

The Pathophysiological Significance of the Gamma Frequency Band Neural Oscillation

Yongxia Zhou¹, Lijun Hou², Hongbo Jiang^{1,2*}

¹Xinxiang Medical University, Xinxiang

²The Third Affiliated Hospital of Xinxiang Medical University, Xinxiang

Email: *13462256118@126.com

Received: Oct. 3rd, 2013; revised: Oct. 25th, 2013; accepted: Nov. 1st, 2013

Copyright © 2013 Yongxia Zhou et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Gamma oscillation in the hippocampus ranges from 30 to 100 Hz. Inhibitory interneuron network is considered as the main generator which generates the gamma oscillation. Existing studies have shown that gamma oscillation has a complex physiology and is associated with a variety of mental disease processes. More detailed records about the mechanism of production, the physiological and pathophysiological significance of gamma band oscillation and so on are elaborated in this paper.

Keywords: Gamma Band Oscillation; Hippocampus; Inhibitory Interneuron Network; Mental Disease

Gamma 神经振荡的病理生理意义

周永霞¹, 侯丽君², 姜洪波^{1,2*}

¹新乡医学院, 新乡

²新乡医学院第三附属医院, 新乡

Email: *13462256118@126.com

收稿日期: 2013年10月3日; 修回日期: 2013年10月25日; 录用日期: 2013年11月1日

摘要: 海马的 Gamma 神经振荡是频率范围在 30~100 Hz 内的一种脑内神经元同步化活动, 抑制性中间神经元组成的神经网络是产生此高频节律性活动的主要发生器。已有研究表明, Gamma 神经振荡不仅有着复杂的生理机能, 而且与多种精神疾病过程有关。本文较为详细地阐述了脑电 Gamma 振荡产生的机制、生理和病理生理意义等。

关键词: Gamma 振荡, 海马, 抑制性中间神经网络, 精神疾病

1. 引言

生物系统常会表现出不同水平的振荡, 神经系统也同样会由于同步化活动而表现出多频谱的振荡。这些同步化活动是众多正常生理活动以及病理生理学功能的最重要的基础, 所以对神经振荡的研究在解释神经网络功能上至关重要, 其中 gamma 神经振荡现

在越来越得到脑科学家的重视, 尤其是发现了其在认知领域的重要研究价值。

2. Gamma 神经振荡

局部场电位的 gamma 神经振荡是大量脑内网络神经元的集体同步化运动, 在认知和注意力方面起着重要作用^[1]。它通常出现在动物快速动眼睡眠(rapid-eye-movement sleep)时或者清醒探索状态(active ex-

*通讯作者。

ploration)。目前研究表明：知觉、注意、学习和记忆的产生以及运动程序的整合等这些高级神经网络活动都有海马 gamma 神经振荡的参与。Jefferys 等^[2]认为 gamma 波与神经活动有同步关系，并研究了感觉信号的处理在大脑皮层中的定位和区域。大量研究发现 gamma 神经振荡节律不仅与刺激信号有锁相关系，而且 40Hz 左右的 gamma 神经振荡成分与认知电位 P300 也有锁相关系。这方面的研究已有大量实验验证^[3-8]。皮层的 gamma 同步化活动和认知处理以及感觉刺激的时间绑定有关^[9-11]，与注意力的唤起^[12-13]、感知处理^[14-15]以及运动控制^[16-17]等大脑活动紧密相关。除此之外，还有越来越多的证据表明改变的或者异常的 gamma 振荡可能和精神分裂症等某些精神疾病有关，此类疾病主要表现为认知和行为的异常^[18-20]。同时在对自闭症^[21]和老年痴呆症^[22-23]的临床研究中发现，在 gamma 频段内的同步振荡活动明显下降。

3. Gamma 神经振荡产生机制

Gamma 振荡是网络神经元产生的同步性节律活动，在离体海马脑片中，gamma 振荡可以通过多种代谢型和离子型的受体激动剂被诱导出来，包括代谢型谷氨酸受体，毒蕈碱乙酰胆碱受体和红藻氨酸受体。Gamma 振荡也可以被钾离子溶液诱导出来。然而，通过这些不同方式诱导出来的 gamma 振荡对兴奋性和抑制性的依赖程度有所差别。在海马 CA1 区中代谢型谷氨酸受体诱导的和 CA3 区中红藻氨酸和卡巴胆碱诱导的 gamma 振荡可以完全由 GABA_A 受体拮抗剂荷包牡丹碱所抑制，同时，钾溶液诱导的 gamma 振荡也能被 GABA_A 受体拮抗剂完全抑制。这暗示了 gamma 振荡主导地依赖于 GABA_A 受体介导的抑制性，说明了相互连接的抑制性中间神经网络，是 gamma 振荡的主要发生器。在 gamma 振荡的产生中，胞体抑制性的中间神经元发挥了关键的作用，这些中间神经元必须具有快速发放动作电位和表达小清蛋白的特性。此外在体情况下，gamma 神经振荡的产生还需要中间神经元与锥体细胞之间的兴奋性突触活动。当 AMPA 受体和 NMDA 受体被阻滞，由 40Hz 刺激快速放电的中间神经元所产生的 gamma 神经振荡功率谱显著性地降低^[24]，这表明锥体细胞与中间神经元之间的兴奋性突触活动具有调节 gamma 节律的作用，而且还起到了将局部的同步化扩散到全局的同

步的作用^[25]，总的来说，外界刺激导致锥体细胞的兴奋，释放 AMPA 等兴奋性神经递质，然后在这些递质的作用下，使得一种能够快速放电，且有小白蛋白表达的篮状细胞即 GABA 能神经元兴奋，这种快速放电的篮状细胞通过缝隙连接和快速、高振幅 GABA 突触形成一个能够产生 gamma 神经振荡的中间神经网络，并使锥体细胞也受到 gamma 节律的调节，形成下一轮的 gamma 神经振荡^[25]。另外，gamma 振荡还能在齿状回、内嗅皮层和躯体感觉皮层中被诱导出来，但是潜在的机制尚不明确。

4. Gamma 神经振荡生理意义

Gamma 神经振荡已被提出来作为众多功能的参照信号，gamma 神经振荡同步与几个认知过程相关联，如时间编码、感觉绑定与感知、储存和提取信息等^[26]。更重要的是，gamma 神经振荡也参与了对记忆和学习^[27]功能的调节。由于 gamma 神经振荡的频率范围较大，多种不同类型的 gamma 频率被涵盖其中，学者们根据其生理功能的调节作用不同，通常将 gamma 神经振荡分成低频 gamma (Low Gamma, LG) 和高频 gamma (High Gamma, HG) 神经振荡。LG 通常与记忆的恢复和提取密切相关^[28]，它可以在海马网络中跨区域地协调，使得记忆被激活^[29]；而 HG 则参与了记忆的编码^[26]。Gamma 神经振荡的上述功能与 gamma 神经振荡基本的生理作用是密切相关的。值得一提的是，gamma 振荡和 theta 振荡之间的关联在现实记忆形成中起着重要的作用，因为它们能将突触可塑性以及神经网络的同步化有机地整合在一起。Hentschke 等(2007)将这种关系定义为“嵌套(nesting)”^[30]。他们同时还证明在海马 CA1 区域毒蕈碱受体可以部分地支配将 gamma 神经振荡锁定在 theta 周相。Gruber 等(2008)把在识别记忆中这两种振荡的特异性功能分别描述成“熟悉(familiarity)”和“回忆(recollection)”，其中 gamma 振荡主要与早期的熟悉性的检索活动有关，而 theta 振荡则与后期的回想、追溯等回忆性活动密不可分^[31]。

5. Gamma 神经振荡与相关病理的研究

5.1. 精神分裂症

精神分裂症是一种主要表现为基本个性、思维、

情感、行为的分裂，精神活动与环境的不协调等精神异常的功能性精神病。有关精神分裂症的认知模式，目前认为它的病理生理学核心是感知信息的输入和储存信息之间的整合障碍。基于不同脑功能网络之间的联系可能是通过共振实现的，因此可推测精神分裂症患者在整合认知信息时不同脑区间出现了各种结合失误。研究表明大量神经元的同步化节律活动对健康的认知功能是必不可少，特别是快速放电的小白蛋白阳性中间神经神经元，其在精神分裂症中表现出异常。Clementz(1997)最早报道关于精神分裂症异常的脑电活动，并将这一异常的脑电活动与患者的 P50 异常联系起来^[32]。许多研究已经报道精神分裂症中异常的神经振荡，尤其是在伽马频段。伽马振荡的缺损和受损的神经元的沟通会在各种基本和高级认知功能，包括感官知觉、注意力、记忆等产生错误的过程，所有这些都导致积极的和消极的精神分裂症的症状^[33]。目前虽然大多数研究报道精神分裂症患者的整体脑电 Gamma 活动减弱，但是进一步的研究却提示了 Gamma 活动的异常形式与患者精神症状之间密切相关。Baldeweg(1998)报道：有明显躯体性幻觉的患者其 Gamma 活动表现为高功率而非低功率^[34]。

5.2. 癫痫

癫痫(epilepsy)即俗称的“羊角风”或“羊癫风”，是一种常见的神经系统疾病，以在病程中反复发作的神经元异常放电所致的暂时性中枢神经系统功能失常为特征。据中国最新流行病学资料显示，国内癫痫的总体患病率为 7.0%，年发病率为 28.8/10 万，1 年内有发作的活动性癫痫患病率为 4.6%。据此估计中国约有 900 万左右的癫痫患者，其中 500~600 万是活动性癫痫患者，同时每年新增加癫痫患者约 40 万，在中国癫痫已经成为神经科仅次于头痛的第二大常见病。目前不少学者认为 Gamma 活动与癫痫的前兆或发作诱导有关。Le Van(1997)记录一位有发作性视幻觉和语言紊乱症状的癫痫患者的 ECG，同时记录到癫痫放电和 Gamma 功率增强^[35]。目前已有实验表明：离体脑片(n = 40)上强直电刺激海马 Schaeffer 侧枝，32.5%神经元全细胞记录呈现 3~100 Hz 膜电位振荡，这种电振荡能促进细胞外场电位癫痫活动形式的转化。急性癫痫模型上(n = 10, in vivo)，反复强直电刺

激海马或中部颞叶新皮质可诱发海马区 4~7 Hz 和中部颞叶新皮质 20 Hz(n = 11)深部电图电振荡。慢性强直电刺激大鼠背侧海马(n = 12)或中部颞叶新皮质(n = 11)，7~8 d 后出现这些脑区和 EEG 电振荡活动的频率及幅度的增加。巨大 EEG 节律性电振荡活动成为电图和癫痫行为性发作的先兆。说过度激活海马一内嗅皮质一颞叶新皮质产生的同步化电振荡可能是颞叶癫痫发生的重要原因之一^[36]。

5.3. 抑郁症

抑郁症(depression)是由各种原因引起的以抑郁为主要症状的一组情感性障碍(affective disorders)或心境障碍(mood disorders)，是一类以抑郁心境的自我体验为中心的临床症状群或状态。在临床上，抑郁症的主要表现是以情感低落、思维迟缓和精神运动性抑制这三大症状。一些抑郁症患者还会伴有焦虑症状，严重时还会出现自杀的观念及行为。目前，抑郁症已经成为精神类疾病中自杀率最高的疾病之一。许多国内外的研究表明，抑郁症能够导致患者的认知功能损伤及记忆功能障碍^[37]。其中，抑郁症对认知功能的损伤不容忽视，包括其对长时程记忆、工作记忆和其他认知功能的抑制作用。抑郁症患者还会出现注意障碍的表现，如注意力不集中，或不能持久地集中注意等缺陷。另外，在临床上，执行功能可能是表征抑郁症严重程度的指标之一，并且研究表明与正常被试组相比，抑郁症患者 Gamma 波活动呈现出不同的半球优势，即处理正性情绪信息的资源由大脑右半球控制，处理负性情绪信息由左半球来完成，并且抑郁症患者在处理负性情绪信息时表现出偏向性^[38]。研究表明，抑郁症状态下海马 CA1-mPFC 之间 theta 节律的相位耦合受到抑制，与 DA 的 D1 受体参与的调节相关；而 gamma 节律的相位耦合在抑郁大鼠中增强了，这与 5-HT1A 受体的激活相关。并且，海马 CA1 区 theta-HG 受慢性应激的抑制作用，受到了 5-HT1A 受体的调节^[39]。

5.4. 老年痴呆症

老年痴呆症是一种中枢神经系统变性病，起病隐袭，病程呈慢性进行性，主要表现为渐进性记忆障碍、认知功能障碍、人格改变及语言障碍等神经精神症

状,严重影响社交、职业与生活功能。近几十年来,随着老龄化的不断进展,该疾病已越来越明显地影响了人类的健康与生活。Stam(2002)研究一组 MMSE 均分为 21.3 的老年痴呆症患者的 MEG,发现患者的快 alpha 频段、快 beta 频段和 Gamma 频段的共振减弱且以枕区以及颞区最明显^[40]。Koenig(2005)报道老年痴呆症患者和有轻微认知功能损害患者安静状态下的 alpha、beta 和 Gamma 全域共振减弱, delta 共振增强,支持有关这些患者大脑皮层功能区相互联络障碍的假设^[41]。

5.5. 孤独症

孤独症也称自闭症,又称孤独性障碍(autistic disorder)等,是广泛性发育障碍(pervasive developmental disorder, PDD)的代表性疾病。主要特征是漠视情感、拒绝交流、语言发育迟滞、行为重复刻板以及活动兴趣范围的显著局限性,一般在 3 岁以前就会表现出来。自闭症者“有视力却不愿和你对视,有语言却很难和你交流,有听力却总是充耳不闻,有行为却总与你的愿望相违……”人们无从解释,只好把他们叫作“星星的孩子”——犹如天上的星星,一人一个世界,独自闪烁。实验研究结果表明,特殊视觉刺激下,孤独症患者脑电信号中 Gamma 频率振荡同步的确存在异常;同时在怪球范式下的视觉实验也表明,孤独症患者的事件相关电位主要成分与正常对照组相比也存在差异^[42]。这些发现,进一步肯定了“神经细胞基本功能柱”这一模型的理论价值,同时也初步论证多重经颅磁刺激治疗的可行性。

6. Gamma 神经振荡的研究前景

尽管人们对 gamma 神经振荡理解以及 gamma 神经振荡与生物体学习和记忆之间的奥秘已经逐渐揭开,但是还有很多问题有待解决,例如其与全脑网络化活动之间的关系以及对高级认知性功能的决定性作用仍有待深入地研究。除了利用生理学实验的手段,计算机模拟的方法也将会越来越重要,其在研究单个神经元与整个网络系统之间的关系,以及离子通道和不同受体特性方面有非常独到的优势,能够加深人们对这种较为抽象的神经网络活动的感性认识,同时对生理学实验有着重要的补充甚至预测作用。此

外,动物行为学和分子生物学等生物学技术也将以电生理技术作为主导研究手段的同时在不同水平对研究结果进行重要补充。

近年来,针对于神经电生理信号的分析研究,从微观的单神经元自发放电的记录到宏观的人类脑电图(EEG)和脑磁图(MEG)的记录,都证明了信号间的相位同步在感觉、认知和学习记忆过程中起到的关键作用。

作为脑内重要的同步化活动之一, gamma 神经振荡的时间协调并不只是与健康大脑相关,还与众多神经和精神疾病的病理过程相关。虽然这些疾病中的多种症状并未归类到电生理方向,但近年来的研究证实了几乎所有的神经和精神疾病都存在一个大脑内的机制,而这些均与电生理过程相关。通过对海马 gamma 神经振荡研究的不断深入,无疑将为指导临床诊断神经精神疾病提供了新的思路 and 方向。

参考文献 (References)

- [1] Kotani, K., et al. (2014) Population dynamics of the modified theta model: Macroscopic phase reduction and bifurcation analysis link microscopic neuronal interactions to macroscopic gamma oscillation. *Journal of the Royal Society Interface*, 95, Article ID: 20140058.
- [2] Jefferys, J.G.R. and Traub, R.D. and Whittington, M.A. (1996) Neuronal networks for induced 40 Hz rhythms. *Trends in Neurosciences*, 19, 202-208.
- [3] Gurtubay, I.G., Alegre, M., Labarga, A., et al. (2001) Gamma band activity in an auditory oddball paradigm studied with the wavelet transform. *Clinical Neurophysiology*, 112, 1219-1228.
- [4] Senkowski, D. and Herrmann, C.S. (2002) Effects of task difficulty on evoked gamma activity and ERPs in a visual discrimination task. *Clinical Neurophysiology*, 113, 1742-1753.
- [5] Slobounov, S., Tutwiler, R., Slobounova, E., et al. (2000) Human oscillatory brain activity within gamma band 30-50 Hz induced by visual recognition of non-stable postures. *Cognitive Brain Research*, 9, 177.
- [6] Gruber, T., et al. (2001) Modulation of induced gamma band responses and phase synchrony in a paired associate learning task in the human EEG. *Neuroscience Letters*, 316, 29-32.
- [7] Gruber, T., et al. (1999) Selective visual-spatial attention alters induced gamma band responses in the human EEG. *Clinical Neurophysiology*, 110, 2074-2085.
- [8] Gruber, T., et al. (2002) Effects of picture repetition on induced gamma band responses, evoked potentials, and phase synchrony in the human EEG. *Cognitive Brain Research*, 13, 377.
- [9] Kaiser, J., Rahm, B. and Lutzenberger, W. (2009) Temporal dynamics of stimulus-specific gamma-band activity components during auditory short-term memory. *Neuroimage*, 44, 257-264.
- [10] Tallon-Baudry, C. (2009) The roles of gamma-band oscillatory synchrony in human visual cognition. *Frontiers in Bioscience*, 14, 321-332.
- [11] Sederberg, P.B., Schulze-Bonhage, A., Madsen, J.R., et al. (2007) Hippocampal and neocortical gamma oscillations predict memory formation in humans. *Cerebral Cortex*, 17, 1190-1196.
- [12] Lakatos, P., Karmos, G., Mehta, A.D., et al. (2008) Entrainment

- of neuronal oscillations as a mechanism of attentional selection. *Science*, **320**, 110-113.
- [13] Lee, K.H., Williams, L.M., Haig, A., et al. (2001) An integration of 40 Hz Gamma and phasic arousal: Novelty and routinization processing in schizophrenia. *Clinical Neurophysiology*, **112**, 1499-1507.
- [14] Correa, A. and Nobre, A.C. (2008) Spatial and temporal acuity of visual perception can be enhanced selectively by attentional set. *Experimental Brain Research*, **189**, 334-339.
- [15] Schroeder, C.E. and Lakatos, P. (2009) Low-frequency neuronal oscillations as instruments of sensory selection. *Trends in Neurosciences*, **32**, 9-18.
- [16] Legros, A., Corbacio, M., Beuter, A., Modolo, J., Goulet, D., Prato, F.S. and Thomas, A.W. (2012) Neurophysiological and behavioral effects of a 60 Hz, 1,800 μ T magnetic field in humans. *European Journal of Applied Physiology*, **112**, 1751-1762.
- [17] Cheyne, D., Bells, S., Ferrari, P., Gaetz, W. and Bostan, A.C. (2008) Self-paced movements induce high-frequency gamma oscillations in primary motor cortex. *NeuroImage*, **42**, 332-342.
- [18] Uhlhaas, P.J., Linden, D.E.J., Singer, W., Haenschell, C., Lindner, M., Maurer, K. and Rodriguez, E. (2006) Dysfunctional long-range coordination of neural activity during Gestalt perception in schizophrenia. *The Journal of Neuroscience*, **26**, 8168-8175.
- [19] Uhlhaas, P.J. and Singer, W. (2010) Abnormal neural oscillations and synchrony in schizophrenia. *Nature Reviews Neuroscience*, **11**, 100-113.
- [20] Haenschel, C., Bittner, R., Waltz, J., Haertling, F., Wibrall, M., Singer, W., Linden, D.E.J. and Rodriguez, E. (2009) Cortical oscillatory activity is critical for working memory as revealed by deficits in early-onset schizophrenia. *The Journal of Neuroscience*, **29**, 9481-9489.
- [21] Wilson, T.W., Rojas, D.C., Reite, M.L., Teale, P.D. and Rogers, S.J. (2007) Children and adolescents with autism exhibit reduced MEG steady-state gamma responses. *Biological Psychiatry*, **62**, 192-197.
- [22] Koenig, T., Prichep, L., Dierks, T., et al. (2005) Decreased EEG synchronization in Alzheimer's disease and mild cognitive impairment. *Neurobiology of Aging*, **26**, 165-171.
- [23] Stam, C.J., Jones, B.F., Nolte, G., Breakspear, M. and Scheltens, Ph. (2007) Small-world networks and functional connectivity in Alzheimer's disease. *Cerebral Cortex*, **17**, 92-99.
- [24] Cardin, J.A., Carlen, M., Meletis, K., Knoblich, U., Zhang, F., Deisseroth, K., Tsai, L.H. and Moore, C.I. (2009) Driving fast-spiking cells induces gamma rhythm and controls sensory responses. *Nature*, **459**, 663-667.
- [25] Bartos, M., Vida, I. and Jonas, P. (2007) Synaptic mechanisms of synchronized gamma oscillations in inhibitory interneuron networks. *Nature Reviews Neuroscience*, **8**, 45-56.
- [26] Colgin, L.L. and Moser, E.L. (2010) Gamma oscillations in the hippocampus. *Physiology (Bethesda)*, **25**, 319-329.
- [27] Tallon-Baudry, C., Bertrand, O., Peronnet, F. and Pernier, J. (1998) Induced gamma-band activity during the delay of a visual short-term memory task in humans. *Journal of Neuroscience*, **18**, 4244-4254.
- [28] Colgin, L.L. (2012) Slow gamma takes the reins in replay. *Neuron*, **75**, 549-550.
- [29] Carr, M.R., Karlsson, M.P. and Frank, L.M. (2012) Transient slow gamma synchrony underlies hippocampal memory replay. *Neuron*, **75**, 700-713.
- [30] Hentschke, H., Perkins, M.G., Pearce, R.A. and Banks, M.I. (2007) Muscarinic blockade weakens interaction of gamma with theta rhythms in mouse hippocampus. *European Journal of Neuroscience*, **26**, 1642-1656.
- [31] 王奎, 许琳, 严明, 吴杰 (2008) 海马 θ 振荡的研究进展. *生理科学进展*, **4**, 331-334.
- [32] Bork, J.A., Rogers, T., Wedlund, P.J. and de Leon, J. (2000) A pilot study on risperidone metabolism: The role of cytochromes P450 2D6 and 3A. *Journal of Clinical Psychiatry*, **60**, 469-476.
- [33] Shin, Y.W., O'Donnell, B.F., Youn, S. and Kwon, J.S. (2011) Gamma oscillation in schizophrenia. *Psychiatry Investigation*, **8**, 288-296.
- [34] Yasui-Furukori, N., Kondo, T., Mihara, K., Suzuki, A., Inoue, Y., De Vries, R. and Kaneko, S. (2002) Lack of correlation between the steady-state plasma concentrations of haloperidol and risperidone. *Journal of clinical pharmacology*, **42**, 1083-1088.
- [35] Le Van, Q.M., Aadam, C., Llachaux, J.P., et al. (1997) Temporal patterns in human epileptic activity are modulated by perceptual discriminations. *Neuroreport*, **8**, 1703-1710.
- [36] 韩丹 (2000) 强直电刺激大鼠海马、中部颞叶新皮质诱发癫痫模型中电振荡癫痫发生的关系研究. *中国神经科学杂志*, **2**, 108-114.
- [37] Castaneda, A.E., Tuulio-Henriksson, A., Marttunen, M., Suvisaari, J. and Lönnqvist, J. (2008) A review on cognitive impairments in depressive and anxiety disorders with a focus on young adults. *Journal of Affective Disorders*, **106**, 1-27.
- [38] 王守镜 (2013) 情绪图片在抑郁症病人与正常人中诱发的 Gamma 波活动研究. 电子科技大学, 成都.
- [39] 郑晨光 (2013) 大鼠 theta 和 gamma 神经振荡参与调节突触可塑性及潜在机制探究. 南开大学, 天津.
- [40] Stam, C.J., van Cappellen Walsum, A.M., Pijnenburg, Y.A., et al. (2002) Generalized synchronization of MEG recordings in Alzheimer's disease: Evidence for involvement of the gamma band. *Journal of Clinical Neurophysiology*, **19**, 562-574.
- [41] Koenig, T., Prichep, L., Dierks, T., Hubl, D., Wahlund, L.O., John, E.R. and Jelic, V. (2005) Decreased EEG synchronization in Alzheimer's disease and mild cognitive impairment. *Neurobiology of Aging*, **26**, 165-171.
- [42] 王瑶 (2012) 孤独症的神经振荡同步分析. 燕山大学, 北京.