

# 个体智力差异的神经生物学基础

张琼, 施建农

(中国科学院心理研究所, 北京 100101)

**【摘要】** 本文从脑电生理、脑功能成像、神经生化、行为遗传与分子遗传等多个角度探讨了智力研究的新进展, 但各角度的研究均存在诸多争议和疑问, 留待人们继续探索。

**【关键词】** 智力; 脑电生理; 功能性脑成像; 神经生化; 遗传

中图分类号: R395.1 文献标识码: A 文章编号: 1005-3611(2006)04-0435-03

## The Physiological Basis of Intelligence Difference

ZHANG Qiong, SHI Jian-nong

Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**【Abstract】** In studying human intelligence, many new techniques like electroencephalography(EEG) mapping, functional MRI, neuro-biochemistry, molecular genetics and behavioral genetics focus on different levels of brain function correlated with intelligence. However, it is still a confusing issue. The review suggests that more endeavors are needed.

**【Key words】** Intelligence; Event-related potentials; fMRI, PET; Neurobiochemistry; Genetics

本文试对脑电生理、脑功能成像、神经生化、行为遗传与分子遗传等关于智力差异及智力生物学基础的探索进行总结, 以期为智力研究者提供参考。

## 1 脑电生理学研究

EEG与智力关系的研究主要集中在静息状态(睁眼、闭眼)和认知负荷状态下的个体智力差异情况, 静息状态下的研究结果不太一致, 而认知负荷条件下的研究结果比较一致: 脑电活动与智力呈负相关。Barry和Clarke指出, 在研究大脑活动与认知、行为的关系时, 智力是一个重要的干扰变量, 而关于这个领域的结果很不一致, 文中指出, 不同的测量方法是影响这些结果相互不一致的主要原因之一<sup>[1]</sup>。

诱发电位被认为是不受知识、经验影响的, 可以反映“纯粹的脑活动”, 这些活动代表着智力的“生物学基础”, 因此, 人们常常考察事件相关脑诱发电位与智力测验分数的相关。诱发电位成分与IQ关系的研究主要集中在N1-P2联合体(complex)和P3上。有大量研究关注100-250ms时窗内诱发电位成分与智力的个体差异的关系, 但不同的研究得到的结果并不一致。而关于P300潜伏期与认知能力之间关系的研究则比较一致, 相关系数大约在-0.35至-0.45之间<sup>[2]</sup>。其实, 智力本身就是一个“群”概念, 它包括各种能力(朱智贤, 心理学大辞典)。可以说, ERP家庭中的很多成分都从不同角度反映了智能的诸方面。例如, N1、N2、MMN、PN与主动注意及被动注意, P300与记忆、认知, N400与言语、语言, CNV与注意、期待、准备等有关<sup>[3]</sup>。在这一类研究中, 主要的假设是诱发电位能忠实反映神经功能的不同方面, 但任何一个信号从神经起源传导至头皮的过程中, 经过传导特性完全不同的各种部

位后, 衰减情况又很不相同, 因此用诱发电位来预测智力带有很强的推测性。

一些研究者主张用全脑激活模式来解决上述不同研究关于EEG诱发电位与智力关系结果的不一致性。比如, 用相干法(coherence)考察不同脑区电极之间耦合情况, 有两项研究<sup>[4,5]</sup>发现低相干与高智商存在相关, 也就是说, 高智商的人不同脑区的耦合较弱或者说脑区存在较强的功能分化, 这一结果符合神经效能假说的预测。神经效能假说(neural efficiency hypothesis)认为智力指的是大脑工作的效率。这种效率源于对相关脑区的调用, 且不滥用无关的脑区。智力水平高的个体在加工信息和解决问题时效率更高(也就是说, 心理负荷少)<sup>[6]</sup>。Thatcher等<sup>[7]</sup>则采用了大量的EEG指标, 考察它们与智商的相关, 这些指标包括: 头皮19个导联传统波段的绝对功率与相对功率、几个波段的比率(band ratios)、半球内与半球间波幅的对称性、各波段在所有导联的相干、相位延迟情况等。他们认为, EEG指标可以预测智力, 其中, 相位延迟和相干的预测效应最强。另外, 一些用事件相关去同步化(ERD)进行的研究<sup>[8]</sup>发现, 不同智力水平的个体在完成记忆任务或学习任务时动用的脑区不同, 各脑电波频谱去同步化现象差异明显。但这些结果之间也存在着不一致性, 仍有待于进一步重复验证。

## 2 脑成像技术的发现

由于智力的神经基础可能涉及了一些复杂认知过程的整合, 那么, 智力的神经解剖结构是广泛分布在全脑呢, 还是只限于一些区域? 脑功能成像术(包括PET, fMRI)由于具有较高的空间分辨率, 从另一角度提供了很多信息。

已有的一些结果发现高g因素的任务比低g因素任务对额叶的激活更强。用PET发现扣带前回的脑血流水平与完成有节奏的听觉系列累积任务(paced auditory serial addition task)有关<sup>[9]</sup>。Duncan等<sup>[10]</sup>发现在完成一些g因素负荷高的

**【基金项目】** 本研究得到国家自然科学基金(30370489); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KSCXZ-SW-221)和北京市重点实验室-首都师范大学“学习与认知实验室”资助  
通讯作者: 施建农

任务时,额叶的侧区被激活 (lateral areas of the frontal lobes)。Prabhakaran 等<sup>[11]</sup>用功能磁共振发现在完成瑞文推理测验时,与“执行功能或工作记忆的控制功能”有关的区域被激活。Boivin 等<sup>[12]</sup>考察了 33 名被试在“休息”下的情况,发现额叶活动和瑞文推理测验、韦氏成人智测分数之间存在负相关,这与之前一些采用高 g 因素负荷任务得出的结论是一致的。这些发现表明,即使未进行推理或解决一个特定的任务,个体之间存在的智力差异也可以在脑活动中体现出来。但这一研究由于使用 18F - fluorodeoxyglucose (FDG) 技术存在一些局限性,所以结果仍有待验证。Kroger 等<sup>[13]</sup>发现在对各种相关信息进行整合时,任务复杂性增加、干扰物增多都会增加顶叶和背侧前额叶的激活,高水平的相关复杂性 (relational complexity) 选择性激活左前额叶。

但也有一些研究报道称额叶以外的其他区域也与智力存在相关。Carpenter 等<sup>[14]</sup>发现高水平的认知活动涉及较多的神经环路,而不是仅限于额叶的一些部分。Haier 等<sup>[15]</sup>让被试看录像(即非高 g 因素负荷的任务)来考察个体 g 因素之间的差异,结果发现,个体智力之间的差异影响着左 BA37/19 区与其他脑区之间的相互作用。瑞文测验得分高者,左 BA37/19 区与左扣带回前、额中回 (medial frontal gyrus) 之间存在相关。Deary 等<sup>[16]</sup>用三种难度水平(呈现时间)的检测时任务来考察相关的大脑区域,发现与容易水平的任务相比,在完成困难水平任务时,激活较强的脑区有扣带回,额叶和顶叶的某些区域,而额区、颞区、顶叶相对来说激活较弱。这在其他功能性脑成像研究的结果部分一致,提示检测时任务所激活的脑区与智力存在密切的关系。也有一些研究者通过研究类比推理的脑成像来间接推断智力行为的神经基础。因为人们认为智力的认知基础是在有遥远联系的概念之间或信息之间建立流畅的或是有创造性的类比关系<sup>[17]</sup>。比如,Geake 和 Hansen<sup>[18]</sup>选用了字母串类比任务 (copycat 任务, Mitchell, 1993),进行了事件相关功能磁共振研究,发现在上、中、下额回以及扣带回/旁扣带回都有激活,而之前也有研究发现这些区域与包括诱导推理 (inductive syllogisms)、句法分级 (syntactic hierarchies)、言语创造性 (linguistic creativity) 在内的推理任务有关。而以言语智商作为协变量的分析,则发现 BA9 区和 BA45/46 区的激活与之有关。

### 3 神经化的发现

关于智力的神经生化基础,有一些间接的证据。研究者发现中枢胆碱能通路参与到检测时和智力测验任务的操作中,这些证据来源于对尼古丁<sup>[19]</sup>、烟碱类乙酰胆碱受体拮抗剂 - 盐酸-3-甲基氨基异樟脑烷 (一种降压药)<sup>[20]</sup> 等的研究。Stough 等<sup>[21]</sup>考察了关于检测时的神经生化(主要是胆碱能系统)基础,他们发现,脑中葡萄糖水平占优势对于较好地完成任务时任务非常重要。受控制的、中等水平的低血糖会降低信息加工速度(包括用心理测验、反应时任务、检测时任务和相关的视觉信息加工任务进行测试)<sup>[22]</sup>,而在同时,外周神经传导速度却完好无损<sup>[23]</sup>表明这种效应是中枢的。

体内生长激素 (GH) 分泌峰值减小、血浆胰岛素样生长因

子 (IGF-1) 浓度降低是标志年老的最强有力、最具特征性的内分泌变化指标。这种变化同时可以影响认知功能。缺乏 GH 的儿童,IGF-1 水平降低,认知功能出现显著缺陷。幼年时候有过 GH 缺乏的成人,与经过了一年的 GH 替代治疗后达到正常水平的对照组相比,记忆功能较低。IGF-1 水平低于 9.4nmol/l 的老年被试中,IGF-1 水平与认知水平低、认知功能显著下降有关。血清中 IGF-1 水平被认为与信息加工速度有关,而与记忆、流体智力和 MMSE 分数不相关。研究者们认为只有在 IGF-1 的浓度低于一定阈值时才会对信息加工速度产生负面影响。前瞻性的研究资料显示更可能是低 IGF-1 水平起到使认知功能减退的作用,而不是认知损害导致了低 IGF-1 水平。随着年龄的增长和由于神经变性疾病 (如 Alzheimer's disease) 而发生的认知缺陷可能与 IGF-1 缺乏有关<sup>[24]</sup>。

用磁共振波谱分析 (magnetic resonance spectroscopy, MRS), 可以研究脑结构生化底物及其在生物体内的功能。Jung 等<sup>[25]</sup>考察了成人被试体内 N-乙酰天门冬氨酸 (N-acetylaspartate, NAA) 是否与韦氏智商存在相关。在考察了三个区域(左额区、右额区、左顶枕区)的白质后,发现只有左顶枕区的白质可以预测智商,而且在女性中比在男性中有更强的预测性。

### 4 遗传学的发现

Neubauer 等<sup>[26]</sup>在一项德国双生子研究中,发现反应时与心理测验的智力分数差异的相关受遗传因素的影响。但 Luciano 等<sup>[27]</sup>发现,检测时任务之所以与智力存在相关,是因为它们之间存在第三个影响变量,即遗传因素。

Robert Plomin 及其率领的研究小组发现,人类第 6 条染色体的长臂上有一种 IGF2R 基因,在超常儿童 DNA 样本中再现的频率比对照组高<sup>[28]</sup>。英国曼彻斯特大学 Tony Payton 及其同事检测到 Cathepsin D (CTSD) 可能通过杀死不必要的神经元从而在早期大脑发育中发挥促进智力的作用<sup>[29]</sup>。David Comings 领导的研究小组从 828 名成人中检测出存在 CHRM2 基因杂合突变者智商比无突变者低,存在纯合突变者智商比杂合突变者低<sup>[30]</sup>。

近期关于遗传变异小鼠的研究有力地证实了 GH 和 IGF-1 信号通路的改变可以延缓衰老且延长寿命<sup>[31]</sup>。在其他的有机体中,例如果蝇、蛔虫和酵母,也发现同源信号通路也与决定寿命有关<sup>[32]</sup>。综合所有这些数据,可以推测,使循环血中的 GH/IGF-1 保持在较低水平可以延缓衰老,而同时增加特定脑区中的 GH/IGF-1 可能可以改善甚至防止发生衰老相关的认知功能缺陷。

### 5 其他研究结果

眼动研究中记录到在完成认知任务时,需要动用的加工资源和资源分配情况可以由瞳孔扩大的程度来反映。瞳孔扩大程度高者加工负荷大或心理努力大<sup>[33]</sup>,让大学生被试完成乘法任务,发现在瞳孔反应与认知能力之间存在负相关。学业性向测验 (Scholastic Aptitude Test, SAT) 中得分低的大学生

对乘法问题表现出更大的瞳孔直径。他们用神经效能理论来解释,认为,认知能力强者的加工效率高或心理努力少。Verney等<sup>[94]</sup>在一项研究中,发现瞳孔直径在完成的任务时变大,他们也认为这一指标可以反映认知资源分配的情况。Verney<sup>[95]</sup>发现分配给无关刺激更多资源者认知能力测验完成较差。

## 6 小结与展望

对智力的神经生物基础的研究取得了很大进展,但是由于智力本身概念的复杂,使得寻找其生物学基础的工作开展起来必然具有一定的难度。也使得以往对智力的研究存在许多问题。

首先,不同研究者所用的实验设计存在差异,例如,一些实验采用被试内设计,还有一些研究则采用被试间设计,重点在于比较差异。因此,不同研究的结果之间难以比较。

其次,实验控制不够严格,可能存在自变量的混淆。多数研究未将智力与创造力分离开来。并且,由于智力本身是个复杂的“群”概念,各种智力成分与实验任务之间的关系不同,也就是说,实验结果对任务的依赖较大,研究者很有必要将智力的各种成分进行分离之后再进一步研究。

研究者们选用的工具和被试人群的差异也比较大。例如,多数研究者在筛选不同智力水平的被试时,选用智力测验大多不同。研究被试的年龄、数量、性别比例在各研究中都有很大的差异,很难从这些实验结果中得出较为普遍的结论。

我们认为,关于智力的生理研究,如果能证明某种公认的生理指标具有个体智力差异的提示意义,或者验证已有的范式或开发一些新的实验范式来探讨对智力个体差异的提示意义将会有很重要的贡献,也就是说,如果我们能够发现比“智力测验”更客观、可靠的指标,这在教育学、心理学中将具有十分重要的意义。

### 参 考 文 献

- 1 Barry RJ, Clarke AR. Electrophysiology and intelligence. *Clinical Neurophysiology*, 2005, 116: 1999- 2000
- 2 Bazana G, Stelmack RM. Intelligence and event-related potentials in a backward-masked auditory discrimination task: Analysis of speed and stages of information processing. Unpublished Dissertation, University of Ottawa, 2001
- 3 张明岛,陈兴时,著. 脑诱发电位学. 上海:上海科技教育出版社,1995
- 4 Gasser T, Jennen-Steinmetz C, Verleger R. EEG coherence at rest and during a visual task in two groups of children. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1987, 67: 151- 158
- 5 Thatcher RW, McAlaster R, Lester ML, et al. Hemispheric EEG asymmetries related to cognitive functioning in children. In E. Poreman. *Cognitive processing in the right hemisphere*. New York: Academic Press, 125- 126
- 6 Haier RJ, Siegel BV, Nuechterle K H, et al. Cortical glucose metabolic rate correlates of abstract reasoning and attention studied with positron emission tomography. *Intelligence*,

- 1988, 12:199- 217
- 7 Thatcher RW, North D, Biver C. EEG and intelligence: relations between EEG coherence, EEG phase delay and power. *Clinical Neurophysiology*, 2005, 116:2129- 2141
- 8 Jausovec N, Jausovec K. Intelligence related differences in induced brain activity during the performance of memory tasks. *Personality and Individual Differences*, 2004, 36: 597- 612
- 9 Deary IJ, Ebmeier KP, MacLeod KM, et al. PASAT performance and the pattern of uptake of 99mTc- exametazime in brain estimated with single photon emission tomography. *Biological Psychology*, 1994, 38:1- 18
- 10 Duncan J, Seitz J, Kolodny J, et al. A neural basis for general intelligence. *Science*, 2000, 289: 457- 460
- 11 Prabhakaran V, Smith JAL, Desmond JE, et al. Neural substrates of fluid reasoning: an fMRI study of neurocortical activation during performance of the Raven's Progressive Matrices Test. *Cognitive Psychology*, 1997, 33: 43- 63
- 12 Boivin MJ, Giordani GB, Berent S, et al. Verbal fluency and positron emission tomographic mapping of regional cerebral glucose metabolism. *Cortex*, 1992, 28:231- 239
- 13 Kroger JK, Sabb FW, Fales CL, et al. Recruitment of anterior dorsolateral prefrontal cortex in human reasoning: A parametric study of relational complexity. *Cerebral Cortex*, 2002, 12: 477- 485
- 14 Carpenter PA, Just MA, Reichle ED. Working memory and executive function: evidence from neuroimaging. *Current Opinion in Neurobiology*, 2001, 10:195- 199
- 15 Haier RJ, White NS, Alkire MT. Individual differences in general intelligence correlate with brain function during nonreasoning tasks. *Intelligence*, 2003, 31: 429- 441
- 16 Deary IJ, Simonotto E, Marshall A, et al. The functional anatomy of inspection time: a pilot fMRI study. *Intelligence*, 2001, 29:497- 510
- 17 Hofstadter DR. *Fluid concepts and creative analogies*. Basic Books, New York, 1996
- 18 Geake JG, Hansen PC. Neural correlates of intelligence as revealed by fMRI of fluid analogies. *Neuroimage*, 2005, 26: 555- 564
- 19 Stough C, Mangan G, Bates T, et al. Effects of nicotine on perceptual speed. *Psychopharmacology*, 1995, 119:305- 310
- 20 Thompson JC, Stough C, Ames D, et al. Effects of the nicotinic antagonist mecamylamine on inspection time. *Psychopharmacology*, 2000, 150: 117- 119
- 21 Stough C, Thompson JC, Bates TC, et al. Examining neurochemical determinants of inspection time: development of a biological model. *Intelligence*, 2001, 29:511- 523
- 22 Ewing FME, Deary IJ, McCrimmon RJ, et al. Effect of acute hypoglycemia on visual information processing in adults with Type 1 diabetes mellitus. *Physiology and Behavior*, 1998, 64:653- 660

(下转第 440 页)

- NeuroImage, 2000, 11:157- 166
- 11 Saver JL, Damasio AR. Preserved access and processing of social knowledge in a patient with acquired sociopathy due to ventromedial frontal damage. *Neuropsychologia*, 1991, 29 (12):1241- 1249
  - 12 Kaczmarek B. Neurolinguistic analysis of verbal utterances in patients with focal lesions of frontal lobes. *Brain and Language*, 1984, 21 (1 ):52- 58
  - 13 Stone VE, Baron-Cohen S, Knight RT, et al. Frontal lobe contributions to theory of mind. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1998, 10(5): 640- 656
  - 14 Baron-Cohen S, Ring H, Moriarty J, et al. Recognition of mental state terms: Clinical findings in children with autism and a functional neuroimaging study of normal adults. *British Journal of Psychiatry*, 1994, 165(5): 640- 649
  - 15 Gallagher HL, Frith CD. Functional imaging of 'theory of mind'. *Trends in Cognitive Sciences*, 2003, 7(2):77- 83
  - 16 Allison T, Puce A, McCarthy G. Social perception from visual cues: role of the STS region. *Trends in Cognitive Sciences*, 2000, 4(7): 267- 278
  - 17 Wicker B, Michel F, Henaff MA, et al. Brain regions involved in the perception of gaze: a PET study. *Neuroimage*, 1998, 8(2):221- 227
  - 18 Calder AJ, Andrew D, Keane J, et al. Reading the mind from eye gaze. *Neuropsychologia*, 2002, 40(8) :1129- 1138
  - 19 Hoffman EA, Haxby JV. Distinct representations of eye gaze and identity in the distributed human neural system for face perception. *Nature Neuroscience*, 2000, 3:80- 84
  - 20 Fine C, Lumsden J, Blair R. Dissociation between 'theory of mind' and executive functions in a patient with early left amygdala damage. *Brain*, 2001, 124(2):287- 298
  - 21 Stone VE, Baron-Cohen S, Calder A, et al. Acquired theory of mind impairments in individuals with bilateral amygdala lesions. *Neuropsychologia*, 2003, 41(2):209- 220
  - 22 Baron-Cohen S, Ring HA, Wheelwright S, et al. Social intelligence in the normal and autistic brain: An fMRI study. *European Journal of Neuroscience*, 1999, 11:1891- 1898
  - 23 Vogeley K, Bussfeld P, Newen A, et al. Mind reading: Neural mechanism of theory of mind and self- perspective. *Neuroimage*, 2001, 14:170- 181
  - 24 Gallagher HL, Jack AI, Roepstorff A, et al. Imaging the Intentional Stance in a Competitive Game. *Neuroimage*, 2002, 16: 814- 821
  - 25 Samson D, Apperly IA, Chiavarino C, et al. Left temporo-parietal junction is necessary for representing someone else's belief. *Nature Neuroscience*, 2004, 7: 499- 500
  - 26 Saxe R, Kanwisher N. People thinking about thinking people: The role of the temporo- parietal junction in "theory of mind". *Neuroimage*, 2003, 19: 1835- 1842

(收稿日期:2006- 01- 17)

(上接第 437 页)

- 23 Strachan MWJ, Deary IJ, Ewing FME, et al. Acute hypoglycaemia impairs functions of the central but not the peripheral nervous system. *Physiology & Behavior*, 2001, 72: 83- 92
- 24 Lackey BR, Gay SL, Henricks DM. Actions and interactions of the IGF system in Alzheimer's disease: Review and hypotheses. *Growth Hormone IGF Research*, 2000, 10:1- 13
- 25 Jung RE, Haier RJ, Yeo RA, et al. Sex differences in N-acetylaspartate correlates of general intelligence: An 1H-MRS study of normal human brain. *Neuroimage*, 2005, 26: 965- 972
- 26 Neubauer AC, Spinath FM, Riemann R, et al. Genetic and Environmental Influences on Two Measures of Speed of Information Processing and their Relation to Psychometric Intelligence: Evidence from the German Observational Study of Adult Twins. *Intelligence*, 2000, 28:267- 289
- 27 Luciano M, Posthuma D, Wright MJ, et al. Perceptual speed does not cause intelligence, and intelligence does not cause perceptual speed. *Biological Psychology*, 2005, 70:1- 8
- 28 Plomin R, Crabbe JC. DNA. *Psychological Bulletin*, 2000, 126: 806- 828
- 29 Payton A, Holland F, Diggle P, et al. Cathepsin D exon 2 polymorphism associated with general intelligence in a healthy older population. *Molecular Psychiatry*, 2003, 8:1- 5
- 30 Comings DE, Wu S, Rostamkhani M, et al. Role of the cholinergic muscarinic 2 receptor (CHRM2) gene in cognition. *Molecular Psychiatry*, 2003, 8: 10- 11
- 31 Holzenberger M, Dupont J, Ducos B, et al. IGF- 1 receptor regulates lifespan and resistance to oxidative stress in mice. *Nature*, 2003, 421:182- 187
- 32 Tatar M, Bartke A, Antebi A. The endocrine regulation of aging by insulin-like signals. *Science*, 2003, 299:1346- 1351
- 33 Beatty J. Task- evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources. *Psychological Bulletin*, 1982, 91:276- 292
- 34 Verney SP, Granholm E, Dionisio DP. Pupillary response indexes cognitive processing in the visual backward masking task. *Psychophysiology*, 2001, 38:76- 83
- 35 Verney SP, Granholm E, Marshall SP. Pupillary responses on the visual backward masking task reflect general cognitive ability. *International Journal of Psychophysiology*, 2004, 52: 23- 36

(收稿日期:2006- 01- 22)