doi：10.7499/j.issn.1008-8830.2601078

论著·临床研究

早产儿与足月儿早期静息态脑功能连接特征：一项功能性近红外光谱技术的探索性研究

吴蕴[1] 朱晓芸[1] 孟凡喆[1] 高和荣[1] 曹佳燕[1] 杨红[1] 骆丹丹[1] 金志萍[2] 周浩[1] 汪军[1]

（1.复旦大学附属儿科医院康复中心，上海 201102；2.上海市奉贤区奉浦社区卫生服务中心，上海 201401）

［摘要］**目的** 基于功能性近红外光谱技术（functional near-infrared spectroscopy, fNIRS），比较不同胎龄新生儿静息态脑功能连接的差异。**方法** 纳入住院新生儿40例，按胎龄分为极早产儿组（*n*=10）、中晚期早产儿组（*n*=10）和足月儿组（*n*=20）。在矫正胎龄（40±4）周时，使用fNIRS采集静息态全脑血氧信号，以额叶、顶叶和颞叶为感兴趣区域（region of interest, ROI），计算功能连接强度并进行全脑与ROI水平的组间比较。**结果** 全脑水平上，早产儿组平均功能连接强度显著低于足月儿组（0.55±0.20 vs 0.68±0.16，*P*=0.030）。亚组分析显示，极早产儿组连接强度最低（0.46±0.19），显著低于中晚期早产儿组（0.64±0.19，*P*=0.030）和足月儿组（0.68±0.16，*P*<0.01）。ROI水平上，极早产儿组在左侧额叶–右侧额叶、左侧颞叶–右侧额叶、双侧额叶–双侧顶叶（包括同侧与对侧）及左侧顶叶–右侧顶叶等多对关键连接上的强度均显著低于足月儿组（*P*<0.05）。**结论** 早产对静息态脑功能连接的影响呈胎龄梯度效应，胎龄越小，连接减弱得越显著。极早产儿表现为全脑及关键脑区间的广泛性连接降低。［中国当代儿科杂志，2026，28（9）：1052-1059］

［关键词］功能性近红外光谱技术；脑功能连接；探索性研究；早产儿；足月儿

Early resting-state functional connectivity characteristics in preterm and full-term infants: an exploratory study using functional near-infrared spectroscopy

WU Yun, ZHU Xiao-Yun, MENG Fan-Zhe, GAO He-Rong, CAO Jia-Yan, YANG Hong, LUO Dan-Dan, JIN Zhi-Ping, ZHOU Hao, WANG Jun. Department of Rehabilitation, Children's Hospital of Fudan University, Shanghai 201102, China (Wang J, Email: wangjunsh@fudan.edu.cn)

Abstract: Objective To compare resting-state brain functional connectivity among neonates of different gestational ages using functional near-infrared spectroscopy (fNIRS). **Methods** Forty hospitalized neonates were enrolled and categorized by gestational age into very preterm (*n*=10), moderate-to-late preterm (*n*=10), and full-term (*n*=20) groups. At a corrected gestational age of (40 ± 4) weeks, resting-state whole-brain oxygenation signals were acquired with fNIRS. The frontal, parietal, and temporal lobes were defined as regions of interest (ROI). Functional connectivity strength was calculated, and between-group comparisons were performed at both the whole-brain and ROI levels. **Results** At the whole-brain level, the mean functional connectivity strength in preterm infants was significantly lower than that in full-term infants (0.55 ± 0.20 vs 0.68 ± 0.16, *P*=0.030). Subgroup analysis showed the lowest connectivity strength in the very preterm group (0.46 ± 0.19), significantly lower than in the moderate-to-late preterm group (0.64 ± 0.19, *P*=0.030) and the full-term group (0.68 ± 0.16, *P*<0.01). At the ROI level, the very preterm group exhibited significantly reduced connectivity relative to the full-term group across multiple key connections, including left frontal-right frontal, left temporal-right frontal, bilateral frontal-bilateral parietal (both ipsilateral and contralateral), and left

［收稿日期］2026-01-08；［接受日期］2026-08-04
［基金项目］复旦大学附属儿科医院“医+X”项目（EKYX202406）；“临床-基础”双结对项目（EKSJD202424）；上海市奉贤区柔性引进高层次人才（团队）项目。
［作者简介］吴蕴，女，本科，主管治疗师。
［通信作者］汪军，男，副主任医师。Email：wangjunsh@fudan.edu.cn。

parietal-right parietal connections (all $P<0.05$). **Conclusions** Preterm birth exerts a gestational age-dependent gradient effect on resting-state brain functional connectivity, with smaller gestational age associated with more pronounced reductions. Very preterm neonates show widespread decreases in connectivity at the whole-brain level and between key cortical regions. **[Chinese Journal of Contemporary Pediatrics, 2026, 28(9): 1052-1059]**

Key words: Functional near-infrared spectroscopy; Brain functional connectivity; Exploratory study; Preterm infant; Full-term infant

正常新生儿大脑已具备运动、感觉及反馈外界刺激的基本能力[1]，但早产及相关脑损伤可干扰关键功能连接网络的正常发育，导致一系列神经系统发育障碍[2-3]。值得注意的是，即使未合并颅内出血、白质损伤等重大脑部病变，早产儿远期认知与行为异常的风险仍显著高于足月儿[4]。这提示大脑发育评估不仅应关注宏观结构，更需深入探究其微观功能连接状态。

目前，临床关注多集中于存在明确脑损伤的早产儿，而脑影像学“无异常”的非脑损伤早产儿，其远期不良神经发育风险常被低估[1]。基于静息态功能磁共振成像（magnetic resonance imaging, MRI）的研究发现，与非脑损伤足月儿相比，脑影像学“无异常”的非脑损伤早产儿在运动、认知、语言和执行功能的核心脑网络上呈现功能连接减弱、节点中心性下降及网络协同性降低[5]，表明早产过程本身在无明确结构损伤的情况下，仍可构成关键风险因素，导致大脑功能网络早期协同与整合水平呈特征性下降。功能性近红外光谱技术（functional near-infrared spectroscopy, fNIRS）因便携、抗干扰及易床旁实施等优势，为新生儿脑功能监测提供了新手段[6]，且与fMRI在功能连接探测上具有良好相关性[7]，已成为研究早产儿脑发育规律的理想工具及新生儿多模态脑功能成像的重要组成部分[8-9]。基于此，本研究拟采用fNIRS技术，系统比较非脑损伤早产儿与足月儿的脑功能特征，旨在为后续探究早产儿早期临床行为学特征及远期神经发育差异的脑机制提供依据。本研究为前瞻性观察性研究，数据来源于复旦大学附属儿科医院康复中心的fNIRS数据库。

1　资料与方法

1.1　一般资料

2024年9月—2025年5月期间，共采集150例新生儿病房住院患儿的fNIRS数据。依据胎龄（极早产儿、中晚期早产儿、足月儿）与fNIRS采集时间［矫正胎龄（40±4）周］相匹配的原则及纳入标准，最终纳入40例数据。按胎龄分为3个组：极早产儿组（28周≤胎龄<32周）10例，中晚期早产儿组（32周≤胎龄<37周）10例，足月儿组（胎龄≥37周）20例。本研究经复旦大学附属儿科医院伦理委员会批准［（2024）225］，受试者监护人均签署知情同意书。

纳入标准：（1）胎龄28~41周。（2）住院期间接受fNIRS检查。（3）住院期间接受头颅MRI检查，由两名经验丰富的新生儿神经影像医师独立阅片，确认无明确脑损伤表现（即常规头颅MRI平扫未见以下结构性异常[10]：脑出血、脑室周围白质软化、点状白质损伤、明确脑梗死、显著脑室扩大或脑萎缩、其他明确的结构畸形）。（4）全身运动（general movement, GM）评估结果为单调性或正常。（5）fNIRS数据采集时间窗为矫正胎龄（40±4）周。排除标准：（1）严重视力或听力障碍；（2）遗传代谢性疾病或先天性畸形；（3）出生时Apgar评分<7分。

1.2　研究方法

本研究采用静息态fNIRS技术，在新生儿病房内使用NirSmart-6000A系统（江苏丹阳慧创医疗设备有限公司）来采集大脑血氧动力学信号（氧合与脱氧血红蛋白浓度变化）。系统参数：光源波长为730/850 nm，探测器为雪崩光电二极管，采样率为11 Hz；共21个光源和16个探测探头，构成54个有效测量通道，发射–探测间距均值为2 cm。依据标准婴儿脑图谱模板，将54个通道定位并划分至双侧大脑皮质的3个感兴趣区域（region of interest, ROI）（额叶、顶叶、颞叶，区分左右侧），通道-ROI对应关系见表1，空间分布见图1。

检测时，受试婴儿仰卧于婴儿床内，佩戴定制的fNIRS测试帽，保持安静的睡眠状态。每次采集持续5~8 min，期间保持环境安静，并尽量减少被试移动，以确保信号质量稳定。

表 1　ROI 与通道对应关系

ROI	通道排布
LFC	CH4、CH5、CH6、CH13、CH15、CH16、CH17、CH18、CH19、CH20、CH30、CH31、CH32、CH33、CH34、CH35、CH45
RFC	CH1、CH2、CH3、CH7、CH9、CH10、CH11、CH12、CH14、CH23、CH25、CH27、CH28、CH29、CH37、CH38
LTL	CH21、CH22、CH42
RTL	CH8
LPL	CH36、CH43、CH44、CH46、CH51、CH52、CH53、CH54
RPL	CH26、CH39、CH40、CH41、CH47、CH48、CH49、CH50

注：［ROI］感兴趣区域；［L］左侧；［R］右侧；［FC］额叶皮质；［TL］颞叶；［PL］顶叶；［CH］通道。组合缩写如LFC、RTL等分别代表对应侧别的相应脑区。

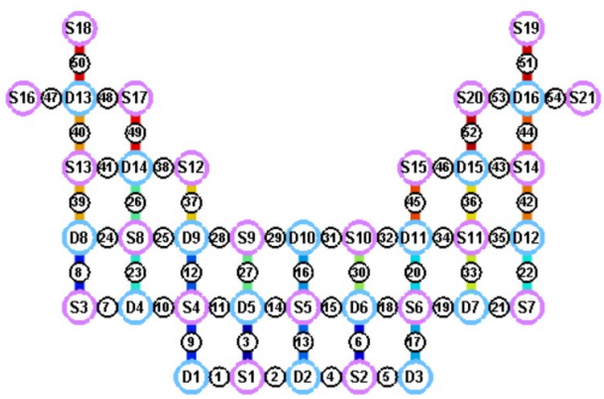


图 1　54 通道在大脑的分布图

1.3　数据处理

fNIRS 静息态数据通过 NirSpark 工具包进行数据预处理，预处理流程如下：（1）剔除血氧波动大的片段，确保信号平稳；（2）运动伪迹通过自动检测方式识别（标准差阈值=6，峰值阈值=0.5），并采用三次样条插值进行校正；（3）采用 0.01~0.1 Hz 带通滤波抑制心率、呼吸及 Mayer 波等高频干扰；（4）依据修正 Beer-Lambert 定律，以路径长度差分因子为 6 计算含氧血红蛋白与脱氧血红蛋白的浓度变化。静息态功能连接分析和可视化操作在 NirSpark、FC-NIRS [11]、Brain Net-View [12] 中进行。针对静息态功能连接分析，在序列上分析各通道氧合血红蛋白浓度的 Pearson 相关系数，然后将 Pearson 相关系数进行 Fisher Z 转换，转换后的 Z 值即为各通道间的脑功能连接程度（每例受试者静息态下均生成 54×54 的相关矩阵，并将矩阵图按照 ROI 进行划分）。将每两个 ROI 涉及的所有通道相互组合的功能连接值取平均值，作为这两个 ROI 间的功能连接值。由于氧合血红蛋白的信噪比优于脱氧血红蛋白的信噪比，故本文后续分析仅使用氧合血红蛋白的数据 [13]。

1.4　统计学分析

本研究所有数据分析均采用 SPSS 18.0 统计软件进行。所有统计学检验均为双侧检验，检验水准 α 设定为 0.05。经 Shapiro-Wilk 检验符合正态分布的计量资料以均数 ± 标准差（$\bar{x} \pm s$）表示，非正态分布或等级资料以中位数（四分位数间距）［M（P_{25}，P_{75}）］表示，计数资料以例数和构成比（%）表示。一般资料比较中，计数资料（如母孕情况、新生儿并发症等）组间比较采用 Fisher 确切概率法。脑功能连接强度的组间比较：基于 NirSpark 软件提取 3 组各脑网络功能连接程度均值，多组间比较采用单因素方差分析，组间两两比较采用最小显著性差异法；若方差不齐，则采用 Welch 校正检验。为控制多重检验导致的假阳性风险，采用 Bonferroni 校正。

2　结果

2.1　3 组临床资料比较

本研究共纳入 10 例极早产儿和 10 例中晚期早产儿，以及同期住院的足月儿 20 例，其中男性 21 例，女性 19 例。3 组在母孕期是否罹患高血压、糖尿病，出生时小于胎龄儿占比、是否剖宫产，新生儿并发症中支气管肺发育不良、新生儿败血症、动脉导管未闭和坏死性小肠结肠炎占比，以及临床 GM 评估时的胎龄和评估结果方面进行比较，差异无统计学意义（P>0.05），而 3 组在母孕期是否发生胎膜早破、产前类固醇使用，胎龄、出生时体重及是否双胎，新生儿并发症的呼吸窘迫综合征、新生儿黄疸占比方面进行比较，差异均有统计学意义（P<0.05）。见表 2。

表2　极早产儿组、中晚期早产儿组和足月儿组临床资料的比较

项目	极早产儿组 (n=10)	中晚期早产儿组 (n=10)	足月儿组 (n=20)	Z/F值	P值
母孕期情况 [例(%)]					
高血压	1(10)	1(10)	2(10)	–	1.000*
糖尿病	1(10)	1(10)	2(10)	–	1.000*
胎膜早破	4(40)	3(30)	1(5)	–	0.044*
产前感染	0(0)	1(10)	5(25)	–	0.274*
产前类固醇使用	10(100)	6(60)	1(5)	–	<0.001*
出生情况					
胎龄 [$M(P_{25}, P_{75})$, 周]	30(28^{+1}, 30^{+4})	34(33^{+1}, 35^{+6})	39(37^{+2}, 39^{+5})	32.95	<0.001
小于胎龄儿 [例(%)]	0(0)	3(30)	2(10)	–	0.129*
体重 ($\bar{x} \pm s$, g)	1 275 ± 300	2 068 ± 441	3 181 ± 478	69.59	<0.001
多胎 [例(%)]	3(30)	2(20)	0(0)	–	0.036*
剖宫产 [例(%)]	5(50)	7(70)	11(55)	–	0.766*
新生儿并发症 [例(%)] (出生至fNIRS采集)					
呼吸窘迫综合征	9(90)	5(50)	3(15)	–	<0.001*
支气管肺发育不良	1(10)	0(0)	0(0)	–	0.500*
新生儿败血症	0(0)	0(0)	0(0)	–	1.000*
动脉导管未闭	0(0)	2(20)	1(5)	–	0.298*
新生儿黄疸	1(10)	1(10)	10(50)	–	0.022*
坏死性小肠结肠炎	0(0)	0(0)	0(0)	–	1.000*
临床GM评估					
胎龄 [$M(P_{25}, P_{75})$, 周]	38^{+5}(37, 39)	38(37, 39)	40(38, 40)	1.860	0.170
评估结果 [例(%)]					
N	4(40)	4(40)	9(45)	–	1.000*
PR	6(60)	6(60)	11(55)	–	1.000*

注：*采用Fisher确切概率法。［fNIRS］功能性近红外光谱技术；［GM］全身运动；［N］正常扭动运动；［PR］单调性全身运动。

2.2　全脑功能平均连接强度比较

2.2.1　早产儿与足月儿的全脑功能平均连接强度比较

图2展示了早产儿与足月儿全脑通道间的相关性，分别以总平均相关系数矩阵的形式呈现。足月儿组的全脑功能连接平均强度为0.68 ± 0.16，早产儿组为0.55 ± 0.20。通过比较两组的功能连接强度发现，足月儿组的全脑功能平均连接强度显著高于早产儿组（t=2.20，P=0.030）。

2.2.2　极早产儿、中晚期早产儿与足月儿的全脑功能平均连接强度比较

图3展示了极早产儿、中晚期早产儿与足月儿全脑通道间的相关性，分别以总平均相关系数矩阵的形式呈现。计算3组全脑各通道功能连接强度的均值显示，极早产儿组、中晚期早产儿组与足月儿组的全脑功能连接平均强度分别为0.46 ± 0.19、0.64 ± 0.19和0.68 ± 0.16。3组间全脑功能连接平均强度比较差异具有统计学意义（F=5.13，P=0.011）。其中极早产儿组与中晚期早产儿组、极早产儿组与足月儿组间比较，差异有统计学意义（P值分别为0.033、0.003）。中晚期早产儿组与足月儿组之间差异无统计学意义（P=0.552）。

2.3　全脑ROI比较

2.3.1　早产儿与足月儿的全脑ROI比较

基于每两个ROI涉及的所有通道相互组合的功能连接强度进行2组组间比较，结果未发现早产儿组与足月儿组之间差异存在统计学意义（P>0.05），见表3与图4。

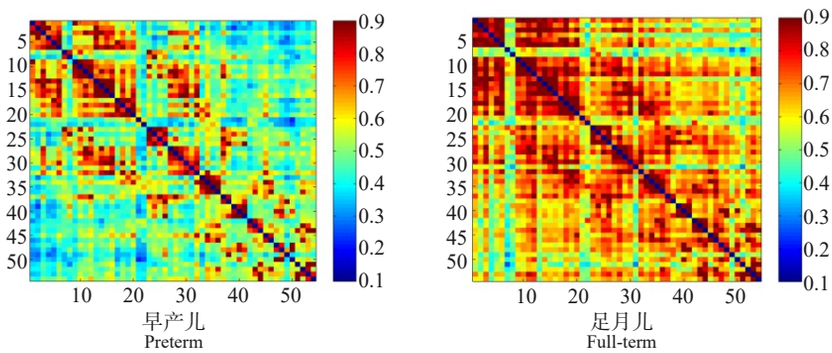


图2　2组氧合血红蛋白分组平均相关矩阵映射　图片展示了2组婴儿在静息态下氧合血红蛋白浓度的平均相关矩阵。矩阵横轴、纵轴均为本研究fNIRS探测通道编号（共54个通道），矩阵内每个色块代表对应行、列两个通道之间血氧浓度变化的Pearson相关系数，右侧色条数值范围0.1~0.9，数值越大代表通道间功能连接强度越高。矩阵中的每个色块代表两个通道之间血氧浓度变化的Pearson相关系数，颜色越暖（偏向黄色/红色）表示正相关性越强，颜色越冷（偏向蓝色）表示负相关性越强或连接越弱。该矩阵直观地反映了不同胎龄出生的婴儿在足月等效年龄时大脑静息态网络的功能连接强度的差异。

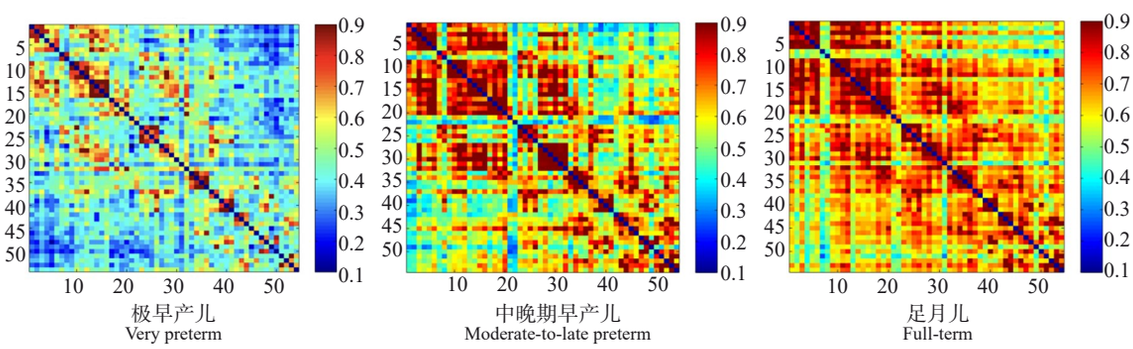


图3　3组氧合血红蛋白分组平均相关矩阵映射　图片展示了3组婴儿在静息态下氧合血红蛋白浓度的平均相关矩阵。矩阵横轴、纵轴均为本研究fNIRS探测通道编号（共54个通道），矩阵内每个色块代表对应行、列两个通道之间血氧浓度变化的Pearson相关系数，右侧色条数值范围0.1~0.9，数值越大代表通道间功能连接强度越高。矩阵中的每个色块代表两个通道之间血氧浓度变化的Pearson相关系数，颜色越暖（偏向黄色/红色）表示正相关性越强，颜色越冷（偏向蓝色）表示负相关性越强或连接越弱。该矩阵直观地反映了不同胎龄出生婴儿在足月等效年龄时大脑静息态网络的功能连接强度差异。

表3　早产儿组和足月儿组基于ROI的功能连接强度比较　（$\bar{x} \pm s$）

ROI	早产儿 (n=20)	足月儿 (n=20)	t值	P值 (FDR矫正)
左侧颞叶–右侧额叶	0.40 ± 0.24	0.59 ± 0.21	2.67	0.064
左侧颞叶–右侧顶叶	0.36 ± 0.26	0.55 ± 0.23	2.50	0.064
左侧额叶–右侧顶叶	0.43 ± 0.21	0.60 ± 0.19	2.73	0.064
右侧额叶–左侧顶叶	0.48 ± 0.21	0.64 ± 0.18	2.61	0.064
右侧额叶–右侧顶叶	0.49 ± 0.24	0.65 ± 0.19	2.36	0.070
左侧顶叶–右侧顶叶	0.52 ± 0.23	0.67 ± 0.22	2.14	0.098
左侧额叶–右侧额叶	0.59 ± 0.24	0.72 ± 0.17	1.99	0.115

注：［ROI］感兴趣区；［FDR］错误发现率。

2.3.2　极早产儿、中晚期早产儿与足月儿的全脑ROI比较　基于3组ROI的组间分析发现，仅极早产儿组与足月儿组之间存在显著的ROI功能连接强度差异。具体体现在极早产儿组在左侧额叶–右侧额叶、左侧颞叶–右侧额叶、双侧额叶–双侧顶叶（包括同侧与对侧），以及左侧顶叶–右侧顶叶的功能连接强度均显著低于足月儿组（P<0.05），见图5、表4。

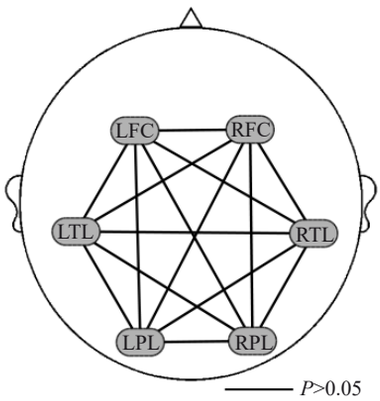


图4　早产儿组和足月儿组基于ROI的功能连接强度差异2D图　线段为所有ROI之间功能连接的组间t检验的P值，虚线圆圈代表6个ROI。黑线代表无显著差异的连接（P>0.05）。

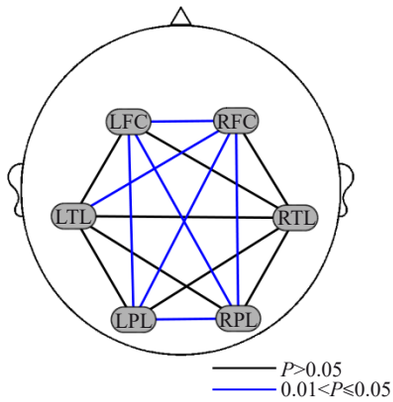


图5　极早产儿组与足月儿组基于ROI的功能连接强度差异的2D图　线段为所有ROI之间功能连接的组间t检验的P值，虚线圆圈代表6个ROI。黑线代表无显著差异的连接（P>0.05），深蓝色线代表具有显著差异的连接（P≤0.05）。

表4　极早产儿组与足月儿组基于ROI的功能连接强度比较　（$\bar{x} \pm s$）

ROI	极早产儿（n=10）	足月儿（n=20）	t值	P值（FDR矫正）
左侧额叶–右侧额叶	0.48 ± 0.19	0.72 ± 0.17	3.63	0.017
左侧额叶–右侧顶叶	0.37 ± 0.19	0.60 ± 0.19	3.20	0.017
右侧额叶–左侧顶叶	0.39 ± 0.21	0.64 ± 0.18	3.36	0.017
左侧颞叶–右侧额叶	0.35 ± 0.26	0.59 ± 0.21	2.68	0.030
左侧额叶–左侧顶叶	0.42 ± 0.21	0.63 ± 0.18	2.84	0.030
右侧额叶–右侧顶叶	0.44 ± 0.23	0.65 ± 0.19	2.73	0.030
左侧顶叶–右侧顶叶	0.44 ± 0.25	0.67 ± 0.22	2.59	0.033

注：［ROI］感兴趣区；［FDR］错误发现率。

3　讨论

尽管围产期救治水平持续提升，运动与认知功能障碍仍是早产儿常见的远期后遗症[14]。约50%的非脑性瘫痪的早产儿在学龄期仍存在运动障碍及相关神经系统轻微体征，显著影响其运动、认知及社会适应功能[15-17]。因此，超早期系统筛查对改善早产儿预后至关重要。GM评估对脑性瘫痪等神经发育障碍具有较高的预测价值[18-19]，若联合fNIRS获取静息态脑网络连接的客观指标，有望在临床症状出现前识别出神经发育轨迹异常的高危儿，为精准预警与早期干预提供新依据。

本研究采用fNIRS技术发现，不同胎龄新生儿静息态脑功能连接呈明显的胎龄梯度效应，早产儿的全脑连接强度显著低于足月儿，但ROI水平未发现普遍差异，这提示早产对脑网络的影响更倾向于广泛性功能整合水平下降，而非局限于少数特定连接[20]。此外，早产可能改变大脑网络发育的基本模式，表现为整体连接效率下降时部分关键长程连接得以保留，构成特定神经连接易损性的基础[21]，有待结合图论等方法深入探讨[22]。

在全脑功能连接层面，极早产显著降低了全脑范围的功能连接强度，与既往fMRI研究[23-24]一致，提示过早脱离宫内环境可能影响神经网络的功能组装。Arimitsu等[25]指出胎龄是影响脑网络发育的关键因素，推测本研究中极早产儿的全脑连接减弱正是该关键发育过程被中断的体现。

在ROI水平上，极早产儿组与足月儿组之间存在显著的ROI功能连接强度差异。Basu等[26]发现早期早产儿额叶及基底节神经递质浓度异常，提示过早宫外暴露可能引起γ-氨基丁酸与谷氨酸系统紊乱；Gozdas等[5]发现早产儿额叶运动前区与认知控制区的功能整合已受损；Thomason等[27]提示早产对语言相关网络的损害在产前即已发生；王文君[28]发现早产会干扰额叶、顶叶等联合皮质发育。综上，涉及高级认知、语言与执行功能的核心皮层间连接在早期早产儿中尤为脆弱，为其语言发育迟缓等高发神经发育障碍提供了可能的

神经基础[29-32]。然而，Arimitsu等[25]指出早产儿连接降低具有区域特异性，且主要见于胎龄<30周的早产儿，而胎龄≥30周者连接强度反而更高，并归因于出生后年龄增长及宫外环境的积极影响[33-35]。上述差异可能源于样本特征、胎龄分组、校正年龄、设备及分析方法等因素。本研究结果与多数证据共同表明，早产（尤其是早期早产）可显著影响脑功能网络的协同发育。

综上，基于fNIRS的静息态脑网络分析有助于识别极早产儿脑功能连接异常，为早期筛查提供了客观可行的新手段。需强调，尽管早产是神经发育风险的重要因素，但出生后环境与经验依赖的神经可塑性仍为干预提供了关键时间窗[36]。因此，即使影像学上无明显结构性损伤的早产儿，也应根据其脑功能特征进行系统随访，并实施循证早期干预，以改善其神经发育结局。

本研究存在一定局限性：（1）样本量有限，且未能实现所有婴儿在完全相同的校正胎龄点采集数据，亦未纳入超早产儿，未来需大样本、全脑覆盖的纵向研究验证；（2）“无脑损伤”的定义主要依赖结构MRI，未来应整合产前及围产期高危因素病史及行为学等多维度评估，以更全面地表征新生儿神经发育状态。

作者贡献声明：吴蕴、朱晓芸、孟凡喆、高和荣、曹佳燕和金志萍负责数据收集；吴蕴、汪军和骆丹丹负责数据分析及论文撰写；汪军、杨红和周浩负责基金支持、研究指导、论文修改及审核。

利益冲突声明：所有作者均声明无利益冲突。

［参　考　文　献］

[1] 史玮炀, 贝斐. 早产对大脑结构和功能连接影响的研究进展[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2021, 27(2): 166-170. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5741.2021.02.017.

[2] Cheong JL, Doyle LW, Burnett AC, et al. Association between moderate and late preterm birth and neurodevelopment and social-emotional development at age 2 years[J]. JAMA Pediatr, 2017, 171(4): e164805. PMID: 28152144. DOI: 10.1001/jamapediatrics.2016.4805.

[3] Wallois F, Moghimi S. Revisiting the functional monitoring of brain development in premature neonates. A new direction in clinical care and research[J]. Semin Fetal Neonatal Med, 2024, 29(4-5): 101556. PMID: 39528364. DOI: 10.1016/j.siny.2024.101556.

[4] Rogers EE, Hintz SR. Early neurodevelopmental outcomes of extremely preterm infants[J]. Semin Perinatol, 2016, 40(8): 497-509. PMID: 27865437. DOI: 10.1053/j.semperi.2016.09.002.

[5] Gozdas E, Parikh NA, Merhar SL, et al. Altered functional network connectivity in preterm infants: antecedents of cognitive and motor impairments?[J]. Brain Struct Funct, 2018, 223(8): 3665-3680. PMID: 29992470. PMCID: PMC6892636. DOI: 10.1007/s00429-018-1707-0.

[6] Wolf M, Wolf U, Toronov V, et al. Different time evolution of oxyhemoglobin and deoxyhemoglobin concentration changes in the visual and motor cortices during functional stimulation: a near-infrared spectroscopy study[J]. Neuroimage, 2002, 16(3 Pt 1): 704-712. PMID: 12169254. DOI: 10.1006/nimg.2002.1128.

[7] Duan L, Zhang YJ, Zhu CZ. Quantitative comparison of resting-state functional connectivity derived from fNIRS and fMRI: a simultaneous recording study[J]. Neuroimage, 2012, 60(4): 2008-2018. PMID: 22366082. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2012.02.014.

[8] Pavlek LR, Mueller C, Jebbia MR, et al. Near-infrared spectroscopy in extremely preterm infants[J]. Front Pediatr, 2021, 8: 624113. PMID: 33553078. PMCID: PMC7859523. DOI: 10.3389/fped.2020.624113.

[9] 贾爱庆, 刘志. 近红外光谱技术在急危重症患者中的研究进展[J]. 医学综述, 2021, 27(10): 2004-2008. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2084.2021.10.024.

[10] 刘敬, 杨于嘉, 封志纯. “早产儿脑损伤诊断与防治专家共识”解读[J]. 中国当代儿科杂志, 2012, 14(12): 885-887. PMID: 23234770.

[11] Xu J, Liu X, Zhang J, et al. FC-NIRS: a functional connectivity analysis tool for near-infrared spectroscopy data[J]. Biomed Res Int, 2015, 2015: 248724. PMID: 26539473. PMCID: PMC4619753. DOI: 10.1155/2015/248724.

[12] Xia M, Wang J, He Y. BrainNet viewer: a network visualization tool for human brain connectomics[J]. PLoS One, 2013, 8(7): e68910. PMID: 23861951. PMCID: PMC3701683. DOI: 10.1371/journal.pone.0068910.

[13] Strangman G, Culver JP, Thompson JH, et al. A quantitative comparison of simultaneous BOLD fMRI and NIRS recordings during functional brain activation[J]. Neuroimage, 2002, 17(2): 719-731. PMID: 12377147. DOI: 10.1006/nimg.2002.1227.

[14] Sultana S, Horiuchi S, Homer CS, et al. The prevalence of long-term neurodevelopmental outcomes in preterm-born children in low- and middle-income countries: a systematic review and meta-analysis of developmental outcomes in 72 974 preterm-born children[J]. J Glob Health, 2025, 15: 04106. PMID: 40181744. PMCID: PMC11969289. DOI: 10.7189/jogh.15.04106.

[15] Ibrahim H, Wilkins A, Ali SA, et al. Narrative review of neurodevelopmental and psychiatric complications associated with prematurity[J]. BMC Pediatr, 2025, 25(1): 933. PMID: 41239334. PMCID: PMC12619160. DOI: 10.1186/s12887-025-06306-z.

[16] Serenius F, Abrahamsson T, Ådén U, et al. Neurodevelopmental

outcomes 12 years after extremely preterm birth in Sweden[J]. Pediatrics, 2026, 157(3): e2025073742. PMID: 41638598. DOI: 10.1542/peds.2025-073742.

[17] Cheong JLY, Mainzer RM, Doyle LW, et al. Neurodevelopment at age 9 years among children born at 32 to 36 weeks' gestation [J]. JAMA Netw Open, 2024, 7(11): e2445629. PMID: 39556392. PMCID: PMC11574691. DOI: 10.1001/jamanetworkopen.2024.45629.

[18] 杨红, 邵肖梅. 全身运动质量评估[J]. 中国循证儿科杂志, 2007, 2(2): 138-143. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5501.2007.02.009.

[19] Kapil N, Majmudar-Sheth B, Escapita AC, et al. Unveiling the immediate impact of Prechtl's General Movement Assessment training on inter-rater reliability and cerebral palsy prediction[J]. NeuroSci, 2024, 5(3): 244-253. PMID: 39483282. PMCID: PMC11469738. DOI: 10.3390/neurosci5030019.

[20] López-Guerrero N, Alcauter S. Developmental trajectories and differences in functional brain network properties of preterm and at-term neonates[J]. Hum Brain Mapp, 2025, 46(1): e70126. PMID: 39815687. PMCID: PMC11735747. DOI: 10.1002/hbm.70126.

[21] Mousley A, Akarca D, Astle DE. Premature birth changes wiring constraints in neonatal structural brain networks[J]. Nat Commun, 2025, 16(1): 490. PMID: 39779695. PMCID: PMC11711473. DOI: 10.1038/s41467-024-55178-x.

[22] Hu H, Coppola P, Stamatakis EA, et al. Typical and disrupted small-world architecture and regional communication in full-term and preterm infants[J]. PNAS Nexus, 2025, 4(2): pgaf015. PMID: 39931103. PMCID: PMC11809590. DOI: 10.1093/pnasnexus/pgaf015.

[23] Doria V, Beckmann CF, Arichi T, et al. Emergence of resting state networks in the preterm human brain[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2010, 107(46): 20015-20020. PMID: 21041625. PMCID: PMC2993415. DOI: 10.1073/pnas.1007921107.

[24] Bouyssi-Kobar M, De Asis-Cruz J, Murnick J, et al. Altered functional brain network integration, segregation, and modularity in infants born very preterm at term-equivalent age [J]. J Pediatr, 2019, 213: 13-21. PMID: 31358292. PMCID: PMC6765421. DOI: 10.1016/j.jpeds.2019.06.030.

[25] Arimitsu T, Shinohara N, Minagawa Y, et al. Differential age-dependent development of inter-area brain connectivity in term and preterm neonates[J]. Pediatr Res, 2022, 92(4): 1017-1025. PMID: 35094022. PMCID: PMC9586860. DOI: 10.1038/s41390-022-01939-7.

[26] Basu SK, Pradhan S, Sharker YM, et al. Severity of prematurity and age impact early postnatal development of GABA and glutamate systems[J]. Cereb Cortex, 2023, 33(12): 7386-7394. PMID: 36843135. PMCID: PMC10267637. DOI: 10.1093/cercor/bhad046.

[27] Thomason ME, Scheinost D, Manning JH, et al. Weak functional connectivity in the human fetal brain prior to preterm birth[J]. Sci Rep, 2017, 7: 39286. PMID: 28067865. PMCID: PMC5221666. DOI: 10.1038/srep39286.

[28] 王文君. 早产儿在校正胎龄足月时与正常足月新生儿大脑皮质的发育差异[D]. 济南: 山东大学, 2020.

[29] Lee JY, Park HK, Lee HJ. Accelerated small-world property of structural brain networks in preterm infants at term-equivalent age[J]. Neonatology, 2019, 115(2): 99-107. PMID: 30384384. DOI: 10.1159/000493087.

[30] 刘芳, 张文柳, 谭丽俊, 等. 早产对婴幼儿早期语言、睡眠及认知发育影响的探讨[J]. 中国中西医结合儿科学, 2021, 13(6): 461-464. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3865.2021.06.001.

[31] Cho HJ, Jeong H, Park CA, et al. Altered functional connectivity in children born very preterm at school age[J]. Sci Rep, 2022, 12 (1): 7308. PMID: 35508563. PMCID: PMC9068715. DOI: 10.1038/s41598-022-11184-x.

[32] Scheinost D, Kwon SH, Lacadie C, et al. Prenatal stress alters amygdala functional connectivity in preterm neonates[J]. Neuroimage Clin, 2016, 12: 381-388. PMID: 27622134. PMCID: PMC5009231. DOI: 10.1016/j.nicl.2016.08.010.

[33] Ohlsson A, Aher SM. Early erythropoiesis-stimulating agents in preterm or low birth weight infants[J]. Cochrane Database Syst Rev, 2017, 11(11): CD004863. PMID: 29145693. PMCID: PMC6486170. DOI: 10.1002/14651858.CD004863.pub5.

[34] Caskey M, Stephens B, Tucker R, et al. Adult talk in the NICU with preterm infants and developmental outcomes[J]. Pediatrics, 2014, 133(3): e578-e584. PMID: 24515512. DOI: 10.1542/peds.2013-0104.

[35] King LS, Camacho MC, Montez DF, et al. Naturalistic language input is associated with resting-state functional connectivity in infancy[J]. J Neurosci, 2021, 41(3): 424-434. PMID: 33257324. PMCID: PMC7821865. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0779-20.2020.

[36] Pitcher JB, Schneider LA, Drysdale JL, et al. Motor system development of the preterm and low birthweight infant[J]. Clin Perinatol, 2011, 38(4): 605-625. PMID: 22107893. DOI: 10.1016/j.clp.2011.08.010.

（本文编辑：张辉）

（©《中国当代儿科杂志》编辑部，开放获取CC BY-NC-ND 4.0协议）
（© Editorial Office of *Chinese Journal of Contemporary Pediatrics*. OA under CC BY-NC-ND 4.0 license）