

重新检视工作记忆在视觉搜索中的作用*

张 豹

(广州大学教育学院心理与脑科学研究中心, 广州 510006)

摘 要 视觉搜索是人类从作用于视觉系统的大量信息中选择相关信息进入信息加工系统的一种认知功能,同时也是研究选择性注意的一种常用范式。工作记忆作为一种服务于当前任务信息的存储与加工的认知系统,在视觉搜索过程中扮演着关键角色。为了深入了解工作记忆在视觉搜索过程中的作用机制,在梳理已有成果的基础上,分别从工作记忆对靶子模板的储存、视觉搜索项目与靶子模板在工作记忆中的匹配及工作记忆对已检测过搜索项目的记忆三个方面进行综述。最后结论表明工作记忆确实在视觉搜索过程中起作用,但其作用机制仍存在较多争议。

关键词 工作记忆; 视觉搜索; 返回抑制

分类号 B842

1 引言

视觉搜索任务一般是指个体从众多的干扰刺激中寻找靶子刺激的过程,它是认知心理学研究选择性注意的一种常用的、具有较高生态学效度的实验范式之一。迄今为止,研究者们已经采用视觉搜索范式获得了大量的研究成果。近年来,工作记忆与视觉搜索的交互影响亦成为研究者们所关注的热点问题(见综述 Olivers, 2008; Woodman & Chun, 2006; 潘毅, 许百华, 胡信奎, 2007; 潘毅, 许百华, 陈晓芬, 2006; 张明, 张阳, 2007)。在以往研究及相关综述的基础上,笔者试图重新检视有关工作记忆在视觉搜索过程中作用已有的相关研究证据,以厘清工作记忆在视觉搜索中所扮演的角色。

从日常生活来看,视觉搜索是人类最常用的认知活动之一。从每天睁开眼睛的那一刻起,视觉搜索就充满着人们的生活。例如,起床后寻找鞋子;在人群中寻找某个人等等。虽然某些搜索任务很容易,看起来不需要搜索过程,比如,如果知道鞋子放在哪里,起床后寻找鞋子就特别容

易,这是因为记忆在视觉搜索过程中起作用,会促进找鞋这一视觉搜索过程的效率。另外,有些视觉搜索任务则相对较难,例如体育课时在运动场中寻找某个同学。但如果提前知道这个同学穿红色的外套,在搜索的过程中就会只关注穿红外套的同学,而忽略其他外套颜色的同学,使搜索过程变得相对容易很多。即使事先不知道这位同学穿哪种颜色的衣服而只能根据他的面孔来辨认,人们还是有办法来提高搜索的效率,例如刚才找过的地方,就不会再去寻找。

在上面的例子中,不管是鞋子搁放的位置,还是外套的颜色,或是已找过的地方,都能依靠记忆中的信息促进人们在视觉情境中搜索特定靶子的效率。大多数情况下,开始视觉搜索的时候,相关信息就会被提取到工作记忆中,用以引导注意偏向或是拒绝某些刺激,以提高视觉搜索效率。由此可知,工作记忆对促进视觉搜索的效率扮演着重要的角色。

那么工作记忆在视觉搜索过程中是如何起作用的呢?对这一问题的回答,笔者将根据已有相关研究证据主要从以下三个方面来详细论述工作记忆在视觉搜索中扮演的角色。

2 工作记忆储存靶子模板?

无论进行任何搜索,都需要首先设定并记住

收稿日期: 2011-06-17

* 国家自然科学基金面上项目(31070994), 广东省教育科学规划项目(08SXY002)资助。

通讯作者: 张豹; E-mail: bao.zhang@139.com

搜索的靶子, 视觉搜索亦是如此。因此笔者首先要论述的问题便是视觉搜索靶子的记忆表征(称之为“靶子模板”)储存的位置。

众多的注意理论认为在视觉搜索过程中靶子刺激以模板的形式储存在视觉工作记忆之中(如 Desimone & Duncan, 1995; Duncan & Humphreys, 1989), 一旦检测到靶子刺激, 该刺激就会传送到工作记忆中, 从而用来控制外部的行为(Duncan, 1980)。

视觉工作记忆对靶子模板的储存得到了一些认知神经研究的支持(Chelazzi, Duncan, Miller, & Desimone, 1998; Chelazzi, Miller, Duncan, & Desimone, 1993; Rossi, Bichot, Desimone, & Ungerleider, 2001; Woodman & Arita, 2011)。例如, Chelazzi 等人(1998; 1993)采用单细胞记录技术记录猴子在完成视觉搜索任务时颞下皮层(inferotemporal cortex)的神经活动。他们首先让猴子记住呈现在注视点处的一个线索刺激, 间隔一段时间之后, 呈现一个视觉搜索序列, 要求猴子将眼睛移动到之前记住的线索刺激。Chelazzi 等发现线索刺激呈现完后的间隔阶段, 部分神经元的活动加强, 这被认为是反映靶子模板在工作记忆中保持的神经元活动。另外, Rossi 等(2001; 2007; 2009)在对猴子脑损伤的研究中, 训练猴子搜索指定的靶子, 靶子会在每次搜索之前呈现(自上而下的搜索任务)。在实验中 Rossi 等操纵靶子变化的频率, 即不同搜索任务之间靶子相同或不同的频率。研究结果发现, 当猴子被摘除前额叶时就很难完成靶子不停变化的视觉搜索任务, 但能完成靶子变化频率比较低的视觉搜索任务, 并与前额叶完整时的作业水平差不多。同时 Rossi 等发现当视觉搜索任务为颜色突显(pop out)任务(自下而上的视觉搜索任务)时, 不管前额叶是否完整, 猴子都能很好地完成任务。Rossi 等认为相对于靶子固定或 Pop out 的视觉搜索任务, 靶子不停变化的视觉搜索任务需要前额叶的参与。Woodman, Luck 和 Schall (2007)认为在 Rossi 等实验中, 当靶子不停变化时, 需要将靶子模板保持在视觉工作记忆中, 即前额叶中(Goldman-Rakic, 1996), 故猴子前额叶受到损伤时, 视觉搜索成绩会受到影响; 而当视觉搜索的靶子保持固定时, 搜索成绩不受前额叶损伤的影响, 说明靶子模板不用保持在视觉工作记忆中。由此可以推断, 视

觉搜索的靶子模板是否保持在视觉工作记忆之中还依赖于靶子随测试变化的频率。

为了证明上述推断, Woodman 等(2007)采用记忆负载任务与视觉搜索任务相结合的双任务范式对人类被试进行了实验研究。在实验中, 首先给被试呈现视觉搜索靶子, 搜索靶子有两种类型, 一种是固定靶子, 即在一个区组内的测试中所有视觉搜索靶子是相同的, 另一种为变化靶子, 即在区组内每一个测试的视觉搜索靶子是随机变化的。接下来是记忆负载任务, 要求被试记住四个颜色方块。间隔一段时间之后呈现一个视觉搜索任务, 要求被试从不同开口方向的方框中搜索靶子是否出现; 最后呈现记忆探测, 要求判断探测屏出现的颜色方块是否与记忆负载任务中的颜色方块相同。为了防止对记忆颜色的言语编码, 在每个测试的过程中都要求被试不断大声复述 4 个数字或字母。Woodman 等(2007)预测: 由于记忆负载任务中对四个颜色块的记忆已接近视觉工作记忆的最大容量(Cowan, 2001; Luck & Vogel, 1997), 因而变化靶子条件下的靶子模板在视觉工作记忆中的存储会受到工作负载任务的影响, 从而降低视觉搜索效率; 相反, 固定靶子条件下的靶子模板不需要存储在视觉工作记忆中, 因而视觉搜索的效率不会受到工作记忆负载的影响。结果符合他们的预测, 即在靶子变化条件下视觉搜索效率受到工作记忆负载的影响而显著下降, 而在靶子固定条件下却没有受到影响。该实验结果证实了视觉搜索过程中靶子模板的存储位置对靶子变化频率的依赖性, 即只有在靶子变化的视觉搜索中, 靶子模板才需要存储在视觉工作记忆中, 而在靶子固定的视觉搜索中, 靶子有可能存储在视觉工作记忆之外的其他区域, 例如长时记忆(Woodman, et al., 2007)。

但存在的一个问题是, 在靶子固定的视觉搜索任务中, 如果靶子模板存储在长时记忆之中, 那输入刺激与靶子模板的匹配场所在何处? 潘毅、许百华和胡信奎(2007)认为此种情形下被试仍然需要从长时记忆中提取靶子模板到工作记忆, 以完成匹配判断。但由于靶子模板经过长期复述而得到巩固, 因此在工作记忆中的保持只需要占用很少的注意资源。这种理论上的解释难以解释猴子在前额叶受损时仍能很好地完成靶子保持固定时的视觉搜索任务(Rossi et al., 2007, 2009), 因

此仍需进一步的验证。

3 被注意的项目是否需要在工作记忆中进行匹配?

在序列搜索的视觉搜索过程中,需要将注意从一个刺激转移到另一个刺激(Woodman & Luck, 1999, 2003),直到找到靶子。其中涉及到的一个重要问题是在注意的序列转移过程中,被注意到的刺激是否会自动传送到工作记忆中?如果是,那么被注意过的刺激是否会被再次检测?

笔者拟从理论模型和实证研究两方面来论述视觉搜索过程中被注意的项目是否需要传送到工作记忆中以完成与靶子模板的匹配。

最早与此问题相关的理论模型是 Treisman 等的知觉整合模型(Feature Intergration Theory, Treisman & Gelade, 1980; Treisman & Gormican, 1988)。该模型认为,在视觉搜索过程中,注意转移并聚焦到搜索序列中项目的位置,然后将该项目的特征整合到一起,成为一个客体表征,该表征在记忆中以客体文件(object file)的形式存储。故根据知觉整合理论,视觉搜索过程中被注意的项目会被传送到记忆中进行整合。模型中所指的记忆应该就是视觉工作记忆。而 Duncan 和 Humphreys 从另外一个角度阐述了视觉搜索过程(Duncan & Humphreys, 1989)。他们认为视觉搜索过程中注意不是从一个项目转移到另一个项目的方式进行搜索,而是将有限的注意资源同时分配给视觉搜索序列中的多个项目。项目得到的注意资源越多,就越有可能被传送到工作记忆中,从而控制和支配个体输出的外在的行为。注意资源是根据项目与视觉工作记忆中靶子模板的匹配程度来分配的,匹配程度越高,所获得的注意资源就越多。另外, Bundesen (1990); Bundesen, Habekost 和 Kyllingsbæk (2005)有关注意的计算模型,即(Neural) Theory of Visual Attention, 也认为视觉搜索序列中的(多个)项目进入工作记忆以后,会根据其与靶子模板之间的相似性进行匹配。由此可见,虽然 Treisman 的知觉整合模型强调的是序列搜索,而 Duncan 及 Bundesen 强调的是平行搜索,但两者都认为视觉搜索过程中被注意到的项目会自动传送到工作记忆中以完成与靶子模板的匹配。

一些研究者采用工作记忆负载任务与视觉搜索任务相结合的双任务范式对上述理论中所提及

的观点进行了实证验证。他们所采用的双任务范式的逻辑如下:工作记忆的容量是有限的,一般能存储约 4 个项目或组块(Cowan, 2001; Luck & Vogel, 1997)。如果视觉搜索过程中需要将注意的项目传送到工作记忆中进行匹配,那么在工作记忆满负荷条件下,被试将不能同时完成工作记忆保持任务与视觉搜索任务,由此会导致视觉搜索效率下降。基于这一逻辑,Logan (1978, 1979)要求被试在记住 7 个数字的同时完成视觉搜索任务,结果并没有发现记忆任务会影响视觉搜索任务。然而 Logan (1978, 1979)所采用的记忆任务为言语工作记忆任务。根据工作记忆模型,工作记忆的存储系统可以分为言语工作记忆与视觉工作记忆两个子系统(Baddeley, 1986, 2010),而大部分的注意理论认为是视觉工作记忆,而非言语工作记忆参与视觉搜索过程。为了进一步验证视觉工作记忆在视觉搜索中的作用,Woodman, Vogel 和 Luck (2001)要求被试在视觉工作记忆满负荷的情境下完成视觉搜索任务。记忆任务为记住屏幕上呈现的四个颜色块,但为防止对颜色块的言语编码,在测试过程中要求被试一直大声复述四个数字或字母。搜索任务为在不同开口方向的方框中搜索开口向上或向下的方框。结果发现,虽然在有视觉工作记忆负载条件下,视觉搜索的速度会整体变慢(Solman, Allan Cheyne, & Smilek, 2011; 采用眼动技术亦发现相似的结果),但其视觉搜索效率(反应时 \times 搜索集的斜率)与单独的视觉搜索任务却没有显著的差异。此结果表明视觉工作记忆负载并没有影响视觉搜索的效率。根据前述双任务范式的逻辑,Woodman 等(2001)的实验结果与理论模型中所述的“被注意的项目会自动传送到视觉工作记忆中进行匹配”的观点是不一致的。另外,Woodman 等(2001)还从另一个角度检验了视觉工作记忆是否会存储被检测过的项目。他们认为如果被检测过的项目会存储在视觉工作记忆中,那么随着视觉搜索中搜索集的变大,工作记忆需要存储项目也会随之增加,那么工作记忆负载任务中对项目的保持量应该会下降。结果发现,虽然在记忆任务基础上增加视觉搜索任务会损害工作记忆的保持量(单记忆任务与“记忆+搜索”任务下平均保持量分别为 3.2 和 2.7 个项目),但“记忆+搜索”任务下的保持量并不会随着搜索集变化而改变。反过来说,被试完成视觉搜

索任务所占用的视觉工作记忆资源在所有搜索集条件下是相同的。因此, Woodman 等(2001)等认为视觉搜索过程中被注意选择的项目表征不需要保持在视觉工作记忆。

虽然 Woodman 等(2001)并没有发现视觉工作记忆负载对视觉搜索效率的影响, 但并不能排除其他类型的视觉工作记忆信息会对视觉搜索起作用。近年来越来越多的证据表明视觉工作记忆中的客体信息与空间信息是分开存储的(Carlesimo, Perri, Turriziani, Tomaiuolo, & Caltagirone, 2001; Goldman-Rakic, 1996), 大脑皮层中有两种不同的通路分别表征客体信息(“What”通路)和空间信息(“Where”通路)(Goldman-Rakic, 1996)。在 Woodman 等(2001)研究中的颜色块属于客体表征, 故其所得到的研究结果亦只能表明客体工作记忆对视觉搜索没有影响, 而不能概括到空间工作记忆。Woodman 和 Luck (2004)与 Oh 和 Kim (2004)各自考察了空间工作记忆在视觉搜索中的作用。以 Woodman 和 Luck (2004)的研究为例, 当他们将 Woodman 等(2001)实验中的客体工作记忆负载任务替换为空间工作记忆负载任务后发现: 与单独的视觉搜索任务条件相比, “记忆+搜索”任务条件下的搜索效率显著降低, 表明空间工作记忆任务阻碍了视觉搜索任务的进行。另外, 对空间工作记忆的成绩进行分析后也发现, 相对于单记忆条件, “记忆+搜索”任务条件下的空间工作记忆成绩与显著下降, 这表明视觉搜索过程亦损害了空间工作记忆的存储。

对于空间工作记忆负载为何会损害视觉搜索效率的内在机制却存在多种不同的解释:

一种可能的解释为空间工作记忆的编码与储存是基于空间注意的复述机制(Awh, Jonides, & Reuter-Lorenz, 1998; Awh et al., 1999; 另见综述 Wang & Klein, 2010), 而视觉搜索亦需要注意的序列转移(Woodman & Luck, 1999; Woodman & Luck, 2003), 因此在空间工作记忆保持的过程中空间注意的复述机制会妨碍或阻止视觉搜索过程中的序列注意转移, 从而降低视觉搜索的效率。反过来, 视觉搜索过程中的序列注意转移也会妨碍或阻止空间工作记忆的空间注意复述, 从而损害空间工作记忆的编码与存储。

另一种可能的解释为空间工作记忆负载任务妨碍了视觉搜索过程中对曾检测过位置的记忆表

征。许多对视觉搜索的研究表明视觉搜索过程中存在返回抑制(Inhibition of Return)效应, 即注意会偏离曾注意过的项目位置, 从而提高视觉搜索效率(Dodd, Castel, & Pratt, 2003; Klein, 1988; Klein & MacInnes, 1999; Müller & von Mühlhelen, 2000; 见综述 Wang & Klein, 2010; 张明, 张阳, 2007)。而空间工作记忆与返回抑制之间存在密切的关系, 例如, Castel, Pratt 和 Craik (2003)在返回抑制任务中嵌入工作记忆任务。当嵌入任务为非空间工作记忆任务时, 观察到了返回抑制效应; 而当嵌入任务为空间工作记忆任务时, 返回抑制效应消失了, 这表明空间工作记忆对返回抑制的产生有重要的作用(又见 Chou & Yeh, 2008; Zhang, Y. & Zhang, M., 2011)。同理, 空间工作记忆负载会通过破坏视觉搜索过程中返回抑制来增加注意重新检测已检测过的项目(或位置)的机会, 从而增加视觉搜索的难度。当然这只是一项推测, 空间工作记忆是否能破坏视觉搜索中的返回抑制, 还有待进一步验证。

但不管是哪一种解释, 都说明空间工作记忆在视觉搜索过程中起作用。由此可知, 视觉工作记忆对视觉搜索的影响似乎取决于工作记忆中负载的信息类型, 空间工作记忆负载会降低视觉搜索效率(如 Woodman & Luck, 2004; Oh & Kim, 2004), 而客体工作记忆负载则对视觉搜索效率没有影响(如 Woodman 等, 2001)。

值得一提的是, Woodman 等(2007)采用与 Woodman 等(2001)相似的实验范式却发现客体工作记忆会降低视觉搜索的效率, 这一结果与 Woodman 等(2001)的实验结果并不一致。造成两者差别的原因可能为视觉搜索的类型不同, 即 Woodman 等(2001)实验中采用靶子固定类型的视觉搜索, 而 Woodman 等(2007)采用的是变化靶子的视觉搜索。变化靶子的视觉搜索中靶子模板需要存储在工作记忆中(Woodman, et al., 2007), 会与客体工作记忆负载任务中的项目竞争注意资源, 因而可能削弱靶子模板的记忆表征质量, 从而加大与搜索序列中的项目的匹配难度。相反, 固定靶子的视觉搜索中靶子模板并不需要储存在工作记忆中(Woodman, et al., 2007), 因此不会受到客体工作记忆负载的影响。但与之而来的一个疑问是固定靶子的视觉搜索中的匹配过程在何处进行? 尚需进一步的论证。另外, 即使 Woodman 等

(2007)证明了客体工作记忆会影响变化靶子类型的视觉搜索,但这并不能说明本部分所关注的问题——视觉搜索过程中被注意的项目是否需要传送到工作记忆中。因为 Woodman 等(2007)实验中客体工作记忆负载主要影响的是靶子模板的记忆表征质量,而非被注意的项目在工作记忆中的表征。

另外,笔者认为 Woodman 等(2001)实验发现的“客体工作记忆负载对(固定靶子的)视觉搜索没有影响”以及“客体工作记忆保持量不受搜索集变化的影响”两种结果亦不能证明“视觉搜索中被注意的项目不会自动地传送到视觉工作记忆之中”。理由如下:

(1)在视觉搜索过程中,即使被注意的项目被自动地传送到视觉工作记忆之中,但并不意味着这一项目便会存储在工作记忆中,而有可能是完成与靶子模板的匹配后便立即衰退,以便给下一个被注意的项目留下足够的空间。根据这一假设,笔者预测:即便进入工作记忆的项目会立即衰退,但在匹配完成之前还是会占用部分客体工作记忆空间。这一预测得到 Woodman 等(2001)实验中数据的支持,即相对于单记忆条件下,“记忆+搜索”任务条件下的客体工作记忆保持量有所减少(3.2 vs. 2.7),这表明视觉搜索任务会部分地损害客体在工作记忆中的保持(又见 Woodman & Luck, 2010),而这种损害可能就是因为被注意的项目自动地传送到视觉工作记忆中需要占用一定的空间所致。而结果中视觉搜索效率未受客体工作记忆负载的影响,可能是因为被试为了优先保证视觉搜索的顺利完成而只策略性地牺牲了部分客体工作记忆任务。

(2)正是由于被注意的项目进入工作记忆完成匹配之后便会立即衰退¹,而不需要存储在客体工作记忆中,因而只需要一定的存储空间(这一定的

存储空间就是“记忆+搜索”任务条件与单记忆条件下客体工作记忆保持量的差值部分, $3.2-2.7=0.5$ 个项目)。由此可推断,由于被注意过的项目在工作记忆中所需要的存储空间是固定的,所以剩余的客体工作记忆的保持量(2.7 个项目)不会因为搜索集的增加而变化。

(3)还有一种可能的解释是, Woodman 等(2001)整个实验中靶子是固定的,干扰刺激亦是固定的(开口向左或向右的方框),实际上只用记住两种刺激,经过大量的重复之后,只需要少量的资源即可将其记住。而这部分资源恰好可能是“记忆+搜索”任务条件与单记忆条件下客体工作记忆保持量的差值部分。而搜索效率未发生变化亦是因为视觉搜索优先性的策略所致。当然这些解释还需要进一步的实验论证,同时也提示客体工作记忆对视觉搜索的影响还缺乏强有力的证据。

与客体工作记忆对视觉搜索的影响尚未确定不同的是,已有证据表明空间工作记忆在视觉搜索过程中扮演着重要的角色(Oh & Kim, 2004; Woodman & Luck, 2004)。但这些证据是否能证明视觉搜索过程中被注意的项目会自动传送到视觉工作记忆中呢?答案是否定的。因为不管被注意的客体是否被传送到视觉工作记忆中,并不影响视觉工作记忆对该客体位置的记忆或视觉搜索过程中注意的转移——这被认为是空间工作记忆影响视觉搜索的两种可能机制。

综上所述,虽然众多的理论模型都认为在视觉搜索过程中被注意的项目会被自动地传送到视觉工作记忆,以完成与靶子模板的匹配,但至今仍缺乏直接而有力的实证证据的支持。另外,如果被注意的项目与靶子模板的匹配不是在视觉工作记忆中完成,那匹配过程的位置又在何处呢?据笔者所知,并未有相关的理论与实证研究对此进行论述。

4 对检测过的干扰刺激是否存在记忆效应?

从上一部分的论述中可知,目前的证据尚不能确定被注意的项目是否有必要传送到视觉工作记忆中,因此也不能确定客体工作记忆是否会保存被注意过的干扰刺激。然而, Woodman 和 Luck (2004)的研究发现空间工作记忆负载会损害视觉搜索的效率,提示在视觉搜索过程中,对于检测

¹虽然被注意的项目进入客体工作记忆后会立即衰退,但并非意味着所有项目都会完全衰退,还是存在部分项目被记住的可能性。由于客体工作记忆的容量有限(Cowan, 2001; Luck & Vogel, 1997),肯定不能保存全部被注意过的项目。此外,在类似于 Woodman 等(2007; 2001)的双任务范式中,被试在保证有效完成视觉搜索任务的同时,也必须很好地完成客体工作记忆任务,故更不可能保持全部的被注意过的项目。

过的干扰刺激(或位置)²可能会通过返回抑制的机制起作用,以提高视觉搜索效率。本部分笔者试图论述视觉搜索领域一个颇有争议的问题——视觉搜索过程中对被检测过的干扰刺激(或位置)是否存在记忆效应,是否会被贴上抑制标签(inhibition tagging),以防止被再次检测?对于这一问题主要有二种观点:

一种观点认为工作记忆不需要保持搜索过程中被检测过的分心刺激(Horowitz & Wolfe, 1998, 2001, 2003; Hulleman, 2009),即无记忆模式(amnesic search model)。例如,Horowitz 和 Wolfe (1998)认为在视觉搜索过程中不会保持注意转移的轨迹,视觉搜索就像非置换取样(sampling without replacement)一样,工作记忆不会保持搜索过程中被检测过的分心刺激。当再一次遇到这些刺激时,还会把它们当作新的刺激来处理。无记忆视觉搜索是根据瞬间的显著特征来决定最有可能成为靶子的项目,并引导注意偏向到那个位置。如果项目被识别为非靶子,下一个项目还会以同样的标准进行选择。从无记忆机制来看,如果每一刻都有 n 个项目,视觉系统在每一次取样时,都会有 $1/n$ 的机会选中这个靶子。为了验证这一假设,Horowitz 和 Wolfe (1998)在他们的实验中要求被试在一系列分心字母“L”中搜索靶子字母“T”。实验设置了二个条件:静态条件和动态条件。在静态条件中,每次搜索屏之后是掩蔽刺激,然后才是下一个搜索屏;而动态条件中每隔 111ms 刺激的位置就会变化一次。他们假设:如果视觉搜索是记忆驱动搜索模式,在静态条件下就会保持前一次搜索的记忆痕迹,从而在下一次搜索中不会再检测搜索过的位置。而在动态条件下这种记忆痕迹会遭到破坏,个体需要重新检测曾搜索过的位置。而如果视觉搜索是无记忆搜索模式,两种条件下都不会保持搜索的记忆痕迹,那么静态条件与动态条件下的结果应是一样的。研究结果是静态条件与动态条件下的平均反应时 \times 集大

小(set size)形成的斜率是相等的,与他们之前的预期一致。Horowitz 和 Wolfe (2001)在多靶子视觉搜索任务中也发现了符合无记忆视觉搜索模式。

Horowitz 和 Wolfe (1998)的实验结果招致了一些研究者的质疑。例如, Peterson 等对 Horowitz 和 Wolfe (1998)的实验结果详细分析后发现,虽然两种条件下的斜率是相同的,但是搜索速度却不同,对于静止的画面搜索要更快,表明被试可能在二种条件的画面中使用不同的策略。更重要的是,两种条件下的错误率是不相等,随机条件比静止条件下的错误率更多,这表明视觉搜索在静止条件下更有效(Peterson, Kramer, Wang, Irwin, & McCarley, 2001)。Peterson 等(2001)采用眼动技术对这一问题进行探讨,实验中要求被试搜索呈现在刺激序列中的靶子刺激,同时记录被试的眼动轨迹。他们认为如果是无记忆的视觉搜索,被试的眼动就会频繁地回跳到曾检测过的位置。结果发现,虽然个体会偶尔再检测一些曾检测过的项目,但是数据模式并不适合无记忆视觉搜索模型,相反却适合记忆驱动的视觉搜索模型。

另外, Kristjánsson (2000)认为 Horowitz 和 Wolfe (1998)研究中没有发现静态视觉搜索条件下对曾检测过干扰刺激位置的记忆效应,是因为其设置的搜索集变化范围太小(8-16)。Kristjánsson (2000)推断,在静态条件下视觉搜索过程中,当刺激出现的可能位置数量一定时(例如在 Horowitz 等 1998 年实验中为 64 个),随着搜索集(set size)的增大,靶子刺激出现在前一个搜索序列中分心刺激位置的可能性就会增加。如果存在记忆效应,那么对该靶子刺激的反应将会变慢,从而平均搜索时间增大。为了对这一推断进行检测, Kristjánsson (2000)首先检测了当靶子刺激出现在干扰刺激位置时是否会增加搜索的难度。在实验 1 中,他将 Horowitz 和 Wolfe (1998)的动态条件稍微改变:搜索序列中的刺激总是出现在前一个搜索序列刺激的位置上。Kristjánsson 认为,如果存在对干扰刺激位置的记忆,那么被试则会认为其所在位置已被检测过而不会再对其进行重新检测,当下一搜索序列中靶子刺激出现在该位置时就很有可能被遗漏(miss),从而增加靶子被检测到的难度。实验结果发现,静态条件与动态条件下的斜率存在差异,动态条件下的斜率显著增加,显示出位置记忆效应。接下来在实验 2 中他

² 返回抑制包括基于位置与基于客体的返回抑制(McAuliffe, Chasteen, & Pratt, 2006; Possin, Vincent, Song, & Salmon, 2009),但因为目前尚不能证实或排除视觉搜索过程中客体工作记忆对搜索项目的记忆是否存在,故此处仍表述为干扰刺激(或位置)。

将搜索集变化范围扩大到 4 - 56 个时,发现静态条件与动态条件下搜索斜率在大搜索集时出现了分离,动态条件下搜索时间显著地慢于静态条件,表现出静态条件下的位置记忆效应。由此, Kristjánsson 认为 Horowitz 和 Wolfe (1998, 2001) 所设置的搜索集变化的范围太小,不足以探测到静态条件下位置的记忆效应。另外, Horowitz 和 Wolfe (2003) 也承认无记忆模型的视觉搜索是一种比较强的假设,或许视觉搜索过程中被试还是能记住少量的检测过的项目(或位置),尤其是最近检测过的项目(或位置)。

由此可见,视觉搜索是以有记忆模式(memory driven search model)进行搜索的。工作记忆在视觉搜索过程中以置换取样(sampling with replacement)的方式促进搜索,即通过返回抑制机制,工作记忆会暂时存储曾被检测过的项目(或位置),以防止对这些项目进行再搜索(Klein, 1988)。有记忆模式得到大量证据的支持(Dodd, et al., 2003; Emrich, Al-Aidroos, Pratt, & Ferber, 2010; Klein, 1988; Klein & MacInnes, 1999; Kristjánsson, 2000; Müller & von Mühlenen, 2000; 见综述 Wang & Klein, 2010; 张明, 张阳, 2007)。例如, Klein 最先采用探测范式检测了视觉搜索过程中的返回抑制(Klein, 1988)。实验中,他们首先要求被试完成一个复杂的视觉搜索任务,搜索任务完成过程中出现一个探测刺激,要求被试一看到探测刺激就尽快对其进行反应。探测刺激出现的位置有两种,一种出现在之前视觉搜索序列中刺激出现的位置(on-probe),另一种出现在新的位置(off-probe)。Klein 预测,如果视觉搜索中存在对检测过项目的记忆——返回抑制,那么在最近检测的几个项目上就会存在抑制标记,故对 on-probe 条件下探测刺激的平均反应时要慢于 off-probe 条件。结果证实了此预测,即视觉搜索中确实存在返回抑制现象(又见 Müller & von Mühlenen, 2000)。有记忆模式的视觉搜索还得到了大量眼动证据的支持(Dodd, Van der Stigchel, & Hollingworth, 2009; Klein & MacInnes, 1999; Peterson, et al., 2001),例如, Klein 和 MacInnes (1999)采用眼动技术亦研究发现在视觉搜索过程中,眼跳更多地偏离先前注意过的项目,且这种偏离效应可以追溯到注视点之前的三个项目,这表明眼跳的偏离不是因为瞬间的对最近访问过

的项目的抑制,而是因为对这些项目不需要被重新检测的记忆。

综上所述,在视觉搜索的过程中对曾检测过的项目(或位置)存在记忆效应,通过对这些项目贴上抑制标签,从而避免注意再次检测该项目(或位置),从而提高搜索效率。但要全面了解工作记忆如何通过返回抑制机制在视觉搜索过程中起作用,笔者认为至少还需要回答以下两个问题:(1)工作记忆对被注意过的项目的记忆(返回抑制)是基于客体还是基于位置?(2)工作记忆是否会储存所有被注意过的项目(或位置)?如果不是,会储存多少?

首先来回答第一个问题,对于工作记忆在视觉搜索过程中的记忆效应是基于位置还是基于客体或情境(scene)受到了研究者们的关注(Klein & MacInnes, 1999; MacInnes & Klein, 2003)。例如, Klein 和 MacInnes (1999)考察了视觉搜索情境消失与否对视觉搜索中返回抑制的影响。在实验中,他们首先要求被试在视觉情境中搜索某一特定的靶子,大部分测试的搜索过程中会出现一个探测圆点。主试提前告诉被试如果探测圆点出现,则要停止搜索,快速用眼睛注视探测圆点。探测圆点出现时,之前的视觉情境可能依然呈现(50%)或消失(50%)。结果发现,在视觉情境呈现条件下,眼跳到之前注视过的区域的探测圆点的反应时间明显长于眼跳到未注视过的区域的探测圆点的反应时间,出现了显著的返回抑制现象;而在视觉情境消失条件下,眼跳反应时间并不会受到之前注视点的影响(MacInnes & Klein, 2003 也发现了同样的结果)。然而, Klein 和 MacInnes (1999)及 MacInnes 和 Klein (2003)实验中要求被试用眼睛扫描的方式来搜索目标,视觉搜索是通过外显的注意转移(overt attention shift)来进行的(见综述 Wang & Klein, 2010)。Müller 等采用较为内隐的注意转移(covert attention shift)范式对此问题进行了研究。类似于 Klein 和 MacInnes (1999)的实验,只是对被试没有明显的眼动扫描要求。他们发现只有当视觉情境在探测刺激出现时依然保留的条件下,才会出现返回抑制效应;而在视觉情境消失条件下并没有发现返回抑制效应(Müller & von Mühlenen, 2000)。上述结果都表明,视觉搜索过程中返回抑制的出现依赖于视觉情境存在与否,即他们实验中所发现的返回抑制效应都是基于情

境或基于客体的返回抑制。但前面所述 Kristjánsson (2000) 实验 1 的位置重置的动态条件下(relocation dynamic condition), 靶子总是出现在前一画面(frame)的干扰刺激位置上, 因此在动态变化过程中, 只是位置发生了变化, 而客体并未改变。而如果只是存在对客体的记忆, 则可预测不会出现记忆效应, 这显然与 Kristjánsson (2000) 得到的结果不一致。因此 Kristjánsson (2000) 的结果提示了视觉搜索过程中基于位置的返回抑制的存在, 即在前一画面中抑制了干扰刺激所在的位置, 而当随后画面中的靶子再现在该位置时, 对该位置的抑制效应会增加靶子检测遗漏的概率, 从而表现出 Kristjánsson (2000) 实验 1 中所得到的记忆效应。据此, 似乎可以得出这样的结论, 即视觉工作记忆在视觉搜索中的作用既可以表现为基于位置的返回抑制, 也可以表现为基于客体(情境)的返回抑制。但在做出这样的结论之前, 对 Klein 和 MacInnes (1999)、MacInnes 和 Klein (2003) 及 Müller 等(2000)的实验结果还可以有如下解释: 由于基于位置的返回抑制会扩散到相邻区域, 其强度分布是随着与提示位置的距离的增加而递减的(Bennett & Pratt, 2001), 即抑制是分布在一个区域的, 提示位置上的返回抑制强度最大, 随着与提示位置距离越远, 返回抑制强度越小。在视觉搜索过程中, 之前注视过干扰刺激的位置会通过返回抑制机制而被抑制。在视觉情境保留的条件下, 情境中的刺激能精确地提示抑制的位置, 但在视觉情境消失的条件下精确提示亦随之消失, 多个位置的抑制经扩散后会形成大范围的抑制区域, 因而缩小了 on-probe 与 off-probe 之间的差异, 故导致返回抑制效应消失。需要指明的是此种假设只是一种推测, 尚未证实。但如果此推测成立, 则可以认为视觉工作记忆在视觉搜索中对曾注意过的项目的记忆效应来源于基于位置的返回抑制机制。

接下来回答第二个问题。问题 2 涉及到返回抑制的容量, 可以肯定的是由于视觉工作记忆的容量限制, 不可能所有被注意的项目都会在工作记忆中得到存储。那能存储多少项目呢? 根据 Dodd 等(2009)的一项研究表明, 视觉搜索中被注意过的最近 4 个项目上都存在返回抑制效应, 这表明视觉工作记忆至少能储存 4 个被注意过的项目(或位置)(另见综述: 包燕, 胡克松, 肖小溪,

2006)。

综上所述, 视觉工作记忆会通过返回抑制机制, 避免注意重新检测已检测过的项目(或位置), 以提高视觉搜索效率。但由于视觉工作记忆本身的容量限制, 并非所有被检测过的项目都会被保存。但需要指出的是, 有关视觉搜索中的返回抑制机制的研究大都采用静态视觉搜索任务, 而现实生活中大都是动态视觉搜索情境, 某个空间位置上的物体可能会随着时间变化而变换, 此种情况下对已检测空间的回视可能是完成视觉搜索任务的有效策略。综上所述, 我们认为对已检测空间的记忆在视觉搜索过程中的作用是有限的, 尽管它对产生返回抑制现象起着重要作用(潘毅等, 2007)。

5 结语

由此可见, 工作记忆系统的视觉工作记忆在视觉搜索过程中发挥重要的作用。关于工作记忆对视觉搜索的影响, 另有研究者还从工作记忆系统更高一级的中央执行功能(Baddeley, 1986, 2010)的层面进行了考察。例如 Han 和 Kim (2004) 要求被试完成类似于 Woodman 等 (2001) 的双任务, 所不同的是在 Woodman 等 (2001) 的简单的存储任务的基础上增加一个加工任务。结果发现, 当“记忆+搜索”任务条件下的搜索效率与单视觉搜索任务条件无差别; 而在“加工+搜索”任务条件下, 视觉搜索效率则显著下降, 这表明在视觉搜索过程中需要与工作记忆执行系统相关的资源, 视觉搜索同时加载工作记忆的加工任务会损害视觉搜索的效率。但目前关于中央执行功能对视觉搜索的研究较少, 中央执行如何影响视觉搜索还有待进一步系统的研究。

此外, 近年来一些研究者发现, 不止是储存在工作记忆中的靶子模板会引导注意选择, 连存储在工作记忆中与当前任务无关的记忆表征亦会引导注意选择(Soto, Heinke, Humphreys, & Blanco, 2005; Soto & Humphreys, 2009; Soto, Humphreys, & Heinke, 2006), 且 Soto 等认为这种无关工作记忆表征对视觉注意选择的自上而下的引导是自动化的(Soto, Hodson, Rotshtein, & Humphreys, 2008)。这部分研究在张明和张阳(2007)、潘毅等(2010; 2007)及 Soto, Hodson, Rotshtein 和 Humphreys (2008)的研究综述中均有专门的论述,

因此本文不再赘述。但需要指出的无关工作记忆表征是否总会引导注意偏向到与之匹配的刺激尚存在争议,并非所有研究都发现此引导效应的存在。例如有研究者发现工作记忆表征并不能引导注意(Downing & Dodds, 2004; Houtkamp & Roelfsema, 2006; Houtkamp, Spekreijse, & Roelfsema, 2002; Peters, Goebel, & Roelfsema, 2009)或以一种灵活的方式引导注意(Woodman & Luck, 2007)。目前对不一致结果的解释也存在争议,一些研究者,如 Olivers 等(2009; 2011),将研究结果的差异归因于各自实验所采用视觉搜索类型的不同;而另一些研究者则归因于两者所采用的记忆刺激的属性的不同(Zhang et al., 2010)或受被试策略的影响(Carlisle & Woodman, 2011; Pan & Soto, 2010)。

综上所述,视觉搜索作为人类日常生活中常用的认知功能,可以视为人类选择外界刺激进入人类信息加工系统的一种常用方式。同时它作为一种常用范式,为研究注意的选择功能积累了大量的研究成果。因此视觉搜索在心理学家对人类认知功能的研究中有着重要的地位。而如何从同时作用于人类感觉系统的大量的信息中快速选择相关信息,以优化目标选择,是视觉搜索研究中的核心问题。工作记忆作为一种服务于当前任务信息的存储与加工的认知系统(Baddeley, 1986),在视觉搜索过程中扮演着关键角色。本文通过分析与综合已有的研究成果,试图深入了解工作记忆在视觉搜索过程中起何作用及如何起作用。笔者主要从工作记忆对靶子模板的储存、视觉搜索项目与靶子模板在工作记忆中的匹配及工作记忆对已检测搜索项目的记忆这三个方面进行分析后发现:虽然各方面证据都表明工作记忆确实在视觉搜索过程中起作用,但其作用机制仍存在较多争议。故笔者建议今后研究者可从以下几个方面展开对这一问题研究:(1)当视觉搜索的靶子固定时,靶子模板储存在何处仍缺乏直接证据。如果如 Woodman 等(2007)所推论,靶子模板存储在长时记忆中,那该靶子模板如何引导注意选择视觉情境中的目标?靶子模板与搜索刺激又在何处进行匹配?(2)工作记忆是否是视觉搜索过程中靶子模板与搜索刺激匹配的场所?(3)视觉搜索过程中的返回抑制是基于客体还是基于位置?动态视觉搜索过程中是否依然存在返回抑制?(4)工作记忆

的中央执行功能如何在视觉搜索中起作用?(5)导致无关工作记忆表征对视觉注意引导的不一致研究结果的实质原因?

参考文献

- 包燕, 胡克松, 肖小溪. (2006). 返回抑制的容量研究: 回顾与展望. *心理科学进展*, 14(2), 204-209.
- 潘毅. (2010). 基于工作记忆内容的视觉注意. *心理科学进展*, 18(2), 210-219.
- 潘毅, 许百华, 陈晓芬. (2006). 选择性注意与视觉空间工作记忆的交互作用. *心理科学*, 29(2), 323-326.
- 潘毅, 许百华, 胡信奎. (2007). 视觉工作记忆在视觉搜索中的作用. *心理科学进展*, 15(5), 754-760.
- 张明, 张阳. (2007). 工作记忆与选择性注意的交互关系. *心理科学进展*, 15(1), 8-15.
- Awh, E., Jonides, J., & Reuter-Lorenz, P. A. (1998). Rehearsal in spatial working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24(3), 780-790.
- Awh, E., Jonides, J., Smith, E. E., Buxton, R. B., Frank, L. R., Love, T., et al. (1999). Rehearsal in spatial working memory: Evidence from neuroimaging. *Psychological Science*, 10(5), 433-437.
- Baddeley, A. (1986). *Working memory*. Oxford: Clarendon.
- Baddeley, A. (2010). Working memory. *Current Biology*, 20(4), R136-R140.
- Bennett, P. J., & Pratt, J. (2001). The spatial distribution of inhibition of return. *Psychological Science*, 12(1), 76-80.
- Bundesden, C. (1990). A theory of visual attention. *Psychological Review*, 97(4), 523-547.
- Bundesden, C., Habekost, T., & Kyllingsbæk, S. (2005). A neural theory of visual attention: Bridging cognition and neurophysiology. *Psychological Review*, 112(2), 291-328.
- Carlesimo, G. A., Perri, R., Turriziani, P., Tomaiuolo, F., & Caltagirone, C. (2001). Remembering what but not where: Independence of spatial and visual working memory in the human brain. *Cortex*, 37(4), 519-534.
- Carlisle, N. B., & Woodman, G. F. (2011). Automatic and strategic effects in the guidance of attention by working memory representations. *Acta Psychologica*, 137(2), 217-225.
- Castel, A. D., Pratt, J., & Craik, F. I. M. (2003). The role of spatial working memory in inhibition of return: Evidence from divided attention tasks. *Perception & Psychophysics*, 65(6), 970-981.
- Chelazzi, L., Duncan, J., Miller, E. K., & Desimone, R. (1998). Responses of neurons in inferior temporal cortex during memory-guided visual search. *Journal of Neurophysiology*, 80(6), 2918-2940.

- Chelazzi, L., Miller, E. K., Duncan, J., & Desimone, R. (1993). A neural basis for visual search in inferior temporal cortex. *Nature*, 363(6427), 345–347.
- Chou, W. L., & Yeh, S. L. (2008). Location- and object-based inhibition of return are affected by different kinds of working memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61(12), 1761–1768.
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(1), 87–185.
- Desimone, R., & Duncan, J. (1995). Neural mechanisms of selective visual attention. *Annual Review of Neuroscience*, 18, 193–222.
- Dodd, M. D., Castel, A. D., & Pratt, J. (2003). Inhibition of return with rapid serial shifts of attention: Implications for memory and visual search. *Perception & Psychophysics*, 65(7), 1126–1135.
- Dodd, M. D., Van der Stigchel, S., & Hollingworth, A. (2009). Novelty is not always the best policy: Inhibition of return and facilitation of return as a function of visual task. *Psychological Science*, 20(3), 333–339.
- Downing, P. E., & Dodds, C. M. (2004). Competition in visual working memory for control of search. *Visual Cognition*, 11(6), 689–703.
- Duncan, J. (1980). The locus of interference in the perception of simultaneous stimuli. *Psychological Review*, 87(3), 272–300.
- Duncan, J., & Humphreys, G. W. (1989). Visual search and stimulus similarity. *Psychological Review*, 96(3), 433–458.
- Emrich, S. M., Al-Aidroos, N., Pratt, J., & Ferber, S. (2010). Finding memory in search: The effect of visual working memory load on visual search. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 63(8), 1457–1466.
- Goldman-Rakic, P. S. (1996). Regional and cellular fractionation of working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 93, 13473–13480.
- Han, S. H., & Kim, M. S. (2004). Visual search does not remain efficient when executive working memory is working. *Psychological Science*, 15(9), 623–628.
- Horowitz, T. S., & Wolfe, J. M. (1998). Visual search has no memory. *Nature*, 394(6693), 575–577.
- Horowitz, T. S., & Wolfe, J. M. (2001). Search for multiple targets: Remember the targets, forget the search. *Perception & Psychophysics*, 63(2), 272–285.
- Horowitz, T. S., & Wolfe, J. M. (2003). Memory for rejected distractors in visual search? *Visual Cognition*, 10(3), 257–298.
- Houtkamp, R., & Roelfsema, P. R. (2006). The effect of items in working memory on the deployment of attention and the eyes during visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32(2), 423–442.
- Houtkamp, R., Spekreijse, H., & Roelfsema, P. R. (2002). Items in working memory do not automatically attract attention in visual search. [abstract]. *Journal of Vision*, 2(7), 536.
- Hulleman, J. (2009). No need for inhibitory tagging of locations in visual search. *Psychonomic Bulletin & Review*, 16(1), 116–120.
- Klein, R. M. (1988). Inhibitory tagging system facilitates visual search. *Nature*, 334(6181), 430–431.
- Klein, R. M., & MacInnes, W. J. (1999). Inhibition of return is a foraging facilitator in visual search. *Psychological Science*, 10(4), 346–352.
- Kristjánsson, Á. (2000). In search of remembrance: Evidence for memory in visual search. *Psychological Science*, 11(4), 328–332.
- Logan, G. D. (1978). Attention in character-classification tasks: Evidence for the automaticity of component stages. *Journal of Experimental Psychology: General*, 107(1), 32–63.
- Logan, G. D. (1979). On the use of a concurrent memory load to measure attention and automaticity. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 5(2), 189–207.
- Luck, S. J., & Vogel, E. K. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature*, 390(6657), 279–281.
- MacInnes, J. W., & Klein, R. M. (2003). Inhibition of return biases orienting during the search of complex scenes. *The ScientificWorld Journal*, 3, 75–86.
- McAuliffe, J., Chasteen, A. L., & Pratt, J. (2006). Object- and location-based inhibition of return in younger and older adults. *Psychology and Aging*, 21(2), 406–410.
- Müller, H. J., & von Mühlelen, A. (2000). Probing distractor inhibition in visual search: Inhibition of return. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26(5), 1591–1605.
- Oh, S. H., & Kim, M. S. (2004). The role of spatial working memory in visual search efficiency. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11(2), 275–281.
- Olivers, C. N. L. (2008). Interactions between visual working memory and visual attention. *Frontiers in Bioscience*, 13, 1182–1191.
- Olivers, C. N. L. (2009). What drives memory-driven attentional capture? The effects of memory type, display type, and search type. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35(5), 1275–1291.
- Olivers, C. N. L., Peters, J., Houtkamp, R., & Roelfsema, P.

- R. (2011). Different states in visual working memory: When it guides attention and when it does not. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(7), 327–334.
- Pan, Y., & Soto, D. (2010). The modulation of perceptual selection by working memory is dependent on the focus of spatial attention. *Vision Research*, 50(15), 1437–1444.
- Peters, J. C., Goebel, R., & Roelfsema, P. R. (2009). Remembered but unused: The accessory items in working memory that do not guide attention. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21(6), 1081–1091.
- Peterson, M. S., Kramer, A. F., Wang, R. F., Irwin, D. E., & McCarley, J. S. (2001). Visual search has memory. *Psychological Science*, 12(4), 287–292.
- Possin, K. L., Vincent, F. J., Song, D. D., & Salmon, D. P. (2009). Space-based but not object-based inhibition of return is impaired in Parkinson's disease. *Neuropsychologia*, 47(7), 1694–1700.
- Rossi, A. F., Bichot, N. P., Desimone, R., & Ungerleider, L. G. (2001). Top-down, but not bottom-up: Deficits in target selection in monkeys with prefrontal lesions. [abstract]. *Journal of Vision*, 1(3), 18.
- Rossi, A. F., Bichot, N. P., Desimone, R., & Ungerleider, L. G. (2007). Top down attentional deficits in macaques with lesions of lateral prefrontal cortex. *Journal of Neuroscience*, 27(42), 11306–11314.
- Rossi, A. F., Pessoa, L., Desimone, R., & Ungerleider, L. G. (2009). The prefrontal cortex and the executive control of attention. *Experimental Brain Research*, 192(3), 489–497.
- Solman, G. J. F., Allan Cheyne, J., & Smilek, D. (2011). Memory load affects visual search processes without influencing search efficiency. *Vision Research*, 51(10), 1185–1191.
- Soto, D., Heinke, D., Humphreys, G. W., & Blanco, M. J. (2005). Early, involuntary top-down guidance of attention from working memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31(2), 248–261.
- Soto, D., Hodsoll, J., Rotshtein, P., & Humphreys, G. W. (2008). Automatic guidance of attention from working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(9), 342–348.
- Soto, D., & Humphreys, G. W. (2009). Automatic selection of irrelevant object features through working memory. *Experimental Psychology*, 56(3), 165–172.
- Soto, D., Humphreys, G. W., & Heinke, D. (2006). Working memory can guide pop-out search. *Vision Research*, 46(6-7), 1010–1018.
- Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 12(1), 97–136.
- Treisman, A. M., & Gormican, S. (1988). Feature analysis in early vision: Evidence from search asymmetries. *Psychological Review*, 95(1), 15–48.
- Wang, Z. G., & Klein, R. M. (2010). Searching for inhibition of return in visual search: A review. *Vision Research*, 50(2), 220–228.
- Woodman, G. F., & Arita, J. T. (2011). Direct electrophysiological measurement of attentional templates in visual working memory. *Psychological Science*, 22(2), 212–215.
- Woodman, G. F., & Chun, M. M. (2006). The role of working memory and long-term memory in visual search. *Visual Cognition*, 14(4-8), 808–830.
- Woodman, G. F., & Luck, S. J. (1999). Electrophysiological measurement of rapid shifts of attention during visual search. *Nature*, 400(6747), 867–869.
- Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2003). Serial deployment of attention during visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(1), 121–138.
- Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2004). Visual search is slowed when visuospatial working memory is occupied. *Psychonomic Bulletin & Review*, 11(2), 269–274.
- Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2007). Do the contents of visual working memory automatically influence attentional selection during visual search? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(2), 363–377.
- Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2010). Why is information displaced from visual working memory during visual search? *Visual Cognition*, 18(2), 275–295.
- Woodman, G. F., Luck, S. J., & Schall, J. D. (2007). The role of working memory representations in the control of attention. *Cerebral Cortex*, 17(Suppl 1), i118–i124.
- Woodman, G. F., Vogel, E. K., & Luck, S. J. (2001). Visual search remains efficient when visual working memory is full. *Psychological Science*, 12(3), 219–224.
- Zhang, B., Zhang, J. X., Kong, L. Y., Huang, S., Yue, Z. Z., & Wang, S. P. (2010). Guidance of visual attention from working memory contents depends on stimulus attributes. *Neuroscience Letters*, 486(3), 202–206.
- Zhang, Y., & Zhang, M. (2011). Spatial working memory load impairs manual but not saccadic inhibition of return. *Vision Research*, 51(1), 147–153.

Re-examining the Role of Working Memory in Visual Search

ZHANG Bao

(The Center for Mind and Brain, Education School, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Visual search is a common perceptual task used to study how attention selects a particular object in the visual scene among a large number of distractors. Working memory, which is used to retain relevant information and suppress irrelevant information, has been proved to play a crucial role in visual search process, e.g., maintaining the visual search template, offering the place for matching the search template and visual search items, and preventing attention from re-orienting to the examined items. Based on the relevant evidence reviewed here, it is clear that working memory does play a role in visual search, but how it works still needs further studies.

Key words: working memory, visual search, inhibition of return