飞行训练诱导的眶额-壳核功能连接及其行为学关联

郝佳琪[1]，陈曦[2]

摘要

飞行操作技能是一种涉及多种认知功能的复杂操作技能。现有脑可塑性研究多聚焦运动员等运动人群，而对飞行训练场景下大脑的动态耦合变化尚不清晰。壳核作为基底节核心输入脑区，参与习惯养成、奖赏加工与精细运动控制，这些功能与飞行操作有很大的相关性。本研究采用2019—2022年两时点纵向静息态功能磁共振（rs-fMRI）实验，匹配25名飞行学员与23名同届无飞行经验地面专业男生，基于壳核种子点开展全脑功能连接分析，通过混合方差分析检验组别与时间交互效应，并结合心理运动追踪任务开展行为关联分析。结果显示，壳核与右侧眶上额回的功能连接存在显著组别与时间交互作用；基线阶段两组该环路功能连接存在组间差异，两年随访时组间差异方向反转；此外，飞行组壳核与右侧眶额皮层功能连接随训练降低，并且这种连接的降低对应更高的运动操纵准确率。本研究证实长期飞行训练会重塑壳核-右侧眶上额回认知运动环路，通过抑制冗余脑区间同步活动、保留核心决策-运动传导通路实现网络高效化；研究结果补充职业技能依赖的皮层-纹状体可塑性实证，可为飞行员认知神经评估、航空人为因素防控提供影像学理论支撑。

关键词：壳核、功能连接、眶上额回、核磁共振、飞行员

1 绪论

民航客机深刻改变了人类生活，重塑了人们对时间与空间的认知。其中，民用航空是发展历史最短的行业之一。飞行重新定义了空间与地点的边界，它既催生了新的适应机遇，也带来了新的边缘化风险。2024年济州航空空难表明，飞行员在极端应激下易出现认知混淆与操作失误，凸显人为因素是航空安全的核心风险（央视新闻, 2024）。壳核是纹状体的核心亚结构之一，与尾状核共同组成背侧纹状体，是基底神经节的主要输入核团。壳核作为纹状体的核心亚区，参与习惯形成、运动调控与奖励相关加工，在长期训练相关脑重塑中扮演关键角色（Basile et al., 2021）。

2 理论背景

研究表明，在需要将认知策略转化为精确运动输出的任务中，例如职业运动员执行高难度动作时，壳核体积的增大与运动能力呈正相关（Adamson et al., 2020）。由此可见，长期认知–运动训练能够促进该脑区的功能可塑性(Voelcker-Rehage et al., 2011)，优化脑区间功能连接模式，使得

[1] 作者介绍：中国民用航空飞行学院，飞行技术学院，应用心理， haojiaqi1207@163.com，民航飞行人员心理状态评估体系建立及预警危机干预措施研究
[2] 作者介绍：中国民用航空飞行学院，飞行技术学院，应用心理， chengnnu422@126.com

大脑网络从“高连接、低效率”向“低连接、高效率”转变（Bassett et al., 2015）。然而，现有证据大多来自针对运动员或基础运动学习的研究。在高级飞行训练这一极其复杂的认知-运动整合情境下，壳核的可塑性机制仍缺乏充分研究。

为了考察飞行训练与壳核的功能变化，我们进行了本项研究。本研究的研究对象为飞行学员，核心目标是捕捉长期训练引发的神经可塑性变化。采用纵向研究设计追踪同一组学员从训练开始到训练结束的成长全过程，从而消除个体内部先天差异的影响，真正揭示训练本身引起的动态脑部变化。为了消除历史和时间的影响，本研究设立了一组对照组，相较于新手与专家的横断面比较，这种方法更具因果推断价值。本研究主要采集被试的头部静息态功能磁共振图像（rs-fMRI）。磁共振成像具有非侵入性特点，能够无创地显示飞行员静息状态下这些脑区间自发神经活动的同步性。总之，本研究采用 2019-2022 年纵向追踪设计，纳入飞行训练组与地面对照组，基于静息态功能磁共振成像，重点考察壳核与全脑功能连接的时间与组别交互效应。本研究旨在探究长期飞行训练导致的的功能连接改变，揭示飞行员职业适应背后的神经特征，为航空医学相关研究提供实证参考。

3 研究方法

3.1 实验设计

本研究设采用纵向研究，于 2019 年采集了两组被试的头部 rs-fMRI。经过两年的时间，于 2022 年再次采集了同一批被试的 rs-fMRI 数据，旨在确定其壳核（putamen）的差异情况。目的在于识别与飞行训练相关的壳核的功能连接变化。

所有的被试选自中国民航飞行学院招募的被试，一组是飞行学员,另外一组是性别、年龄匹配的地面专业对照组，所有候选人是同一届的本科生；性别均为男性。被试排除标准包括：(1)既往患脑部器质性疾病、精神心理疾病者；(2)体内植有金属、假肢、固定钢板等不宜进行 MRI 检查者；(3)不能配合参与本研究或者拒绝签署知情同意书；（4）患有幽闭恐惧症。最终共招募了 25 名男性飞行学员和 23 名男性地面专业学生，地面专业学生无任何飞行训练经验。飞行学员飞行训练的飞机类型是 SR-20、DA-42 和 C172R，第二次数据采集时，飞行学员训练时长为 101.5–249 小时（包含飞行模拟器），对照组无任何飞行相关训练。涉及人类的研究已获得中国电子科技大学（成都，中国；编号：2019–042019)伦理委员会的批准。研究按照当地法规和机构要求进行。参与者提供了书面知情同意书以参与本研究。

数据采集时使用 3T 核磁成像仪（GE DISCOVERY MR 750）,扫描序列为梯度回波脉冲序列，T1 结构像参数设置为重复时间(TR)为 5.976 ms, 回波时间(TE)为 1.976 ms, 体素大小为 1 mm^3，视野 FOV 为 256mm×256mm×154mm，矩阵为 256×256，翻转角为 9° 切片数为 154。在获取 fMRI 图像时，具体参数设置如下：翻转角为 90°；切片厚度为 4 毫米（无间隔）；图像矩阵为 64×64；视野（FOV）为 240mm×240mm×140mm；TR/（TE）为 2000 /30 毫秒。每位参与者扫描时间均 8.5min，每次扫描包含 35 个切片，一共搜集了 255 帧图像。

3.2 心理运动能力评估

心理运动能力评估在 2022 年数据采集时同时收集。本研究采用 Mueller & Piper（2014）编制的 MTT 任务评估参与者的心理运动能力，任务通过心理学实验构建语言（PEBL）平台呈现，单次测试时长为 5 分钟。实验时，电脑屏幕上出现随机变化位置的光点，被试用鼠标控制光标追踪光点位置，光标与光点重合即为正确，同时记录反应时。

3.3 数据预处理

数据预处理使用基于 MATLAB R2022b 平台的 Restplus 软件。具体处理流程如下：（1）数据格式转换：将原始 DICOM 格式数据转换为 NIfTI（NII）格式，以便后续分析。（2）初始图像剔除：为避免扫描初期磁场尚未达到稳定状态对数据质量造成影响，剔除前 10 个时间点的图像，以确保后续分析的信号来源于稳定的磁共振信号。（3）时间层校正：对剩余功能像进行时间层校正，以补偿隔层扫描所导致的时间相位差异。（4）头动校正：采用刚性配准方法对所有图像进行头动校正，以减小被试头部轻微移动对信号的影响。（5）空间标准化：将校正后的功能像配准至蒙特利尔神经研究所（MNI）标准空间，并进行重采样，以实现个体间脑区的空间对应。（6）平滑处理：使用高斯核对图像进行空间平滑处理，平滑核为[6,6,6]，以提高信噪比并降低个体解剖差异的影响。（7）去线性漂移：去除随时间变化的线性趋势，以校正由于设备升温或系统漂移导致的低频信号变化。（8）协变量回归：对白质信号、脑脊液信号及头动参数等协变量进行回归，以剔除生理噪声及其他非神经元来源的干扰信号。（9）带通滤波：最后，对残差信号进行带通滤波（0.01 – 0.08 Hz），以提取低频振荡信号，减少高频噪声及极低频漂移的影响。

3.4 功能连接计算

预处理之后的数据纳入 restplus 软件进行功能连接计算。功能连接是通过评估任意两个脑区之间功能活动的时间序列相似性或一致性来反映它们之间的功能关联。本研究以左侧壳核作为种子点,其定位参照以往研究坐标为（x=29，y=-6，z=6，r=3.5mm）（Manza, 2016）。提取该种子点的平均时间序列，计算其与全脑每个体素时间序列之间的皮尔逊相关性。通过 Fisher Z 变换将相关系数转换为 Z 值，以优化数据的正态性。

3.5 统计分析

使用基于 MATLAB R2022b 的 spm12 软件对数据进行混合方差分析。其中时间为被试内因素，组别为被试间因素，考察时间与组别的交互作用。组间效应体现飞行学员与地面对照组的差异，时间效应体现两组随时间变化的历史效应。交互作用体现了两组被试在两个时间点的壳核变化的差异。本研究采用团块水平的多重对比校正（FWE），以团块显著性水平 $p<0.05$ 作为判断统计结果具有统计学意义的标准。最后使用 SPSS 27.0 进行事后分析。组内纵向变化采用配对样本 t 检验进行分析，分别考察每组被试在两个时间点脑影像指标的改变；组间差异采用独立样本 t 检验，

比较两组在两个时间点的脑影像指标的差异；采用 Pearson 相关分析探讨脑影像指标与行为学指标（飞行时长与心理运动能力评估）之间的相关性。

4 研究结果

4.1 被试基本情况

所有被试影像数据经预处理及头动质量检验，无被试存在头动过大情况，全部被试数据均符合后续功能连接分析要求，未做被试剔除。数据于 2019 年采集，其中总飞行小时、移动反应时、移动准确率于 2022 年采集。所有被试人口统计学与行为学指标见表 1（表 1 人口计学和行为任务）。具体包括：年龄（均值±标准差）、性别分布（男性占比）、受教育年限、右利手(百分比）、总飞行时间（均值±标准差）、反应时（秒，均值±标准差）以及正确率（百分比，均值±标准差）。本研究纳入飞行组（n=25）与地面组（n=23）。

表 1 人口计学和行为任务

	Pilot（n=25）	Controls(n=23)	t	p
年龄	18.84±0.69	18.87±0.87	-0.13	0.9
性别	100%	100%		
教育年限	12	12		
右利手	96	92		
总飞行小时	242.26±10.32			
移动反应时	1129.88±114.96	1175.04±125.25	-1.30	0.2
移动准确率	0.94±0.04	0.92±0.05	1.66	0.11

4.2 壳核与全脑功能连接

基于脑 MRI 统计图谱分析显示，壳核-右侧眶上额回（ORBsup_R）功能连接存在显著的组别与时间交互作用（F=21.19，P<0.05），提示飞行训练对两组被试该脑区功能连接的影响存在时间依赖性差异（图 1 交互作用表 2 表现出显著壳核功能连接性的脑区（混合方差分析））。

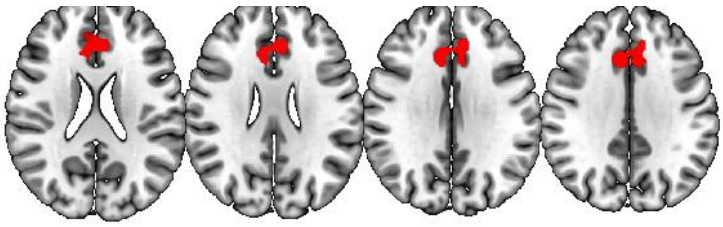


图 1 交互作用

表 2 表现出显著壳核功能连接性的脑区（混合方差分析）

	脑区	团块体积（体素）	MNI 坐标（x, y, z）	F*	p
交互作用	右侧眶上额回	2108	（9 45 -24）	21.19	p<0.05

4.3 行为学数据

4.3.1 心理运动行为任务：正确率与反应时

飞行学员组：双变量皮尔逊相关分析显示，壳核与眶上额回功能连接的纵向变化(ΔFC，2022-2019 年间 z 值标准化功能连接的纵向变化）和行为指标的关联模式在两组间并不一致。在心理运动任务正确率上，飞行组未见统计学差异，地面组呈显著负相关（r=-0.423，p<0.05）；在任务平均反应时指标上，飞行组未见统计学差异，地面组呈显著正相关（r=0.428，p<0.05）（图 2 心理运动任务行为与脑功能连接相关散点图。该散点图展示心理运动能力指标与腹内侧壳核ΔFC 的相关关系；图中横坐标为心理运动任务指标，纵坐标为腹内侧壳核功能连接变化值ΔFC。）。

4.3.2 飞行时长与脑功能连接 ΔFC 的相关分析

累计飞行时长与ΔFC 相关：在飞行学员组内，壳核ΔFC 与累计飞行时长无显著相关性（r=-0.09，p=0.668）（图 3 累计飞行时长与ΔFC 相关）。

4.4 事后多重比较

本研究采用独立样本 t 检验，配对样本 t 检验分析，系统考察训练前后两组指标的变化特征。2019 年独立样本 t 检测结果表明，飞行组与地面组间壳核与右侧眶上额回存在显著差异（t=3.219,P=0.002），飞行组比地面组的相关性显著的更高 2022 年组间比较显示，两组指标差异具有统计学意义（t=-2.215,P=0.032），飞行组的该功能连接下降，相反，地面组的连接上升。在两个时间点，差异的方向转变了（图 4 交互作用）。

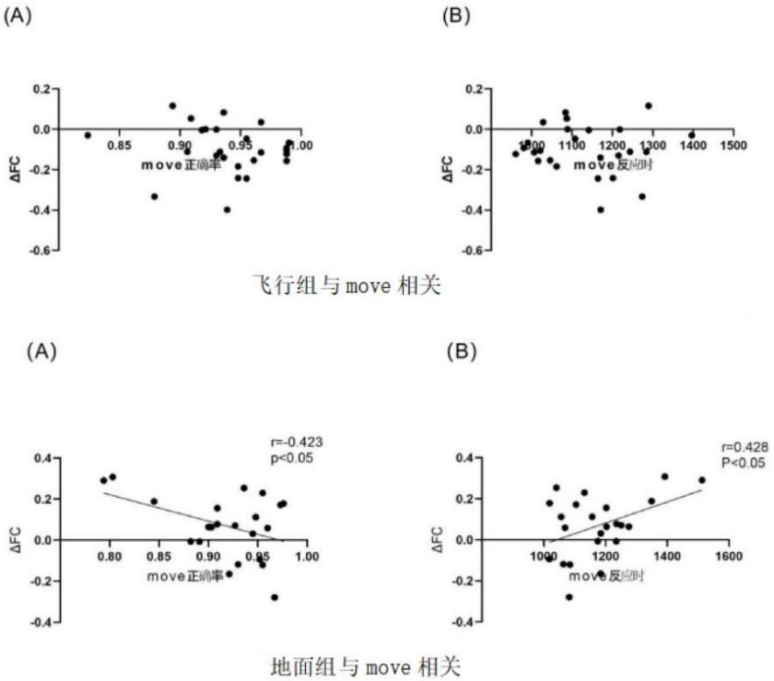


图 2 心理运动任务行为与脑功能连接相关散点图。该散点图展示心理运动能力指标与腹内侧壳核ΔFC 的相关关系；图中横坐标为心理运动任务指标，纵坐标为腹内侧壳核功能连接变化值ΔFC。

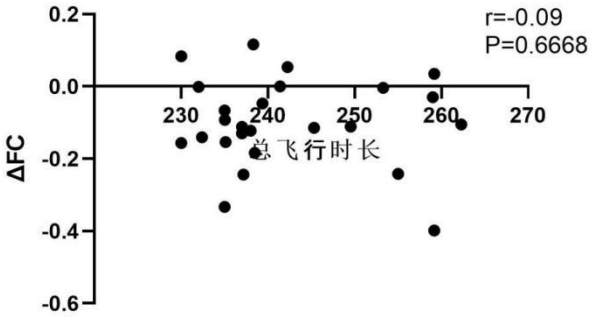


图 3 累计飞行时长与 ΔFC 相关

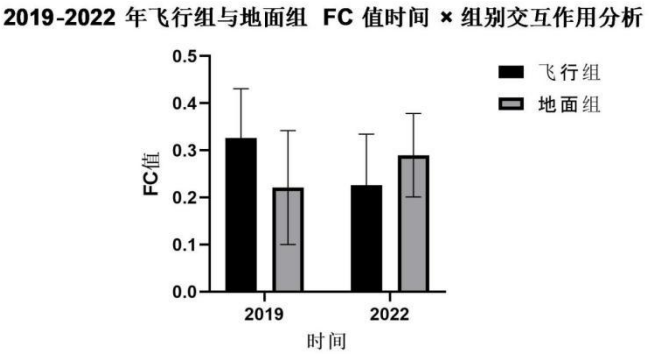


图 4 交互作用

5 总结

本研究采用两年纵向静息态功能连接设计，对比飞行学员与地面对照人群的基底节网络可塑性差异，重点探究长期系统化飞行训练对壳核功能连接的塑造作用。研究发现右侧眶上额回与壳核的功能连接存在显著的交互作用，这一结果为飞行认知神经机制研究提供实证依据。

额叶存在多套并行、解剖分离的皮层 - 纹状体闭环环路，不同前额叶亚区定向投射至纹状体特异性分区，各自分管认知、情绪、动机类行为调控 （Masterman & Cummings, 1997）。其中眶额皮层（OFC）作为价值编码核心前额叶脑区，可依据细胞构筑与纤维投射划分为内侧、外侧两大功能单元，二者加工信息完全分化（Rolls, 2004; Rolls et al., 2020）：内侧眶额（含本研究观测的右侧眶上额回 BA11）专一编码奖赏、正向操纵收益与主观愉悦刺激；外侧眶额皮层负责惩罚、预期落空、操作失误等负性线索加工。非人灵长类与人类脑损伤研究证实，眶额皮层核心功能为-反转学习与负反馈加工：当奖惩规则发生变化时，完整 OFC 可快速更新刺激价值表征，眶额损伤人群无法依托失误调整行为，持续固着低效选择策略（Fellows, 2007）。从纤维通路特征来看，内侧眶额皮层存在大量定向白质纤维束，特异性投射至壳核，构建价值信号向运动系统传导的专属解剖通路（Masterman & Cummings, 1997；Rolls et al., 2020；Frey & Petrides, 2000）。

解剖示踪、静息功能连接与损伤实验共同证实，右侧眶上额回（内侧 OFC）与壳核形成稳定“价值评估 - 运动输出”耦合环路（Rolls, 2004; Fellows, 2007; Masterman & Cummings, 1997）。眶额皮层接收视觉、体感、多模态环境线索，完成操纵风险、操作正误的相对价值权衡后，通过皮质 - 纹状体白质纤维束将标准化决策信号传递至壳核；壳核作为基底节核心输入枢纽，整合前额叶所有调控信息，把抽象价值判断转化为连贯、精细的手部自动化操纵动作 (Rolls et al., 2020)。飞行任务高度依赖该环路协同工作：真机、模拟机训练中持续出现仪表偏差、操纵失误、教官评分等奖惩反馈，需要右侧眶上额回实时更新各类操纵行为的主观收益，再通过纤维投射持续调控壳核运动输出通路。Fellows (2007) 的脑损伤研究反向佐证二者依存关系：眶额皮层受损患者无法加工负反馈信号，眶额向壳核的价值校正传导中断，操纵行为僵化、难以根据故障快速修正，证明眶额 - 壳核耦合是灵活飞行操纵的必要神经基础。长期飞行训练对壳核网络的重塑并非孤立改变，必然伴随眶额 - 壳核交互通路的同步协同优化。

本研究观测到，两年系统化飞行训练后飞行人群壳核全脑功能连接强度显著低于对照组，且壳核功能连接水平与心理行为能力呈负相关，说明高效自动化操纵不依赖脑区间同步活动增强，而是依托长期强化学习产生的-神经通路修剪效应(Rolls, 2004; Rolls et al., 2020)。长期大量飞行实操过程中，右侧眶上额回持续接收操纵失误带来的负性反馈，不断更新操纵行为的奖惩价值表征，并稳定向壳核输出统一调控信号；重复同步激活下，眶额与壳核之间大量弥散、无任务意义的弱同步冗余纤维连接逐步被抑制修剪，仅保留匹配最优操纵策略的核心交互通路，过滤无关情绪、感知信号对运动指令的干扰，实现“风险预判 - 即时动作修正”一体化高效加工 (Rolls, 2004)。从额叶 - 纹状体环路架构角度，眶额皮层向壳核的投射分主次通路，长期强化学习会弱化非特异性旁支纤维同步性，强化核心功能束的耦合效率，最终表现为壳核整体全脑连接数值下降，但眶额与壳核交互通路专一性提升 (Masterman & Cummings, 2020)。该可塑性修剪规律与眶额皮层编码特征完全匹配：内侧 OFC 稳定存储标准化操纵价值，外侧 OFC 持续识别失误惩罚，二者协同驱动皮层 - 纹状体网络精简，减少跨脑区无效同步活动，提升高压环境下操纵反应速度 (Masterman & Cummings,1997;Rolls et al., 2020)。

本研究仍存在一定局限，首先样本规模有限，被试数量偏少，统计效力存在一定制约；其次仅设置两年前后两个扫描节点，缺少训练中期观测数据，难以完整追踪脑岛环路随训练时长的渐进可塑性变化，相关规律还需更大纵向队列数据进一步验证。后续研究可扩大纵向观测队列，增设多阶段随访扫描，结合任务态 fMRI 与多模态结构影像，分层探究不同飞行年限人群的眶额 - 壳核环路演化差异。

参考文献

央视新闻。调查称韩国济州航空空难中飞行员关错发动机[EB/OL]. (2025-07-21). https://www.sohu.com/a/916106788_162522.

Adamson, B. C., et al. (2020). The impact of exercise on basal ganglia volume and its relation to cognitive performance. NeuroImage, 215, 116829.

Basile G A, Bertino S, Bramanti A, et al. Striatal topographical organization: Bridging the gap between molecules, connectivity and behavior[J]. European Journal of Histochemistry, 2021, 65(s1):3284. DOI:10.4081/ejh.2021.3284.

Bassett D S, Yang M, Wymbs N F, et al. Learning-induced autonomy of sensorimotor systems[J]. Nature Neuroscience, 2015, 18(5): 744-751.

Fellows L K. The Role of Orbitofrontal Cortex in Decision Making[J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2007, 1121:421-430.

Manza P, Zhang S, Li C- S R, et al. Resting- State Functional Connectivity of the Striatum in Early-Stage Parkinson’s Disease: Cognitive Decline and Motor Symptomatology[J]. Human Brain Mapping, 2016, 37: 648- 662.

Masterman D L, Cummings J L. Frontal- subcortical circuits: the anatomic basis of executive, social and motivated behaviors[J]. Journal of Psychopharmacology, 1997, 11(2): 107- 114.

Rolls E T. The functions of the orbitofrontal cortex[J]. Brain and Cognition, 2004, 55(1):11-29.

Rolls E T, Cheng W, Feng J F. The orbitofrontal cortex: reward, emotion and depression[J]. Brain Communications, 2020, 2(1):fcaa196.

Flight Training–Induced Changes in Orbitofrontal–Putamen Functional Connectivity and Their Behavioral Associations

Hao Jiaqi

Abstract

Flight operation is a complex skill that relies on multiple cognitive functions. Previous studies of experience-dependent brain plasticity have primarily focused on athletes and other populations engaged in extensive motor training, whereas longitudinal changes in brain functional coupling associated with flight training remain poorly understood. The putamen, a major input structure of the basal ganglia, plays important roles in habit formation, reward processing, and fine motor control, all of which are closely related to flight performance. In this longitudinal resting-state functional magnetic resonance imaging (rs-fMRI) study, data were collected at two time points between 2019 and 2022 from 25 male flight cadets and 23 male students from the same cohort with no flight-training experience. Whole-brain seed-based functional connectivity analysis was performed using the putamen as the seed region. A mixed-design analysis of variance was used to examine group × time interaction effects, followed by correlation analyses with performance on a psychomotor tracking task.

Keywords: putamen; functional connectivity; superior frontal gyrus, orbital part; magnetic resonance imaging; flight cadets