

自由词序、丰富格标记与大脑可塑性：德语句法与脑卒中后网络重组

王志轩 李林宣 宋昀锟

1 英国伦敦帝国理工学院，伦敦英国，SW7 2AZ；

2 广东外语外贸大学，广东广州，510000；

3 深圳市赛德教育学院，广东深圳，510000；

摘要：德语具有灵活的词序和丰富的格标记，这使形态-句法分析和工作记忆的负荷增加。本综述汇总了 2021 年至 2025 年的神经影像和临床证据，探讨这些语言压力如何既与成年人大脑语言连接组的组织结构相关，又与其在左侧外侧裂区卒中后的重新组织有关。扩散磁共振成像和基于 *fixel* 的分析结果一致显示，德语使用者的背侧额-颞-顶叶通路得到加强，特别是弓状束和上纵束。任务态和静息态 fMRI 显示，在句法挑战下左侧下额回有强烈参与，并且随着句法负荷增加，域通用网络和右半球网络亦协同合作。在失语症中，背侧纤维的完好预示非典型语序句子理解能力的恢复；当这些通路受损时，右半球同源区和胼胝体跨半球桥接的代偿招募能够支撑剩余的语法功能。纵向研究表明，语言治疗可以减轻卒中后纤维束萎缩、提高网络效率，而靶向未受损节点的无创神经调控手段能够进一步增强这些收益。我们认为，语言类型学是神经可塑性轨迹的重要调节因素，应指导评估、预后和干预。将类型学特征整合到针对德语（以及推而广之其他形态句法丰富语言）的精准康复中，为取得更佳疗效提供了有原则的途径，同时更清晰地解释了环境语言需求如何塑造成人大脑的连接组。

关键词：德语句法；自由词序；格标记；神经可塑性；弓状束；卒中后失语症；功能连接；扩散磁共振成像

DOI：10.69979/3029-2808.25.08.059

引言

德语的语法结构具有自由的词序和丰富的格标记，与英语等固定词序语言形成鲜明对比。德语名词短语带有格标记（如主格、宾格、与格），因此主语和宾语的角色不依赖词序即可识别；这使句子可以在不改变核心意义的情况下变换顺序。“Der Hund beißt den Mann” 和 “Den Mann beißt der Hund” 两个句子在格标记 “den”的提示下含义相同，其中冠词 “den” 标明 “Mann” 是宾语，无论其在句中位置如何。这些特征使德语句法处理负荷增大：理解者必须迅速解码形态线索（如格词尾）并将其映射到句法角色上；当遇到非常规（非主语开头）的词序时，大脑需要利用这些线索打破默认的主-谓-宾解析策略。研究表明，这种加工调用了一组脑区网络，涉及句法解析、形态处理和记忆等功能。左侧额叶皮层（主要是额下回，Broca 区）和左侧颞顶区域对句子结构分析至关重要。在德语这种允许多种词序的语言中，句法运算对这些脑区的依赖更为突出：健康德语使用者在处理非典型词序或长距离依存时左侧 BA44 高度激活，显示其在组织、重排句子成分以提取句意方面的重要作用。

同时，这类句子的工作记忆需求（如动词出现前保持主语）会动员左侧背外侧前额叶（如额下沟）和辅助运动区。左侧颞上回 (STG) 及外侧裂周围区域则参与将单词归类为语法范畴并逐步构建句法结构；由于德语依赖格标记，左前颞上回被认为能够快速识别 “den” 这样的宾格冠词并提示名词短语的句法角色，将此信息传递到更广泛的网络中用于结构构建。

德语句法并不意味着理解时可以忽略语义或常识；相反，它提供多重线索（词序、形态、有生性等）供大脑综合利用。德语听者在理解句子时会同时结合格标记和典型词序预期来解析。心理语言学研究表明，脑损伤导致的失语症可以选择性破坏这些过程。德语的 Broca 型失语症患者（常见于左额下回等处损伤）在理解非常规词序句子时尤其困难，因为他们无法充分利用格标记，而倾向于默认将首个名词视为主语。即使存在明显的格提示，这类语法缺损患者也难以正确赋予名词应有的句法角色，对复杂句子的理解往往近乎猜测。跨语言研究表明，有格标记语言的失语症患者经常忽视词序变化且未能充分受益于形态线索，反而倾向套用默认的 SVO 顺序或依赖语义常识进行猜测。这一现象强调形态-句法

处理具有独特的神经基础，脑损伤可选择性削弱这种能力：德语失语症患者往往无法正确理解或使用格标记。在不同语言中，失语症症状的表现形式也各不相同。这些差异说明大脑的语言处理策略可能因语言而异：德语使用者的大脑必须更强烈地支持形态句法和灵活词序的处理，因此可能发展出更具韧性或更分散的语言网络。

1 神经影像学证据

1.1 结构与连接

研究证实母语特征会塑造大脑连通性。一项比较德语和阿拉伯语母语者的扩散 MRI 研究发现，两种语言的白质网络差异显著：德语使用者左半球背侧额-颞-顶叶通路（通过弓状束、SLF 等连接 Broca 区与后部颞叶）内的半球内连通性更强，支持复杂词序和层级句法处理；而阿拉伯语使用者在腹侧语义通路的区域连通以及通过胼胝体的半球间连通上更突出。这表明德语复杂的句法需求促使大脑强化左侧背侧通路来处理灵活词序，而另一种语言则动员不同的网络。

大量卒中后失语症的 DTI 研究也显示出共性：左侧弓状束的完整性越高，失语症程度往往越轻，句法和复述能力的恢复越好。急性期左侧 SLF 和弓状束的 DTI 参数甚至可以预测数月后的语言能力。如果早期扫描显示关键通路几乎完全中断，预示复杂句法恢复的可能性很小，治疗应侧重培养替代理解策略；相反，若大部分纤维束完好，则积极的语言治疗有望帮助患者重新获得接近正常的句法理解和产出能力。

1.2 高级扩散分析

由于 DTI 难以分辨交叉纤维区域的损伤，出现了基于 pixel 的分析 (FBA) 等更精细的扩散 MRI 方法。FBA 可在单个体素内同时建模多条纤维走向，提供纤维密度 (FD) 和纤维横截面积 (FC) 等指标，从而判断交织纤维束各自的损伤情况。应用 FBA 揭示了更具体的结构-功能关联：例如，有研究发现卒中失语症患者左侧弓状束、SLF III 和额枕下束 (IFOF) 的纤维密度相较健康对照显著降低——这些背侧和腹侧通路正分别支撑句法解析和语义处理。进一步分析表明：左侧 IFOF 纤维密度的下降与句子理解障碍密切相关（说明语义整合需要该腹侧通路完整）；命名能力与 IFOF 和钩状束的完整性相关（词汇检索依赖腹侧语义通路）；句子理解成绩也和左侧 SLF III 的纤维密度呈正相关（该背侧通路参与复杂句法处理）。由此可见，失语症至少部分源于左半球语言网络中关键纤维束的大量轴突丧失，这种断

连效应超出了皮层损伤本身的影响。纵向 FBA 研究还发现卒中后某些白质束会持续萎缩，意味着康复窗口可能随着未用纤维的退变而缩窄；若残余纤维保持完好，它们即可作为康复训练的重要基础。

1.3 功能连接

功能性 MRI 等描绘了大脑活动和网络特性。任务态 fMRI 显示，健康德语使用者在句法加工中左侧 IFG (Broca 区) 和左侧 STG 显著激活；但对失语症患者而言，静息态 fMRI 更易实施。通过测量静息时脑区 BOLD 信号的同步波动，可以评估脑功能连接强度。研究发现，左半球腹侧语言网络（连接额叶和颞叶的语义通路）的剩余功能连接水平是失语症患者语言理解能力的有力预测指标，甚至胜过病灶体积等结构因素。这意味着，即使语言中枢区域部分存留，但如果它们彼此无法同步协作，患者仍然难以理解句子。该发现促使人们探索提高网络同步性的干预措施，例如使用脑刺激或专门训练来重建相关脑区的协同活动。

2 临床应用

2.1 评估与预后

针对德语失语症的评估需要考虑语言特性。许多标准失语症评估量表基于英语设计，可能无法充分捕捉德语患者的句法缺陷。因此应增加针对德语语法的测试，如考查格标记和非常规词序理解的图片匹配题，要求患者运用从句和正确的动词词形等，以揭示其在德语特有语法上的障碍。治疗师还应特别留意患者对被动句和乱序句的理解、名词格尾的运用情况，这有助于辨别句法缺损还是言语运动方面的问题，从而制定针对性方案。预后方面，左侧背侧白质通路（如 SLF 和弓状束）的完整性被证实与句法功能恢复密切相关，而胼胝体中连接语言区的纤维是否完好则影响右半球代偿的潜力。此外，大型数据分析表明，将病灶因素和网络指标结合比单看病灶更准确地预测失语症患者的康复前景；例如，基线静息态网络效率可提示患者对语言训练的反应强弱。这类“连接组”预后方法有望帮助临床制定更切合实际的康复目标和策略。

2.2 治疗策略调整

德语失语症康复在遵循通用原则（高频练习、多感官提示、强调有意义交流）的同时，需针对德语句法和形态特点做适当调整。例如，在句子产生训练中加入词序灵活性练习：先让患者说出常规语序句子“Der Junge schreibt einen Brief.”，然后引导其将宾语置于句

首，造出变体句“Einen Brief schreibt der Junge.”，借助格标记来维持句意不变，以训练患者理解和产出非常规语序的能力。又如，通过“映射疗法”等手段强化患者对名词格尾提示的注意：利用彩色卡片或图示帮助其把句子中“谁对谁做了什么”的成分对应起来，练习根据格变化解读句法角色，从而改善对非典型句型的理解与表达。随着患者在语法任务上取得进步，其大脑往往能找到替代途径来承担原受损区域的功能（例如调动右侧同源区参与）。此外，可在康复过程中辅以无创脑刺激手段以放大训练收益：左半球损伤严重的患者通过对右侧额叶施加阳极 tDCS 等，可以激发右侧语言网络的代偿潜能；而左侧残余网络有望恢复的患者，适度抑制右半球过强的活动（如施加右侧阴极 tDCS）则有利于解除对左侧功能的抑制。研究和 Meta 分析支持这种根据损伤程度分层的刺激策略。还有研究正探索刺激小脑以改善言语的流畅性，以及使用多巴胺或去甲肾上腺素类药物来提高大脑可塑性，但这些方法尚需进一步验证。

2.3 语言特性融入康复

德语复杂的语法既给康复带来挑战，也提供了冗余线索可供利用。治疗中应指导患者善用德语提供的各种线索：如果患者难以说出完整句子，可先训练他们确保动词和主语具有正确的屈折形式——这往往足以让听者理解时态和施事等主要信息；如果患者理解长句有困难，则教他们优先抓取句首名词的冠词形式（如“Der...”通常表示主格主语，“Den...”表示宾格宾语），以快速判断句子的主宾关系。这些策略直接源于德语的结构特点，能帮助患者用尚存的能力尽量弥补句法解析的不足。此外，康复材料也要贴近患者的语言环境。例如，应包含德语中特有的可分前缀动词练习（确保患者听到如“Ich rufe dich an”此类句子时能意识到句末的“an”是动词前缀），以免他们在真实交流中遇到类似结构时不知所措。照护者的配合同样重要——应建议家属尽量使用简单、常规的主-谓-宾语序与患者交流，必要时通过重读来强调主语或宾语，不随意颠倒词序，从而降低患者理解的难度。如果患者因为语法错误一时难以被理解，应鼓励家人更多地依据语境和关键词去猜测其意图，而不过分纠结于语法上的完美。这种沟通方式的调整能减少双方的挫败感，增加患者开口交流的信心，从而促进语言功能的恢复。

3 未来方向

未来，神经语言学与临床神经科学的融合将推动更精准的康复。首先，可在治疗前为每位失语症患者绘制

其“语言网络图谱”，将针对其母语的语言评估与脑影像结果相结合，确定其独特的保留与受损通路组合。据此制定个性化方案：对大脑已自发重组较好的功能安排较轻的训练，而对网络恢复滞后的方面加强练习，并考虑辅以脑刺激等手段。其次，建议将“神经可塑性教育”引入康复过程。向患者适度讲解大脑重组语言功能的潜力（例如告诉他们“你的大脑还有备用通路可以帮助你理解语法，我们会一起来训练它”），能够提高他们的主动性和坚持治疗的信心。了解到成年人大脑依然能够重新连线，患者往往会更加积极地配合长期训练。临床医生也可据最新证据鼓励患者：即使卒中发生数月之后，坚持练习仍能加强大脑中某些连接——成像研究表明，康复训练甚至可以改善白质的微观结构。这种对于可塑性的认识将帮助患者和家属树立信心，推动康复之旅不断前行。

4 结论

德语灵活的词序和丰富的格标记为探究语言结构与大脑结构如何交织提供了理想范例。证据表明，德语使用者的大脑为了满足本语言的句法需求，发展出强化的左半球背侧网络和相应的处理策略。这种母语特有的神经适应也深刻影响了左侧语言区卒中后的恢复轨迹。当左侧语言网络受损时，大脑的可塑性反应具有多层次的代偿——既尝试修复受损网络，又动员同源区补偿，并调整对语言线索的依赖。德语失语症患者证明了大脑的变通能力：有些患者能够依靠格标记和上下文来弥补词序处理能力的丧失，另一些则将语言任务重分配给右半球或其他备用通路。影像研究显示：有效康复常伴随关键白质通路连通性的保留或重建；即使在慢性期，训练下大脑仍可发生显著的结构与功能重组。临幊上应结合网络视角和语言视角指导干预。前者强调恢复语言需重建整个网络的运作，后者指出不同语言的最优网络配置各有差异——因此基于英语的疗法在德语患者身上需要调整。融合这两种视角才能实现真正的个体化：治疗方案既取决于患者的病灶情况，也须考虑其母语特征。

尽管仍有许多谜团未解，现有证据已令人振奋：成人大脑依然具有惊人的可塑潜能——卒中不是终点，而是重启语言学习的起点。正如德语格标记使打乱的句子仍可理解，卒中后大脑即使原有“句法”结构受损，也能通过新路径重建意义和交流。通过跨学科的合作，我们正学习如何帮助大脑重拾语言能力。这不仅改善了德语失语症患者的康复前景，也为不同语言的语言治疗带来了新的启示。

参考文献

- [1]Beber, S., Bontempi, G., Miceli, G., & Tettamanti, M. (2024). The neurofunctional correlates of morphosyntactic and thematic impairment in aphasia: A systematic review and meta-analysis. *Neuropsychology Review*, 34(4), 769 - 793. <https://doi.org/10.1007/s11065-024-09648-0>.
- [2]Braun, E. J., Braley, A., Mashima, P., et al. (2022). White matter microstructural integrity pre- and post-treatment in individuals with chronic post-stroke aphasia. *Brain and Language*, 222, 105008. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2021.105008>.
- [3]Chen, X., Chen, L., Zheng, S., et al. (2021). Disrupted brain connectivity networks in aphasia revealed by resting-state fMRI. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 13, 666301. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2021.666301>.
- [4]Egia-Zabala, M., & Munarriz-Ibarrola, A. (2024). Language diversity and bi/multilingualism in aphasia research. *Languages*, 9(10), 325. <https://doi.org/10.3390/languages9100325>.
- [5]Egorova-Brumley, N., Khelif, M. S., Werden, E., Bird, L., & Brodtmann, A. (2022). Grey and white matter atrophy 1 year after stroke aphasia. *Brain Communications*, 4(2), fcac061. <https://doi.org/10.1093/braincomms/fcac061>.
- [6]Falconer, I., Varkanitsa, M., & Kiran, S. (2024). Resting-state brain network connectivity is an independent predictor of responsiveness to language therapy in chronic post-stroke aphasia. *Cortex*, 173, 296 - 312. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2023.11.022>.
- [7]Kourtidou, E., Kasselimis, D., Angelopoulou, G., et al. (2021). The role of the right hemisphere white matter tracts in chronic aphasic patients after damage of the language tracts in the left hemisphere. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, 635750. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.635750>.
- [8]MacWhinney, B., Osmá n-Sági, J., & Slobin, D. I. (1991). Sentence comprehension in aphasia in two clear case-marking languages. *Brain* and *Language*, 41(2), 234 - 249. [https://doi.org/10.1016/0093-934X\(91\)90154-S](https://doi.org/10.1016/0093-934X(91)90154-S).
- [9]Pregla, D., Lissón, P., Vasishth, S., Burchardt, F., & Stadie, N. (2021). Variability in sentence comprehension in aphasia in German. *Brain and Language*, 222, 105008. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2021.105008>.
- [10]Stockbridge, M. D., Faria, A. V., Fridriksson, J., Rorden, C., & Bonilha, L. (2023). Subacute aphasia recovery is associated with resting-state connectivity within and beyond the language network. *Annals of Clinical and Translational Neurology*, 10(9), 1525 - 1532. <https://doi.org/10.1002/acn3.51842>.
- [11]Wei, X., Adamson, H., Schwendemann, M., Goucha, T., Friederici, A. D., & Anwander, A. (2023). Native language differences in the structural connectome of the human brain. *NeuroImage*, 270, 119955. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2023.119955>.
- [12]Yeo, S. S., & Choi, E. B. (2022). Diffusion tensor tractography studies on recovery mechanisms of aphasia in stroke patients: A narrative mini-review. *Brain Sciences*, 12(11), 1468. <https://doi.org/10.3390/brainsci12111468>.
- [13]Yourganov, G., Keator, L. M., Basilakos, A., et al. (2021). Independent contributions of structural and functional connectivity to spoken language in post-stroke aphasia. *Network Neuroscience*, 5(4), 911 - 928. https://doi.org/10.1162/netn_a_00207.
- [14]Zettin, M., Bondesan, C., Nada, G., & Dimitri, D. (2021). Transcranial direct-current stimulation and behavioral training, a promising tool for a tailor-made post-stroke aphasia rehabilitation: A review. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, 769185. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2021.769185>.
- [15]Zhang, J., Zheng, W., Shang, D., et al. (2021). Fixel-based evidence of microstructural damage in crossing pathways improves language mapping in post-stroke aphasia. *NeuroImage: Clinical*, 31, 102774. <https://doi.org/10.1016/j.nic.2021.102774>.