从局部耦合到全局协同：脑-心肺轴框架下运动功能的多系统耦合机制

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/42996.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

从局部耦合到全局协同：脑-心肺轴框架下运动功能的多系统耦合机制。运动功能看似是肌肉与骨骼的独角戏，实则其每一次实现都离不开神经系统与心肺循环系统的支持，是一场多系统精密协作的交响乐。

近日，中国科学院深圳先进技术研究院方鹏研究员、李光林研究员团队联合康复大学、美国迈阿密大学团队在中国工程院Engineering集群分刊ENGINEERING Health and Rehabilitation Engineering上发表题为The Coupling Behaviors Between Nervous and Cardiopulmonary Circulation Systems Underlying Motor Function: A Review的综述论文。

该文系统梳理了运动过程中神经-血管耦合、神经-心脏耦合、神经-肺（呼吸）耦合的三重机制，并提出脑-
心肺轴概念，为运动康复从单系统修补转向多系统协同干预提供了整合性的理论框架。

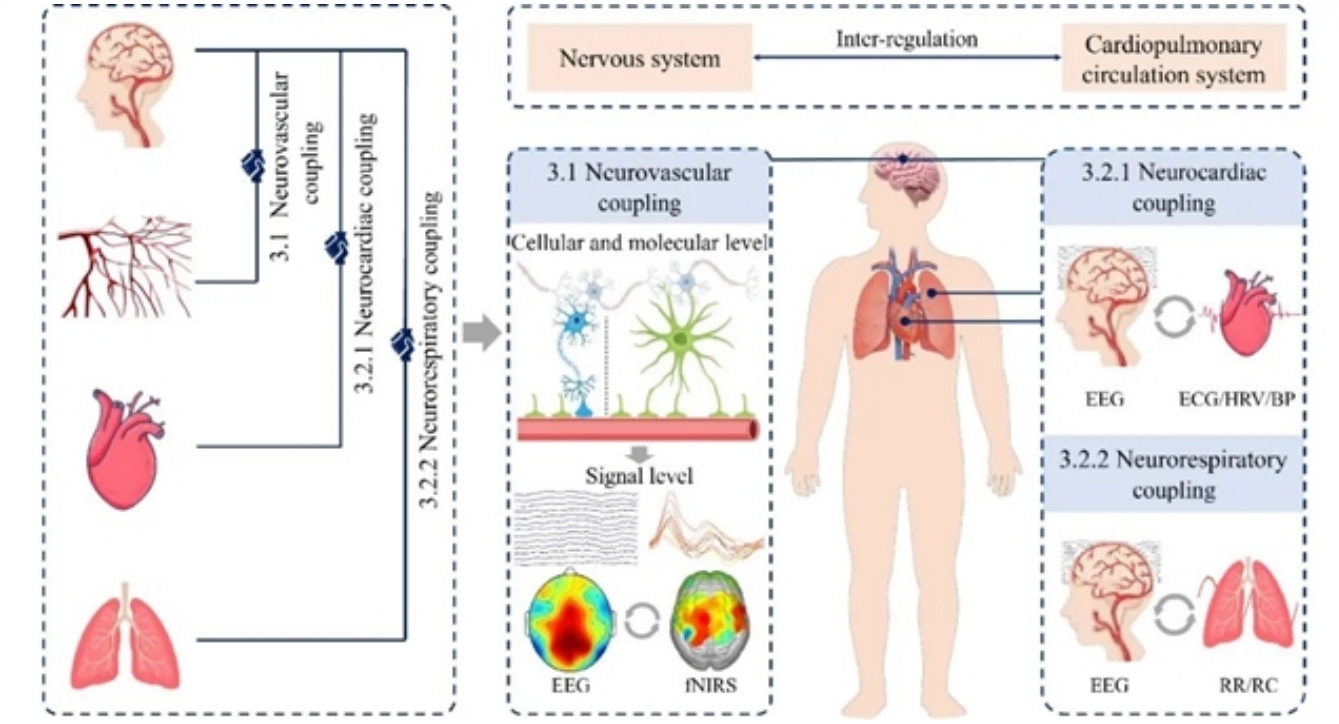


图1.多系统耦合关系及本文内容结构

从神经肌肉到脑-心肺轴

长期以来，运动功能研究主要围绕神经肌肉系统的交互作用展开，而对心肺循环系统这一幕后供给线作用的探讨仍相对有限。事实上，每一次肢体动作都伴随着脑区神经电活动的爆发，而这片兴奋的神经火海需得到局部脑血流和全身氧供的及时补给，否则运动将难以为继。考虑到运动过程中神经与心肺循环系统间的互作与协同关系，本综述提出脑-心肺轴这一理论框架，从整体视角研究神经系统与心肺循环系统间的相互作用，将大脑、心脏、肺脏和循环系统视为一个相互通讯的闭环，强调运动既需要自上而下的指令驱动，也离不开自下而上的信号反馈。

三重耦合：局部与全局的有效协同

该综述的核心贡献在于划分了运动功能中神经系统与心肺循环系统耦合的两大维度以及三种形式。

1.局部尺度的神经-血管耦合

在细胞分子层面，代谢反馈与非代谢前馈两种假说的交锋与融合构成了NVC机制讨论的主线。前者认为神经元活动产生的代谢副产物（如CO2、乳酸）可诱导血管舒张、脑血流增加，后者则主张脑血流的增加可由神经活动本身触发，而非继发于能量消耗后产生的代谢产物。此外，近期研究还发现了反向的血管-
神经元耦合——血管张力变化反过来调节神经元活动，提示这种相互作用是双向的。

在信号层面，脑电图-功能性近红外光谱（EEG-fNIRS）同步记录显示，运动时alpha和beta节律的幅值降低（即事件相关去同步化）与氧合血红蛋白浓度上升相伴而行。基于传递熵等特征的信息论方法则揭示了神经活动与血流动力学变化间存在双向信息传递，且从血流动力学变化信息向神经活动信息方向的传递熵显著强于反向传递熵。相较前额叶区域，这种方向性耦合在运动皮层区域更为显著。

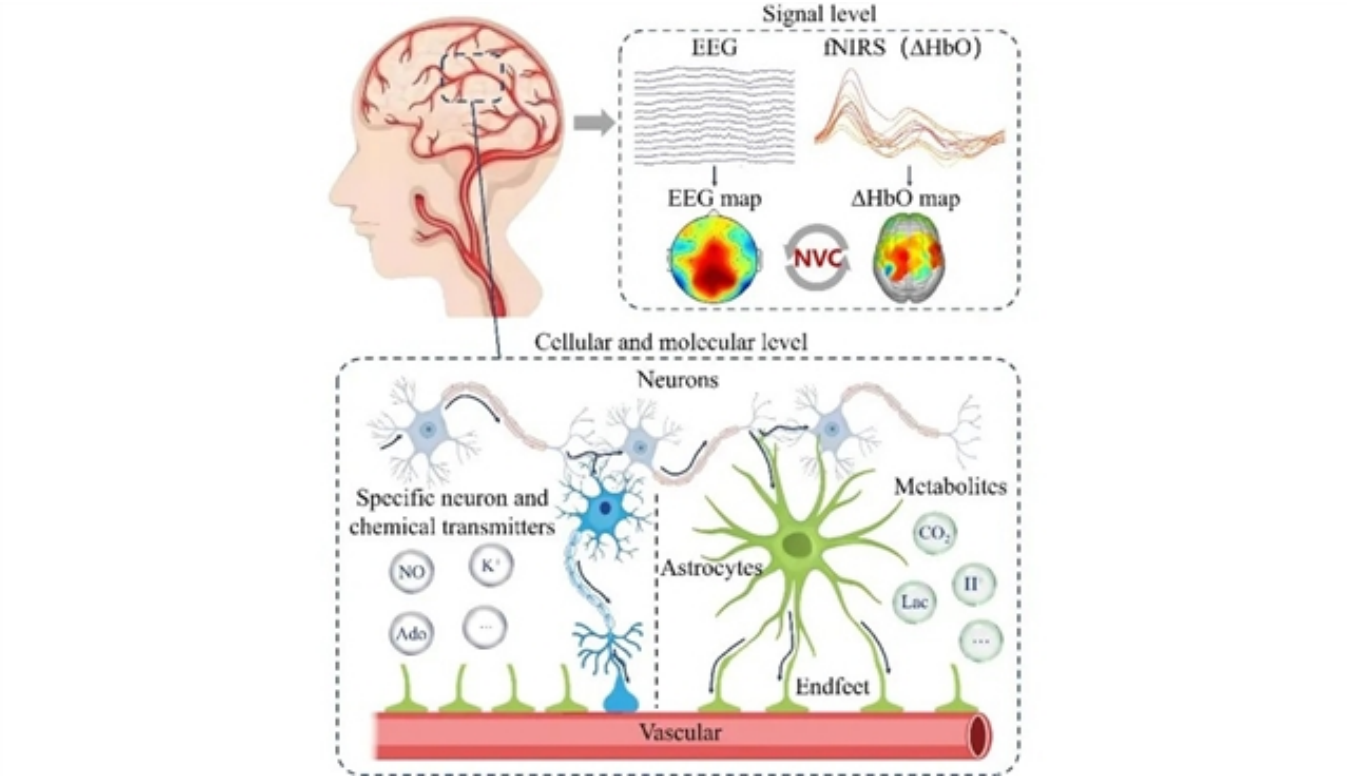


图2.细胞分子水平与信号水平的神经-血管耦合

2.全局尺度的神经-心脏耦合与神经-肺（呼吸）耦合

运动时，中枢神经系统通过自主神经网络对心血管与肺进行前馈调节，提高心率、心输出量和呼吸频率等心肺指标，外周的压力感受器、化学感受器等则持续监测血压、血氧和二氧化碳等指标并反馈至中枢神经系统，二者协同作用使心血管和呼吸反应与代谢需求相匹配。另一方面，心肺系统通过心脏搏动和呼吸形成的内源性生理节律，影响神经系统兴奋性。如在心脏收缩期皮层兴奋性更强（相较于舒张期），使手部肌肉激活程度增加；主动深呼吸条件下则能够显著提高运动诱发电位幅值并缩短潜伏期。这意味着心肺系统不仅为运动功能提供必要的代谢底物与氧气支持，更是参与运动功能调节的重要组成部分。

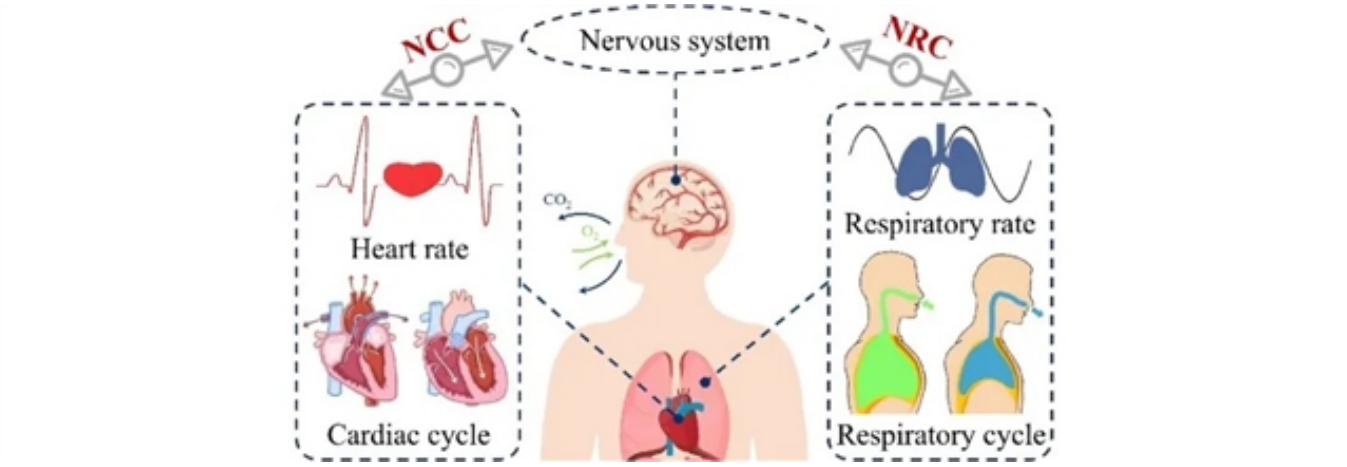


图3.神经系统与心肺循环系统之间的全局双向调节

多系统耦合的瓶颈与突破

脑-心肺轴框架为理解运动过程中的多系统交互提供了新的视角，但仍有四大瓶颈亟待突破。

1.神经与心肺循环系统耦合的神经环路研究仍处于探索阶段，不同脑区间的信息传递路径、功能分工及其协同模式仍如黑箱。

2.多模态信号采集的时-
空同步性不足，传统线性分析方法难以有效捕捉多系统间的非线性耦合特征。

3.现有模型多局限于两两耦合（如仅包含脑-心或脑-
血管耦合），缺乏同时容纳神经心肺循环系统的多维度动态耦合模型。

4.临床转化滞后，目前康复评估仍依赖单系统指标，缺乏反映跨系统整合功能的定量耦合指数。

从局部修补到全局重构

本文提出的脑-心肺轴框架，为运动康复从单系统干预转向多系统整合，提供了一种新的认知视角。这提醒我们，一位卒中患者的步行障碍，可能不仅是皮质脊髓束损伤的问题，还可能涉及神经-血管反应的不对称、心脏自主调节的紊乱、呼吸-运动协调的失序。因此，未来的精准康复不应只关注神经传导恢复，还应重视心肺循环功能的改善，以及心肺节律与神经振荡的再同步。这种系统整合思维有望推动新的多模态生物标志物的构建，并指导个体化的多维度协同干预，从而提升康复治疗的效果与效率。（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：https://journal.hep.com.cn/ehre/EN/10.2738/ENGHRE.2026.0002

作者：方鹏 等 来源：《工程 · 健康与康复工程》

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发