

6~12岁儿童额叶自发脑电频谱相干的特点

张琼¹ 施建农² 沈模卫¹

(1 浙江大学心理与行为科学系, 杭州 310028 2 中科院心理所, 北京 100101)

摘要 EEG频谱相干分析发现额叶发育在童年中期存在可能的加速期。针对这一问题, 本研究通过记录75名6至12岁正常儿童静坐和闭目状态下的自发脑电, 分析 δ 、 θ 、 α 和 β 基本脑电频段下31对电极相干的变化情况, 系统探索了该年龄段儿童额叶自发脑电频谱相干的变化特点, 结果发现: θ 波活动普遍强于 α 和 β 波活动; 6至12岁儿童额叶内、额叶与其他脑叶间相干在整体上表现为随年龄增长而增加的趋势; 额叶内、额叶与其他脑叶间相干在各频段均表现为7岁、11岁突增, 10岁、12岁表现为高峰。上述结果支持6至12岁儿童额叶发育存在加速变化的结论。

关键词 儿童 额叶 自发脑电 相干 发展

中图分类号: B844 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6020(2007)-04-0311-06

1 引言

大脑发育过程的敏感期是神经生物科学研究的一个重要课题。以动物和特殊个案为对象的研究发现, 在脑发育的敏感期, 某些脑功能的形成与发展比其他时期更快; 受损伤的脑功能也表现出更强的康复或补偿能力, 即如果机体在该时期获得适宜的康复治疗, 其脑功能得以正常发展的可能性便增大^[1]。那么, 人类大脑皮层发育是否存在敏感期呢? 来自脑电的相关研究已为人类大脑皮层发育存在加速变化的观点提供了较为丰富的证据。Huds-

peth和Pribram发现, 儿童脑电 α 波的功率在1~6岁、6~10.5岁、10.5~13岁、14~15岁和18~20岁均表现为加速增长^[2]; 刘世熠等发现5~6岁和13~14岁均为脑电 α 波功率的加速增长期^[3~5]。然而, 上述研究均以脑电功率为分析指标, 只能描述某一频段下单一脑区的活动状态, 而无法对不同脑区间同一频段下的功能联系进行深入探讨。有研究者针对该问题发展了另一类脑电分析技术——相干法(coherence), 该技术能分析某一特定脑电频段内不同脑区信号间的相关, 提供特定频率下脑电活动的空间同步信息, 即反映大脑皮层不同神经网络间的空间关系^[6]。该技术通常用

基金项目: 中国博士后基金项目(20060400333); 浙江省教育厅科研项目(3820070061); 国家自然科学基金项目(30670716)。

通讯作者: 施建农, 男, 研究员, 博导, E-mail: shjian@psych.ac.cn

于探讨不同脑区间在同一频段下的功能联系,目前已被人类大脑皮层发育敏感期研究领域所采用。

在人类大脑皮层各区域中,额叶是最复杂、最重要的部分,额叶内部、额叶与大脑其他皮质及皮质下区域都存在广泛的联系。额叶的发育为人类复杂心理活动和行为发展提供了物质基础^[1],因此,有关额叶内部、额叶与大脑其他皮质及皮质下的各神经网络的发展特点的研究已成为众多学者关注的焦点^[7~8]。Barry等选取2对额枕电极的研究发现,儿童9岁时 α 波段的相干显著降低^[9~10]。Hanlon等发现男性被试 θ 波的额叶内相干在6岁后表现为显著增加^[11]。虽然上述研究均为额叶及其神经联系的发育存在加速期提供了诸多证据,但由于它们或仅选择特定电极对^[9~10],或仅限于 θ 波段^[11]分析不同区域的相干,或未能具体报道某一年龄、某一频段的相干结果^[12],因此难以系统反映额叶内部以及额叶与大脑其他区域神经网络的发展特点。

本研究拟通过分析 δ 、 θ 、 α 和 β 基本脑电频段下,分布于整个大脑皮层的31对电极^[13~14]相干的变化情况,系统探索6~12岁儿童额叶自发脑电相干的加速期,为探索加速期干预与大脑发育关系的研究奠定基础。

2 方 法

2.1 被试

选取北京市某两所小学学生作为被试。所有被试均为右利手,身体健康,无神经系统疾病或精神疾病病史。被试在实验

前24小时内禁用中枢性药物及兴奋性饮料。所有被试智力水平用瑞文推理智力测验测得,经年龄常模换算均为智力正常水平。各年龄组人数及平均年龄分别为:6岁组12人(5男7女,年龄 6.59 ± 0.27 岁);7岁组12人(5男7女,年龄 7.47 ± 0.31 岁);8岁组10人(5男5女,年龄 8.54 ± 0.29 岁);9岁组10人(5男5女,年龄 9.45 ± 0.27 岁);10岁组11人(7男4女,年龄 10.46 ± 0.24 岁);11岁组10人(5男5女,年龄 11.34 ± 0.32 岁);12岁组10人(6男4女,年龄 12.11 ± 0.09 岁)。

2.2 实验程序与脑电记录

被试坐于屏蔽室内一张舒适的椅子上。要求被试全身肌肉放松、闭目,始终保持头脑清醒。采用Advanced Numerical Technology (ANT, Enchedes, The Netherlands)脑电记录系统,记录电极固定于32导电极帽。以双耳乳突为参考电极。头皮与电极之间阻抗小于 $5k\Omega$,信号经放大器放大,连续记录EEG,采用DC记录,采样频率为 512Hz 离线式处理。记录时间为1分钟,记录被试在安静和闭眼状态下的脑电信号。

2.3 数据分析和统计

采用ASA (Advanced Source Analysis 3.0 Enchedes, The Netherlands)分析。离线式滤波带通为 $0.2 \sim 40\text{Hz}$ 伪迹去除标准为 $\pm 50\mu\text{V}$ 。脑电分段设为2秒。分析频段为: δ ($1.5 \sim 3.5\text{Hz}$), θ ($3.5 \sim 7.5\text{Hz}$), α ($7.5 \sim 12.5\text{Hz}$), β ($12.5 \sim 30\text{Hz}$)。两个信号的相干由下述公式计算得来。

$$R_{x_1 x_2}(w) = \frac{\text{Complex Spectrum}(x_1(t)) \times \text{Complex Spectrum}(x_2(t))}{\sqrt{\text{Power Spectrum}(x_1(t)) \times \text{Power Spectrum}(x_2(t))}}$$

其中,Complex Spectrum代表复频率,Power Spectrum代表功率谱。对所得的相干值进行Fisher Z转换,进行数据统计。对所得的相干均值进行逆转换再汇报具体相

干值。

在考察大脑半球内的相干时,电极对的选择为:(1)额叶-额叶:左半球的 $F_{p_1} - F_{7_1}$, $F_{p_1} - F_{3_1}$,右半球的 $F_{p_2} - F_{8_2}$, $F_{p_2} - F_{4_2}$;(2)

额叶-颞叶: 左半球的 $F_{p_1} - T_{p_7}$ 、 $F_7 - T_7$ 、 $F_7 - T_{p_7}$ 、 $F_3 - T_7$ 、 $F_3 - T_{p_7}$ 右半球的 $F_{p_2} - T_{p_8}$ 、 $F_8 - T_8$ 、 $F_8 - T_{p_8}$ 、 $F_4 - T_8$ 、 $F_4 - T_{p_8}$; (3) 额叶-中央: 左半球的 $F_{p_1} - C_3$ 、 $F_3 - C_3$ 右半球的 $F_{p_2} - C_4$ 、 $F_4 - C_4$; (4) 额叶-顶叶: 左半球的 $F_7 - P_3$ 、 $F_3 - P_3$ 右半球的 $F_8 - P_4$ 、 $F_4 - P_4$; (5) 额叶-枕叶: 左半球的 $F_{p_1} - O_1$ 、 $F_7 - O_1$ 、 $F_3 - O_1$ 右半球的 $F_{p_2} - O_2$ 、 $F_8 - O_2$ 、 $F_4 - O_2$ 。其中, 半球电极对为组内因素, 年龄为组间因素, 进行重复测量的方差分析。

在考察额叶在两半球间的相干时, 电极对的选择为: $F_{p_1} - F_{p_2}$ 、 $F_7 - F_8$ 、 $F_3 - F_4$ 。其中, 电极对为组内因素, 年龄为组间因素, 进行重复测量的方差分析。

3 结 果

各电极对在不同频段下的相干值见表 1。额叶内各电极对各频段的相干都表现出显著的年龄间差异 (δ 波: $F_{(6,70)} = 2.26$, $p < 0.05$; θ 波: $F_{(6,70)} = 2.86$, $p < 0.05$; α 波: $F_{(6,70)} = 3.01$, $p < 0.05$; β 波: $F_{(6,70)} = 2.87$, $p < 0.05$)。进一步比较发现, 各频段 10 岁相干值显著高于 11 岁组, 且 12 岁组 δ 波相干显著高于 11 岁组。另外, θ 波: 10 岁组显著高于 6 岁组和 7 岁组, 12 岁组显著高于 7 岁组; α 波: 8 岁、10 岁和 12 岁组显著高于 7 岁组; β 波: 8 岁和 10 岁组显著高于 6 岁和 7 岁组; 9 岁、10 岁和 12 岁组均显著高于 7 岁组 (图 1); 额叶半球间 (左右对称) 电极相干无显著年龄效应。

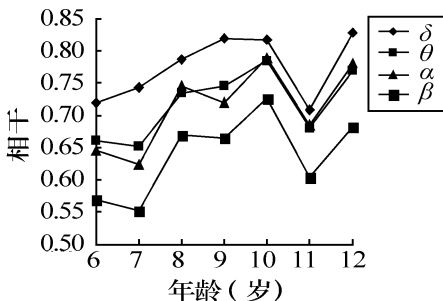


图 1 6~12岁儿童额叶相干的发展变化 (半球内)

表 1 不同电极对在不同频段下的相干值

电极对	δ 波	θ 波	α 波	β 波
$F_{p_1} - F_7$	0.74	0.66	0.65	0.60
$F_{p_1} - F_3$	0.84	0.81	0.82	0.73
$F_{p_2} - F_8$	0.75	0.67	0.65	0.60
$F_{p_2} - F_4$	0.78	0.72	0.72	0.64
$F_{p_1} - T_{p_7}$	0.56	0.34	0.26	0.32
$F_7 - T_7$	0.72	0.61	0.54	0.50
$F_7 - T_{p_7}$	0.65	0.50	0.40	0.43
$F_3 - T_7$	0.68	0.51	0.41	0.43
$F_3 - T_{p_7}$	0.64	0.45	0.33	0.40
$F_{p_2} - T_{p_8}$	0.51	0.32	0.26	0.31
$F_8 - T_8$	0.72	0.61	0.55	0.49
$F_8 - T_{p_8}$	0.59	0.44	0.34	0.40
$F_4 - T_8$	0.68	0.52	0.42	0.43
$F_4 - T_{p_8}$	0.58	0.40	0.29	0.35
$F_{p_1} - C_3$	0.61	0.45	0.38	0.42
$F_3 - C_3$	0.71	0.56	0.46	0.51
$F_{p_2} - C_4$	0.60	0.46	0.39	0.41
$F_4 - C_4$	0.69	0.59	0.49	0.51
$F_7 - P_3$	0.47	0.36	0.27	0.35
$F_3 - P_3$	0.51	0.36	0.28	0.35
$F_8 - P_4$	0.44	0.32	0.25	0.33
$F_4 - P_4$	0.48	0.34	0.26	0.33
$F_{p_1} - O_1$	0.42	0.25	0.25	0.25
$F_7 - O_1$	0.44	0.28	0.23	0.30
$F_3 - O_1$	0.49	0.31	0.27	0.33
$F_{p_2} - O_2$	0.41	0.24	0.27	0.26
$F_8 - O_2$	0.44	0.28	0.22	0.28
$F_4 - O_2$	0.45	0.26	0.25	0.28
$F_{p_1} - F_{p_2}$	0.77	0.69	0.61	0.50
$F_7 - F_8$	0.46	0.32	0.27	0.27
$F_3 - F_4$	0.73	0.63	0.57	0.47

额叶与中央叶的电极对相干结果表明, θ 波和 β 波表现显著年龄主效应 (θ 波: $F_{(6,70)} = 2.89$, $p < 0.05$; β 波: $F_{(6,70)} = 3.62$, $p < 0.01$)。进一步比较发现, θ 波: 7 岁、8 岁、10 岁和 12 岁组显著高于 11 岁组, 12 岁组显著高于 6 岁和 7 岁组; β 波: 8 岁、9 岁和 10 岁组显著高于 11 岁组; 12 岁组相干值显著高于各年龄组 (9 岁组除外) (图 2)。

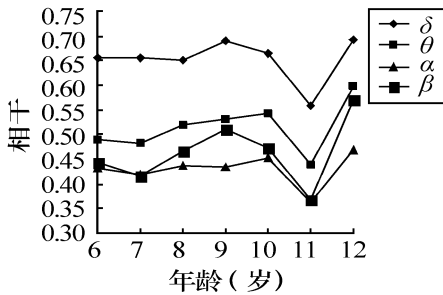


图2 6~12岁儿童额叶-中央叶相干的发展变化

额叶与颞叶的电极相干结果表明,除 δ 波以外,各波段相干都有显著年龄主效应(θ 波: $F_{(6,70)} = 2.96, p < 0.05$; α 波: $F_{(6,70)} = 2.25, p < 0.05$; β 波: $F_{(6,70)} = 2.47, p < 0.05$)。进一步比较发现, θ 、 α 波: 12岁组显著高于其他各组; β 波: 12岁组显著高于其他各组, 8岁、9岁、10岁和11岁组显著高于7岁组(图3)。

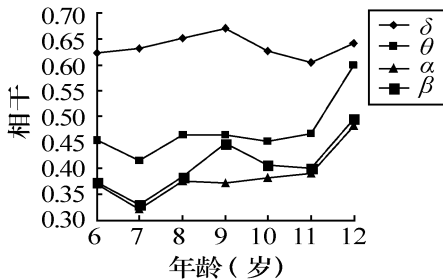


图3 6~12岁儿童额叶-颞叶相干的发展变化

额叶与顶叶的电极相干结果表明,除 δ 波以外,各频段相干的年龄主效应显著(θ 波: $F_{(6,70)} = 4.75, p < 0.01$; α 波: $F_{(6,70)} = 3.22, p < 0.01$; β 波: $F_{(6,70)} = 2.31, p < 0.05$)。进一步比较发现,各频段12岁组相干值均显著高于11岁组,而且 θ 、 α 和 β 三个波段的12岁组显著高于其他各年龄组(图4)。

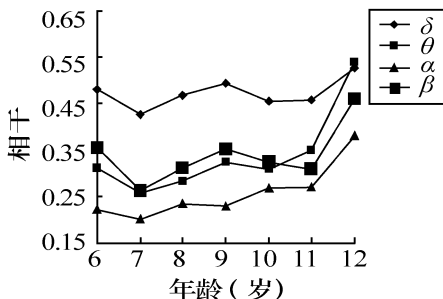


图4 6~12岁儿童额叶-顶叶相干的发展变化

额叶与枕叶之间的电极对相干结果表明,除 δ 波以外,各波段相干均有显著年龄主效应(θ 波: $F_{(6,70)} = 4.17, p < 0.01$; α 波: $F_{(6,70)} = 3.45, p < 0.01$; β 波: $F_{(6,70)} = 2.87, p < 0.05$)。具体来说, θ 波: 11岁组显著高于7岁组, 12岁组显著高于各年龄段, α 波: 12岁组显著高于各年龄段, 10岁和11岁组显著高于6岁组, β 波: 12岁组显著高于各年龄组(图5)。

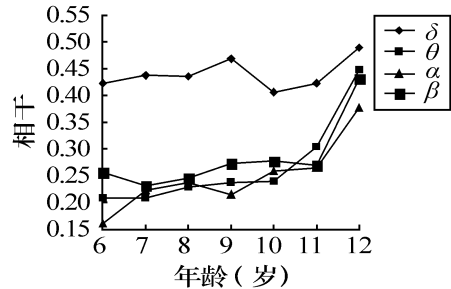


图5 6~12岁儿童额叶-枕叶相干的发展变化

4 讨论

额叶显著增大以及额叶功能网络的形成^[7-8]是童年中期大脑发育的重要特征之一。额叶功能网络作为一些重要认知功能的基础,其发育对心理发展有重要的意义。本研究选用四个基本脑电频段和31个电极对,运用相干法系统考察了6至12岁儿童额叶内部、额叶与其他脑叶间网络发展变化的特点。结果发现,额叶内部、额叶与其他脑叶之间的相干普遍表现出 δ 波活动最大;额叶内部和额枕相干以 β 波活动最低;额中央、额颞和额顶相干以 α 波活动最低。由于在大脑发育过程中,神经纤维会出现分化现象,这种分化与特异性功能网络的形成有关^[15],因此,笔者认为,低频活动与高频活动的相干差异可能反映了神经纤维分化及网络建构的过程,这可能意味着不同脑电频段对神经网络的形成具有不同的调节作用。

本研究还发现,从6岁到12岁期间,

31对电极相干在整体上表现为随年龄增长而增加的趋势。关于相干值随年龄增长而发生的变化,目前仅见 Thatcher等提出的双过程模型(worprocess model)作过解释^[16],这一模型认为长距离相干和短距离相干是两种不同的发育过程,两者分别依赖不同长度神经纤维的发育。长距离相干值随长纤维密度增大而增加,而短距离相干值则随短纤维密度增大而降低。本研究中长距离电极对如额枕、额颞和额顶的相干结果支持这一模型。然而短距离电极对(包括额叶内和额中央)的相干,在整体上也表现为随年龄增长而增加。这一结果与该模型的预测相矛盾,但与 Barry等的研究结果一致^[9-10]。因此笔者认为,双过程模型有关短距离相关的假设尚需进一步探讨。

此外,本研究发现,额叶相干在7岁和11岁时突增,在9岁和12岁时表现为高峰,这与以往脑电研究结果相一致^[13,17-18],进一步验证了关于人类大脑发育的敏感期假说。7岁和11岁时的相干突增可能提示此时脑神经元出现了新的神经修剪现象^[19],而神经元的每一次突触过剩和突触修剪都代表了解剖上相互联系的脑区出现了时间上和空间上的周期性重组,这种重组即表现为敏感期^[21]。本研究发现的额叶发育的高峰年龄与其他研究发现的主要认知能力获得的时间也是相吻合的,如Fischer等发现9岁和12岁儿童抽象思维任务绩效显著高于其他年龄^[21-23];Anderson等发现儿童的抑制控制能力在12岁左右出现峰值^[24]。因此,本研究结果在一定程度上为心理学和教育工作者划分儿童发展阶段的年龄段提供了线索。

5 小 结

本研究以6至12岁儿童为对象,探讨了大脑额叶内部、额叶与大脑其他区域

对电极在 δ 、 θ 、 α 和 β 基本脑电频段下相干的发展特点,结果发现:(1) θ 波活动普遍强于 α 和 β 波活动;(2)6~12岁儿童额叶内、额叶与其他脑叶间相干在整体上表现为随年龄增长而增加的趋势;(3)额叶内部、额叶与大脑其他各区间相干在各频段均表现为7岁、11岁突增,10、12岁表现为高峰。上述结果支持了6~12岁儿童额叶发育存在加速变化的观点。

参考文献

- [1]杨雄里. 脑科学的现代进展. 上海: 上海科学技术出版社, 1998
- [2]Hudspeth W J, Prbran K H. Psychophysiological indices of cerebral maturation. *International Journal of Psychophysiology*, 1992, 12(1): 19~29
- [3]刘世熠, 邬勤娥, 孙文龙. 4岁至7岁学龄前儿童脑电图研究. *心理学报*, 1963, 3: 186~194
- [4]刘世熠. 我国儿童的脑发展的年龄特征问题. *心理学报*, 1962, 2: 89~97
- [5]刘世熠. 脑电图与心理的大脑生理机制研究的几个问题. *心理学报*, 1961, 3: 141~152
- [6]Shaw J An introduction to the coherence function and its use in EEG signal analysis. *Journal of Medical Engineering and Technology*, 1981, 5(6): 279~288
- [7]许政援, 沈家鲜, 吕静, 等. 儿童发展心理学. 长春: 吉林教育出版社, 2002
- [8]Casey B J, Tottenham N, Liston C, et al. Imaging the developing brain: What have we learned about cognitive development? *Trends in Cognitive Sciences*, 2005, 9(3): 104~110
- [9]Barry R J, Clarke A R, McCarthy R, et al. Age and gender effects in EEG coherence: I. Developmental trends in normal children. *Clinical Neurophysiology*, 2004, 115(10): 2252~2258
- [10]Barry R J, Clarke A R, McCarthy R, et al. Age and gender effects in EEG coherence: II. Boys with attention deficit/hyperactivity disorder. *Clinical Neurophysiology*, 2005, 116(4): 977~984

- [11] Hanlon H W, Thatcher R W, Cline M J. Gender Differences in the development of EEG coherence in normal children. *Developmental Neuropsychology*, 1999, 16(3): 479~ 506
- [12] Thatcher R W, Walker R, Giudice S. Human cerebral hemispheres develop at different rates and ages. *Science*, 1987, 236(4805): 1110~ 1113
- [13] Thatcher R W. Cyclic cortical reorganization, origins of human cognitive development. In Dawson G, Fischer K, eds. *Human behavior and the developing brain*. New York: The Guildford Press, 1994. 232~ 266
- [14] Samsen R JM, van't Klooster B J, van der Molen M W, et al. Growth spurts in brain maturation during middle childhood as indexed by EEG power spectra. *Biological Psychology*, 1997, 44(3): 187~ 209
- [15] Thatcher R W. A predator-prey model of human cerebral development. In Newell K, Molenaar P, eds. *Applications of nonlinear dynamics to developmental process modeling*. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1998. 87~ 128
- [16] Thatcher R W, Krause P, Hrybyk M. Cortico-cortical associations and EEG coherence: A two-compartmental model. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1986, 64(2): 123~ 143
- [17] Moslman D, Franks B A. Development of the concept of inferential validity. *Child Development*, 1986, 57(1): 153~ 165
- [18] 刘力戈. 4~ 12岁儿童脑地形图正常参考值. *临床脑电学杂志*, 1998, 7(3): 144~ 146
- [19] Huttenlocher P R. Morphometric study of human cerebral cortex development. *Neuropsychologia*, 1990, 28(6): 517~ 527
- [20] Thatcher R W. Maturation of the human frontal lobes: Physiological evidence for staging. *Developmental Neuropsychology*, 1991, 7(3): 397~ 419
- [21] Fisher K W, Kenny S L. Environmental conditions for discontinuities in the development of abstractions. In Mines R A, Kitchener K S, eds. *Adult Cognitive development: Methods and models*. New York: Praeger, 1986.
- [22] O'Brien D P, Overton W F. Conditional reasoning and the competence-performance issue: A developmental analysis of a training task. *Journal of Experimental Child Psychology*, 1982, 34(2): 274~ 290
- [23] John E R, Ahn H, Pricep L, et al. Developmental equations for the electroencephalogram. *Science*, 1980, 210(4475): 1255~ 1258
- [24] Anderson V. Assessing executive functions in children. *Biological, psychological and developmental considerations*. *Pediatric Rehabilitation*, 2001, 4(3): 119~ 136

A Developmental Coherence Study of Frontal Lobe for Children Aged from 6 to 12

ZHANG Qiong¹ SHI Jian-nong² SHEN Mo-wei¹

(1. Department of Psychology, Zhejiang University, Hangzhou 310028)

2. Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract

Previous studies have indicated that there are developmental spurts and plateaus in children's brain coherence of theta band for selected electrode pairs. Does coherence of other basic frequency bands for more electrode pairs have the same developmental trends? 75 children participated in this study. EEG was recorded from 32 sites during an eyes-closed resting condition. The wave-shape coherence was calculated for 28 intrahemispheric electrode pairs and 8 inter-hemispheric electrode pairs within each of the delta, theta, alpha and beta bands. Coherences of theta band were higher

than alpha and beta bands. The long-distance and short-distance coherences increased consistently which was explained by a two-process model. Moreover, the coherences keep developing across this age range with a sudden increase at 7 and 11 years, and the peak at 10 and 12. EEG coherence of frontal lobe in normal children of this age range develops systematically with age, showing spurts which are correlated with cognitive development.

Key words children, frontal lobe, EEG, coherence, development