

# 三维图形的视空间工作记忆容量研究\*

吴文春<sup>1</sup>, 徐学<sup>1</sup>, 郑允佳<sup>2</sup>

(1. 韩山师范学院教育科学学院, 潮州 521041; 2. 广东金融学院应用心理学系, 广州 510521)

**摘要:**采用三维几何图形为材料, 通过单探测变化觉察范式来测定视觉工作记忆的存储容量, 并比较客体工作记忆和空间工作记忆容量的差异。实验 1、2 的材料分别为由颜色和形状两个基本特征组成的三维图形和由一个基本特征和一个细节特征组成的三维图形。两个实验结果显示, 被试能在视觉工作记忆中存储约 2–3 个客体和 4 个空间位置, 空间工作记忆容量显著大于客体工作记忆容量。进一步的比较发现, 被试对由两个基本特征组成的三维图形的存储容量大于由一个基本特征和一个细节特征组成的三维图形。这表明, 组成三维图形的特征类型对视空间工作记忆的存储容量有显著影响。

**关键词:**视觉工作记忆; 容量; 客体; 空间; 三维图形

**中图分类号:** B842.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1003–5184(2018)03–0215–06

## 1 引言

视觉工作记忆 (visual working memory) 容量是近二十年来工作记忆领域的研究焦点。Luck 和 Vogel (1997) 首先采用变化觉察范式 (change detection paradigm) 对视觉工作记忆的容量进行考察。实验的基本程序是, 首先给被试快速呈现一组由若干个客体 (如颜色框) 组成的样本刺激, 900ms 空屏间隔之后呈现检测刺激, 要求被试判断检测刺激中的客体与样本刺激中的客体是否发生变化。结果表明, 被试能在视觉工作记忆中保存约 4 个单特征或多特征客体 (如单颜色块、双色嵌套方块或颜色–朝向结合的线段)。进一步的实验发现, 视觉工作记忆的容量只受样本刺激的客体数量影响, 而与客体中所包含的特征数目无关 (Vogel, Woodman, & Luck, 2001)。

对于视觉工作记忆容量约为 4 个客体这一结论, 多数研究结果与其基本一致。Trick 和 Pylyshyn (1993) 采用追踪任务进行实验, 结果发现, 被试能够将 4 个项目同时置于注意范围之内进行加工, 当项目数量超过 4 个时, 计数过程中就需要转换注意, 进行序列加工; “多目标追踪” 范式的结果也显示, 被试只能同时追踪 4 个圆点。沈模卫等人也采用客体追踪范式对动态情境下视觉客体信息的存储容量进行测定, 结果表明客体运动速度的工作记忆

容量约为 3 个 (沈模卫, 李鹏, 郎学明, 陈硕, 2007)。最近, 吴文春和孙悦亮 (2013) 采用单探测变化觉察范式, 考察了单特征图形的客体和空间工作记忆容量, 结果发现, 被试在视觉工作记忆中能存储 3~4 个客体信息和 4~5 个空间位置, 空间工作记忆容量大于客体工作记忆容量; 采用二维双特征图形为识记材料的实验结果也显示空间工作记忆容量大于客体工作记忆容量, 但与单特征图形相比容量值偏小, 为 2~3 个项目和 3~4 个空间位置 (吴文春, 2013)。

不过, 对于容量的影响因素, 多数研究得出的结果与其并不一致。Olson 和 Jiang (2002) 在其实验中同样采用双色嵌套方块和单色块 (分为大空心单色块和小单色块) 作为刺激材料, 结果发现, 在客体数量相同的情况下, 被试对记忆双色嵌套方块的正确率要显著低于单色方块, 即同一维度内特征数量的增多会导致所能存储的项目数量的减少; 研究还发现, 当特征数量相同时, 提高特征种类的异质性会提高记忆准确率, 如记忆三条颜色–朝向线段的记忆成绩优于记忆六个颜色 (或朝向)。Wheeler 和 Treisman (2002) 也得出与 Olson 等 (2002) 一致的结果。为此, 他们认为, 记忆容量受制于客体数量和客体所含特征数量两个因素, 当客体在同一种类特征上具有不同值时, 记忆容量取决于特征值的数量而非客

\* 基金项目: 广东省哲学社会科学“十二五”规划项目 (GD14XXL03), 韩山师范学院文科技持项目 (WF201403), 广东省教育科研“十二五”规划 2012 年度项目 (2012JK057)。

通讯作者: 徐学, E-mail: 39218325@qq.com。

体数量。此外, Xu (2002) 还发现, 同一客体内部各特征间的绑定关系影响记忆成绩, 当要求被试记忆由多个部分构成的客体时, 需记忆的特征整合于客体同一部分的记忆成绩比其分布于客体不同部分更好, 同时也表明视觉工作记忆容量受客体特征的结合形式所影响。Alvarez 和 Cavanagh (2004) 的研究发现, 视觉工作记忆容量受客体的信息负荷影响, 记忆容量随客体在知觉编码阶段加工难度的增大而减小。Eng, Chen 和 Jiang (2005) 采用简单和复杂刺激为实验材料考察其对视觉工作记忆容量的影响, 结果显示, 被试对于简单特征的刺激(颜色方块、字母)的存储容量要大于复杂特征的刺激(立方体、面孔)。沈模卫等(沈模卫, 徐青, 高在峰, 余喻, 尹军, 孙忠强, 水仁德, 2009)以对侧延迟活动(contralateral delay activity, CDA)的幅值为脑电指标, 对视觉工作记忆中可存储的客体数目进行探讨, 结果也证实视觉工作记忆的容量受客体复杂度所影响。最近, Brady 和 Alvarez (2015) 的研究还表明, 刺激呈现方式也会影响视觉工作记忆容量, 空间集合表征(Spatial ensemble representations)可提高被试对复杂客体的工作记忆容量。

综上所述, 尽管不少研究表明视觉工作记忆的容量为 3~4 个项目, 但它并不是一个恒定的数值, 其大小受识记阶段的刺激数量、刺激所含的特征数量、特征间的绑定关系及复杂程度等多种因素所制约。且已有研究基本上采用单维度特征或两维度特征组成的平面图形为材料, 而生活中我们看到的大多是立体事物。立体事物与平面事物有着不同的形态, 立体事物具有体积感和纵深感, 其三维效果较之平面图形具有更强烈的视觉冲击力和视觉感受, 还具有更多的视觉感知细节(陈妍, 2012)。本研究者认为采用三维立体图形作为刺激材料来考察视觉工作记忆的容量, 将使实验结果更具普遍性并提高其外部效度。为此, 本研究将采用三维几何图形为材料, 测定视觉工作记忆的存储容量, 并比较客体工作记忆和空间工作记忆容量的差异。实验一考察由两种基本特征组成的三维图形的客体和空间工作记忆容量; 实验二考察由一种基本特征和一种细节特征组成的三维图形的客体和空间工作记忆容量。

## 2 实验 1 两基本特征组成的三维图形的客体和空间工作记忆容量

### 2.1 方法

#### 2.1.1 被试

28 名韩山师范学院本科生(男 10 名, 女 18 名)自愿参加实验, 年龄在 19~23 岁之间, 平均 20.66 岁。他们的视力或矫正视力正常, 无色盲和色弱。实验完成后获得小礼品一份。

#### 2.1.2 仪器与材料

实验刺激在 17 英寸电脑显示器上呈现。屏幕背景色为白色。被试眼睛距离屏幕约 60cm。实验程序用 E-prime 1.1 编制。实验材料为由不同形状和颜色组成的规则立体图形, 采用专业 3-D 制图软件 Sketchup(中文名: 草图大师)8.0 版本制作。8 种备选形状为: 立方体、四棱柱、四棱台、圆柱、三棱锥、六棱柱、圆锥体。7 种备选颜色为: 红色( $R = 241, G = 19, B = 0$ ); 绿色( $R = 37, G = 241, B = 0$ ); 蓝色( $R = 0, G = 121, B = 241$ ); 黄色( $R = 241, G = 219, B = 0$ ); 青色( $R = 0, G = 221, B = 224$ ); 紫色( $R = 219, G = 0, B = 241$ ); 褐色( $R = 167, G = 107, B = 73$ )。在同一组记忆项中, 每个图形的颜色和形状不重复出现。每个图形的视角约为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。

#### 2.1.3 实验设计

采用 3(识记项目数: 3、4、6 个)  $\times$  2(任务类型: 客体工作记忆任务、空间工作记忆任务)两因素被试内实验设计。其中, 客体工作记忆任务包含颜色变化、形状变化、颜色-形状交换变化三种检测变化方式, 空间工作记忆任务只包含位置变化检测方式。在识记项目阶段, 两种任务的刺激图形相同, 但实验指导语不同, 且其出现顺序随机。样本刺激系列由 3 个、4 个或 6 个互不相同的三维图形组成, 它们随机出现在屏幕上  $3 \times 4$  矩阵中的几个隐形方格中(吴文春, 2013)。每个方格的大小与刺激图形相同, 相邻方格的距离不少于  $1.8^\circ$ (边框到边框计算)。检测项目只呈现一个图形, 其大小均不变。在客体工作记忆任务试验中, 其位置固定在屏幕的中央, 其颜色、形状或形状-颜色的结合方式可能发生改变, 变化的概率为各处理条件下试验次数的 50%。在颜色变化条件下, 检测项目的形状与识记项中的一个图形相同, 颜色改变为识记阶段未出现的一种; 在形状变化条件下, 检测项目的颜色与识记项中的一个图形相同, 形状改变为识记阶段未出现的一种; 在特征交换条件下, 检测项目由识记项中分属于两个不同刺激图形的颜色和形状组成。在空间工作记忆任务试验中, 检测项目的形状、颜色均不变, 只是其呈现位置有 50% 的概率发生改变(吴文春, 2013)。当位置发生改变时, 检测项目将随机呈

现在识记项目阶段未出现过图形的某一方格中。因变量为被试对检测项目的检测正确率。

实验包含客体工作记忆任务和空间工作记忆任务2个区组,前者共有216个正式实验试次(trial)和18个练习试次,后者有72个正式试次和6个练习试次。对2个区组的实验顺序进行平衡,各区组条件下的试次随机呈现。正式实验之前先进行练习实验,直至被试熟悉实验程序并完全理解实验要求。完成整个实验约需35分钟。

#### 2.1.4 实验程序

实验在单被试实验室内进行。具体流程与吴文春(2013)的研究基本相同,如图1。首先在屏幕中心出现红色注视点“+”1000毫秒(ms)。紧接着屏幕上出现4个互不相同的阿拉伯数字1000ms,要求被试用正常语速对其进行连续出声复述,直至检测项目出现,目的是排除言语复述的参与。间隔500ms后样本刺激出现,时间为500ms。在客体记忆任务中要求被试努力记住每个图形的形状和颜色,而在空间记忆任务中则记住其空间位置。间隔900ms后出现一个检测项目,直至被试做出反应;此时,要求被试尽量准确地判断:检测项目相对于记忆项目中的图形是否发生改变,如未改变按“F”键,反之按“J”键。对于客体工作记忆任务,要求被试判断检测图形的形状和颜色是否与样本刺激中的某个图形完全相同;对于空间工作记忆任务,要求被试判断检测图形的位置是否发生改变。

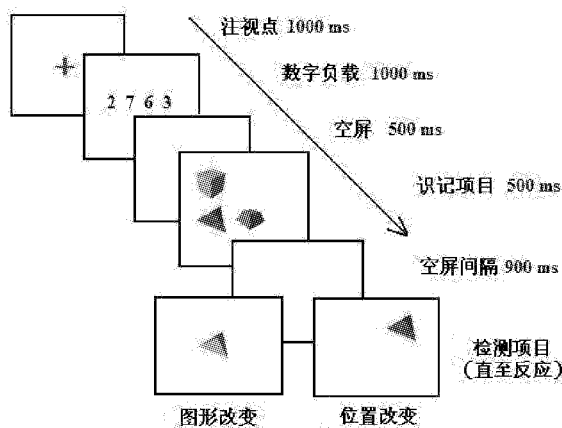


图1 单次试验流程图

#### 2.2 结果与分析

采用SPSS16.0软件对28名被试数据进行统计分析,被试在各实验条件下的检测正确率和标准差如图2所示。

3×2两因素被试内方差分析显示,识记项目数的主效应显著, $F(2,54) = 74.59, p < 0.001, \eta^2 =$

0.73,客体和空间工作记忆检测正确率均随识记项目数的增加而显著下降;任务类型的主效应显著, $F(1,27) = 179.97, p < 0.001, \eta^2 = 0.87$ ,空间工作记忆的正确率显著高于客体工作记忆;识记项目数与任务类型的交互作用也显著, $F(2,54) = 5.92, p < 0.01, \eta^2 = 0.18$ 。

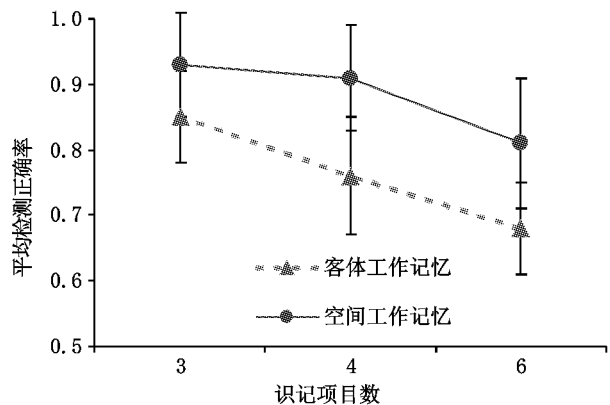


图2 实验1各条件下被试的平均正确率

采用Pashler(1988)提出的公式对客体工作记忆和空间工作记忆的容量进行测定,计算公式为: $k = S \times [(H - F) \div (1 - F)]$ 。其中,k为存储容量,S为呈现的刺激数目,H为击中率,F为虚报率。以该公式对每位被试在各记忆数目条件下的记忆容量进行估计,并计算其平均记忆容量。其结果如图3。

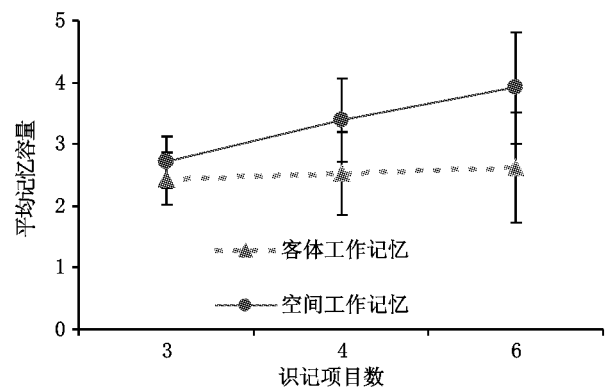


图3 实验1不同条件下被试的平均工作记忆容量

由于该公式对客体呈现数目有一定的限制,即只在其超过存储容量时该公式才有效,否则会造成对工作记忆容量的低估。实验结果表明,当记忆项目数为6个时,客体工作记忆的存储容量为2.62个客体,空间工作记忆的存储容量为3.91个位置。

对记忆项目数为3、4、6个时的客体和空间工作记忆的容量分别进行相关样本t检验,结果显示,空间工作记忆的容量均显著大于客体工作记忆的容量( $t(27) = 4.27, t(27) = 7.68, t(27) = 6.38, ps < 0.001$ )。

### 3 实验2 基本特征和细节特征组成的三维图形的客体 and 空间工作记忆容量

#### 3.1 方法

##### 3.1.1 被试

26 名韩山师范学院本科生(男 8 名,女 18 名)自愿参加实验,年龄在 19~22 岁之间,平均年龄 20.54 岁;视力或矫正视力正常,无色盲和色弱。实验完成后获得小礼品一份。

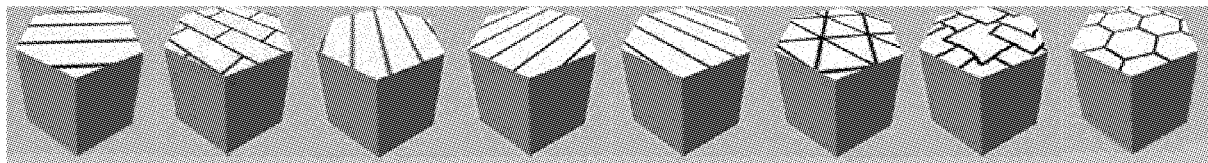


图4 实验2中采用的8种顶部图案举例

##### 3.1.3 实验设计与程序

Alvarez 等(2004)的研究表明,被试对细节特征的记忆正确率更低,因此本实验将记忆项的最大数目减小至 5 个。采用 3(识记项目数:3、4、5 个)×2(任务类型:客体工作记忆任务、空间工作记忆任务)两因素被试内实验设计。其中,客体工作记忆任务包含颜色变化、图案变化、颜色-图案交换变化三种检测变化方式,空间工作记忆任务仍然只包含位置变化检测方式。其它条件同实验一。实验程序方面,考虑到刺激图形的顶部图案为细节特征,知觉难度比基本特征大,因此,将识记项目的呈现时间延长至 800ms。其它程序设置同实验一。

#### 3.2 结果与分析

采用 SPSS16.0 软件对 26 名被试数据进行统计分析,被试在各实验条件下的检测正确率和标准差如图 5 所示。

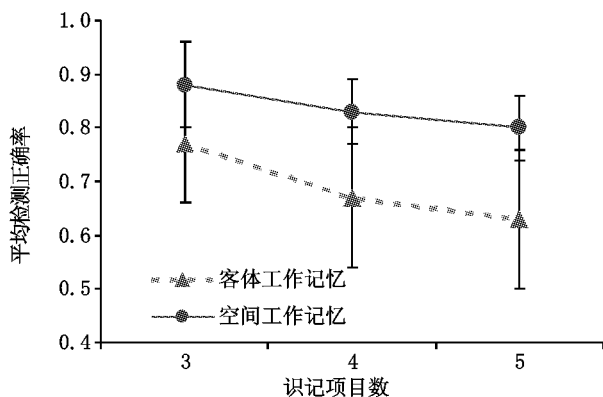


图5 实验2各条件下被试的平均正确率

3×2 两因素被试内方差分析显示,识记项目数的主效应显著,  $F(2, 50) = 64.63, p < 0.001, \eta^2 = 0.72$ , 客体和空间工作记忆检测正确率均随识记项目

##### 3.1.2 实验设备与材料

实验设备、环境及编程软件同实验一。电脑屏幕背景为灰色。被试与屏幕的距离约为 57cm。实验材料为由不同侧面颜色和顶部图案组成的六棱柱,举例如图 4。7 种备选颜色同实验一。任选一种颜色和图案可构成一个刺激图形。在同一组记忆项中,图形的颜色和图案均无重复。每个图形的视角约为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。

目数的增加而显著下降;任务类型的主效应也显著,  $F(1, 25) = 33.20, p < 0.001, \eta^2 = 0.57$ , 空间工作记忆的正确率显著高于客体工作记忆;识记项目数与任务类型的交互作用也显著,  $F(2, 50) = 4.51, p < 0.05, \eta^2 = 0.15$ 。

采用 Pashler (1988) 提出的公式对视觉工作记忆容量进行测定,计算公式为:  $k = S \times [(H - F) \div (1 - F)]$ 。其结果如图 6。

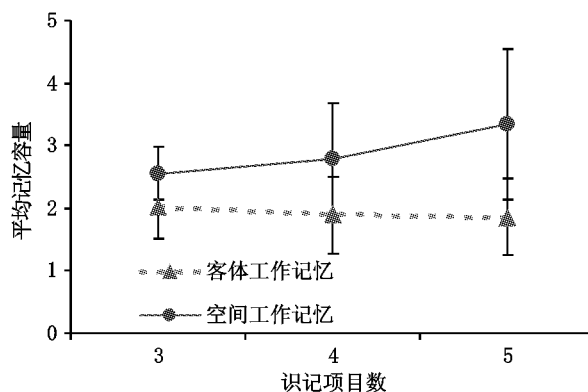


图6 实验2不同条件下被试的平均工作记忆容量

实验结果显示,当记忆项目数为 3 个时,客体工作记忆的存储容量达到最大值,为 2.01 个客体,而空间工作记忆的存储容量在记忆项目数为 5 个时达到最大值,为 3.34 个位置。

对记忆项目数为 3、4、5 个时的客体和空间工作记忆的容量分别进行相关样本  $t$  检验,结果显示,空间工作记忆的容量均显著大于客体工作记忆的容量 ( $t(25) = 6.00, t(25) = 4.26, t(25) = 4.90, ps < 0.001$ )。

为检验三维图形的特征类型是否影响其客体和空间工作记忆容量,对实验 1 和实验 2 中识记项目

数为3个和4个两种条件下的平均容量分别进行独立样本 $t$ 检验。结果显示,实验1中的客体工作记忆容量均显著大于实验2( $t(52) = 3.40, p = 0.001; t(52) = 3.55, p = 0.001$ ),而实验1中的空间工作记忆容量仅在识记项目数为4个时显著大于实验2( $t(52) = 2.92, p < 0.01$ ),当识记项目数为3时,两个实验的空间工作记忆容量无差异( $t(52) = 1.31, p = 0.19$ )。这表明,总体而言,被试对由两个异质基本特征组成的三维图形的视空间工作记忆存储数量要大于由一个基本特征和一个细节特征组成的三维图形,即特征类型影响视觉工作记忆容量。

#### 4 讨论

本研究通过两个实验考察了三维图形的视空间工作记忆容量,实验一结果显示,被试能在视觉工作记忆中存储约3个由两个异质基本特征组成的客体和4个空间位置,实验二结果显示,被试能存储约2个由一基本特征和一细节特征组成的客体和4个空间位置。这一结果与静态条件下视觉工作记忆容量的研究结果基本一致(Luck & Vogel, 1997; Vogel et al., 2001; Fencsik, 2003; 吴文春, 2013)。对于客体和空间工作记忆存储容量有限这一结果,我们认为其主要受制于个体短时间内可用的注意资源是有限的。这里所说的“短时间内可用的注意资源”即Cowan(2001)提出的“注意焦点的容量”;Cowan(2001)认为它一次只能容纳少量的信息,为3~5个组块,这与本研究在排除言语复述条件下得出视觉工作记忆的存储容量约为3个三维图形和4个空间位置的结果基本一致。

另外,两个实验结果均表明,空间工作记忆容量显著大于客体工作记忆容量。这一结果提示,人类的视空间工作记忆可分为客体记忆和空间记忆,与神经心理学、潜变量、双分离、发展以及脑机制的研究提供的大量实验结果一致(罗良,刘兆敏,林崇德, 2007)。这两种视觉工作记忆容量的差异,可能与其不同的编码方式有关。Poster等(Poster, D'Esposito, & Corkin, 2005)认为,语音编码对于客体工作记忆的特征是至关重要的,而空间工作记忆的特征则不需要言语编码,其双分离的N-back实验结果证实,言语分心物对客体工作记忆成绩的影响大于对空间工作记忆的影响。就本研究而言,两个实验均在视觉工作记忆过程中增加了言语负载任务,这一言语负载很可能阻碍了被试在客体工作记忆过程中起重要作用的言语编码,降低了其记忆成绩,但并

不妨碍在空间工作记忆过程中起重要作用的视觉编码。因此,客体工作记忆的检测正确率显著低于空间工作记忆,其容量也更小。

对两个实验的视空间工作记忆容量进行比较后发现,实验一的客体工作记忆容量显著大于实验二的客体工作记忆容量。即被试对由两个基本特征组成的三维图形的存储数量要大于对由一个基本特征和一个细节特征组成的三维图形存储数量。这表明,特征类型影响视觉客体工作记忆的存储容量。而对于空间工作记忆容量的比较,结果只发现当识记项目数为4个时实验一的容量显著大于实验二。对此,我们认为其主要原因在于,本研究的两个实验结果均已证实,空间工作记忆容量要显著大于客体工作记忆容量,且其容量估计值分别为2~3个客体和3~4个空间位置。因此,在有效的空间工作记忆容量值大于3的情况下,样本刺激的识记项目数为3个时的比较结果不具代表性。这表明,特征类型对视觉空间工作记忆的存储容量也有显著影响,但其效力比对客体工作记忆容量的影响相对更小。

#### 参考文献

- 陈妍. (2012). 三维图形用户界面的视觉传达性研究. 硕士学位论文. 江南大学.
- 罗良, 刘兆敏, 林崇德. (2007). 人类视空间工作记忆分离的证据与机制. *心理科学进展*, 15(3), 394-400.
- 沈模卫, 李鹏, 郎学明, 陈硕. (2007). 客体运动速度的视觉工作记忆容量. *心理科学*, 30(4), 796-801.
- 沈模卫, 徐青, 高在峰, 余喻, 尹军, 孙忠强, 水仁德. (2009). 客体复杂度影响工作记忆可存储的客体数量. *应用心理学*, 15(1), 3-9.
- 吴文春. (2013). 二维特征图形的客体和空间工作记忆存储研究. *心理发展与教育*, 29(3), 247-254.
- 吴文春, 孙悦亮. (2013). 图形规则性对客体和空间工作记忆存储的影响. *心理与行为研究*, 11(2), 205-210.
- Alvarez, G. A., & Cavanagh, P. (2004). The capacity of visual short term memory is set both by visual information load and by number of objects. *Psychological Science*, 15(2), 106-111.
- Awh, E., Barton, B., & Vogel, E. K. (2007). Visual working memory represents a fixed number of items regardless of complexity. *Psychological Science*, 18, 622-628.
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(01), 87-114.
- Eng, H. Y., Chen, D., & Jiang, Y. (2005). Visual working memory for simple and complex visual stimuli. *Psychonomic*

- Bulletin & Review*, 126, 1127 – 1133.
- Luck, S. J. , & Vogel, E. K. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature*, 390 (6657), 279 – 281.
- Luria, R. , & Vogel, E. K. (2011). Shape and color conjunction stimuli are represented as bound objects in visual working memory. *Neuropsychologia*, 49, 1632 – 1639.
- Olson, I. R. , & Jiang, Y. (2002). Is visual short – term memory object based? Rejection of the “strong object” hypothesis. *Perception & Psychophysics*, 64(7), 1055 – 1067.
- Pashler, H. (1988). Familiarity and visual change detection. *Percept Psychophys*, 44(4), 369 – 378.
- Poster, B. R. , D’ esposito, M. , & Corkin, S. (2005). Effects of verbal and nonverbal interference on spatial and object visual working memory. *Memory & Cognition*, 33(2), 203 – 212.
- Timothy, F. B. , & George, A. A. (2015). No Evidence for a Fixed Object Limit in Working Memory: Spatial Ensemble Representations Inflate Estimates of Working Memory Capacity for Complex Objects. *Journal of Experimental Psychology Learning Memory*, 41(3), 921 – 929.
- Trick, L. M. , & Pylyshyn, Z. W. (1993). What enumeration studies can show us about spatial attention; Evidence for limited capacity preattentive processing. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 19, 331 – 351.
- Vogel, E. K. , Woodman, G. F. , & Luck, S. J. (2001). Storage of features, conjunctions, and objects in visual working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27(1), 92 – 114.
- Wheeler, M. E. , & Treisman, A. M. (2002). Binding in short – term visual memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 131(1), 48 – 64.
- Xu, Y. (2002). Limitations of object – based feature encoding in visual short – term memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28(2), 458 – 468.

## The Research on the Capacity of Visual – spatial Working Memory of 3 – D Graphs

Wu Wenchun<sup>1</sup>, Xu Xue<sup>1</sup>, Zheng Yunjia<sup>2</sup>

(1. School of Education Science, Hanshan Normal University, Chaozhou 521041;

2. Department of Applied Psychology, Guangdong University of Finance, Guangzhou 510521)

**Abstract:** Using 3 – D graphs as materials, this study calculated the capacity of visual – spatial working memory through single probe change detection paradigm, and compared the difference between the capacity of object working memory and spatial working memory. The materials of Experiment 1 are 3 – D graphs with two features of color and shape, and those in Experiment 2 were defined by different colors and textures. The results of two experiments showed the participants could store about two to three objects and four spatial locations, and the capacity of spatial working memory was significantly greater than object working memory capacity. After further comparative analysis, we found the storage capacity of 3 – D graphs with two basic features was higher than that of 3 – D graphs with one basic feature and a detail feature. It indicated the types of features that composed 3 – D graphs had a great influence on the capacity of visual – spatial working memory.

**Key words:** visual working memory; capacity; object; spatial; 3 – D graphs