

统计学习的认知机制及其神经基础*

武秋艳^{1, 2)} 邓园^{1)**}

(¹⁾中国科学院心理研究所行为科学重点实验室, 北京 100101; (²⁾中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 本文主要探讨了人类统计学习研究的起源和发展、影响统计学习的因素及统计学习的脑神经基础。人类统计学习的研究起源于 20 世纪 90 年代关于婴儿听觉语音流切分的实验, 之后, 大量研究又考察了对听觉非语言信息及视觉图形的统计学习。这些研究表明, 统计学习是一种具有一般性的、涉及发现和提取规则的学习类型, 但是不同范畴的统计学习又受到与特定范畴有关因素的制约。例如, 语言统计学习受到语言因素的制约, 而非语言统计学习与呈现刺激的特征以及呈现的通道有关。近些年, 研究者开始采用事件相关电位 (event-related potentials, ERPs) 技术考察统计学习的时间进程, 以及采用功能核磁共振成像 (functional magnetic resonance imaging, fMRI) 技术考察统计学习的脑激活模式。ERPs 研究较一致地发现 400 ms 左右产生的负波与统计信息的提取有关, 而脑成像研究结果表明, 与统计学习相关的脑区有大脑左侧颞上回 (superior temporal gyrus)、右侧纹状体 (right striatum) 和右侧颞叶内侧记忆系统 (right medial temporal memory system)。

关键词 统计学习, 规则, 领域一般性, 组合概率, ERP, fMRI

学科分类号 B842.3

DOI: 10.3724/SP.J.1206.2011.00539

在每天的生活中, 我们都会从周围环境中接受大量信息, 而这些信息往往蕴含着某些内在规则, 对这些内在规则的把握或适应能使人类更有效地处理和储存外在信息。以我们每天都使用的语言为例, 语言就是一套具有内在规则的符号系统。在句子水平上, 语言的规则表现为语法 (grammar)。在词汇 (word) 水平上, 词的组成规则就叫构词法 (morphology) 或正字法 (orthography)。例如, 英语词汇具有“边界限制”规则, 即只有部分辅音或辅音组合可以出现在单词的起始位置或结尾处, 如“gdog”不是一个合理的单词, 因为“gd”不可以出现在单词的起始位置。又例如在汉语中, 大部分的左右结构合体字都是左形右声的 (左边的部首代表意义类别, 右边部首代表发音)。正是因为掌握了这些规则, 人们才能快速有效地加工语言文字。那么, 人类是如何掌握这些语言规则的呢?

20 世纪 90 年代末, 通过研究幼儿的语音学习, 研究者提出了“统计学习” (statistical learning) 的概念。自此以后, 越来越多的研究者关注这一特别的学习类别。通过以下的分析, 我们将看到统计学习作为一种对信息规则的学习具有普遍的意义。

统计学习不仅能习得语言信息中的规则, 也可以习得非语言信息中的规则。同时, 统计学习也会受到很多外在因素的影响。近年来, 采用电生理技术及神经成像技术开展的研究则进一步揭示了统计学习的神经生理基础。

1 统计学习的早期研究

最早的统计学习研究表明, 8 个月大的婴儿就能够发现语音信息中的统计线索^[1]。研究者设计了 4 个固定的音节组, 其中每个音节组由 3 个音节组成, 并且它们的组合顺序是固定的 (例如: bidaku, golabu, tupiro, padoti)。研究者将这 4 个固定的音节组随机地、反复地拼接在一起, 由此就产生了一段无间隔的语音流 (例如 bidakupadotigolabupadotibidaku……)。随后, 研究

* 国家自然科学基金资助项目(30700232), 中国科学院心理研究所青年科学基金资助项目(O9CX052005)。

** 通讯联系人。

Tel: 010-64852598, E-mail: dengy@psych.ac.cn

收稿日期: 2011-11-18, 接受日期: 2012-02-10

者将这一语音流播放给 8 个月大的婴儿听. 2 min 后, 研究者用去习惯化的实验范式^[2]对这些婴儿进行测试. 用于测试的材料包括 3 种音节组: a. 学习阶段出现过的固定音节组(例如 *tupiro*), 其音节组合概率为 1; b. 学习中未出现过的随机音节组, (例如 *dapiku*), 其音节组合概率为 0; c. 音节组合概率介于 0 和 1 之间的音节组, 这些组合中的前两个音节与第三个音节在学习阶段相邻呈现的概率小于 1(如 *pirogo*), 或者组合中的第一个音节与后两个音节在学习阶段相邻呈现的概率小于 1(如 *butupi*). 测验结果发现, 婴儿对音节组合概率为 1 的音节组的关注时间最短, 而对音节组合概率低于 1 的音节组的关注时间较长. 也就是说, 他们对出现过的固定音节组更加熟悉, 而对其他两种音节组比较陌生. 由于不同的音节组以及音节组内单个音节之间都没有时间间隔, 而且所有音节的物理属性也经过了标准化, 因此音节之间的统计关系, 即组合概率 (co-occurrence probability) 是用于提取固定音节组的唯一线索. 以上的研究发现表明, 8 个月大的婴儿已经能够在 2 min 内发现连续语音流中的统计线索. 后续的研究进一步发现, 当组合概率相同时, 婴儿甚至能够发现语音流中更为复杂的统计线索——条件概率 (conditional probability, 即反映组合内音节之间预测性的一个指标)^[3]. 根据以上的研究发现, 研究者提出了一个独特的学习类型, 即统计学习 (statistical learning).

语言学习研究者认为, 统计学习很可能在婴儿习得词汇的过程中具有重要作用, 即基于统计线索发现连续语音流中固定音节组的学习很可能就是婴儿最初学习词汇分割的方式^[4-5]. 之后, 有大量研究支持了统计学习在语言习得中的重要作用^[6-8]. 然而, 另有证据表明这种学习并不仅仅发生在语言学习上. 下面我们将围绕这一问题进行详细分析.

2 统计学习的一般性

早期的统计学习研究主要考察对听觉语言材料的学习. 但进一步的研究发现, 在对听觉或视觉的非语言材料学习中也存在统计学习, 从而揭示了统计学习在学习材料、加工通道上的一般性.

一方面, 人类对听觉非语言材料的学习表现出了统计学习的特点. 研究者采用早期统计学习研究中的实验逻辑及范式, 但把语音材料改用非语言的声音 (例如, 音调 *tone*), 以此考察学习者是否能够习得非语言刺激流中声音之间的统计关系. *Saffran*^[9]

采用和文献[1]相同的实验范式, 同时考察了成年人和儿童对听觉语言材料以及听觉非语言材料的统计学习. 结果发现, 学习者既能够基于统计规则提取出语音流中的 3 音节固定组合, 也能够基于统计规则提取出非语言声音流中 3 个声音的固定组合, 而且对语言材料和对非语言材料的统计学习结果没有显著差异. 因此, 研究者认为统计学习可能不具有语言特异性. 这一观点也得到 ERPs (event-related potentials) 研究的支持. 例如, 研究者比较了学习者在听非语言声音流和语言声音流 (语音流) 时的脑电活动, 结果发现学习者对两种材料的学习表现出相似的 N100 和 N400 波形, 这两个效应可能与统计规则提取相关 (详见后文)^[10-11].

另一方面, 人类对视觉图形之间关系的学习也表现出统计学习的特点. 研究发现, 学习者能够提取视觉图形之间的统计关系, 包括时间序列上的统计关系^[12-17]以及空间位置上的统计关系^[18-20]. 例如, *Kirkham* 等^[14]将 *Saffran* 等^[1]统计学习实验中的 3 音节组合替换为 3 个简单图形的组合, 将 4 个这样的固定组合随机地、重复地连续呈现, 从而形成一个视觉图形序列. 结果发现, 与语言 (语音流) 统计学习的结果非常相似, 学习者选择学习中出现过的固定组合的比例要显著高于选择随机组合的比例. 再例如, *Fiser* 和 *Aslin*^[12]采用 *Aslin* 等^[9]实验中使用的实验范式, 将音节替换为视觉图形, 考察学习者是否同样能够提取视觉图形之间的时间序列关系. 实验中, 在屏幕中央有一个阻挡物, 被试看到一个图形以水平方式在屏幕上连续地来回移动, 每次经过阻挡物之后就会改变形状, 如物体 A 首先从屏幕中央移向屏幕最右侧, 然后向屏幕中央移动, 当移动到阻挡物之后时变为另一种形状, 然后离开阻挡物继续往左移动, 移动到最左端时再次返回向屏幕中央移动, 移动到阻挡物之后变为第三种形状, 然后继续移向屏幕最右侧, 最后返回到屏幕中央. 这 3 种形状在学习时总是以特定顺序呈现, 共有 4 个这样的固定形状序列. 这 4 个固定形状序列随机、连续呈现, 产生一个 6 min 的动画. 实验者事先并没有告诉被试动画中包含这种固定形状序列, 只是告诉他们认真看这个动画. 结果发现, 与提取音节之间的统计关系相似, 被试同样能够提取视觉图形之间的时间序列关系.

以上研究综合表明, 在语言 (语音) 和非语言 (声音和视觉图形) 统计学习中, 学习者表现出相似的行为模式. 因此, 统计学习可能是不依赖于语言

学信息的一种学习方式, 即统计学习不存在语言特异性。

3 影响统计学习的因素

尽管统计学习具有一般性, 但统计学习本身受到多种因素的制约。也就是说, 虽然学习者能够从多种材料中提取统计规则, 但这些统计学习的过程和结果会依赖于某些特定因素。了解统计学习的制约因素有助于最大化统计学习的效果。

首先, 学习者能提取的统计规则类型受到刺激特征的制约。实验呈现的刺激往往包含多种类型的统计规则, 学习者在统计学习过程中究竟提取了怎样的统计规则依赖于呈现刺激的特征。研究表明, 在语音的统计学习中, 学习者能够提取音节之间的何种统计关系会受到音节组合中音节特征的影响^[21-23]。例如, Gomez^[22]给学习者呈现由3种音节组合(如AXC)随机呈现产生的语音流。结果发现, 当居中音节X变异较小时, 学习者习得了相邻音节的组合(例如AX或XC), 而音节X变异性较大时, 学习者习得了非相邻音节之间的组合规则(即A和C的关系)。也就是说, 学习者首先能够习得相邻音节的组合, 而当相邻音节的组合不是一种可靠的统计线索时, 学习者就会注意学习材料中其他可靠的统计线索。同样地, 视觉图形的统计学习也会受到图形呈现特征的影响^[17, 24]。例如, Fiser和Aslin^[24]发现, 当较小的结构单元(包括2个图形)嵌入在较大的结构单元(由3个或4个图形组成)中时, 学习者只习得大的结构单元, 而没有习得嵌入其中的局部结构单元。而当小的结构单元和大的结构单元相互独立时, 学习者可以同时习得两种结构单元。这一结果表明, 结构单元之间的嵌入性(embeddedness)使得学习者只提取整体结构之间的统计规则。Turk-Browne等^[17]发现, 当形状和颜色共变时(即刺激中的每一个物体都是一个特定的形状和一个特定颜色的集合体), 学习者习得了物体与物体之间的统计规则, 而当形状和颜色之间的共变性被打乱时(即一个特定形状的物体多次出现时其颜色不同), 被试习得了物体的局部特征之间的统计规则, 即习得了形状与形状之间或者颜色与颜色之间的统计规则, 表明共变性(covariance)制约着学习者提取的是整个图形的统计关系还是单个特征之间的统计关系。这些研究都表明学习者会根据呈现刺激的特征, 选择性地提取不同的统计规则。

其次, 统计学习受到刺激通道属性的影响。如上文提到, 学习者既可以习得听觉呈现的刺激之间的统计关系, 也可以习得视觉呈现的刺激之间的统计关系, 但大量研究表明不同刺激通道的统计学习存在差别^[9, 25-29]。例如, Conway和Christiansen^[25]向学习者呈现基于相同统计规则产生的视觉序列、听觉序列以及反应序列, 并直接比较了视觉、听觉和触觉通道的统计学习。由于听觉信息(语音流)总是在时间维度上, 视觉信息更多的是在空间维度上, 而触觉信息既可以是在空间维度上也可以是在时间维度上, 因此实验预期序列呈现方式(时间维度上)会导致听觉统计学习的成绩更好。实验结果证实了这种预期: 听觉统计学习的成绩要优于视觉统计学习以及触觉统计学习的成绩, 另外, 触觉序列学习者对序列的起始信息更敏感, 而听觉序列学习者对序列的末尾信息更敏感。这些结果表明, 统计学习的学习方式以及结果会受通道属性本身的制约而表现出差异。

最后, 统计学习会受到注意的调控。Turk-Browne等^[16]呈现由两种颜色的图形混合而成的视觉序列, 要求被试只注意其中一种颜色的图形, 而忽略其他颜色的图形。结果发现, 被试只提取了被注意颜色的图形序列中的统计规则, 而没有提取其他颜色的图形序列中的统计规则, 该研究表明统计学习的结果受到注意的调控。其他采用类似研究策略的实验也得到了相同的研究结论^[28, 30-31]。

4 统计学习的脑神经机制

采用传统的行为学技术研究统计学习时, 研究者通常采用“学习后进行测验”的方式来考察统计学习的效果并进而推断统计学习的发生机制。也就是说, 在这些统计学习研究中, 被试首先看到或听到由统计规则组织而成的材料, 但没有被告知学习材料是如何组织起来的。事后进行二选一的迫选测验, 判断两两出现的刺激里哪个更像在学习阶段出现过的刺激。若被试认为符合统计规则的刺激更加熟悉, 就表明被试提取了学习材料的统计规则。然而, 借助目前被广泛应用的脑电记录及脑成像技术^[32-33], 研究者能够直接地、实时地观测到统计学习的时间进程以及脑激活模式。此外, 这类研究发现还有助于从神经基础上考察统计学习与其他学习的区别与联系。

事件相关电位(event-related potentials, ERPs)技术被广泛用于考察在完成特定认知任务时的脑电

波, 该技术的优势在于精确到毫秒级的时间分辨率。目前已有大量的研究采用 ERP 技术分别考察学习者对语音流^[11, 34]、非语言声音流^[10, 35]以及视觉图形序列^[36]进行统计学习时的脑活动进程。Abla 等^[10]给被试呈现连续声音流的同时记录脑电活动, 学习过程分为三个阶段。学习之后进行迫选测验, 测验结果表明所有被试选择符合统计规则刺激的比例显著高于随机水平。脑电结果发现, 在刺激出现后约 400 ms 的时候, 靠近额中央区位置出现一个明显的负波 (N400), 这一 ERP 效应可能和大脑中提取统计规则的过程有关。研究者进一步根据迫选测验的结果将被试分为高表现组、中等表现组以及低表现组, 并比较不同表现组在加工声音流时的 N400 效应。结果发现, 尽管行为测验结果表明所有被试都习得了统计规则, 但不同组之间的 ERP 效应却不相同。在高表现组中, N400 效应出现在学习的第一个阶段。在中等表现组中, N400 效应出现在学习的第三个阶段。而低表现组在学习的任何阶段都没有出现 N400 效应。不同表现组之间的学习效应出现的时间不同, 这体现了学习者成功提取统计规则的速度不同。高表现者能够更快地提取统计规则, 中等表现组在较晚阶段才提取了统计规则, 而低表现组可能需要更长的时间提取统计规则。Cunillera 等^[11]考察了统计线索和语音线索 (重读首音节) 对语音流加工的影响。结果发现, 当只有统计线索时, 学习者提取语音组的过程引起了 N400 效应。而在既有统计线索也有语音线索的情况下, 学习者提取语音组的过程不仅引起了 N400 效应, 还引起了更加早期的 P2 效应 (潜伏期为 200 ms 的正走向的波), 揭示了统计线索以及统计线索与语音线索的相互作用对实时统计学习过程的影响。通过上述研究可以看出, 不同于仅考察统计学习结果的传统行为实验, ERP 研究能够更清楚地揭示统计学习发生和发展的时间进程。

功能核磁共振成像 (functional magnetic resonance imaging, fMRI) 技术以血氧水平依赖效应为核心检测和定位脑功能, 具有较高的空间分辨率^[32]。McNealy 等^[37]考察了学习者依赖于统计线索及语音线索对语音流进行规则提取时的脑激活模式。实验中的语音流分为只包含统计线索的语音流, 同时包含统计线索和语音线索的语音流以及没有任何线索的语音流。行为测验的结果表明学习者不能区分出这三种语音流, 然而脑扫描的结果表明: 与没有统计线索的语音流相比, 包含统计线索的语音流引起

了更强的左侧颞上回 (left superior temporal gyrus, STG) 的激活, 语音线索则进一步增强了该脑区的激活程度。研究者认为这一结果揭示了学习者基于统计规则将连续语音流切分为单独的词汇所依赖的脑神经基础。Turk-Browne 等^[38]采用 fMRI 技术考察了学习者对视觉图形序列的统计学习过程。在实验中, 研究者给学习者呈现基于统计规则产生的图形序列以及随机的图形序列, 同时进行大脑扫描。结果发现学习者在没有意识到统计规则的情况下, 有规则的图形序列更多地激活了右脑的纹状体 (striatum) 以及位于右侧颞叶内侧记忆系统的海马区 (hippocampus), 表明右侧纹状体以及海马皮层与提取图形序列中的统计规则有关。此外, 这一研究结果表明, 统计学习可能与语境学习^[39]、序列学习^[40-41]等由纹状体和海马区调节的其他学习类型有关。

5 综合讨论及研究展望

统计学习的重要性在于它是一种具有普遍意义的学习, 对我们能否高效地处理日常生活中接触到的不同类型信息具有重要作用。通过对以往研究的分析整理, 我们认为目前研究者对统计学习机制的认识可以归纳为以下几点: a. 统计学习的过程主要涉及发现及提取外界信息中的统计规则; b. 统计学习具有一般性, 是一种非领域特异性和非通道特异性的学习类型; c. 与规则提取有关的 ERP 证据表现为 N400 效应, 即在大约 400 ms 时, 学习者能够基于提取的统计规则将符合与不符合统计规则的刺激有效地区分开来, 表现为两类刺激引起不同程度的脑活动; d. 听觉语言统计学习的核心脑区是大脑左侧颞上回, 而视觉图形序列的统计学习主要激活了右侧纹状体和海马区。

统计学习作为一种近十几年才被提出的学习类型, 尚有很多核心问题没有得到回答。未来的研究可以考虑从以下几个角度开展: a. 统计学习与其他较早被关注的学习类型之间的区别与联系。例如, 与联想学习、配对学习、类别学习等类型相比, 统计学习在神经基础上有哪些共同之处及独特之处^[42]? b. 利用统计学习的规律促进语言学习。已有研究者从计算机模拟的角度揭示了统计学习在汉字习得中的作用^[43], 我们的初步实证研究也发现在字形学习中存在统计学习的过程^[44]。因此, 进一步的研究应探索如何利用这些规律来促进语言学习的效率和效果。此外, 将来的研究也应探讨统计学习在语法习得中扮演怎样的角色。学习者能够提取

序列呈现刺激中的统计规则是否就意味着统计学习也有助于学习者对语法的学习? 甚至是通过统计学习本身就能使学习者习得语法? c. 非语言的统计学习与其他知觉加工的关系. 例如, 基于格式塔法则对知觉信息的加工与基于统计规则对信息的加工有何种关系? 目前的研究表明, 学习者能够将最初未被分割的呈现刺激分割为多个结构单元, 但是学习者由此形成的知识表征是对结构单元内组成部分之间的结构关系的表征, 还是把提取的结构单元作为一个完整、独立的物体进行表征? d. 与行为学研究相比, 使用脑电记录和脑成像技术开展的研究能够更有效地揭示统计学习发生的过程, 更有助于考察统计学习的本质. 然而, 目前采用这些技术开展的研究非常少. 未来的研究应更多地利用此类技术的优势, 并突破现有实验范式的局限. e. 关于统计学习的脑神经机制也还有很多问题需要回答. 例如, 提取不同类型的统计规则是否存在不同的时间进程? 不同类型的统计规则是以平行方式还是以序列方式被习得的? 不同统计规则的习得是受一个神经系统不同方式或不同程度的调节还是分别受一些子神经系统的调节? 以上这些角度和问题都围绕统计学习的本质, 这些问题的回答将有助于更好地理解统计学习. 同时, 有效地利用这些认识也将有助于学习者更好地学习和处理外周的信息.

参 考 文 献

- [1] Saffran J R, Aslin R N, Newport E L. Statistical learning by 8-month-old infants. *Science*, 1996, **274**(5294): 1926-1928
- [2] Jusczyk P W, Aslin R N. Infants' detection of the sound patterns of words in fluent speech. *Cognit Psychol*, 1995, **29**(1): 1-23
- [3] Aslin R N, Saffran J R, Newport E L. Computation of conditional probability statistics by 8-month-old infants. *Psychol Sci*, 1998, **9**(4): 321-324
- [4] Bates E, Elman J. Learning rediscovered. *Science*, 1996, **274**(5294): 1849-1850
- [5] Seidenberg M S. Language acquisition and use: Learning and applying probabilistic constraints. *Science*, 1997, **275**(5306): 1599-1603
- [6] Newport E L, Aslin R N. Learning at a distance I. Statistical learning of non-adjacent dependencies. *Cognit Psychol*, 2004, **48**(2): 127-162
- [7] Perruchet P, Tyler M D, Galland N, *et al.* Learning nonadjacent dependencies: No need for algebraic-like computations. *J Exp Psychol Gen*, 2004, **133**(4): 573-583
- [8] Saffran J R, Thiessen E D. Pattern induction by infant language learners. *Dev Psychol*, 2003, **39**(3): 484-494
- [9] Saffran J R. Constraints on statistical language learning. *J Mem Lang*, 2002, **47**(1): 172-196
- [10] Abta D, Katahira K, Okanoya K. On-fine assessment of statistical learning by event-related potentials. *J Cogn Neurosci*, 2008, **20**(6): 952-964
- [11] Cunillera T, Toro J M, Sebastian-Galles N, *et al.* The effects of stress and statistical cues on continuous speech segmentation: An event-related brain potential study. *Brain Res*, 2006, **1123** (1): 168-178
- [12] Fiser J, Aslin R N. Statistical learning of higher-order temporal structure from visual shape sequences. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 2002, **28**(3): 458-467
- [13] Fiser J, Scholl B J, Aslin R N. Perceived object trajectories during occlusion constrain visual statistical learning. *Psychon Bull Rev*, 2007, **14**(1): 173-178
- [14] Kirkham N Z, Slemmer J A, Johnson S P. Visual statistical learning in infancy: Evidence for a domain general learning mechanism. *Cognition*, 2002, **83**(2): B35-B42
- [15] Olson I R, Chun M M. Temporal contextual cuing of visual attention. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 2001, **27**(5): 1299-1313
- [16] Turk-Browne N B, Junge J A, Scholl B J. The automaticity of visual statistical learning. *J Exp Psychol Gen*, 2005, **134**(4): 552-564
- [17] Turk-Browne N B, Isola P J, Scholl B J, *et al.* Multidimensional visual statistical learning. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 2008, **34**(2): 399-407
- [18] Chun M M, Jiang Y H. Contextual cueing: Implicit learning and memory of visual context guides spatial attention. *Cognit Psychol*, 1998, **36**(1): 28-71
- [19] Fiser J, Aslin R N. Unsupervised statistical learning of higher-order spatial structures from visual scenes. *Psychol Sci*, 2001, **12**(6): 499-504
- [20] Fiser J, Aslin R N. Statistical learning of new visual feature combinations by infants. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2002, **99**(24): 15822-15826
- [21] Bonatti L L, Peña M, Nespor M, *et al.* Linguistic constraints on statistical computations: The role of consonants and vowels in continuous speech processing. *Psychol Sci*, 2005, **16**(6): 451-459
- [22] Gomez R L. Variability and detection of invariant structure. *Psychol Sci*, 2002, **13**(5): 431-436
- [23] Onnis L, Monaghan P, Richmond K, *et al.* Phonology impacts segmentation in online speech processing. *J Mem Lang*, 2005, **53**(2): 225-237
- [24] Fiser J, Aslin R N. Encoding multielement scenes: Statistical learning of visual feature hierarchies. *J Exp Psychol Gen*, 2005, **134**(4): 521-537
- [25] Conway C M, Christiansen M H. Modality-constrained statistical learning of tactile, visual, and auditory sequences. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 2005, **31**(1): 24-39
- [26] Conway C M, Christiansen M H. Statistical learning within and between modalities-Pitting abstract against stimulus-specific representations. *Psychol Sci*, 2006, **17**(10): 905-912
- [27] Conway C M, Christiansen M H. Seeing and hearing in space and time: Effects of modality and presentation rate on implicit statistical learning. *Eur J Cogn Psychol*, 2009, **21**(4): 561-580

- [28] Emberson L L, Conway C M, Christiansen M H. Timing is everything: Changes in presentation rate have opposite effects on auditory and visual implicit statistical learning. *Q J Exp Psychol*, 2011, **64**(5): 1021-1040
- [29] Robinson C W, Sloutsky V M. Visual statistical learning: Getting some help from the auditory modality//McNamara D S, Trafton J G. *Proceedings of the 29th Annual Cognitive Science Society*. Austin: Cognitive Science Society, 2007: 611-616
- [30] Baker C I, Olson C R, Behrmann M. Role of attention and perceptual grouping in visual statistical learning. *Psychol Sci*, 2004, **15**(7): 460-466
- [31] Pacton S, Perruchet P. An attention-based associative account of adjacent and nonadjacent dependency learning. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 2008, **34**(1): 80-96
- [32] 倪睿, 吴新年, 齐翔林, 等. fMRI在视觉研究中的应用和进展. *生物化学与生物物理进展*, 2000, **27**(3): 254-257
Ni R, Wu X N, Qi X L, *et al.* *Prog Biochem Biophys*, 2000, **27**(3): 254-257
- [33] 饶恒毅, 陈霖. 多方式认知功能成像研究进展. *生物化学与生物物理进展*, 2001, **28**(6): 806-810
Rao H Y, Chen L. *Prog Biochem Biophys*, 2001, **28**(6): 806-810
- [34] Sanders L D, Newport E L, Neville H J. Segmenting nonsense: An event-related potential index of perceived onsets in continuous speech. *Nat Neurosci*, 2002, **5**(7): 700-703
- [35] Sanders L D, Ameral V, Sayles K. Event-related potentials index segmentation of nonsense sounds. *Neuropsychologia*, 2009, **47**(4): 1183-1186
- [36] Ablat D, Okanoya K. Visual statistical learning of shape sequences: An ERP study. *Neurosci Res*, 2009, **64**(2): 185-190
- [37] McNealy K, Mazziotta J C, Dapretto M. Cracking the language code: Neural mechanisms underlying speech parsing. *J Neurosci*, 2006, **26**(29): 7629-7639
- [38] Turk-Browne N B, Scholl B J, Chun M M, *et al.* Neural evidence of statistical learning: Efficient detection of visual regularities without awareness. *J Cogn Neurosci*, 2009, **21**(10): 1934-1945
- [39] Chun M M, Phelps E A. Memory deficits for implicit contextual information in amnesic subjects with hippocampal damage. *Nat Neurosci*, 1999, **2**(9): 844-847
- [40] Ergorul C, Eichenbaum H. Essential role of the hippocampal formation in rapid learning of higher-order sequential associations. *J Neurosci*, 2006, **26**(15): 4111-4117
- [41] Schendan H E, Searl M M, Melrose R J, *et al.* An fMRI study of the role of the medial temporal lobe in implicit and explicit sequence learning. *Neuron*, 2003, **37**(6): 1013-1025
- [42] Turk-Browne N B, Scholl B J, Johnson M K, *et al.* Implicit perceptual anticipation triggered by statistical learning. *J Neurosci*, 2010, **30**(33): 11177-11187
- [43] 杨剑峰, 舒华. 汉字阅读的联结主义模型. *心理学报*, 2008, **40**(5): 516-522
Yang J F, Shu H. *Acta Psychology Sinica*, 2008, **40**(5): 516-522
- [44] Wu Q Y, Fang X P, Chen Q J, *et al.* The learning of morphological principles: A statistical learning study on a system of artificial scripts. //Gary Lee. *Advances in Automation and Robotics Vol.1, Lecture Notes in Electrical Engineering*: 122. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2011: 187-196

The Cognitive Mechanism and Neural Bases of Statistical Learning*

WU Qiu-Yan^{1,2)}, DENG Yuan^{1)**}

⁽¹⁾ *Key Laboratory of Behavioral Science, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

⁽²⁾ *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract In this review, we mainly discuss the origin and the development of statistical learning research, as well as constraints and brain neural bases of statistical learning. Researches of statistical learning originated from the studies on speech segmentation in human infants since 1990's. From then on, lots of studies have explored statistical learning on both non-linguistic continuous sound streams and visual shape sequences. Evidence from these researches suggest that statistical learning is involved in discovering and extracting regularities, and it is domain-general. However, statistical learning in different domains is constrained by domain-related factors. For example, statistical learning in language (s) is constrained by language-specific factors; while non-linguistic statistical learning is constrained by stimulus characteristics and presentation modality. In recent years, several studies have examined the temporal course of statistical learning by employing event-related potentials (ERPs) technique and investigated its neural substrates by using functional magnetic resonance imaging (fMRI) technique. ERPs studies consistently found that a negative ERP component at around 400 ms was related with the extraction of regularities, and findings of fMRI studies suggested that statistical learning mainly involved left superior temporal gyrus, right striatum and right medial temporal memory system.

Key words statistical learning, regularity, domain-general, co-occurrence probability, ERP, fMRI

DOI: 10.3724/SP.J.1206.2011.00539

* This work was supported by grants from The National Natural Science Foundation of China (30700232) and Project for Young Scientists Fund, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences (O9CX052005).

**Corresponding author.

Tel: 86-10-64852598, E-mail: dengy@psych.ac.cn

Received: November 18, 2011 Accepted: February 10, 2012