

# 理解不确定性：儿童概率表征的认知发展机制<sup>\*</sup>

刘思焱 苏彦捷<sup>\*\*</sup>

(北京大学心理与认知科学学院, 行为与心理健康北京市重点实验室, 生物与机器智能教育部重点实验室, 北京, 100871)

**摘要** 概率表征反映个体对不确定性的感知与判断的能力。以往研究表明, 人类在生命早期就表现出了概率表征能力, 部分非人类动物也具有概率表征能力, 且该能力被应用于各个领域, 如语言学习、情绪理解等。由此可见, 概率表征能力具有跨物种一致性与领域一般性, 其对个体的生存与繁衍具有重要适应意义。基于对以往研究证据的系统梳理, 本研究阐明概率表征的认知发展理论解释, 其中包含数量加工和逻辑推断等不同视角的分析; 提出概率表征认知发展机制的整合性假说, 该假说认为数量加工与逻辑推断分别反映概率表征的不同认知加工成分, 共同构成概率表征能力的认知基础; 最后指出未来的可能研究方向。

**关键词** 概率表征 认知发展 数量加工 逻辑推断 整合性假说

## 1 引言

人类与动物生存的自然与社会环境中充满不确定性, 对不确定性的感知、理解与推断是对生存与繁衍至关重要的认知能力。“概率”这一数学概念反映了环境中的不确定性, 比如: 今天下雨的概率为 60%; 在晚高峰出门遇到堵车的概率为 90%; 买彩票中奖的概率为百万甚至千万分之一。概率信息衡量了结果事件发生的可能性。在日常生活中, 个体需要基于概率信息推断结果事件, 并完成决策。

已有研究发现, 人类在生命早期就表现出了对概率信息的敏感性 (Denison et al., 2013; Xu & Garcia, 2008), 并且能够基于概率信息指导行为, 做出更有利于自己的决策 (Denison & Xu, 2010b, 2014)。这种能力被应用于各个领域。人类儿童在进行类别学习时, 会考虑样例呈现的概率信息 (Xu & Tenenbaum, 2007)。当研究者呈现一只狗、一只猫和一只鸟给被试, 并告诉被试狗的名字时, 被试会认为这个名字代表了狗这一物种; 而当研究者呈现三只不同品种的狗时, 此时被试会认为这个名字

代表某一个特定品种的狗。这是因为当以物种为单位进行抽样时, 三个样例都是狗的概率更小, 因此被试倾向于认为该名字代表特定品种的狗。此外, 婴幼儿能够基于概率信息推断他人的心理状态, 如偏好与意图 (Diesendruck et al., 2015; Kushnir et al., 2010; Ma & Xu, 2011, 2013; Wellman et al., 2016; Xu & Denison, 2009)、情绪状态 (Asaba et al., 2019; Doan et al., 2018, 2020; Doan et al., 2023)。当实验者的抽样结果违背总体的基本比率 (base rate) 时, 婴儿倾向于认为该实验者的抽样存在偏差, 这可能反映了实验者对某种结果事件的偏好 (Attisano & Denison, 2020)。在类似的实验任务中, 黑猩猩 (chimpanzees, *Pan troglodytes*) (Eckert, Rakoczy, et al., 2018) 和啄羊鹦鹉 (kea, *Nestor notabilis*) (Bastos & Taylor, 2020) 也表现出了对实验者抽样偏差的敏感性。由此可见, 概率表征能力具有跨物种一致性与领域一般性 (domain-general)。

以往研究从数量加工、逻辑推断的视角对概率表征认知加工机制<sup>①</sup>进行了探讨。基于已有理论假说与实证研究证据, 本研究整合概率表征认知加工

<sup>\*</sup> 本研究得到国家自然科学基金面上项目 (32371111) 的资助。

<sup>\*\*</sup> 通讯作者: 苏彦捷, E-mail: yjsu@pku.edu.cn

<sup>①</sup> 以往有关婴幼儿概率表征认知机制的研究主要采用的是单次简单随机抽样的问题情境或该情境的变式, 该问题情境下所测量到的是婴幼儿对概率信息的基本感知与推断, 可能是其他更复杂概率问题解决能力的基础 (Xu & Garcia, 2008)。

DOI:10.16719/j.cnki.1671-6981.20260308

机制的理论假说，提出未来可能的研究方向。

## 2 概率表征的常见实验范式

概率表征的常用实验范式主要有期待违背范式 (violation of expectation, VoE) 与二分迫选范式 (two-alternative forced-choice, 2AFC)。期待违背范式通过记录个体对不同结果事件的注视时间，进而推断个体是否能够基于概率信息对结果产生正确预期；二分迫选范式则通过模拟概率事件的过程让个体对不同结果事件进行选择，进而推断个体能够基于概率信息预测结果事件并做出决策。

期待违背范式常用于婴儿与动物研究。如图 1 所示，实验者对包含不同颜色小球的总体进行无放回的随机抽样，总体中包含 80 颗红球和 20 颗白球。在该实验中，实验者最终所抽取出的样本包含 4 颗红球和 1 颗白球，即符合总体分布的样本，为大概率事件；或最终所抽取出的样本包含 1 颗红球和 4 颗白球，即不符合总体分布的样本，为小概率事件。6 个月大的婴儿对不符合总体分布的样本表现出了显著更长的注视时间。该结果表明 6 个月大的婴儿对概率事件存在正确预期 (Denison et al., 2013)。8 个月大的儿童在相似的任务中也表现出了这种预期，并且其不仅能基于总体分布预期样本的结果，还能基于样本结果预期总体分布 (Xu & Garcia, 2008)。为了排除知觉匹配策略的影响，实验者给婴儿呈现一个从别处拿出的不符合总体分布的样本后，婴儿没有表现出显著更长的注视时间。这说明婴儿对不同结果的注视时间差异并不是由知觉匹配策略导致的。在采用不同任务情境的另一个实验

中，开口朝下的容器中包含正在发生随机碰撞的 4 个物体，其中 3 个黄色物体，1 个蓝色物体。当最终蓝色物体掉出时，婴儿表现出了显著更长的注视时间。采用相似情境的研究也得到了一致的结果 (Téglás et al., 2015; Téglás et al., 2011)。其它采用期待违背范式的研究也揭示了一致的结果 (Denison et al., 2013; Téglás et al., 2007; Xu & Denison, 2009)。期待违背范式也被应用于恒河猴 (rhesus macaques, *Macaca mulatta*) 研究，当大多数都是苹果的抽奖机中掉出一颗柠檬时，恒河猴表现出了显著更长的注视时间 (De Petrillo & Rosati, 2019)。但在采用注视时间作为行为指标的实验中，被试总是可以看到所有事件结果，即他们的行为表现总是基于所有已知信息的。那么被试是否能够对未知事件结果进行推断并选择呢？

研究者采用二分迫选实验范式，让年龄更大的婴幼儿对未知的事件结果进行选择，以此检验其对概率信息的理解和推断 (Denison & Xu, 2010b, 2014; Fontanari et al., 2014; O' Grady & Xu, 2020)。在该范式中，被试做出选择前，始终不会得知结果如何，因此只能基于概率信息进行推断。该范式被应用于婴幼儿研究与动物研究中。在 2AFC 实验中，研究者先给 10 到 12 个月大的婴儿呈现两个装满棒棒糖的容器，包含用星星贴纸包装和用黑纸包装的两种棒棒糖，其中用星星贴纸包装的棒棒糖是被试更偏好的。两种棒棒糖在容器中的数量比例不同，此处将含星星贴纸包装的棒棒糖比例更大的容器称为“更优总体”。当实验者分别从两个容器中随机取出棒棒糖时，始终保持棒棒糖的包装纸是不可见的状态，

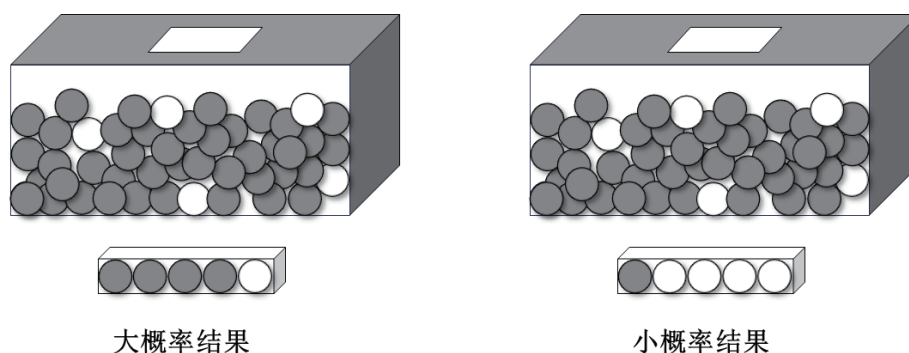


图 1 概率表征的期待违背实验范式图示 (图改编自 Denison & Xu, 2019)

而后让被试做选择。被试选择从“更优总体”抽取出的棒棒糖的频次显著更高 (Denison & Xu, 2010b, 2014)。该结果说明, 10 到 12 个月的婴儿能够基于概率信息对未知的事件结果进行推断并指导自己的决策。采用相同的范式, 研究者发现 3 到 5 岁儿童 (Alderete & Xu, 2023)、7 到 12 岁儿童 (O'Grady & Xu, 2020) 以及少数部落人群 (Fontanari et al., 2014) 也具有概率表征能力。采用 2AFC 范式的动物研究也发现了跨物种一致的概率表征能力 (Bastos & Taylor, 2020; Caicoya et al., 2023; Clements et al., 2018; Eckert, Call, et al., 2018)。

以上两种范式分别适用于不同被试群体中, 且所揭示的认知能力存在差异。VoE 范式的结果能反映被试对概率信息的敏感性, 但在该种范式的任务中, 被试总是可以看到所有结果, 因此基于此无法推断被试是否真的能够预测未知的结果事件; 2AFC 范式则是让被试在结果不可见的情况下进行迫选, 相比 VoE 范式而言, 能够反映被试基于预测所作出的决策。

### 3 概率表征的实证研究证据

概率表征的实证研究主要围绕两方面展开: 首先, 人类生命早期就表现出了对概率信息的敏感性, 还能基于概率信息指导决策, 且这种能力具有跨物种一致性; 其次, 概率表征能力并不局限于某一特定情境, 具有领域一般性, 其在生存决策的各个方面都发挥着重要作用。

采用期待违背范式的研究发现, 六个月和八个月的婴儿已经表现出对概率信息的敏感性 (Denison et al., 2013; Xu & Garcia, 2008)。他们均能根据总体分布推断随机抽取的样本结果, 当样本结果不符合总体分布时, 婴儿表现出了显著更长的注视时间。这说明婴儿能够依据随机抽样过程的概率信息对样本结果形成正确预期。12 个月大的婴儿在不同的实验情境中也表现出了对概率信息的敏感性 (Téglás et al., 2007), 他们对小概率结果事件的注视时间显著更长。而当不呈现样本结果, 只让婴儿对从不同总体中抽取出的不可见的样本进行迫选时, 婴儿显著更多地选择了有更大概率出现他们偏好结果的选项 (Denison & Xu, 2010b, 2014)。以上研究证据

均说明, 人类在生命早期就已经具备对概率信息的敏感性, 并能依据概率信息预测未来事件的结果, 并指导决策行为。其他相关研究也揭示了婴幼儿对概率信息的敏感性 (Denison et al., 2013; Kayhan et al., 2018; Sim & Xu, 2017), 且能基于概率信息指导决策行为 (Liu et al., 2024; O'Grady & Xu, 2020; Szkudlarek & Brannon, 2021)。

动物研究也揭示了类似的规律。一项有关恒河猴概率表征能力的研究发现, 当给恒河猴呈现从总体中随机抽样出的小概率事件时, 恒河猴的注视时间显著长于对从总体中随机抽样出的大概率事件的注视时间 (De Petrillo & Rosati, 2019)。该研究表明恒河猴对概率信息具有敏感性, 能够基于总体的分布推断样本结果的可能性。其它研究多采用 2AFC 范式, 让个体从两个未知结果的选项中进行选择。比如, 研究者给黑猩猩呈现两个包含两种水果的容器, 且容器中两种水果的数量比例不等, 当研究者从两个容器中分别随机取出一块水果 (对黑猩猩不可见) 并让黑猩猩选择时, 黑猩猩显著更多地选择了更大概率是它偏好水果的选项, 即选择了从包含更大比例的偏好水果的总体中随机抽取的水果 (Eckert, Call, et al., 2018; Rakoczy et al., 2014)。采用类似的范式, 以往研究还发现大猩猩 (gorilla, *Gorilla gorilla*)、倭黑猩猩 (bonobo, *Pan paniscus*)、黄猩猩 (orangutans, *Pongo abelii*) (Eckert, Call, et al., 2018; Eckert et al., 2017; Rakoczy et al., 2014)、卷尾猴 (capuchins, *Sapajus* spp.) (Tecwyn et al., 2017)、长颈鹿 (giraffes, *Giraffa camelopardalis*) (Caicoya et al., 2023)、啄羊鹦鹉 (Bastos & Taylor, 2020) 也具有概率表征能力。此外, 在一项有关非洲灰鹦鹉 (grey parrots, *Psittacus erithacus*) (Clements et al., 2018) 概率表征能力的研究中, 研究者在一个容器中放入 3 块棉花和 1 块软木塞, 然后从中随机取出一块攥在手中, 让非洲灰鹦鹉对研究者手里的东西进行命名, 结果发现非洲灰鹦鹉命名的频次与容器中物体的比例一致, 即非洲灰鹦鹉对随机抽样的结果预期与总体分布一致。以上研究证据均说明一些非人类动物也具有对概率信息的敏感性, 并且能够依据概率信息预测未来事件并指导自己的决策行为, 即概率表征能力具有跨

物种一致性。

概率表征能力并不局限于某一特定方面或情境，其可被应用于不同情境中，即具有领域一般性。首先，概率表征能力在社会认知加工中起重要作用（Cesana-Arlotti et al., 2020; Ma & Xu, 2013; Wellman et al., 2016）。婴幼儿能够利用概率表征能力理解他人的意图与偏好。在实验者或玩偶存在抽样偏差时，其抽样结果并不服从总体的概率分布，此时10个月大的婴儿会预期实验者或玩偶对某种结果存在偏好（Kushnir et al., 2010; Wellman et al., 2016），因此出现了这种不符合概率原则的结果。而当这种抽样偏差出现在机械手臂上时，婴儿则不会认为其存在对结果的偏好（Ma & Xu, 2013）。当结果事件符合概率原则时，儿童则会根据个体的选择推断个体的偏好。比如，当个体面对两个装有不同比例红色糖果和蓝色糖果的抽奖机器时，如果个体选择了红色糖果比例更大的抽奖机器，儿童会推断该个体喜欢红色糖果（Doan et al., 2022）。此外，儿童的情绪理解也与概率表征有关（Doan et al., 2023）。比如，相比于获得了大概率发生的好结果，当个体获得了小概率发生的好结果时，儿童会认为个体更高兴（Asaba et al., 2019; Doan et al., 2020）以及更惊讶（Doan et al., 2018）。除社会线索外，婴幼儿在利用概率信息进行推断时，也会考虑物理线索。当实验者所呈现的总体中同时包含红色小球和绿色小球，且存在物理限制使得绿色小球无法被抽取出，即使实验者从大多都是绿色小球的总体中抽取出符合总体分布的样本，11个月大的婴儿也会表现出显著更长的注视时间，即该结果不符合婴儿的预期（Denison et al., 2014; Denison & Xu, 2010a）。在不同情境下的概率表征任务都表明，婴幼儿能够将新获得的证据与先验概率整合，以此更新自己的推断结果，即进行贝叶斯概率推断。同时，这些新获得的证据并不局限于特定的情境下，婴幼儿能在不同情境下进行概率表征，即人类所具有的概率表征能力是领域一般的。

综上所述，概率表征能力是一种对生存与繁衍至关重要的认知能力，其出现于人类生命早期且具有跨物种一致性，还具有跨情境的领域一般性。

#### 4 概率表征中的数量加工

从数量加工角度来看，概率表征基于对总体与样本之间数量关系的理解。在完全随机抽样过程中，总体与样本的比率信息应该保持一致。因此，在直觉统计学理论中（Denison & Xu, 2019; Xu & Garcia, 2008），个体的概率表征是建立在对概率信息的近似估计上的，比如当总体中存在80个红色小球和20个白色小球时，对总体进行随机抽样，取得一个红色小球的概率为80%，取得一个白色小球的概率为20%。概率信息与不同颜色小球占总体的数量比例是一致的。在该假说的理论框架下，个体对数量信息的感知与估计是完成概率表征的重要认知基础。

以往研究采用2AFC范式探讨学龄儿童与灵长类动物概率表征中的数量信息加工。如图2所示，研究者采用简单随机抽样的概率问题情境检验儿童的概率表征能力。在该任务情境中，研究者在每个试次给儿童呈现两个总体，这两个总体中包含不同数量比率的黑色小球与白色小球，如左侧总体中黑色小球占总体数量比率为80%，右侧总体中黑色小球占总体数量比率为20%，则两总体中随机抽取出黑色小球的概率之比为4，该概率之比也被称为比率之比（ratios of proportions, RP），该指标反映了两选项中得到目标结果概率的相对差异，当相对差异较大时，则更容易辨别，因此儿童的正确率也会越高。研究发现7~10岁儿童在2AFC概率判断任务中的表现随RP线性变化（Liu et al., 2024; O'Grady & Xu, 2020），当RP较大时，两总体的比率信息辨别更容易，儿童的正确率更高；当RP较小时，两总体的比率信息辨别更困难，儿童的正确率更低。随年龄增大，儿童在概率判断任务中的平均正确率增大，且受到比率这一数量信息的影响也增大，这说明随年龄增长，儿童会更多地基于比率这一正确而理性的数量信息完成概率表征（Liu et al., 2024; O'Grady & Xu, 2020）。

研究者采用类似的范式检验黑猩猩的概率表征能力，得到了与儿童研究相似的结果（Eckert, Call, et al., 2018）。此外，其他研究也发现了类似的规律（Qu et al., 2024），且揭示了概率表征可能是基于近似数量系统（approximate number system, ANS）的。以上证据均反映了个体的概率表征是建立在数量加

工的基础上的，他们在概率判断任务中的表现与近似数量表征的规律相似（Feigenson et al., 2004）。并且也有研究发现，近似数量表征敏锐度与小学儿童在概率判断任务中的表现显著相关，当儿童的近似数量表征敏锐度越高时，其在概率判断任务中的正确率也越高（Szkudlarek & Brannon, 2021）。

但目前直接探讨概率表征与数量表征之间因果关系的研究还较少，未来研究可通过纵向追踪和横断行为实验多种方法，探讨概率表征的数量加工机制。

## 5 概率表征中的逻辑推断

从逻辑推断视角来看，个体的概率表征基于对所有可能结果事件的枚举，再对所有可能事件进行比较，进而得出结论。且在逻辑推断假设中，所有被枚举出的结果事件之间是等可能性的。但这种表征所有可能事件的能力并非在生命早期就已经成熟完备。可能事件结果之间若是互斥的，部分研究表明婴幼儿不具备这种同时表征多种互斥的可能事件结果的能力（Leahy, 2023; Leahy & Carey, 2020; Redshaw & Suddendorf, 2016）。对不同结果

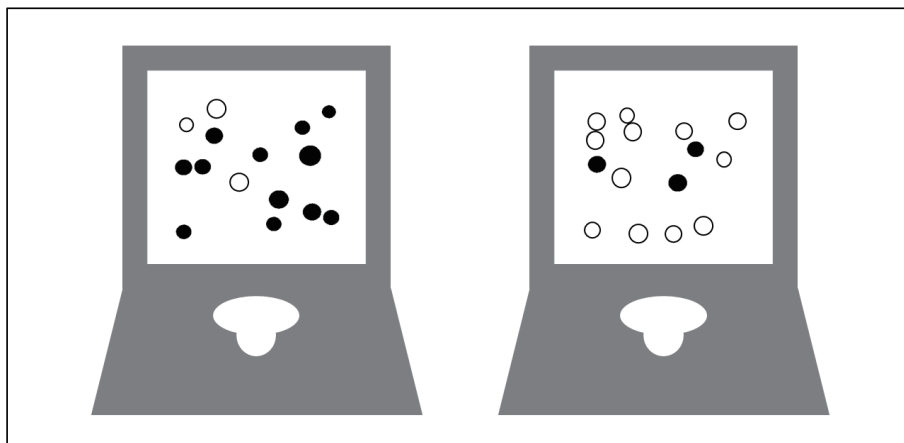


图2 儿童概率表征研究的二分迫选实验范式图示 (图改编自 Liu et al., 2024)

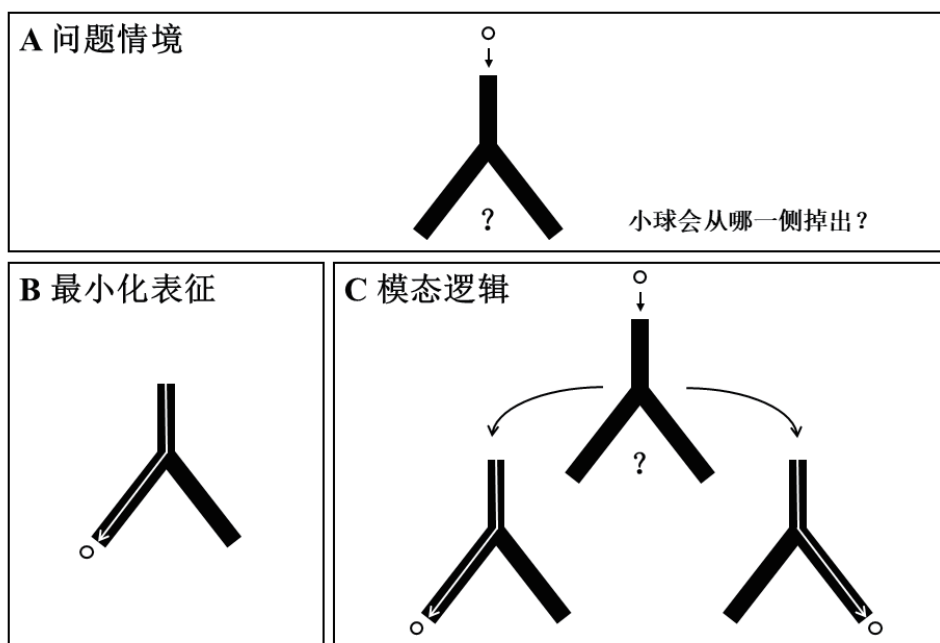


图3 模态概念理论图示 (图改编自 Leahy & Carey, 2020)

事件的表征是随着发展而逐渐成熟的，研究者将这种同时表征不同结果可能性的能力称为模态概念（modal concept）或模态逻辑（modal logic）（Leahy & Carey, 2020）。如图 3 所示，当存在一个二叉分支管道，从上方入口放入一个小球，判断小球会从下方哪个管道中出现？图 3B 为未获得模态概念个体的加工模式，他们采用一种最小化表征（minimal representation）的方式来对事件结果进行推断，即采用模拟的方式，从所有可能事件中随机选取一个作为真实结果。如图中所示，将小球从左侧管道出现作为真实结果，进而来完成后续决策。一项儿童和黑猩猩的研究发现（Redshaw & Suddendorf, 2016），2 岁儿童和黑猩猩可能采用了最小化表征的方式来进行概率表征，他们在二叉分支管道任务中，更多地堵住一侧的管道而非同时堵住两侧管道；随年龄增大，儿童逐渐转变为采用图 3C 的方式来完成推断，即模态逻辑的方式。在图 3C 中，个体能同时表征两种互斥的可能结果，并据此完成决策。获得模态逻辑的儿童能够同时用手堵住两侧管道。

以往研究揭示了儿童模态概念的发展。部分研究发现，2 岁儿童尚不具有模态概念或模态逻辑（Mody & Carey, 2016; Redshaw & Suddendorf, 2016）。如图 4 所示，模态概念测量常用的寻找任务给儿童呈现两组容器，其中一组只有一个容器

（蓝色容器），另一组有两个容器（黄色与绿色容器），研究者将一颗星星藏在蓝色容器中，并将另一颗完全相同的星星藏在黄色与绿色容器中之一，该过程对被试不可见，因此被试并不知道星星最终藏在黄色还是绿色容器中。最终让 2~5 岁的儿童被试选择一个容器寻找星星。已经获得模态概念的儿童能够对右侧一组容器的可能性进行表征，即黄色与绿色容器中都有可能藏有星星，而左侧蓝色容器则已经确定藏有星星，因此他们选择左侧蓝色容器的比例应该与 100% 没有显著差异；而没有获得模态概念的儿童则在每一次尝试中都会随机认定黄色或绿色容器中的一个藏有星星，因此在每一次尝试中，右侧一组容器都有约 50% 的概率被选中，左侧蓝色容器被选中的概率也为约 50%（Mody & Carey, 2016）。后续研究采用类似的范式（Leahy, 2023; Leahy et al., 2022）以及二叉分支管道范式的变式（Leahy, 2023）也得到了一致的结果，发现 2~3 岁儿童尚未获得模态概念。

但上述研究中所采用范式需要儿童被试对客体进行追踪或者在工作记忆中保持对不可见客体的表征，这种认知负荷可能导致已经获得模态概念的儿童无法完成该任务。因此后续有研究者采用如图 5 所示的抽奖机任务来测量儿童的模态概念（Alderete & Xu, 2023）。在抽奖机任务中，被试不需要追踪

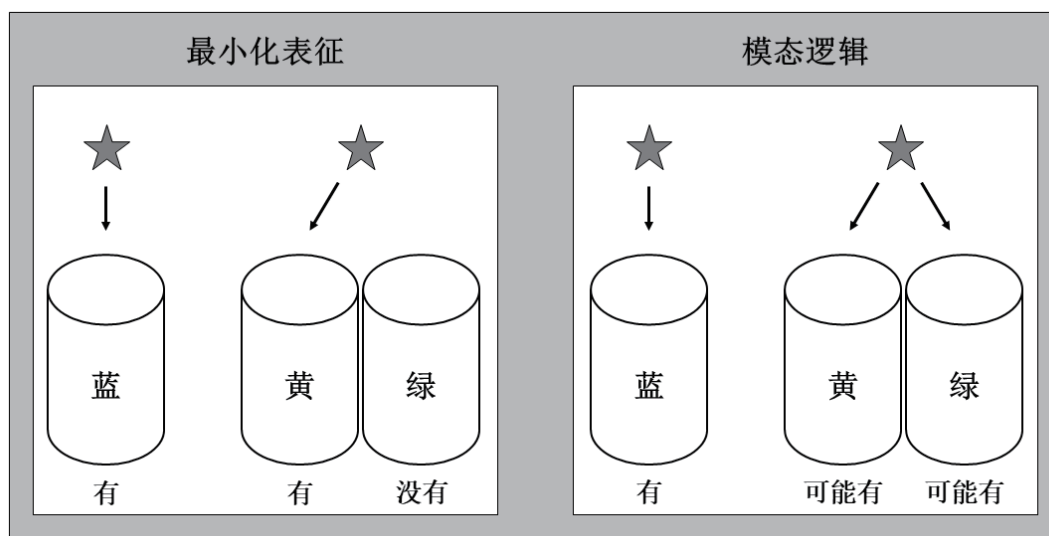


图 4 模态概念的寻找任务图示（图改编自 Alderete & Xu, 2023）

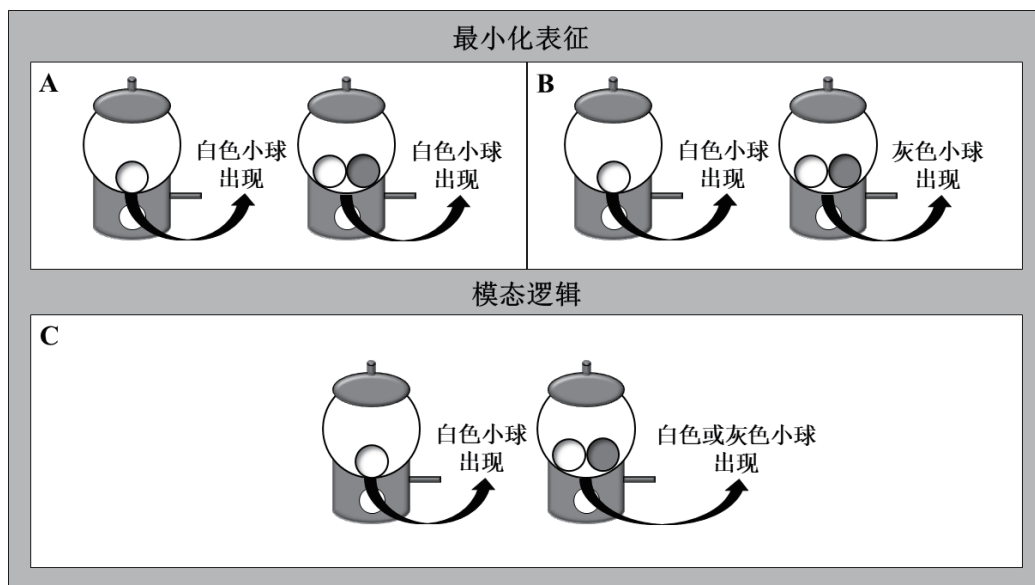


图5 模态概念的抽奖机任务图示 (图改编自 Alderete & Xu, 2023)

客体或保持对不可见客体的加工。采用该任务的研究发现3岁儿童能够对未来可能事件进行准确判断,说明其已经获得模态概念。也有研究提示,儿童在寻找任务中失败的原因可能是其执行计划的能力发展不成熟,而非无法表征互斥的事件结果 (Turan-Kucuk & Kibbe, 2024, 2025)。此外,也有婴儿眼动研究发现,14个月的婴儿可能已经具有对不确定事件结果的表征 (Cesana-Arlotti et al., 2022)。因此,有关婴幼儿模态概念的发展研究结果尚存在争议。

逻辑推断视角的解释与数量加工视角的解释不同,更关注概率表征的逻辑框架,即儿童如何获得对概率中的或然性的理解,而数量加工视角则更多关注概率表征中对概率中数量信息的感知与估计。这两种解释框架可能反映了概率表征的不同认知成分。

## 6 讨论与展望

基于已有对概率表征认知加工机制的假说和实证研究证据,不同假说之间可能并不是互斥的关系,而是对概率表征不同认知加工成分的解释。以往相关研究与理论将模态概念与概率表征视为相对独立且相互联系的能力,但有可能模态概念与数量加工共同构成了概率表征的认知基础,即在以往理论基础提出整合性假说:概率表征的逻辑推断解

释为个体表征概率信息提供基本的逻辑判断基础,即不同结果均有可能发生且不同结果的发生具有互斥性;而数量加工则为概率表征提供了衡量和估计概率信息的认知基础,让个体能基于有限的信息对总体中的数量信息进行估计,进而基于概率表征的逻辑框架对样本中的数量信息进行估计。例如,在2AFC任务中,儿童要做出正确的判断,首先需要理解从总体中抽取一个样本的随机性,即每个物体都会等可能性地被抽到,并且不同物体被抽到的事件是互斥的;其次,儿童需要根据总体物体的数量分布情况来估计目标事件发生的概率,进而做出决策。因此,概率表征认知发展机制的不同理论假说可能并非互斥关系,而是分别阐述了该加工过程的不同认知成分,今后的研究可系统性检验和探讨这些假说之间的关系。

以往有关模态概念的相关理论提出,婴幼儿完成模态逻辑推断的认知过程为:先对所有可能事件结果进行枚举,而后对不同事件结果的数量进行加工,进而形成对事件结果的预期或做出决策 (Cesana-Arlotti et al., 2012)。然而,若基于该理论,则以往研究所发现的人类生命早期就可以完成的概率表征可能并非“真正的”概率表征,因为近年来的部分研究发现3岁儿童尚不具有模态概念,或尚未获得对可能性概念的理解 (Leahy, 2023; Leahy &

Carey, 2020)。对此，可能存在两种解释：第一，人类在生命早期所完成的概率表征是通过最小化表征的方式完成的，即通过模拟事件结果来完成，并非真正意义的概率表征；第二，人类在生命早期就可以进行真正的概率表征，但由于以往有关儿童模态概念的研究所采用任务情境过于复杂，因此低估了儿童的能力（Alderete & Xu, 2023; Leahy et al., 2022; Turan-Kucuk & Kibbe, 2024, 2025）。

此外，以往有关婴幼儿概率表征的研究存在系统性的任务需求的分离，这可能导致了模态概念与概率表征两个方面的研究结果无法统一。例如，一项有关婴儿概率表征的研究使用了客体追踪任务（Téglás et al., 2015），结果发现，只有在小数量条件下，婴儿才能够预测未来事件；而在大数量条件下，被试则没有表现出对未来事件的准确预测。这可能是由于客体追踪任务激活了被试的客体档案系统（object file system, OFS），该系统只能对小数量进行精确加工（Feigenson et al., 2004），因此在大数量条件下被试无法基于数量信息预测未来事件。而后续采用大数量情境的多项研究均表明，儿童能够在大量情境下进行概率表征（Liu et al., 2024; O'Grady & Xu, 2020; Stahl & Feigenson, 2024; Szkudlarek & Brannon, 2021）。儿童研究中也存在类似现象，当研究者减少任务需求的认知负荷后，被试的表现显著提升（Alderete & Xu, 2023）。未来研究可以系统考虑不同任务涉及的任务需求，采用更符合婴幼儿的实验范式对其概率表征能力进行测量；也可系统性比较不同任务之间的异同，更加全面地考察婴幼儿的概率表征能力。

最后，未来研究可考虑采用多种方法探讨概率表征能力的认知发展机制。例如，采用神经网络模型的方式模拟个体进行概率推断的心理过程（Shultz & Nobandegani, 2021），以此推测概率表征的认知加工机制；也可采取多模态技术探索概率表征的认知加工过程，例如眼动追踪（Cesana-Arlotti et al., 2022），脑电图等方法。

#### 参考文献

- Alderete, S., & Xu, F. (2023). Three-year-old children's reasoning about possibilities. *Cognition*, 237, 105472.
- Asaba, M., Ong, D. C., & Gweon, H. (2019). Integrating expectations and outcomes: Preschoolers' developing ability to reason about others' emotions.

- Developmental Psychology*, 55(8), 1680–1693.
- Attisano, E., & Denison, S. (2020). Infants' reasoning about samples generated by intentional versus non-intentional agents. *Infancy*, 25(1), 110–124.
- Bastos, A. P. M., & Taylor, A. H. (2020). Kea show three signatures of domain-general statistical inference. *Nature Communications*, 11(1), 828.
- Caicoya, A. L., Colell, M., & Amici, F. (2023). Giraffes make decisions based on statistical information. *Scientific Reports*, 13(1), 5558.
- Cesana-Arlotti, N., Kovács, A. M., & Téglás, E. (2020). Infants recruit logic to learn about the social world. *Nature Communications*, 11, 5999.
- Cesana-Arlotti, N., Téglás, E., & Bonatti, L. (2012). The probable and the possible at 12 months: Intuitive reasoning about the uncertain future. In F. Xu & T. Kushnir (Eds.), *Advances in child development and behavior: Rational constructivism in cognitive development* (pp. 1–26). Academic Press.
- Cesana-Arlotti, N., Varga, B., & Téglás, E. (2022). The pupillometry of the possible: An investigation of infants' representation of alternative possibilities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 377, 20210343.
- Clements, K. A., Gray, S. L., Gross, B., & Pepperberg, I. M. (2018). Initial evidence for probabilistic reasoning in a Grey parrot (*Psittacus erithacus*). *Journal of Comparative Psychology*, 132(2), 166–177.
- De Petrillo, F., & Rosati, A. G. (2019). Rhesus macaques use probabilities to predict future events. *Evolution and Human Behavior*, 40(5), 436–446.
- Denison, S., Reed, C., & Xu, F. (2013). The emergence of probabilistic reasoning in very young infants: Evidence from 4.5- and 6-month-olds. *Developmental Psychology*, 49(2), 243–249.
- Denison, S., Trikutam, P., & Xu, F. (2014). Probability versus representativeness in infancy: Can infants use naïve physics to adjust population base rates in probabilistic inference? *Developmental Psychology*, 50(8), 2009–2019.
- Denison, S., & Xu, F. (2010a). Integrating physical constraints in statistical inference by 11-month-old infants. *Cognitive Science*, 34(5), 885–908.
- Denison, S., & Xu, F. (2010b). Twelve- to 14-month-old infants can predict single-event probability with large set sizes. *Developmental Science*, 13(5), 798–803.
- Denison, S., & Xu, F. (2014). The origins of probabilistic inference in human infants. *Cognition*, 130(3), 335–347.
- Denison, S., & Xu, F. (2019). Infant statisticians: The origins of reasoning under uncertainty. *Perspectives on Psychological Science*, 14(4), 499–509.
- Diesendruck, G., Salzer, S., Kushnir, T., & Xu, F. (2015). When choices are not personal: The effect of statistical and social cues on children's inferences about the scope of preferences. *Journal of Cognition and Development*, 16(2), 370–380.
- Doan, T., Friedman, O., & Denison, S. (2018). Beyond belief: The probability-based notion of surprise in children. *Emotion*, 18(8), 1163–1173.
- Doan, T., Friedman, O., & Denison, S. (2020). Young children use probability to infer happiness and the quality of outcomes. *Psychological Science*, 31(2), 149–159.
- Doan, T., Friedman, O., & Denison, S. (2023). Calculated feelings: How children use probability to infer emotions. *Open Mind: Discoveries in Cognitive Science*, 7, 879–893.

- Doan, T., Stonehouse, E., Denison, S., & Friedman, O. (2022). The odds tell children what people favor. *Developmental Psychology, 58*(9), 1759–1766.
- Eckert, J., Call, J., Hermes, J., Herrmann, E., & Rakoczy, H. (2018). Intuitive statistical inferences in chimpanzees and humans follow Weber's law. *Cognition, 180*, 99–107.
- Eckert, J., Rakoczy, H., & Call, J. (2017). Are great apes able to reason from multi-item samples to populations of food items? *American Journal of Primatology, 79*(10), e22693.
- Eckert, J., Rakoczy, H., Call, J., Herrmann, E., & Hanus, D. (2018). Chimpanzees consider humans' psychological states when drawing statistical inferences. *Current Biology, 28*(12), 1959–1963.
- Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences, 8*(7), 307–314.
- Fontanari, L., Gonzalez, M., Vallortigara, G., & Girotto, V. (2014). Probabilistic cognition in two indigenous Mayan groups. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 111*(48), 17075–17080.
- Kayhan, E., Gredebaeck, G., & Lindskog, M. (2018). Infants distinguish between Two events based on their relative likelihood. *Child Development, 89*(6), E507–E519.
- Kushnir, T., Xu, F., & Wellman, H. M. (2010). Young children use statistical Sampling to infer the preferences of other people. *Psychological Science, 21*(8), 1134–1140.
- Leahy, B. P. (2023). Don't you see the possibilities? Young preschoolers may lack possibility concepts. *Developmental Science, 26*, e13400.
- Leahy, B. P., & Carey, S. E. (2020). The acquisition of modal concepts. *Trends in Cognitive Sciences, 24*(1), 65–78.
- Leahy, B., Huemer, M., Steele, M., Alderete, S., & Carey, S. (2022). Minimal representations of possibility at age 3. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 119*(52), e2207499119.
- Liu, S., Su, Y., Suo, D., & Zhao, J. (2024). Heuristic strategy of intuitive statistical inferences in 7- to 10-year-old children. *Journal of Experimental Child Psychology, 242*, 105907.
- Ma, L., & Xu, F. (2013). Preverbal infants infer intentional agents from the perception of regularity. *Developmental Psychology, 49*(7), 1330–1337.
- Ma, L., & Xu, F. (2011). Young children's use of statistical sampling evidence to infer the subjectivity of preferences. *Cognition, 120*(3), 403–411.
- Mody, S., & Carey, S. (2016). The emergence of reasoning by the disjunctive syllogism in early childhood. *Cognition, 154*, 40–48.
- O'Grady, S., & Xu, F. (2020). The development of nonsymbolic probability judgments in children. *Child Development, 91*(3), 784–798.
- Qu, C., Clarke, S., Luzzi, F., & Brannon, E. (2024). Rational number representation by the approximate number system. *Cognition, 250*, 105839.
- Rakoczy, H., Cluever, A., Saucke, L., Stoffregen, N., Graebener, A., Migura, J., & Call, J. (2014). Apes are intuitive statisticians. *Cognition, 131*(1), 60–68.
- Redshaw, J., & Suddendorf, T. (2016). Children's and apes' preparatory responses to two mutually exclusive possibilities. *Current Biology, 26*(13), 1758–1762.
- Shultz, T. R., & Nohandegani, A. S. (2021). A computational model of infant learning and reasoning with probabilities. *Psychological Review, 129*(6), 1281–1295.
- Sim, Z. L., & Xu, F. (2017). Infants preferentially approach and explore the unexpected. *British Journal of Developmental Psychology, 35*(4), 596–608.
- Stahl, A. E., & Feigenson, S. (2024). Young children distinguish the impossible from the merely improbable. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 121*(46), e2411297121.
- Szkudlarek, E., & Brannon, E. M. (2021). First and second graders successfully reason about ratios with both dot arrays and Arabic numerals. *Child Development, 92*(3), 1011–1027.
- Teewyn, E. C., Denison, S., Messer, E. J. E., & Buchsbaum, D. (2017). Intuitive probabilistic inference in capuchin monkeys. *Animal Cognition, 20*(2), 243–256.
- Téglás, E., Girotto, V., Gonzalez, M., & Bonatti, L. L. (2007). Intuitions of probabilities shape expectations about the future at 12 months and beyond. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 104*(48), 19156–19159.
- Téglás, E., Ibanez-Lillo, A., Costa, A., & Bonatti, L. L. (2015). Numerical representations and intuitions of probabilities at 12 months. *Developmental Science, 18*(2), 183–193.
- Téglás, E., Vul, E., Girotto, V., Gonzalez, M., Tenenbaum, J. B., & Bonatti, L. L. (2011). Pure reasoning in 12-month-old infants as probabilistic inference. *Science, 332*(6033), 1054–1059.
- Turan-Kucuk, E. N., & Kibbe, M. M. (2024). Three-year-olds' ability to plan for mutually exclusive future possibilities is limited primarily by their representations of possible plans, not possible events. *Cognition, 244*, 105712.
- Turan-Kucuk, E. N., & Kibbe, M. M. (2025). Three- and four-year-old children represent mutually exclusive possible identities. *Journal of Experimental Child Psychology, 249*, 106078.
- Wellman, H. M., Kushnir, T., Xu, F., & Brink, K. A. (2016). Infants use statistical sampling to understand the psychological world. *Infancy, 21*(5), 668–676.
- Xu, F., & Denison, S. (2009). Statistical inference and sensitivity to sampling in 11-month-old infants. *Cognition, 112*(1), 97–104.
- Xu, F., & Garcia, V. (2008). Intuitive statistics by 8-month-old infants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 105*(13), 5012–5015.
- Xu, F., & Tenenbaum, J. B. (2007). Sensitivity to sampling in Bayesian word learning. *Developmental Science, 10*(3), 288–297.

# Understanding the Uncertainties: The Cognitive Developmental Mechanisms of Children's Probabilistic Representation

*Liu Siyi<sup>1</sup>, Su Yanjie<sup>1</sup>*

(School of Psychological and Cognitive Sciences, Beijing Key Laboratory of Behavior and Mental Health,  
Key Laboratory of Machine Perception (Ministry of Education), Peking University, Beijing, 100871)

**Abstract** Probabilistic representation refers to the ability to perceive, judge, and infer about uncertainties. Human infants, children, and several nonhuman animals, such as great apes, monkeys, and birds, are sensitive to probabilistic information, as well as capable of making probabilistic judgments and inferences, even learning based on probabilities, suggesting inter-species consistency of probabilistic representation. Also, human and nonhuman animals are capable of integrating different-domain information into probabilistic representation, such as spatio-temporal information, physical constraints, and mental states, suggesting domain-generality of probabilistic representation. Domain-generality and inter-species consistency indicate that probabilistic representation is of great importance for organisms' survival and reproduction. However, how human represent probabilities remains controversial for a long time. Understanding what cognitive mechanisms underlie probabilistic representation and how children acquire the ability to represent probabilities would be of great importance for understanding how human learn and reason about the world, as probabilities must be the core information of the world in which human and animals live.

Existing empirical research mostly used two paradigms to examine probabilistic representation, violation of expectation (VoE) and two-alternative forced-choice (2AFC) task. Violation of expectation paradigm was mostly applied to infant and nonhuman animal studies, as infants and nonhuman animals were not able to give meaningful verbal responses. Two-alternative forced-choice paradigm was mostly applied to child and nonhuman animal studies. Compared with two-alternative forced-choice paradigm, violation of expectation paradigm could only indicate infants' sensitivity to probabilities, as it always showed all the information to capture infants' visual attention patterns toward expected and unexpected consequences, instead of making infants choose uncertain choices based on their predictions.

Researchers have examined human and nonhuman animals' probabilistic representation by the two paradigms mentioned above, and have discussed how human and nonhuman animals represent probabilities from different theoretical perspectives. Two theoretical explanations have been proposed to construct the cognitive developmental mechanisms of probabilistic representation, numerical processing, and logic inferences. On the one hand, theoretical perspective based on numerical processing, or intuitive statistics, suggests that we represent probabilities based on numerical information, such as the proportions. Some research indeed showed that children and nonhuman animals exhibited similar characteristics to numerical processing in probabilistic representations, and numerical representation acuity was positively correlated with performances of probabilistic representation. Children showed increasingly better abilities to represent probabilities based on numerical information with age. On the other hand, according to the theoretical perspective based on logic inferences, we represent probabilities by enumeration of all the possible and exclusive consequences, which was referred to as modal concept or modal logic. However, some researchers argued that we were not born with the ability to represent probabilities with modal logic. Instead, they proposed that infants and toddlers represented probabilities by simulating a random consequence from all the possible consequences till age three, whereas older children and adults represent probabilities by enumerating all the consequences, or modal logic.

Combined with the empirical evidence and existing theoretical explanations, we expound the theoretical explanations for the cognitive developmental mechanisms of probabilistic representation, including different perspectives from numerical processing and logical inferences. This article proposed an integrative hypothesis of probabilistic representation, and suggested the possible directions for future research. Additionally, the two aforementioned proposals may not be exclusive to each other. Each explanation focused on one aspect of probability representation. Therefore, we proposed the integrated theory to construct the cognitive developmental mechanism of probability representation. Logic inferences, or modal logic, allows us to understand that all the possible consequences might happen and they are exclusive. Meanwhile, numerical processing helps us estimate the numerical information of probabilities. In general, both modal logic and numerical processing underly human's probabilistic representation. Future research could focus on explore the integrated cognitive developmental mechanism of probability representation and apply different approaches in this field.

**Key words** probabilistic representation, cognitive development, numerical processing, logic inferences, integrated hypothesis