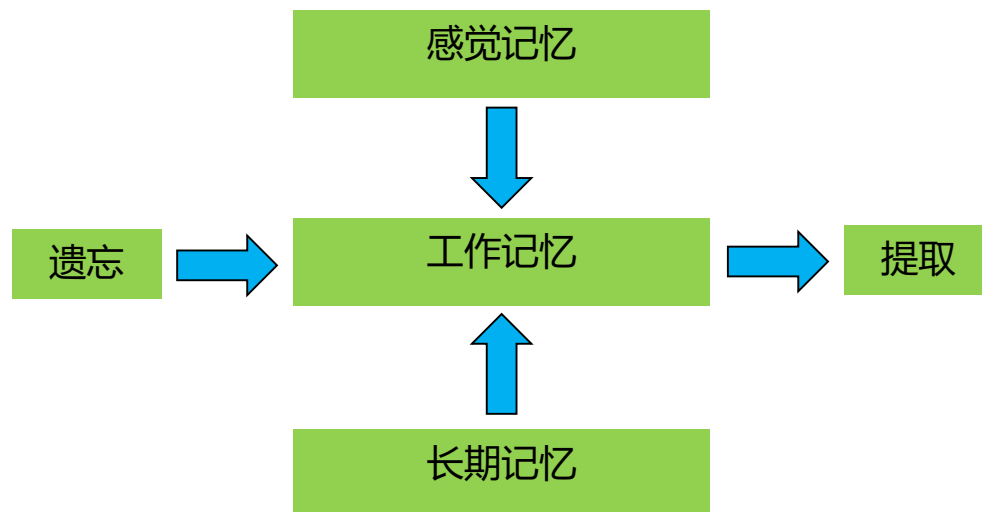
43 57 18 79 82 96 15 21 74 52

37 85 49 63 89 27 91 39 68 23



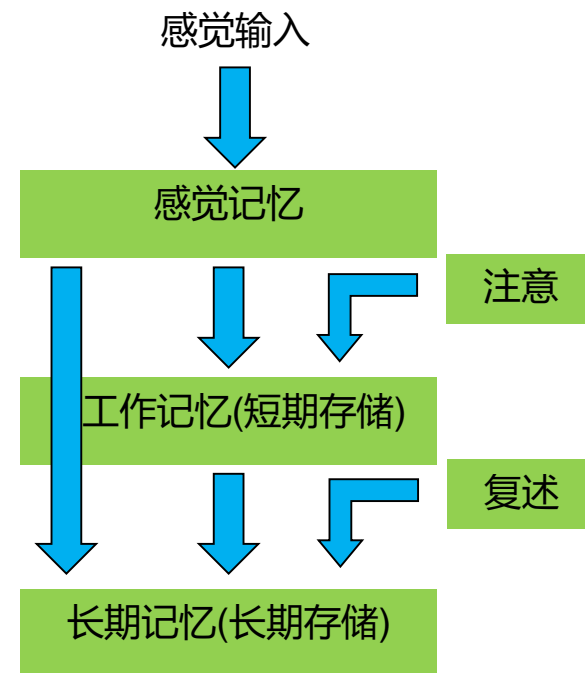
工作记忆

- 作为一种容量有限、仅在短期间内保存的信息，工作记忆可源于感觉记忆的输入，也可以从长期记忆中提取获得



工作记忆

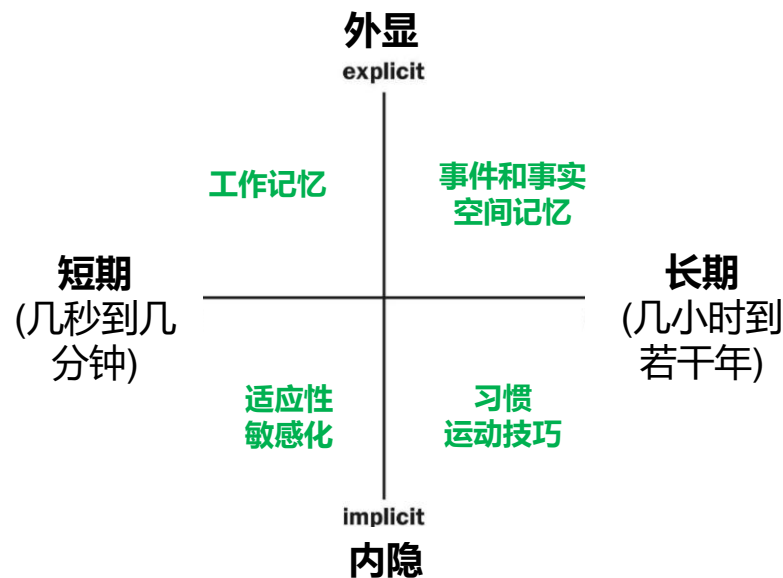
- 工作记忆的认知机制：
 - 感觉信息形成短暂的感觉记忆
 - 通过注意过程，选择信息进入短期存储（工作记忆）
 - 通过复述转入长期存储（长期记忆）
- 此外，研究显示感觉记忆也有可能通过直接编码形成长期记忆



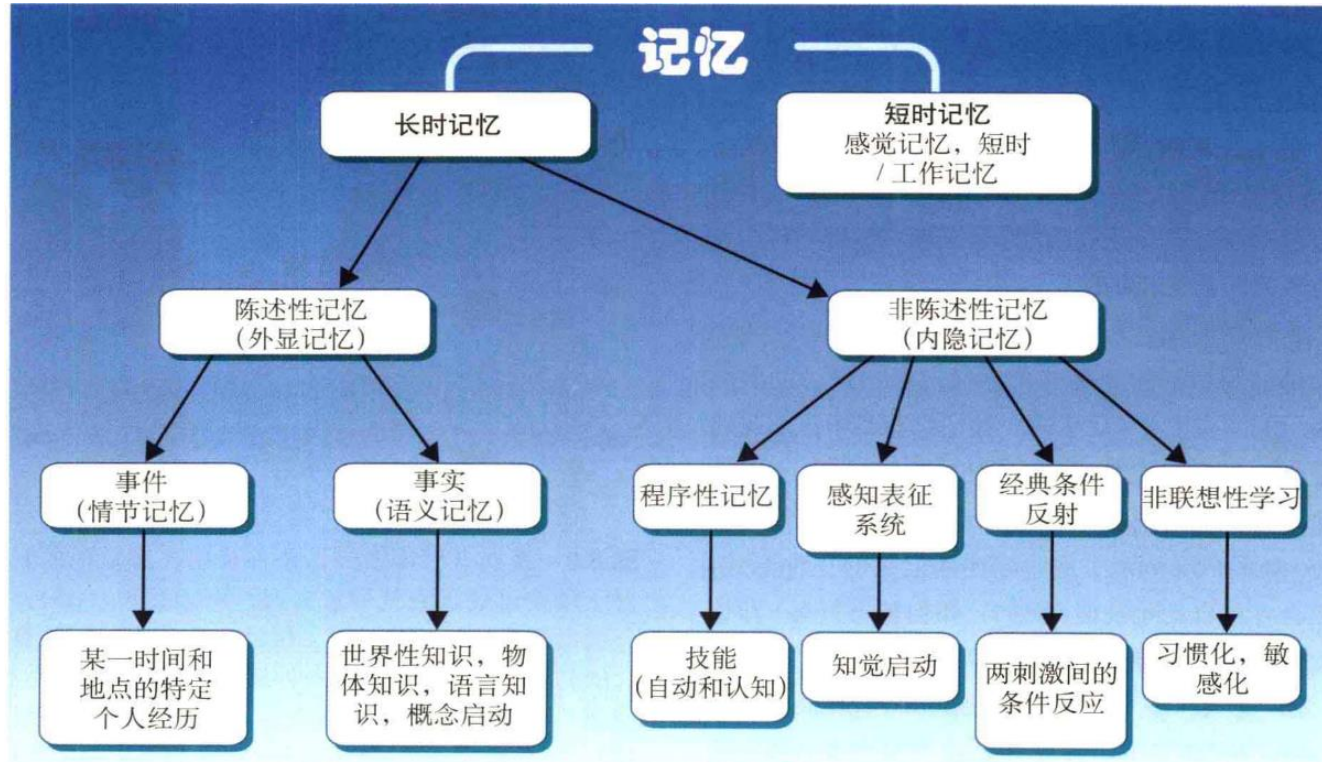
工作记忆的认知机制

长期记忆的类型

- 陈述性(declarative)记忆：也被称为外显(explicit)记忆，是指那些对先前已知事物（如姓名、事实、事件）有意识的回忆，我们在日常生活中经常提到的记忆通常都属于外显记忆
- 非陈述性(nondeclarative)记忆：又叫内隐(implicit)记忆，帮助人们通过已有的经验掌握完成某项任务的技能，这一过程不需要有意识的记忆

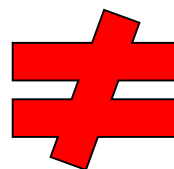


长期记忆的类型



陈述性记忆

情节记忆（事件）：自传式记忆，对以往事件的个人意识

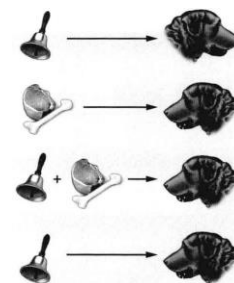


语义记忆（事实）：世界知识，通常与情节记忆无关



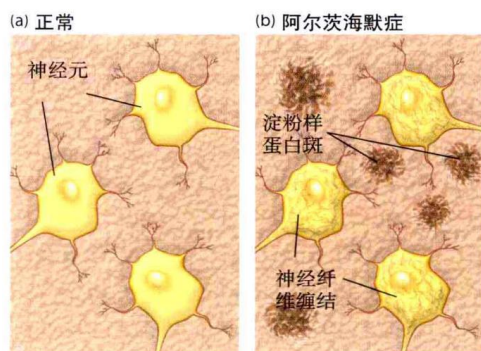
非陈述性记忆

- 非陈述性记忆不需要有意回想先前经验，但先前的经验又确实促进了行为表现
 - 程序性(procedural)记忆：包含各种自动技能（运动等）和认知技能（读写等）的学习
 - 知觉表征系统：感知系统中发挥作用，更快地识别以前出现过的物体或词语（知觉启动）
 - 非联想学习
 - 习惯化：因反复刺激而对刺激的敏感性降低
 - 敏感化：因反复刺激而对刺激的敏感性增高
 - 经典的条件反射



大脑损伤与记忆

- 短期记忆遗忘症：由脑损伤等原因引起的短期记忆缺陷
- 长期记忆遗忘症：对长期记忆产生影响
 - 逆行性遗忘症：对遗忘症发生以前的事件记忆丧失
 - 顺行性遗忘症：形成新记忆能力的丧失



记忆的神经机制

- 目前普遍认为记忆通过强化神经回路中的突触连接进行存储
 - 突触权值矩阵 (synaptic weight matrix) 在理论上可以存储巨量信息，从而将特定的输入模式（事件）与特定的输出模式（记忆提取）联系起来

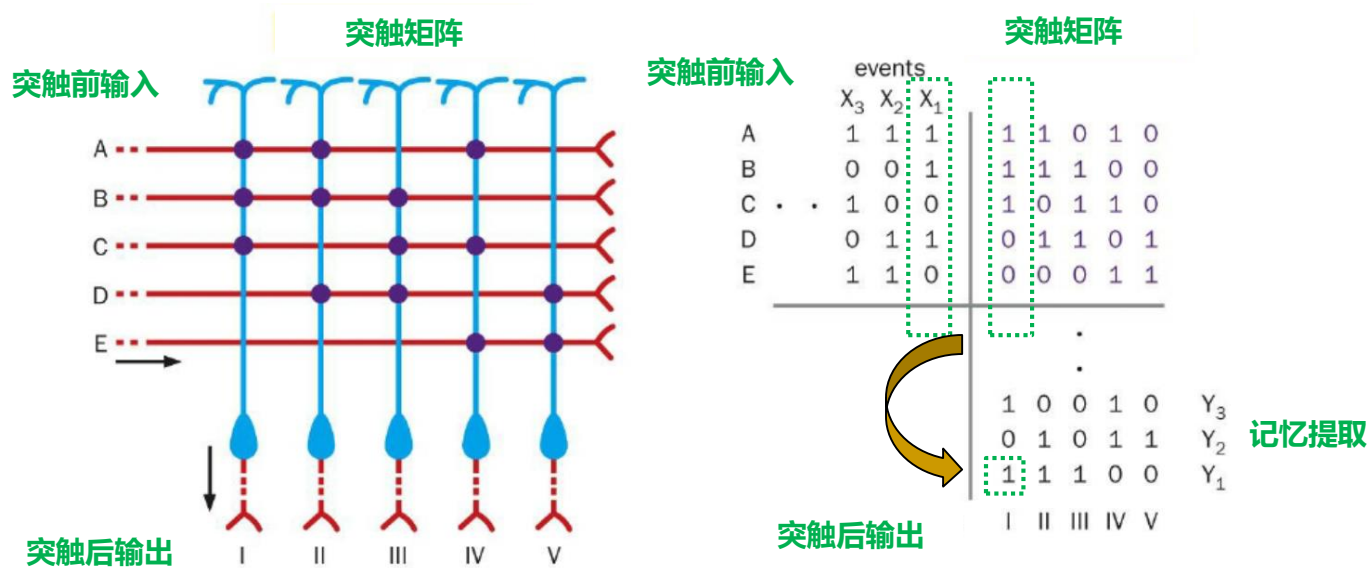


Figure 10-5 Principles of Neurobiology (© Garland Science 2016)

记忆的神经机制

- 哺乳动物海马的神经回路中存在明显的突触权值矩阵
 - 每个神经元都与几千甚至几万个其他神经元相连组成庞大的突触矩阵，为记忆的获得和存储提供了巨大的容量

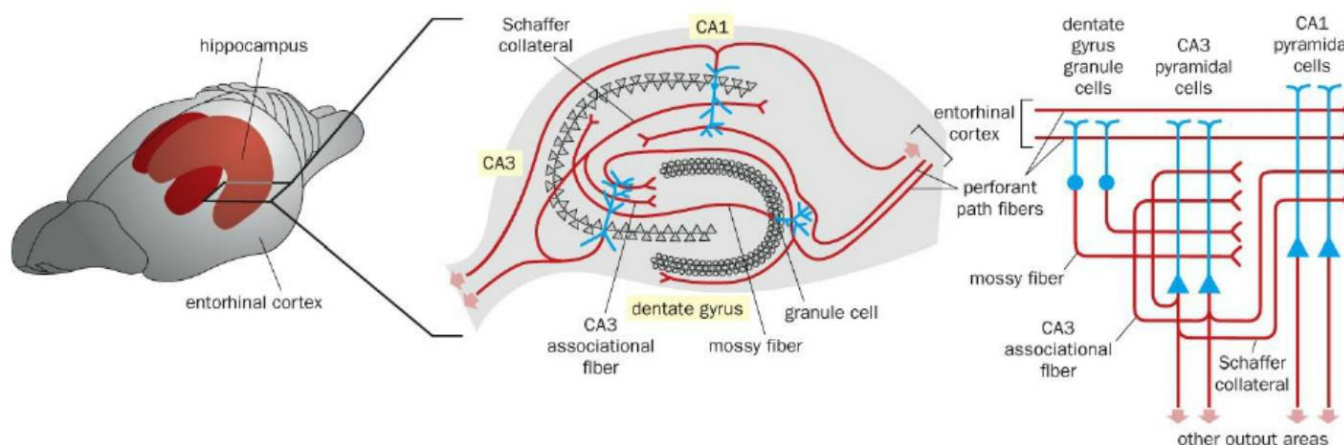


Figure 10-6 Principles of Neurobiology (© Garland Science 2016)

学习的神经机制

- 学习的本质就是根据经历的事件改变突触矩阵的权值，即改变突触连接的方式，如形成、消失、增强、减弱，也称为突触可塑性(synapse plasticity)
- 赫布法则：如果神经元A重复或持续刺激神经元B，则它们的活动模式相关，导致它们之间的突触连接增强
- 赫布法则的延伸理论：如果神经元A对神经元B的兴奋性刺激反复失败，使得他们的活动模式不相关，则它们之间的突触连接减弱

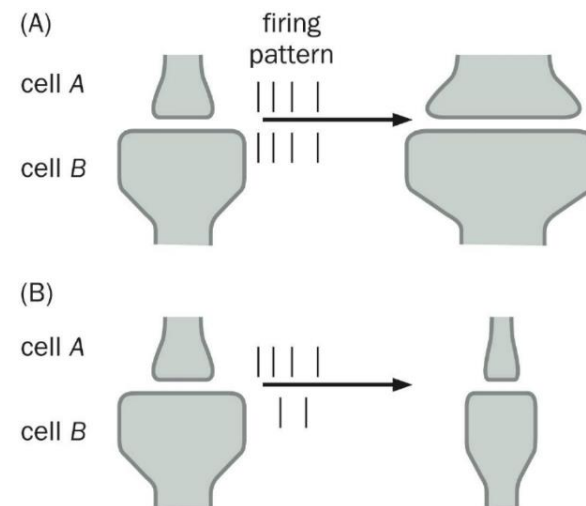
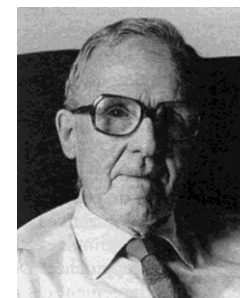
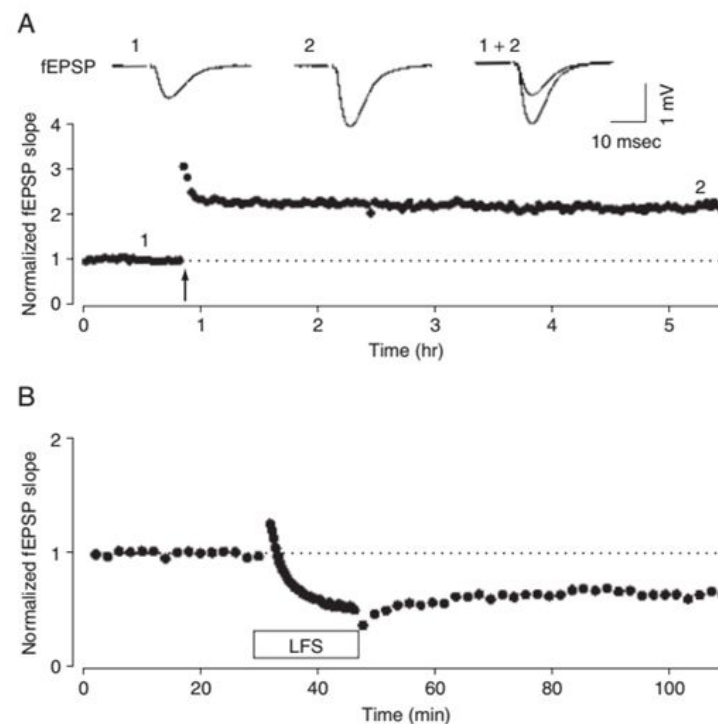


Figure 5-25 Principles of Neurobiology (© Garland Science 2016)

赫布法则示意图

突触可塑性现象

- 对海马中的神经元施加高频电刺激后，可记录到兴奋性突触后电位 (EPSP) 增大，表明神经元的突触传递效率提高，而且可以持续几个小时甚至几天，被称为长时程增强 (long-term potentiation, LTP)
- 对LTP相对的机制是长时程抑制 (long-term depression, LTD)，由低频刺激诱导产生



电生理记录LTD/LTP现象. (A)给予100Hz的高频刺激(HFS)能够诱发出LTP. (B)给予重复的低频刺激 (LFS) 能够诱发出LTD

突触可塑性:LTP的特性

- LTP具有输入特异性、协同性和关联性的特点
 - **输入特异性(input specificity)**: LTP只发生在经历了高频刺激的突触, 而不发生在其他未被刺激的突触上
 - **协同性(cooperativity)**: 与赫布法则类似, 通过诱发突触后神经元的去极化, 能够仅通过弱刺激(如单次刺激)即可诱导LTP
 - **关联性(associativity)**: 一个不能单独产生LTP的弱刺激, 当和强刺激共同作用时可以引发LTP

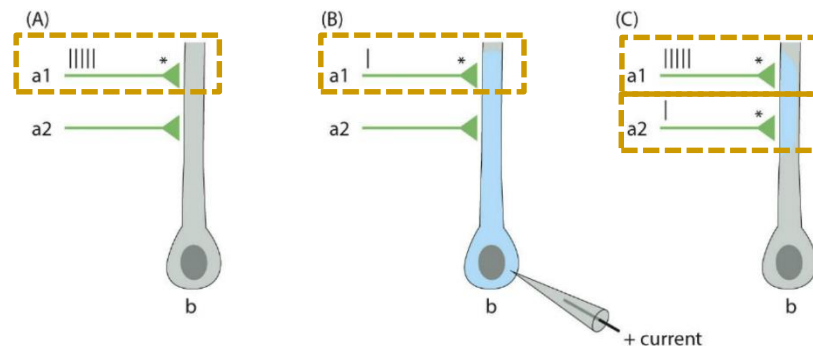


Figure 10-9 Principles of Neurobiology (© Garland Science 2016)

突触可塑性:LTP的特性

- LTP的上述特点有利于调节对记忆获取非常重要的突触权值矩阵,使得个体的经历能够在单一突触水平上改变突触权值矩阵中每一个突触的强度
 - 输入特异性使得同一个突触后神经元与不同突触前神经元形成的突触强度能够被独立的调控
 - 协同性使得某一个输入信号能够通过同时去极化多个突触后神经元,从而调节一组突触的强度
 - 关联性使得同时发生的输入信号能够互相作用,从而影响对方信号通路上的突触强度,这一点对联想学习十分重要

突触可塑性: 突触的双向调节

- 如果突触连接只能被强化，整个突触权值矩阵将最终饱和从而失去编码新记忆的空间，因此除LTP外还有许多其他可塑性机制存在，使得突触权重能够被双向调节
- LTP/LTD代表了对突触强度不间断的双向修饰调控，从而大幅度增加了突触记忆网络的机动性和存储能力
 - LTP和LTD能够先后影响同一个突触，即低频刺激能够抑制曾被LTP加强的突触，而高频刺激也能够增强曾被LTD弱化的突触

突触可塑性: 脉冲时序相关可塑性

- 除LTP/LTD外, 另外一种突触可塑性机制被称为脉冲时序相关可塑性(spike-timing-dependent plasticity, STDP)
- 在STDP中, 突触前和突触后兴奋的精确时序性对于突触强度改变极为关键
 - 如果突触前神经元和突触后神经元的先后兴奋且间隔很短(通常在几十毫秒), 且这种成对兴奋模式多次出现, 则该突触的连接强度增大
 - 如果突触前神经元在突触后神经元兴奋后的几十毫秒内也产生兴奋, 则多次反复后突触的连接强度降低

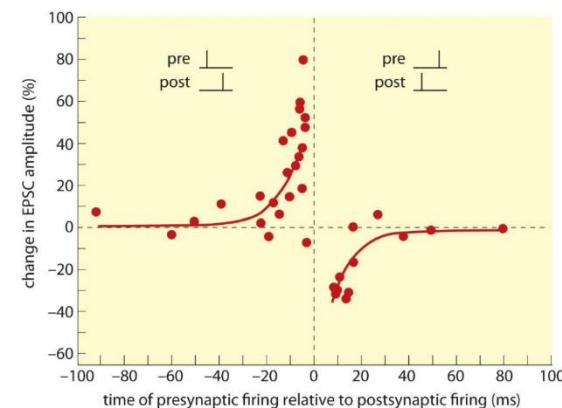


Figure 10-15 Principles of Neurobiology (© Garland Science 2016)

突触可塑性: STDP的特点

- STDP兼具LTP和LTD两者的特性，既可以加强突触连接也可弱化突触连接
- 利用赫布法则解释STDP:
 - 如果突触前神经元重复在突触后神经元之前兴奋，则这一突触前兴奋应参与了造成突触后神经元兴奋的刺激过程，因此两个神经元之间的突触应该被加强
 - 如果突触前神经元重复性在突触后神经元之后兴奋，则这一突触前兴奋就不可能参与造成突触后神经元兴奋的刺激过程，因此两个神经元之间的突触应该被削弱

学习的类型

- 所有的动物都必须更好地适应不断变化的环境，因此进化出不同类型的学习方式
- 简单学习类型：
 - 习惯化(habituation)：对重复出现的刺激响应强度降低，反映神经系统对于环境刺激的响应可以发生快速变化
 - 敏化(sensitization)：对出现在某有害刺激之后的刺激响应强度增加的过程



习惯化和敏化的神经机制

- 海兔只有20000个神经元且较大便于电生理记录，具有简单形式的学习和长期记忆能力
 - 习惯化：重复刺激会导致海兔的缩鳃反射程度降低
 - 敏感化：如果对已经习惯化的海兔尾部施加一个强烈的电刺激，缩鳃反射将会极大增强

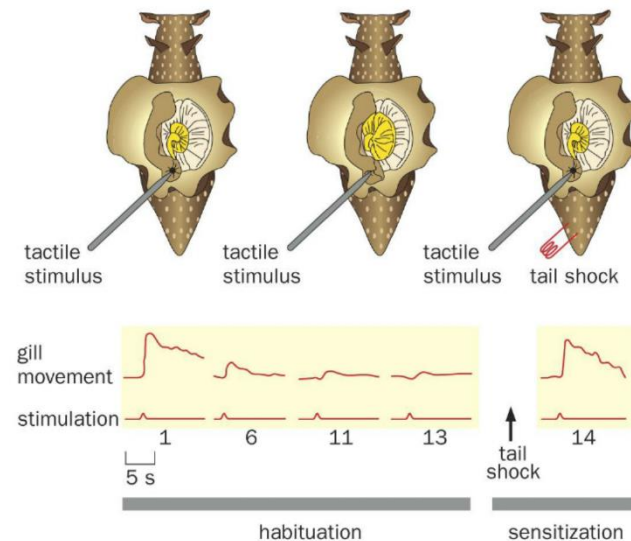


Figure 10-24b Principles of Neurobiology (© Garland Science 2016)

习惯化和敏化的神经回路

- 缩鳃反射的神经回路：
 - 吸水管的24个感觉神经元与鳃部肌肉的6个运动神经元形成单突触连接
 - 另一组感觉神经元将电击通过5-羟色胺 (5-HT) 神经元分别传导至感觉神经元的胞体以及感觉-运动神经元突触的前末端
- 行为习惯化和敏化的神经回路变化是什么？
 - 感觉神经元对重复性刺激反应的改变
 - 感觉-运动神经元突触的传递效能改变
 - 运动神经元与肌肉之间神经肌肉接头的突触传递效能改变
- 上述实验表明，突触效能抑制造成习惯化，而突触效能增强造成敏化

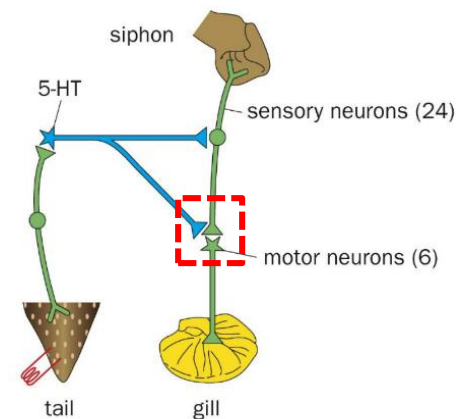
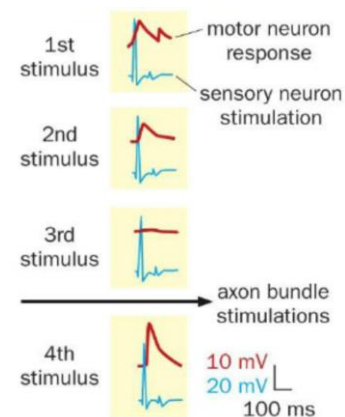


Figure 10-24c: Principles of Neurobiology (© Garland Science 2016)



高级的学习类型

- 经典条件化(classical conditioning, 又称条件反射): 对条件刺激产生新反应的能力, 在人和动物中广泛存在
 - 食物(非条件刺激)和一个本来不能导致流涎的声音(条件刺激)同时成对出现并重复多次后, 这一声音便可以导致流涎
 - 条件刺激一般早于非条件刺激, 属于一种联想学习(associative learning)

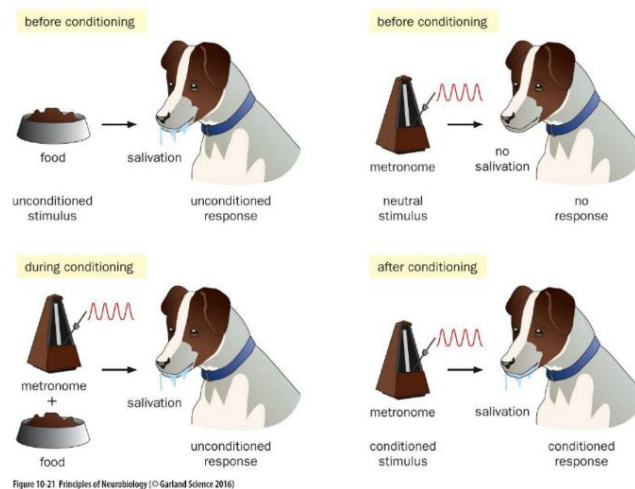


Figure 10-21 Principles of Neurobiology (© Garland Science 2016)

高级的学习类型

- 操作性条件化(operant conditioning, 也称工具性条件化): 在操作性条件反射中, 一个强化因子只在动物表现出特定行为时出现, 也属于一种联想学习
 - 当强化因子(食物)在大鼠每一次按压平板都出现时, 老鼠渐渐将按压平板(它自身的动作)与食物奖赏联系起来

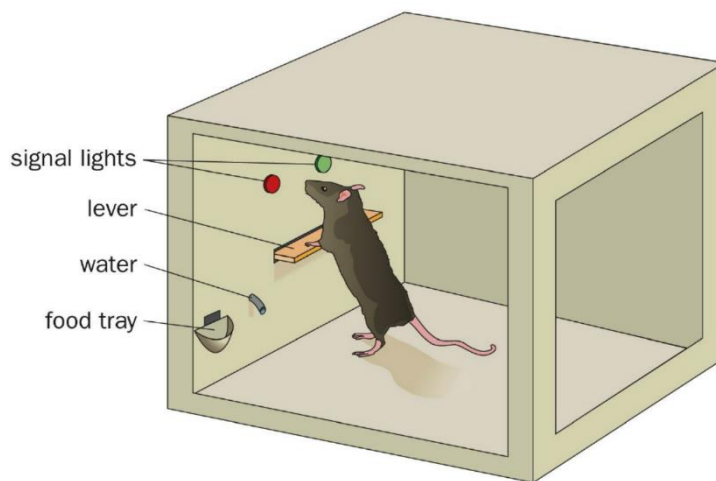


Figure 10-22 Principles of Neurobiology (© Garland Science 2016)

条件化学习的特点

- 经典条件化和操作性条件化的共同特点
 - 时机(发生顺序和间隔时间)对条件化的有效性极为重要
 - 经典条件化：条件刺激→非条件刺激
 - 操作性条件化：行为→强化因子, 间隔短条件化效果最好
- 条件化学习的消退(extinction)现象
 - 经典条件化：当条件刺激重复性地不与非条件刺激配对出现时，条件化的反应会逐渐消失
 - 操作性条件化：当强化因子没有在特定行为出现后重复性出现时，这一行动也会消失

条件化学习的神经回路

- 果蝇的嗅觉条件化学习回路模型
 - 条件刺激（中性气味）经投射神经元进入蕈状体神经元，后者与输出神经元构成突触矩阵，用于表征不同的输入气味并可激活不同的输出神经元
 - 条件化学习过程中，表征非条件刺激（食物/电击）的调节神经元与表征条件刺激的蕈状体神经元同时激活，从而改变了蕈状体神经元与输出神经元之间的突触连接强度
 - 条件反射形成后，当条件刺激单独出现，即可激活相应的蕈状体神经元并进一步激活输出神经元，引发果蝇产生排斥性或吸引性的行为

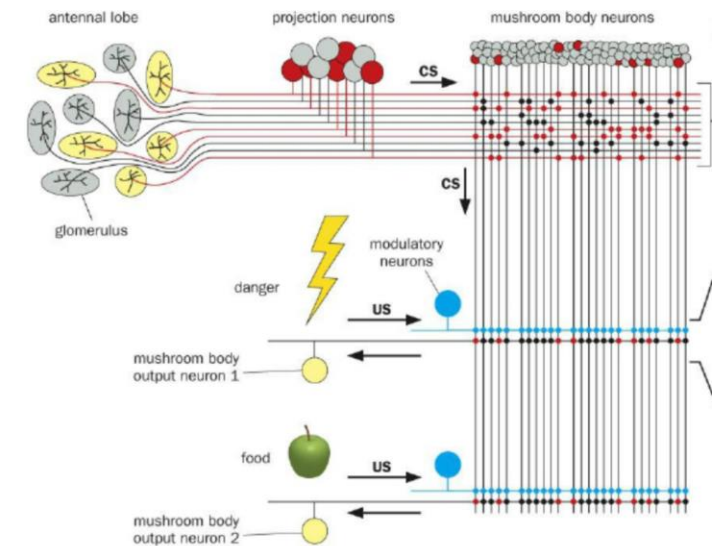
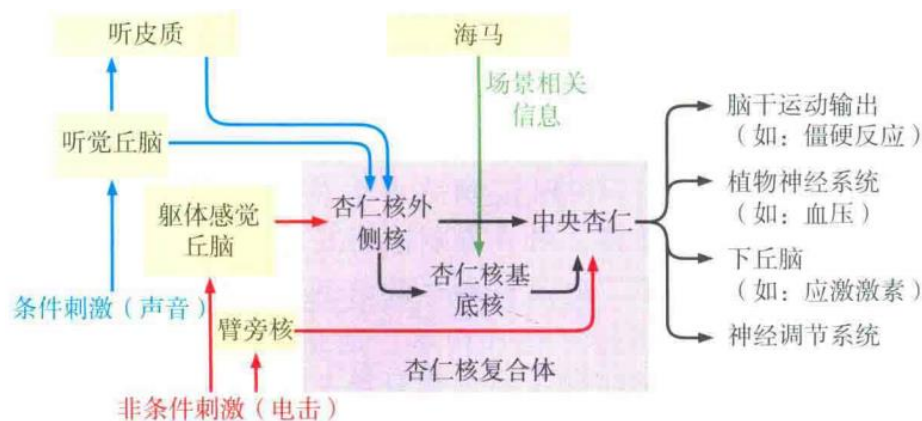


Figure 10-29a Principles of Neurobiology (© Garland Science 2016)

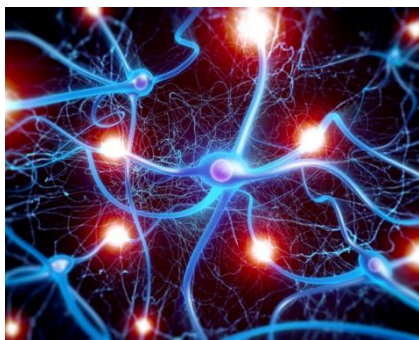
恐惧条件化的神经回路

- 杏仁核是高等动物的情绪记忆和信息处理中心，在恐惧条件化学习中具有核心作用，而中央杏仁核是对恐惧反应的输出部分
 - 听觉条件刺激：听觉丘脑/听皮质→杏仁核外侧核→中央杏仁核
 - 场景条件刺激：海马→杏仁核基底核→中央杏仁核
 - 引发恐惧反应的非条件刺激(电击)：1) 躯体感觉丘脑→杏仁核外侧核→中央杏仁核，2) 痛觉通路(臂旁核)→中央杏仁核



探索学习的神经机制

- 进一步确定学习与突触强度改变的因果关系，需要在脑科学研究中实现以下目标：
 - 确定与某个特定学习过程相关的具体神经元和突触可塑性
 - 确定突触权值矩阵在学习前后的特定状态
 - 对突触权值矩阵进行人为修改，使其无需学习即可由一个特定状态直接变成另一个特定状态
 - 验证修改后的生物行为与经过学习后所形成的行为类似



认知学习

- 除可被视为依据经验而改变行为的过程外，学习也可以被解释为对新知识的获取，因此被称为认知学习(cognitive learning)
- 从认知学习的角度理解条件化过程
 - 动物学习到了条件刺激（如声音）后会发生非条件刺激（如食物）这一新知识
 - 条件反射行为则是运用这一知识预测即将发生的非条件刺激的反应（如流涎），而非是对条件刺激本身的反应

认知学习

- 尽管认知能力通常被认为只在具有发达大脑皮质的哺乳动物尤其是人类中存在，但神经科学的实验表明，即使是昆虫也可以利用认知学习掌握抽象概念
- 蜜蜂可以通过食物奖励学会“相同”和“不同”的抽象概念，并用这一概念来指导行为
 - 识别不同颜色的符号标记，并可迁移到不同形状、气味的识别

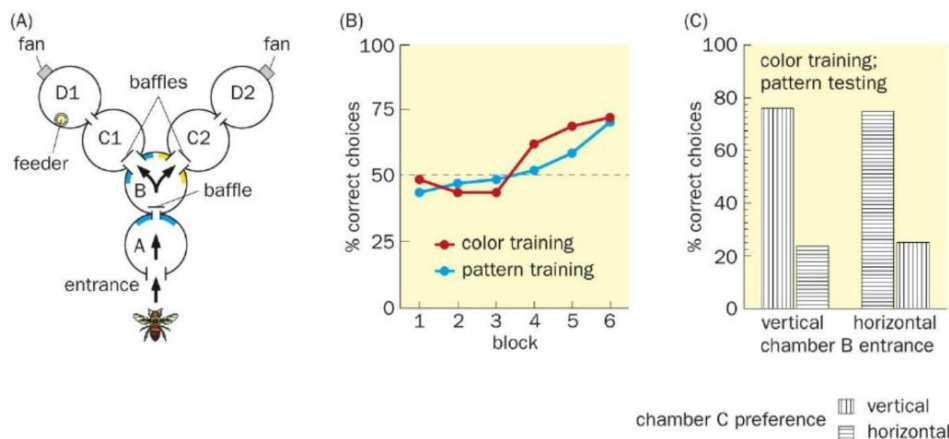


Figure 10-23 Principles of Neurobiology (© Garland Science 2016)

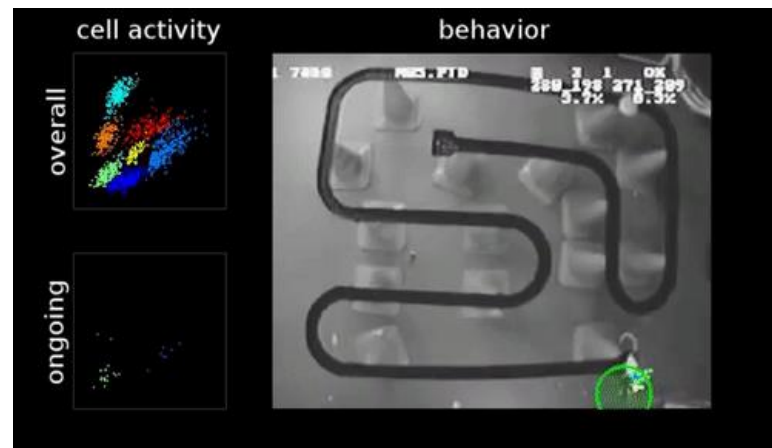
海马与空间记忆

- 出租车司机的海马容量要比普通公交车司机的大，并且其容量大小与出租车司机驾驶年龄呈现正相关
- 提示海马参与了与空间认知相关的长期空间记忆 (spatial memory)



海马与空间记忆

2014年的诺贝尔生理学奖授予了海马和相关皮质中位置细胞和网格细胞的发现



位置细胞 (place cell)



John O'Keefe

John O'Keefe discovered, in 1971, that certain nerve cells in the brain were activated when a rat assumed a particular place in the environment. Other nerve cells were activated at other places. He proposed that these "place cells" build up an inner map of the environment. Place cells are located in a part of the brain called the hippocampus.

May-Britt Moser and Edvard I. Moser



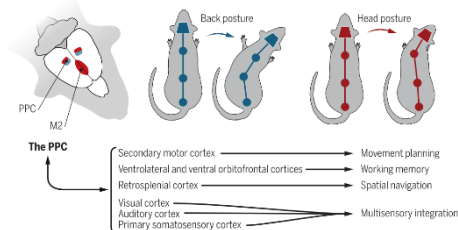
May-Britt och Edvard I. Moser discovered in 2005 that other nerve cells in a nearby part of the brain, the entorhinal cortex, were activated when the rat passed certain locations. Together, these locations formed a hexagonal grid, each "grid cell" reacting in a unique spatial pattern. Collectively, these grid cells form a coordinate system that allows for spatial navigation.



网格细胞 (grid cell)

Posture cells in the PPC-M2 network

Posture cells have been discovered in the PPC-M2 network. PPC neurons in rodents have reciprocal connections to various cortical areas, including visual, auditory, primary somatosensory, and prefrontal cortices, as well as the secondary motor and retrosplenial cortices, thus supporting a series of cognitive functions.



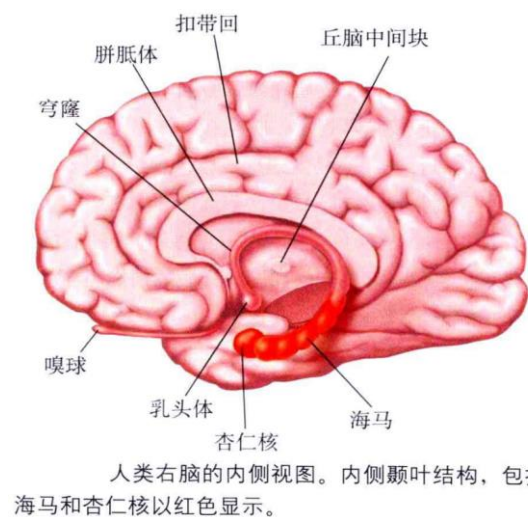
sciencemag.org SCIENCE

姿态细胞 (posture cell)



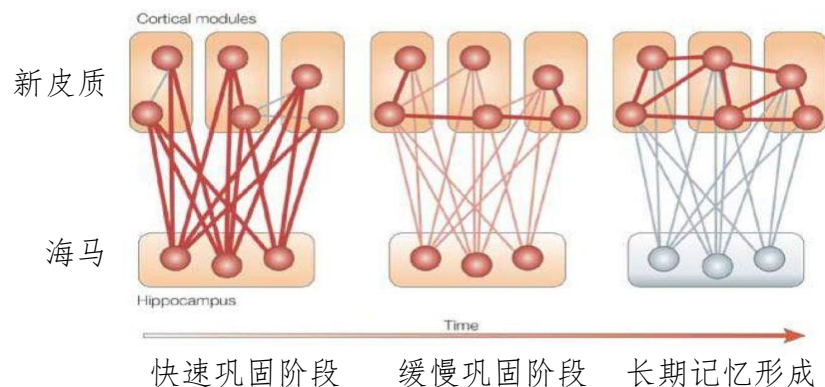
与长期记忆相关的皮质区域

- 海马及内侧颞叶的相关皮质：
 - 与短期记忆无关，但在外显记忆的最初存储并形成长期记忆的过程中极为重要
 - 并不参与长期记忆的存储和提取，因此对大脑受损前获得的旧记忆影响有限
- 外显长期记忆在哪里存储？
 - 大脑中的新皮质参与长期外显记忆的存储
 - 特定种类的记忆存储在特定的皮质区域



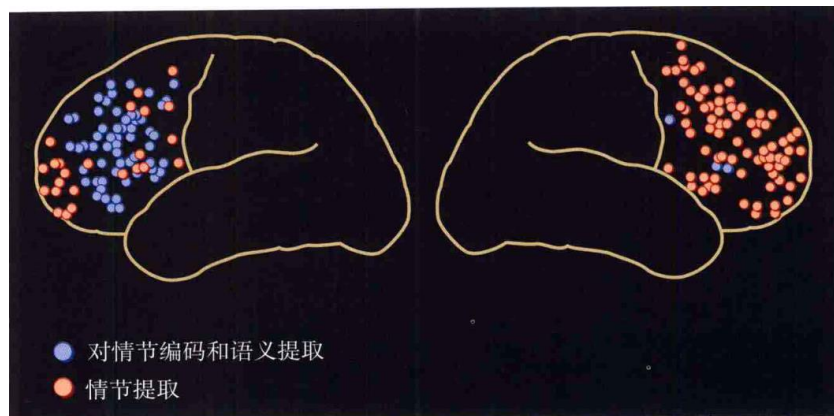
长期记忆形成的巩固假说

- 巩固是指长期记忆从开始获得后随时间而逐渐形成的过程，包括以下阶段：
 - 快速巩固阶段：最初记忆形成时，包括海马在内的内侧颞叶参与了长期记忆的编码和提取，将分散到各个皮质区域的信号联系起来
 - 缓慢巩固阶段：海马和皮质区域之间通过持续的相互作用，使得皮质区域之间逐渐建立内部联系，逐渐减少长期记忆对海马的依赖
 - 长期记忆形成：长期外显记忆通过皮质区域间的联系逐渐巩固，在提取时不再依赖海马，海马和皮质区域之间的联系完全消失



其他与记忆编码和提取相关的皮质区域

- 除海马外，额叶也参与了短期和长期记忆过程，研究显示左侧额叶参与情节记忆的编码、语义记忆的编码和提取，而右侧额叶参与情节信息的记忆提取
- 也有观点认为，左侧额叶更多参与语言表征的编码过程，而右侧额叶更多参与物体和空间记忆信息的加工



多巴胺与奖赏学习

- 哪些脑区控制动物在奖励刺激下不断重复行为？
 - 电流刺激的操作性条件化实验显示，中脑的**腹侧被盖区(VTA)**和**黑质**中多巴胺神经元在奖赏学习中起重要作用
 - 研究显示，VTA→伏隔核和黑质→纹状体两条通路均参与学习有助于获得奖励性刺激的行为反应

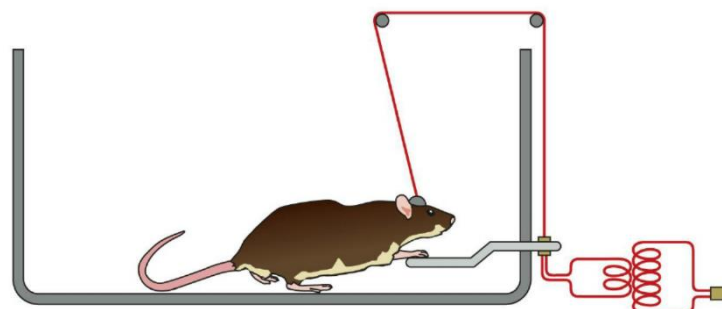
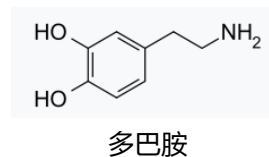
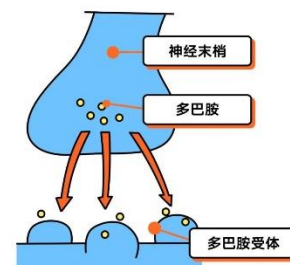
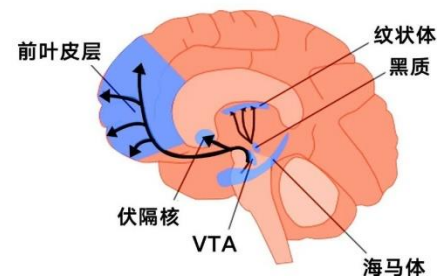


Figure 10-44a Principles of Neurobiology (© Garland Science 2016)



多巴胺神经元的兴奋模式

- 多巴胺神经元以两种不同的模式产生兴奋：
 - 紧张性(tonic)模式：维持较低但较为稳定的基本放电频率
 - 相位性(phasic)模式：响应特定刺激以集中放电的形式兴奋
- 实验显示，多巴胺神经元的相位性兴奋并不是针对奖赏本身，而是反映了实际奖赏和预期奖赏直接的差异，又叫奖励预测误差(reward prediction error)
 - 学习前：奖励的出现产生相位性兴奋
 - 学习后：条件刺激产生相位性兴奋，奖励出现却无相位性兴奋
 - 学习后无奖励：条件刺激产生相位性兴奋，奖励消失导致紧张性兴奋被抑制

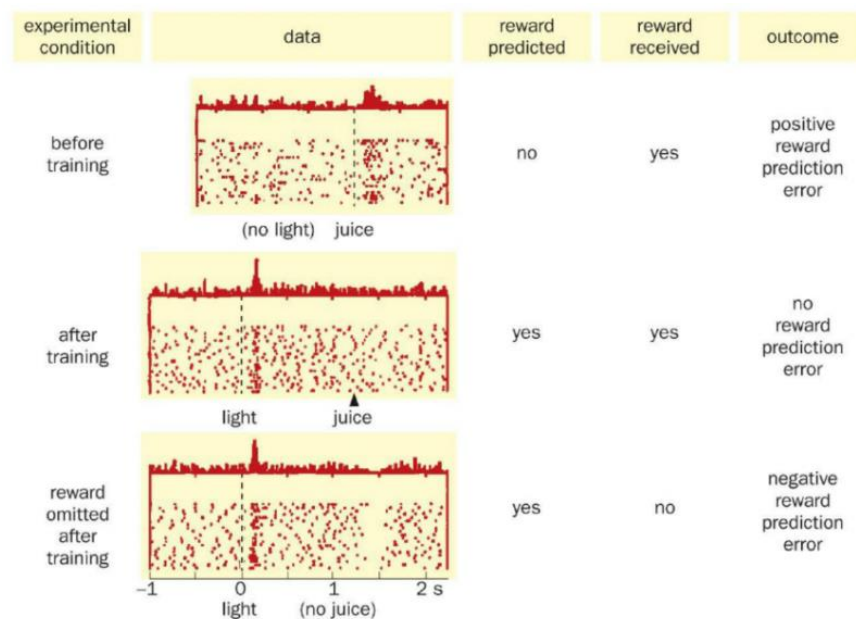


Figure 10-45a Principles of Neurobiology (© Garland Science 2016)

多巴胺介导的奖赏学习回路模型

- 一个幅度为 S 的信号，通过可变强度(ω)的突触连接，产生振幅为 ωS 的响应
- 多巴胺神经元同时接受奖励信号 R 和负反馈信号 ωS ，输出信号 $R - \omega S$ 即为奖励预测误差，利用其对 ω 进行调节
- 在学习之前，因 ω 很小导致奖励预测误差很大，导致多巴胺神经元输出较大的信号以增加 ω
- 随着学习的进行， ω 不断增加导致奖励预测误差减小
- 当奖励预测误差为0时学习完成，多巴胺神经元不再因响应奖励信号而产生相位性兴奋

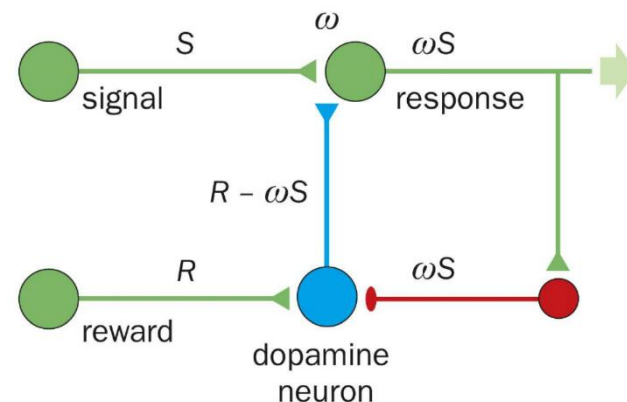
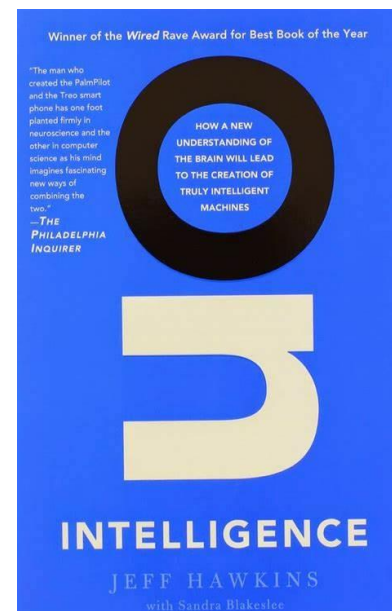


Figure 10-45b Principles of Neurobiology (© Garland Science 2016)

脑启发的智能理论简介

- 《人工智能的未来》的作者杰夫·霍金斯
- 掌上电脑及手写输入系统发明人
- Palm Computing、Handspring等IT公司创始人
- 红木神经科学研究院创始人



智能的本质是什么？

- 问题1：“如果一个从未见过的新东西，比如一个蓝色的咖啡杯，突然出现在房间里，那么将会发生什么？”
 - 大脑会注意到这个原本不属于这里的東西，某些原本不活跃的神经元将会变得活跃
- 问题2：然而大脑中的神经元如何知道蓝色咖啡杯是新出现的，而房间里其他上百件东西不是呢？
 - 大脑的新皮质利用记忆不断地在对所看、所听和所感的一切进行预测



智能的本质是什么？

- 大脑以一种并行的方式，对构成我们所生活的世界的每一处不断地进行预测，“预测无时无刻不在”
 - 绝大多数预测是意识不到的非自主行为
- 大脑对世界的感知不仅包括感觉，还有基于记忆的预测在起作用
 - 对世界的一部分感知是“脑补”出来的

智能的本质是什么？

- “改变了的门”的思想实验：
 - 当一扇常用的门在不知情的情况下被改变后（如把手、窗户、重量等），在开门时大脑会很快意识到改变的发生
- 大脑会在极短的时间内注意到这扇门上千种可能变化中的任何一处
 - 大脑是如何注意到这些变化的呢？



智能的本质是什么？

- “改变了的门”的实验说明：大脑对于每个特定时刻将要看到、听到和感觉到的事物进行了低层级的感官预测，大脑新皮质的所有区域都在同时预测着它们接下来的体验
 - 视觉皮质对边缘、形状、位置和运动作出预测
 - 听觉皮质对音调、声源方向和模式作出预测
 - 体感皮质对触摸、质地、轮廓和温度作出预测
- 预测过程：1) 参与知觉这扇门的神经元，在实际接收到感觉输入之前就开始活跃；2) 在感觉输入真正到达时，将其与预期进行比较
 - 当实际情况与预期存在明显差异时，就会引起大脑的注意



智能的本质是什么？

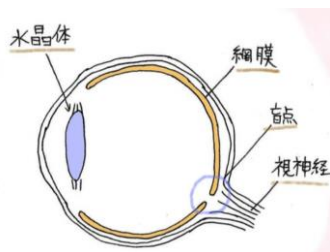
- 智能的本质是**预测**
 - 预测是大脑新皮质的主要功能和智能的基础
- 听觉方面的预测现象：
 - “人之初，性本……”
 - 在饭店听到“请递给我……”

善 恶



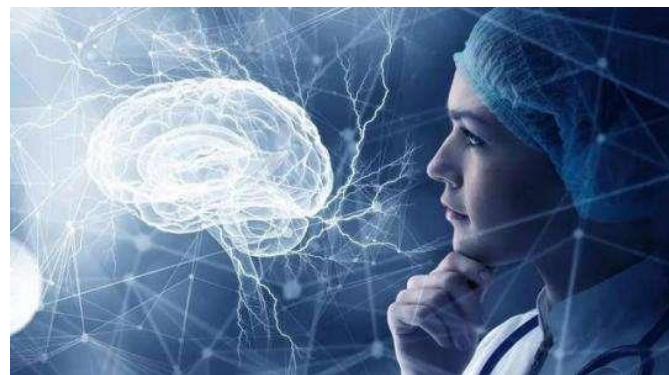
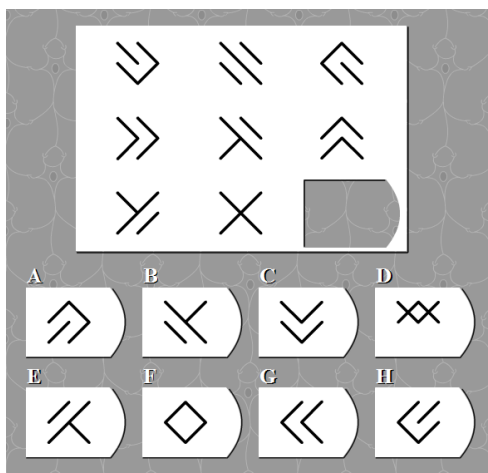
智能的本质是预测

- 视觉方面的预测现象：
 - 平时我们不能意识到视觉盲点的存在，是由于大脑通过预测填补了盲点处缺失的信息
 - 进入眼睛的原始数据通常纷乱而模糊，而大脑新皮质通过预测信息填补那些缺失或混乱的位置，便看到了清晰的图像



智能的本质是预测

- 除感觉信息外，预测也是其他所有大脑新皮质的基本工作方式
 - 智力测验在本质上就是对预测能力的测验
 - 科学本身就是通过一套假设和测试的过程，来推进对世界的认识



预测和行为之间的联系

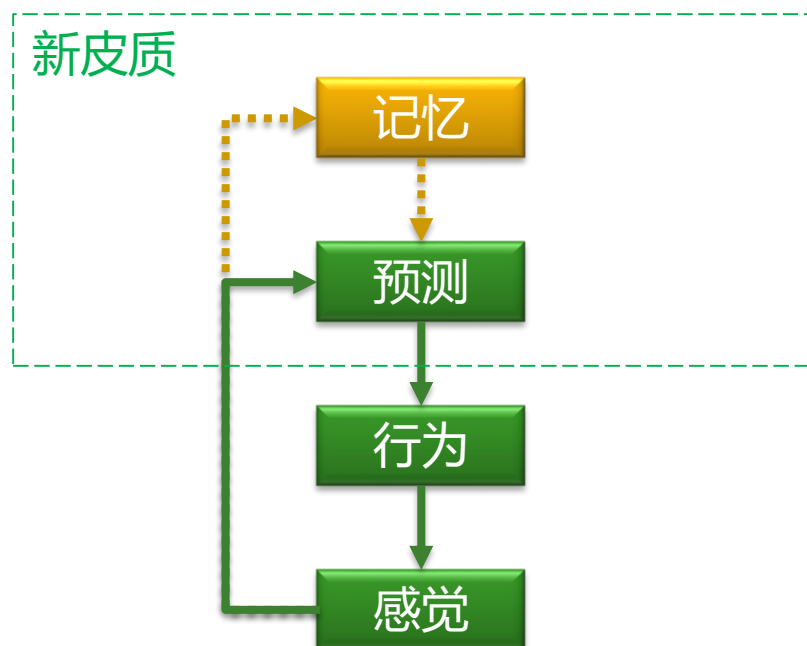
- 大脑中的新皮质是在动物进化出复杂的行为之后才被进化出来的，因此先有行为然后才有智能
 - 新皮质的主要功能是为了提供对外部世界的记忆，进化出大量新皮质的动物，可以和人类一样感知这个世界
- 大脑所感知到的大多数事物，在很大程度上都依赖于行为
 - 人类的大脑先预测会看到某种行为（如手臂移动），然后这一预测引发运动指令，从而使预测成为现实
- 为什么人类有语言、工具使用等智能行为而其他动物没有？
 - 人类大脑的新皮质在运动控制上取代了大脑的其他部分，因此在产生和控制行为方面起着主导和超前的作用

总结

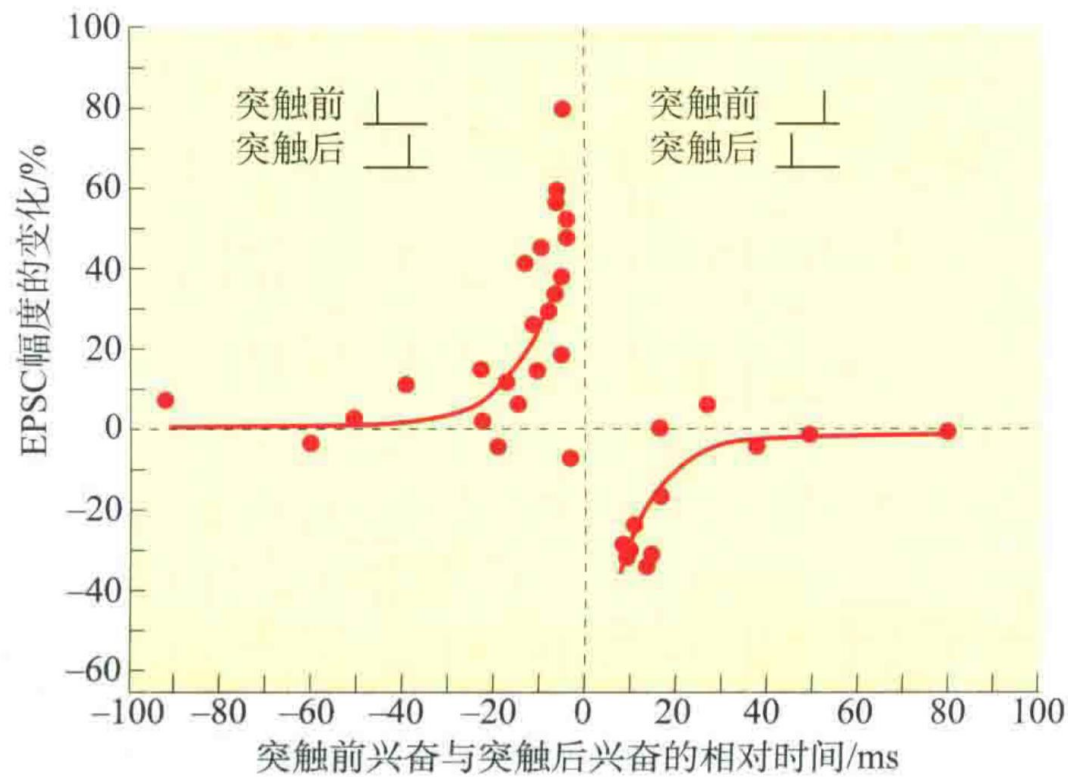
- 智能是衡量对世界中模式的记忆和预测能力，这些模式包括语言、数学、物体的物理属性以及社会环境
- 大脑从外界接收模式，将它们存储成记忆，然后结合正在发生的事情进行预测
- 人类大脑中新皮质的进化导致智能的出现
 - 拥有了更强大的记忆，从而以更复杂的关系为基础进行预测
 - 接管了人类大部分的运动行为，通过预测的方式控制行为

智能的理论框架

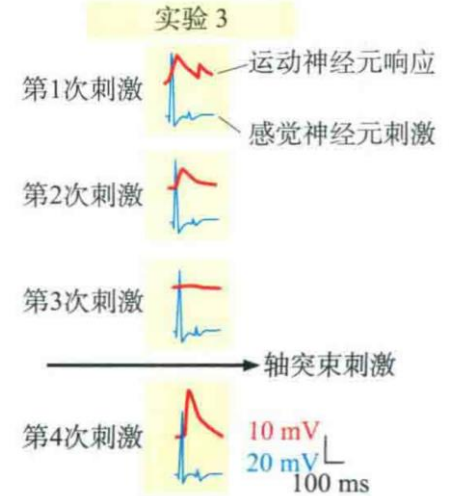
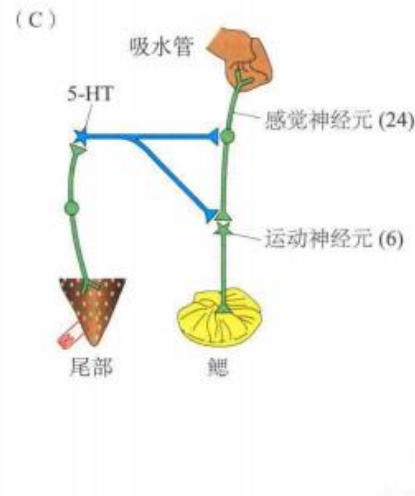
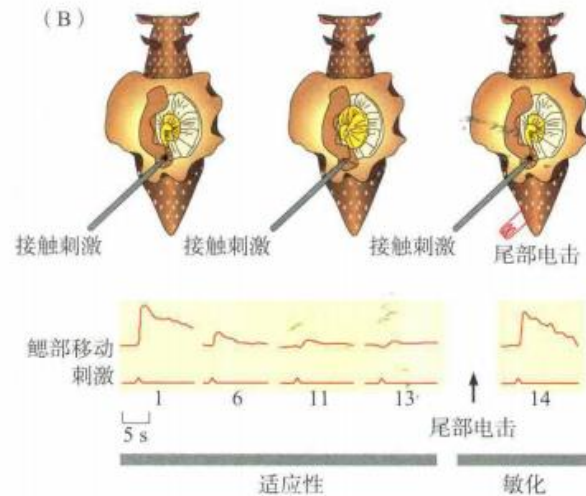
一种基于大脑新皮质的智能理论：“记忆-预测框架”



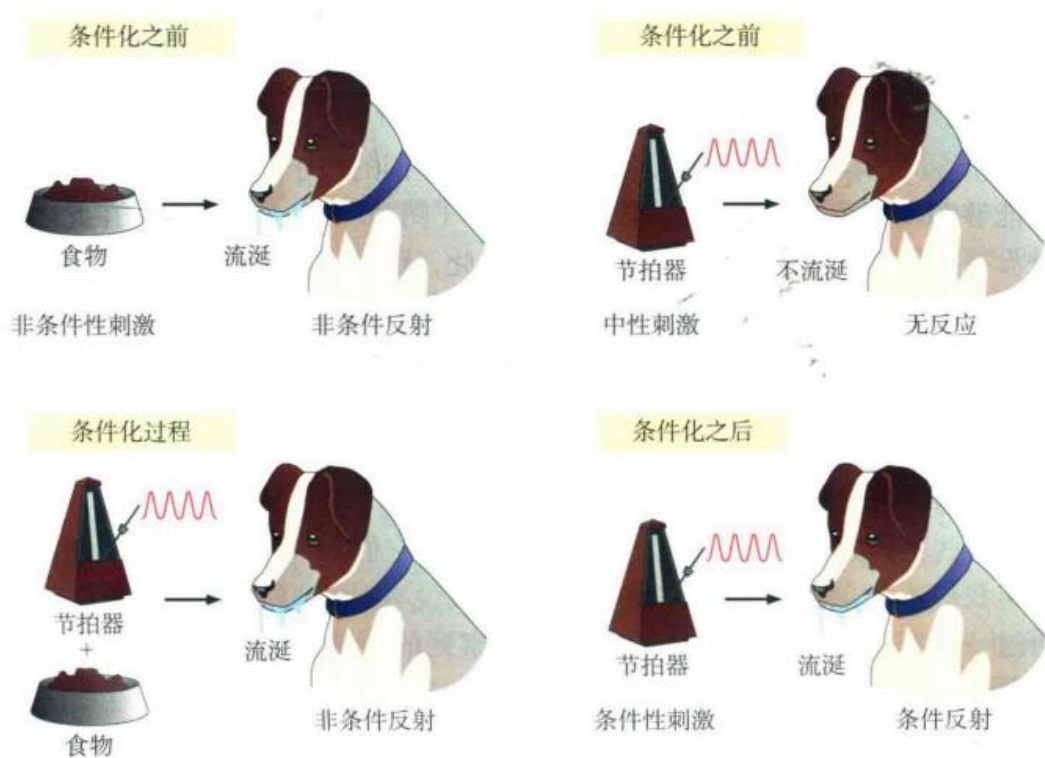
本章部分英文图表注释



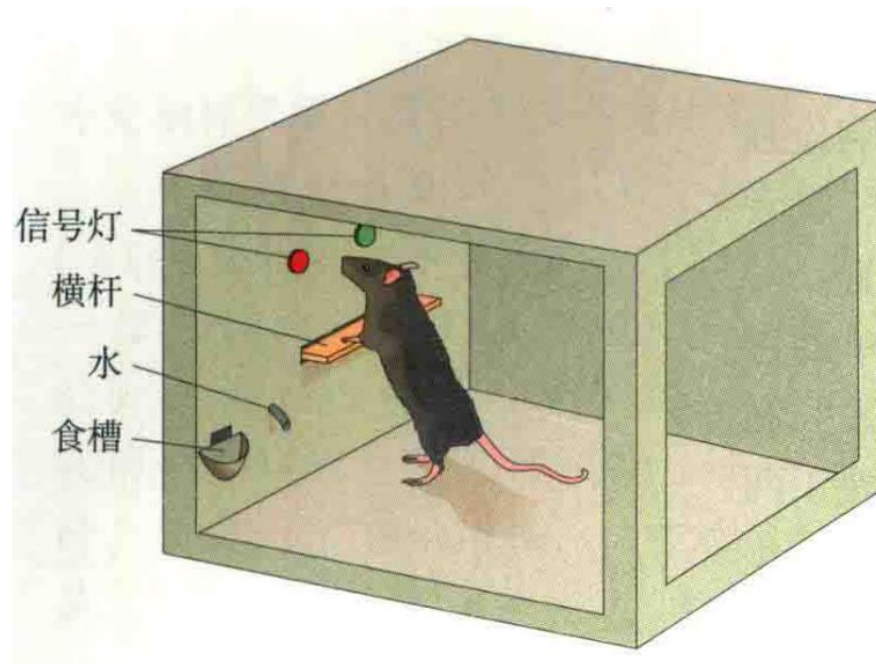
本章部分英文图表注释



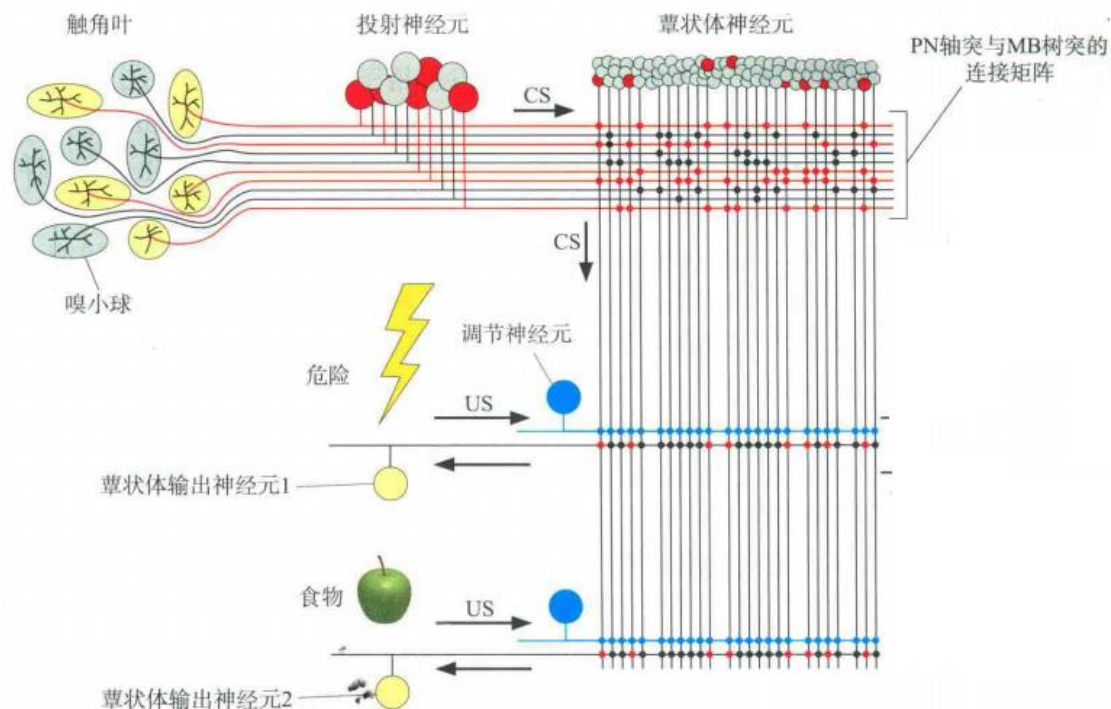
本章部分英文图表注释



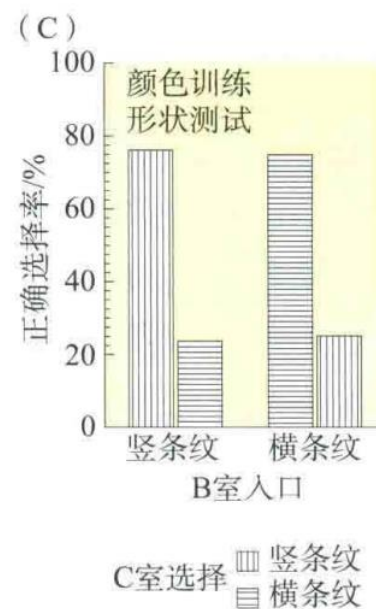
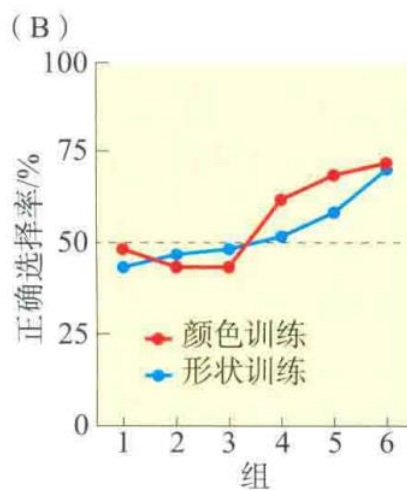
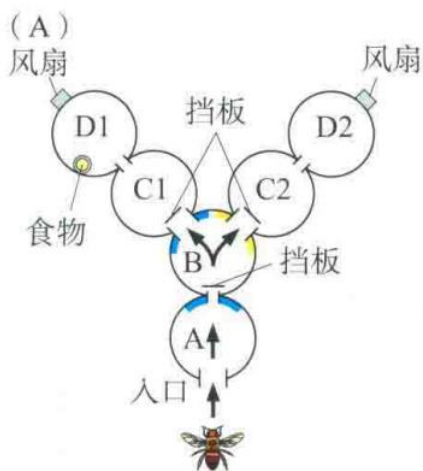
本章部分英文图表注释



本章部分英文图表注释



本章部分英文图表注释



本章部分英文图表注释

