

## 小鼠对不同拓扑性质图形的识别\*

朱 静<sup>\*,\*\*\*</sup> 郭兴焱<sup>\*\*</sup> 马 园 任 菲

(西南林学院保护生物学学院, 昆明 650224)

**摘要** 视觉感知的一系列研究都支持大范围拓扑感知的理论. 拓扑性质作为整体性质, 是视觉感知的基础. 视觉对图形拓扑特征差异的感知要优先于对局部特征差异的感知. 采用 Y 迷宫研究了小鼠对不同拓扑性质图形的识别. 训练小鼠学习识别圆环和实心矩形这一对拓扑性质不同的图形, 之后用拓扑特征相同或不同的其他图形测试小鼠, 这些图形包括空心矩形、实心圆、缺口的圆环、缺口的空心矩形. 实验结果表明, 学会识别圆环(奖励)和实心矩形(无奖励)的小鼠无法区分实心圆和实心矩形以及圆环和空心矩形, 但是能够分别从缺口圆环、缺口的空心矩形、实心圆与空心矩形组成的图形对中识别出空心矩形. 因此证实了小鼠的视觉系统能够感知拓扑特征的差异并且具有对拓扑性质的概括能力. 结果为拓扑知觉对视觉系统来说是基本的这一假设提供了证据.

**关键词** 小鼠, 拓扑知觉理论, Y 迷宫

**学科分类号** B842.1

**DOI:** 10.3724/SP.J.1206.2009.00698

在视觉感知的研究中, 视觉从哪里开始是一个最基本的问题. 对这一问题的回答是理解大脑视觉信息加工机制的基础. 关于视觉感知的所有理论都可以分为两个流派: “从局部到整体”和从“整体到局部”<sup>[1]</sup>. 1980 年 Treisman 等<sup>[2]</sup>提出了视觉的特征整合理论(feature integration theory), 认为知觉系统首先加工局部特征, 然后加工整体特征. 视觉早期只能自动地检测物体独立的特征, 包括颜色、尺寸、方向等, 这些特征被独立地并行加工. 到了特征整合阶段, 知觉系统通过注意, 把彼此分开的特征整合为一个单一的物体. 这种关于视觉过程从局部性质到整体的思想很长时期内在视觉的研究中占主导地位.

1982 年, 我国学者陈霖提出了一个截然相反的观点: 在视觉的早期阶段, 视觉系统检测的是物体的整体特征, 而不是局部特征. 认为人类视知觉过程是从大范围拓扑性质开始的. 在视觉处理的早期阶段, 人的视觉系统首先检测图形的拓扑性质, 拓扑性质知觉优先于局部特征性质的知觉<sup>[3]</sup>.

近年的研究为拓扑知觉理论提供了一些支持, 表明拓扑性知觉在昆虫和人的视觉中都存在<sup>[4-5]</sup>. 关于人类的拓扑性知觉, 目前已经做了大量的研

究. 有测试表明视知觉早期对拓扑结构知觉存在敏感性<sup>[1]</sup>. 有学者利用功能磁共振成像(fMRI)的方法, 发现颞叶皮层和拓扑差异相关<sup>[6]</sup>. 另一实验也证明了这一点, 即在对拓扑差异的偏侧性检验中, 发现颞叶皮层与拓扑差异有关, 而非初级视皮层<sup>[6]</sup>. 另外, 惯用右手的人左脑拓扑性质的知觉占优势. 采用 fMRI 的研究发现, 拓扑性质分辨使大脑左半球颞叶兴奋. 该研究也表明, 左半球拓扑性质知觉占优势、右半球局部几何性质知觉占优势<sup>[7]</sup>. 在其他动物身上也找到了支持拓扑性知觉理论的证据. 例如蜜蜂就能识别出拓扑性质不同的图形, 如空心菱形和十字、圆环和实心圆等<sup>[8]</sup>.

陈霖认为除了人类和蜜蜂外, 在生物进化链中, 分辨拓扑性质的能力应当是各种生物视觉系统具有的共同功能<sup>[4]</sup>. 既然拓扑不变性在昆虫和人的视觉感知中都存在, 是否在啮齿类动物中也存在

\* 云南省重点建设学科野生动植物保护与利用资助项目(XKZ200904).

\*\* 共同第一作者.

\*\*\* 通讯联系人.

Tel: 0871-3864314, E-mail: zhuj@swfc.edu.cn

收稿日期: 2009-11-25, 接受日期: 2010-03-23

呢? 基于这个目的, 本研究希望通过小鼠的行为学测试, 让小鼠对拓扑性质相同或不同的图形进行识别, 以此探索作为啮齿动物的小鼠是否具有能识别大范围拓扑性质的能力, 从而为拓扑性知觉的理论提供相关的佐证.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验动物

昆明种成年小鼠, 雌雄各 20 只, 由昆明医学院动物养殖中心提供. 小鼠购买后在实验室内饲养一周进行实验, 饲养期间自由饮水和取食. 饲养环境为温度  $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 光周期  $L:D=12\text{ h}:12\text{ h}$ . 小鼠 5 只一组饲养于塑料饲养箱内, 雌雄分开

饲养, 并对小鼠进行标记编号. 小鼠雄性体重  $(38.50 \pm 3.46)\text{ g}$ , 雌性体重  $(29.79 \pm 2.34)\text{ g}$ . 在实验进行后控制小鼠饮食, 使体重保持在 80% 左右.

### 1.2 实验装置

实验装置采用 2 个相同材质和设计的“Y”型迷宫(图 1), 分别测试雄性和雌性小鼠. 迷宫由塑料板制成, 每通道夹角  $120^\circ$ , 通道尺寸为长 $\times$ 宽 $\times$ 高  $40\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ , 通道顶部和底部不封口. 每个图形印刷在一张  $4\text{ cm} \times 3.8\text{ cm}$  的纸片上, 纸片再粘贴在一张硬纸卡片上  $3.8\text{ cm} \times 11.1\text{ cm}$ , 硬纸卡片安置在距迷宫通道相交位置  $5\text{ cm}$  处, 使迷宫左右通道分别各呈现一个图形. 实验中保持迷宫左右通道的光线均匀(图 1).

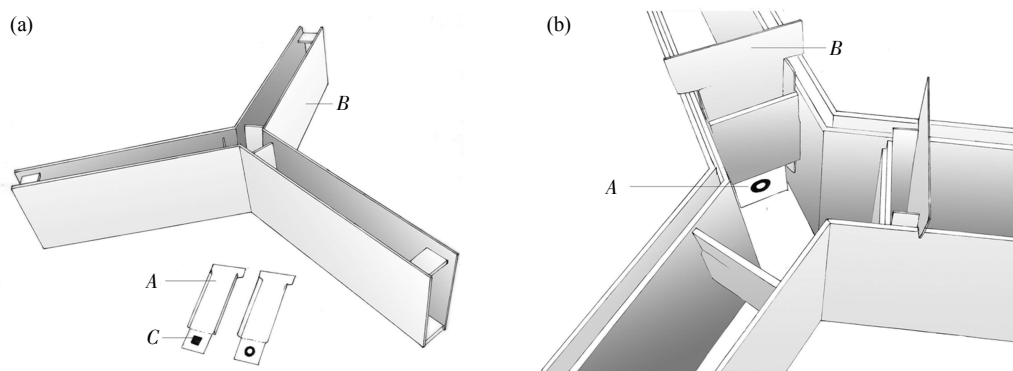


Fig. 1 The apparatus of topological pattern recognition in mice

(a) Y maze and paper door. A: The paper door; B: Y maze; C: Pattern. (b) A: Pattern; B: Paper door. The pattern was affixed on the bottom of paper door, then the paper door was fixed into the inner of channel.

### 1.3 图形刺激

将圆环(外径  $1.5\text{ cm}$ , 内径  $0.8\text{ cm}$ )和实心矩形(边长  $1.3\text{ cm}$ )作为一对图形用于训练. 圆环为正性刺激( $\text{CS}^+$ )给予奖励(小鼠日常食用的鼠粮, 每次约  $0.05 \sim 0.1\text{ g}$ ), 实心矩形为负性刺激( $\text{CS}^-$ )不给予奖励. 其余图形作为测试图形, 分别为实心圆(直径  $1.5\text{ cm}$ )和实心矩形(直径  $1.3\text{ cm}$ ), 圆环(外径  $1.5\text{ cm}$ , 内径  $0.8\text{ cm}$ )和空心矩形(外径  $1.3\text{ cm}$ , 内径  $0.8\text{ cm}$ ), 缺口圆环(外径  $1.5\text{ cm}$ , 内径  $0.8\text{ cm}$ , 缺口为  $1/4$  圆环并旋转  $45^\circ$ )和空心矩形, 缺口空心矩形(外径  $1.3\text{ cm}$ , 内径  $0.8\text{ cm}$ , 缺口  $0.6\text{ cm}$ )和空心矩形, 空心矩形和实心圆. 这些图形在小鼠对圆环和实心矩形学习达到 90% 的正确率后, 以较小的概率(约  $1/10$ )随机穿插测试, 也不给予奖励.

### 1.4 实验方法

实验安排在每日  $19:00 \sim 23:00$  之间进行. 实验开始前, 将小鼠逐一放入迷宫中, 让每只小鼠在迷宫中反复探索  $10\text{ min}$ , 以熟悉和适应环境. 这个期间训练小鼠学习穿越空白的纸门, 当所有小鼠均能穿越纸门后进行训练.

**1.4.1 训练.** 每次训练前将小鼠放入迷宫起始端自由探索  $1\text{ min}$ , 此时并无图形呈现. 为防止小鼠对图形所在的空间位置(左或右)产生学习, 图形的左右位置随机呈现, 随机顺序采用 Microsoft Excel 软件生成. 训练时将小鼠从通道的起始端放入迷宫, 小鼠穿过圆环( $\text{CS}^+$ )图形并进入所在的通道后, 在通道尽头给予食物奖励, 如果小鼠  $2\text{ min}$  内不进行选择或选择实心矩形( $\text{CS}^-$ )所在的通道, 将其取出

进行第二次训练. 每只小鼠每天连续进行 10 次. 当选择圆环的平均选择率达到 90% 后, 再巩固 6 天进行测试.

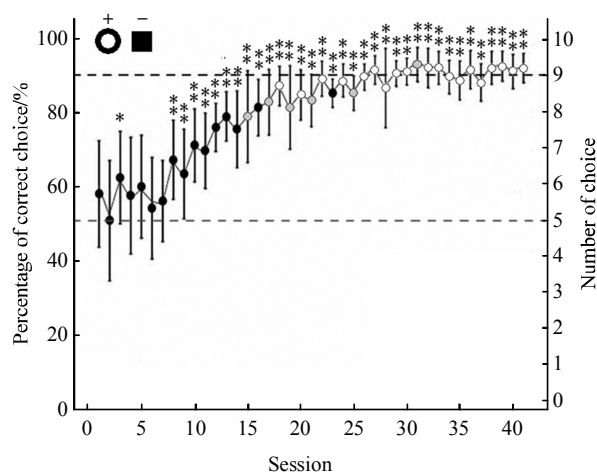
**1.4.2 测试.** 测试阶段小鼠对圆环和实心矩形的训练仍然进行, 只是在小鼠 10 次训练过程中再加入 1 次新图形的测试, 测试时不给予食物奖励, 每对测试图形一共测试 20 次. 每天每对图形测试 2 次.

### 1.3 数据处理

实验数据用 SPSS13.0 分析, 小鼠训练过程中对圆环的选择用( $\bar{x} \pm s$ )表示, 采用 *t*-test 检验每天训练的平均正确率与 50% 的随机水平, 以及 90% 的水平之间的差异. 测试图形的选择次数采用  $\chi^2$  检验进行比较.

## 2 结 果

小鼠在第 1 至 7 轮训练期间, 对圆环学习的正确率与 50% 的随机水平相比差异不显著(*t*-test,  $P > 0.05$ , 1~7 轮), 而第 1 至 14 轮, 对圆环学习的正确率与 90% 相比, 差异极显著(*t*-test,  $P < 0.01$ , 1~14 轮). 训练的第 26 轮至 41 轮, 小鼠对圆环学习的正确率在 90% 上下波动, 与 90% 相比差异不显著(*t*-test,  $P < 0.01$ , 26~41 轮), 从第 8 轮至第 41 轮, 小鼠对圆环的选择率与 50% 相比差异极显著(*t*-test,  $P < 0.01$ , 8~41 轮)(图 2). 结果表明小鼠通过训练能学会区分圆环和实心矩形.

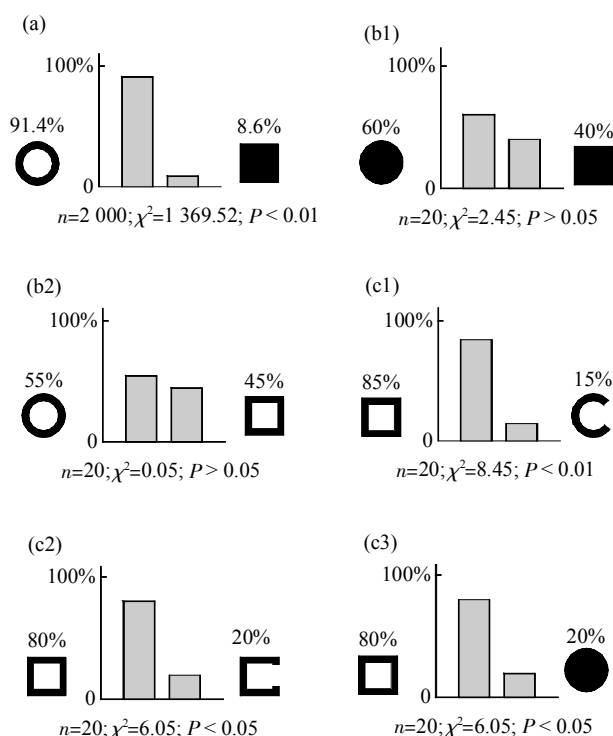


**Fig. 2 Learning curves for positive stimuli of ring and negative stimuli of square**

Mice were trained to distinguish between a ring and a square during the training session. The *x*-coordinate shows that the session of training. The *y*-coordinate (left) shows that the percentage of correct choice (ring) in 20 mice. The *y*-coordinate (right) shows that the number of correct choice (ring). ●  $P < 0.01$ , ○  $P < 0.05$ , □  $P > 0.05$ , compared with 90% level; \*\*  $P < 0.01$ , \*  $P < 0.05$ , compared with 50% level.

而从小鼠测试期间的训练来看(32~41 轮), 对圆环的选择率与 50% 的随机水平相比差异极显著(*t*-test,  $P < 0.01$ , 32~41 轮), 而与 90% 的水平相比, 差异不显著(*t*-test,  $P > 0.05$ , 32~41 轮, 图 2).

实心矩形和实心圆以及空心矩形和圆环(图 3b1, b2), 这两对图形的拓扑特征相同, 而几何特征不同. 随机穿插测试表明, 小鼠不能分辨出这两对图形(b1:  $\chi^2=2.45$ ,  $P > 0.05$ ; b2:  $\chi^2=0.05$ ,  $P > 0.05$ ). 空心矩形和有缺口的圆环、空心矩形和实心圆、空心矩形和有缺口的空心矩形这三对图形, 它们的拓扑性质不同, 其中空心矩形和有缺口的圆环(图 3c1)、空心矩形和实心圆(图 3c3)的拓扑性质和几何性质都不同, 空心矩形和有缺口的空心矩形(图 3c2)的拓扑性质不同, 但几何性质相似. 小鼠均能分别区分出中心有“洞”的图形(c1:  $\chi^2=8.45$ ,  $P < 0.01$ , c2:  $\chi^2=6.05$ ,  $P < 0.05$ , c3:  $\chi^2=6.05$ ,  $P < 0.05$ ). 以上结果表明小鼠优先选择拓扑特征相同的图形, 而几何特征之间的差异相对不重要.



**Fig. 3 Six pair of stimuli and the result of percentages of choices in favor of the positive stimulus and negative stimuli**

(a) Training stimulus pair. (b) Testing stimulus pairs each being topologically equivalent. (c) Testing stimulus pairs each being topologically different. Data were compared with random-choice behavior and Chi-square ( $\chi^2$ ) and *P* values were shown.

### 3 讨 论

拓扑知觉理论认为图形的几何性质差异属于局部性质的差异,而图形的连通性差异属于拓扑性质的差异<sup>[1]</sup>。图3中实心圆和实心矩形(图3b1),圆环和空心矩形(图3b2),这两对图形的连通性是相同的,即拓扑性质相同,而几何性质不同。图3中空心矩形和缺口圆环、空心矩形和缺口空心矩形、空心矩形和实心圆这三对图形的连通性是不同的,即拓扑性质不同。

陈霖(2003年)等先前训练蜜蜂学习识别“圆环”和“S”这两个图形后,再让蜜蜂去识别其他拓扑性质不同的图形,蜜蜂都能识别出测试图形的拓扑差异<sup>[4]</sup>。而对拓扑性质相同但几何性质不同的图形,蜜蜂却无法分辨。从小鼠对这些图形的选择结果来看,小鼠无法区分实心矩形和实心圆、空心矩形和圆环这两对图形,因为这两对图形的拓扑性质相同,而能区分空心矩形和缺口圆环、空心矩形和缺口空心矩形、空心矩形和实心圆,即小鼠明显选择中间有“洞”的图形,即空心矩形或圆环。因为这三对图形中每一对图形的拓扑性质是不同的。从这一点可认为,小鼠对图形的拓扑特征相对于几何特征更敏感。因而能辨别拓扑性质上的差异,对拓扑性质比几何性质更具有敏感性这一结论在蜜蜂实验和本实验中都得到体现。我们有理由推测拓扑知觉对所有视觉系统来说都是基本的<sup>[7]</sup>。

拓扑知觉理论认为光通量、图形的周长和空间频率等特征为局部特征,而有“洞”还是没有“洞”的特征表现为拓扑的差异<sup>[4]</sup>。本实验认为小鼠可能不是通过光通量这一局部性质的差异来区分圆环和实心矩形这两个图形。如果说小鼠是根据圆环比实心矩形具有更小的光通量这一局部特征来识别,第一,小鼠在测试中就可能选择比空心矩形的光通量还小的缺口圆环以及缺口的空心矩形,然而结果正好相反,小鼠对空心矩形的选择显著高于缺口圆环和缺口空心矩形,第二,圆环和空心矩形也具有光通量的差异,然而小鼠却无法区分。因此,一定范围内的光通量差异也许不会对小鼠区分两个图形的能力产生影响。光通量的差异按照陈霖的拓扑知觉理论属于“局部性质”,局部性质的变化应该不会影响对拓扑性质差异的知觉。因为视觉系统对大范围的拓扑性质敏感,而对局部性质相对不敏感<sup>[7]</sup>。

另外,蜜蜂对圆环和“S”图形的训练,在初期就已经很快与随机水平(50%)有显著差异<sup>[4]</sup>。而本实验小鼠则需要一个较长时间的训练。分析认为在训练初期(1、3、4、5轮),小鼠的正确率已有提高的迹象(图2),对圆环的学习与随机水平(50%)相比正确率较高,表明小鼠能较快学习圆环图形,但存在不稳定的现象。小鼠是否能分辨拓扑性质不同的图形,只能通过行为学的方法,将有“洞”的图形和奖励联系起来,通过穿越迷宫来表达小鼠分辨“洞”与非“洞”的图形,为了排除偶然因素和正确率的波动,因此需要进行多次训练以反映小鼠对拓扑图形的认知能力。这个结果虽不如蜜蜂实验的报道能证实拓扑视觉是天生的,但与蜜蜂实验的结果并不矛盾。小鼠的视觉和其他物种相比不具备优势<sup>[8]</sup>,并且需要长时间的强化训练,达到90%的正确率,才能保证小鼠能区分圆环和实心矩形,并在测试中概括出“洞”这一拓扑特征。而蜜蜂能很快通过行为来区分“洞”与非“洞”的图形,可能是因为蜜蜂有很强的学习能力和分辨图形的能力<sup>[9-10]</sup>。通过我们的实验结果证实了一个假设,即如果拓扑性质的确是视知觉的基本单元,那么在生物进化链中,分辨拓扑性质的能力应当是各种动物视觉系统具有的共同功能<sup>[4]</sup>。

本研究的结果表明作为啮齿类的小鼠存在拓扑性知觉,为大范围拓扑知觉理论这一开创性的贡献提供一重要佐证。为什么视觉系统需要对“洞”如此敏感,现在还不清楚。另一方面,现在还不确定是否所有的拓扑知觉都是源自于对“洞”的敏感,这一点也需要今后的研究来回答。

**致谢** 本论文的研究得到了中国科学院昆明动物研究所马原野研究员和胡新天研究员的指导,在此表示诚挚的谢意!

### 参 考 文 献

- [1] Chen L. The topological approach to perceptual organization. *Visual Cognition*, 2005, **12**(4): 553-701
- [2] Treisman A M, Gelade G. A feature-integration theory of attention. *Cognition Psychology*, 1980, **12**(1): 97-136
- [3] Chen L. Topological structure in visual perception. *Science*, 1982, **218**(4573): 699-700
- [4] Chen L, Zhang S W, Srinivasan M. Global perception in small brain: Topological pattern recognition in honeybees. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2003, **100**(11): 6884-6889
- [5] Zhuo Y, Zhou T G, Rao H Y, *et al.* Contributions of the visual ventral pathway to long-range apparent motion. *Science*, 2003,

- 299(5605): 417-420
- [6] Wang B, Zhou T G, Zhuo Y, *et al.* Global topological dominance in the left hemisphere. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2007, **104** (52): 21014-21019
- [7] 朱 滢. 陈霖的拓扑性质知觉理论. *心理科学*, 2005, **28**(5): 1031-1034
- Zhu Y. *Psychology Science*, 2005, **28**(5): 1031-1034
- [8] Pinto L H, Enroth-Cugell C. Tests of the mouse visual system. *Mammalian Genome*, 2000, **11**(7): 531-536
- [9] Zhang S W, Baresch K, Srinivasan M V. Maze learning by Honeybees. *Neurobiology of Learning and Memory*, 1996, **66**(3): 267-282
- [10] Zhang S W, Srinivasan M V. Prior experience enhances pattern discrimination in insect vision. *Nature*, 1994, **368**: 330-332

## Different Topological Properties Pattern Recognition in Mice\*

ZHU Jing<sup>\*\*\*</sup>, GUO Xing-Yan<sup>\*\*</sup>, MA Yuan, REN-Fei

(*Faculty of Conservation Biology, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China*)

**Abstract** The theory of topological visual perception was proposed in previous studies. According to this theory, topological properties, as a global properties, is the primitive of visual perception, and figures with topological differences could be discriminated easier than figures with local feature differences. The different topological properties pattern recognition was investigated in mice by using a modified Y-maze. Two stimuli of topological different features were used to train mice to distinguish between ring and square. Besides, a ring and a square, the other stimulus which topologically features different or same carried as test. These stimulus patterns include a hollow square, a disk, a ring with a gap and a hollow square with a gap. The results showed that the mice trained to discriminate the ring (the reward pattern) from the square (the not reward pattern) were unable to distinguish between the disk and the square as well as the ring and the hollow square, but were able to discriminate the hollow square from the ring with a gap, the hollow square with a gap or the disk, respectively. The data suggest that visual system in mice may be sensitive to topological distinction and extract the topological properties to transfer. Moreover, these findings provide a new evidence for the hypothesis that topological perception is a fundamental property of vision.

**Key words** mice, theory of topological perception, Y maze

**DOI:** 10.3724/SP.J.1206.2009.00698

---

\*This work was supported by a grant from The Wildlife Protection and Utilization of Yunnan Key Subject(XKZ200904).

\*\*These authors contributed equally to this work.

\*\*\*Corresponding author.

Tel: 86-871-3864314, E-mail: zhuj@swfc.edu.cn

Received: November 25, 2009 Accepted: March 23, 2010