

# 基于体素的优秀跳水运动员大脑结构性特征研究

魏高峡<sup>1</sup> 罗 劲<sup>1\*</sup> 李佑发<sup>2</sup>

1. 中国科学院心理研究所心理健康重点实验室, 北京 100101; 2. 北京师范大学认知神经科学与学习国家重点实验室, 北京 100875

**摘要** 诸多研究表明, 运动技能获得会伴随着人脑结构发生一定程度的可塑性变化. 但至今为止, 长时运动技能学习对人脑运动皮层的影响还较少受到关注. 文中采用核磁共振技术, 基于体素的形态学分析, 比较了12名优秀运动员与12名普通人在大脑灰质结构像上的差异. 结果表明, 优秀运动员在双侧丘脑和左侧运动前区(BA6)上的灰质密度显著高于普通人. 这种变化究竟是先天选材还是多年运动技能训练所引起的, 需要进一步的探讨. 此外, 建议运动技能学习的脑成像研究可以更关注运动员这一专业群体.

**关键词** 皮层可塑性 运动技能获得 体素形态学 运动员 丘脑 运动皮层

运动技能学习是指一系列提高动作速度、准确性、自动化水平和适应性等动作效率指标的内部过程. 人们认为这些过程是感觉和动作信息进行重组和整合的中枢神经系统的复杂活动<sup>[1]</sup>. 随着现代脑成像技术(如PET, MRI)的发展, 人们可以观察到人类动作学习所引起的大脑结构的变化. 近年来对出租车司机、打字员和音乐家等这些专门职业人群大脑可塑性的研究日益增多. Maguire<sup>[2]</sup>对伦敦出租车司机大脑结构像进行研究, 发现他们大脑海马后部的灰质体积要显著高于一般人. 另一项对杂耍游戏学习者的大脑结构进行跟踪研究表明, 三个月的技能学习可以引起大脑结构发生可塑性变化<sup>[3]</sup>. 近年来, 音乐家大脑的可塑性成为研究的热点. 这些研究均获得了较为一致的结论: 与非演奏者相比, 经过专业训练后的乐器演奏者的大脑结构不同于一般人, 其脑结构发生了与专业技能训练相关的可塑性变化<sup>[4,5]</sup>. Schlaug<sup>[6]</sup>在回顾了音乐家大脑的相关研究后指出, 这类人群可以作为探索长期训练对大脑皮层结构产生影响的理想模型.

正如音乐家一样, 运动员也是另一类进行专业动作学习的人群. 他们的运动生涯一般从幼年就已开始, 在获得基本运动技能的基础上反复进行某一套动作的练习. 虽然这两类群体有很多共同之处,

但在动作的具体表现形式上还是存在着差异. 乐器演奏者擅长精细动作技能的表现, 而从事大多数运动项目的运动员则在遵循严格动作顺序的基础上更多征用了粗大的动作单元. 从某种程度上而言, 人们认为运动员这一群体在表现粗大型运动技能时则更具有代表性. 事实上, 人类的许多日常活动(如走、跳、投)都属于粗大型运动技能, 因此, 这些粗大型运动技能也被称为基本运动技能, 对于人类的生存和发展具有重要的生物学意义<sup>[7]</sup>. Neilson<sup>[8]</sup>指出, 与技能训练有关的动作表现神经环路会发生适应性的可塑变化. 他还认为运动员的专业训练应该能够引起人脑可塑性重组. 然而, 关于从事专业运动技能训练的运动员的大脑结构的可塑性, 还很少引起人们的关注. 本研究旨在探讨这种差异是否与运动技能的获得有关. 研究选择了专业跳水运动员为对象, 原因在于(1)跳水运动员很早就开始从事专业训练;(2)跳水运动能够很好地代表粗大型运动技能;(3)跳水这项运动不同于一般的人类肢体动作, 没有经过专门的训练无法完成, 运动员需要具有良好的力量、协调性和本体感觉能力. 基于此, 本研究假设跳水运动员的大脑结构不同于一般人, 其差异表现在与运动经验相关的脑区.

2008-12-01 收稿, 2009-02-27 收修改稿

\* 通信作者, E-mail: luoj@psych.ac.cn

## 1 研究方法

### 1.1 被试

本研究招募了两组被试, 一组为运动员组, 另一组为非运动员组. 运动员组的招募要求是每天进行5 h以上的专业训练的现役运动员, 非运动员组的招募要求是没有经过任何业余或专业的运动训练且身体健康者. 本研究最后招募到的12名运动员(6名男性和6名女性)均来自北京市跳水队, 平均专业训练为10 a, 所有被试均从少年开始进入专业队训练; 非运动员组的12名被试(6名男性和6名女性)为来自北京市丰台中学的中学生, 在性别、年龄上与运动员组进行匹配. 所有被试的年龄均在13—17岁之间, 运动员平均年龄为 $14.58 \pm 1.68$ 岁, 非运动员组的平均年龄为 $14.92 \pm 1.38$ 岁. 所有被试均为右利手、身体健康、无药物依赖病史. 本研究经北京磁共振中心道德伦理委员会批准, 同时按照1964年赫尔辛基宣言所规定的伦理标准执行实验操作, 并与所有被试父母签订了被试同意书. 在扫描进行前, 所有被试均向北京磁共振中心递交了被试检查单以排除有视力或听力障碍、身体受伤、有金属植入、脑部创伤、有幽闭恐惧、丧失意识能力或怀孕的被试个体.

### 1.2 MR扫描

3T配有标准头部线圈的Siemens Trio System (Siemens, Erlangen, Germany)用于采集结构像. 被试的头部用耳机和头部线圈之间的泡沫塑料固定. 采集标准全脑高分辨率3D图像(T1加权, MP-RAGE序列). 扫描参数如下: TR=2530 ms, TE=3.37 ms, flip angle=7°, slice thickness=1.33 mm, FOV=256 mm, 512×512-pixel matrix, Voxel size=0.5 mm×0.5 mm×1.33 mm. 总共扫描144个图像, 用于结构分析.

### 1.3 脑图像数据分析

采用基于体素的形态测量学(VBM)工具箱分析结构像数据(Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, UK). VBM是一种基于像素对脑结构图像进行自动、全面、客观的分析技术, 可定量检测脑组织成分的密度, 从而进行不同群体

间局部差异的比较图像的预处理. 首先对所有结构像进行格式转换(DICOM); 然后在MATLAB 6.5平台(Math Works, Natick, Mass)上, 采用SPM 2中的VBM工具箱<sup>[9-11]</sup>(Institute of Neurology, London, UK; <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk>)进行具体分析. 主要分析步骤为:

(1) 对每个个体的原始图像进行空间标准化到Montreal Neurological Institute (MNI)模板上, 该模板接近于Talairach空间. 接着将这些标准化了的图像分别分割成灰质、白质和脑脊液, 最后用FWHM 8mm对图像进行平滑. 对所有分割过的灰质图像、白质图像和脑脊液图像进行平均, 创建各自的模板;

(2) 进行灰质、白质和脑脊液的最优空间标准化. 然后, 将最优标准化了的图像继续分割成灰质、白质和脑脊液, 同时去除掉非脑结构组织;

(3) 将Jacobi调制标准化方法应用到灰质图像中, 保留标准化后的体积;

(4) 采用FWHM 8 mm对图像进行平滑;

(5) 分析组间全脑灰质和白质体积与密度的差异;

(6) 采用最优化VBM获取高分辨率的全脑图像, 最后处理过的图像分辨率为1 mm×1 mm×1 mm.

### 1.4 统计分析

采用SPM 2中的配对样本 $t$ 检验对灰质体积和密度进行基于体素的组间比较. 统计结果最后在MNI的3D图像上进行投射显示, 阈值设定为50个激活簇以上,  $p < 0.001$  (未校正), 根据分析结果, 对C-A组间比较的结果进行了阈值调整, 阈值设定为多重比较校正后的 $p_{FDR} < 0.05$ . 同时, 进行非线性转换, 将数据结果从MNI空间转换到Talairach标准空间. 此外, 还进行了运动员训练年限与灰质密度和体积的相关分析.

## 2 研究结果

### 2.1 组间脑灰质密度的比较

运动员组与非运动员组在某些脑区上的灰质密度出现显著差异(表1). 与非运动员相比, 运动员在双侧丘脑(图1, 未校正,  $p < 0.001$ )和左侧运动

前区(图2, 未校正,  $p < 0.001$ )上的灰质密度要显著高于非运动员, 而非运动员在双侧梭状回(BA 19), 左侧尾状核、双侧海马旁回(BA 36)、右侧小脑、左侧舌回(BA 17)、楔状回(BA 18)、双侧颞中回(BA 21、BA 37、BA 38)以及额中回(BA 10)上的灰质密度要显著高于运动员(多重比较校正,  $p_{FDR} < 0.05$ ). 两组在灰质体积上未发现显著性差异(未校正,  $p < 0.001$ ).

## 2.2 相关分析

在运动前区(BA 6)灰质密度和运动员的运动年限之间进行相关分析发现, 二者相关达到极显著性水平( $r = 0.91$ ,  $p = 0.0001$ ), 即随着运动年限的增加, 运动员在左侧运动前区(BA 6)上的灰质密度也逐渐增加(图3), 而在丘脑灰质密度和运动年限之间作相关分析则未发现二者有显著性相关.

表1 运动员组与非运动员组在灰质密度上的差异脑区及其最大值<sup>a)</sup>

条件	脑区	解剖学区域 (Brodmann area)	大脑半球	Talairach 坐标 (x, y, z)			激活簇大小 (voxels)	t	z
A-C									
	皮层下	丘脑	L	0	-16	2	4801	6.17	4.65
	额叶	中央前回(BA 6)	L	-50	-10	29	483	5.08	4.09
C-A									
	颞叶	梭状回(BA 19)	R	50	-64	-13	3354	6.79	4.93
	枕叶	枕中回(BA 19)	R	62	-69	-14		5.19	4.15
	后小脑	山坡	R	57	-75	-16		4.33	3.64
	颞叶	尾状核	L	-31	-33	6	578	6.52	4.81
	颞叶	脑区下回	L	-28	-34	-1		4.36	3.66
	颞叶	梭状回(BA 19)	L	-49	-67	-13	8844	5.95	4.54
	后小脑	山坡	L	-60	-72	-17		5.87	4.51
	颞叶	颞中回(BA 21)	L	-60	-49	-1		5.52	4.33
	边缘系统	海马回钩(BA 36)	L	-29	-5	-28	1351	5.71	4.43
	边缘系统	海马旁回(BA 36)	L	-32	-31	-14		4.69	3.86
	颞叶	下回(BA 20)	L	-34	-21	-19		4.35	3.65
	后小脑	小舌	R	32	-66	-24	616	5.41	4.27
	枕叶	舌回(BA 17)	L	-11	-88	-1	256	5.33	4.22
	枕叶	枕下回(BA 17)	L	-18	-90	-6		4.08	3.49
	枕叶	楔状叶(BA 18)	L	-12	-83	29	455	5.30	4.21
	边缘系统	海马回钩(BA 36)	R	30	-6	-33	215	4.82	3.94
	边缘系统	海马旁回(BA 36)	R	42	-20	-16	182	4.80	3.93
	颞叶	颞中回(BA 21)	R	66	-49	8		4.08	3.49
	颞叶	颞中回(BA 38)	L	-39	12	-39	115	4.36	3.66
	额叶	额内回(BA 10)	R	4	67	9	120	4.27	3.61

a) Talairach 为坐标空间; A 为运动员组; C 为非运动员组; A-C 比较阈值为未校正的  $p < 0.001$  水平; C-A 比较阈值为 100 个激活簇大小、多重比较校正后的  $p_{FDR} < 0.05$  水平; L 表示左半球, R 表示右半球

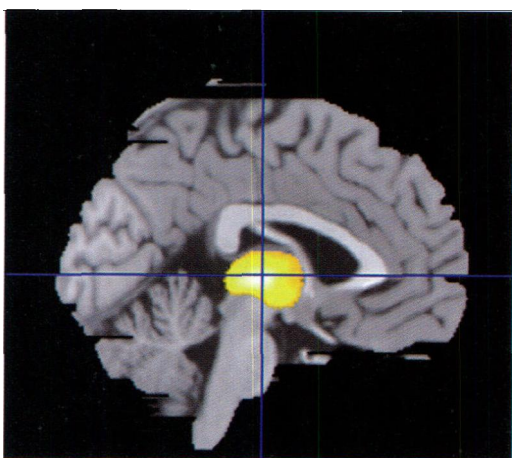


图1 丘脑灰质密度图

运动员在双侧丘脑灰质密度上要显著高于非运动员, 图像显示的阈值为激活簇大小 = 50,  $p < 0.001$  (未校正), 中心坐标为  $(x = 0, y = -16, z = -2)$ . 该图为统计结果投射到矢状位图上的显示效果

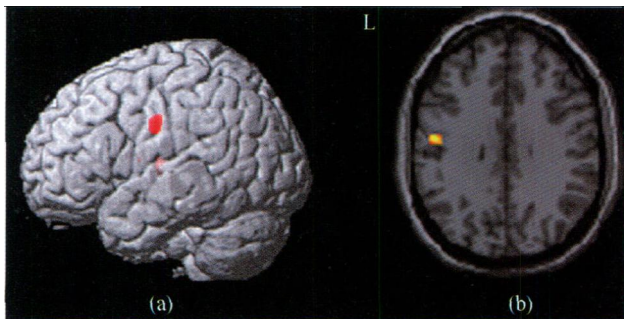


图2 左侧运动前区灰质密度图

运动员在左侧运动前区 (BA 6) 的灰质密度显著高于非运动员. 图像显示的阈值为激活簇大小 = 50,  $p < 0.001$  (未校正). (a) 图是统计结果投射到 ch2bet 脑上的显示效果, 图中所看到的为左脑半球; (b) 图是统计结果投射到轴状位图上的显示效果, 中心坐标为  $(x = -5, y = -10, z = 32)$

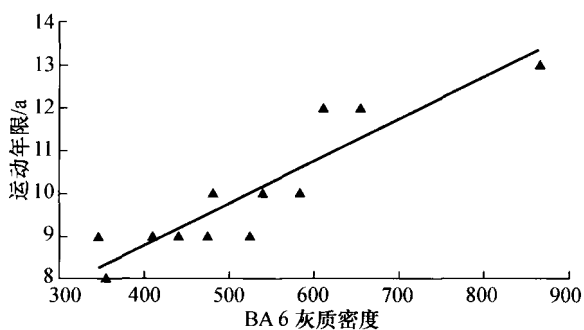


图3 运动前区 (BA 6) 上的灰质密度与运动年限之间的相关图

### 3 讨论

本实验中, 运动员双侧丘脑、左侧运动前区 (BA 6) 的灰质密度显著高于非运动员, 而在双侧梭状回 (BA 19), 左侧尾状核、双侧海马旁回 (BA 36)、右侧小脑、左侧舌回 (BA 17)、楔状回 (BA 18)、双侧颞中回 (BA 21, BA 37, BA 38) 以及额中回 (BA 10) 上的灰质密度要显著低于非运动员. 该研究结果部分证实了前期假设.

以往研究发现, 运动前区 (BA 6) 在运动计划和执行活动中起着重要的作用. 本研究中发现运动员在该区域灰质密度显著增高的现象, 提示该区域出现了与运动经验相关的结构性可塑性变化. 前期很多功能成像研究发现运动前区存在着可塑性改变和重组的现象. Folyer-lea 等发现, 在进行三周的运动技能学习后, 运动皮层有很显著的激活<sup>[12]</sup>. 研究还发现, 序列学习也可以改变运动皮层的可塑性<sup>[13]</sup>. 在最近对键盘乐器手等职业人群进行大脑结构像的分析中发现, 他们的运动皮层区域相比常人有着显著的增大<sup>[4,6]</sup>. Rosenkranz<sup>[14]</sup>等采用 TMS 研究了音乐家在学习新的技能任务时的运动皮层区域的兴奋性和可塑性表征, 他们推测专业音乐家经过长时的音乐训练, 在其运动区域的突触数目上应有增加, 在突触的可塑性上也存在着可变的空间. 近来的一项 TMS 研究也发现, 经过 5 d 的训练, 大脑皮层结构就能发生显著性变化<sup>[15]</sup>. 本研究招募对象为平均训练年限在 10 a 以上的专业跳水运动员, 这些专业人员在单一的环境中多年从事某一种技能的训练. 我们发现, 运动员运动前区的灰质密度表现出与训练年限的相关. 我们认为, 跳水运动员运动皮层的灰质密度反映了与运动经验有关的适应性. 考虑到大脑发育和技能获得之间可能存在交互作用, 比赛和训练中的运动表现可以作为丰富的环境刺激, 促进与皮层组织相关的功能获得和保存. 因此, 我们推测在 VBM 分析中所观察到的灰质密度的显著增加可能与长时运动训练有关. 事实上, 这种关系已经被很多关于技能获得对运动皮层可塑性影响的研究所证实<sup>[16,17]</sup>.

另外, 本研究还发现, 与非运动员相比, 运动员在丘脑灰质密度上表现出显著增加. 以往神经生理学的研究认为丘脑损伤会伴随运动性忽视症 (mo-

tor neglect)和体像障碍(disturbances of the body schema)等症候<sup>[18]</sup>。以往的临床研究结果也发现运动障碍病症患者在丘脑灰质密度和部分各项性指标(FA)的降低<sup>[19,20]</sup>。本研究中所发现的丘脑的具体脑区位于背内核和后结节。来自对猫<sup>[21]</sup>和猴<sup>[22]</sup>的动物实验支持了丘脑这两个具体部位的变化和运动功能退化的关系。另有研究发现在中枢神经或周围神经系统损伤情况下,也可以观察到丘脑神经元的变化<sup>[23]</sup>。然而,我们研究中的被试均无脑损伤或者身体损伤的情况存在,因此,可以排除丘脑的变化是由于运动损伤造成。然而,在丘脑灰质密度和运动训练年限之间做相关分析,没有发现二者存在统计学意义上的显著性相关,其原因可能是丘脑灰质密度与某种身体素质或遗传因素有关。

此外,根据以往动物和人类的研究结果,额叶运动皮层和丘脑认为是运动技能行为获得或保持的关键脑区(详见文献[24, 25])。我们认为中央前回的灰质密度可能与自幼年开始训练的、长期的运动经历有关。此外,研究还发现运动员组在梭状回(BA 19)和海马旁回(BA 36)上的灰质密度显著减少。虽然减少的真实原因尚不清楚,但通过另一个平行的对运动员进行运动表象的功能像研究结果却发现,运动员恰恰是在这两个脑区上的激活程度要显著高于非运动员组。这项研究发现提示在功能上表现出的显著激活区域可能与该区域灰质密度的减少有某种程度的补偿效应关系。

由于运动员是从事长时运动技能学习和训练的职业人群,因此,本研究所采用的运动员群体可以为探索大脑可塑性的变化提供新的被试模型。根据运动训练学的项群理论,由于某些运动项目所需要共同的身体素质和心理素质,可以将这些运动项目归纳进某一个运动项群,如篮球、曲棍球在防守和进攻技术上需要更多的心理策略,而体操、游泳等项目在本体感觉反馈上有很高的要求。在进行运动员脑结构可塑性的探索时,可以根据这些项目的共同技术特征,分别进行探讨。此外,也可以研究某个项群的认知心理特征与大脑某部分解剖结构的关系。因此,运动员群体可以作为大脑结构和功能可塑性研究的代表性群体。今后的认知神经科学的被试样本选择中可以考虑将运动员纳入其中,丰富该领域的研究成果。此外,对于中国跳水运动员而

言,青少年时期是他们获得金牌最佳运动技能表现的最佳年龄段,也是能够较好地探索到大脑结构变化的良好年龄段。本研究招募的被试均属于青少年。虽然其大脑的可塑性研究结果可能会受到大脑发育状况的影响,但在实验设计上对控制组的年龄上进行了匹配,避免了大脑发育状况对研究结果的影响。此研究也提示,在今后对运动员大脑可塑性进行研究时,应该充分考虑到与运动技能获得相关的神经系统活动变化的因素,也要考虑到年龄和运动项目特征。

### 参 考 文 献

- 1 Lisberger SG. The neural basis for learning of simple motor skills. *Science*, 1988, 242: 728—735
- 2 Maguire EA, Spiers HJ, Good CD, et al. Navigation expertise and the human hippocampus: A structural brain imaging analysis. *Hippocampus*, 2003, 13: 250—259
- 3 Draganski B, Gaser C, Busch V, et al. Neuroplasticity: Changes in grey matter induced by training. *Nature*, 2004, 427: 311—312
- 4 Gaser C, Schlaug G. Brain structures differ between musicians and non-musicians. *J Neurosci*, 2003, 23: 9240—9245
- 5 Sluming V, Barrick T, Howard M, et al. Voxel-based morphometry reveals increased gray matter density in Broca's area in male symphony orchestra musicians. *NeuroImage*, 2002, 17: 1613—1622
- 6 Schlaug G. The brain of musicians. A model for functional and structural adaptation. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2001, 930: 281—299
- 7 Magill R. *Motor Learning: Concepts and Application*. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2001
- 8 Nielsen JB, Cohen LG. The Olympic brain. Does corticospinal plasticity play a role in acquisition of skills required for high-performance sports? *The Journal of Physiology*, 2008, 586: 65—70
- 9 Ashburner J, Friston KJ. Voxel-based morphometry—the methods. *NeuroImage*, 2000, 11: 805—821
- 10 Good CD, Johnsrude I, Ashburner J, et al. Cerebral asymmetry and the effects of sex and handedness on brain structure: a voxel-based morphometric analysis of 465 normal adult human brains. *NeuroImage*, 2001, 14: 685—700
- 11 Good CD, Johnsrude IS, Ashburner J, et al. A voxel-based morphometric study of ageing in 465 normal adult human brains. *NeuroImage*, 2001, 14: 21—36
- 12 Floyer-Lea A, Matthews PM. Distinguishable brain activation networks for short—and long-term motor skill learning. *Journal of Neurophysiology*, 2005, 94: 512—518

- 13 Grafton ST, Hazeltine E, Ivry R. Functional mapping of sequence learning in normal humans. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1995, 7: 497-510
- 14 Rosenkranz K, Williamon A, Rothwell JC. Motorcortical excitability and synaptic plasticity is enhanced in professional musicians. *J Neurosci*, 2007, 27: 5200-5206
- 15 May A, Hajak G, Ganssbauer S, et al. Structural brain alterations following 5 days of intervention: Dynamic aspects of neuroplasticity. *Cereb Cortex*, 2007, 17: 205-210
- 16 Karni A, Meyer G, Jezzard P, et al. Functional MRI evidence for adult motor cortex plasticity during motor skill learning. *Nature*, 1995, 377: 155-158
- 17 Ungerleider LG, Doyon J, Karni A. Imaging brain plasticity during motor skill learning. *Neurobiology of Learning and Memory*, 2002, 78: 553-564
- 18 Tang CM. *Neuropsychology*. Beijing: People's Military Medicine Press, 2001
- 19 Padovani A, Borroni B, Brambati SM, et al. Diffusion tensor imaging and voxel based morphometry study in early progressive supranuclear palsy. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 2006, 77: 457-463
- 20 Thivard L, Pradat PF, Lehericy S, et al. Diffusion tensor imaging and voxel based morphometry study in amyotrophic lateral sclerosis: relationships with motor disability. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 2007, 78: 889-892
- 21 Moran A, Avendano C, Reinoso-Suarez F. Thalamic afferents to the motor cortex in the cat. A horseradish peroxidase study. *Neuroscience Letters*, 1982, 33: 229-233
- 22 Matelli M, Luppino G. Thalamic input to mesial and superior area 6 in the macaque monkey. *Journal of Comparative Neurology*, 1996, 372: 59-87
- 23 Navarro X, Vivo M, Valero-Cabre A. Neural plasticity after peripheral nerve injury and regeneration. *Progress in Neurobiology*, 2007, 82: 163-201
- 24 Sanes JN, Donoghue JP. Plasticity and primary motor cortex. *Annual Review of Neuroscience*, 2000, 23: 393-415
- 25 Doyon J, Gaudreau D, Laforce R, et al. Role of the striatum, cerebellum, and frontal lobes in the learning of a visuomotor sequence. *Brain and Cognition*, 1997, 34: 218-245