

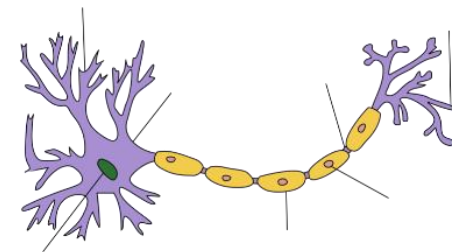
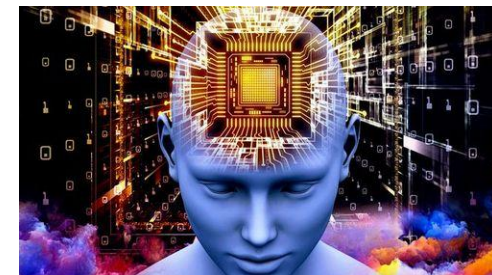


# 脑与认知科学基础 之 运动控制

仲苏玉

人工智能学院  
脑认知与智能医学中心

2024.04.15



# 回顾

- 神经元和神经系统
- 初级感知觉
  - 听觉、嗅觉、味觉、躯体知觉、视觉
- 高级认知活动
  - 物体识别

# 大纲

- 引言
- 运动系统结构
- 运动表征
- 运动的神经编码
- 运动障碍
- 总结

# 学习目标

- 掌握运动神经系统结构
- 掌握运动表征模式
- 掌握运动的神经编码
- 了解运动障碍

# 引言

# 神经疾病

- 帕金森氏症(运动不能)
  - 肌肉僵直、身体姿势及自主运动出现障碍
- 故事
  - 四个人吸食假海洛因→
  - 疑似帕金森→
  - 发现物质MPTP →
  - 创造出帕金森动物→
  - 找到治疗人类的方法

# 运动系统结构

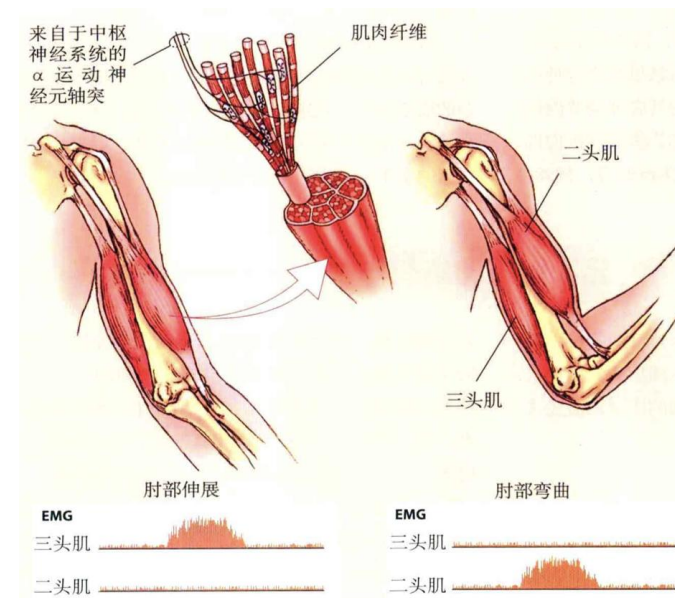
# 概述

- 运动实施的部分：效应器
  - 身体可以运动的部分称为效应器
  - 手、腿、腰、舌、颌、眼...
- 控制运动的部分：运动神经
  - 脊髓
  - 皮质下运动结构
    - 小脑
    - 脑干中的运动神经
    - 锥体外系
  - 大脑运动皮质
    - 锥体系
- 运动实施和运动控制（脊髓）间的作用部分： $\alpha$ 运动神经元



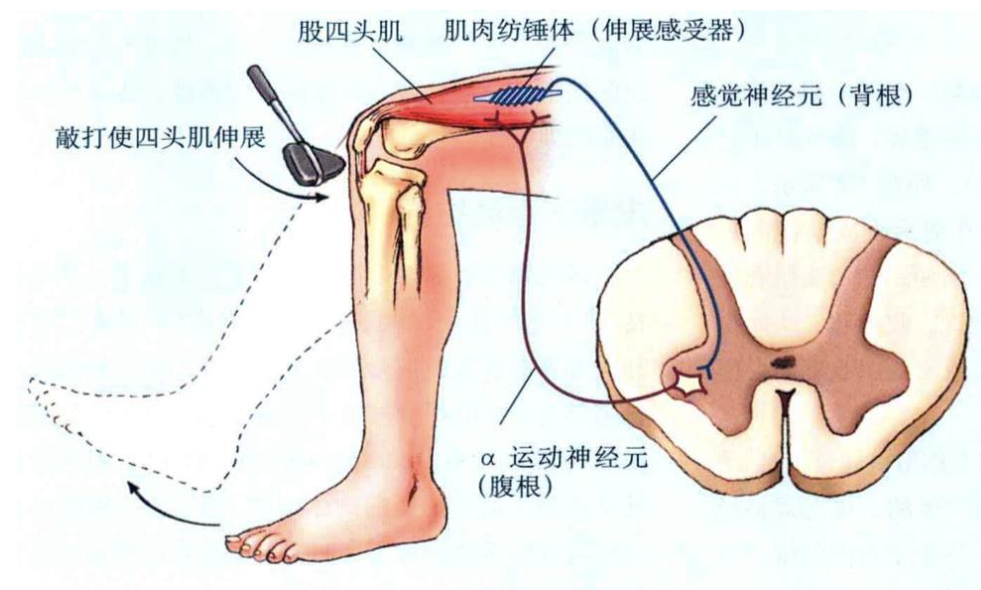
# 效应器

- ▶ 传出神经纤维末梢或运动神经末梢及其所支配的肌肉或腺体一起称为效应器；
- ▶ 效应器中一个或一组肌肉状态的变化就形成了运动
- ▶ 肌肉由可以改变长度和张力的弹性纤维组织组成
- ▶ 肌肉与骨骼在关节处相连，并通常拮抗的一对，使效应器收缩或伸展，形成机械运动。



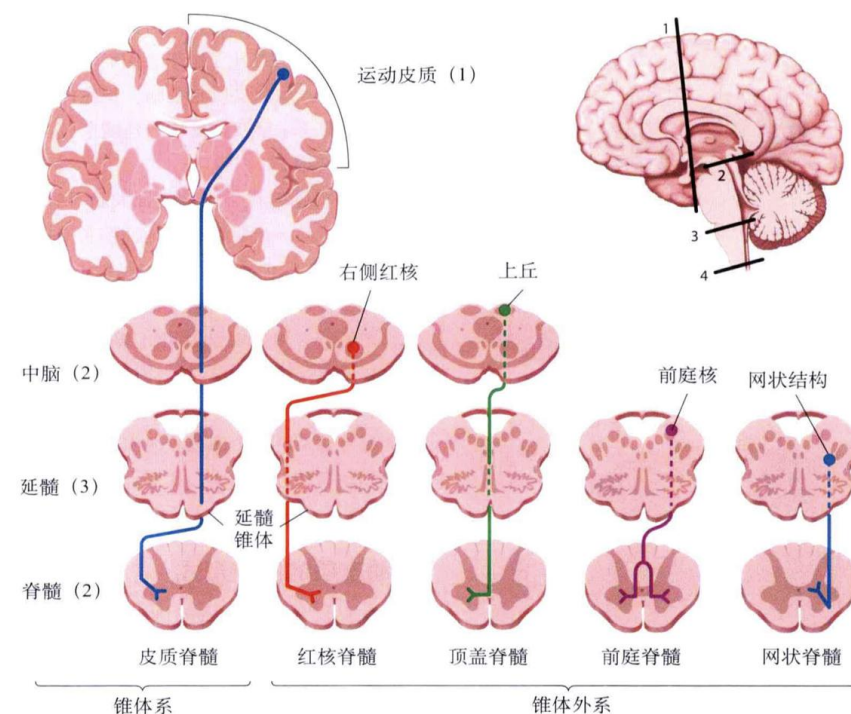
# $\alpha$ 运动神经元

- 连接运动神经和肌肉，使神经信号转化为机械运动
- 源于脊髓，通过脊髓腹根，终于肌肉纤维
- 输出
  - 脊髓腹根，动作电位→
  - 神经递质(乙酰胆碱)→
  - 肌肉纤维收缩
- 输入
  - 肌肉伸展，感觉纤维产生信号→脊髓背根（如：膝跳反射）
  - 脊髓各部分的中间神经元
  - 脊髓下行纤维
    - 来源于皮质和皮质下结构
    - 发出的信号可以使兴奋的或抑制性的



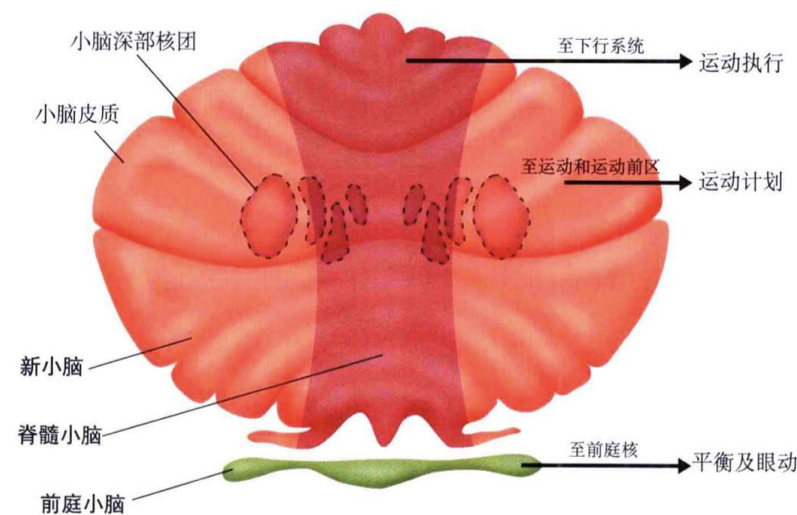
# 脊髓

- 直接控制一些简单运动
  - 膝跳反射
- 传导脑运动神经信号
  - 脑和脊髓的两条下行传导通路
    - 锥体系（运动皮质的锥体细胞投射的神经束）通过延髓锥体交叉进入脊髓对侧
    - 锥体外系（**脑干**直接投射的神经束）不通过延髓锥体进入脊髓对侧或同侧



# 皮质下运动结构：小脑

- 特点：密集神经元，皮质有褶皱
- 输入：感觉输入，辅助运动的皮质信号输入小脑皮质
- 输出：深部核团上行输出至丘脑影响大脑皮质
- 下半部分：前庭小脑，脊髓小脑，新小脑





# 皮质下运动结构：基底神经节

## ➤符号说明

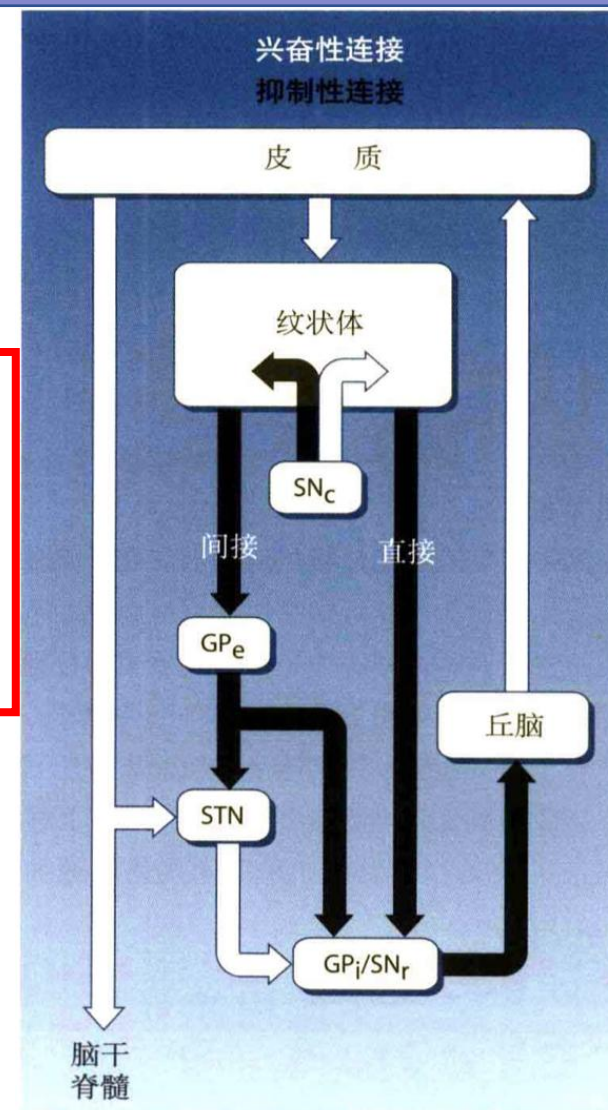
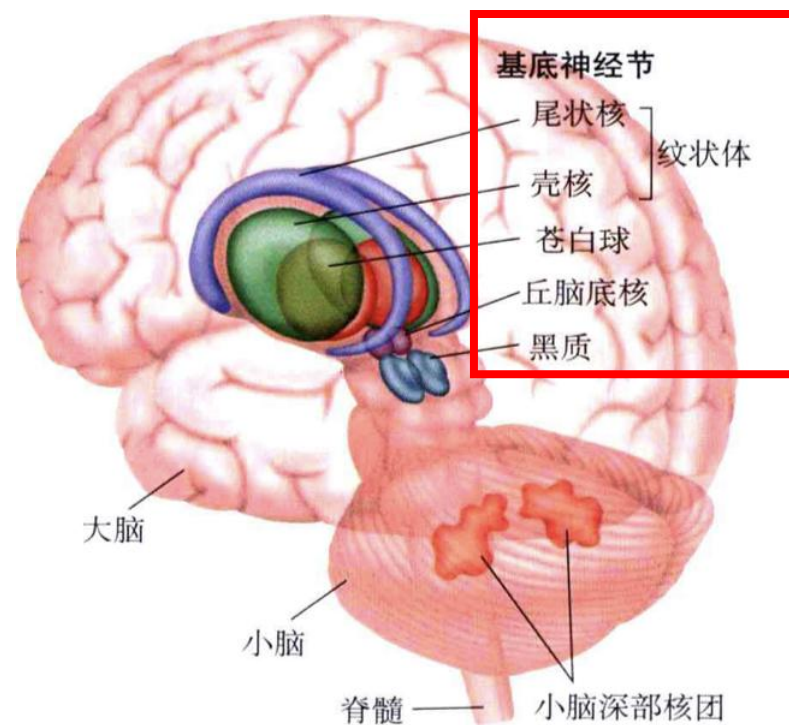
- 纹状体：尾状核+壳核
- GPi：苍白球内侧
- GPe：苍白球外侧
- SNc：黑质致密部
- SNr：黑质网状结构
- STN：丘脑底核

## ➤输入：纹状体

## ➤输出：苍白球内侧，部分黑质

## ➤上行双通路：

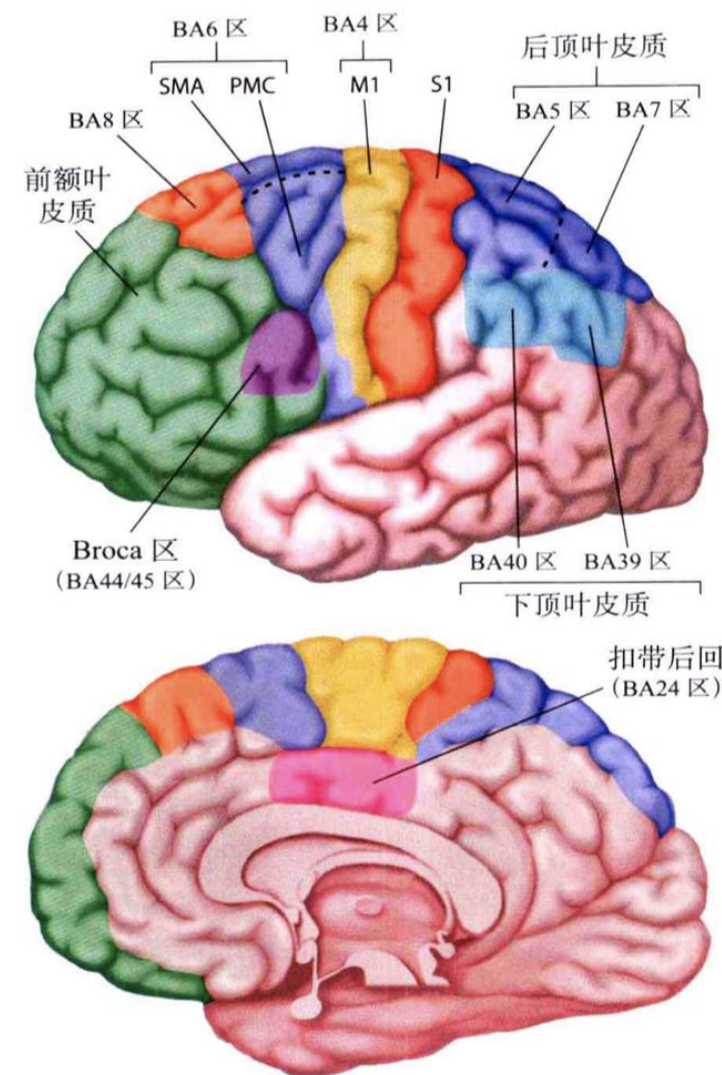
- 直接通路：纹状体 → GPi/SNr → 丘脑 → 皮质
- 间接通路：纹状体 → GPe → GPi/SNr → 丘脑 → 皮质



# 大脑皮质运动结构

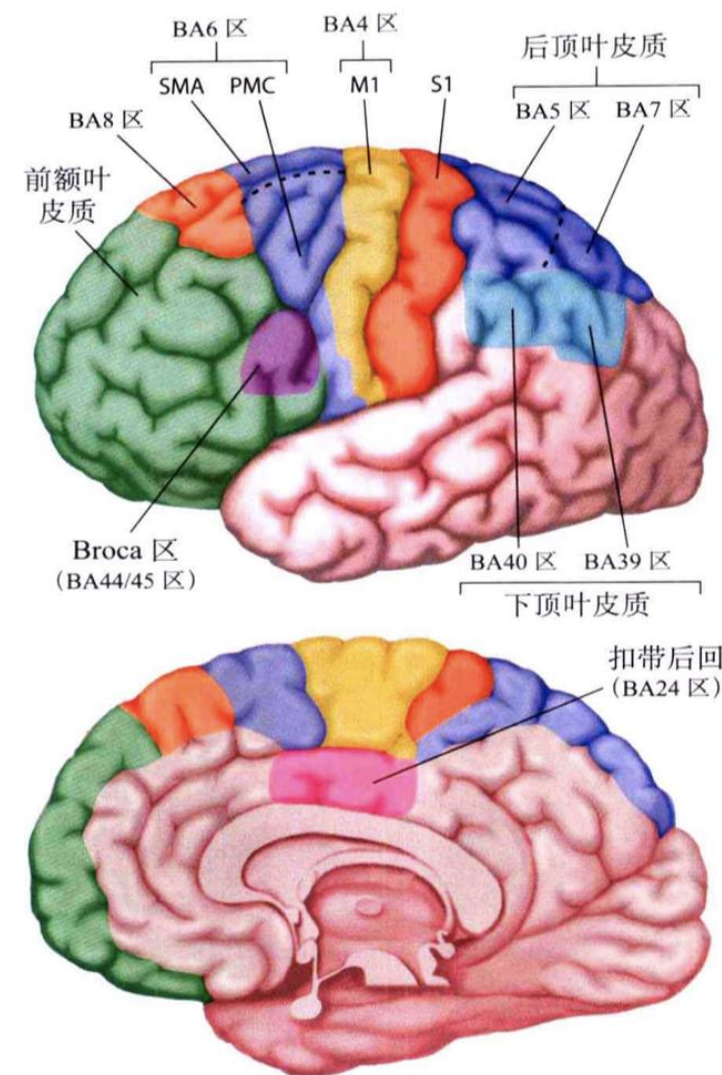
## ➤ 运动相关的大脑皮质区

- 初级运动皮质BA4
- 次级运动皮质BA6
  - 辅助运动区SMA
  - 运动前区PMC
- 其他联合区域
  - BA8 (额叶眼区) 眼动
  - Broca区言语动作
  - S1感觉区
  - 后顶叶BA5、BA7动作的计划与控制
  - 下顶叶BA40、BA39, 和动作协调有关
  - BA24



# 大脑皮质运动结构

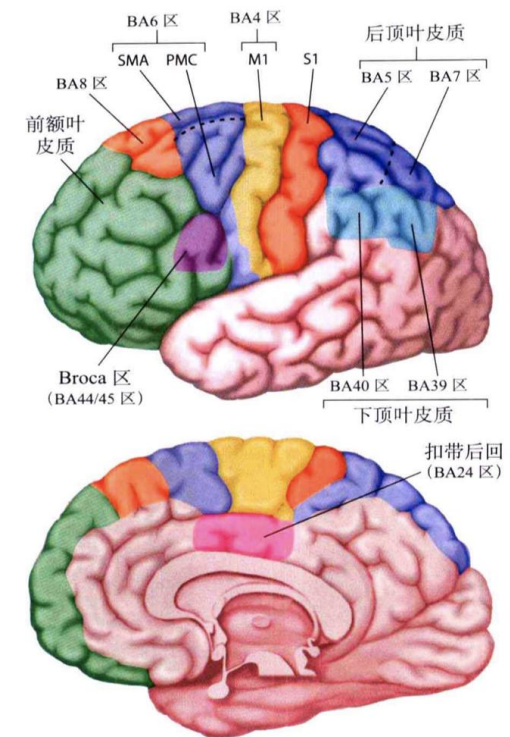
- 大脑皮质可直接或间接地控制脊髓神经元
- 皮质脊髓束
  - 大脑皮质对脊髓神经元的直接控制通路
  - 源于皮质终于 $\alpha$ 运动神经元或脊髓中间神经元
    - 主要是初级运动皮质BA4
    - 还有部分次级运动皮质BA6
  - 常被称为锥体束
- 其他源于大脑皮层的调解运动功能的途经





# 源于大脑皮质的其他调节运动功能的途径

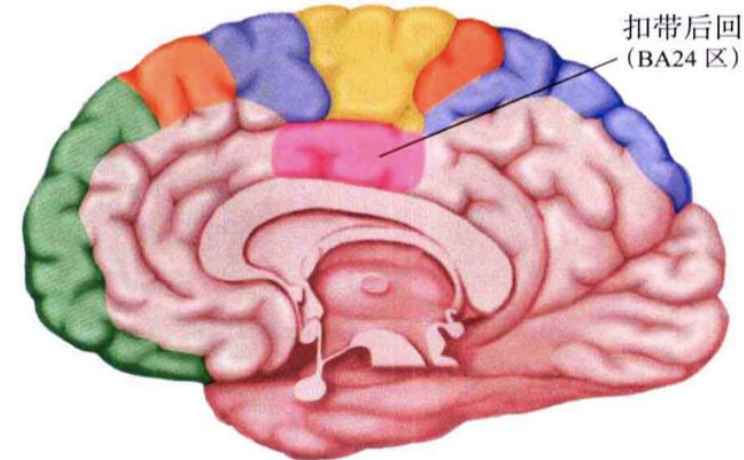
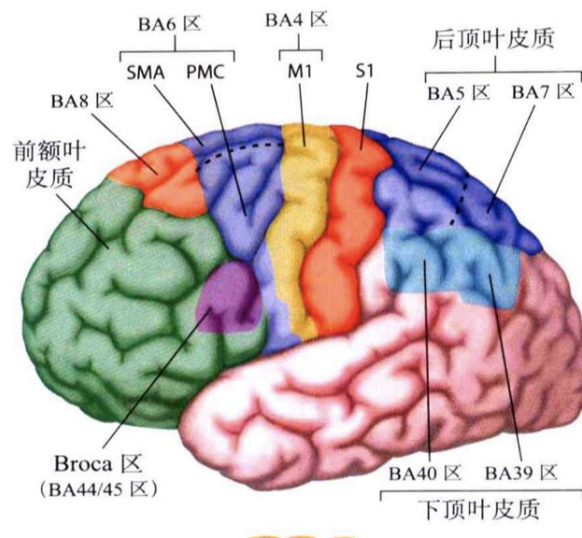
- 运动皮质（M1）-运动前区（PMC）的皮质-皮质束；
- 运动皮质的神经元-脑干连接，调节椎体外系功能；
- 运动皮质与小脑、基底神经节的连接；
- 皮质-延髓束





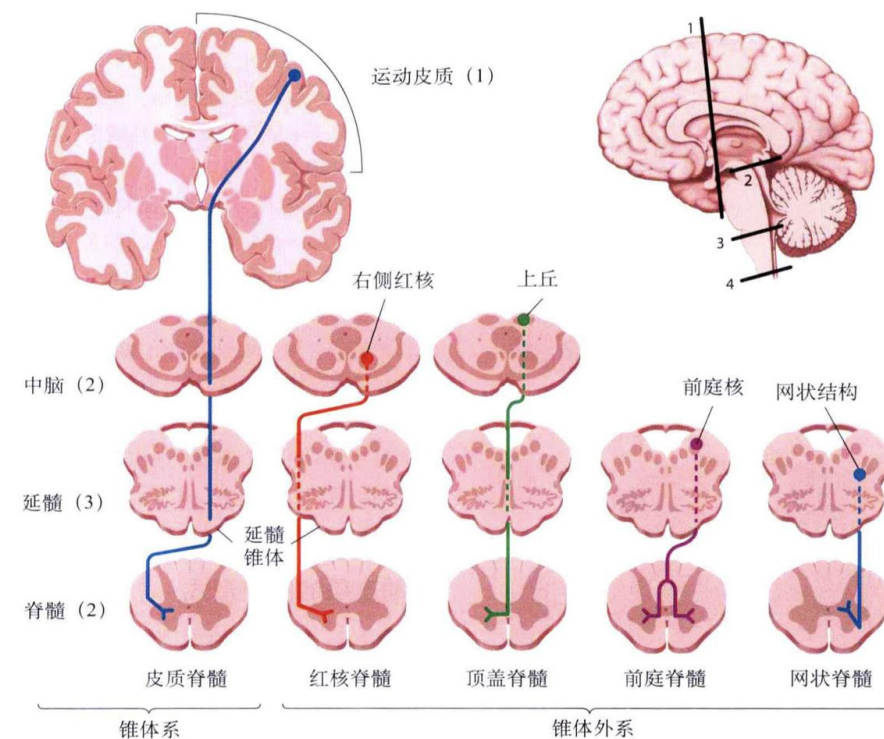
# 脑和脊髓的下行传到通路 (1) 锥体系

- 锥体系是由中央前回 (BA4区)、运动前区和辅助运动区 (BA6区)、后顶叶 (BA5和BA7区) 和额叶眼区 (BA8区) 等皮层的锥体细胞 (大、小锥体细胞) 和梭形细胞发出的轴突组成, 主要是管理骨骼肌的随意运动。



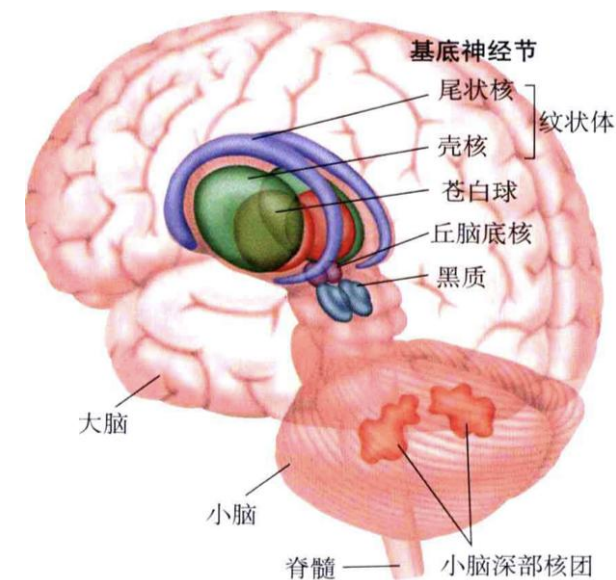
# 脑和脊髓的下行传到通路（1） 锥体系

- 锥体系分为皮质核束和皮质脊髓束；
- 皮质核束终止于**脑神经运动核**，支配头面部骨骼肌的运动；
- 皮质脊髓束又包括皮质脊髓侧束和皮质脊髓前束；
- 皮质脊髓侧束贯穿脊髓各个节段，对侧支配四肢、手指、脚趾等骨骼肌的运动；
- 皮质脊髓前束终止于上端胸髓，双侧支配躯干骨骼肌的运动



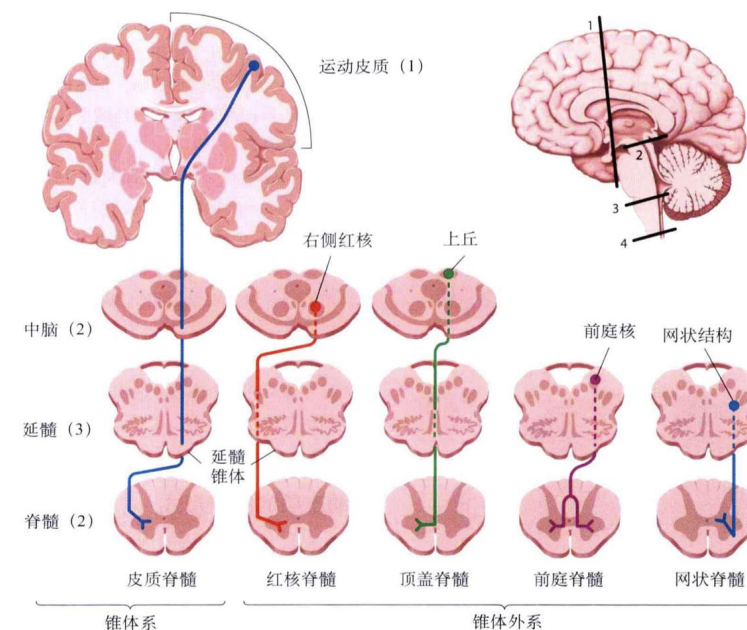
## 脑和脊髓的下行传到通路（2）锥体外系

- 锥体外系是指锥体系以外的所有躯体运动的传导通路，涉及丘脑、基底节（纹状体、网状结构、黑质、红核）、脑桥、下橄榄核、小脑等结构；
- 主要功能是调解肌张力、协调肌肉的运动、维持体态姿势、担负半自动的刻板运动和反射性运动等。



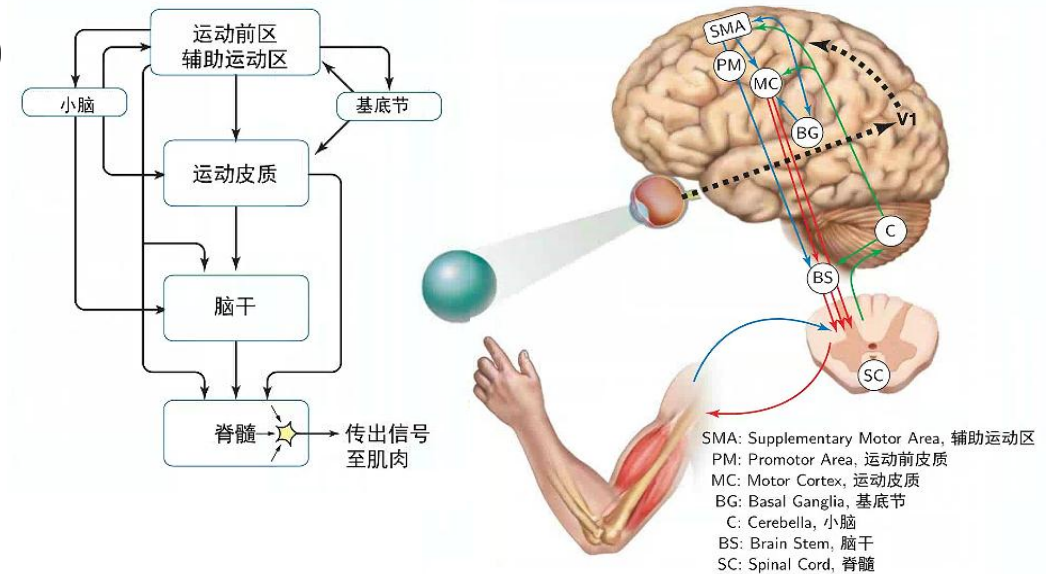
## 脑和脊髓的下行传到通路（2） 锥体外系

- 运动皮层发出纤维在上述结构处**换元**后再发出纤维；
- 部分纤维组成环路对运动皮层进行直接调解（如纹状体环路）
- 部分纤维下行至脊髓，对脊髓前角运动神经元进行功能调解
  - 如前庭脊髓束、网状脊髓束等；



# 运动皮质的组织原则

- 运动皮质具有躯体特定区的拓扑表征（侏儒图）
  - 表征效应器的皮质区域大小反映了效应器在运动中的重要性 and 运动的精细程度
  - 对侧控制
- 层级组织：运动区域之间的联系
  - 脊髓（低级）→ 运动皮质、联合区（高级）
  - 低级：简单的反射运动
  - 高级：加工基于知觉、经验、目标的运动计划
  - 在小脑和基底神经节的帮助下，运动皮质和脑干结构将运动指令转化为运动
  - 高层可以调节低层



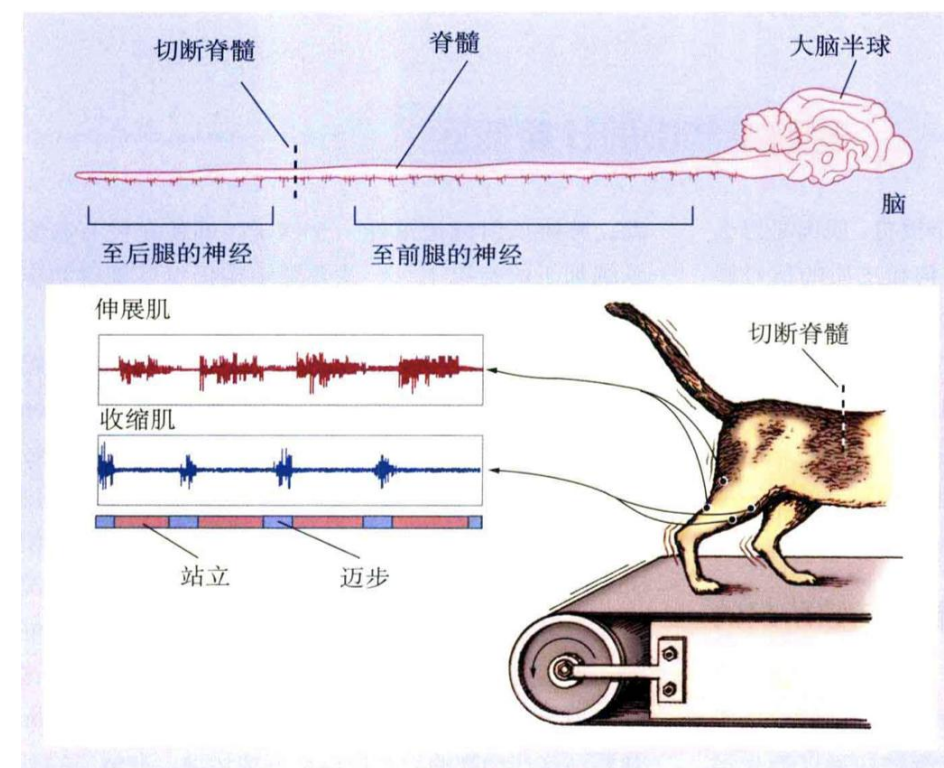
下行的运动层级通路

# 运动表征



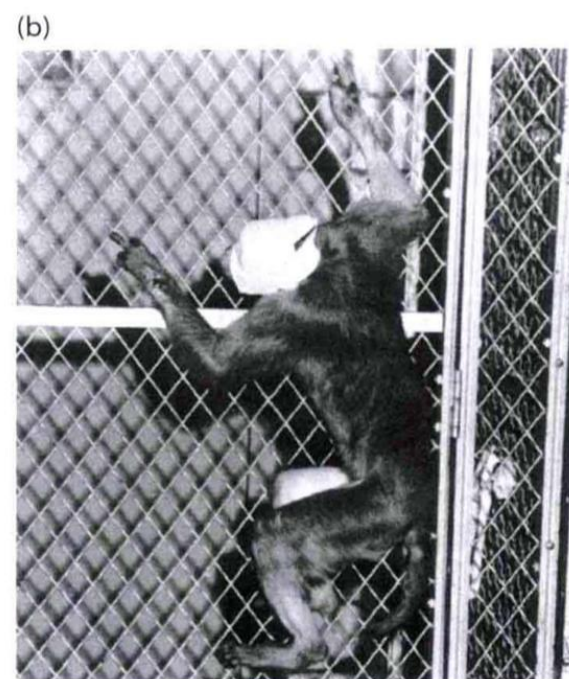
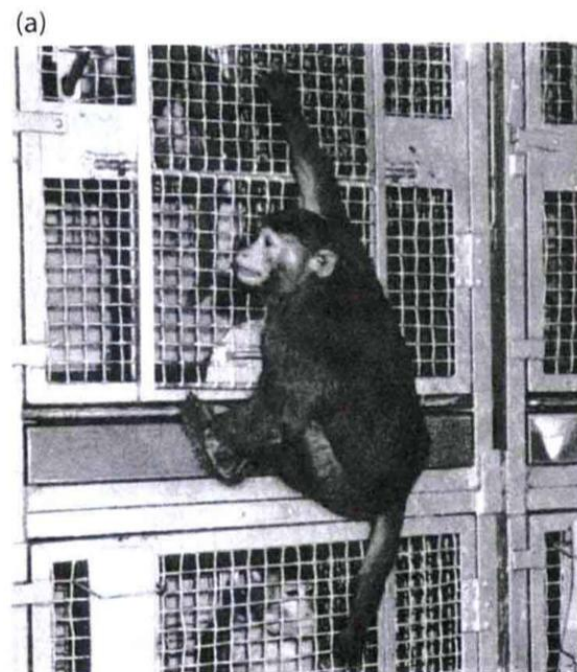
# 缺乏来自大脑的控制信号的运动

- 低级结构可以产生运动，膝跳反射
- 中枢模式产生器
  - 部分脊髓的神经元在没有任何外部的反馈信号时可以产生完整的动作序列
- 脊髓切断实验



# 缺少感觉信号反馈的运动

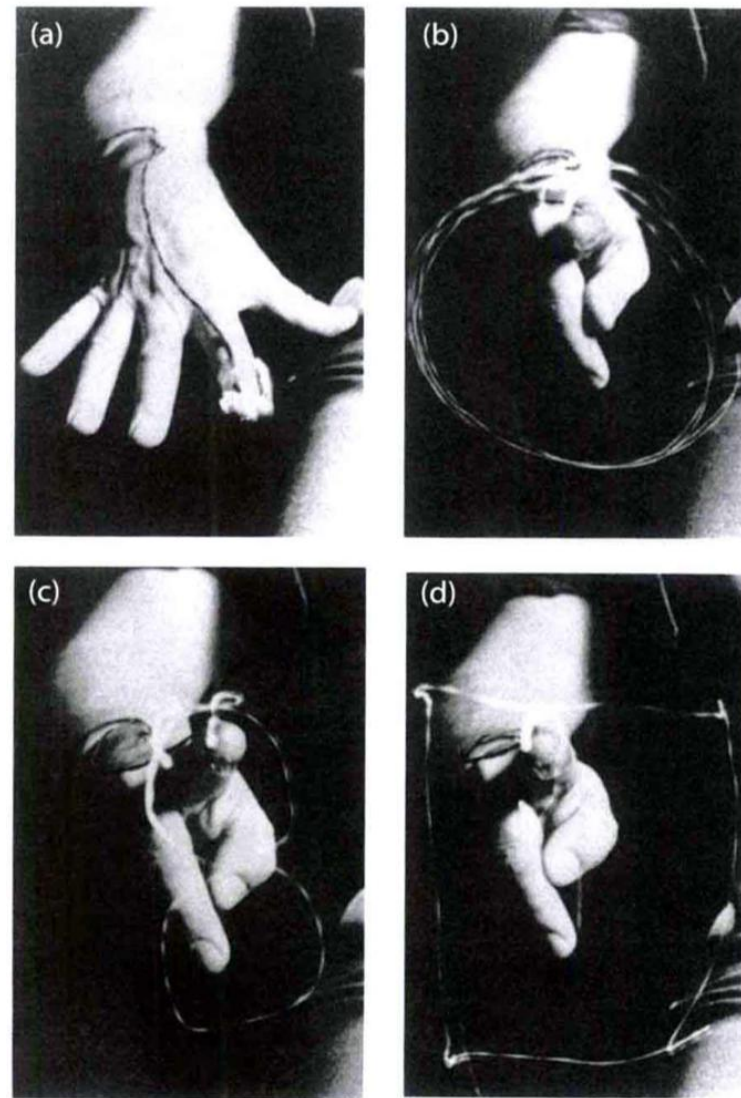
- 运动并非完全依赖于周围的反馈
- 表明：运动模式有内在表征。
- 来自猴子的证据
  - 切断脊髓背根神经纤维（感觉）
  - 单侧切断使用单侧（左图）
  - 双侧切断使用两侧（右图）





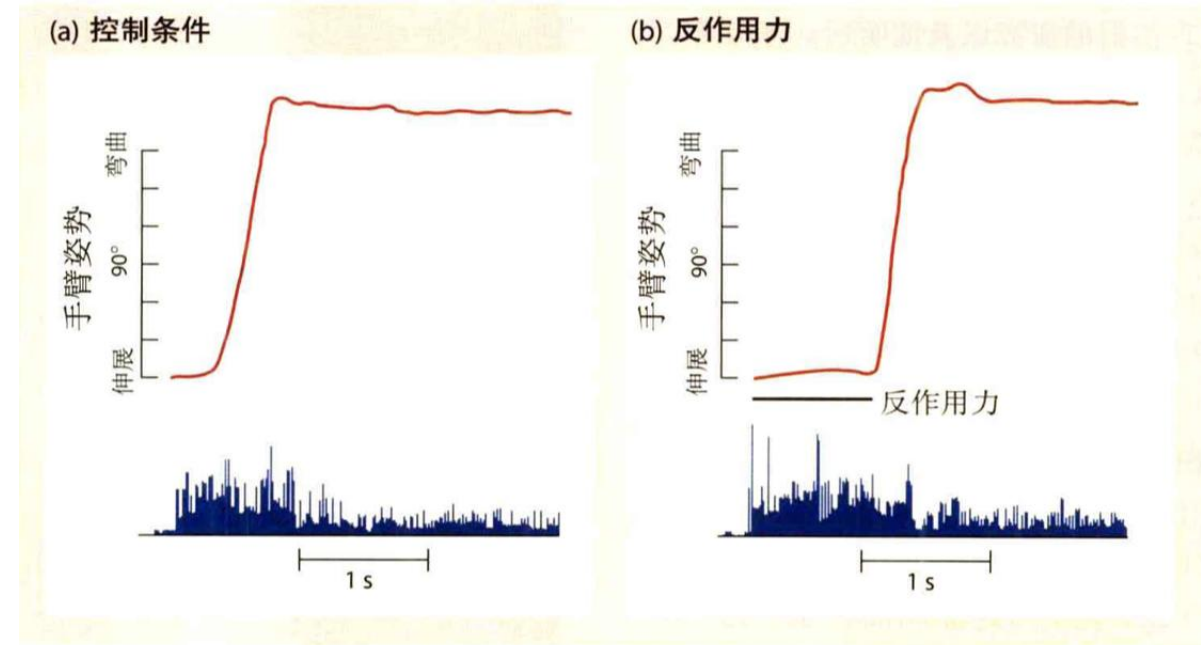
# 缺少感觉信号反馈的运动

- 运动并非完全依赖于周围的反馈
- 表明：运动模式有内在表征。
- 来自猴子的证据  
切断脊髓背根神经纤维（感觉）
- 来自人的证据  
严重感觉障碍群体仍可以做出复杂动作  
（如右图）



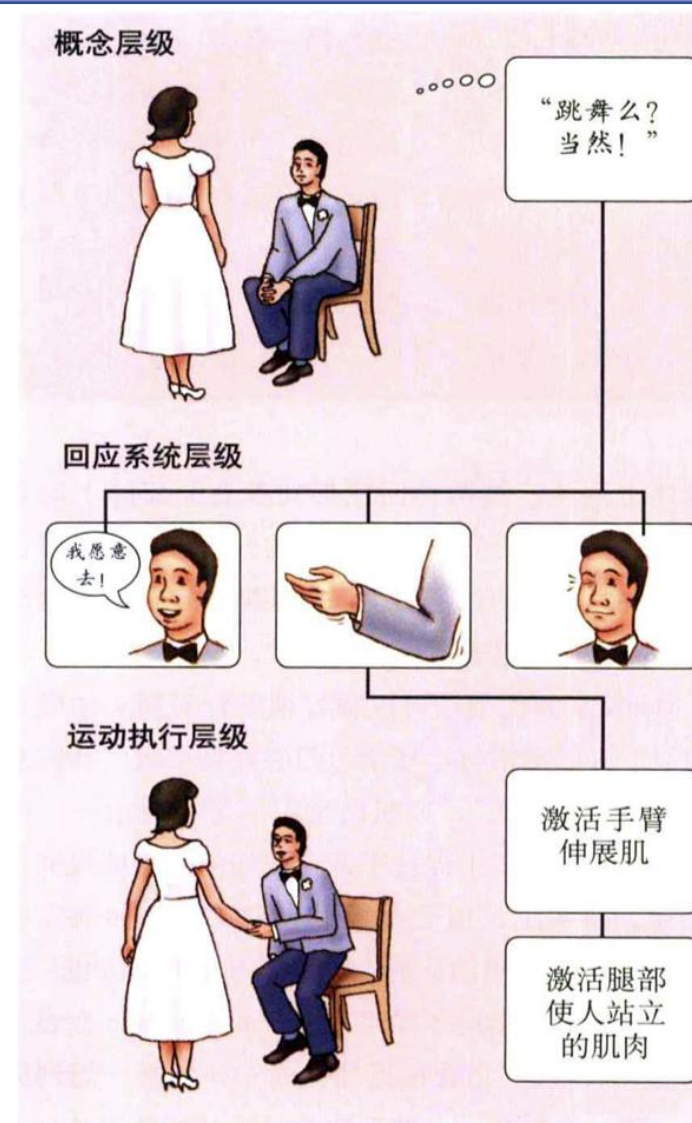
# 运动计划的表征

- 基于位置 or 基于轨迹
- 终点控制
  - 猴子在传入神经阻滞时的手臂运动
- 运动控制的核心表征
- 可以将运动看做是从一个姿势状态转换到另一种状态
- 需要强调的是，位置运动计划并非唯一的运动计划表征要素。也可以表征运动的其他要素，例如距离等。



# 复杂运动序列的层级式表征

- MacKay模型(1987)
- 从高层到底层
  - 概念层：表征动作目标
  - 回应系统层：目标转化为具体动作表征
  - 执行层：肌肉运动
- 高层不用表征所有信息，底层动作不受具体执行形式的限制



# 复杂运动序列的层级式表征

- 运动学习常发生在底层
- 肌肉记忆
- 但运动学习并不完全依赖肌肉活动
- 不同底层效应器在执行同一个高层表征转化而来的动作时，具有相似性：  
右图

(a) Cognitive Neuroscience

(b) Cognitive Neuroscience

(c) Cognitive Neuroscience

(d) Cognitive Neuroscience

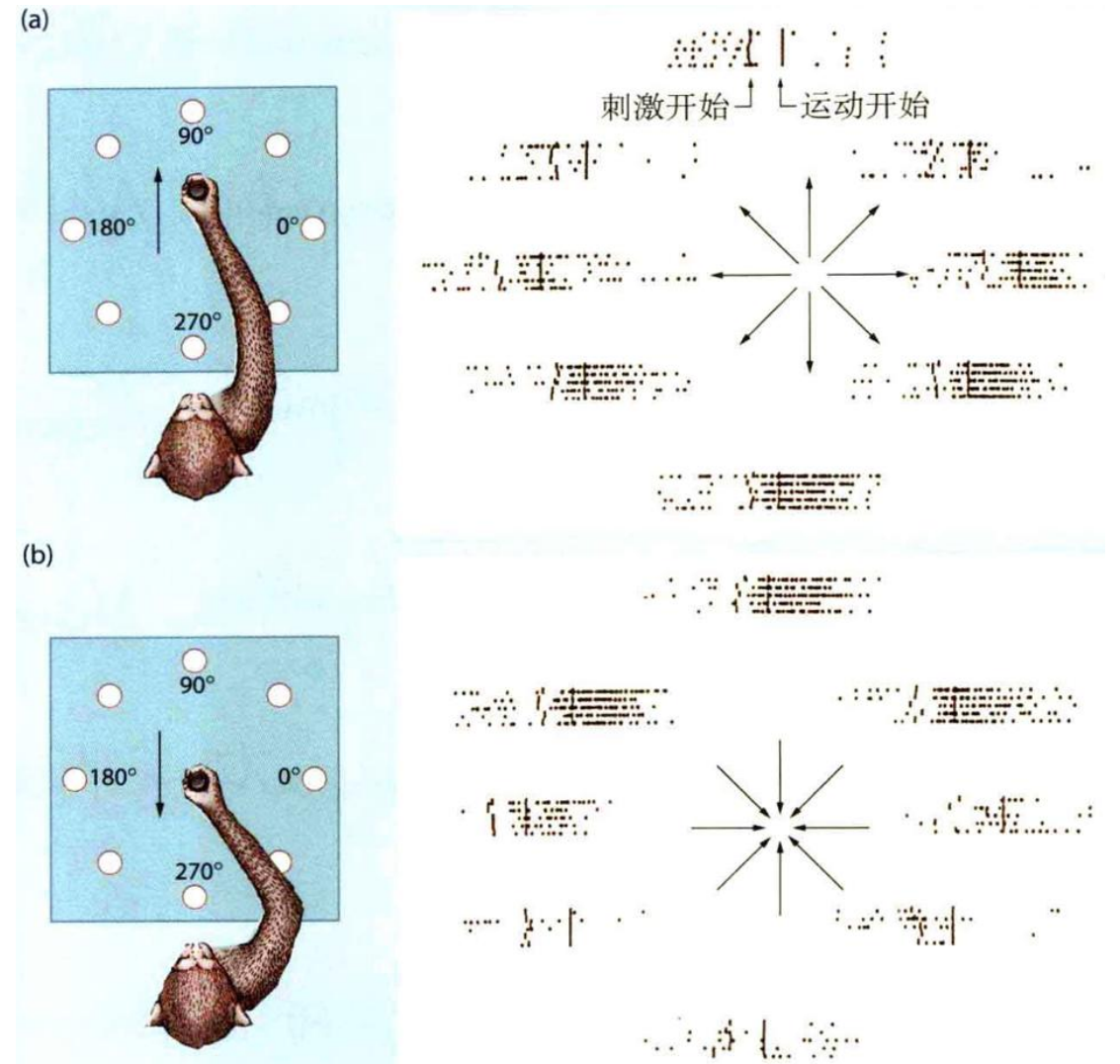
(e) Cognitive Neuroscience

# 运动的神经编码



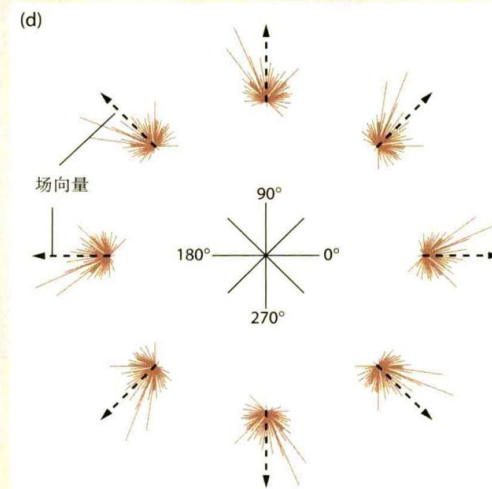
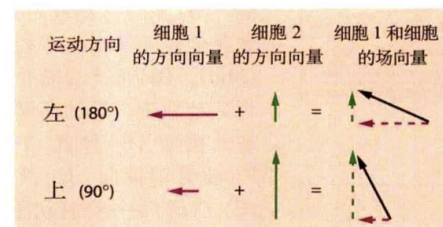
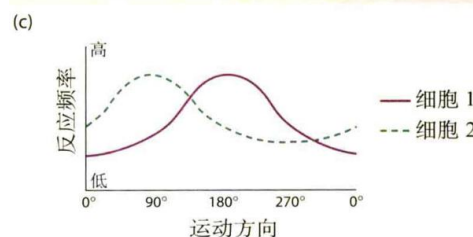
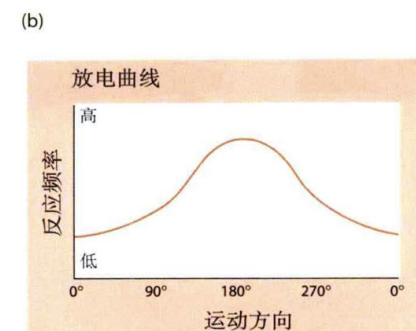
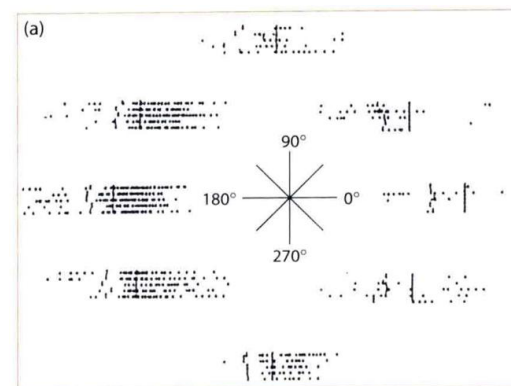
# 编码运动方向

- “离开中心” 任务实验 (Georgopoulos, 1995)
- 猴运动皮质细胞的激活方向
  - 朝向自己身体方向时的激活最大, **与起始位置无关**
- 运动皮质细胞编码运动方向, 朝特定方向的运动需要激活相应的细胞



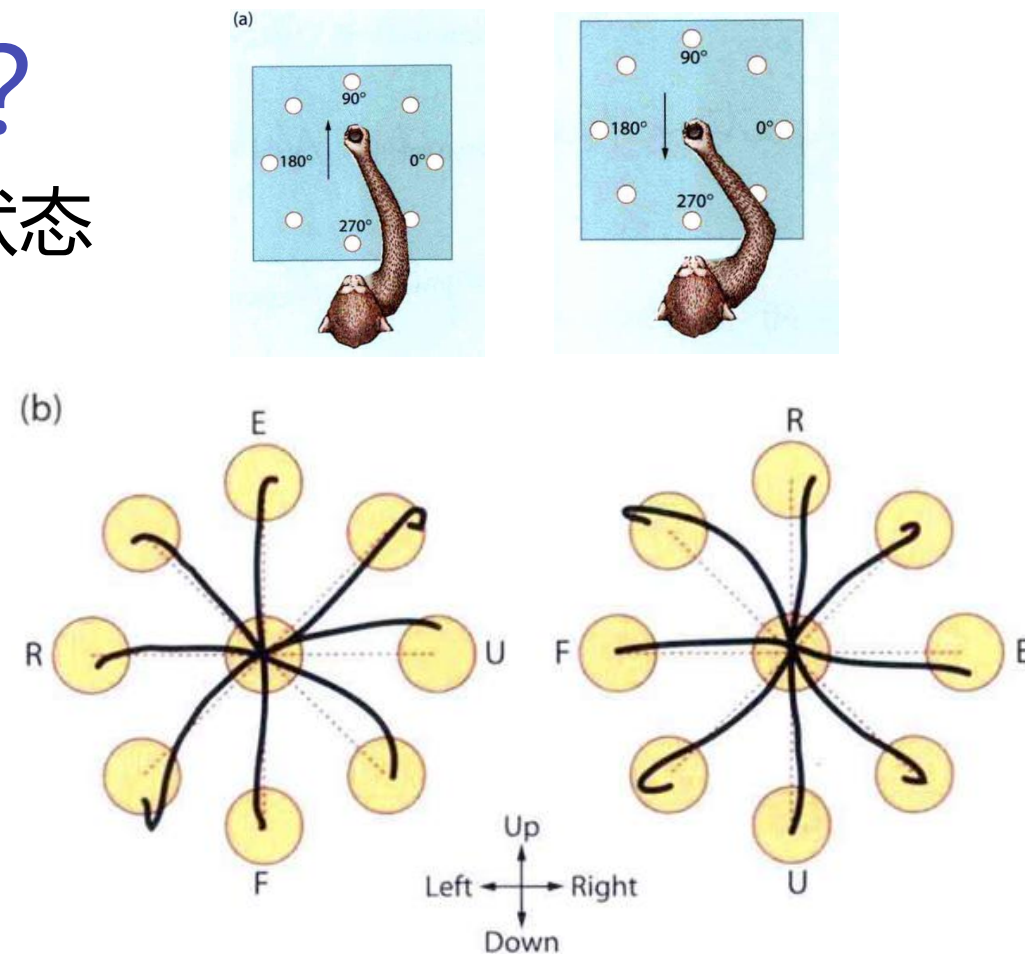
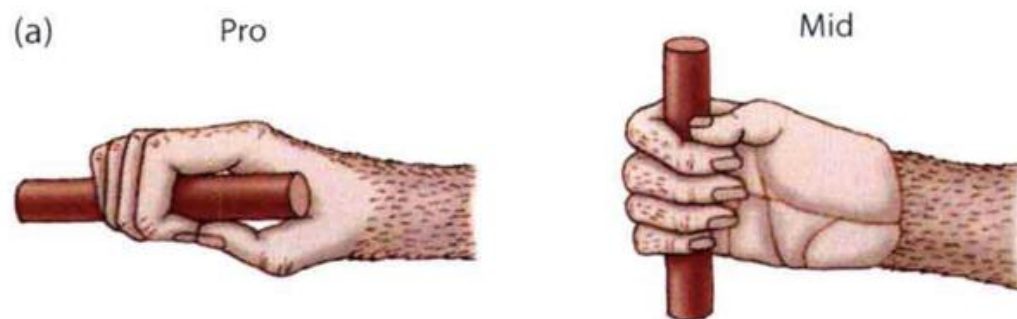
# 运动皮质细胞如何编码方向信息？

- 场向量运动方向
- 理论假设：朝一个方向运动的指令传给所有和该肢体运动相关的细胞，每个细胞做出的反应是目标方向和其优选方向的差值函数
- 多个神经元活动的综合
  - a)b) 单个神经元
  - c) 2个神经元综合
  - d) 241个神经元综合



# 编码运动方向or肌肉状态?

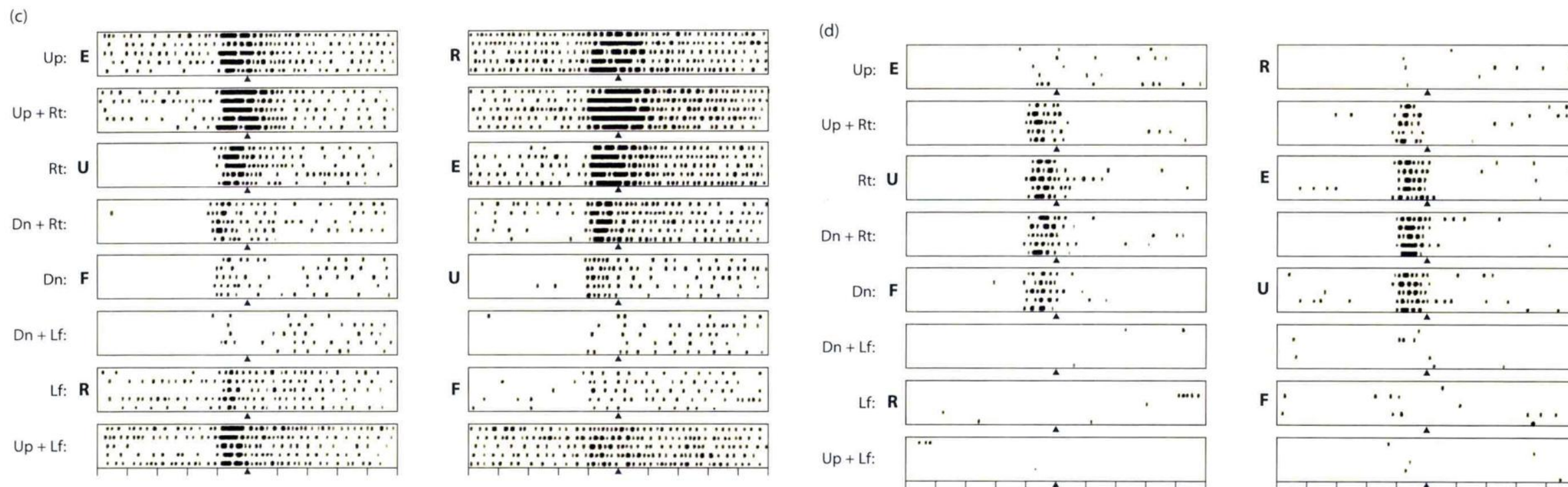
➤除了运动方向,还有编码肌肉运动状态





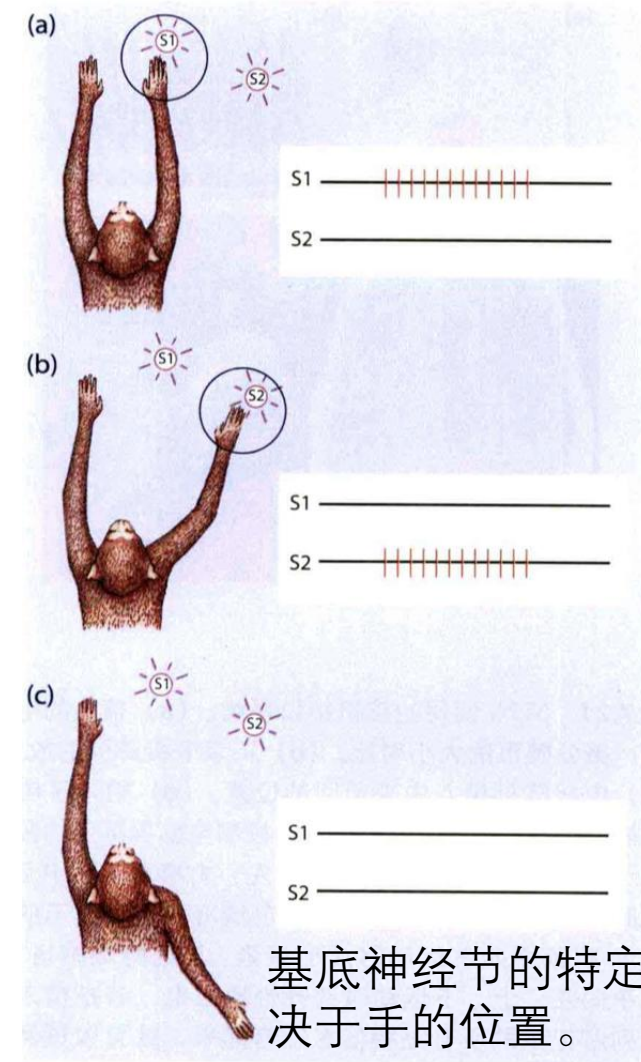
# 编码肌肉运动

➤除了运动方向，还有编码肌肉运动状态



# 编码运动目标

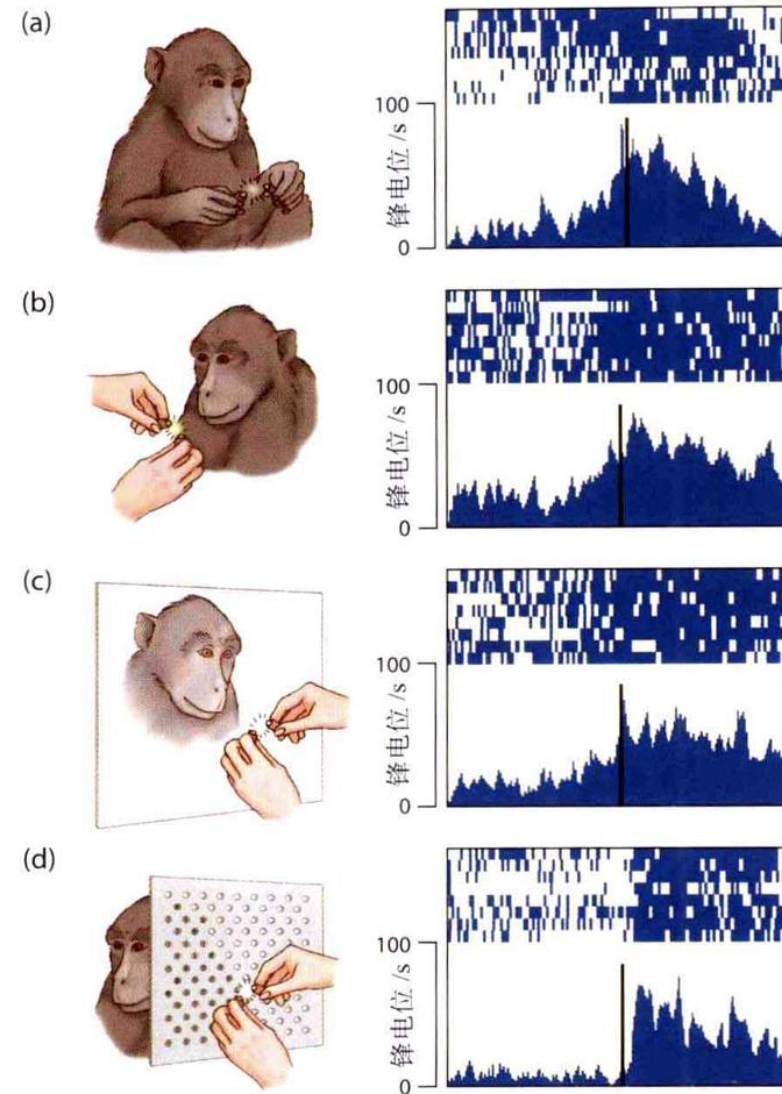
- 次级运动皮质与动作目的关系更密切
- 运动系统需要考虑空间环境信息。
- 基于目标的动作依赖于同步的感觉和运动信息。
- 运动区域许多细胞表征**感觉与运动信息**，这些神经元也具有感受野
- 顶叶、额叶和皮下结构的部分神经元也如此
- 感受野是动态的
  - 基底神经节的神经元分别对视野中的不同位置激活 (图a, b)
  - 当手不在视野范围时，神经元不对视觉刺激反应 (图c)



基底神经节的特定神经元活动取决于手的位置。

# 对他人（动物）动作的理解

- 知觉与运动不分离
- 理解他人动作需要自我参照
- 镜像系统→
  - 猴子运动前区腹侧的一个神经元活动

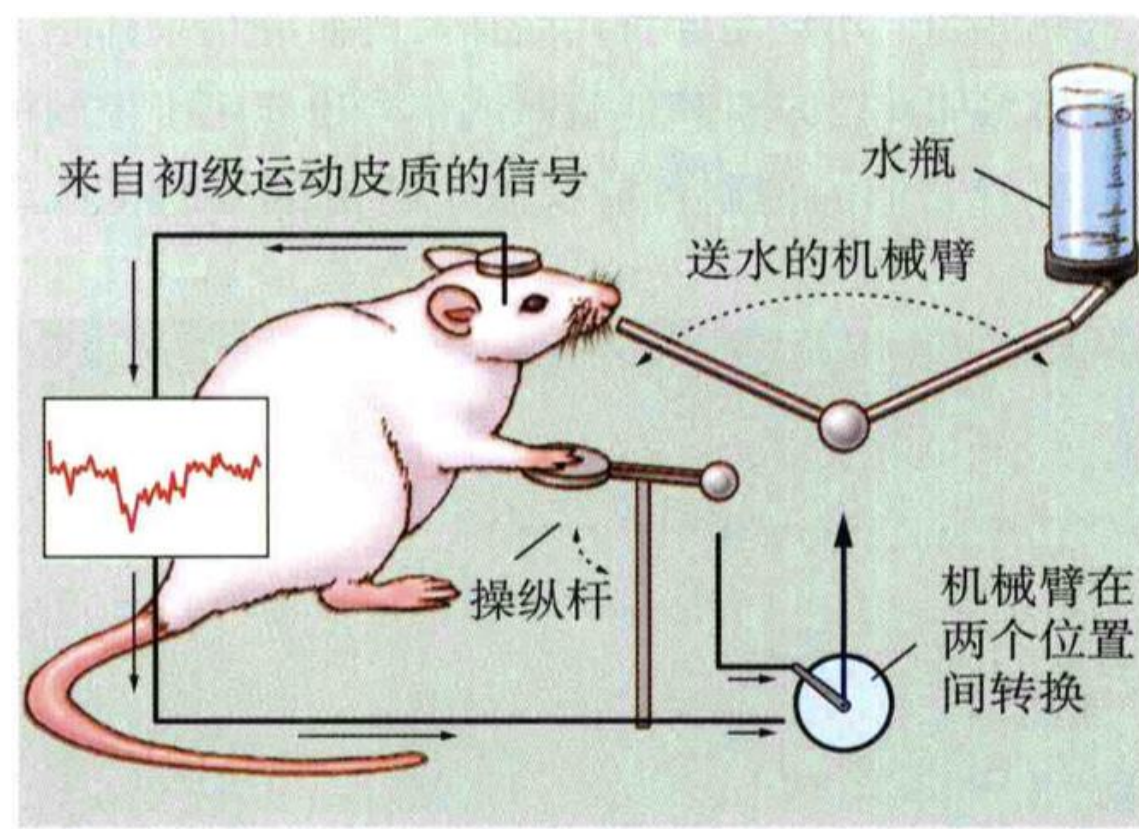
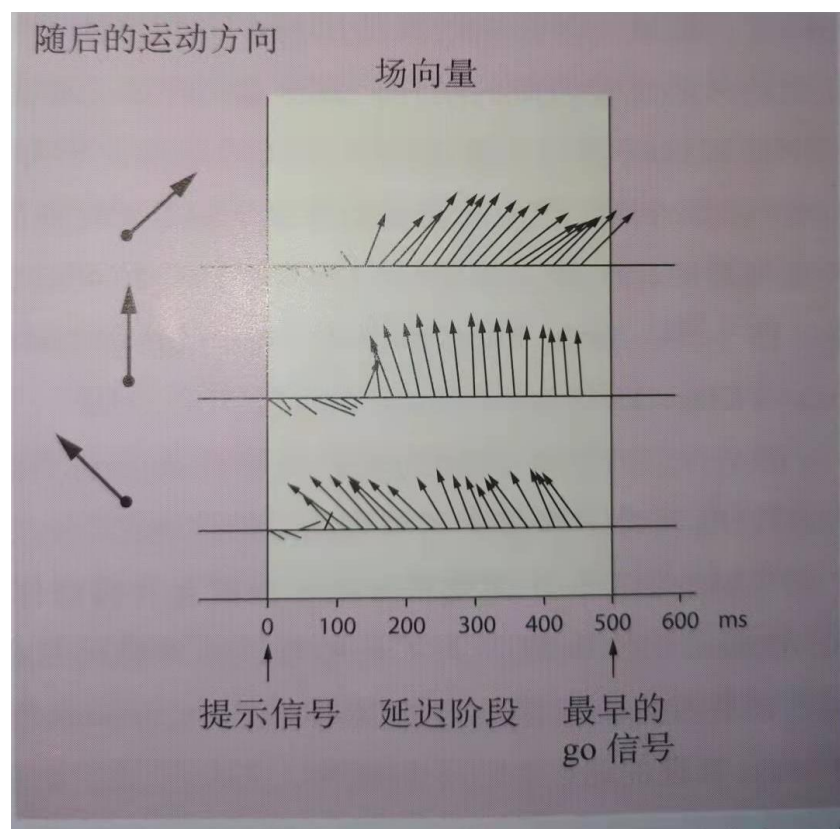




# 脑机接口 (brain-machine interface, BMI)

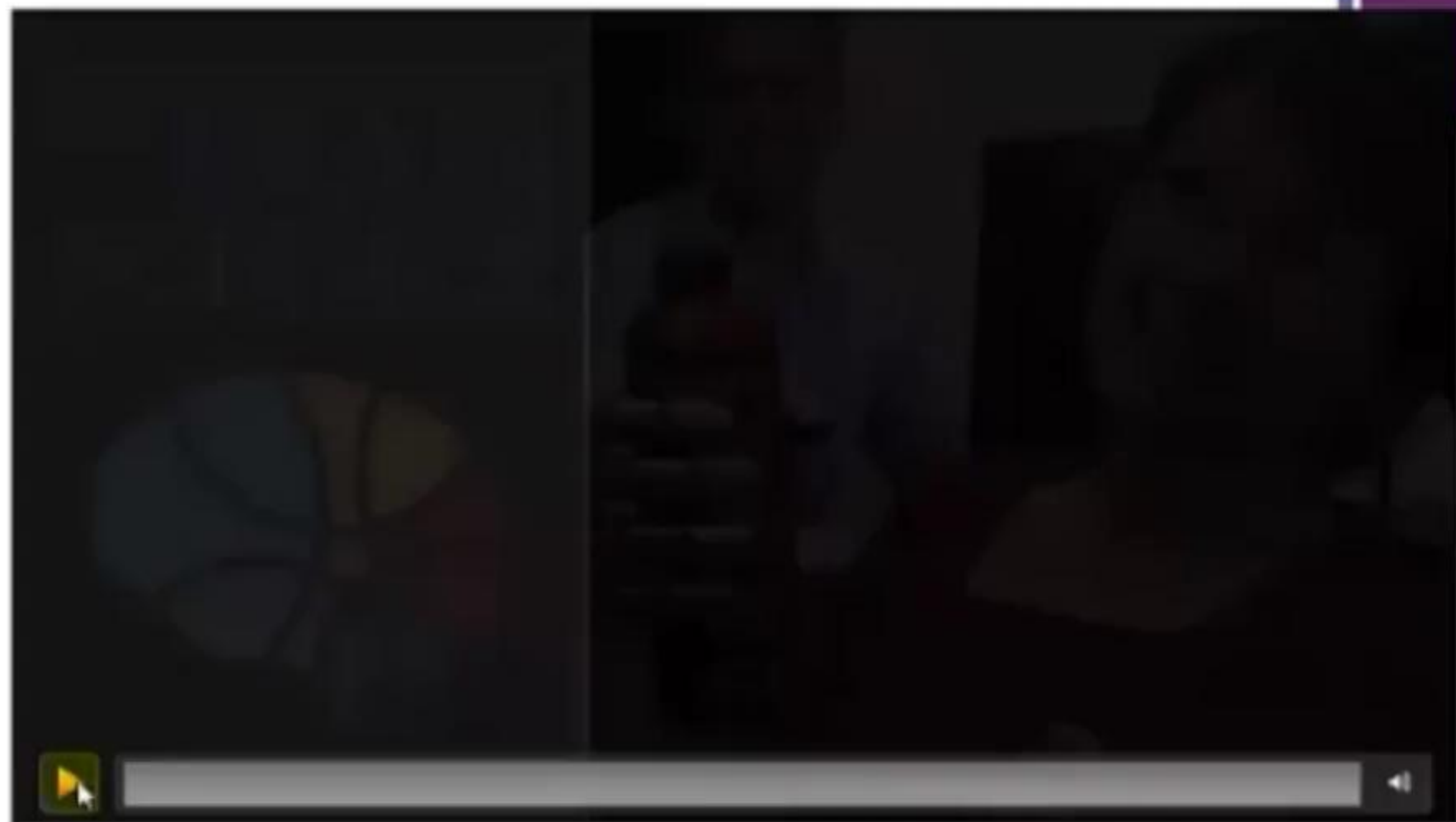
➤ 场向量在运动出发前可预测运动方向

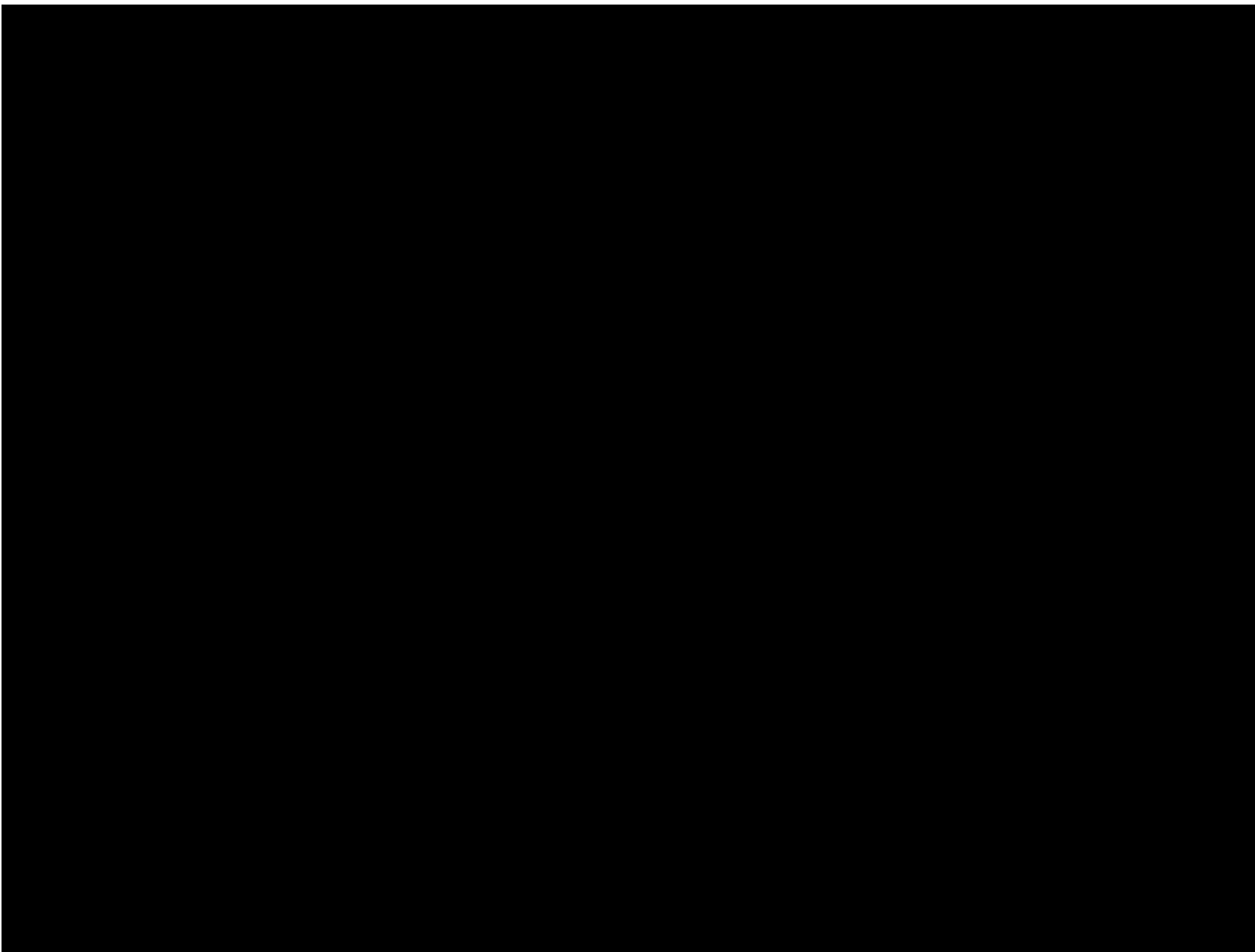
➤ 用神经编码直接驱动机器动作





## + Brain-machine interface(BMI)





**To help people with  
paralysis communicate,  
scientists want to tap  
into their brain activity.**



# 运动障碍

# 皮质区损伤相关的运动障碍

## ➤ 偏瘫

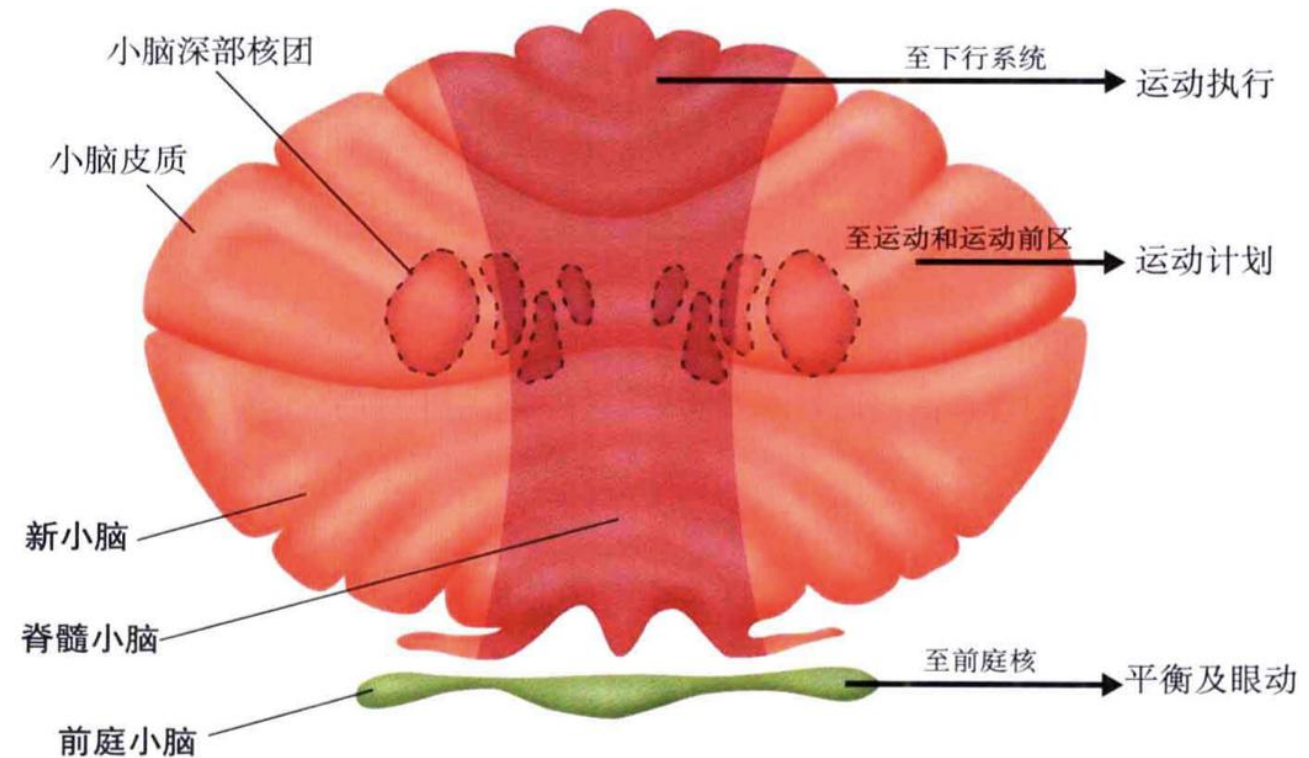
- 运动皮质受损，失去对侧运动的控制
- 反射测试：反应强烈，导致不能运动

## ➤ 失用症

- 具有完成某个动作的肌肉能力，但不能和特定任务联系起来
- 常见左半球皮质损伤，常伴有失语症
  - 意向运动性失用症
    - 对预期动作有理解，但不能准确执行
  - 观念性失用症
    - 不知道动作的目的和工具的使用方法

# 小脑损伤有关的运动障碍

- 前庭小脑障碍
  - 影响**保持平衡和稳定性**
  - 如保持眼睛注视一个物体
- 脊髓小脑障碍
  - 影响对**动作平稳性的控制**
    - 动作各部分配合失调
    - 不能平稳终止
  - 对酒精敏感吸收，产生萎缩
- 新小脑障碍
  - 多动作配合失调



# 基底神经节损伤相关运动障碍：亨廷顿氏舞蹈症

## → 症状

最初发作不明显，精神状态逐渐改变，易怒，神志不清，对日常活动失去兴趣

一年后运动异常：笨拙，平衡有问题，不停地非自主运动

非自主运动支配正常的运动功能，病人的手臂、腿、躯干和头可能不断地扭曲运动

## → 病因

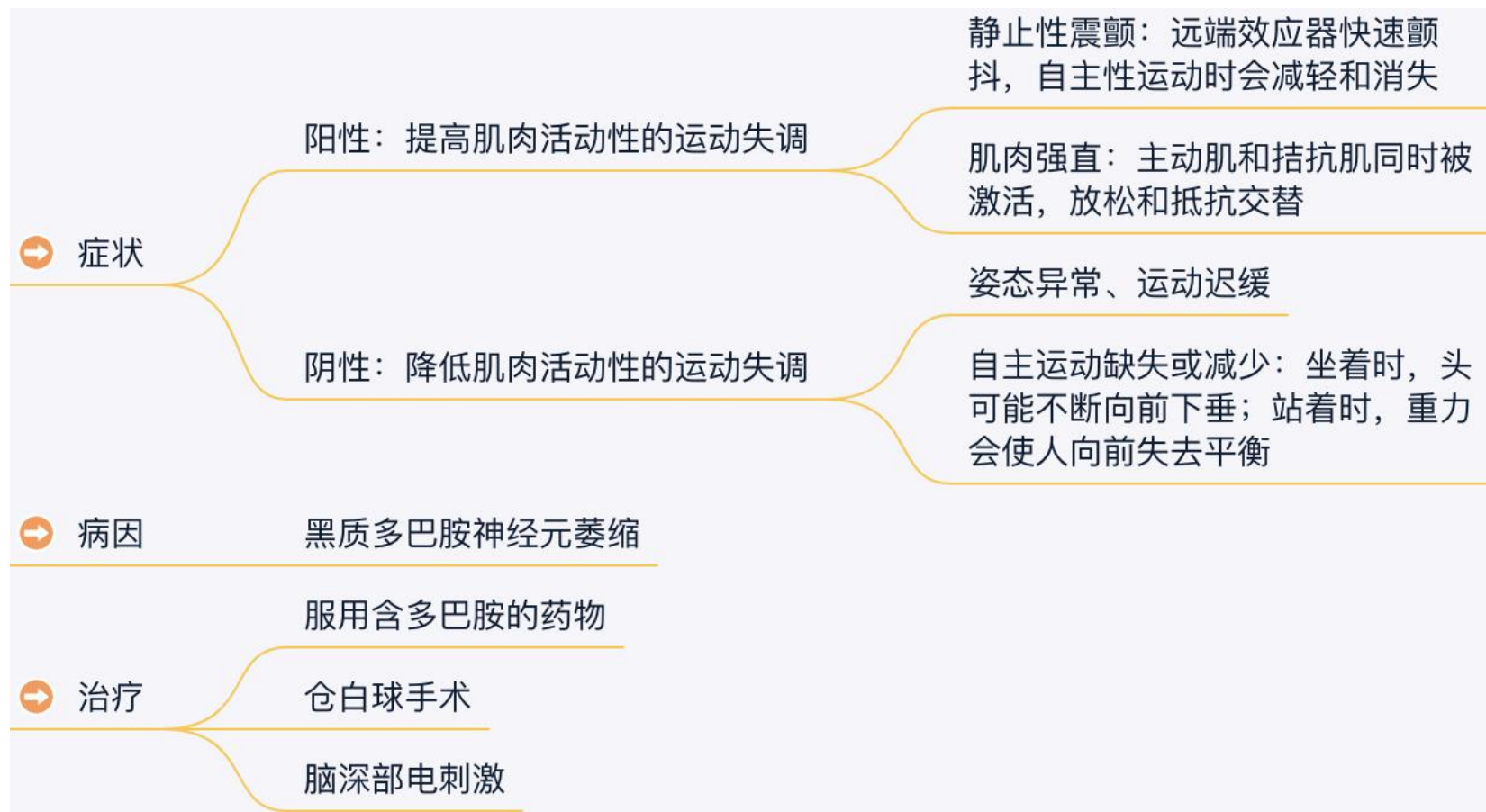
纹状体细胞死亡率90%，皮质、皮质下大量病变

可能是抑制通路输出减少导致运动亢进

## → 治疗

无普遍认可治疗方法；<12

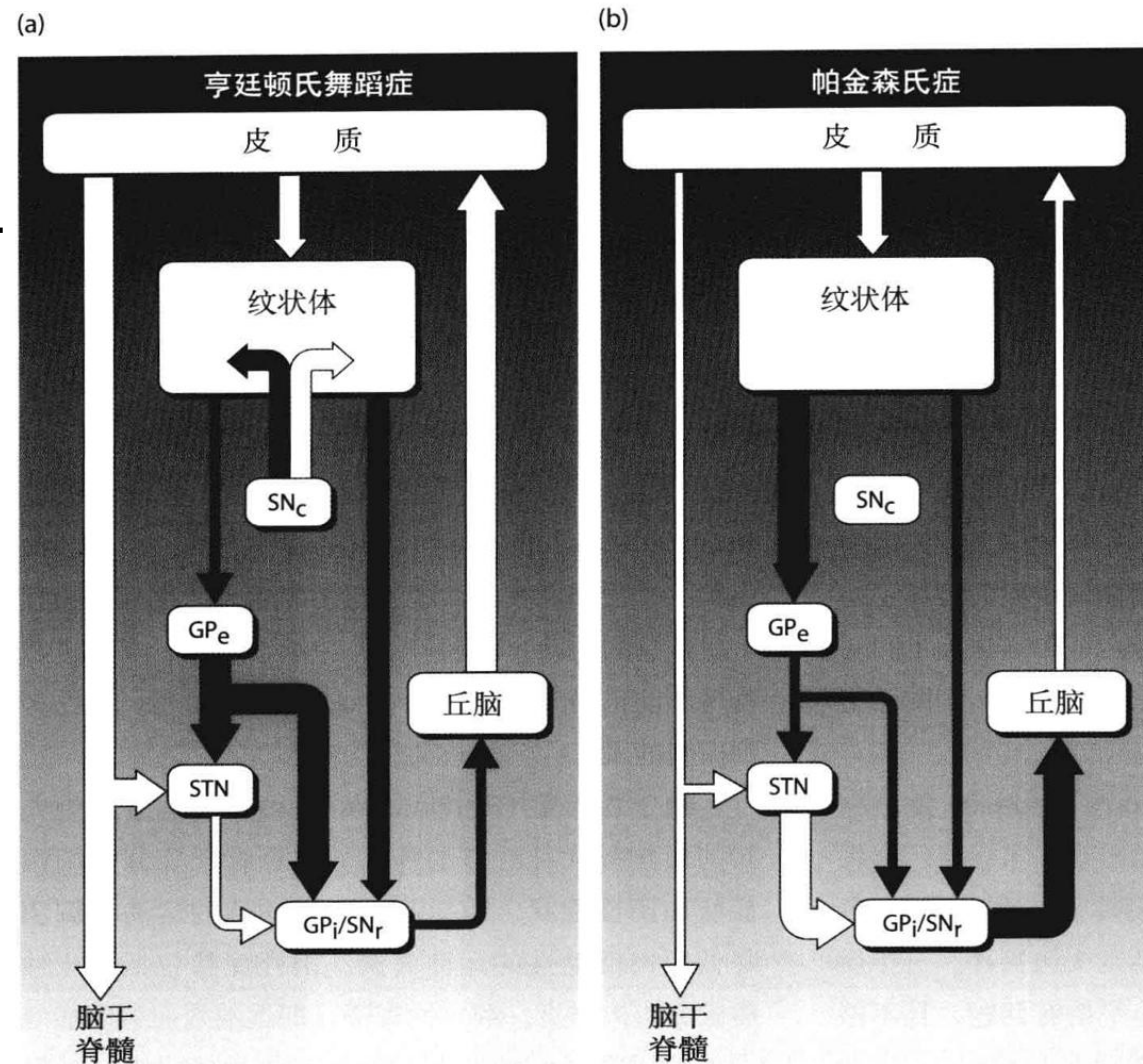
# 基底神经节损伤相关：帕金森氏症





# 基底神经节损伤相关

- 基底神经节—皮质通道对比分析
  - 亨廷顿氏舞蹈症
    - 间接通道：弱→强→弱→强(皮质)
  - 帕金森氏症
    - 直接通道：弱→强→弱(皮质)





# 总结：运动系统的框架

# 运动系统的框架

- 联合皮层：产生运动目标；
- 基底节：运动之间转换；
- 辅助运动区：基于内部目标、定势、习得模式的运动选择；
- 运动前区：基于外部刺激信息的运动选择；
- 外侧小脑：运动模式的准备；
- 运动皮层：激活肌肉；
- 小脑中间地带：运动模式的执行和校正。

# 总结

