

# 概率类别学习的认知神经机制\*

李开云, 付秋芳\*\*, 傅小兰

(中国科学院心理研究所, 脑与认知国家科学重点实验室, 北京 100101)

**摘要** 概率类别学习探讨人们如何习得线索与结果之间的“概率”关系. 研究者借助天气预报等任务, 探讨了概率类别学习的认知策略、无意识性及其与工作记忆和注意的关系; 并借助脑成像技术和脑损伤病人, 探讨了基底神经节、内侧颞叶、前额叶和顶叶等脑区在概率类别学习中的作用. 但是, 由于概率类别学习涉及内隐和外显学习系统的分离问题, 目前对其相关研究结果和理论解释还存在很大争议, 概率类别学习的认知神经机制仍有待进一步研究.

**关键词** 类别学习, 概率类别学习, 认知策略, 无意识性, 神经机制

**学科分类号** B842.3

---

\*国家重点基础研究发展计划(973)(2011CB302201)和国家自然科学基金(30900395)资助项目.

\*\*通讯联系人.

Tel: 010-64845395, E-mail: fuqf@psych.ac.cn

收稿日期: 2011-09-30, 接受日期: 2011-11-11

类别学习是人类智能的一种基本认知过程或学习活动<sup>[1]</sup>,它是指为将周围的事物划分为不同类别而形成特定记忆痕迹的过程<sup>[2]</sup>.类别学习在人们的日常生活中十分重要,它可以使人们对从未见过的新物体或新情境做出快速的反应<sup>[3-4]</sup>.例如,训练有素的医生可以快速地判断病人的 X 片是正常还是异常,并根据 X 片的类型制定相应的治疗方案.但是,在日常生活中人们对某些类别的判断往往不能这样泾渭分明、非此即彼.例如,医生对疾病的诊断,气象学者对天气的预报,地震专家对地震的预测,有时都不能给出绝对的判断而只是给出概率性的判断,因为在已知的条件下可能会出现两种或多种不同的结果.在这种不确定的条件下人们逐渐学会对新事物或新情境做出准确的概率性分类,称为概率类别学习.自 20 世纪 50 年代开始,概率类别学习就被广泛应用到了决策、学习和记忆等研究领域<sup>[5-6]</sup>,相关研究为进一步揭示人类学习的无意识性、认知灵活性以及学习和记忆的机制提供了大量的实验证据和理论解释<sup>[7-10]</sup>.本文首先介绍概率类别学习的操作定义和研究方法,然后综述概率类别学习的认知机制和神经基础,最后总结目前研究中的问题和不足,并指出未来的研究方向.

## 1 什么是概率类别学习

概率类别学习是指人们通过反复、不断的分类来习得线索和结果之间的概率关系,在某种程度上这种关系的习得不依赖于有关概率频次 (probabilistic frequencies) 等的意识知识<sup>[8-12]</sup>.与传统的类别学习不同,在概率类别学习中线索的类别属性是概率性 (probabilistic) 的而不是确定的 (deterministic).也就是说,每一线索并不是明确地属于某一类别,而是有时属于类别 A 有时属于类别 B,但属于类别 A 和 B 的概率不同<sup>[5]</sup>.由于在概率类别学习中各个线索与类别之间的关系是概率性的,学习者可能需要在不断的学习中逐渐发现线索与类别之间的关系,因此这一学习可能是一种渐进的、累加的过程<sup>[9]</sup>.有些研究者认为,这一过程以程序记忆为基础,是一种内隐学习过程<sup>[9-11, 13]</sup>.

目前有关概率类别学习的研究主要包含三种实验任务,其中最为经典的是天气预报任务 (weather prediction task, WPT).在天气预报任务中,一般是在计算机屏幕上呈现四张包含不同图形 (长方形、菱形、圆形和三角形) 的卡片,这四张卡片分别以某一固定概率预测两种天气结果 (晴天\雨天),如四张卡片分别以 75%、57%、43%、25% 的概率预测天气为晴天,反之预测为雨天.在每个试次中,向被试呈现这四张卡片中的一张、两张或三张,被试的任务是根据呈现的卡片来按键判断是晴天还是雨天,被试判断后会出现正确、错误的反馈.四张卡片共有 14 种呈现模式,每种模式按一定的频次出现,在整个实验中晴天和雨天各自出现的总频次相等<sup>[9]</sup>.其他两种实验任务分别是“冰激凌”任务 (the ice-cream task) 和“虚拟病”任务 (fictitious-disease task),这两种任务的基本逻辑与天气预报任务相同,只是刺激材料不同.例如,在冰激凌任务中刺激材料是一个玩具 (Mr. Potatohead™),被试根据玩具的四个面孔特征 (即黑色帽子、黑色胡子、红色眼镜、白色领结) 的呈现模式,来判断这个玩具想要香草味冰激凌还是巧克力味冰激凌<sup>[14]</sup>;在“虚拟病”任务中刺激材料是描述疾病症状的文字,被试根据疾病的四种症状 (即头痛、疲乏、皮疹、打喷嚏),来判断疾病是两种虚拟病 *nermitis* 和 *caldosis* 中的哪一种<sup>[8-9]</sup>.

在过去的几十年里,研究者借助以上三种实验任务深入探讨了人类概率类别学习的认知机理和神经基础,为揭示学习的无意识性以及学习和记忆的机制做出了重要贡献.

## 2 概率类别学习的认知机制

在概率类别学习中,由于线索与结果之间是一种概率性的关系,学习者往往需要较长时间的学习才能习得这种关系.以往的研究表明,健康被试在概率类别学习中平均正确率一般能达到 70%-75% (随机水平是 50%)<sup>[9, 15]</sup>.下面,我们将从概率类别学习的认知策略、无意识性及其与工作记忆和注意的关系三个方面来阐释概率类别学习的认知机制.

## 2.1 概率类别学习的认知策略

在概率类别学习研究早期, 研究者认为, 人们是以一种相互平行的、独立的方式来分别对概率类别学习中四个线索与结果间的关系进行学习, 并逐渐习得线索和结果间的关系, 最终可以对线索做出最佳反应<sup>[8, 16]</sup>。但是, 进一步的研究发现, 被试往往并不能按照最佳反应来进行判断, 而是会采用某种认知策略, 并且不同的被试采用的认知策略不尽相同<sup>[15]</sup>。

Gluck 等<sup>[15]</sup>采用 The Lens Model 回归分析方法, 探讨了人们在完成天气预报任务时使用的认知策略。他们发现理想的学习者主要采用三种不同的认知策略: 多线索策略 (Multicue strategy)、单模式策略 (singleton strategy)、单线索策略 (one-cue strategy)。多线索策略是学习的最佳策略, 学习者首先掌握每一线索的预测概率, 然后根据四个线索的不同结合来内隐地计算其结合模式的预测概率, 并据此做出判断。单模式策略是指学习者只学到了每一线索的预测概率, 但对于几个线索结合出现的模式随机做出判断。单线索策略是指学习者只依据某一线索进行判断, 例如, 学习者只根据卡片 1 进行判断, 只要线索模式中出现卡片 1 就判断是晴天, 否则就判断为雨天。如果理想学习者分别采用上述策略, 那么其最佳正确率可分别达到 100%、75%、87.5% (高预测性的单线索) 或 66% (低预测性的单线索)。然而, Gluck 等发现, 被试的正确率只有 62.4%, 即使当线索的预测概率变为 0.8、0.6、0.4、0.2 时正确率也仅为 74.4%, 这表明被试并不是单纯按照上述策略来完成任务。而且, 他们对单个被试数据的分析结果表明, 被试在完成任务时并不是从头到尾只使用一种策略, 而是在不同的策略间进行转换: 在概率类别学习的初期, 多数被试主要采用单模式策略, 当学习达到一定程度后, 被试会越来越多地使用多线索策略。

不过, Lagnado 等<sup>[5]</sup>指出, 在 Gluck 等所采用的分析方法中多线索策略实际上是指多一最大化 (Multi-matix) 策略, 即理想学习者根据线索和结果间的概率关系进行一种绝对的判断。例如, 如果卡片 1 预测晴天的概率是 75%, 那么出现卡片 1 理想学习者就会判断为晴天。尽管 Gluck 等假定这种策略会带来最佳反应, 但实际上即使被试知道每一线索的预测概率, 其最高正确率也只能达到 83% 而不是 100%。由此, Lagnado 等<sup>[5]</sup>提出, 学习者采用的多线索策略既可能是多一最大化策略, 也可能是多一匹配 (Multi-match) 策略, 即将反应的概率与线索模式的预测概率相匹配。例如, 线索 1 预测晴天的概率为 75%, 那么被试在 100 个试次中有 75 次判断为晴天, 25 次判断为雨天。在此基础上, 他们采用滚动回归分析的方法, 进一步探讨了人们在概率类别学习中使用的认知策略。结果发现, 超过 80% 的被试数据符合多一匹配策略, 只有 6% 的被试数据符合多一最大化策略和单模式策略。并且, 他们进一步指出, 被试在学习中也并非没有使用任何认知策略, 而只是逐渐地学到四个线索对结果的预测概率, 从而有意识地根据强线索而不是弱线索来进行判断。

此外, Meeter 等<sup>[17]</sup>在 Gluck 等研究的基础上, 还考察了被试采用随机策略的可能性。他们发现, 多数被试在概率类别学习期间会多次转换所使用的认知策略, 并且, 有时会由较好的认知策略转到较差的认知策略, 说明概率类别学习是非线性的。目前, 有关人们在概率类别学习中是否使用认知策略, 使用何种认知策略, 以及脑损伤病人与健康人使用的认知策略是否一致等问题都还存在争议<sup>[14, 17-19]</sup>。

## 2.2 概率类别学习的无意识性

概率类别学习研究中, 一个有趣的研究发现是: 尽管人们可以逐渐学到线索与结果之间的概率关系, 但是人们却对这一概率关系缺乏准确意识知识<sup>[5, 9, 12]</sup>。例如, 对脑损伤病人的研究发现, 尽管内侧颞叶损伤的遗忘症病人和阿尔茨海默病病人能够较好地完成任务, 但是他们在有关线索与结果关系的外显评价任务中表现很差, 似乎对二者之间的关系一无所知<sup>[9, 20]</sup>。再如, Gluck 等<sup>[15]</sup>研究发现, 尽管被试能够很好地完成天气预报任务, 但是却不能准确评估卡片与两种天气之间的概率关系; 而且尽管被试主要使用的是单模式和单线索的认知策略, 但是被试实际采用的认知策略与口头报告的认知策略并不相关。这些研究结果说明, 概率类别学习可能是内隐的, 支持 Ashby 和 Alfonso-Reese (1998)<sup>[13]</sup>提出的多类别学习系统理论。也就是, 类别学习可分为性质不同的两个系统: 外显 (言语) 系统, 基于假设检验等推理过程, 受意识

控制；内隐系统，基于非言语的学习过程，不受意识控制。

然而，近年来概率类别学习的无意识性也受到一些研究者的质疑。一方面，有研究者主张，概率类别学习并不是完全无意识或内隐的，内隐系统和外显系统同时参与概率类别学习过程。例如，Poldrack 等<sup>[21]</sup>采用 fMRI 技术发现，在概率类别学习早期主要负责外显学习的内侧颞叶会被激活，而随着学习的进行其激活状态逐渐减弱，主要负责内隐学习的基底神经节则被逐渐激活。随后的脑功能成像研究也进一步证实，在概率类别学习中同时存在内侧颞叶和基底神经节的激活，只是激活的时间和激活状态有所不同<sup>[22-24]</sup>。此外，徐贵平、温红博、魏晓玛和莫雷<sup>[25]</sup>的研究则发现，概率类别学习的无意识性受线索位置的影响：当线索呈现位置固定时，概率类别学习获得的知识是有意识的；而当所有线索呈现位置随机时，概率类别学习获得的知识是无意识的。另一方面，有研究者甚至认为，概率类别学习其实就是一种外显学习过程<sup>[26-28]</sup>。例如，Lagnado 等<sup>[5]</sup>研究发现，在概率类别学习中人们不仅可以学到线索与结果的关系，同时还掌握了一定的任务特征和学习过程的外显知识。由此，他们主张，单一的言语（外显）学习系统足以解释概率类别学习成绩、概率判断与外显测验成绩之间的分离现象。Speekenbrink 等<sup>[19]</sup>也指出，在概率类别学习中帕金森病人和正常被试的行为表现与基于规则的假设检验的外显学习过程相一致。

由上可见，有关概率类别学习的无意识性问题涉及“内隐学习和外显学习系统”的分离问题。由于任何一种任务都可能包含内隐和外显学习系统的参与，在实际的概率类别学习任务中可能不存在单纯的内隐学习或者外显学习过程<sup>[29-30]</sup>。为了探讨学习的无意识性，近年来在内隐学习领域的研究者一方面试图改进对意识知识的测量标准，如结合可控性标准和主观标准来测量意识的意识状态<sup>[31]</sup>；另一方面试图找出对意识和无意识加工具有不同影响的变量，如通过操纵第二任务、学习程度、任务难度等来揭示内隐和外显系统的分离<sup>[32-33]</sup>。在未来有关概率类别学习无意识性的研究中，应借鉴内隐学习领域研究的相关成果，并借助眼动和脑功能成像技术，进一步分析与探讨内隐系统和外显系统在概率类别学习中的作用。

### 2.3 概率类别学习与工作记忆和注意的关系

概率类别学习与工作记忆和注意的关系与概率类别学习的无意识性关系密切。Packard 和 Knowlton<sup>[11]</sup>指出，内隐概率类别学习的主要标志在于它的自动加工和不需要注意资源的参与。Foerde 等<sup>[34]</sup>采用数声任务作为第二任务，首次为概率类别学习不需要注意资源参与的观点提供了直接的实验证据。他们发现，尽管在学习阶段被试在双任务条件下的学习成绩比单任务条件下的略差（二者仅边缘显著， $p = .072$ ），但是当在单任务条件下完成探测测验时，单任务和双任务条件下被试的学习成绩差异不显著，说明第二任务并不影响人们对线索与结果关系的习得。这一结果还得到了 Foerde、Knowlton 和 Poldrack<sup>[35]</sup>研究的进一步证实。他们也发现，当第二任务占用工作记忆和分散被试的注意资源时，尽管人们在双任务条件下学习的正确率确实低于单任务条件下的正确率，但是在单任务的探测组段中两组被试的正确率差异不显著，说明人们在双任务条件下可照常获得线索与结果关系的知识。

但上述结果也受到了一些研究的质疑。例如，Newell 等<sup>[27]</sup>利用 stroop 任务的一个变式作为第二任务发现，不仅双任务组被试在双任务条件下的正确率显著低于单任务组被试，而且在随后的单任务测验中双任务组被试的正确率也显著低于单任务组被试，说明第二任务不仅影响知识的表达也破坏了对知识的获得。不仅如此，两组被试的学习策略也大相径庭，双任务组被试会更倾向采用较简单的单线索和单模式策略，而单任务组被试则主要采用多一匹配策略。因此，Newell 等<sup>[27]</sup>认为，这些结果与外显（陈述）系统的预期相一致，即概率类别学习依赖工作记忆参与；但是不符合内隐（程序）系统的预期，即概率类别学习不依赖工作记忆的参与。这些结果对概率类别学习可能不需要工作记忆和注意的多系统理论提出了挑战。

值得指出的是，尽管 stroop 任务和数声任务都需要注意和工作记忆的参与，但是二者对注意和工作记忆的需求却并不相同。因此，上述相互矛盾的研究结果并不能具体说明概率类别学习与注意和工作记忆的关系。况且，以上研究采用的第二任务都是与概率类别学习任务同时出现，这样就很难区分注意和工作记忆各自对概率类别学习的影响。此外，以上研究在探讨第二任务对概率类别学习的影响时，并没有区分第二任务

影响的是意识还是无意识加工。有研究发现,在内隐学习中注意资源影响意识知识的获得,但并不一定影响无意识知识的获得<sup>[30, 33]</sup>。因此,在未来的研究中,研究者可通过操纵第二任务对注意和工作记忆的需求特点并结合对被试知识意识状态的测量,来进一步探讨工作记忆和注意在概率类别学习中的作用。

### 3 概率类别学习的神经机制

近年来,大量神经心理学和脑功能成像研究表明,多个脑区参与概率类别学习过程,其中,基底神经节、内侧颞叶、前额叶和顶叶等脑区可能在概率类别学习中起重要作用。

#### 3.1 基底神经节

基底神经节包括杏仁核、新纹状体(Neostriatal)、苍白球、尾状核(壳核和尾核)和黑质等结构,它在内隐学习中发挥着重要作用<sup>[36-37]</sup>。脑损伤病人研究表明,基底神经节参与概率类别学习过程。例如,帕金森症是基底神经节中多巴胺输入异常而引发的疾病。虽然帕金森病人在概率类别学习中学习正确率高于随机水平,但学习成绩却远远低于相应的控制组被试<sup>[38-40]</sup>。亨廷顿症主要是尾状核和壳核的细胞受损。亨廷顿病人在概率类别学习中的表现同样存在严重缺陷,其正确率只有 50%<sup>[41]</sup>。图雷特斯综合症主要是新纹状体功能受损,发病者主要是儿童。图雷斯特症儿童对概率类别的学习也存在障碍,而且病情越严重学习成绩越差<sup>[42-43]</sup>。另外,有关健康被试脑功能成像的研究也进一步证实基底神经节在概率类别学习中具有重要作用。研究主要发现,基底神经节的尾状核和新纹状体在概率类别学习中都存在明显的激活,特别是在学习后期基底神经节的激活状态更为明显<sup>[21, 24, 34]</sup>。

#### 3.2 内侧颞叶

内侧颞叶由海马及相邻的皮层组成,包括内嗅皮层、外嗅皮层和海马旁回等,这些结构主要影响与语义和情景记忆相关的外显学习<sup>[4, 46-47]</sup>。遗忘症主要是内侧颞叶功能失常而引发的功能性疾病。Knowlton 等<sup>[9, 38]</sup>利用遗忘症病人,探讨了内侧颞叶在概率类别学习中的作用。研究发现,在学习早期遗忘症病人的学习成绩与控制组没有差异,但是在学习晚期其学习成绩却远远低于控制组。由此,他们指出,内侧颞叶可能仅仅在概率类别学习的晚期起作用。不过, Hopkins 等<sup>[14]</sup>有关双侧海马受损的遗忘症病人的研究发现,即使在学习早期遗忘症病人的成绩也低于控制组,并且遗忘症病人不能像控制组被试那样使用复杂的认知策略,表明内侧颞叶可能参与概率类别学习的整个过程。此外,有关健康被试脑功能成像研究则发现,在概率类别学习早期内侧颞叶被激活,在学习的晚期激活程度有所下降,说明内侧颞叶可能在概率类别学习的早期比较重要<sup>[21, 44]</sup>。但也有研究指出,内侧颞叶在概率类别学习早期被激活,主要是因为在学习的早期会出现新的刺激表征,一旦形成新刺激表征内侧颞叶的激活程度就会下降<sup>[16, 48-49]</sup>。目前为止,多数研究表明,内侧颞叶参与概率类别学习过程,但是有关内侧颞叶在概率类别学习中的具体作用还存在争议。

#### 3.3 前额叶皮层

前额叶皮层在学习和使用分类规则方面起重要作用,并与意识知识的产生关系密切<sup>[41]</sup>。有关额叶功能异常的精神分裂症病人的研究发现,精神分裂症病人在概率类别学习中学习成绩显著低于健康被试,说明前额叶可能在概率类别学习中具有一定的作用<sup>[12, 50]</sup>。而有关健康被试的脑功能成像的研究也发现,在概率类别学习中前额叶皮层会被激活<sup>[51-52]</sup>。例如, Kincses 等<sup>[53]</sup>的研究发现,前额叶皮层有助于概率类别学习成绩的提高。不过,也有研究证明,前额叶皮层在概率类别学习中不起作用<sup>[39]</sup>。由于前额叶皮层和基底神经节联系紧密,两者中任何一个功能的受损都可能导致需要其参与的任务的成绩下降<sup>[4]</sup>,目前有关前额叶在概率类别学习中的具体作用还有待于进一步研究。

#### 3.4 顶叶的补偿作用

老化会使健康老年人的前额叶皮层体积减少<sup>[54]</sup>,尾状核体积和功能下降<sup>[55]</sup>,但是, Fera 等<sup>[56]</sup>研究发现,健康老年被试和年轻被试在概率类别学习中的成绩差异不显著。并且,他们还发现,尽管两组被试在概

率类别学习中激活的脑区相似, 但是年轻被试在额叶皮层和尾状核的激活区域更大, 而老年被试则在顶叶的激活区域更大. 由此, Fera 等<sup>[56]</sup>认为, 顶叶对老年人的概率论类别学习可能具有一种补偿的作用. Weickert 等<sup>[57]</sup>的研究也发现, 尾状核和背外侧前额叶皮层受损的精神分裂症病人的概率类别学习表现正常, 并且相对于健康被试, 精神分裂病人在扣带回、海马旁回 (parahippocampal) 和顶叶的激活区域更大. 这些结果都支持大脑中存在额叶—顶叶的补偿机制的观点, 即当额叶的功能受到损害时顶叶和海马旁回可以部分替代受损额叶的功能<sup>[58-59]</sup>.

最后, 目前在概率类别学习中有关基底神经节和内侧颞叶的相互关系也存在一定的争议. 在某种程度上, 这一争议反映了研究者对内隐系统与外显系统关系的不同解释. 例如, 有研究者主张, 内侧颞叶和基底神经节相互竞争, 基底神经节的活动增强会使内侧颞叶的活动下降<sup>[21]</sup>, 而内侧颞叶的活动增强也会使基底神经节的活动下降<sup>[23]</sup>. 有研究者认为, 基底神经节和内侧颞叶以一种平行的方式独立对概率学习过程起作用<sup>[10, 60]</sup>. 还有研究指出, 内侧颞叶与基底神经节的相互作用可能受前额叶的调节<sup>[61-62]</sup>. 此外, 近两年有研究者发现, 脑内多巴胺水平的高低影响帕金森病人的概率类别学习成绩. 如当服用过量多巴胺药物导致脑内多巴胺水平过高时, 概率类别学习绩效较差<sup>[18, 19, 63]</sup>, 说明多巴胺系统在概率类别学习中具有重要的作用.

#### 4. 小结与展望

综上所述, 概率类别学习不仅是研究人类类别学习能力的重要范式, 还是探讨人类学习过程和记忆系统的有效方法. 在日常生活中, 人类认知活动的一个基本目标就是基于过去的经验预测未来. 但是, 在一个不确定的世界中, 基于以往经验和已有条件做出最佳判断是非常困难的. 概率类别学习的研究, 可以揭示人们在这种不确定情景下的认知过程, 为我们进一步理解这一复杂活动背后的认知神经机制提供良好的视角.

目前, 在概率类别学习的研究中, 研究者主要使用天气预报任务, 探讨人们如何在不确定条件下习得线索与结果之间的概率关系. 研究结果发现, 人们在概率类别学习中并不只是根据线索与结果的关联来逐步习得二者的关系, 而是会采用一定的认知策略来实现对结果的预测. 对这一关系的习得可能是无意识的, 并不需要注意和工作记忆的参与, 但对此也存在一定的争议. 有关神经心理学和脑功能成像的研究发现, 负责内隐学习和外显学习的脑区, 如基底神经节和前额叶等, 可能都参与概率类别学习的过程, 但目前有关这些脑区在概率类别学习中的具体作用及其相互关系还并不清楚.

实际上, 目前在概率类别学习的研究中的众多争议都涉及到“内隐学习系统和外显学习系统的分离”问题. 例如, 主张多学习系统理论的研究者认为, 概率类别学习可以是无意识的, 不受注意和工作记忆的影响; 支持单学习系统理论的研究者则主张, 概率类别学习是外显的、有意识的, 并且需要注意和工作记忆的参与. 未来研究应借鉴内隐学习领域的研究成果, 并借助眼动技术和脑功能成像技术, 来分析与探讨内隐系统和外显系统在概率类别学习中的作用, 以进一步揭示概率类别学习的认知神经机理. 如利用眼动技术分析被试在天气预报任务中对每张卡片的注视时间、眼睛运动轨迹及瞳孔大小等, 以进一步揭示被试在概率类别学习中是否采用认知策略以及是否存在认知策略的“转换机制”<sup>[37]</sup>. 其次, 由于人类大脑是一个有机的整体, 在完成某一行为时大脑的不同区域之间并不是相互独立而是相互协作. 例如, 尽管一般认为基底神经节等脑区主要负责内隐学习, 额叶等脑区主要负责外显学习, 但是实际上基底神经节 (尤其是纹状体) 和额叶之间并不是相互分离而是相互联系<sup>[4]</sup>. 未来研究应探讨纹状体和额叶以及内侧颞叶等脑区在概率类别学习中的相互关系, 以进一步揭示概率类别学习的神经基础. 如有研究者探讨了神经症厌食患者完成天气预报任务时的脑区活动, 结果发现额叶—纹状体系统和内侧颞叶系统在概率类别学习中的作用不同<sup>[64]</sup>. 最后, 由于人类在不确定情境下的学习和判断过程是一个动态、复杂的过程, 一方面会受到学习者动机、情绪、生理状态、药物等的影响, 如有研究发现睡眠可以提高概率类别学习绩效<sup>[65]</sup>; 另一方面还受到刺激线索属性的影响, 如有研究发现线索的可命名性影响概率类别学习的绩效<sup>[66]</sup>. 因此, 未来研究应尽量使用接近人类

真实环境的实验情境, 探讨动机、情绪等在概率类别学习的作用, 以更加深入地揭示人们在完成这一任务时的决策判断过程.

### 参 考 文 献

- [1] Maddox W T, Pacheco J, Reeves M, *et al.* Rule-based and information-integration category learning in normal aging. *Neuropsychologia*, 2010, 48(10): 2998-3008
- [2] Ell S W, Ing A D, Maddox W T. Critical noise effects on rule-based category learning: The impact of delayed feedback. *Attention, Perception, and Psychophysics*, 2009, 71(6): 1263-1275
- [3] Maddox W T, Glass B D, O'Brien J B, *et al.* Category label and response location shifts in category learning. *Psychological Research*, 2010, 74(2): 219-236
- [4] Seger C A, Miller E K. Category learning in the brain. *Annual Review of Neuroscience*, 2010, 33, 203-219
- [5] Lagnado D A, Newell B R, Kahan S, *et al.* Insight and strategy in multiple-cue learning. *Journal of Experimental Psychology: General*, 2006, 135(2): 162-183
- [6] Shanks D R. Connectionism and the learning of probabilistic concepts. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 1990, 42(2): 209-237
- [7] Estes W K. Array models for category learning. *Cognitive Psychology*, 1986, 18(4): 500-549
- [8] Gluck M A, Bower G H. From conditioning to category learning: An adaptive network model. *Journal of Experimental Psychology: General*, 1988, 117(3): 227-247
- [9] Knowlton B J, Squire L R, Gluck M A. Probabilistic classification learning in Amnesia. *Learning and Memory*, 1994, 1(2): 106-120
- [10] Meeter M, Radics G., Myers C E, *et al.* Probabilistic categorization: How do normal participants and amnesic patients do it? *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 2008, 32(2): 237-248
- [11] Packard M G, Knowlton B J. Learning and memory functions of the basal ganglia. *Annual Review of Neuroscience*, 2002, 25(1): 563-593
- [12] Weickert T W, Goldberg T E, Egan M F, *et al.* Relative risk of probabilistic category learning deficits in patients with Schizophrenia and their siblings. *Biological Psychiatry*, 2010, 67(10): 948-955
- [13] Ashby F G, Alfonso-Reese L A. A neuropsychological theory of multiple systems in category learning. *Psychological Review*, 1988, 105(3): 442-481
- [14] Hopkins R O, Myers C E, Shohamy D, *et al.* Impaired probabilistic category learning in hypoxic subjects with hippocampal damage. *Neuropsychologia*, 2004, 42(4): 524-535
- [15] Gluck M A, Shohamy D, Myers C E. How do people solve the "weather prediction" task? Individual variability in strategies for probabilistic category learning. *Learning and Memory*, 2002, 9(6): 408-418
- [16] Gluck M A, Oliver L M, Myers C E. Late-training amnesic deficits in probabilistic category learning: a neurocomputational analysis. *Learning and Memory*, 1996, 3(4): 326-340
- [17] Meeter M, Myers C E, Shohamy D, *et al.* Strategies in probabilistic categorization: Results from a new way of analyzing performance. *Learning and Memory*, 2006, 13(2): 230-239
- [18] Jahanshahi M, Wilkinson L, Gahir H, *et al.* Medication impairs probabilistic classification learning in Parkinson's disease. *Neuropsychologia*, 2010, 48(4): 1096-1103
- [19] Speekenbrink M, Lagnado D A, Wilkinson L, *et al.* Models of probabilistic category learning in Parkinson's disease: Strategy use and the effects of L-dopa. *Journal of Mathematical Psychology*, 2010, 54(1): 123-136
- [20] Eldridge L L, Masterman D, Knowlton B J. Intact implicit habit learning in Alzheimer's disease. *Behavioral Neuroscience*, 2002, 116(4): 722-726
- [21] Poldrack R A, Clark J, Pare -Blagoev E J, *et al.* Interactive memory systems in the human brain. *Synthesis*, 2001, 52: 297-314
- [22] Atallah H E, Rudy J W, O'Reilly R C. The role of the dorsal striatum and dorsal hippocampus in probabilistic and deterministic odor discrimination tasks. *Learning and Memory*, 2008, 15(5): 294-298
- [23] Lee A S, Duman R S, Pittenger C. A double dissociation revealing bidirectional competition between striatum and hippocampus during learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(44): 17163-17168
- [24] Seger C A, Cincotta C M. The Roles of the caudate nucleus in human classification learning. *The Journal of neuroscience*, 2005, 25(11): 2941-2951
- [25] 徐贵平, 温红博, 魏晓玛, 等. 线索呈现位置对概率类别学习的影响. *心理学报*, 2011, 43(3): 264-273  
Xu G P, Wen H B, Wei X M. The influence of positions of cues on probabilistic category learning. *Acta Psychologica Sinica*, 2011, 43(3): 264-273

- [26] Newell B R, Lagnado D A, Shanks D R. Challenging the role of implicit processes in probabilistic category learning. *Psychonomic Bulletin and Review*, 2007, 14(3): 505-511
- [27] Price A L. Distinguishing the contributions of implicit and explicit processes to performance of the weather prediction task. *Memory and Cognition*, 2009, 37(2): 210-222
- [28] Speekenbrink M, Channon S, Shanks D R. Learning strategies in Amnesia. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 2008, 32(2): 292-310
- [29] 郭秀艳. 内隐学习和外显学习关系评述. *心理科学进展*, 2004, 12(2): 185-192  
Guo X Y. Analysis of relationship between implicit learning and explicit learning. *Advances in Psychological Science*, 2004, 12(2): 185-192
- [30] 付秋芳, 傅小兰. 内隐学习中表征和意识的关系. *心理科学进展*, 2006, 14(1): 18-22  
Fu Q F, Fu X L. Relationship between representation and consciousness in implicit learning. *Advances in Psychological Science*, 2006, 14(1): 18-22
- [31] Fu Q F, Dienes Z, Fu X L. Can unconscious knowledge allow control in sequence learning. *Consciousness and Cognition*, 2010, 19(1): 462-474
- [32] Fu Q F, Fu X L, Dienes Z. Implicit sequence learning and conscious awareness. *Consciousness and Cognition*, 2008, 17(1), 185-202
- [33] 付秋芳, 傅小兰. 第二任务对内隐序列学习的影响. *心理科学*, 2010, 33(4): 861-864  
Fu Q F, Fu X L. Effects of the secondary task on implicit sequence learning. *Psychological Science*, 2010, 33(4): 861-864
- [34] Foerde K, Knowlton B J, Poldrack R A. Modulation of competing memory systems by distraction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103(31): 11778-11783
- [35] Foerde K, Poldrack R A, Knowlton B J. Secondary-task effects on classification learning. *Memory and Cognition*, 2007, 35(5): 864-874
- [36] Ashby F G, Maddox W T. Human category learning 2.0. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2010, 1224: 147-161
- [37] Shohamy D, Myers C, Kalanithi J, *et al.* Basal ganglia and dopamine contributions to probabilistic category learning. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 2008, 32(2): 219-236
- [38] Knowlton B J, Mangels J A, Squire L R. A neostriatal habit learning system in humans. *Science*, 1996, 273(5280): 1399-1402
- [39] Perretta J G., Pari G., Beninger R J. Effects of Parkinson disease on two putative nondeclarative learning tasks: probabilistic classification and gambling. *Cognitive and Behavioral Neurology*, 2005, 18(4): 185-192
- [40] Shohamy D, Myers C, Onlaor S, *et al.* Role of the basal ganglia in category learning: How do patients with Parkinson's disease learn? *Behavioral Neuroscience*, 2004, 118(4): 676-686
- [41] Knowlton B J, Squire L R, Paulsen J S, *et al.* Dissociations within nondeclarative memory in Huntington's disease. *Neuropsychology*, 1996, 10(4): 538-548
- [42] Kéri S, Szlobodnyik C, Benedek G., *et al.* Probabilistic classification learning in Tourette syndrome. *Neuropsychologia*, 2002, 40(8): 1356-1362
- [43] Marsh R, Alexander G M, Packard M G, *et al.* Habit learning in tourette syndrome: a translational neuroscience approach to a developmental psychopathology. *Archives of general psychiatry*, 2004, 61(12): 1259-1268
- [44] Aron A R, Shohamy D, Clark J, *et al.* Human midbrain sensitivity to cognitive feedback and uncertainty during classification learning. *Journal of Neurophysiology*, 2004, 92(2): 1144-1152
- [45] Sage J R, Anagnostaras S G, Mitchell S, *et al.* Analysis of probabilistic classification learning in patients with Parkinson's disease before and after pallidotomy surgery. *Learning and Memory*, 2003, 10(3): 226-236
- [46] Denis M, Paul C, Quinn and Stephen EG. Lea. *The Making of Human Concepts*. Oxford University Press, 2010: 75-79
- [47] Wixted J T, Squire L R. The medial temporal lobe and the attributes of memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 2011, 15(5): 210-217
- [48] Gluck M A, Myers C E. Hippocampal mediation of stimulus representation: A computational theory. *Hippocampus*, 1993, 3(4): 491-516
- [49] Reber P J, Knowlton B J, Squire, L R. Dissociable properties of memory systems: Differences in the flexibility of declarative and nondeclarative knowledge. *Behavioral Neuroscience*, 1996, 110(5): 861-871
- [50] Foerde K, Poldrack R A, Knowlton B J, *et al.* Selective corticostriatal dysfunction in Schizophrenia: Examination of motor and cognitive skill learning. *Neuropsychology*, 2008, 22(1): 100-109
- [51] Law J R, Flanery M A, Wirth S, *et al.* Functional magnetic resonance imaging activity during the gradual acquisition and expression of paired-associate memory. *Journal of Neuroscience*, 2005, 25(24): 5720-5729
- [52] Rushby J A, Vercaemmen A, Loo C, *et al.* Frontal and parietal contributions to probabilistic association

- learning. *Cerebral Cortex*, 2011, 21(8): 1879-1888
- [53] Kincses T Z, Antal A, Nitsche M A, *et al.* Facilitation of probabilistic classification learning by transcranial direct current stimulation of the prefrontal cortex in the human. *Neuropsychologia*, 2004, 42(1), 113-117
- [54] Raz N, Rodrigue K M, Kennedy K M, *et al.* Differential aging of the human striatum: longitudinal evidence. *American Journal of Neuroradiology*, 2003, 24(9): 1849-1856
- [55] Rypma B, Prabhakaran V, Desmond J E, *et al.* Age differences in prefrontal cortical activity in working memory. *Psychology and Aging*, 2001, 16(3): 371-384
- [56] Fera F, Weickert T W, Goldberg T E, *et al.* Neural mechanisms underlying probabilistic category learning in normal aging. *The Journal of Neuroscience*, 2005, 25(49): 11340-11348
- [57] Weickert T W, Goldberg T E, Callicott J H, *et al.* Neural correlates of probabilistic category learning in patients with Schizophrenia. *The Journal of Neuroscience*, 2009, 29(4), 1244-1254
- [58] Behrens T E J, Woolrich M W, Walton M E, *et al.* Learning the value of information in an uncertain world. *Nature Neuroscience*, 2007, 10(9): 1214-1221
- [59] Koch K, Wagner G., Nenadic I, *et al.* Temporal modeling demonstrates preserved overlearning processes in Schizophrenia: an fMRI study. *Neuroscience*, 2007, 146(4): 1474-1483
- [60] Dickerson K C, Li J, Delgado M R. Parallel contributions of distinct human memory systems during probabilistic learning. *NeuroImage*, 2011. doi:10.1016/j.neuroimage.2010.10.080
- [61] Poldrack R A, Foerde K. Category learning and the memory systems debate. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 2008, 32(2): 197-205
- [62] Poldrack R A, Rodriguez P. How do memory systems interact? Evidence from human classification learning. *Neurobiology of Learning and Memory*, 2004, 82(3): 324-332
- [63] Shohamy D, Myers C, Hopkins R O, *et al.* Distinct hippocampal and basal ganglia contributions to probabilistic learning and reversal. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2008, 21(9): 1820-1832
- [64] Celone K A, Thompson-Brenner H, Ross R S, Pratt E M, *et al.* An fMRI investigation of the fronto-striatal learning system in women who exhibit eating disorder behaviors. *NeuroImage*, 2011. doi:10.1016/j.neuroimage.2011.03.026
- [65] Djonlagic I, Rosenfeld A, Shohamy D, *et al.* Sleep enhances category learning. *Learning and Memory*, 2009, 16: 751-755
- [66] Kokinov B, Karmiloff-Smith A, Nersessian N J. *European Perspectives on Cognitive Science*. New Bulgarian University Press, 2011

## Cognitive and neural mechanisms of probabilistic category learning\*

LI Kai-Yun, FU Qiu-Fang\*\*, FU Xiao-Lan

*(State Key Laboratory of Brain and Cognitive Science, Institute of Psychology, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)*

**Abstract** In probabilistic category learning tasks, people learn incrementally the “probabilistic” association between cues and outcomes. Here, we first discussed cognitive strategies used in probabilistic category learning, the unconsciousness of probabilistic category learning, as well as the relationship between probabilistic category learning and working memory and attention. Then, we reviewed the different roles of various brain regions, including the basal ganglia, the medial temporal lobe, the prefrontal lobe and the parietal lobe, in probabilistic category learning. Finally, we suggest that probabilistic category learning might involve both implicit and explicit processes and future research is needed to further explore the cognitive and neural mechanisms of probabilistic category learning.

**Key words** category learning, probabilistic category learning, cognitive strategies, unconsciousness, neural mechanism

---

\*This work was supported by grants from National Basic Research Program of China (2011CB302201) and The National Natural Science Foundation of China (30900395).

\*\*Corresponding author.

Tel: 010-64845395, E-mail: fuqf@psych.ac.cn

Received: September 30, 2011

Accepted: November 11, 2011

Available online: November 14, 2011