

## 综述

# 抽象概念语义表征的认知神经基础研究

王晓莎<sup>1,2</sup>, 毕彦超<sup>1,2,\*</sup>

北京师范大学<sup>1</sup>认知神经科学与学习国家重点实验室和IDG/麦戈文脑科学研究院; <sup>2</sup>神经影像大数据与人脑连接组学北京市重点实验室, 北京 100875

**摘要:** 抽象概念是人类概念系统的重要组成部分。随着脑功能影像技术的推广和广泛应用, 以具体的客体和动作概念为研究对象的概念神经基础研究取得了一系列重要进展, 但人脑表征和加工抽象概念的机制一直是个未解之谜。本文综述了抽象概念的认知理论和脑功能影像研究进展, 发现抽象概念可通过语言和潜在具身信息进行表征, 抽象概念的脑区基础与此认知框架有一定对应。未来研究需澄清语言和具身认知在抽象概念表征和加工的参与机制及其脑基础, 从而推动人脑概念系统和相关类脑研究的进展。

**关键词:** 抽象概念; 脑功能影像研究; 语言加工; 具身认知

**中图分类号:** B842; Q427

## The cognitive and neural bases of abstract concepts

WANG Xiao-Sha<sup>1,2</sup>, BI Yan-Chao<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>National Key Laboratory of Cognitive Neuroscience and Learning & IDG/McGovern Institute for Brain Research; <sup>2</sup>Beijing Key Laboratory of Brain Imaging and Connectomics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

**Abstract:** Words denoting abstract concepts constitute nearly half of human lexicon and serve as building blocks of the human culture. Since the advent of non-invasive neuroimaging techniques, great progress has been made in revealing the neurobiological foundation of concrete object and action concepts, yet it remains unclear how abstract concepts are stored and processed in the brain. Here we review recent development in this field, focusing on both theoretical perspectives and neuroimaging findings. We found that abstract concepts can be represented via linguistic and experiential information; the neural correlates of abstract concepts are partly in line with such a theoretical framework. Future studies are warranted to uncover the cognitive and neural mechanisms of language and experience in abstract word representation, which will help to deepen our understanding of general computational principles of the human conceptual system and to promote the development of the brain-like artificial intelligence.

**Key words:** abstract concepts; neuroimaging; language; embodied cognition

概念是人类关于周围世界一般知识的心理表征, 是人类以抽象化的方式, 透过外界事物或过程的表面现象所形成的对其本质特征的认识。作为认知系统的核心成分, 概念是人类知觉、学习、记忆、思维等多种高级认知功能的基础<sup>[1]</sup>。日常生活中, 正是基于已有的概念系统, 我们才能把对当前世界

的感知与过去的经验知识联系起来<sup>[2]</sup>, 从而完成识别、命名和使用周围的物体, 阅读或思考问题, 与他人交流, 计划未来等各种认知活动。概念系统一旦受损, 人类将无法对外界刺激做出正确的评估和反应, 并严重影响日常活动和社会功能<sup>[3]</sup>。

概念在人脑中是如何存储和加工的? 这一直是

Received 2018-05-02 Accepted 2018-07-23

Research from the corresponding author's laboratory was supported by grants from the National Natural Science Foundation of China (No. 31671128 and 31700943) and China Postdoctoral Science Foundation (No. 2017M610791).

\*Corresponding author. Tel: +86-10-58802911; E-mail: ybi@bnu.edu.cn

哲学、认知心理学以及认知神经科学关注的基本科学问题之一。以往关于概念的研究主要集中在具体的客体和动作概念上, 着重于探讨具体概念丰富的感知觉/运动特征与其语义表征之间的关系<sup>[4,5]</sup>。抽象概念是人类概念系统的重要组成部分, 是人类文化(包括科学、文学、宗教和艺术等)构建的基石。研究表明至少在英语中, 抽象词和具体词的使用频率是旗鼓相当的<sup>[6]</sup>。但我们对抽象概念的神经基础却“知之甚少, 即使从传统认知理论的角度也只是冰山一角”<sup>[7]</sup>。随着脑功能影像技术的进步和广泛应用, 近年来研究者围绕抽象概念的认知神经表征机制进行了深入探讨。本文将对抽象概念的认知理论进展进行简要介绍, 并对抽象概念加工的脑区基础进行梳理。

## 1 抽象概念表征的认知理论简述

人类关于外部环境的知识包含着各种各样的概念, 除了可被感觉(视、听、触、嗅等)通道直接感知的客体和动作概念(如“花瓶”、“握手”), 有很多知识不能简单还原到感知觉和运动经验上, 例如花瓶的功能知识(装饰环境), 握手的社交意图, 涉及多个人物角色及其互动的事件概念(如“会议”、“游戏”), 或者抽象思维概念(如“逻辑”)等。这些语义知识区别于那些与感知觉信息对应更为直接的具体概念知识(如花瓶的形状和颜色等), 伴随着对感知觉/运动经验依赖的逐渐减少, 组成了人脑概念系统的抽象部分。过去30年里, 研究者们对抽象语义知识的认知神经机制进行了多个角度的探讨, 如感知觉经验缺乏对具体概念的影响<sup>[8,9]</sup>, 具体概念的抽象功能知识<sup>[10,11]</sup>和比喻用法<sup>[12]</sup>等, 其中抽象词作为抽象语义知识的典型代表被广泛关注和研究。

抽象概念最初的研究兴趣有一定的哲学基础<sup>[13]</sup>, 实验研究始于20世纪60年代。大量实验发现了抽象概念(如“逻辑”)与具体概念(如“花瓶”)的加工差异, 主要表现为具体概念的加工成绩在词语识别、自由回忆等多种认知任务中优于抽象概念, 又称为具体优势效应(concreteness advantage effect); 这一效应在脑损伤患者中往往被放大, 例如失语症和深层失读症患者加工抽象概念时正确率显著低于具体概念<sup>[14]</sup>。也有病案研究报道了反具体优势效应(reverse concreteness advantage effect), 即抽象概念加工能力相对完好, 具体概念则明显受损<sup>[15–21]</sup>。这

一双分离现象表明抽象概念与具体概念的神经机制可能是有区别的。针对抽象概念与具体概念的加工差异, 研究者们提出了多种认知理论<sup>[22,23]</sup>, 其中双重编码(dual coding)、语境有效性(context availability)和表征结构差异(differential representational framework)等理论侧重从表征方式和/或动态加工等方面进行解释, 尤其是双重编码理论强调语言信息在抽象概念表征中的核心作用, 而具身认知表征理论(embodied cognition)则额外强调剖析抽象概念本身的语义内容。现将各个理论简要综述如下。

### 1.1 双重编码理论

双重编码理论是解释抽象和具体概念差异的最有影响力的理论之一, 用于解释学习记忆等多类任务的行为表现<sup>[24,25]</sup>。该理论认为概念表征依赖两类信息——语言信息和感知觉/运动信息, 这两类信息表征在两个相互独立而又彼此相关的语义系统内。非语言的感知觉/运动系统存储概念的感知觉/运动经验, 如形状、颜色、声音和运动方式等; 基于语言的语义系统则包含了概念之间的语言学和句法联系。两大系统内部和系统之间存在相关和指代等不同类型的联系。抽象概念主要或仅表征在语言系统中, 具体概念则受益于双重语义系统的支持。

语言信息如何支持或影响抽象概念的表征呢? 近年来一系列认知行为实验开始量化和操纵语言信息来回答这一问题。语言习得被认为是影响儿童抽象词语学习的重要制约因素, 尤其是语法启动可能在其中发挥着核心作用<sup>[26]</sup>。健康成人被试的概念习得任务中, 研究者发现在学习具体和抽象概念时, 使用特征判断任务来测试学习成绩时, 对于抽象概念, 使用麦克风(需要口语产生)比使用键盘表现出更好的学习成绩, 具体概念则模式相反<sup>[27]</sup>, 提示抽象概念习得更加依赖语言。另外, 语言经验也可以通过词语共同出现形成的关联影响概念的表征和加工<sup>[28]</sup>, 如有研究发现基于自然语料库的词语关联信息统计出来的词语邻居数量可显著预测抽象词在词汇判断任务中的反应时, 而对具体词的预测效应并不显著<sup>[29]</sup>。这些结果初步表明语言经验对抽象词加工具有独特的贡献, 但语言经验影响抽象概念表征和加工的认知神经机制尚有待深入。

### 1.2 语境有效性理论

语境有效性理论强调语境信息在词汇的概念提取中发挥着核心作用。我们在研究词语指代的概念信息时, 一般认为词语本身承载的意义是固定的,

但现实中词语总是存在于特定的语境中，其含义也随着语境的改变而改变。Schwanenflugel 等人<sup>[30]</sup>认为，提供语言材料的语境信息（可来自材料环境或理解者已有的知识经验）有助于语言理解。当个体基于语境信息获得概念之间的关系后，理解过程才得以完成。因此对某一概念的理解情况与个体为其提供语境信息的能力密切相关。具体概念和抽象概念的区别在于两类概念单独出现时携带的有效语境信息存在差异，即抽象概念的语境信息提取比具体概念困难，而这种不足可以通过提供外部语境信息来弥补。因此，该理论预测在概念单独呈现时，存在具体优势效应；若提供合适的语境，具体优势效应消失。

Schwanenflugel 等人的一系列行为实验证实了以上猜测<sup>[30, 31]</sup>，例如当为每个词语附上一段话或一个句子作为该词的语境时，在真假词语判断和句子阅读任务上表现出的具体优势效应就消失了<sup>[30]</sup>。近年来，Hoffman 等人利用语料库数据量化了每个概念出现的语境数量，并以这些语境的相似程度作为衡量词语语境多样性的指标，发现语境多样性与具体性评定呈显著负相关，即与具体概念相比，抽象概念出现的语境类型更多<sup>[32]</sup>，提示抽象概念语境有效性低可能是因为语境数量多，而关联普遍较弱。

与早期实验结果不一致的是，即使匹配了抽象词和具体词的语境有效性后，自由回忆任务上仍然表现出具体优势效应<sup>[33]</sup>。Schwanenflugel 等人因此认为语境有效性对抽象/具体差异的解释与任务要求有关：在简单的词汇判断和理解任务上，平衡语境有效性信息可以消除具体/抽象差异；在无关词语记忆任务中，被试会调用表象策略来完成任务，因而表现出具体优势效应。另外，语境有效性这一指标多依赖被试的主观评定，其认知机制并未得到深入研究。综合来看，语境有效性理论相关研究的一个贡献在于突破了概念的静态表征研究角度，无论是强调语境或者任务要求对词语加工的影响，均主张考察概念的动态加工过程及其影响因素。这种外部环境对词语加工的影响在最新的双重编码理论<sup>[25]</sup>和概念的神经解剖模型中的语义控制模块/脑区也有所体现<sup>[5, 34]</sup>。

### 1.3 表征结构差异理论

表征结构差异理论认为抽象概念与具体概念具有不同的表征结构<sup>[35]</sup>：抽象概念主要按照语义相关

方式 (association, 如“偷盗”和“惩罚”) 组织在一起，而具体概念主要按照语义相似程度 (similarity, 如“狮子”和“老虎”) 组织在一起。该理论的支持证据来自一系列脑损伤患者个案研究<sup>[35, 36]</sup>。最早的证据是语义障碍患者 A. Z. 在视觉-听觉跨通道词语匹配任务中表现出的语义干扰效应。该任务要求 A. Z. 从视觉呈现的四个词语构成的词组中指出主试大声读出的某个词，词组中四个词语的关系可以是语义联想关系 (如 clean-neat-pure-fresh)，也可以是语义相似关系 (如 cheat-trick-steal-deceit)。结果显示有语义联想关系的抽象词组与语义相似关系的抽象词组相比表现出显著的语义干扰效应，而具体词则表现出相反的模式<sup>[35]</sup>。研究者随后在深层失读症患者阅读任务上表现出的语义错误和启动效应<sup>[37, 38]</sup>以及健康被试的 odd-one-out 监测实验范式<sup>[39, 40]</sup>中也发现了同样的效应。

但是，在其他病例和健康被试中检验这一理论时，有些研究组虽然重复了语义相关对抽象概念加工的重要性，但同时发现语义相似关系对抽象概念的表征也很重要<sup>[41, 42]</sup>，这与最近研究发现语义相似关系是神经表征的主要组织维度较为吻合<sup>[43]</sup>。另外，该理论中强调的不同类型语义关系在双重编码理论中虽然没有明确提及，但可能与言语和非言语两大系统内部和系统之间的不同类型联系有一定重合<sup>[25]</sup>，例如语义相关关系可能与两个词语在自然语言中共同出现的情况有关。

### 1.4 抽象概念的具身认知表征观

具身认知理论认为人类知觉经验表征于身体状态和感知觉运动系统对当前经验的模拟。该理论认为概念并非以抽象符号的形式表征，而是可还原到相关的感知觉/运动经验。例如“香蕉”这一概念是由“黄色的”、“弯弯的”、“香甜”等知觉体验以及对长条形物体的特有的抓握方式等身体经验构成<sup>[7]</sup>。抽象概念缺乏感知觉/运动经验，是否以及如何依赖某些潜在的具身维度进行表征呢？关于抽象概念具身认知表征的争论和发展，尤其是关于概念隐喻理论及其相关实验证据，我们推荐感兴趣的读者阅读 Zhang 等人的综述<sup>[44]</sup>；这里主要对前人研究中所提及的抽象概念潜在具身维度进行综述。

最近有两个研究组总结了与抽象概念相关的潜在具身经验维度，其中 Crutch 等人提出了 12 个维度<sup>[45-47]</sup>，包括社会、道德、思维、时间、空间、数量、

感觉、情绪等, Binder 等人<sup>[48]</sup>根据目前高级认知功能的神经基础研究进一步提炼神经基础上相对分离的感觉、运动、空间、时间、情感、社会 and 认知等七大类认知经验的 65 个特征维度。这两个研究组均采用语义特征评定法对每个概念的多维经验/潜在具身信息进行量化,发现以这些维度构建的语义距离空间能够将抽象和具体概念区分开<sup>[47, 48]</sup>。这些维度中,社会和思维信息以及情绪信息在抽象概念认知加工中的作用有部分实验证据支持,尤其是情绪效价信息在抽象概念习得和表征中可能尤为重要。

#### 1.4.1 社会和思维信息

证据主要来自特征列举研究。对于若干抽象词(“自由”、“真相”、“发明”)和具体词(“鸟”、“沙发”、“汽车”)概念,对被试列出的语义特征进行编码分类后,研究发现相比于具体概念,抽象概念在与人相关、社会交流、社会组织等社会相关的特征类型以及信念等思维类型上所占比例更大,说明社会和思维信息可能在抽象概念表征上具有重要作用<sup>[49]</sup>。

#### 1.4.2 情绪信息

研究显示,词语的具体性程度与其情绪信息(唤醒度和效价)有密切关系:唤醒度与具体性之间呈线性负相关(抽象词的唤醒程度更高),效价与具体性之间呈倒 U 型曲线(抽象词的效价更高,而与效价极性的方向无关)<sup>[50]</sup>;效价可以解释在将可表象性和语境有效性等变量控制后真假词判断任务中所表现出的抽象词优势效应<sup>[51]</sup>;效价信息也与成年健康被试的抽象概念分类和习得成绩显著相关<sup>[52, 53]</sup>。另外,效价信息是抽象概念中普遍具有的语义内容。一项研究考察了随机选择的 360 个抽象概念的语义内容,发现含有显著效价信息的抽象词所占比例为 34%,而含有其它潜在具身维度信息的抽象词所占比例平均为 5%<sup>[54]</sup>。这可能是由于效价判断(即判断某个概念所引发的内心积极或消极感受)是人类行为的核心成分<sup>[55]</sup>,有研究者甚至提出情绪(效价)启动可能是抽象概念习得的一个重要机制<sup>[51]</sup>。

### 1.5 小结

通过对抽象概念加工的认知理论进行简要概述,可以看出早期理论对抽象概念的讨论受限于语言系统的框架,如双重编码理论中的语言编码,并未对抽象概念的语义特征进行明确的定义。在具身认知思潮的影响下,研究者开始剖析抽象概念的内在

容,并提出可能的具身维度。

因此,研究抽象概念时,相比于把概念的抽象/具体程度作为语义空间的一个连续的组织维度,更为可取的观点是利用感知觉经验和抽象语义特征(如情绪、社会等)等多个维度的具身经验信息和语言信息构建多维语义空间;随着感知觉经验丰富程度的进行性减少和抽象语义特征(如情绪、社会等)及语言信息的进行性增加<sup>[48, 56]</sup>,可观察到语义空间从具体概念到抽象概念的过渡;不同抽象概念在不同语义特征的分布权重不同也有助于解释抽象概念内部的异质性<sup>[57, 58]</sup>。这一构想强调了语言和具身信息的双重作用,延续了双重编码理论<sup>[25]</sup>,语言和情景仿真模型<sup>[59]</sup>和情绪/语言信息模型<sup>[51]</sup>等概念理论的基本框架,启发未来研究需对语言信息在抽象概念表征中的作用进行细化,借鉴社会认知神经科学等领域的最新进展识别可能的具身维度,并推动两类信息整合机制研究的发展,以揭示抽象概念区别于具体概念的内在机制。

值得一提的是,最近一项研究探讨了语义加工脑区的组织结构,利用静息状态下脑区间的功能连接强度和图论的分析方法,发现概念加工网络包含三个稳定的子模块:默认网络模块、外侧裂周边网络模块和额顶网络模块<sup>[60]</sup>。其中默认网络模块可能负责汇聚多种加工通道的信息,如有研究发现具体概念的形状、颜色、视觉运动、操作方式、听觉等特征相关程度均可调节该模块脑区的激活强度<sup>[61]</sup>;利用逐步功能连接法追踪单一通道汇聚的脑区发现不同通道信息在该模块达到稳定状态<sup>[62]</sup>,因此该模块为基于多维具身维度的概念信息提供了可能的神经基础。外侧裂周边网络模块包括左侧颞中回并向后延伸至颞顶联合区,以及左侧额下回眶部和三角部,负责词汇和语法规则的表征<sup>[34]</sup>,为基于语言的概念表征提供了可能的神经基础。

人类正常的概念习得和使用过程中,语言和体验信息往往同时存在,例如儿童在习得“规定”这一概念时,一方面他/她在日常活动探索中通过自己或观察他人违反或遵守规定时得到的奖励和惩罚反馈表现出一定的情绪经验,另一方面也通过语言环境习得“规定”与“惩罚”、“奖励”、“遵守”、“秩序”等之间的联系。目前有一系列行为和计算模型研究发现同时使用两类信息对于概念习得和认知加工有明显的优势<sup>[63, 64]</sup>,如使用贝叶斯概率模型将两类信息结合起来相比于只利用一类信息或者相互独

立的两类信息而言，能够更好地模拟人类被试的概念认知任务成绩<sup>[63]</sup>。两类信息的整合可能依赖两者之间的直接或间接映射<sup>[25]</sup>，相关整合机制及其与概念的抽象程度之间的关系尚有待深入研究。另外，一些潜在具身维度（如情绪和社会信息等）在概念表征中的参与机制尚不明确；这些维度自身也很复杂，可能反映了“由初级通道的信息进一步抽象出来的高级多通道认知加工”<sup>[47]</sup>。这些维度的提出一方面是大脑高级认知功能模块为认知研究提供的启发，另一方面相应的认知研究和理论的发展及其神经基础的考察也为阐述局部脑区和脑网络的认知功能提供了线索，因此，对抽象概念认知神经机制的探讨依赖必将推动脑科学与认知科学之间双向的渗透和影响。

## 2 抽象概念加工的神经基础研究进展

抽象概念神经基础的研究思路与认知理论进展一致，也可大致分为两类：一类研究强调了抽象概念与具体概念的比较，另一类研究考察了抽象概念某一潜在具身维度的脑区基础。另外，在多维语义空间框架下，有研究构建了基于语言和多个潜在具身维度的语义子空间，并考察抽象概念两类语义子空间的神经基础。现将这几类研究成果简要综述如下。

### 2.1 抽象概念的关键脑区基础：抽象概念与具体概念的比较

早期抽象词特异性损伤的病例报告没有提供精细的病灶位置或者病灶损伤面积较大，无法定位抽象词加工的关键脑区（如<sup>[65,66]</sup>）。随着脑功能成像技术的成熟和广泛应用，很多研究比较了抽象词和具体词在真假词判断、语义判断等多种任务中的激活强度。目前针对这些研究开展了两项元分析：Wang等人对1997~2008年期间19篇直接对比抽象概念和具体概念激活强度的脑影像研究（包括15项功能磁共振成像研究和4项正电子发射计算机断层扫描研究）的结果进行了元分析<sup>[67]</sup>；Binder等人旨在探讨感知觉和言语等两类知识的神经基础，对17项脑功能成像研究进行了元分析，其中包含了13项对比抽象概念和具体概念的研究<sup>[68]</sup>。两项元分析研究一致发现，相比于具体概念，抽象概念激活较高的脑区主要分布在左侧额下回（inferior frontal gyrus, IFG）三角部和眶部，并延伸至颞叶前上部<sup>[67,68]</sup>。颞叶前上部在抽象概念加工中的作用一般被认为与该脑区负责语言加工有关<sup>[67]</sup>，但具体机制尚不明确。

对于IFG，经颅磁刺激（transcranial magnetic stimulation, TMS）对IFG进行虚拟损伤，结果显示具体词加工不受影响，抽象词语在真假词判断任务上的错误率增加<sup>[69]</sup>，在语义匹配任务上反应时显著延长<sup>[70]</sup>，与脑影像研究一致地支持了该脑区在抽象词加工中的核心作用。

关于抽象词在IFG的效应主要有两种解释。一种观点认为该脑区参与自上而下的执行控制<sup>[71,72]</sup>。抽象词在这里激活较高，可能是由于抽象概念的语境数量多但关联弱，需要更强的语义控制。Hoffman等人借助TMS对IFG虚拟损伤后，发现无语境条件下抽象词语义匹配任务反应时显著延长，而具体词加工或者为抽象词提供语境后均不受影响<sup>[70]</sup>。但是，随后的研究显示IFG的激活强度受到抽象程度和语境类型（一致条件和不一致条件）的调节，却并未表现出两个因素的交互作用<sup>[73]</sup>，因此抽象词在IFG的效应与语义控制的关系尚需更多的实验证据加以重复和验证。第二种观点认为该脑区是语言系统的关键脑区，因为空间位置上抽象词激活的IFG脑区与语言加工的语义和句子加工脑区吻合较好<sup>[74]</sup>，在抽象词中的作用可能与抽象词加工更依赖语言系统有关。最近一项研究显示可表象性和语境有效性对抽象词在IFG的激活强度都有独特的贡献，提示IFG可能综合了抽象词的多个维度信息<sup>[75]</sup>。由于IFG执行控制功能和语言加工所对应的解剖基础分离受限于脑功能影像的空间分辨率和个体差异<sup>[76]</sup>，未来研究可采用个体分析和多变量模式识别等方法深入探讨抽象词在IFG的激活机制。

### 2.2 抽象概念潜在具身维度的神经基础

除了将抽象词和具体词进行对比外，研究者初步考察了抽象概念若干特征维度的神经基础，主要采用以下两种研究思路：一是考察特定范畴抽象概念（如社会概念）相比于其他类型抽象概念是否特异性表征在某些脑区（具体概念类似的研究思路见<sup>[77]</sup>）；二是将抽象概念的特征维度作为连续变量，考察某些脑区的活动是否受到这些维度的调节（具体概念类似的研究思路见<sup>[61]</sup>）。具体概念的相关研究表明，具体概念的部分感知觉/运动信息（如形状、颜色和动作知识）存储于相应感知觉/运动通道加工的脑区<sup>[4,78]</sup>。目前少数研究考察了抽象概念社会信息和情绪信息的脑区基础。人类实时的社会和情绪加工任务包含自我和他人等多个角色，刺激感知和评估等多个认知成分<sup>[79]</sup>，由社会认知<sup>[80]</sup>、情绪

加工<sup>[81]</sup>等相关神经环路负责。抽象概念的社会和情绪信息不依赖于实时的情境和社会角色,反映了个体已有的社会 and 情绪知识,其神经基础与社会和情绪神经环路的重叠情况及其可能机制是当前研究的热点问题之一。

### 2.2.1 社会信息

很多研究考察了社会概念的脑区基础<sup>[82–86]</sup>,发现语义判断任务上,与非社会概念(如 nutritious)相比,社会概念(如 honor)判断显著激活了双侧颞叶前部上区、颞顶联合区、内侧前额叶、扣带回后部/楔前叶等社会加工脑区<sup>[80]</sup>。这些脑区也表现出一定的功能特异性,如右侧颞叶前部上区的激活强度与社会概念所描述的社会行为丰富程度相关,且不受概念效价信息的影响<sup>[83]</sup>;右侧楔前叶激活模式编码社会角色的信仰信息<sup>[87]</sup>。

### 2.2.2 情绪信息

Vigliocco 等人比较了抽象概念和具体概念(匹配了除情绪信息之外的众多词汇学变量,包括可表象性和语境有效性)在真假词判断任务中的激活强度,发现抽象概念在负责情绪加工的前扣带皮层喙部(rostral anterior cingulate cortex, rACC)激活强度显著高于具体词,且抽象概念效价信息可以显著调节该脑区的激活强度<sup>[50]</sup>。随后研究证实在语义判断任务中 rACC 的激活强度确实受到概念情绪信息的调节,但效价与概念具体程度在该脑区没有交互作用<sup>[88]</sup>。随后 Ghio 等人发现与其它抽象和具体范畴句子比较,情绪句子在功能定义的情绪加工脑区并未发现任何显著的体素团,利用情绪加工脑区的激活模式来区分不同类型概念时正确率也很低<sup>[89]</sup>。

## 2.3 抽象概念多维语义子空间的神经基础

鉴于语言和潜在在具身信息是抽象概念多维语义空间的主要组织维度,最近一项研究针对 360 个抽象词汇,构建了这两种语义子空间,并初步考察了其神经基础<sup>[54]</sup>。该研究的基本思路是表征相似性分析<sup>[90]</sup>(representational similarity analysis):即分别在认知和神经指标上计算多个词语两两之间的距离来构建不同类型的语义空间,通过计算认知与神经语义空间的相似性来深入了解神经活动模式的表征内容。对于语言信息的语义子空间,该研究借助人工智能领域自然语言处理中单词表征的经典算法(LSA 和 word2vec),从大规模文本语料库中提取词语与文档之间或者不同词语之间共同出现的统计规律,将词语进行向量化表征,进一步计算得出抽象

词语两两之间在语言信息上的距离;对于潜在在具身维度的语义子空间,收集了每个抽象词在 13 个语义特征相关程度的评定,并基于此构建了抽象词语两两之间在这些维度上的距离。以主观评定得到的抽象概念两两之间的距离为金标准分析发现,语言信息和潜在在具身维度得到的抽象概念语义距离之间存在一定程度的相关,且与主观评定的抽象概念距离之间均显著相关,提示语言信息和潜在在具身维度对于抽象概念的语义空间都有着独特的贡献。

为考察大脑是否有特定系统遵循某一信息维度组织抽象概念,通过任务态功能磁共振实验,采集分析得到了受试者在加工这 360 个抽象词时每个词语的全脑激活模式,在脑区局部水平、语言和语义系统水平和全脑水平等三个神经尺度上构建了抽象词语神经模式的距离矩阵,随后利用表征相似性分析比较神经激活模式矩阵、语言信息和潜在在具身信息矩阵,发现抽象概念的潜在在具身信息分布式表征在多个脑区及全脑模式上,而语言信息则与高级语言加工系统整体的激活模式显著相关<sup>[54]</sup>。这些结果初步阐述了抽象语义信息的多层次、多维度人脑表征基础。

## 2.4 小结

目前关于抽象概念加工的脑基础研究大多集中在抽象概念与具体概念的对比,发现左侧 IFG 在抽象概念加工中的重要作用。还有少数研究考察了抽象概念特定潜在在具身维度的脑区基础,其中社会类概念激活脑区与经典社会加工脑区较为吻合,支持了具身理论;情绪信息的脑区基础在不同研究间结果并不一致。也有研究考察了基于语言和多维具身维度的抽象概念语义子空间的神经基础。

综合来看,这些研究大多关心的是某个局部脑区(基本单元是体素)的激活强度是否能够区分开抽象词与具体词,或者不同范畴的抽象词(如社会类概念与非社会类概念),忽略了两方面信息:(1)脑区间的连接模式和网络特性,(2)抽象概念不同认知维度(如语言加工和社会信息)之间的整合。具体概念研究成果提示局部脑区的功能特性与该脑区和其它脑区的连接模式密切相关<sup>[91–94]</sup>,脑功能和结构连接模式可以表征语义信息<sup>[95,96]</sup>,基于脑区的连接模式也识别了一些概念加工的枢纽脑区(如颞叶前部和颞顶枕联合区等)<sup>[60]</sup>。这些对于未来开展抽象概念不同类型信息整合的神经基础研究提供了一定的启发。

### 3 总结与展望

抽象概念是人类概念系统的重要组成部分。阐述抽象概念在大脑内的表征和加工机制对于揭示人类概念系统的神经基础具有重要的意义。综述前人研究可见, 早期关于抽象概念的研究重在阐释抽象概念与具体概念的区别, 没有明确定义抽象概念的表征内容。近年来, 抽象概念的研究问题开始从对比研究中“抽象概念不是什么”的否定陈述改为“抽象概念是什么”的肯定陈述, 基本上围绕语言和具身认知这两种认知思路探讨抽象概念的语义表征, 其中语言信息一直被认为在抽象概念表征中发挥着核心作用, 情绪等潜在具身信息对抽象概念表征的影响及其神经基础也有一定的进展。但目前考察抽象概念的神经基础研究尚处于起步阶段, 语言信息和潜在具身信息影响抽象概念的认知机制和神经基础有待验证和深入研究。未来研究可至少从以下两个角度平行展开探索。

(1) 抽象概念加工的脑网络基础。抽象概念加工涉及多个认知维度和多个脑区, 尤其是潜在具身维度及其脑区基础还有待发掘和验证。另外, 这些脑区与其它相关脑区(如语言脑区)之间如何相互联系共同支持抽象语义表征? 抽象概念的脑网络基础与具体概念有何异同<sup>[60, 97, 98]</sup>? 不同类型的抽象概念脑网络基础有何异同?

(2) 语言与抽象概念的关系。语言与人类抽象思维和概念加工关系密切, 但其机制和神经基础尚不清楚。值得一提的是, 人工智能领域迅猛发展, 通过构建大规模语料库和发展统计语言模型等提供了自然语言统计规律的量化手段<sup>[99]</sup>; 发展心理学研究提示语言习得在儿童学习抽象词语中发挥着重要作用<sup>[26]</sup>。抽象概念研究需积极借鉴语言研究相关领域的最新研究成果, 推动语言参与抽象概念加工的机制研究。

对这些问题进行回答, 不仅有助于揭示抽象概念语义表征的认知神经机制, 对于理解人脑概念系统的工作原理也有重要意义, 同时也将推动概念学习和障碍康复、类脑研究等相关领域的发展。

#### 参考文献

- Margolis E, Laurence S. *Concepts: Core Readings*. Cambridge, MA: MIT Press, 1999.
- Murphy GL. *The Big Book of Concepts*. Cambridge, MA: MIT Press, 2002.
- Patterson K, Nestor PJ, Rogers TT. Where do you know what you know? The representation of semantic knowledge in the human brain. *Nat Rev Neurosci* 2007; 8(12): 976–987.
- Binder JR, Desai RH. The neurobiology of semantic memory. *Trends Cogn Sci* 2011; 15(11): 527–536.
- Lambon Ralph MA, Jefferies E, Patterson K, Rogers TT. The neural and computational bases of semantic cognition. *Nat Rev Neurosci* 2017; 18(1): 42–55.
- Reilly J, Kean J. Formal distinctiveness of high- and low-imageability nouns: analyses and theoretical implications. *Cogn Sci* 2007; 31(1): 157–168.
- Barsalou LW. Grounded cognition. *Annu Rev Psychol* 2008; 59: 617–645.
- Bi Y, Wang X, Caramazza A. Object domain and modality in the ventral visual pathway. *Trends Cogn Sci* 2016; 20(4): 282–290.
- Peelen MV, He C, Han Z, Caramazza A, Bi Y. Nonvisual and visual object shape representations in occipitotemporal cortex: evidence from congenitally blind and sighted adults. *J Neurosci* 2014; 34(1): 163–170.
- Leshinskaya A, Caramazza A. Nonmotor aspects of action concepts. *J Cogn Neurosci* 2014; 26(12): 2863–2879.
- Leshinskaya A, Caramazza A. Abstract categories of functions in anterior parietal lobe. *Neuropsychologia* 2015; 76: 27–40.
- Jamrozik A, McQuire M, Cardillo ER, Chatterjee A. Metaphor: Bridging embodiment to abstraction. *Psychon Bull Rev* 2016; 23(4): 1080–1089.
- Rosen G. “Abstract Objects”. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2017 Edition), Zalta EN (ed.), 2017, URL = <<https://plato.stanford.edu/archives/spr2017/entries/abstract-objects/>>.
- Shallice T, Cooper RP. Is there a semantic system for abstract words? *Front Hum Neurosci* 2013; 7: 175.
- Warrington EK. The selective impairment of semantic memory. *Q J Exp Psychol* 1975; 27(4): 635–657.
- McCarthy RA, Warrington EK. Past, present, and prospects: Reflections 40 years on from the selective impairment of semantic memory (Warrington, 1975). *Q J Exp Psychol (Hove)* 2016; 69(10): 1941–1968.
- Yi HA, Moore P, Grossman M. Reversal of the concreteness effect for verbs in patients with semantic dementia. *Neuropsychology* 2007; 21(1): 9–19.
- Warrington EK, Shallice T. Category specific semantic impairments. *Brain* 1984; 107(Pt 3): 829–854.
- Papagno C, Capasso R, Miceli G. Reversed concreteness effect for nouns in a subject with semantic dementia. *Neuropsychologia* 2009; 47(4): 1138–1148.
- Macoio J. Is a plum a memory problem? Longitudinal study

- of the reversal of concreteness effect in a patient with semantic dementia. *Neuropsychologia* 2009; 47(2): 518–535.
- 21 Bachoud-Levi AC, Dupoux E. An influence of syntactic and semantic variables on word form retrieval. *Cogn Neuropsychol* 2003; 20(2): 163–188.
- 22 Connell L, Lynott D. Strength of perceptual experience predicts word processing performance better than concreteness or imageability. *Cognition* 2012; 125(3): 452–465.
- 23 Hoffman P. The meaning of ‘life’ and other abstract words: Insights from neuropsychology. *J Neuropsychol* 2016; 10(2): 317–343.
- 24 Paivio A. *Mental Representations: A Dual Coding Approach*. London: Oxford University Press, 1986.
- 25 Paivio A. *Mind and its Evolution: A Dual Coding Theoretical Approach*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., 2007.
- 26 Gleitman LR, Cassidy K, Nappa R, Papagragou A, Trueswell JC. Hard words. *Lang Learn Dev* 2005; 1(1): 23–64.
- 27 Borghi AM, Flumini A, Cimatti F, Marocco D, Scorolli C. Manipulating objects and telling words: a study on concrete and abstract words acquisition. *Front Psychol* 2011; 2: 15.
- 28 Barsalou LW. On staying grounded and avoiding quixotic dead ends. *Psychon Bull Rev* 2016; 23(4): 1122–1142.
- 29 Recchia G, Jones MN. The semantic richness of abstract concepts. *Front Hum Neurosci* 2012; 6: 315.
- 30 Schwanenflugel PJ, Shoben EJ. Differential context effects in the comprehension of abstract and concrete verbal materials. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn* 1983; 9(1): 82–102.
- 31 Schwanenflugel PJ, Harnishfeger KK, Stowe RW. Context availability and lexical decisions for abstract and concrete words. *J Mem Lang* 1988; 27: 499–520.
- 32 Hoffman P, Lambon Ralph MA, Rogers TT. Semantic diversity: a measure of semantic ambiguity based on variability in the contextual usage of words. *Behav Res Methods* 2013; 45(3): 718–730.
- 33 Schwanenflugel PJ, Akin C, Luh WM. Context availability and the recall of abstract and concrete words. *Mem Cognit* 1992; 20(1): 96–104.
- 34 Xu Y, He Y, Bi Y. A tri-network model of human semantic processing. *Front Psychol* 2017; 8: 1538.
- 35 Crutch SJ, Warrington EK. Abstract and concrete concepts have structurally different representational frameworks. *Brain* 2005; 128(Pt 3): 615–627.
- 36 Crutch SJ, Ridha BH, Warrington EK. The different frameworks underlying abstract and concrete knowledge: evidence from a bilingual patient with a semantic refractory access dysphasia. *Neurocase* 2006; 12(3): 151–163.
- 37 Crutch SJ, Warrington EK. Semantic priming in deep-phonological dyslexia: contrasting effects of association and similarity upon abstract and concrete word reading. *Cogn Neuropsychol* 2007; 24(6): 583–602.
- 38 Crutch SJ. Qualitatively different semantic representations for abstract and concrete words: further evidence from the semantic reading errors of deep dyslexic patients. *Neurocase* 2006; 12(2): 91–97.
- 39 Crutch SJ, Jackson EC. Contrasting graded effects of semantic similarity and association across the concreteness spectrum. *Q J Exp Psychol (Hove)* 2011; 64(7): 1388–1408.
- 40 Crutch SJ, Connell S, Warrington EK. The different representational frameworks underpinning abstract and concrete knowledge: evidence from odd-one-out judgements. *Q J Exp Psychol (Hove)* 2009; 62(7): 1377–1388, 1388–1390.
- 41 Geng J, Schnur TT. The representation of concrete and abstract concepts: categorical versus associative relationships. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn* 2015; 41(1): 22–41.
- 42 Zhang X, Han Z, Bi Y. Are abstract and concrete concepts organized differently? Evidence from the blocked translation paradigm. *Applied Psycholinguistics* 2012; 34: 1–34.
- 43 Xu Y, Wang X, Wang X, Men W, Gao JH, Bi Y. Doctor, teacher, and stethoscope: neural representation of different types of semantic relations. *J Neurosci* 2018; 38(13): 3303–3317.
- 44 Zhang ET (张恩涛), Fang J, Lin WY, Luo JL. Embodied views of abstract concepts representation. *Adv Psychol Sci (心理科学进展)* 2013; 21(3): 429–436 (in Chinese with English abstract).
- 45 Troche J, Crutch S, Reilly J. Clustering, hierarchical organization, and the topography of abstract and concrete nouns. *Front Psychol* 2014; 5: 360.
- 46 Crutch SJ, Williams P, Ridgway GR, Borgenicht L. The role of polarity in antonym and synonym conceptual knowledge: evidence from stroke aphasia and multidimensional ratings of abstract words. *Neuropsychologia* 2012; 50(11): 2636–2644.
- 47 Crutch SJ, Troche J, Reilly J, Ridgway GR. Abstract conceptual feature ratings: the role of emotion, magnitude, and other cognitive domains in the organization of abstract conceptual knowledge. *Front Hum Neurosci* 2013; 7: 186.
- 48 Binder JR, Conant LL, Humphries CJ, Fernandino L, Simons SB, Aguilar M, Desai RH. Toward a brain-based componential semantic representation. *Cogn Neuropsychol* 2016: 1–45.
- 49 Barsalou LW, Wiemer-Hastings K. Situating abstract concepts. In Pecher D, Zwaan RA (eds). *Grounding Cognition: The Role of Perception and Action in Memory, Language, and Thinking*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005, 129–163.
- 50 Vigliocco G, Kousta ST, Della Rosa PA, Vinson DP, Tetta-



- manti M, Devlin JT, Cappa SF. The neural representation of abstract words: the role of emotion. *Cereb Cortex* 2014; 24(7): 1767–1777.
- 51 Kousta ST, Vigliocco G, Vinson DP, Andrews M, Del Campo E. The representation of abstract words: why emotion matters. *J Exp Psychol Gen* 2011; 140(1): 14–34.
- 52 Newcombe PI, Campbell C, Siakaluk PD, Pexman PM. Effects of emotional and sensorimotor knowledge in semantic processing of concrete and abstract nouns. *Front Hum Neurosci* 2012; 6: 275.
- 53 Ferre P, Ventura D, Comesana M, Fraga I. The role of emotionality in the acquisition of new concrete and abstract words. *Front Psychol* 2015; 6: 976.
- 54 Wang X, Wu W, Ling Z, Xu Y, Fang Y, Wang X, Binder JR, Men W, Gao JH, Bi Y. Organizational principles of abstract words in the human brain. *Cereb Cortex* 2018; 28(12): 4305–4318.
- 55 Barrett LF, Bliss-Moreau E. Affect as a psychological primitive. *Adv Exp Soc Psychol* 2009; 41: 167–218.
- 56 Barsalou LW. Abstraction in perceptual symbol systems. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 2003; 358(1435): 1177–1187.
- 57 Caramelli N, Borghi AM, Setti A. The identification of definition strategies in children of different ages. *Linguistica Computazionale* 2006; 26: 155–177.
- 58 Setti A, Caramelli N. Different domains in abstract concepts. *Proceedings of the XXVII Annual Conference of Cognitive Science Society*. Stresa, Italy: Cognitive Science Society, 2005, 1997–2002.
- 59 Barsalou LW, Santos A, Simmons WK, Wilson CD. Language and simulation in conceptual processing. In: deVega M, Glenberg AM, Graesser AC (Eds.). *Symbols, Embodiment, and Meaning*. Oxford University Press, 2008, 245–283.
- 60 Xu Y, Lin Q, Han Z, He Y, Bi Y. Intrinsic functional network architecture of human semantic processing: Modules and hubs. *Neuroimage* 2016; 132: 542–555.
- 61 Fernandino L, Binder JR, Desai RH, Pendl SL, Humphries CJ, Gross WL, Conant LL, Seidenberg MS. Concept representation reflects multimodal abstraction: a framework for embodied semantics. *Cereb Cortex* 2016; 26(5): 2018–2034.
- 62 Sepulcre J, Sabuncu MR, Yeo TB, Liu H, Johnson KA. Stepwise connectivity of the modal cortex reveals the multimodal organization of the human brain. *J Neurosci* 2012; 32(31): 10649–10661.
- 63 Andrews M, Vigliocco G, Vinson D. Integrating experiential and distributional data to learn semantic representations. *Psychol Rev* 2009; 116(3): 463–498.
- 64 Smith L, Yu C. Infants rapidly learn word-referent mappings via cross-situational statistics. *Cognition* 2008; 106(3): 1558–1568.
- 65 Bub D, Kertesz A. Deep agraphia. *Brain Lang* 1982; 17(1): 146–165.
- 66 Franklin S, Howard D, Patterson K. Abstract word anomia. *Cogn Neuropsychol* 1995; 12(5): 549–566.
- 67 Wang J, Conder JA, Blitzer DN, Shinkareva SV. Neural representation of abstract and concrete concepts: a meta-analysis of neuroimaging studies. *Hum Brain Mapp* 2010; 31(10): 1459–1468.
- 68 Binder JR, Desai RH, Graves WW, Conant LL. Where is the semantic system? A critical review and meta-analysis of 120 functional neuroimaging studies. *Cereb Cortex* 2009; 19(12): 2767–2796.
- 69 Papagno C, Fogliata A, Catricala E, Miniussi C. The lexical processing of abstract and concrete nouns. *Brain Res* 2009; 1263: 78–86.
- 70 Hoffman P, Jefferies E, Lambon Ralph MA. Ventrolateral prefrontal cortex plays an executive regulation role in comprehension of abstract words: convergent neuropsychological and repetitive TMS evidence. *J Neurosci* 2010; 30(46): 15450–15456.
- 71 Badre D, Wagner AD. Left ventrolateral prefrontal cortex and the cognitive control of memory. *Neuropsychologia* 2007; 45(13): 2883–2901.
- 72 Bedny M, McGill M, Thompson-Schill SL. Semantic adaptation and competition during word comprehension. *Cereb Cortex* 2008; 18(11): 2574–2585.
- 73 Hoffman P, Binney RJ, Lambon Ralph MA. Differing contributions of inferior prefrontal and anterior temporal cortex to concrete and abstract conceptual knowledge. *Cortex* 2015; 63: 250–266.
- 74 Vigneau M, Beaucousin V, Herve PY, Duffau H, Crivello F, Houde O, Mazoyer B, Tzourio-Mazoyer N. Meta-analyzing left hemisphere language areas: phonology, semantics, and sentence processing. *Neuroimage* 2006; 30(4): 1414–1432.
- 75 Della Rosa PA, Catricala E, Canini M, Vigliocco G, Cappa S. The left inferior frontal gyrus: A neural crossroads between abstract and concrete knowledge. *Neuroimage* 2018; 175: 449–459.
- 76 Fedorenko E, Duncan J, Kanwisher N. Language-selective and domain-general regions lie side by side within Broca's area. *Curr Biol* 2012; 22(21): 2059–2062.
- 77 Kiefer M, Sim EJ, Herrnberger B, Grothe J, Hoenig K. The sound of concepts: four markers for a link between auditory and conceptual brain systems. *J Neurosci* 2008; 28(47): 12224–12230.
- 78 Pulvermuller F. How neurons make meaning: brain mecha-

- nisms for embodied and abstract-symbolic semantics. *Trends Cogn Sci* 2013; 17(9): 458–470.
- 79 Adolphs R. The social brain: neural basis of social knowledge. *Annu Rev Psychol* 2009; 60: 693–716.
- 80 Mar RA. The neural bases of social cognition and story comprehension. *Annu Rev Psychol* 2011; 62: 103–134.
- 81 Lindquist KA, Wager TD, Kober H, Bliss-Moreau E, Barrett LF. The brain basis of emotion: a meta-analytic review. *Behav Brain Sci* 2012; 35(3): 121–143.
- 82 Wilson-Mendenhall CD, Simmons WK, Martin A, Barsalou LW. Contextual processing of abstract concepts reveals neural representations of nonlinguistic semantic content. *J Cogn Neurosci* 2013; 25(6): 920–935.
- 83 Zahn R, Moll J, Krueger F, Huey ED, Garrido G, Grafman J. Social concepts are represented in the superior anterior temporal cortex. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2007; 104(15): 6430–6435.
- 84 Binney RJ, Hoffman P, Lambon Ralph MA. Mapping the multiple graded contributions of the anterior temporal lobe representational hub to abstract and social concepts: evidence from distortion-corrected fMRI. *Cereb Cortex* 2016; 26(11): 4227–4241.
- 85 Contreras JM, Banaji MR, Mitchell JP. Dissociable neural correlates of stereotypes and other forms of semantic knowledge. *Soc Cogn Affect Neurosci* 2012; 7(7): 764–770.
- 86 Ross LA, Olson IR. Social cognition and the anterior temporal lobes. *Neuroimage* 2010; 49(4): 3452–3462.
- 87 Leshinskaya A, Contreras JM, Caramazza A, Mitchell JP. Neural representations of belief concepts: a representational similarity approach to social semantics. *Cereb Cortex* 2017; 27(1): 344–357.
- 88 Skipper LM, Olson IR. Semantic memory: distinct neural representations for abstractness and valence. *Brain Lang* 2014; 130: 1–10.
- 89 Ghio M, Vaghi MM, Perani D, Tettamanti M. Decoding the neural representation of fine-grained conceptual categories. *Neuroimage* 2016; 132: 93–103.
- 90 Kriegeskorte N, Kievit RA. Representational geometry: integrating cognition, computation, and the brain. *Trends Cogn Sci* 2013; 17(8): 401–412.
- 91 Mahon BZ, Caramazza A. What drives the organization of object knowledge in the brain? *Trends Cogn Sci* 2011; 15(3): 97–103.
- 92 Saygin ZM, Osher DE, Koldewyn K, Reynolds G, Gabrieli JD, Saxe RR. Anatomical connectivity patterns predict face selectivity in the fusiform gyrus. *Nat Neurosci* 2011; 15(2): 321–327.
- 93 Wang X, He C, Peelen MV, Zhong S, Gong G, Caramazza A, Bi Y. Domain selectivity in the parahippocampal gyrus is predicted by the same structural connectivity patterns in blind and sighted individuals. *J Neurosci* 2017; 37(18): 4705–4716.
- 94 Wang X, Peelen MV, Han Z, He C, Caramazza A, Bi Y. How visual is the visual cortex? comparing connectional and functional fingerprints between congenitally blind and sighted individuals. *J Neurosci* 2015; 35(36): 12545–12559.
- 95 Fang Y, Wang X, Zhong S, Song L, Han Z, Gong G, Bi Y. Semantic representation in the white matter pathway. *PLoS Biol* 2018; 16(4): e2003993.
- 96 Wang X, Fang Y, Cui Z, Xu Y, He Y, Guo Q, Bi Y. Representing object categories by connections: Evidence from a multivariate connectivity pattern classification approach. *Hum Brain Mapp* 2016; 37(10): 3685–3697.
- 97 Fang Y, Han Z, Zhong S, Gong G, Song L, Liu F, Huang R, Du X, Sun R, Wang Q, He Y, Bi Y. The semantic anatomical network: Evidence from healthy and brain-damaged patient populations. *Hum Brain Mapp* 2015; 36(9): 3499–3515.
- 98 Han Z, Ma Y, Gong G, He Y, Caramazza A, Bi Y. White matter structural connectivity underlying semantic processing: evidence from brain damaged patients. *Brain* 2013; 136(Pt 10): 2952–2965.
- 99 Mikolov T, Chen K, Corrado G, Dean J. Efficient estimation of word representations in vector space. *arXiv* 2013: 1301.3781v1303 [cs.CL].