



# A Brief Survey of Multidisciplinary Approaches in Evolutionary Linguistics

Tao Gong<sup>1\*</sup>, Lan Shuai<sup>2</sup>, Umberto Ansaldo<sup>1</sup>

1.Department of Linguistics, University of Hong Kong, Pokfulam Road, Hong Kong Island, Hong Kong; 2.Department of Chinese, Translation and Linguistics, City University of Hong Kong, 83 Tat Chee Avenue, Kowloon, Hong Kong

Email: tgong@hku.hk

Received: Sep. 18th, 2011; revised Nov. 30th, 2011; accepted Dec. 15th, 2011.

**Abstract:** We briefly review several research approaches from a variety of disciplines that could contribute to evolutionary linguistics. These disciplines include anthropology and archaeology, animal behaviors, genetics, neuroscience, and computer simulation and behavioral experiments. Apart from language, they also examine language users, nonhuman primates and other animals, human cultures and brains. All these aspects could cast their influences on language evolution. Together with a summary of recent contributions in these disciplines, we discuss how these multidisciplinary approaches yield important insights on our comprehensive understanding of language and its evolution.

**Key words:** Evolutionary linguistics, FOXP2, mirror neurons, neuroimaging, computer simulation

现代人类学通讯 2011年 第五卷 第 263-272 页 第二届语言进化与遗传进化国际会议

## 演化语言学跨学科方法概述

龚涛<sup>1\*</sup>, 帅兰<sup>2</sup>, 昂贝托·安萨多<sup>1</sup>

1.香港大学语言学系 香港港岛薄扶林路; 2.香港城市大学中文翻译及语言学系 香港九龙 达之路 83 号

**摘要:** 本文介绍来自其他学科的、对演化语言学有所贡献的一些研究方法。这些学科包括: 人类学和考古学、动物行为学、基因学、脑科学, 及计算机模拟和行为实验。除语言外, 这些学科还关注语言使用者、非人灵长类和其他动物、人类大脑以及文化。所有这些因素都可能对语言演化施加影响。通过简要总结这些学科的一些最新成果, 作者探讨了跨学科研究如何为全面了解语言及其演化提供重要见解。

**关键词:** 演化语言学; FOXP2 基因; 镜像神经元; 脑成像; 计算机模拟

### 1、介绍

作为当代语言学中的复兴学科, 演化语言学 (Evolutionary linguistics) 致力于研究人类语言何时、何地及如何起源、变化和消亡[1-3]。诚如最近的专注和评论所示 (见 [4-14]), 演化语言学已成为研究语言和人类本质的现代科学中的一个新焦点 [15,16]。考虑到人类语言存在于两个方面, 即语言本身 (如个人习语和群体语言) 和语言使用者 (如语言生物学机制) [17], 我们把演化语言学的研究分为两类, 分别研究语言本身的演化和语言生物学机制的演化。

关于语言本身演化的研究注重具体语言。相关课题包括: (1) 如何重建不同语言的

历史关系 (如汉藏语系、侗傣和南岛语系的起源); (2) 不同语言如何在各种社会-文化条件下变化、接触和竞争 (如中国境内普通话和少数民族语言的接触和竞争, 及由之产生的混合语); (3) 语言特性 (如音系特征、词序或做格系统等) 在不同语言中的表现及在特定语言内的变化。基于北亚和东南亚的丰富语料, 中国及西方的历史语言学和类型学学者们已对这些课题做出了突出贡献。这在第二届遗传进化和语言进化国际会议中已经充分体现。

关于语言生物学机制演化的研究关注语言官能 (用以获得和使用任何一种自然语言的一套生物机制[18]), 而非具体的语言或语

系。相关课题包括：(1) 语言的生成机制是否只存在于句法[19]，还是在句法、语义和音系方面都有独立的组合原则来导致语言的生成机制[20]；(2) 语言处理能力是由人脑中的特定语言模块决定的[21,22]，还是从普适的、起初并非语言特有的认知能力中演变而来的[23,24]；(3) 语言处理能力如何在儿童中发展以及儿童如何习得特定的语言结构；(4) *语言普遍性* (在语言结构和使用上的、普遍存在于世界上绝大多数但非全部语言中的特性或原则 [25]；如特定的词序、构成性 (compositionality) 和规则性 (regularity) 等) 如何出现、变化和消失。在这些课题中，*语言习得* (婴儿从其所处环境中获得语言的过程 [26]) 已在心理语言学中被广泛研究，但 *语言起源* (古代智人所经历的从前语言交流系统到使用类似现今语言进行交流的过程 [24]) 却被局限于共时标度内。这主要是因为语言行为很难从化石中提取的事实 [18,27]，而且语言学本身缺乏评价那些基于当前数据来推论语言演化假说的科学基础 [3]。

为跨越这些局限，语言演化研究只得借助于语言学以外的其他学科的贡献。换句话说，演化语言学，尤其是语言起源研究，命中注定是跨学科的。考虑到这一点，本文概述了一些可对演化语言学做贡献的学科，包括人类学和考古学、动物行为学、基因学、脑科学、计算机模拟和行为实验。对每个学科，我们讨论其主要假设和研究手段，总结其最新成果，并评价其如何帮助我们更好的了解语言及其演化。本综述旨在帮助语言学家了解这些学科的贡献，并鼓励语言学家与其他学科感兴趣学者进行合作。只有这样，我们才能获得可信、可行和足够的对语言及其演化的认识 [16]。

## 2、演化语言学中的跨学科研究

### 2.1 人类学和考古学

人类学和考古学学者是第一批试图解释语言起源的学者。他们普遍认为：(1) 独特的人类行为，如语言，是由人类特有的生理机制和解剖结构所决定的；(2) 非语言行为通常包含语言起源的证据。这些学科的研究通常从两个方面入手：(1) 分析已灭绝人种的人类学遗迹，并比较现代人和灭绝人种的解剖结

构，以获得与言语产生有关的骨骼构造是否存在的证据；(2) 分析考古学遗迹，以获得对已灭绝人种的认知能力和社会行为的复杂度的认识。

虽然通常不接触具体语料，这些学科的研究可以帮助我们更多了解人类的演化和迁移、人脑的发展、语言行为和其他个人和群体行为的关联，及语言在人类中出现的粗略时间。例如，基于尼安德特人 (与我们的祖先智人生活在同时代的一个灭绝人种) 的牙齿化石，Smith 和同事分析了尼安德特人的生命史 [28]。在牙齿的形成过程中，生物周期会在牙齿珐琅质和本质上体现，形成永久的成长速率和持续时间的印记。对牙齿化石的分析可获得比分析骨骼更高的精确度，更好的辅助研究古代人种的成长和发展。此项研究表明，尼安德特人的牙齿生成周期长于现代人，这表明相对较长的儿童期和相对缓慢的生长周期是智人特有的。同样的，其他的生物适应过程和社会组织方面也可能是这样的。这样的一个延长了的儿童期对语言习得尤为重要。

通过对古人类头骨化石的系统比较，Schoenemann 发现从古人类到现代人类，大脑尺寸的发展有两个趋势，即总体大脑容量的绝对增长和特殊脑区 (如额叶) 容量的相对增长 [29]。他认为大脑容量的增长和脑区专门化的程度紧密关联：人脑这些区域相对于其他物种对应区域的尺寸比例与这些区域所承担的功能的体现程度成正比。基于语言—大脑共同演化的理论 [30]，他进一步认为概念理解的复杂性的增加导致了对句法或语法的需求，这些成分可以帮助进行有效的交流 [31]。

通过研究已灭绝人种所制造的石器的化石，D'Errico 分析了制造这些石器所需的打磨技术 [32]。这些技术反应了一个层次化的思考过程和一个类似于句法的组织系列行为的能力。这两个方面都体现了制造这些石器的人种的语言能力。他和同事还分析了来自欧洲伊伯利亚半岛的尼安德特人使用海贝和矿物颜料表达符号的行为，并发现这些曾经生活在欧洲的尼安德特人的这种行为与同时代的生活在非洲的尼安德特人的相应行为没有

明显区别[33]。这些发现质疑了语言只在非洲突然起源的假说。

除与古人类有关的遗迹外，Coupé 和同事分析了印度尼西亚的 Wallacea 区域在 6 万年前的海平面数据[34]。在此时期，智人通过跨海航行从这一区域踏上了大洋洲的土地。这些海平面数据表明要在当时到达大洋洲，必须进行几次跨海航行，每次至少跨越 90 公里宽的海面。除预先储备食物食水及建造坚固的可抵御恶劣情况的木筏外，没有一个成熟的交流系统指导建造木筏和与其他人交换意见和意图，这样的跨海壮举是不可能的。成功的跨海壮举间接表明当时的智人很可能已经具备了一个类似于语言的成熟的交流系统。

人类学和考古学的研究表明：语言演化，特别是语言起源，是一个长期复杂的生理、认知和社会发展过程；语言能力可被应用于其他的、非语言的个体和群体行为并留下印记；对这些行为的分析能够获得产生语言的先决条件及语言在何时何地起源的间接证据。

## 2.2 动物行为学

此学科的研究主要基于比较法[2]：通过比较人类和其他动物在文化层面上的不同行为来获得早期人类可能具有的行为和认知能力[35]。一个广为接受的假设是：既然人类的生物演化远慢于语言的文化演化，人类和其他高级哺乳动物在智力上没有本质差别，而只有程度区别。此学科的研究可分为两类：(1) 研究人类近亲，即灵长类物种，如猴子、黑猩猩、倭猩猩、大猩猩和红猩猩，来确定人类语言能力在这些物种中可能的原始形式；(2) 研究人类远亲，如蜜蜂和鸣禽，来比较人类语言和其他动物的交流系统的异同。主要的研究方法有三种：(1) 野外观察，即在不过多干扰的情况下对野外动物的行为进行观测；(2) 野外或实验室实验，即在野外或实验室中对野外或者捕获的动物进行实验；(3) 在人类环境下哺育动物，并进行很多人与动物的交流。

尽管只针对非人动物和其不那么复杂的交流系统，此学科的研究可激发我们思考语言结构是否为语言特有及语言处理能力是否

为人类所特有。例如，Fitch 主张用比较法来区分与语言有关的机制的 *同源* (从同一祖先继承的、相似的机体构造特性) 和 *趋同* (不同祖先的物种独立演化出来的、相似的机体构造特性)[2]。前者可帮助了解人类具有的、广泛的、和其他灵长类动物类似的机体特性，而后可帮助确定那些独立演化而来的、人和其他动物共同具有的特性。同样基于比较法，Hurford 列举了很多动物 (包括鸣禽、狗和灵长类动物) 都具有的、在认知和语言能力上的原始形式[36]。他的数据表明，很多非人动物都具有情景记忆能力，能表示抽象特性和关系，进行传递性指代，具有简单的“相似”或“不同”的概念，诸如此类。所有这些都可视作是人类语言能力的“种子”。

通过野外或实验室进行的回播 (playback) 实验，Zuberbühler 和同事考察了黛安娜长尾猴[37]、大白鼻长尾猴[38]、坎氏长尾猴[39] 和倭猩猩[40] 的叫声交流系统 (如报警叫声和食物叫声)，并发现在这些灵长类物种中存在很多语言的预适应 (preadaptation)，如组合能力、社会感知和意图共享等。这表明，在最近的灵长类演化历史中，很小的演化调整已足以让人类产生语言。此外，通过强化训练，Gentner 和同事成功让八哥学会区分两种歌声，其中一种具有  $A^N B^N$  的结构[41]。此结构类似于人类语言中的递归结构。这一成果质疑了递归结构是语言特有结构的观点[42,43]。

通过让动物适应人类文化环境，Savage-Rumbaugh 和同事考察了捕获的黑猩猩和倭猩猩使用手语和词符与人类进行交流的能力[44]。尽管这些动物的叫声非常有限，它们能够熟练的运用手语和词符表达想法。通过一些包含可控刺激的试验，他们还在这些捕获的动物中发现了很多社会行为，如指示、共同注意、依次交流和对其他动物想法的敏感力。除灵长类外，Pepperberg 对一个叫 Alex 的非洲灰鹦鹉进行了数载的研究。据报道，Alex 可以和 Pepperberg 进行言语交流，能够理解简单概念 (如颜色、形状和质地) 和复杂关系、二阶逻辑，及交流中的角色等[45]。此项研究颠覆了此前认为只有人类具有这类高级智力的观点。

动物行为学的研究指出,非人动物具有很多在语义、语用和句法方面的语言能力的原始形式。不过,我们也要知道,动物心智与人类心智大不相同。例如,只有人类能够归纳和创造无限的词汇、概念和事物,随意组合想法并把不同领域的知识混在一起,记录真实的和想象的感知经验,及考虑所见所闻和所感外的事物[46]。

### 2.3 基因学

物种的基因图谱反应了它的生物演化。基因学的研究基于一个基本假设,即基因型(细胞、生命体或个人的基因组成)决定表现型(任何可观察到的生命体特性)。在演化语言学中,此假设转变为:人类特有的、在基因 X 上的变化决定了人类特有的表现型 Y(如某种语言行为)。除了帮助重建人类发展谱系外,基因学研究还可以帮助我们确定人类语言行为的基因基础。此学科的研究手段主要包括大样本比较、家庭聚合及孪生个体研究[47]。

通过比较大样本的人类个体,基因学研究发现了很多由于人类染色体缺陷导致的疾病,如威廉姆斯症候群(WMS)和唐氏症候群(DNS)。罹患这些疾病的人通常伴有很多认知方面的缺陷,如不能正确处理局部和全局信息等[48]。有趣的是,尽管其他认知能力有缺陷,威廉姆斯症候群患者的语言能力和表现似乎并未受损[49]。这一发现暗示普遍认知能力和语言发展是分开的。实际上,除词汇测试方面的表现突出外,威廉姆斯症候群患者在句法、语态和音系方面并不强于正常人,他们在空间感知和空间信息语言表达方面有明显的障碍,而且鲜有证据表明这些患者的语言能力是被选择性的保留了[50]。

同样基于大样本比较,基因学研究还发现了一些负责大脑成长的基因,如ASPM和MIPH。Dediu和Ladd发现,这些基因的等位基因与声调语言在世界上的分布具有相关性:那些主要分布声调语言的区域的人,他们在群体水平上的基因图谱中通常多含有这些基因的老一些的等位基因[51]。这主要是因为新一些的等位基因会导致大脑皮层组织的细微变化,进而影响习得和处理语言声调的能力。

基因学科研究与语言演化有关的最重要的成果要数是通过分析 KE 家族成员而发现的 FOXP2 基因[52]。Vargha-Khadem 和同事发现,和正常成员相比,具有变异 FOXP2 基因的成员在说和理解语言上有明显缺陷,如不能生成可理解的言语,无法根据语法处理词汇,以及不能对语法性做除正确的判断[53]。除人类外,其他脊椎动物,如灵长类、啮齿类和鸟类,也具有不同版本的 FOXP2 基因。Enard 和同事通过对人类、灵长类和啮齿类动物的 FOXP2 氨基酸序列的比较,发现从灵长类到人类,FOXP2 氨基酸序列经历了 2 个近期(小于 12 万年)的变化。这反映了一个对此基因的很强的选择[54]。由于语言在人类历史上也是最近才出现的,FOXP2 基因似乎是一个“语言基因”,专为语言而被选择。语言学家 Jackendoff 和 Pinker 也认为人类的 FOXP2 基因是独特的,它决定了记录和发展语言官能的基因机制[55]。最近的分子遗传研究把人类的 FOXP2 氨基酸序列复制到老鼠上,并比较了这些“人类化的”老鼠和其他野生老鼠的习性。此研究表明,人类化的 FOXP2 基因主要影响老鼠的脑基底核的神经连接。这表明人类大脑中脑基底核神经回路的改变对言语演化和语言的出现尤为重要[56]。

尽管如此,通过对受影响的和正常的 KE 家族成员,及受影响的成员和其他有类似言语和语言障碍的失语症患者进行全面的语言和认知能力的比较,Watkins 和同事发现受影响的 KE 家族成员对编码测试的表现最为糟糕。此结果对应于一个核心的排序(sequencing)能力上的障碍,此障碍才是导致言语表现和非言语表现失调的主要原因[57]。同时,对雀类 FOXP2 基因的研究发现,此基因可影响鸣禽对鸟声序列的协调[58];对老鼠 FOXP2 基因的研究也发现,变异的 FOXP2 基因会导致老鼠大脑中的神经突触失去可塑性,进而影响其运动学习能力[59]。这些新证据表明,受影响的 KE 家族成员的言语和语言障碍主要是由于发展运动学习能力失调导致的,而且此失调主要体现在负责发声和次序学习的脑区中。这一观点不要求把语言官能进行遗传编码,也不认为 FOXP2 基因是专

门为语言而被选择的。KE 家族成员因为变异的 FOXP2 基因而出现语言失调的证据并不足以支持存在一个被遗传编码的语言官能。

除 FOXP2 外, 基因学研究还在探索导致其他语言障碍的基因基础。目前的成果都还不足以说明存在一个生物学机制决定的语言模块[60]。同时, 相比于其他行为, 语言行为很难被精确细致的量化和分类, 这也导致了很难精确定位相关的基因。人类基因型和认知行为的关联通常是间接的, 不能被简单的归为某个单独基因或基因序列与一组认知能力的关联。没有哪个单独基因可以解释为什么人类可以使用特有的语言能力进行交流。我们只有研究那些在不同器官的不同水平上起作用的不同基因, 才能更好的了解言语和语言是如何工作的。

## 2.4 脑科学

除基因外, 人类的脑神经回路也为人类行为提供了神经学基础。通过假设不同脑区负责不同类型的活动, 脑科学研究旨在发现与语言处理能力及其演化有关的神经基础。

脑科学研究中的一个有趣发现是猴子脑中的镜像神经元。这些位于猴脑额叶和顶叶的神经元, 在猴子做抓食物的动作, 或者当它看到其他猴子或人类实验员进行类似动作时都会被激活[61]。跟进实验表明, 这些神经元可以帮助猴子理解动作的意图[62] 和目的[63], 而且人脑的布鲁卡区也可能存在类似的神经元[64]。这些成果激发了一个人类镜像神经系统的观点[65,66]。此观点呼应了语言感知的肌动理论[67], 并支持了“手势起源说”的语言起源理论 [65,68]。但是, 学者们也提出了一些质疑, 比如 Hickok 认为镜像神经元只是建立了一个单纯的、巴普洛夫式的条件反射, 或者匹配了一些抽象的、不同于一般运动-感知系统所能提取的概念[69], Heyes 也认为镜像神经元是关联式学习的副产品, 而不是对行为理解的适应性产物[70]。对于 镜像神经元, 我们需要更多研究来探索其对语言演化是否有用。同时, 我们也要进一步研究语言可否由特殊的大脑连接及其综合功能所导致的[71,72]。

现代脑成像技术提供了一个观察人类行为的新角度。这些技术可以诊视脑受损病人,

也可以记录正常被试在特定语言任务中的神经表现。两种脑成像技术已被广泛应用: (1) 脑电图 (EEG, electroencephalography), 通过置于头皮的电极记录语言或一般认知任务中特定时间段的大脑反应, 来确定这些反应的时域顺序, 并推测其在大脑中的来源; (2) 功能核磁共振 (fMRI, function Magnetic Resonance Imaging), 通过监测由于脑区神经活动导致的血氧水平变化来确定负责某些语言或认知能力的脑区。

根据“违反式 (violation)”实验设计, 即比较处理正常语言例子和处理有语义或语法不相容例子的神经反应, 脑电研究发现了很多与语义、句法和词态处理有关的事件相关电位 (ERPs, event-related potentials)[73]。这些研究有助于验证已有的语言学理论, 甚至为提出新理论做贡献。例如, 在语言学中, 将前置替代和它的先行词结合是一个句法问题 [74,75], 而确定传递语中反身代词的先行词则不确定是句法还是其他问题。基于一些前置替代一致/不一致的例句 (如“John’s brothers like themselves/\*himself.”) 和传递语一致/不一致的例句 (如“John’s brothers like Bill and themselves/\*Bill and himself.”), Harris 和同事在用脑电图比较前置替代句子的神经反应时监测到了 P600 (在被试看到反身代词后 600 毫秒左右, 其脑电图出现一个正向事件电位), 而在比较传递语句子的神经反应时监测到了 P300 (在被试看到反身代词后 300 毫秒左右, 其脑电图出现一个正向事件电位)[76]。这些结果明确了处理前置替代需要一个句法处理, 而处理传递语则可能涉及与语义有关的语用或者叙述处理。

通过比较预设条件下的大脑反应, 功能核磁共振研究发现, 人类大脑的布鲁卡区、前扣带皮层和其他额叶区域都对语言处理有重要的协调作用[77][78]。其他研究也发现, 一些原来认为是专门处理语言的脑区 (如布鲁卡区和韦尼克区) 也负责一些非语言活动, 如处理音乐 [79] 及协调视觉和手动 [68], 此外, 言语的神经基础与其他包含表达语言的身体部分的非语言活动的神经基础也有重合[80]。

脑科学研究区分了不同类型的语言处理

活动, 启发我们重新考虑人类语言的独特性及语言与非语言活动的关联。需要注意的是, 尽管某些脑区重点负责某些语言活动, 语言与其他认知行为一样是一个全脑功能, 需要多脑区共同协调, 而且这些脑区也可能负责其他活动。如果过分强调“一对一”的语言功能与某些脑区的特定关联, 会让我们重蹈 18 世纪颅相学的覆辙。

## 2.5 计算机模拟和行为实验

演化语言学中的计算机模拟来起源于人工智能和计算机科学。它可被视为是用计算机程序表达的假说或理论[81], 而其模拟结果可被视为是对这些假说或理论的实证[82]。演化语言学中的行为实验来自于心理学实验, 与后者不同, 这些实验主要研究社会—文化因素对语言演化的作用及成熟的交流系统是如何产生的[83,84]。尽管最近才被引入到演化语言学的研究中, 模拟仿真和行为实验在近年来的发展非常迅速。

一些计算机模拟使用人工神经网络 (artificial neural networks, ANN) 来模拟语言习得和处理。这个简单的统计学习机制在某种程度上可以模拟人类大脑中的神经构建。在 ANN 中, 神经节点被分层组织。输入层节点接受和处理输入, 并把其输出传到隐藏层节点, 后者再把它们的输出传到输出层节点。语言知识以权重形式存储在跨层的连接上, 这些权重被随机初始化, 并在训练过程中调整。在训练中, 网络的输出与预期的输出进行比较, 其差值被反向传回网络, 并根据反向传播算法 (back-propagation algorithm) 对连接权重进行调整, 以便使网络的输出进一步接近预期的输出。这一过程在训练中不断重复以逐步提高 ANN 的表现。

基于一类特殊的人工神经网络, 即简单重复网络 (simple recurrent network, SRN), Reali 和 Christiansen 证明[85], 统计信息, 如训练句子中的词间转移概率 (transitive probability), 足以解决助词倒位问题[86,87], 即把含有从句的陈述句, 如 “The little boy who  $is_i$  crying  $is_j$  hurt.” ( $is_i$  是从句助词, 而  $is_j$  是主句助词), 变成疑问句时, 要把哪个助词移到句首, 即 “ $Is_j$  the little boy who  $is_i$  crying hurt?” (即把主句助词移到句首, 而不是句中

的第一个助词, 因为它在从句中)。其他研究进一步表明, SRN 还可以把词汇组织成层级的语义结构, 习得名—动或名—动—名句子的语法关系, 处理复杂的、含有多层关系从句的结构中的主谓一致等[88-91]。所有这些表明: (1) 语言习得与其他类型的学习没有本质区别; (2) 个体与环境交流的普遍机制也可以用来解释语言习得[92]; (3) 基于统计和提示信息的普遍学习机制可以从有限的语言材料中归纳出足够的语言知识[93-95], 此点反驳了刺激匮乏假设 (the poverty of the stimulus, 即语言学习一定是基于普遍语法的、天生的限制, 因为学习者的输入是如此的的一致和不完整, 不足以使其习得语法; 助词倒位问题是这一假设的一个经典版本。另见[96-98]的讨论)[92]。最新的研究还说明, 那些符合处理限制和普遍学习机制的语言形式会被容易的习得并在人群中迅速扩散[99]。

其他模拟仿真研究引入多个体系统 (multi-agent system[100]), 将语言使用者模拟为人工个体。这些个体具有一些预设的或可演化的能力来处理语言材料。个体可以彼此交流以习得或更新其语言知识。语言知识多用不同的语言规则或人工神经网络表示, 它们可帮助个体表达语义和理解语句。通过调整交流模式或个体身份, 这类模拟还可引入社会—文化因素, 并探讨其对语言演化的作用。

通过多个体模型和特定的语言规则, Steels 进行了一系列关于语言演化的模拟仿真研究, 其中每个研究包含一个特定的语言游戏 (language game[101])。这些游戏要求个体使用某种语言特性或结构 (如颜色词汇、语态语体等) 来完成交流。为成功进行交流, 个体招募了一些必要的功能, 并逐步发展出相应的语言特性或结构。招募机制本身和所招募的功能都不是语言特有的。这些研究验证了基于招募机制的语言演化理论[102]。此理论认为语言的起源和演化是通过招募 (recruit) 相关的认知功能来服务符号交流完成的。

除上述语言特性和结构外, Kirby 通过重复学习模型 (iterated learning, 通过观察别人的行为来学习, 而这些行为本身也是用同

样的方式学到的) 探索了一个重要的语言普遍性, 即构成性(compositionality, 复杂的表达的意思取决于此表达的成分的意思和这些成分的组合方式), 的起源[103]。在重复学习模型中, 个体被链成一串, 每个个体代表一代中的语言使用者。每个个体只能从学习串中其前面的个体, 并教授其后面的个体。每个个体具有一些学习能力来获得一些语法和词汇规则, 用以表达具有谓词结构的一些意思。在模拟中, 串中第一个个体使用一套整体信号系统来表达意思, 每个意思对应于一个整合的、不可分的信号。此个体把它创造的意思—信号传输给下面的个体, 后者通过其学习能力从这些对中归纳出语言知识, 并把根据这些知识创造意思—信号对继续传输给下面的个体以供学习。此过程不断重复, 类似于不同代个体间的语言习得。有趣的是, 当在这样的文化交流中加入 *传输瓶颈* (transmission bottleneck, 即学习者不能从教授者那里接收到全部的意思—信号对) 时, 这个人工语言在传输中开始发生变化 (从整体性变成构成性, 即用一套词汇和组合词汇的规则来表达意思) 来适应这个传输瓶颈 [104]; 换句话说, 在没有先验的、倾向于构成性知识的情况下, 文化传播的传输瓶颈也可以导致一个构成性语言的出现。此项研究强调了文化传播对语言演化的作用。后来的模拟仿真进一步探讨了不同形态的文化传播对语言起源和变化的作用[105]。

基于这个重复学习模式, Kirby 和同事还设计了一些行为实验[83]: 他们让一串人类被试中的第一个人学习一套由随机信号组成的整体性信号系统。此被试试着记下这套系统, 并复述给下一个被试。此过程在一串被试中不断重复。与模拟结果类似, 最初的随机语言不仅变的有结构了, 而且变得更容易被学习。这个语言甚至可以准确表达那些没有出现在学习例子中的意思。这些实验不仅支持了模拟结果, 还激发了一个“无设计者的设计”(design without a designer view, 语言是使用者无意识的设计经过文化传播累计的结果) 的语言演化理论[106]。

除这些实验外, Galantucci 设计了一个行为实验来探讨交流系统的产生[107]。在此

实验中, 两个被试试图将其控制的虚拟个体移到一个共同的虚拟房间。为达此目的, 被试要使用一个交流渠道来交流, 但这个交流渠道屏蔽了已有的交流方式, 如言语和书面语。尽管如此, 在一系列的尝试之后, 被试逐渐发展出了一套可靠的交流系统, 用以交换位置和移动等用以达成特定目的的信息。除表面上的不同处, 这个新产生的交流系统和人类语言在很多方面都很相似, 如都是约定俗成的、构成性的、简略的和可扩展的。此实验对我们研究人类交流系统的起源和演化, 以及这些系统具有哪些特性都有启示作用。最新的实验还表明, 可靠的交流系统甚至可以在没有预先指定交流渠道的条件下产生[108]。

计算机模拟和行为实验可有效研究语言演化和交流系统出现等问题, 合理的再现语言结构、使用者和社会—文化环境上的复杂性, 并能说明特定的、一小批假设是否足以产生语言的基本方面, 或者某些因素对语言或人类的演化是否具有关键作用[109]。所有这些可以把语言学理论从描述性的转化为解释、探索性的[110]。这两种研究已逐步成为很多语言演化会议的重要主题[10-12]。

### 3、讨论及结论

如上所示, 很多学科可以帮助我们了解语言及其演化; 它们的研究手段可以拓宽我们的视野, 而且相比语言学本身的研究, 这些学科的成果可以提供更加丰富的对于语言及其演化的知识。例如, 脑科学研究揭示了语言行为背后的复杂的大脑神经机制及语言和非语言行为的紧密联系; 基因学帮助我们超越了历史语言学的时间限制; 动物行为的比较数据帮助我们建立了人类语言特有行为和动物一般行为间的联系; 模拟仿真可以重现语言演化的主要阶段, 让我们在短时间内经历过去几十、几百万年的演化。所有这些对于演化语言学来说都是必须的。

同时, 这些学科也有其各自不可避免的局限。对于人类学和考古学, 仅依靠古人类遗迹来估算 1、2 百万年前的交流系统是个什么样子及早期人类具有哪些特征是很困难的。缺乏足够证据经常导致相互竞争的理论, 而验证这些理论需要其他方法。对于动物行

为学，我们只能用我们的想法去解释动物的表现。除动物模型外，我们还需要其他“实验温床”来了解动物中语言能力的原始形式如何逐渐进入人类语言和交流系统。对于基因学，找到足够多的具有某种特定语言障碍的病人是很困难的，而且缺乏足够的受影响个体也限制了基因学研究排查起作用的基因。对于脑科学，脑成像技术还面临很多技术瓶颈和伦理局限[111]，而且设计一个脑科学实验能够完全排除不相关因素而只保留所关心的特定语言行为也是很困难的。对于计算机模拟，直接比较模拟结果和实证数据，尤其是语言起源的数据，通常是不可能的，而且任何对参数设置、编程，或者结果分析的忽视都可能导致预期的模拟结果与实际的模拟结果不匹配，或者某些重要的现象被忽视的错误[112]。除一般局限外，针对 SRN 还有一些具体批评，如它不能明确表达句法歧义[60,113]。对于行为实验，如何限制被试不去使用已有的语言知识有时是个棘手的课题。最后，对于这些学科的关于语言处理和演化的研究，语言学的指导是不可或缺的。

所有这些表明，任何单一学科都不可能获得对语言演化的全面认识。有鉴于此，我们只能从跨学科角度对语言演化进行研究。在实际中，我们不仅要关注那些描述具体语言现象和提出现象成因猜想的语言学研究，还要关注其他学科的研究，这些研究有助于确定表面现象背后的机制，揭示这些机制的演化轨迹，并分析预测这些机制的可能结果。只有这样，我们才能验证所提出的理论，并且获得一个比较全面的对这些现象的认识。跨学科角度可以借鉴不同学科的丰富知识，协调表面上相反的观点，提供新的研究角度，并剔除那些仅在单一学科构架下合理的解释。这样的一个跨学科角度可以获得足够和全面的对语言学问题的解释 [13]。只有语言学家从过去的传统问题和固有方法中跳出来，开始关注具有认知、社会和科学意义的问题，并采纳其他学科的方法来研究语言问题，这样一个跨学科研究才会对语言学界发挥重要作用[16]。可以预见，未来的演化语言学研究将会集中于三个方面：(1) 研究语言本身的研究，侧重于多样性和变化；(2) 从跨学

科角度研究语言官能的演化；(3) 研究语言在大脑中的形态及大脑对语言的处理。这三个方面将会帮助我们最终全面了解人类认知的本质和人类语言的演化。

### 致谢

作者在此感谢复旦大学现代人类学教育部重点实验室金力教授、上海师范大学比较语言学 E-研究院所潘悟云教授和香港中文大学语言工程实验室王士元教授对本文的宝贵意见。

### 参考文献：

1. Hauser MD, Barner D, O'Donnell T(2007)Evolutionary linguistics: A new look at an old landscape. *Language Learning and Development* 3:101-132.
2. Fitch T(2010)*The Evolution of Language*. Cambridge: Cambridge University Press.
3. Ke J-Y, Holland JH(2006)Language origin from an emergentist perspective. *Applied Linguistics* 27:691-716.
4. Harnad S, Steklis HD, Lancaster J(1976)*Origins and Evolution of Language and Speech*. New York: New York Academy of Sciences.
5. Hurford JR, Studdert-Kennedy M, Knight C(1998)*Approaches to the Evolution of Language: Social and Cognitive Bases*. Cambridge: Cambridge University Press.
6. Briscoe T(2002)*Linguistic Evolution Through Language Acquisition: Formal and Computational Models*. Cambridge: Cambridge University Press.
7. Wray A(2002)*The Transition to Language*. Oxford: Oxford University Press.
8. Christiansen MH, Kirby S(2003)*Language Evolution*. Oxford: Oxford University Press.
9. Tallerman M(2005)*Language Origins: Perspectives on Evolution*. Oxford: Oxford University Press.
10. Cangelosi A, Smith ADM, Smith K(2006)*The Evolution of Language: Proceedings of the 6th International Conference*. Singapore: World Scientific Press.
11. Smith ADM, Smith K, Ferrer-i-Cancho R(2008)*The Evolution of Language: Proceedings of the 7th International Conference*. Singapore: World Scientific Press.
12. Smith ADM, Schouwstra M, De Boer B, Smith K(2010)*The Evolution of Language: Proceedings of the 8th International Conference*. Singapore: World Scientific Press.
13. Bickerton D, Szathmáry E(2009)*Biological Foundations and Origin of Syntax*. Cambridge, MA: MIT Press.
14. Larson RK, Déprez V, Yamakido H(2009)*The Evolution of Human Language: Biolinguistic Perspectives*. Cambridge: Cambridge University Press.
15. Oudeyer P-Y(2006)*Self-organization in the Evolution of Speech* (translated by Hurford, JR). Oxford: Oxford University Press.
16. Gong T, Yang R, Zhang C, Ansaldo U(2010)Review of the summer institute in cognitive sciences 2010: The origins of language. *Biolinguistics* 4(4):385-402.
17. Steels L(2005)The emergence and evolution of linguistic structure: From lexical to grammatical communication systems. *Connect Sci* 17:213-230.
18. Hauser MD, Chomsky N, Fitch WT(2002)The faculty of language: What is it, who has it, and how did it evolve? *Science* 298:1569-1579.
19. Chomsky N(1993)*A minimalist program for linguistic theory*. MIT Occasional Papers in Linguistics 1. Cambridge, MA: MIT Working Papers in Linguistics.
20. Jackendoff R(2002)*Foundations of Language: Brain, Meaning,*

- Grammar, Evolution. Oxford: Oxford University Press.
21. Chomsky N(1986) Knowledge of Language: Its Nature, Origin and Use. New York: Praeger.
  22. Pinker S, Bloom P(1990) Natural language and natural selection. *Behav Brain Sci* 13:707-784.
  23. Elman J, Bates E, Johnson MH, Karmiloff-Smith A, Parisi D, Plunkett P(1996) Rethinking Innateness: A Connectionist Perspective on Development. Cambridge, MA: MIT Press.
  24. MacWhinney B(1999) The Emergence of Language. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
  25. Christiansen MH, Kirby S(2003) Language evolution: Consensus and controversies. *Trends Cogn Sci* 7(7):300-307.
  26. Clark EV(2003) First Language Acquisition. Cambridge: Cambridge University Press.
  27. Lieberman P(2006) Toward an Evolutionary Biology of Language. Cambridge, MA: Belknap Press of Harvard University Press.
  28. Smith TM, Toussaint M, Reid DJ, Olejniczak AJ, Hublin JJ(2007) Rapid dental development in a Middle Paleolithic Belgian Neanderthal. *Proc Natl Acad Sci USA* 105:20220-20225.
  29. Schoenemann PT(2006) Evolution of the size and functional areas of the human brain. *Annu Rev Anthropol* 35:379-406.
  30. Deacon TW(1997) The Symbolic Species. New York: W. W. Norton.
  31. Schoenemann PT(1999) Syntax as an emergent characteristic of the evolution of semantic complexity. *Mind Mach* 9:309-346.
  32. D'Errico F, Henshilwood CS, Nilssen P(2001) An engraved bone fragment from ca. 75 kyr Middle Stone Age levels at Blombos Cave, South Africa: implications for the origin of symbolism. *Antiquity* 75:309-318.
  33. Zilhão J, Angelucci DE, Badal-García E, D'Errico F, Daniel F, Dayet L, Douka K, Higham TFG, Martínez-Sánchez MJ, Montes-Bernárdez R, Murcia-Mascarós S, Pérez-Sirvent C, Roldán-García C, Vanhaeren M, Villaverde V, Wood R, Zapata J(2010) Symbolic use of marine shells and mineral pigments by Iberian Neandertals. *Proc Natl Acad Sci USA* 107:1023-1028.
  34. Coupé C, Hombert JM(2002) Language at 70,000 BP: Evidence from sea-crossings. In: *The Evolution of Language: Proceedings of the 4th International Conference*. p27. Harvard.
  35. Stanford CB(2006) Cognition, imitation, and culture in the great apes. In: Arbib MA (ed) *Action to Language via the Mirror Neuron System*. 91-109. Cambridge: Cambridge University Press.
  36. Hurford JR(2007) The Origins of Meaning. Oxford: Oxford University Press.
  37. Zuberbühler K(2000) Causal cognition in a non-human primate: Field playback experiments with Diana monkeys. *Cognition* 76:195-207.
  38. Arnold K, Zuberbühler K(2006) Language evolution: Semantic combinations in primate calls. *Nature* 441:303
  39. Ouattara K, Zuberbühler K, N'Goran E, Gombert J, Lemasson A(2009) The alarm call system of female Campbell's monkeys. *Animal Behavior* 78:35-44.
  40. Clay Z, Zuberbühler K(2009) Food-associated calling sequences in bonobos. *Animal Behavior* 77: 387-1396.
  41. Gentner TQ, Fenn KM, Margoliash D, Nusbaum HC(2006) Recursive syntactic pattern learning by songbirds. *Nature* 440:1204-1207.
  42. Corballis MC(2007) Recursion, language, and starlings. *Cogn Sci* 31:697-704.
  43. Van Heijningen CAA, De Visser J, Zuidema W, Ten Cate C(2009) Simple rules can explain discrimination of putative recursive syntactic structures by a songbird species. *Proc Natl Acad Sci USA* 106:20538-20543.
  44. Savage-Rumbaugh S, Shanker SG, Taylor TJ(1998) *Apes, Language, and the Human Mind*. New York: Oxford University Press.
  45. Pepperberg IM(1999) *The Alex Studies: Cognitive and Communicative Abilities of Grey Parrots*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
  46. Hauser MD(2010) The origin of the mind. *Sci Am* 301:46-51.
  47. Stromswold K(2009) Genetics and the evolution of language: What genetic studies reveal about the evolution of language. In: Larson RK, Déprez V, Yamakido H(eds) *The Evolution of Human Language: Biolinguistic Perspective*. 176-190. Cambridge: Cambridge University Press.
  48. Bellugi U, Bihle A, Jernigan T, Trauner D, Doherty S(1990) Neuropsychological, neurological, and neuroanatomical profile of Williams syndrome. *Am J Med Genet Suppl* 6:115-125.
  49. Bellugi U, Bihle A, Sabo H, Marks AB(1993) Dissociation between language and cognitive functions in Williams syndrome. In: Bishop D, Mogford K(eds) *Language Development in Exceptional Circumstances*. 177-189. Hove, UK: Lawrence Erlbaum Associates.
  50. Brock J(2007) Language abilities in Williams syndrome: A critical review. *Dev Psychopathol* 19(1):97-127.
  51. Dediu D, Ladd DR(2007) Linguistic tone is related to the population frequency of the adaptive haplogroups of two brain size genes, ASPM and Microcephalin. *Proc Natl Acad Sci USA* 104:10944-10949.
  52. Hurst JA, Baraitser M, Auger E, Graham F, Norell S(1990) An extended family with a dominantly inherited speech disorder. *Dev Med Child Neurol* 32(4):352-355.
  53. Vargha-Khadem F, Watkins K, Alcock K, Fletcher P, Passingham R(1995) Praxic and nonverbal cognitive deficits in a large family with a genetically transmitted speech and language disorder. *Proc Natl Acad Sci USA* 92:930-933.
  54. Enard W, Przeworski M, Fisher SE, Lai CS, Wiebe V, Kitano T, Monaco AP, Pääbo S(2002) Molecular evolution of FOXP2, a gene involved in speech and language. *Nature* 418:869-872.
  55. Jackendoff R, Pinker S(2005) The nature of the language faculty and its implications for evolution of language (reply to Fitch, Hauser, and Chomsky). *Cognition* 97:211-225.
  56. Enard W, Gehre S, Hammerschmidt K, Hölter SM, Blass T, Somel M, Brückner MK, Schreweis C, Winter C, Sohr R, Becker L, Wiebe V, Nickel B, Giger T, Müller U, Groszer M, Adler T, Aguilar A, Bolle I, Calzada-Wack J, Dalke C, Ehrhardt N, Favor J, Fuchs H, Gailus-Durner V, Hans W, Hölzlwimmer G, Javaheri A, Kalaydjiev S, Kallnik M, Kling E, Kunder E, Moßbrugger I, Naton B, Racz I, Rathkolb B, Rozman J, Schrewe A, Busch DH, Graw J, Ivandic B, Klingenspor M, Klopstock T, Ollert M, Quintanilla-Martinez L, Schulz H, Wolf E, Wurst W, Zimmer A, Fisher SE, Morgenstern R, Arendt T, De Angelis MH, Fischer J, Schwarz J, Pääbo S(2010) A humanized version of Foxp2 affects cortico-basal ganglia circuits in mice. *Cell* 137:961-971.
  57. Watkins KN, Dronkers N, Vargha-Khadem F(2002) Behavioral analysis of an inherited speech and language disorder: Comparison with acquired aphasia. *Brain* 125:452-464.
  58. White SA, Fisher SE, Geschwind DH, Scharff C, Holy TE(2006) Singing mice, songbirds, and more: Models for FOXP2 function and dysfunction in human speech and language. *J Neurosci* 26:10376-10379.
  59. Groszer M, Keays D, Deacon R, de Bono J, Prasad-Mulcare S, Gaub S, Baum M, French C, Nicod J, Coventry J, Enard W, Fray M, Brown S, Nolan P, Pääbo S, Channon K, Costa R, Eilers J, Ehret G, Rawlins JNP, Fisher S(2008) Impaired synaptic plasticity and motor learning in mice with a point mutation implicated in human speech deficits. *Curr Biol* 18:354-362.
  60. Clark A, Lappin S(2011) *Linguistic Nativism and the Poverty of the Stimulus*. Malden, MA: Wiley-Blackwell.
  61. Rizzolatti G, Fogassi L, Gallese V(2006) Mirrors in the mind. *Scientific American* 295:54-61.
  62. Kohler E, Keysers C, Umiltà MA, Fogassi L, Gallese V, Rizzolatti G(2002) Hearing sounds, understanding actions: Action representation in mirror neurons. *Science* 297:846-848.

63. Umiltà MA, Kohler E, Gallese V, Fogassi L, Fadiga L, Keysers C, Rizzolatti G (2001) I know what you are doing. A neurophysiological study. *Neuron* 31(1):155-165.
64. Iacoboni M, Dapretto M (2006) The mirror neuron system and the consequences of its dysfunction. *Nat Rev Neurosci* 7:942-951.
65. Rizzolatti G, Arbib M (1998) Language within our grasp. *Trends Neurosci* 21(5):188-194.
66. Rizzolatti G, Sinigaglia C (2010) Mirroring and making sense of others. *Nat Rev Neurosci* 11:449.
67. Bever TG, Poeppel D (2010) Analysis by synthesis: A (re-)emerging program of research for language and vision. *Biolinguistics* 4(2-3):174-200.
68. Corballis MC (2002) *From Hand to Mouth: The Origins of Language*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
69. Hickok G (2009) Eight problems for the mirror neuron theory of action understanding in monkeys and humans. *J Cogn Neurosci* 21(7):1229-1243.
70. Heyes C (2010) Where do mirror neurons come from? *Neurosci Biobehav Rev* 34:575-583.
71. Sporns O (2011) *Networks of the Brain*. Cambridge, MA: MIT Press.
72. Sporns O, Chialvo DR, Kaiser M, Hilgetag CC (2004) Organization, development and function of complex brain networks. *Trends Cogn Sci* 8(9):418-425.
73. Kuhl PK, Rivera-Gaxiola M (2008) Neural substrates of language acquisition. *Annu Rev Neurosci* 31:511-534.
74. Chomsky N (1981) *Lectures on Government and Binding*. New York: Mouton de Gruyter.
75. Reinhart T, Reuland E (1993) Reflexivity. *Linguistic Inquiry* 24(4):657-720.
76. Harris T, Wexler K, Holcomb P (2000) An ERP investigation of binding and coreference. *Brain Lang* 75:313-346.
77. Grodzinsky Y, Santi A (2008) The battle for Broca's region. *Trends Cogn Sci* 12:474-480.
78. Makuuchi M, Bahlmann J, Anwander A, Friederici AD (2009) Segregating the core computational faculty of human language from working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106:8362-8367.
79. Maess B, Koelsch S, Gunter TC, Friederici AG (2001) Musical syntax is processed in Broca's area: an MEG study. *Nat Neurosci* 4:540-545.
80. Pulvermüller F (2006) Motor cortex maps articulatory features of speech sounds. *Proc Natl Acad Sci USA* 103:7865-7870.
81. Parisi D, Mirolli M (2007) The emergence of language: How to simulate it. In: Lyon C, Nehaniv CL, Cangelosi A (eds) *Emergence of Communication and Language*. 269-285. London: Springer-Verlag.
82. Cangelosi A, Parisi D (2002) *Simulating the Evolution of Language*. London: Springer-Verlag.
83. Kirby S, Cornish H, Smith K (2008) Cumulative cultural evolution in the laboratory: An experimental approach to the origins of structure in human language. *Proc Natl Acad Sci USA* 105:10681-10686.
84. Scott-Phillips TC, Kirby S (2010) Language evolution in the laboratory. *Trends Cogn Sci* 14(9):411-417.
85. Reali F, Christiansen MH (2005) Uncovering the richness of the stimulus: Structure dependence and indirect statistical evidence. *Cogn Sci* 29:1007-1028.
86. Chomsky N (1975) *The Logical Structure of Linguistic Theory*. New York: Plenum Press.
87. Boeckx C (2006) *Linguistic Minimalism: Origins, Concepts, Methods, and Aims*. Oxford: Oxford University Press.
88. Elman J (1990) Finding structure in time. *Cogn Sci* 14:179-211.
89. Elman J (1991) Distributed representations, simple recurrent networks, and grammatical structure. *Machine Learning* 7:195-225.
90. Morris W, Cottrell G, Elman J (1998) A connectionist simulation of the empirical acquisition of grammatical relations. In: Wemter S, Sun R (eds) *Hybrid Neural Systems*. 175-193. London: Springer.
91. Cartling B (2008) On the implicit acquisition of a context-free grammar by a simple recurrent neural network. *Neurocomputing* 71:1527-1537.
92. Elman J (2005) Connectionist models of cognitive development: Where next? *Trends Cogn Sci* 9:111-117.
93. Saffran JR, Aslin RN, Newport EL (1996) Statistical learning by 8-month-old infants. *Science* 274:1926-1928.
94. Tomasello M (2004) What kind of evidence could refute UG hypothesis: Commentary on Wunderlich. *Studies in Language* 28:642-644.
95. Marcotte JP (2006) Causative alternation errors and innate knowledge: Consequences of the "no negative evidence" fallacy. In: Clark EV, Kelly BF (eds) *Constructions in Acquisition*. 205-232. Stanford, CA: CSLI Publications.
96. Pullum GK, Scholz BC (2002) Empirical assessment of stimulus poverty arguments. *Linguistic Rev* 19:9-50.
97. Marcus GF (1999) Poverty of the stimulus arguments. In: Wilson RA, Keil FC (eds) *The MIT Encyclopedia of the Cognitive Sciences*. 660-661. Cambridge, MA: MIT Press.
98. MacWhinney B (2004) A multiple process solution to the logic problem of language acquisition. *J Child Lang* 31:883-914.
99. Christiansen MH, Chater N (2008) Language as shaped by the brain. *Behav Brain Sci* 31(5):489-509.
100. Bonabeau E (2002) Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human system. *Proc Natl Acad Sci USA* 99:7280-7287.
101. Loreto V, Steels L (2007) Social dynamics: Emergence of language. *Nat Phys* 3:758-760.
102. Steels L (2009) Cognition and social dynamics play a major role in the formation of grammar. In: Bickerton D, Szathmáry E (eds) *Biological Foundations and Origin of Syntax*. 345-368. Cambridge, MA: MIT Press.
103. Kirby S (1999) *Function, Selection and Innateness: The Emergence of Language Universals*. New York: Oxford University Press.
104. Brighton H, Smith K, Kirby S (2005) Language as an evolutionary system. *Phys Life Rev* 2:177-226.
105. Gong T (2010) Exploring the roles of horizontal, vertical, and oblique transmissions in language evolution. *Adap Behav* 18(3-4):356-376.
106. Cornish H (2010) Investigating how cultural transmission leads to the appearance of design without a designer in human communication systems. *Interaction Studies* 11(1):112-137.
107. Galantucci B (2005) An experimental study of the emergence of human communication systems. *Cogn Sci* 29:737-767.
108. Scott-Phillips TC, Kirby S, Ritchie GRS (2010) Signalling signalhood and the emergence of communication. *Cognition* 113:226-233.
109. Lyon C, Nehaniv CL, Cangelosi A (2007) *Emergence of Communication and Language*. London: Springer-Verlag.
110. Mareschal D, Thomas MSC (2006) How computational models help explain the origins of reasoning. *IEEE Comput Intell M* 1(3):32-40.
111. Logothetis NK (2008) What we can do and what we cannot do with fMRI. *Nature* 453:869-868.
112. Galán JM, Izquierdo LR, Izquierdo SS, Santos JI, del Olmo R, López-Paredes A, Edmons B (2009) Errors and artefacts in agent-based modeling. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. Available at: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/1/1.html>.
113. Henderson J (2010) Artificial neural networks. In: Clark A, Fox C, Lappin S (eds) *Handbook of Computational Linguistics and Natural Language Processing*. 221-237. Oxford: Wiley-Blackwell.