



中文阅读中词汇加工与眼动控制的整合模型

李兴珊

Alexander Pollatsek

中国科学院心理研究所

美国马萨诸塞大学

翻译： 包亚倩 中国科学院心理研究所
校对： 王静文 中国科学院心理研究所

声 明

本文件是如下文章的翻译文稿，仅供内部交流及学习使用，无版权，请勿商用。若有表达不准确处，请以原文为准。引用论文时也请引用英文原文。

Li, X., & Pollatsek, A. (2020, July 16). An Integrated Model of Word Processing and Eye-Movement Control During Chinese Reading. *Psychological Review*. Advance online publication.

<http://dx.doi.org/10.1037/rev0000248>

若想了解中国科学院心理研究所阅读与视觉认知实验室最新的研究进展，请访问

<http://eyemind.psych.ac.cn>

目 录

- 1 中文书写系统
- 2 拼音文字阅读中的眼动控制
- 3 中文阅读中的眼动研究
- 4 中文阅读中的词切分
- 5 本研究的目的与动机
- 6 用于模拟的基准数据
- 7 模型的有关假设
 - 7.1 词汇加工和眼动控制的交互作用
 - 7.2 句子阅读中的词汇加工
 - 7.3 眼动控制
- 8 模型结构
 - 8.1 词汇加工模块
 - 8.2 眼动控制模块
 - 8.3 模型实现和参数搜索
- 9 模拟结果
 - 9.1 经典的词的特性影响眼动行为的实验结果拟合
 - 9.2 中文阅读中的眼跳目标选择
 - 9.3 副中央凹预视效应
 - 9.4 歧义字段词切分
- 10 综合讨论
 - 10.1 词切分
 - 10.2 词汇加工与眼动控制之间的关系
 - 10.3 与其他模型的关系
- 11 结论

中文阅读中词汇加工与眼动控制的整合模型

李兴珊 Alexander Pollatsek

中国科学院心理研究所

美国马萨诸塞大学

摘要 本文构建了中文阅读过程中词汇加工和眼动控制的整合模型，以此来探讨中文读者在阅读过程中的一些认知机制。模型包括词汇加工模块和眼动控制模块，词汇加工模块在注视点周围的阅读知觉广度范围内获取新信息。由于中文文本中没有词间空格，该模型在使用交互激活框架来模拟词汇加工过程的基础上对中文阅读中的词切分问题提出了新的假设。知觉广度范围内的汉字可以组成的词汇都会被激活，相互竞争唯一的胜出者。当一个词在竞争中胜出后，该词就会被识别同时完成词切分。眼动控制模块利用词汇加工模块提供的词单元和字单元激活的信息来决定眼睛什么时候移动，移动到哪里。该模型估计了一次注视可以加工的汉字数量，之后执行眼跳到已加工范围之外。模型成功地模拟了中文阅读中词汇加工和眼动控制之间关系的重要研究发现：即中文读者如何进行眼跳目标的选择、中文读者如何切分歧义字段及中文读者在句子阅读过程中如何利用副中央凹视觉区进行信息加工。该模型着重解释了中文读者在阅读过程中如何解决词切分和眼跳目标的选择等重要问题。

关键词 中文阅读；眼动；模型；词汇加工；词切分

在阅读过程中，熟练读者每秒钟可以快速移动眼睛 4~5 次，阅读速度每分钟可以达到 250 个词 (Rayner, Pollatsek, Ashby, & Clifton, 2012)。对于读者如何做到这一点，尤其对中文读者在阅读没有词间空格的中文时如何加工的认知机理却不是很清楚。熟练的中文读者可以与大多数拼音文字读者保持一致的阅读速度 (Liversedge, Drieghe, Li, Yan, Bai, & Hyona, 2016)。

所有阅读模型都必须认真考虑一些特定的眼动模式。首先，读者试图了解他们所读的内容时，眼睛会迅速地在文本中移动，眼动之间会有短暂的停留，此时眼睛相对稳定，称为注视 (fixations) (Ishida & Ikeda, 1989; Wolverson & Zola, 1983)。阅读过程中，眼睛会以每秒 4~5 次的速度进行快速运动，使眼睛从一个位置重新定位到另一个位置，称为眼跳 (saccades) (Rayner, 1998, 2009a)。眼跳过程中，读者几乎看不到任何内容。阅读过程就像幻灯片放映一样，信息以每秒 4~5 次的速度从注视点提取出来。注视时间、注视位置以及注视顺序 (眼动轨迹) 都会受到支持文本理解的潜在认知过程的影响。这不仅适用于拼音文字阅读的研究，也适用于中文阅读的研究，我们很快就会讲到这个。

然而，迄今为止，大多数阅读过程中的眼动控制模型都致力于解释拼音文字阅读过程中的加工

情况。这是比较遗憾的，因为还不清楚支持拼音文字阅读的模式是否足以解释其他非拼音文字语言的加工过程。在这篇文章中，我们报告了解释中文阅读过程中一些眼动行为的计算模型，将其称为中文阅读模型 (Chinese reading model, CRM)。但是，我们必须提醒读者，这个模型不能解释与阅读相关的所有眼动行为。为了使研究问题更聚焦，我们没有考虑句法加工和语义加工等高级认知加工过程。因此，本研究将聚焦于知觉广度范围内的词是如何被加工的以及其与中文阅读过程中眼动控制之间的关系。对于一个模型来说，这本身就是很大的问题。

在接下来的章节中，我们将简要介绍中文阅读的一些基本特征，之后回顾拼音文字阅读中眼动控制的重要发现和模型，以此与中文阅读中的眼动控制进行对比。然后我们会介绍与该模型相关的中文阅读中的一些重要发现，其中一部分发现对提出模型的假设起着重要作用，另一部分则提供了测试模型的基准数据。然后我们会阐述构建中文阅读眼动控制模型的动机、模型的重要假设、模型的结构以及如何实现模型的相关内容。然后，我们将介绍模型对中文阅读中的一些重要的眼动行为的模拟结果。最后，我们将讨论该模型如何增加我们对中文阅读特异性和阅读普遍性的认知机理的理解。

1 中文书写系统

世界上超过 16 亿人使用现代中文书写系统,包括中国、新加坡等。在中国大陆,不同地区的读者使用普通话或地区方言(如粤语)作为口语,但都使用相同的中文书写系统。与许多拼音文字书写系统一样,中文阅读也遵从从左到右、从上到下的阅读方向。

中文书写系统有很多独特的特性。首先,最明显的一个特点是中文是以汉字而不是字母为单元进行书写的。常用汉字有 5000 多个,每个汉字代表一个音节,呈现在一个类似方框的区域中,汉字之间有较小的空格。汉字的复杂程度可以通过笔画的数量来衡量,一些汉字只有一个笔画(如“一”),而一些汉字有超过 20 个笔画(如“罐”)。大多数汉字与其他汉字结合可以组成许多不同的词汇,比如说,汉字“人”可以组成 406 个双字词, 392 个三字词, 549 个四字词, 418 个超过四个字的词语(Lexicon of Common Words in Contemporary Chinese Research Team, 2008)。

其次,中文文本中词与词之间没有空格分隔。最后,中文词很短,大部分词是 1~2 个汉字的长度。《现代汉语常用词表》(2008 年)收录的 56,008 个词条中,单字词占 6%,双字词占 72%,三字词占 12%,四字词占 10%,超过四字的不足 0.3%。

最近许多研究都在考察中文阅读的认知机制。研究中文阅读的独特特性有助于回答其他语言根本无法回答的问题。例如,中文读者如何确定词边界,这在英文阅读中是不存在的问题。事实上,一些研究者认为,“对中文阅读的研究本身已经开始定义和塑造一些有关人类书面语言理解的关键问题,这些问题在该领域仍未得到解答”(Liversedge, Hyona, & Rayner, 2013, p. S2)。基于这些原因,中文阅读这一话题在过去的几十年里引起了相当多的关注。这些研究提出了中文阅读可能与拼音文字阅读不同的具体假设。

2 拼音文字阅读中的眼动控制

我们先回顾拼音文字阅读中眼动控制的重要发现和模型,以便与中文阅读中的眼动控制作比较。首先,眼动控制受到词汇加工过程的影响。关于何时移动眼睛,研究发现注视时间受到词频(语料库中出现的次数)、词长(字符数量)和预测性(词

出现之前根据给出的句子语境信息预测某词的概率)的影响。在之后的内容中,单个注视的持续时间称为注视时间(fixation duration)、第一次注视词的持续时间称为首次注视时间(first fixation duration, FFD)、从首次注视点开始到注视点首次离开当前兴趣区之间的持续时间称为凝视时间(gaze duration)。以往的研究发现高频词和/或预测性高的词注视时间比低频词或低预测性词要短(Rayner & Duffy, 1986; Rayner & Well, 1996)。长词的凝视时间比短词长(Just & Carpenter, 1980),主要是因为长词的注视点比短词多。

另一个重要的问题是阅读过程中眼睛的注视位置。许多研究表明,拼音文字阅读中眼跳目标的选择通常受到词长等低水平视觉特征的影响。对一个词的首次注视位置通常会落在偏好注视位置(preferred viewing location, PVL; Rayner, 1979, 2009b),位于词中心偏左的位置。英文读者(像大多数拼音文字)可以选择 PVL 作为起跳位置,因为词跟词之间有空格,词边界明显。

在过去的几十年里,人们提出了很多模型来研究阅读过程中的眼动控制,如 E-Z 读者模型(Reichle, Pollatsek, Fisher, & Rayner, 1998); SWIFT 模型(Engbert, Nuthmann, Richter, & Kliegl, 2005), Glenmore 模型(Reilly & Radach, 2006), OB1-Reader 模型(Snell, van Leipsig, Grainger, & Meeter, 2018; 综述见 Reichle et al., 2003)。这些模型对内隐注意、视觉加工、词汇加工和眼球运动控制如何共同决定阅读过程中眼睛移动的时间和位置提出了不同的理论假设。但是,正如我们能看到的,这些模型与中文阅读中的眼动模式只有较弱的关联。在这里我们不讨论所有的模型,只讨论一个较为成功的模型(E-Z 读者模型)。这可以明确中文阅读中的眼动控制模型需要改变哪些内容。在综合讨论部分,我们将回顾其他模型,看看它们如何与中文阅读中的一些特性相匹配。

E-Z 读者模型的重要假设是,阅读主要是以序列加工的方式从左到右对每个词进行加工,并相应地移动眼睛(Reichle et al., 1998)。如果对当前注视点的词 n 加工完成,眼睛会指向下一个词 $n+1$ 。如果一个注视点可以加工多个词,那么眼睛会指向词 $n+2$ 或偶尔指向词 $n+3$ 。此外,无论选择哪个词,接下来的注视点都会落到被选词的中央位置。还有其他一些假设与词频、词长和受到上下文语境限制的

预测性有关(Reichle et al., 1998)。正如您所预期的那样, 词的平均阅读时间会随着其频率的增加、长度的减少以及其在文本中出现的概率的增加而减少。还有其他一些假设是关于读者不能在给定的时间内完成词汇识别的情况。读者是否会重新注视该词? 比如, 一个词很长, 读者可能会重新注视它。那么读者就不得不对该词触发另一个眼动, 也就是对词的再注视(refixations)。

在这个模型中, 有两个核心概念: (1)眼睛会加工每个注视点的一个词(n), 有时候是两个词(n 和 n+1), 极少数时候是三个词(n、n+1、n+2); (2)眼睛通常会注视下一个还没加工的词, 但有时如果还没成功识别这个词, 就不得不停留在这个词上。如前所述, 这个模型成功的解决了拼音文字眼动研究的许多问题。

但是, 需要搞清楚的是, 它不能作为中文阅读眼动模型的基础。存在两个重要的问题: 第一, 中文词和词之间没有空格。然而即使中文读者不能借助词间空格将汉字切分为词, 他们还是以词为单位进行加工(Li, Liu et al., 2015; Li, Rayner, & Cave, 2009); 和有空格作为词首尾标记相比, 中文读者如何做到这一点显然是个复杂的问题。第二, 没有词间空格来帮助引导确定他们眼睛移动的位置, 中文读者如何知道眼睛该移动到哪儿? 像E-Z阅读者模型可以假定一个词在一个给定的位置开始和结束, 因此下一个词的中央位置可以成为眼跳目标的选择。但对中文读者来说这是一个不可能完成的任务, 因为文本中没有明显的线索表明词的首尾位置, 不清楚词的中央在哪儿。本文试图回答这两个问题。

3 中文阅读中的眼动研究

过去几十年, 研究者对中文阅读中的眼动行为进行了很多研究。对中文阅读过程中眼动控制的诸多方面已有所了解。中文阅读中眼动控制的某些方面与拼音文字阅读相似。比如, 中文读者也以向前眼跳为主, 但是偶尔会出现回视眼跳(Zang et al., 2011)。

有一个不同之处在于, 中文阅读中的平均注视时间要比英文阅读及其他大多数欧洲语言更长(Liversedge et al., 2016; Rayner, Li, Juhasz, & Yan, 2005)。例如, Liversedge, Drieghe, Li, Yan, Bai, and Hyona (2016)要求英语母语、汉语母语和芬兰语母

语读者阅读各自语言的相同内容的句子(中文文本由英文文本翻译而来)。他们发现, 母语为汉语的读者(245 ms)比母语为英语的读者(207 ms)平均注视时间要长。由于中文词长度较短(至少汉字数量与字母相比), 中文读者的跳读概率(47%)相比英文读者(36%)更高, 中文读者的眼跳长度(3.19 汉字)比英文读者的(8.53 字母)要短。

和拼音文字阅读一样, 词汇属性也会影响中文阅读的阅读时间。高频词或高预测性词的阅读时间(包括首次注视时间和凝视时间)要比低频词或低预测性词短(Wei, Li, & Pollatsek, 2013; Yan, Tian, Bai, & Rayner, 2006)。长词的凝视时间和总注视时间要比短词更长(Li et al., 2011)。Li, Liu 和 Rayner (2011)等人发现词频等词汇属性也会影响跳读概率。汉字是中文阅读中最明显的视觉单位, 许多研究表明汉字属性也会影响眼动行为。比如说, 笔画数少的汉字注视时间较短, 通常会被跳读(Li, Bicknell, Liu, Wei, & Rayner, 2014; Yang & McConkie, 1999)。Li (2014)等人的一个语料库分析研究系统地考察了中文阅读中词汇属性和汉字属性如何影响眼动行为。结果显示, 排除汉字属性的影响时, 词汇效应仍然存在, 这表明词汇加工在中文阅读中扮演着重要的角色。

当读者注视一个给定的位置时, 只能在注视点周围的有限区域内有效地获取信息, 通常称之为知觉广度(Perceptual span, Rayner, 1998, 2009a)。Inhoff and Liu (1998)等人利用移动窗口范式考察了中文阅读的知觉广度范围。在他们的实验中, 被试只能阅读注视点周围窗口内的汉字, 窗口外的汉字均被非词符号“X”所掩蔽。实验中操纵了窗口大小, 窗口随着眼睛的移动而移动。当窗口大小较小时, 与自然阅读相比阅读速度会明显降低。知觉广度是由最接近自然阅读速度的最小窗口大小所决定的, 中文阅读中的知觉广度为注视点左侧一个汉字到注视点右侧三个汉字。英文阅读中的知觉广度为注视点左侧 3~4 个字母, 注视点右侧 14~15 个字母(McConkie & Rayner, 1976; Rayner, Well, & Pollatsek, 1980; McConkie & Rayner, 1975; Rayner, Well, Pollatsek, & Bertera, 1982)。

中文阅读的知觉广度范围通常不仅包括当前注视的词, 还包括右侧至少 1~2 个词, 说明中文读者可以通过副中央凹视觉区获取注视点右侧的信息。使用边界变化范式的副中央凹预视效应证实了

这一观点(Schotter, Angele, & Rayner, 2012 for a review)。边界变化范式中, 在读者的眼睛越过边界之前, 目标位置呈现的是预视刺激, 一旦读者的眼睛跳过边界时, 目标刺激立即替代目标位置上的预视刺激。当目标刺激与预视刺激一致时目标词的阅读时间要比不一致条件更短(Balota, Pollatsek, & Rayner, 1985; Rayner, 1975), 表明读者可以利用副中央凹视觉区获取预视信息。这一效应也存在于中文阅读当中(Gu, Li, & Liversedge, 2015; Liu, Inhoff, Ye, & Wu, 2002; Yan, Richter, Shu, & Kliegl, 2009; Yang, Wang, Xu, & Rayner, 2009; Yen, Radach, Tzeng, Hung, & Tsai, 2009)。此外, 研究者还观察到预视词与目标词共享语音信息或语义信息时的预视效应(Liu et al., 2002; Pollatsek, Tan, & Rayner, 2000; Tsai, Lee, Tzeng, Hung, & Yen, 2004; Yan et al., 2009; Yen, Tsai, Tzeng, & Hung, 2008)。再加上中文阅读中经常出现的跳读, 这些研究结果均表明, 副中央凹视觉区在一定程度上甚至完全可以加工注视词右侧的词。

还有一些证据表明, 中文读者的眼动轨迹与英文读者有所不同。英文读者通常选择偏好注视位置作为眼跳落点位置(词中央偏左的位置), 这在英语等语言中是可能的, 因为英文阅读中读者可以使用副中央凹视觉区获取词长信息, 从而帮助读者将眼睛移动至偏好注视位置。但是没有词间空格的中文阅读中读者如何选择眼跳落点位置呢? 一些研究表明, 中文阅读的 PVL 曲线呈扁平状(PVL 曲线表示词中首次注视落在各字母上的频率) (Tsai & McConkie, 2003; Yang & McConkie, 1999), 后来的研究发现 PVL 曲线峰值出现在词首位置(Li et al., 2011; Yan, Kliegl, Shu, Pan, & Zhou, 2010; Zang, Liang, Bai, Yan, & Liversedge, 2013), 没有研究表明中文阅读中 PVL 曲线会出现在词中央的位置, 这表明中文读者不像英文读者偏好将眼跳落到词中央位置。

为了进一步研究这个问题, Li (2009)等人在同一个句子框架中设计了两字词条件和四字词条件, 如果中文读者将词中央作为眼跳目标选择的位置, 那么四字词条件下的 PVL 曲线峰值相比双字词条件会更靠右。然而, 与这种预期相反, 四字词条件下的 PVL 曲线和双字词条件下的 PVL 曲线相似(两字词条件和四字词条件下, 平均落点位置分别为目标词左侧 0.98 和 0.99 个汉字)。这项研究结果表明,

中文读者不会选择词中央位置作为眼跳落点位置。

然而, Yan, Kliegl, Richter, Nuthmann 和 Shu (2010)提出了不同的观点。他们根据目标词上有一个注视点还是一个以上注视点将试次分为两组。结果发现, 目标词上只有一个注视点时, PVL 曲线峰值在词中央的位置上; 目标词上有一个以上注视点时, PVL 曲线峰值在词首的位置上。基于这一发现, 他们认为如果中文读者能够利用副中央凹视觉区完成词切分, 读者会选择词中央位置作为眼跳落点位置。如果不能完成词切分, 读者会选择词首的位置。这一观点似乎很有趣, 但是 Li 等人(2011)认为 Yan, Kliegl, Richter 等(2010)的结果并不一定能够支持他们的结论。对该结论的另一种解释是, 读者可能偶然地注视在一个词的中央位置, 这样读者可以在一次注视中完成对该词的加工, 从而减少再注视的概率。为了具体地说明这一点, Li (2011)等人利用一个不基于词的眼跳目标选择模型(比如, 眼跳长度固定)进行了模拟, 产生了与 Yan, Kliegl, Richter 等人(2010)所观察到的结果非常相似的模式。另一项研究表明, 即使中文读者阅读的是不能组合成词的一串随机汉字, PVL 曲线也与 Yan, Kliegl, Richter 等人(2010)的结果相似。综上所述, 没有证据表明中文读者在阅读中文时, 会把眼跳目标位置选择在一个词的特定位置上。

最近, Li 等人提出了基于加工效率的策略来解释中文阅读中眼跳目标的选择(Li et al., 2011; Wei et al., 2013)。根据这一策略, 读者首先尝试在给定的注视点上加工尽可能多的信息, 当一个注视位置的加工效率降低到一定程度时, 眼睛将移动到未处理的信息位置。后来的研究验证了这一策略的一些重要预测(Li, Liu et al., 2015; Wei et al., 2013)。比如说, Wei, Li 和 Pollatsek (2013)发现高频词的眼跳长度要比低频词的眼跳长度更长。Liu, Reichle 和 Li (2015)表明, 限制副中央凹加工会降低眼跳长度的词频效应大小。也就是说, 这些研究的总体结果表明, 中文读者在注视点右侧获得的汉字信息越多(从注视点的词开始计算), 他们的眼跳长度会更长。因此, 加工难度小的词会被快速加工并有更长的眼跳长度。但是, 如果副中央凹视觉加工受到干扰, 高频词和低频词之间的眼跳长度不会有显著差异。

总的来说, 与英文阅读和其他拼音文字阅读相比, 中文阅读中的眼动控制具有许多独特特性。因

此, 本文试图利用中文的独特特性, 进一步揭示中文阅读以及它与其他语言阅读的不同之处。

4 中文阅读中的词切分

即使没有明显的词边界信息, 中文读者在阅读中文时没有表现出任何困难。一些研究表明, 一般流利的中文读者通常在1分钟内阅读400个汉字(或260个词), 英文读者和中文读者阅读相同内容的文本时所花费的时间是相似的(Liversedge et al., 2016; Sun, Morita, & Stark, 1985)。这表明中文读者在阅读过程中一定有一套非常高效的词切分认知机制。

即使没有明确的空格作为词边界, 许多研究也表明词在中文阅读中具有心理现实性。首先, 和英文阅读一样(Reicher, 1969), 中文阅读也存在词优效应。相比无意义的汉字串, 中文读者可以更快识别一个词中特定位置的汉字(Cheng, 1981; Shen & Li, 2012)。词优效应表明“词”在阅读中是作为一个整体进行加工的。其次, 如果干扰读者使其不能同时阅读属于一个词的所有汉字, 也会降低阅读效率(Bai, Yan, Liversedge, Zang, & Rayner, 2008; Li, Gu, Liu, & Rayner, 2013; Li, Zhao, & Pollatsek, 2012)。例如, Bai, Yan, Liversedge, Zang 和 Rayner (2008)等人发现词之间加入空格时与正常文本阅读条件下的阅读效率没有显著差异。但是, 在一个词内部的字与字之间加入空格时, 阅读效率显著下降。最后, 一些研究表明, 在中文阅读中, 词边界信息会影响汉字识别和注意分配(Li & Logan, 2008; Li & Ma, 2012; Li & Pollatsek, 2011; Li et al., 2009; Zang, Fu, Bai, Yan, & Liversedge, 2018)。比如说, 在 Li, Rayner 和 Cave (2009)等人的研究中, 中文读者快速浏览四个汉字并尽可能多的报告所看到的汉字。四个汉字在四字词条件下组成一个词, 在双字词条件下组成两个词(前两个汉字组成一个词, 后两个汉字组成另一个词)。在四字词(一个词)条件下, 读者可以准确报告所有四个汉字, 但在双字词条件下, 往往只能报告前两个汉字。结果表明, 中文阅读中存在序列加工过程, 属于同一个词的汉字加工速度相同, 属于不同词的汉字则按序列方式加工。这些研究表明, 和拼音文字阅读一样, 在中文阅读中“词”具有心理现实性。

拼音文字阅读中, 大多数理论都认为词间空格在词切分过程中起着重要作用。这就提出了一个问

题, 如果没有词间空格, 中文读者如何进行词切分? Li (2009)等人基于交互激活框架提出了中文阅读中的词切分和识别的计算模型。根据 Li (2009)等人的模型, 对知觉广度范围内的汉字加工是平行进行的, 加工效率受到离中央凹的距离和视觉注意的影响。代表汉字的加工单元的激活, 会传送到词的加工单元, 并刺激激活相对应的词, 被激活的词又反过来影响字的识别。这个模型有如下重要假设: 首先, 词的识别与切分是一个统一的过程, 二者是不可区分的。只有当词识别出来时, 词才被切分开来。第二, 落在知觉广度内字平行加工。但是, 这些字的识别效率受到视觉注意的影响。离注视点距离越远, 识别效率越低。第三, 词的识别是一个序列的过程。在词的识别单元, 一次竞争过程中只能有一个词胜出。第四, 当一个词被识别后, 刚刚识别的词和字所对应的单元被抑制, 然后再开始下一轮的竞争, 从而开始下一个词的识别过程。

5 本研究的目的是与动机

在本节中, 我们将简要总结在前几节中提到的重要发现, 并陈述当前研究的目的。如上所述, 研究者提出了很多模型来模拟拼音文字阅读中读者的眼动行为。这些模型激发了很多关于阅读的新研究, 从而加深了我们对阅读过程的基本认知加工的理解。然而, 到目前为止, 所有这些模型都致力于解释英语和德语等拼音文字书写系统所涉及的认知过程。因此, 目前尚不清楚不同书写系统的读者在多大程度上使用相同或不同的加工过程来阅读文本。

以往的拼音文字阅读中的眼动控制模型(如E-Z 读者模型、SWIFT 和 Glenmore 等等)很难用来模拟中文阅读中的眼动行为。这些模型通常假设词汇加工在何时移动眼睛和移动到哪儿这个问题上起着重要作用。在大多数模型中, 通常假设词间空格在词切分中起重要作用, 因此他们强调词边界在眼动控制中的作用。但是在中文阅读中没有词间空格或其他明显的词边界信息, 因此很难将这些模型推广到中文阅读中。一些模型曾尝试模拟中文阅读中的眼动行为: Rayner, Li 和 Pollatsek (2007)将E-Z 模型扩展到中文阅读中, 基于模拟结果发现词频、词长等词汇信息在中文读者的眼动控制中发挥着重要作用。这个模型假设中文读者像英文读者那样在阅读文本时利用副中央凹视觉区获取词边界

信息。但是之后的研究表明事实并非如此(Li et al., 2011; Liu, Reichle, & Li, 2016)。总而言之, 尽管这项工作表明可以使用E-Z阅读者模型来解释中文阅读中眼动控制的某些方面, 但是由于模型没有考虑词切分问题, 价值非常有限。显然, 需要更多的建模工作来解释中文读者的眼睛移动位置及其与词切分之间的关系。

以往对中文阅读的建模工作不能用来模拟中文阅读中的所有眼动行为。一些模型的提出主要是解决汉字识别问题(Perfetti, Liu, & Tan, 2005; Yang, Wang, Shu, & Zevin, 2011)。还有一些模型只能用来解决词切分问题, 如Li等人(2009)所提出的模型。他们提出的词切分模型用来解释整词报告任务中的词切分问题, 只模拟了四字词的数据, 而不是完整的句子。另外, 模型只模拟了整词报告任务中的准确率, 没有模拟自然阅读任务中的阅读时间。正如Reichle和Yu(2018)所提出的那样, 这个模型是非常有限的, 只能解释中文阅读过程中的一部分。因此, 需要一个新的模型来模拟句子阅读中的眼动行为。

本文提出的新模型可以模拟自然阅读情境下的整句加工。为了模型方便处理眼动数据, 需要一些新的假设将词切分假设和眼动控制假设结合起来。

6 用于模拟的基准数据

本文所提出的模型致力于考察中文句子阅读中词汇加工过程以及这一加工过程与眼动控制之间的关系。因此, 我们主要对中文阅读中与这些问题相关的研究进行模拟, 来评估该模型是否能够预测中文阅读中的一些眼动行为。当然, 中文阅读中还有许多重要的发现, 如汉字加工和语义加工(Perfetti et al., 2005; Perfetti & Tan, 1998; Perfetti et al., 2005; Perfetti & Tan, 1998)。但是这些发现与当前的模型并没有紧密的联系, 因此, 在这里我们没有对这些发现进行模拟。

第一, 我们模拟了眼动控制模型的经典效应(词频效应、预测性效应和词长效应)。大多数拼音文字书写系统的眼动控制模型都模拟了这些效应(Engbert et al., 2005; Reichle et al., 1998), 并提出所有的眼动控制模型都应该能够模拟这些效应(Engbert et al., 2005)。

第二, 我们模拟了中文阅读中有关眼跳目标选

择的发现。具体来讲, 我们模拟了中文读者在没有词间空格的帮助下如何进行眼跳目标的选择。一个中文阅读模型必须解释中央凹加工负荷对眼跳长度的影响。一些研究发现高频词的眼跳长度比低频词要长(Li et al., 2011; Liu et al., 2015; Wei et al., 2013)。另外, 有研究表明长词的眼跳长度要比短词的眼跳长度更长(Li et al., 2011; Wei et al., 2013)。模型还需要模拟副中央凹加工影响眼跳目标选择的发现, 即当读者看不到目标词右侧的汉字时目标词频率对眼跳长度的影响要比读者能够看到时的影响要小(Liu et al., 2015)。

第三, 我们模拟了中文阅读中有关副中央凹加工的重要发现, 即预视效应。中文阅读的研究发现, 预视词与目标词不一致时阅读时间要比一致条件长(Yang et al., 2009; Yen et al., 2009), 这表明读者可以通过副中央凹视觉区进行词汇加工。当一个词在副中央凹视觉区中完成了一定程度的加工后所需的识别时间更少。由于读者如何加工知觉广度范围的信息一直是过去几十年来研究的热点问题, 因此一个成功的阅读中的眼动控制模型应该能够模拟上述研究发现。

第四, 我们模拟了中文读者如何切分歧义字段的研究发现。在中文文本中, 因为词和词之间没有空格, 词边界有时存在歧义, 可以采用多种方式对汉字串进行切分。许多研究考察了关于中文读者如何切分歧义字段的问题(Ma, Li, & Rayner, 2014; Yan & Kliegl, 2016; Yen, Radach, Tzeng, & Tasi, 2012)。模型也需要对这些发现进行模拟。

7 模型的有关假设

主要假设是基于先前对中文阅读的研究结果所提出来的, 这些假设与拼音文字阅读和中文阅读中普遍重要且已经验证的假设一致。

7.1 词汇加工和眼动控制的交互作用

先前的研究表明, 在拼音文字阅读和中文阅读中, 词汇加工在眼动控制中都起着非常重要的作用(Rayner, 1998, 2009a; Zang et al., 2011)。与拼音文字阅读模型相比, 有一个非常重要的区别在于, 由于没有词间空格, 中文读者需要额外的资源来进行词切分(Li et al., 2009; Ma et al., 2014)。因此, 有必要将词汇加工和眼动控制放在一个模型中, 以便更好地理解词汇加工和眼动控制之间复杂的交互作用。在当前的模型中, 我们将词汇加工和眼动控制

相整合，以期理解词汇加工状态和汉字加工状态如何影响中文阅读中眼睛移动的时间和移动的位置(Li et al., 2011; Wei et al., 2013)。

7.2 句子阅读中的词汇加工

该模型在一个注视点只加工有限数量的汉字，随着眼睛的移动，模型从知觉广度范围内获取新信息。当一个词被识别出来时，所有属于该词的汉字将从模型的加工部分(下一节会定义，这部分称为词汇加工模块)移除掉。通过这种方式，句子里的所有汉字会通过组块的方式进行加工，直到句子中的所有汉字全部完成加工。

对于模型在给定时间内要加工的有限数量的汉字，我们采用了交互激活模型(IAM; McClelland & Rumelhart, 1981)的大部分重要假设来模拟词汇加工过程。之所以这样做是因为交互激活模型的基本假设已经被证实可以用来解释许多认知活动，如视觉文字加工、出声朗读、阅读过程中的眼动控制和言语知觉等(McClelland & Rumelhart, 1981; Coltheart, Rastle, Perry, Langdon, & Ziegler, 2001; Reilly & Radach, 2006; McClelland & Elman, 1986)。这些假设也被成功地用于一个模拟中文阅读中的词汇加工和词切分的模型当中(Li et al., 2009)。根据许多阅读模型的实践经验(McClelland & Rumelhart, 1981)，当前模型的结构是在设计模型时设置好的，不像认知神经网络模型那样需要进行学习(Seidenberg & McClelland, 1989)。这样的模型可以让人们更好地理解人类认知系统的功能结构。

中文阅读有很多独特特性，因此我们需要提出一些新的假设来保证交互激活模型(为英文词识别而开发的)可以解释中文句子阅读中的词汇加工过程。第一个明显的特点是中文词之间没有空格，因此中文读者无法利用低水平视觉信息获取词边界信息。原始的交互激活模型只能识别4个字母的词。为了解决中文句子阅读中没有词间空格的问题，模型需要在阅读过程中进行词切分。

模型的输入为一连串汉字，所以知觉广度范围内可能有一个词、两个词，甚至更多的词。另外，所有未识别的词的长度在被识别之前是未知的。为了解决这些问题，目前的模型假设词汇加工和词切分是一个统一的过程。知觉广度范围内的所有汉字都是平行加工的，由激活的汉字组成的所有可能的词(位置特定)也会被激活，空间上重叠的词以唯一胜

出者的竞争方式完成一个给定词的识别。由于被激活的词包括所有可能由激活汉字组成的词，所以激活词的 lengths 和起始位置都可以不同。当一个词在竞争中胜出后，它就被识别出来了，也就知道了它的首尾位置，那么这个词就从汉字串中切分出来了。竞争就像这样以序列加工的方式进行下去，直到句子中的所有词都被识别出来。

中文阅读与英文阅读及其他拼音文字阅读的另一个区别是，中文有5000多个汉字，汉字具有各种各样复杂的结构。原始的交互激活模型中，在每个字母位置上都使用了特征检测器。相反，我们假设对汉字的自下而上的识别是通过模版匹配进行的，这种方法在物体识别研究中得到了广泛应用(Brunelli, 2009; Brunelli & Poggio, 1997)。待识别的图像与存储的物体表征模版进行相似性比较，并将待识别的对象识别为最接近的匹配对象。在当前的模型中，将输入的汉字图像与以汉字为单位进行表征的汉字模版进行比较。

7.3 眼动控制

之前的研究均表明眼睛何时移动和移动到哪里的决定往往是独立进行的(Rayner & McConkie, 1976; Rayner & Pollatsek, 1981)，在此我们也做出相同的假设。

当前的模型假设两种眼动机制共同工作以确定眼睛何时移动。首先，对当前注视点的词汇加工情况影响眼睛移动的时间。对当前注视词的加工越深，启动眼动运动所需的时间就越少。因此，在一个位置上所花费的注视时间受到加工注视词所花费的时间的影响，不过并不是完全相等的。其次，眼动机制存在自主控制成分，即使在一个注视点上没有加工任何信息，一段时间后眼睛也会移动。

对于眼睛移动的位置，我们采用基于加工效率的策略(Li et al., 2011; Wei et al., 2013)来模拟眼跳目标的选择。根据这个策略，中文读者会估计在一个注视点上能够加工的信息量，然后把眼睛移动到该注视点之后的汉字位置上。

8 模型结构

当前模型中主要有两个模块：词汇加工模块和眼动控制模块(见图1)。词汇加工模块加工知觉广度范围内的词，眼动控制模块决定眼睛移动的时间和位置。两个模块实时互动联系，因此不是相互独

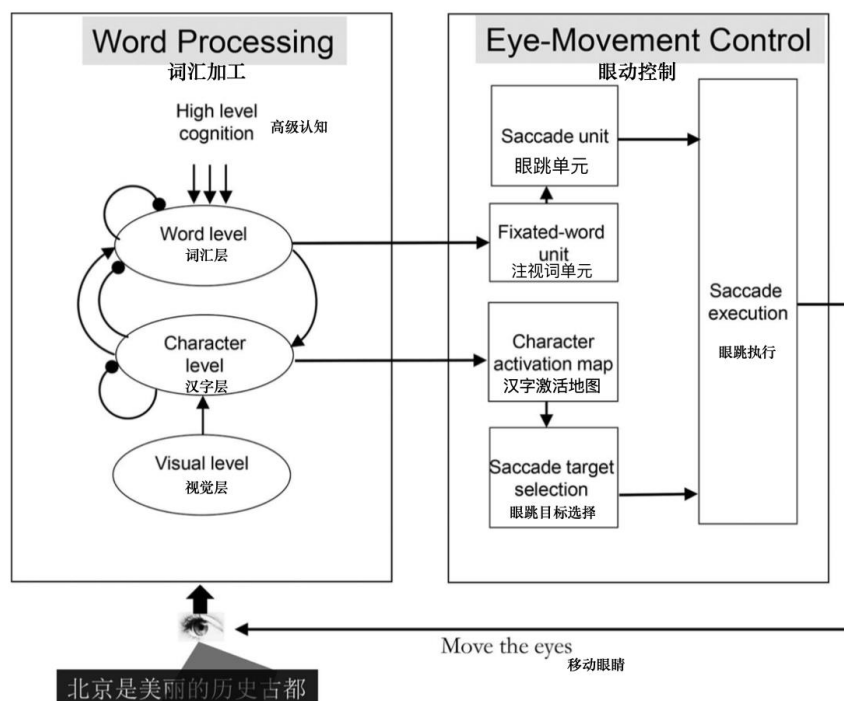


图 1 模型架构示意图。(两个模块之间的箭头表示模块之间的联系。在词汇处理模块中，带箭头的线表示激励性连接，带圆圈的线表示抑制性连接。)

立的。词汇加工模块向眼动控制模块提供词汇加工和汉字加工情况的实时信息，使模型能够利用这些信息来决定眼睛的移动时间和位置。眼动控制模块向词汇加工模块提供眼动信号，信号包括眼睛移动的时间和位置。词汇加工模块一旦收到移动眼睛的指令，知觉广度范围便移动到由眼动控制模块指定的新位置上。

8.1 词汇加工模块

词汇加工模块的基本结构采用了交互激活模型的结构，也有些改动内容，比如将字母层改为汉字层。有三个单元的假设层级：视觉信息、汉字层、词汇层。这三个层级单元构成一个网络，不同层级单元之间和各个层级单元内都有联系。对于每类单元，存在对应每个项目的节点。例如，在汉字层，在每个位置都有可能被激活的一系列对应的汉字节点。每一个节点都有一个激活值，对应于该节点出现在特定位置的可能性。除了前馈连接，不同层级之间也有反馈连接。一些连接是激励性连接，即一个节点的激活会增加连接接收者的激活；其他连接是抑制性连接，即一个节点的激活会降低连接接收者的激活。在所有三个层级上，假设的编码都是位置特定的。在词汇加工模块，有很多插槽(slot)，

每个插槽对应文本中一个汉字的位置。在每个插槽中都有视觉节点、一组汉字节点和一组词汇节点。插槽中的视觉节点和汉字节点只接收给定汉字位置上自下而上的信息。因为词汇层级的编码需要更多的细节，我们之后再介绍。

该模型假设模型的视觉输入会受到知觉广度的限制。知觉广度是指在一个给定的注视点上读者能够有效知觉到的汉字数量。之前的研究表明，中文阅读中的知觉广度大小为注视点左侧一个汉字到右侧三个汉字(Inhoff & Liu, 1998)。因此，假设词汇加工模块在知觉广度范围内五个汉字的位置上接收新的视觉信息，并且随着眼睛的向前移动，知觉广度范围也会随之移动。知觉广度范围内的五个汉字可以是一个、两个或两个以上的词，有时甚至包括更多的词汇。

尽管每个注视点的视觉输入从汉字 $n-1$ 开始到 $n+3$ (我们将注视点上的词称为 n ，注视点左侧的词称为 $n-1$ ，注视点右侧的词称为 $n+1$ ，依此类推)，词汇加工模块加工的汉字数量并不总是固定的。也就是说，词汇加工模块的插槽数量是动态变化的。当眼睛移动时，与知觉广度范围内的新汉字相对应的新插槽被添加到词汇加工模块中。当一个词被识

别出来时,与被识别的汉字所对应的所有插槽将从词汇加工模块中移除掉。不过,还应该注意,如果在之前的注视点上对 $n-1$ 到 $n+3$ 范围内的一些汉字已经进行了加工,那么在新注视点上将不再对其进行加工。因此,很多注视点上词汇加工是从词 n 的位置开始的,而不是 $n-1$ 的位置,因为这个位置上的词已经在上一个注视点上完成了加工。

8.1.1 网络更新

网络中各节点的激活是不断更新的,不同层级内的节点也是以相似的方式更新的(如下文所述),与原始交互激活模型所使用的方式相似。在一个给定的时间内,一个节点收集与之相连的其他节点的所有输入,然后计算所有输入的加权总和,使用公式 1 以低级到高级的顺序更新输出。

若要更新一个节点的激活情况,则使用公式 1 来计算节点的输入。其中 $n_i(t)$ 是网络在给定时间 t 的输入, w_{ij} 是和另一个节点 j (节点激活为 $a_j(t)$) 的连接权重,当连接为激励性连接时 w_{ij} 为正值,当连接为抑制性连接时 w_{ij} 为负值。不同的连接之间的连接权重是不同的,将在下文中介绍。 $free1$ 用于为词汇单元和眼跳单元添加额外的输入(稍后介绍),而对于像汉字节点的其他单元, $free1$ 的值被设置为 0。

$$n_{ij}(t) = similarity_{ij}^2 \times exc_visual_character \times eccentricity_i \quad (5)$$

在公式 5 中, $similarity_{ij}$ 代表输入图像与该汉字节点代表的汉字模版之间的相似性, $exc_visual_character$ 是一个自由参数,调节视觉节点到相同位置的汉字节点 j 之间的连接权重(详见表 1)。相似度是通过输入图像和模板之间具有相同灰度的像素个数与图像中所有像素个数的比值来计算的。词典中有 5692 个汉字。然而,为了简单起见,只有那些相似度得分高于一定水平(0.5)的汉字才会被激活。从视觉层到汉字节点的输入受到视觉离心率(visual eccentricity)的限制,在中央凹处最好,随着距离中央凹的增加而减小。在模型中,我们使用一个以注视点为中心的高斯函数来模拟视敏度与离中央凹的距离的关系; $eccentricity_i$ 代表眼睛注视第 fix 个汉字时第 i 个插槽处视敏度的影响,由公式 6 确定。

$$\sigma = 1 + \frac{\log(frequency_i)}{4.0251} \times Eccentricity_factor \quad (7)$$

在给定的插槽上,同一个插槽中的汉字节点之

$$n_i(t) = \sum_j w_{ij} a_j(t) + free1 \quad (1)$$

使用公式 2 将一个节点的输入(如公式 1 所描述的一样)“压缩”为一个值,以使节点激活值落在 0~1 的范围内。

$$\epsilon_i(t) = \begin{cases} n_i(t)(1 - a_i(t)) & n_i(t) \geq 0 \\ n_i(t)a_i(t) & n_i(t) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

在公式 2 中, $a_i(t)$ 表示在时间 t 上的节点激活。利用公式 3 更新节点($a_i(t + \Delta t)$)在时间 $t + \Delta t$ 时的激活, $\epsilon_i(t)$ 表示使用公式 2 进行压缩后的节点净激活输入。

$$a_i(t + \Delta t) = a_i(t) + \epsilon_i(t) \quad (3)$$

使用公式 4 将节点的激活保持在 0~1 之间。

$$a_i(t) = \begin{cases} 1 & a_i(t) > 1 \\ a_i(t) & 0 \leq a_i(t) \leq 1 \\ 0 & a_i(t) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

8.1.2 汉字层

在每个插槽中有一组汉字节点,每个节点在该位置代表一个汉字。每个汉字节点从相同插槽的视觉节点获取前馈输入。从视觉节点到汉字节点(插槽 i 的第 j 个节点)的输入见公式 5。

$$eccentricity_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(i-fix)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

在公式 6 中, σ 代表分布的标准差。当插槽的激活(注视点激活最强的词)大于 0.3 时, σ 值由公式 7 决定。公式 7 中 $frequency_i$ 是注视词的词频, 4.0251 是当前模型中使用的最大对数频率, $Eccentricity_factor$ 是一个自由参数。这个模拟了一些研究表明的中央凹负荷会调节副中央凹加工的发现(Henderson & Ferreira, 1990; Kennison & Clifton, 1995; Kliegl, 2007; Kliegl, Nuthmann, & Engbert, 2006; White, Rayner, & Liversedge, 2005)。因此,对高频词的注视允许对即将出现的词进行更多的副中央凹加工。当注视点插槽激活小于 0.3 时, σ 值为 1.0。

间是抑制性连接,其权重为 $inh_character_character$

(模型中如何计算权重信息详见公式 1)。这使得同一个位置上的汉字节点之间相互竞争,最后只有一个汉字节点可以在给定插槽上赢得竞争。不同插槽位置上的汉字节点之间不存在连接。

8.1.3 词汇层

由于中文阅读中没有词间空格,因此在词汇识别之前,既不知道词长信息也不知道词边界信息。为了解决这一问题,我们假设每个插槽上有一组词汇节点,每个词的第一个汉字都在这一特定插槽上。因此,词汇节点也是位置特异性的。如果词汇节点代表一个多字词,并且它所占用的插槽数与它所包含的汉字数相等,那么该词汇节点可以占用多个插槽。词汇处理模块中的很多词汇节点在空间上是重叠的(例如,如果两个词汇节点占据同一个插槽,那么它们在空间上是重叠的)。空间上重叠的词汇互相竞争唯一的胜出者。当词汇节点的激活超过阈值,词就被识别出来了,也就可以在文本中成功的切分出来。词典中共有 93992 个词汇(模型中只包括 1~4 个汉字的词汇,占总词汇的 99.2%)。

如果词汇节点和汉字节点在空间上重叠,那么词汇节点将接收汉字节点的前馈连接。这些词可以从不同的位置开始,长度也可以不同。比如说,如果一个“人”字出现在插槽 n ,所有包括“人”字的在插槽 n 上的词汇节点都会被激活(一鸣惊人、明白人、美人、强人所难、人、人民、人类学、人云亦云等等),连接到对应“人”的汉字节点。如果包含这个汉字的词在适当的汉字位置上,那么从汉字节点到词汇节点的连接权重是一个自由参数(如 $exc_character_word$)。否则,前馈连接的权重是另一个自由参数(如 $inh_character_word$)。如果两个词在空间上重叠(同样,不管它们是从一个插槽开始的还是从不同的插槽开始的),词汇之间是横向连接,

横向抑制性连接的权重是一个参数($inh_word_word_overlap$)。横向抑制性连接使空间重叠的词汇相互竞争,最后只有一个空间重叠词胜出。因此,任何汉字都只能分配给一个已识别的词。除了前馈连接还有从词汇节点到汉字节点的反馈连接。如果一个词汇在适当的位置包含由汉字节点代表的汉字,那么从词汇节点到汉字节点的连接是激励性连接(权重是 $exc_word_character$)。

8.1.4 词频影响

词汇节点有一个额外的输入来反映词频的影响。对于词汇单元,将公式 1 中的 $free1$ 变量设置为公式 8 所示的频率标度变量($frequency_scaling_variable, CFS_i$)。公式 8 中, $frequency_i$ 表示词汇节点 i 所代表的词的频率, 4.0251 是当前模型中使用的词的最大对数频率, $frequency_gain$ 是调节词频对词汇加工影响程度的自由参数。

$$CFS_i = \frac{\log(frequency_i)}{4.0251} \times frequency_gain \quad (8)$$

8.1.5 预测性影响

预测性的影响是通过增加相应词汇节点的激活来实现的。词汇节点的激活增加了公式 9 所描述的值,其中 $predictability_i$ 是词汇 i 在语境约束下的预测性, $predictability_gain$ 是一个自由参数。为简单起见,我们假设只激活自下而上汉字层所激活的词汇。因此,只由语境预测但自下而上的汉字层不支持的词汇没有在模型中激活。因为读者通常利用他们读过的所有词汇来预测下一个词应该是什么,这个模型假设预测性对词 $n+1$ 的影响只有在插槽 n 的插槽激活(激活程度最高的词汇节点)超过一个阈值时(模拟中为 0.3)才起作用。

$$a_i(t + \Delta t) = a_i(t) + predictability_i \times predictability_gain \quad (9)$$

8.2 眼动控制模块

8.2.1 眼睛移动时间控制

在当前的模型中,眼睛何时移动受到加工注视词所需时间的影响,注视词的激活强度是眼睛移动的决定性因素。如果对注视词的加工越快,眼睛在该注视点的停留时间越短。在模型中,有一个注视词单元($fixated_word_unit$),它代表对注视词的加工进度。注视词单元的激活强度等于注视位置上的插槽激活强度。该模型假设眼跳单元控制眼睛何时移

动。眼跳单元接收注视词单元的激励性连接,连接权重是另一个自由参数((i.e., $exc_saliency_saccade$)。眼跳单元的激活达到阈值($threshold_eye_move$, 等于 0.95 的固定参数)就会触发眼跳。在一个新的注视开始后,眼跳单元的激活恢复为 0。对于眼跳单元,公式 1 的 $free1$ 变量设置为自由参数 $exc_saccade$ 。因为 $exc_saccade$ 的值大于 0,即使注视词单元的激活为零,眼跳单元的激活仍然增加。在公式 1 中加入这个参数,就为眼动控制模块

引入了一个自动控制成分：即使大脑没有知觉到任何信息，眼睛也会在一段时间后移动。

值得注意的是，虽然注视词单元的激活会影响眼睛何时移动，但眼睛移动的确切时间严格意义上并不一定与注视词汇的识别的时间相同。眼跳单元的激活最终决定眼睛何时移动(眼跳单元的激活达阈值立即触发眼动)，而注视词单元的激活只能通过影响眼跳单元的激活来影响眼睛何时移动。因此，眼睛的移动并不能完全与词汇识别保持一致，眼睛可以在注视词被识别之前或之后移动，这取决于眼跳单元的激活。

8.2.1 眼跳目标的选择

在当前的模型中，我们采用基于加工效率的策略假设来决定眼睛的移动位置。根据这个策略，读者估计他们在一个注视点上能够加工的汉字数量，然后选择该位置之后的字作为眼跳目标。模型有一个汉字激活地图，句子中所有汉字的位置都有一个对应的节点。这些节点的激活初始值为 0，当一个汉字被识别时，激活值为 1。当词汇加工模块中的汉字被加工，汉字的激活值会实时同步更新到汉字激活地图中。汉字激活节点(character-activation unit)的激活值被设置为对应插槽位置上汉字节点的最高激活程度。

为了完成基于加工效率策略的假设，眼动被触发后，眼动控制模块将从左到右序列搜索汉字激活地图，找出激活小于某个阈值(自由参数， $threshold_eye_target$)的第一个节点。相应的汉字被选择为下一次眼跳的预选落点位置。在所选汉字上的准确落点位置由该位置的汉字激活地图激活决定(如公式 10)。公式 10 中， $CharacterSaliency_i$ 表示在 i 位置激活最强的汉字节点的激活， $threshold_eye_move$ 是前面定义的自由参数。这样，如果对汉字进行了更多的加工，眼睛将落在汉字更靠右的位置上。对于目标落点位置(intended landing position)，会叠加有个随机偏差，偏差也服从高斯分布，标准差为 1.0。在模型眼跳目标选择中加入随机因素，是因为有研究表明眼跳落点的分布形状近似正态(McConkie, Kerr, Reddix, & Zola, 1988)。当眼睛准备移动时，如果注视词没有被识别出来，眼跳长度会缩短一个汉字。这样，如果还没完成识别，眼睛离开注视点的距离不会太远。这是词汇加工模块影响眼动的另一种方式。

$$Position = \frac{characterSaliency_i}{threshold_eye_target} \quad (10)$$

8.3 模型实现和参数搜索

8.3.1 模型实现

这是一个计算机模型，所有关于词汇加工和眼动控制的假设通过计算机程序来实现。模型的输入由一系列组成句子的汉字图像构成。该模型模拟了每一个注视点上词汇加工的动态过程，并模拟了整个句子完全加工前的眼动过程。模型的输出是一系列被识别的词汇，以及句子加工过程中每个注视点的位置、起始时间和结束时间。

8.3.2 模型的初始化

模型启动时随机选择句子的第一个或第二个汉字作为注视点，然后启动词汇加工模块注视该汉字，并从注视点左侧一个汉字右侧三个汉字的范围内获取新信息。所有节点的激活初始值为 0。

8.3.3 眼动指标度量

模型需要一个时间系统来记录眼睛移动的时间。为了简化模型，参照交互激活模型的实现方式，模型以离散的时间单位(discrete slices)的方式运行，而不是在连续的时间线上运行。程序每循环一次称为一个迭代(iteration)。在每次迭代中，网络中的所有节点的激活都会更新一次。因此，我们使用迭代的持续时间作为模型计时系统的单位。特定注视点的开始时间记录为注视开始前的迭代次数，结束时间记录为注视结束时的迭代次数。为了将模型中的注视时间与实验观察到的眼动数据进行比较，我们将迭代次数乘以一个比率转化为注视时间。选择一个确保模型预测数据的平均注视时间等于观测数据的平均注视时间的比率。这个比率是用下面的方法计算的：对于给定的数据集，我们通过迭代次数在观察到的平均注视时间和模型预测的平均注视时间之间设置一个比率。然后将这个比率乘以所有模型预测的时间指标(如，首次注视时间和凝视时间)。为了比较模拟数据和观察到的眼动数据，我们使用与眼动研究相同的方法来计算基于词的眼动测量。由于模型没有实现高级认知加工，而高级认知语言加工又被认为是回视的主要因素，因此我们只计算第一次阅读时的眼动指标，而没有考虑回视。我们通过计算首次注视时间和凝视时间来表征眼睛移动时间方面的信息，通过再注视概率、跳读率和眼跳长度来表征眼睛移动位置方面的信息。在一些模拟中我们也计算了词内落点位置。

8.3.4 模型参数

模型中有 14 个参数(见表 1)。为了使自由参数的个数尽可能少,三个参数被设置为固定值

(inh_character_character, threshold_word, and threshold_eye_move)。因此,在模拟过程中可以自

表 1 模型中使用的参数

Table 1
Parameters Used in the Model

Parameter	Best-fitting values	Search range
Visual processing		
Eccentricity_factor	4.689	0-5.0
Word Processing		
exc_visual_character	0.099	0.01-1.0
exc_word_character	0.293	0-0.5
inh_character_character	-0.030	fixed
inh_character_word	-0.261	-0.5-0
exc_character_word	0.779	0-1.0
inh_word_word_overlap	-0.319	-0.4-0
threshold_word	0.900	fixed
frequency_gain	0.452	0-0.5
Sentence processing		
predictability_gain	0.180	0.01-0.25
Eye-Movement control		
exc_saccade	0.235	0.001-0.5
exc_saliency_saccade	0.174	0.001-0.5
threshold_eye_target	0.430	0.3-0.8
threshold_eye_move	0.950	fixed

由改变 11 个参数,其中 7 个参数用于词汇加工(exc_visual_character, exc_word_character, inh_character_word, exc_character_word, inh_word_word_overlap, and frequency_gain), 1 个参数与句子阅读有关(predictability_gain), 3 个参数与眼动控制有关(exc_saccade, exc_saliency_saccade, and threshold_eye_target)。

8.3.5 用于寻找最佳参数的数据集

我们利用 Wei 等人(2013)的数据寻找最佳参数。在这项研究中,记录了 21 名被试阅读 72 个句子时的眼动数据,其中 36 个句子包含高频两字词(每百万出现 50 次以上), 36 个句子包含低频双字词(每百万出现不到 5 次)。这些目标词的预测性接近于 0。如表 2 所示,该研究在目标区域发现了词频

效应。在低频词条件下,首次注视时间和凝视时间显著长于高频词条件。另外,离开高频词的眼跳长度显著长于离开低频词的条件,低频词的注视概率和再注视概率显著高于高频词条件。

8.3.6 模型拟合方法

为了评估模型对观测数据的预测效果,我们计算了模型的拟合偏差。模型加工的句子材料与人类被试阅读的句子材料一致,我们比较了该模型对人类被试眼动数据的预测能力。采用目标词的首次注视时间、凝视时间、注视概率和再注视概率,离开目标词的眼跳长度和汉字识别准确率作为拟合偏差的计算指标。我们使用 normalized root-mean square deviation (nRMSD)来计算拟合偏差(公式 11)。

$$nRMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_{ipredicted} - y_{iobserved}}{std_{iobserved}} \right)^2}{n}} \quad (11)$$

在公式 11 中, $y_{ipredicted}$ 是模型预测数据, $y_{iobserved}$ 是观测数据, $std_{iobserved}$ 是观测数据的标准差, n 是模型拟合的数据点数。nRMSD 值越小,模型拟合越好。我们在整个参数空间中搜索最佳参数,来生成

最小的 nRMSD。

8.3.7 参数拟合过程

因为参数空间非常大,采用并行遗传算法(parallel genetic algorithm)寻找最佳拟合参数。找到

最佳参数后, 运行模型 30 次来模拟 30 个被试的数据。之所以模拟 30 个被试, 是因为模型中存在两个随机因素: 第一, 随机选择了句子中的第一个或第

二个汉字作为眼动起始点; 第二, 眼跳落点位置服从高斯分布, 中点位于预期(目标)落点位置(intended landing position)。在此过程中找到的最佳

表 2 词频效应的实际观测结果与模型模拟结果(Wei, Li, & Pollatsek, 2013)

Table 2
Observed and Simulated Word-Frequency Effect (Wei, Li, & Pollatsek, 2013)

Measures	Observed		Simulated	
	High-frequency	Low-frequency	High-frequency	Low-frequency
First fixation duration (ms)	255 (74)	267 (76)	250	272
Gaze duration (ms)	282 (99)	316 (97)	262	300
Outgoing saccade length	2.93 (0.19)	2.77 (0.15)	2.81	2.58
Fixation probability	0.74 (0.19)	0.78 (0.15)	0.73	0.78
Refixation probability	0.12 (0.25)	0.16 (0.24)	0.04	0.10

Note. Numbers in parentheses are standard deviations.

参数用于其他所有模拟中。在后面介绍的模拟不同的实验结果过程中使用相同的参数是当前模型的优点, 这表明模型的通用性很好, 对不同数据集的模拟不是基于调整每个数据集的参数。

9 模拟结果

我们利用上述模型模拟了中文句子阅读中眼动研究的一些重要发现。在基准数据那一节中提到的, 这些发现包括词汇加工如何影响眼动行为、中文读者的眼跳目标选择、中文读者如何利用副中央凹视觉区加工信息、中文读者如何切分歧义字段等问题。在所有被描述的数据集中, 均使用眼动仪记录了中文读者阅读句子时的眼动数据。在模拟过程中, 模型输入均为中文读者在原始实验中阅读的句子。

如上所述, 我们在所有模拟中均使用了表 1 所示的参数集。也就是说我们不需要为每一个数据集寻找最佳参数。值得一提的是, 实验设备、实验人员、被试以及句子难度在不同的实验中都是不同的, 因此眼动测量的绝对值在不同的实验中也略有不同。在评估模型模拟结果的效果时, 我们主要关注条件之间的差异, 而不是眼动测量数据的绝对值。

9.1 经典的词的特性影响眼动行为的实验结果拟合

9.1.1 词频效应

如上所述, 词频可以影响阅读句子时眼动行为的很多方面。该模型能够准确识别句子中包含的汉字(准确率为 0.99)。如表 2 所示, 首次注视时间、凝视时间、注视概率、跳出眼跳长度(outgoing saccade length)和再注视概率与观测数据具有相似

的模式。与高频词相比, 低频词更容易被注视, 一旦低频词被注视, 它们的首次注视时间和凝视时间都更长, 再注视概率更高。尽管模型低估了眼跳长度, 跳出低频词的眼跳长度还是低于跳出高频词的眼跳长度。

由于对词频的假设, 该模型可以预测词频对注视时间的影响。如公式 8 所示, 词频直接影响词汇节点的输入。因此, 高频词对应节点的激活比低频词对应节点的激活上升得更快。注视词单元与眼跳单元之间有激励性连接, 眼跳单元的激活直接决定何时移动眼睛, 这就是为什么我们观察到高频词的注视时间比低频词的注视时间短。

该模型也成功的预测了词频对眼跳长度的影响: 离开高频词的眼跳长度比离开低频词的眼跳长度更长。如公式 7 所示, 副中央凹视觉区加工效率受到注视词频率的影响。因此, 当注视词为高频词时, 注视点右侧的汉字加工比低频词条件更多。由于模型假设眼跳目标选择是由注视点右侧汉字的激活程度决定的, 因此离开高频词的眼跳长度更长。

9.1.2 预测性效应

Rayner, Li, Juhasz, and Yan (2005) 在中文阅读中发现了一个与英文阅读相似的预测性效应。16 名母语为汉语的中文读者阅读了 36 个中文句子, 三分之一的句子为高预测性条件(70%的读者可以根据先前句子语境准确预测目标词), 另三分之一的句子为低预测性条件(只有 10%的读者可以通过先前句子语境预测目标词), 剩下三分之一为一般(中)预测性条件。结果表明, 低预测性词比中预测性词更容易被注视, 而中预测性词又比高预测性词

更容易被注视。另外,低预测性词的注视时间比中预测性词长,而中预测性词又比高预测性词长(详见表 3)。

我们尝试着模拟 Rayner, Li, Juhasz 和 Yan (2005)等人的句子加工数据。不过,其中 5 个句子目标词不是双字词,模型在模拟中只读取了他们

表 3 预测性效应的实际观测结果与模型模拟结果(Rayner, Li, Juhasz, & Yan, 2005)

Table 3

Observed and Simulated Word-Predictability Effect (Rayner, Li, Juhasz, & Yan, 2005)

Measures	Observed			Simulated		
	High	Medium	Low	High	Medium	Low
First fixation duration (ms)	261 (53)	266 (41)	286 (56)	250	274	289
Gaze duration (ms)	284 (53)	288 (60)	322 (69)	264	289	314
Outgoing saccade length (characters) ^a	2.49 (0.54)	2.34 (0.50)	2.53 (0.77)	2.73	2.73	2.60
Fixation probability	.75 (.17)	.79 (.15)	.88 (.11)	.67	.69	.74
Refixation probability ^a	0.09 (0.12)	0.07 (0.10)	0.13 (0.12)	.04	.05	.08

Note. Numbers in parentheses are standard deviations.

^a The numbers were not reported in Rayner et al. (2005), and they were not significantly different between conditions.

36 个句子的 31 个。因为词长是一个影响眼动行为的重要因素,为避免词长因素的变化混淆结果,我们在模型中删除了这 5 个句子。在模拟过程中,我们使用了与用于模拟词频结果相同的参数,除了 `predictability_gain`,它调整了公式 9 中定义的词汇预测性的影响。由于 Wei 等人(2013)的每个目标词的预测性接近于零,因此不可能使用这组数据为 `predictability_gain` 找到最优值。在模拟 Rayner, Li, Juhasz 和 Yan (2005)的数据时,我们变化了 `predictability_gain` 的值,以求找到最优值,使 `nRMSD` 最小。

如表 3 所示,模型可以非常好的预测 Rayner 等人(2005)的结果。可以看到,对于首次注视时间和凝视时间,中预测性词和高预测性词之间出现了下降,低预测性词和中预测性词之间出现了差异。同样,模型也显示随着词汇在文本中出现的概率降低对该词的注视概率会增加。不过,模型大大低估了对三种条件下的注视概率。

当前的模型可以模拟预测性效应,是因为预测性是通过增加相应词汇节点的激活值来实现的,如果对应词汇根据句子语境的预测性越高,所增加的激活值越大。高预测性词的识别时间更短,因此高预测性词的注视时间比低预测性词更少,跳读概率

更高。词汇(或汉字)是平行加工的,属于高预测性词的汉字在副中央凹中的加工程度要比低预测性词更高。

9.1.3 词长效应

在当前的研究中,我们模拟了 Li 等人(2011)等人的研究结果。在这项研究中,32 位汉语母语者自然阅读 100 个中文句子,记录了句子阅读中的眼动数据。在一半的句子中目标词是双字词,在另一半的句子中目标词是四字词。所有这些词的预测性接近于 0,并在各条件之间进行了匹配。

这项研究的结果如表 4 所示,与长词相比短词更容易被跳读,对长词的凝视时间更长。眼睛离开长词的眼跳长度比离开短词的眼跳长度更长。我们使用与上述模拟相同的参数来模拟 Li (2011)等人的研究结果。如表 4 所示,模型展示了中文阅读中词长效应的大部分重要模式。表 4 中有几个模式很突出:第一,首次注视时间和凝视时间的结果模式存在显著差异,双字词和四字词之间首次注视时间差异很小,而二者在凝视时间上的差异很大。模型很好的预测了这一点。第二,模型非常好的预测了第一遍阅读的注视概率。第三,模型还预测了双字词的向前眼跳长度要比四字词短。

表 4 词长效应的实际观测结果与模型模拟结果(Li, Liu, & Rayner, 2011)

Table 4
Observed and Model-Predicted Word-Length Effect (Li, Liu, & Rayner, 2011)

Measures	Observed		Simulated	
	Two-character	Four-character	Two-character	Four-character
First fixation duration (ms)	250 (23)	249 (28)	250	249
Gaze duration (ms)	266 (28)	355 (91)	265	342
Outgoing saccade length	2.70 (0.68)	2.90 (0.74)	2.78	3.13
Fixation probability	.66 (0.17)	.93 (0.06)	.74	.96
Refixation probability ^a	.06 (.07)	.39 (.23)	.05	.35

Note. Numbers in parentheses are standard deviations.

^a Data were not reported in Li et al. (2011).

9.1.4 首次落点位置分布

模型还预测了首次落点位置分布的一个很重要的模式。如表 5 所示, Li (2011) 等人的结果表明, 对词首汉字的首次注视概率较高, 并且随着离词首位置的增加而降低。关键是, 这些结果表明中文读者并不会像拼音文字读者一样首次注视位置落于词中央位置。如表 5 所示, 模型很好的预测了类似的结果模式。值得一提的是, 在观测结果或预测结果模式中, 目标词的长度几乎没什么影响。

表 5 不同长度词在四个汉字兴趣区的注视概率分布(Li et al., 2011)

Table 5
Fixation Probability Distribution on a Four-Character Region of Interest for Words With Different Length (Li et al., 2011)

Word length	Observed				Simulated			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Two-character	.36	.33	.21	.10	.38	.37	.19	.05
Four-character	.36	.34	.22	.08	.34	.33	.20	.13

Note. The region of interest includes the four-character target word in the four-character condition, and includes the two characters of the target word and two characters following it in the two-character condition.

9.2 中文阅读中的眼跳目标选择

本节内容主要关注模型对眼跳目标选择副中央凹预视效应的模拟。模型可以很好的模拟 Liu 等人(2015)等人的研究结果。在这项研究中, 中文读者阅读了大约在句子中间位置嵌入了高频目标词或低频目标词的句子。在有效预视条件下, 读者自

然阅读句子。在无效预视条件下, 注视点右侧的每个汉字均被一个掩蔽符号“※”替代, 当眼睛跨过隐形边界时掩蔽符号变为正常汉字。因此在无效预视条件下, 读者无法看到目标词右侧的汉字。Liu 等人(2015)重复了 Wei 等人(2013)的研究结果, 表明在有效预视条件下, 眼睛离开高频词的眼跳长度要比离开低频词的眼跳长度更长。但是, 在无效预视条件下, 这种词频效应会减弱。这些结果表明预视对中文读者决定下一个眼跳的目标位置很重要。

如表 6 所示, 模型很好地模拟了 Liu 等人(2015)的研究结果: 在无效预视条件和有效预视条件下, 低频词的首次注视时间和凝视时间均长于高频词。在有效预视条件下, 离开高频词的眼跳长度要比离开低频词的眼跳长度更长。但是在无效预视条件下, 两种条件下的眼跳长度差异很小。

模型可以在有效预视条件下模拟这一结果, 是因为副中央凹视觉区加工的信息多少会导致离开目标词的眼跳长度不同。相比之下, 无效预视条件下副中央凹中呈现的信息均被难以加工的掩蔽符号所掩蔽, 因此汉字节点被激活的程度很小, 目标词频率对此类激活的影响就大大降低了。所以高频词和低频词在眼跳长度上的差异就很小了。

如表 6 所示, 在有效预视条件下, 跳出眼跳长度要比无效预视条件更长。模型也很好的预测了这一效应。模型之所以能够做到这一点, 是因为有效预视条件下副中央凹视觉区加工的汉字要比无效

表 6 预视对词频效应的影响(Liu, Reichle, & Li, 2015)

Table 6
The Influence of Preview on Word Frequency Effects (Liu, Reichle, & Li, 2015)

Measures	Observed		Simulated	
	High-frequency	Low-frequency	High-frequency	Low-frequency
Valid-preview				
First fixation duration (ms)	255 (40)	278 (51)	252	281
Gaze duration (ms)	276 (57)	320 (85)	266	316
Outgoing saccade length	2.73 (0.62)	2.48 (0.51)	2.92	2.41
Fixation probability ^a	.68 (.17)	.70 (.18)	.70	.73
Refixation probability ^a	.05 (.10)	.08 (.10)	.04	.12
Invalid-preview				
First fixation duration (ms)	287 (45)	307 (45)	281	313
Gaze duration (ms)	323 (74)	384 (102)	336	385
Outgoing saccade length	2.37 (0.57)	2.30 (0.57)	1.98	1.84
Fixation probability ^a	.72 (.13)	.78 (.11)	.75	.77
Refixation probability ^a	.07 (.10)	.14 (.12)	.16	.22

Note. Numbers in parentheses are standard deviations.

^a Data were not reported in the original article.

预视条件更多：第一，掩蔽符号“※”对于读者来说非常陌生，出现加工困难。第二，有效条件下预视的汉字可以组成一个词汇，而掩蔽符号不能组成词汇。因此，有效预视条件下，汉字节点收到来自词汇节点的激励性反馈激活连接，在无效预视条件下则没有。有效预视条件下，汉字节点在预视汉字位置上的激活比无效预视条件增加的更快。由于眼动控制模块依赖于即将出现汉字的汉字节点激活来决定眼睛移动的位置，所以在有效预视条件下，跨边界眼跳要比无效预视条件更长。需要注意的是，即使模型模拟了眼跳长度的预视效应模式，但它高估了效应大小。这可能是因为在模拟不同的数据时没有对模型进行参数调整。

Liu 等人(2015)等人使用了不同的阅读材料在有效预视条件下重复了 Wei 等人(2013)观察到的词频效应。同样，我们使用相同的参数(表 1)，选用另一组实验材料也大致重复了词频效应的模拟结果。这表明该模型是非常可靠(稳健, robust)的，可以使用不同的实验材料产生相同模式的结果。

9.3 副中央凹预视效应

在当前的模型中，我们模拟 Gu, Li, and Liversedge (2015)所观察到的副中央凹预视效应。在他们的实验 2 中，中文读者阅读句子中央位置设置两字目标词的句子。读者的眼睛跨过目标词前面的隐形边界之前，在目标词位置上显示两个汉字，当眼睛跨过边界时，所显示的两个汉字变为目标词。在有效预视条件下目标词与预视词一致，在无效预视条件下目标词与预视词不一致。无效预视条件下预视词为随机的两个汉字，不能组成词汇。结

果表明，无效预视条件下，两字目标词的首次注视时间和凝视时间显著长于有效预视条件。

模型在无效预视条件下模拟阅读时，在眼睛跨过隐形边界前表现正常，词汇加工模块使用预视词作为视觉层的输入。眼睛跨过隐形边界之后，视觉层的输入变为目标词，相应插槽位置的汉字节点和词汇节点和所有相应的连接随之更新。同时，眼睛在跨过边界之前激活的汉字和词汇节点仍处于激活状态，将目标位置视觉层到汉字层的连接调为 0，因为新的输入不再支持之前激活的汉字节点。有效预视条件下，模型正常加工句子。如表 7 所示，模型可以很好的预测结果。无效预视条件的首次注视时间和凝视时间长于有效预视条件。不过模型高估了首次注视时间的预视效应。可能还是因为在这一次模拟中没有调整参数。

模型能够模拟预视效应是因为它假设知觉广度范围内的汉字是平行加工的。在有效预视条件下，可以将汉字(词)加工到一定程度上，之后注视时花费很少的时间就能完成加工识别。相反，在无效预视条件下，预视汉字和目标汉字不同，读者眼睛跨过边界后必须重新加工目标词。因此在无效预视条件下加工词汇所需的时间要比有效预视条件长。

与无效预视相比，有效预视条件下的阅读时间的减少是衡量预视效应的指标。然而，假设我们只有一个有效预视条件和一个无效预视条件，这两个条件之间的区别可能包括有效预视收益成分和一个无效预视损失成分。在目前的研究中，还没有好的方法来确定每种效应所占的比例。

9.4 歧义字段词切分

中文文本中有些词的边界是模糊的,也就是说对一串汉字可以切分成多种组合。至少有两种边界模糊的词汇:组合歧义词(*incremental words*)和重叠

歧义字段。本节将介绍模型如何加工这两种汉字段。

表 7 中文阅读中的预视效应(Gu, Li, & Liversedge, 2015)

Table 7
Preview Benefit in Chinese Reading (Gu, Li, & Liversedge, 2015)

Measures	Observed		Simulated	
	Valid preview	Invalid preview	Valid preview	Invalid preview
First fixation duration (ms)	290 (48)	325 (55)	262	353
Gaze duration (ms)	358 (111)	430 (107)	306	421
Outgoing saccade length ^a	2.45 (.69)	2.39 (.62)	2.35	1.93
Fixation probability	.87 (.14)	.92 (.14)	.79	.80
Refixation probability ^a	.22 (.21)	.39 (.21)	.18	.26

Note. Numbers in parentheses are standard deviations.

^a Data were not reported in the original article.

9.4.1 组合歧义词加工

中文中,有些词汇包含的汉字本身可以组成一个词。对两字词来说,第一个汉字、第二个汉字或两个汉字一起都可以组成词汇。比如汉字“不断”,可以切分为“不”、“断”、“不断”。

以往的研究表明中文读者喜欢将组合歧义词当作长词来加工,即使其中的一些汉字可能属于另一个词。Yang, Staub, Li, Wang 和 Rayner (2012)将组合歧义词嵌入到句子中,并且在句子语境中是合理的。一半的试次中第一个汉字在句子语境下是合理的,另一半的试次中是不合理的。他们发现,两字词的第一个汉字在句子语境下合理或不合理都不会影响两字词的阅读时间。表明,中文读者倾向于将两字词作为一个整体来加工,而不是以逐个汉字的方式进行加工。

模型如何加工组合歧义词?当两个汉字“不”和“断”在一个知觉广度范围内时,“不”、“断”和“不断”都会被激活,这些词相互竞争唯一的胜出者。在竞争中谁能胜出取决于以下两点:首先,竞争会受到词频的影响,高频词更有可能胜出;其次,整词在竞争中有一定的优势,因为它可以收到更多汉字节点的前馈激活。如果单个汉字(词)和整词的词频相似,那么整词胜出的可能性更大。

为了说明这一点,我们看了模型预测 Wei 等人(2013)实验 2 的结果,实验中中文读者阅读设为高频目标词和低频目标词条件的句子。72 个目标词中有 70 个词的汉字本身可以成词。对于这些目标词,模拟结果显示,目标词是高频词时,整词切分在

99.4%的试次中胜出,目标词是低频词时整词切分在 99.2%的试次中胜出。在这次模拟中整词切分具有绝对的竞争优势,词频的影响非常微弱。这些结果与 Shen et al., 2018; Yang 等人(2012)的结果一致,中文阅读中组合歧义词通常作为一个整体进行加工。

9.4.2 重叠歧义字段加工

重叠歧义字段中中间位置的汉字可以与左侧汉字组成一个词也可以与右侧汉字组成一个词,比如“学生活”可以切分为“学生”和“生活”。在阅读过程中,读者需要决定中间位置的汉字到底属于哪个词。

先前的一些研究结果可以说明中文读者是如何切分重叠歧义字段的(Ma et al., 2014; Yan & Kliegl, 2016; Yen et al., 2012)。Ma 等人(2014)考察了中文句子中设有重叠歧义字段时的句子阅读眼动模式。实验中将一半的试次设为重叠歧义字段左侧词的词频要高于右侧词(高-低频),另一半试次设为左侧词的词频要低于右侧词(低-高频)。重叠歧义字段之后的句子可以消解歧义。当后续的句子语境支持左侧切分时,高-低频条件下,读者对重叠歧义区的回视很少,第二遍阅读时间也比低-高频条件更短。当后续的句子语境支持右侧切分时结果相反:高-低频条件下,读者对重叠歧义区的回视更多,第二遍阅读时间也比低-高频条件更长。这些结果表明,中间位置的汉字更有可能被切分为属于高频词。Ma 等人(2014)认为读者会使用两阶段策略来加工此类句子,第一阶段:知觉广度范围内汉

字所有可能组成的词汇都会被激活,所有激活的词竞争唯一的胜出者。当某个词胜出后,词汇被识别的同时中间位置的汉字会被切分到胜出词。第二阶段:读者会检查最初的词切分是否正确,如果最初的词切分与后文句子语境不匹配,读者需要回视歧义区重新切分。

关于重叠歧义字段切分的另一个重要发现是中文读者偏好左侧词切分方式,在其他因素(如词频)相等时,读者倾向于将重叠歧义字段中间位置的汉字切分到左侧词。Huang 和 Li (2020a)的研究中,中文读者阅读带有重叠歧义字段(三个汉字 ABC)的句子,匹配了 AB 和 BC 的词频。操纵了目标词之前的句子语境以支持左侧词(AB-C)切分或右侧词(A-BC)切分。与前文语境支持 A-BC 右侧词切分相比,前文语境支持 AB-C 左侧词切分时,阅

读时间更短、跳读概率更高,回视率更低。这些结果表明,当词频没有任何区别时,中文读者偏好将左侧两个汉字切分为一个词,如果前文句子语境不支持这种左侧切分,读者需要花费更多时间来纠正偏好切分。中文阅读的左侧切分偏好与英文阅读相似。

当前的模型可以模拟加工重叠歧义字段的初始阶段。模型使用 Huang 和 Li (2020b)的句子材料进行了模拟。高-低频条件下,98.3%的试次中将中间位置的汉字切分到了左侧词;低-高频条件下,51.7%的试次中将中间位置的汉字切分到左侧,48.3%的试次中将中间位置的汉字切分到了右侧。这些模拟结果有两个启示:第一,在中文词切分中词频的影响很大,在其他因素相同的情况下重叠歧义字段中间位置的汉字更有可能被切分到高频词。

表 8 空间重叠歧义字段加工(Huang & Li, 2020b)

Table 8
Processing of Overlapping Ambiguous Strings (Huang & Li, 2020b)

Measures	Observed		Simulated	
	High-low	Low-high	High-low	Low-high
First fixation duration (ms)	264 (105)	275 (109)	263	276
Gaze duration (ms)	441 (301)	450 (291)	327	369
Outgoing saccade length ^a	2.69 (1.66)	2.74 (1.46)	2.76	2.63
Fixation probability	.90 (.31)	.92 (.27)	0.90	0.90
Refixation probability ^a	.47 (.50)	.52 (.50)	0.20	0.33

Note. Numbers in parentheses are standard deviations.

^aData were not reported in the original article, and they were not significantly different between conditions.

第二,左侧词在竞争中具有一定优势,当高频词在左侧时,几乎总是胜出。即使高频词在右侧时,左侧词仍然可以在一半的试次中胜出。这一结果与 Huang 和 Li (2020a)观察到的左侧优势一致。

与 Huang 和 Li (2020b)以及 Ma 等人(2014)的结果一致,低-高频条件下歧义区首次注视时间和凝视时间要长于高-低频条件(见表 8)。

模型之所以能够模拟重叠歧义字段加工的初始阶段是因为它假设所有空间上重叠的词竞争唯一的获胜者,所以一个给定的汉字只能属于一个词。比如“学生活”中,左侧词“学生”与右侧词“生活”相互竞争,只能有一个词胜出,因此中间的汉字“生”要么属于左侧词要么属于右侧词,只能属于一个。

为什么中文读者在加工重叠歧义字段时具有左侧优势偏好呢?读者的眼睛是从左向右移动的,当眼睛还没有注视到歧义区时左侧汉字距离中央

凹的距离要比右侧汉字短,因此词 AB 相比 BC 更有优势。汉字 A 的激活要比汉字 C 的激活更早,词 AB 的激活也就快于词 BC 的激活,词 AB 在自然阅读中胜出的概率也就更大了。所以在其他因素相同时,读者更倾向于切分 AB 为一个词。

当前的模型没有语义加工成分,所以无法模拟语义加工过程。首先,如表 8 所示,模型预测的凝视时间要比观测数据短一点,再注视概率也比观测数据低。这可能是因为阅读过程中,重叠歧义字段可能会对语义加工过程造成困扰,导致阅读时间更长。其次,模型不能检查并纠正错误。在加工歧义区时,读者可能起初采取错误的切分方式,当通过后文语境解歧时读者可能会回到歧义区重新切分,因为模型没有语义加工成分,无法预测此类眼动行为,未来会进一步解决这一问题。

10 综合讨论

本文报告了中文阅读中的词汇加工和眼动控制整合模型。该模型在交互激活模型的基本框架上提出了一些新的假设来模拟中文阅读中的词汇加工。利用这些假设,模型可以将句子中的连续汉字切成词并在句子阅读中进行识别。除了词汇加工,模型还提出了一些新假设来解决中文阅读中眼睛移动的相关问题。即眼动控制模块利用字单元和词单元的激活信息来决定眼睛移动的时间和位置。结果表明,该模型可以模拟中文阅读中有关词汇加工、眼跳目标的选择、副中央凹加工和词切分的研究发现。

10.1 词切分

根据 Li 等人(2009),我们假设词汇识别和词切分是一个统一的过程,它们同时发生。本文的模型中,知觉广度范围内所有汉字平行激活(受到视敏度限制),所有这些汉字可以组成的词都会被激活。所有被激活的在空间上重叠的词汇节点(词长和位置都可以不同)竞争唯一的胜出者。当一个词汇节点胜出后,它也就从汉字串中被切分出来,同时完成了词汇识别。因为这个词汇节点是位置特定的,在竞争中胜出的词包含该词始末位置的信息。

10.2 词汇加工与眼动控制之间的关系

当前注视插槽上激活强度最高的词汇节点触发眼动控制模块决定何时移动眼睛。即注视词单元和眼跳单元之间有连接,注视词单元对应注视位置上激活强度最高的词汇节点。因此,注视词单元的激活影响眼睛移动的时间。注视词的激活值越高眼跳单元的激活速度越快,注视时间也就缩短了。虽然注视词的激活会影响眼睛移动的时间,但是眼睛移动的时间和完成词汇识别的时间并不完全一致。

正如我们在前言部分所述,没有证据表明中文读者眼跳目标的选择会偏好词的某个特定位置。因此模型假设词首或词中都不是眼跳落点的目标位置。相反,眼跳落点位置由汉字激活地图来决定。汉字激活地图在给定位置的激活水平等于在该位置上激活强度最高的汉字节点。眼动控制模块需要决定眼睛移动的位置时,模型会按从左到右序列搜索汉字激活地图方式,找到低于某个阈限值的位置,作为眼跳落点位置。所以,汉字激活地图直接决定眼睛移动的位置。之所以作出这样的假设是因为:第一,汉字是中文阅读中最明显的视觉单位,汉字

之间有较小的空格。在决定眼睛移动的位置时汉字扮演着非常重要的角色。第二,没有证据表明中文读者会偏好词的某个位置作为眼跳落点位置。从结果部分可以看出,该模型可以很好的模拟与眼跳目标选择相关的结果。不过,值得一提的是,即使我们假设汉字是眼跳目标选择的基本单元,词汇加工也会与汉字加工交互影响眼跳目标的选择。也就是说,汉字加工和词汇加工是交互作用的过程,词单元会通过反馈连接影响相应的汉字单元的激活。虽然汉字单元的激活是眼跳目标选择的主要因素,但是词汇加工也同样影响着眼睛移动的位置。

汉字激活地图决定眼睛移动到哪里的同时词汇加工也会间接影响眼跳目标的选择,所以有可能会对某个词的跳读情况,也就是由这个词组成的汉字激活都在阈限值之上,那么即使这个词没有被识别也会被跳读。如果出现这种情况,是否会导致回视从而降低阅读效率呢?我们认为未必如此,因为汉字的激活已经达到了阈限值,所积累的视觉信息足够支持词汇加工。如果读者还需要一些视觉信息来支持词汇加工,即使跳读了这个词,还可以通过副中央凹视觉区来完成。所以即使一个词在没有完全被识别之前就被跳读了,可能也并不需要额外的回视。目前,这只是模型的一个预测,还需要更多的实验研究来验证。

10.3 与其他模型的关系

近 30 年来,研究者提出了很多模型来解释阅读中的眼动行为。当前模型的灵感来自于之前对词汇加工和眼动控制的建模工作。下面我们介绍一些之前的模型并阐述它们与当前模型之间的关系。

10.3.1 交互激活模型

值得一提的是,交互激活模型并不是眼动模型。但我们认为交互激活原则是解释许多认知过程的基本原则,当前模型的词汇加工模块采用了交互激活模型的大部分重要假设。为了解释中文阅读的一些独特特性,我们也增加了一些新的假设。具体来说,我们需要解决中文阅读中缺少词间空格的问题;在交互激活模型中,感兴趣的字母前后会用空格来分隔。

Li 等人(2009)构建了中文阅读中的词汇识别和词切分模型。当前的模型采用了 Li 等人(2009)的一些重要假设。两个模型均认为词汇识别和词切分是一个统一的过程。不过两个模型之间也有一些区别, Li 等人(2009)的模型只能加工四个汉字,只能模拟

整词报告任务中的准确率。相比之下，当前的模型可以模拟句子阅读中的词汇加工过程，所以在模型中增加了关于知觉广度范围内的眼动行为的假设。

10.3.2 TRACE 模型

TRACE 模型使用交互激活模型的重要假设模拟了言语知觉中的词汇加工。和中文阅读一样，言语信号中没有明确的词边界信息。当前模型有关词切分的假设灵感大部分来自 TRACE 模型。不过也存在一些区别：第一，在阅读当中，读者可以移动眼睛和注意来获取新信息，而言语中听者却无法实现；第二，读者可以同时接收很多汉字信息，而听者无法实现；第三，读者可以回到之前的注视位置上，显然听者不可以。所以，当前模型中关于词切分的文本加工假设和 TRACE 模型中关于语音加工的假设有所不同。

10.3.3 Findlay 和 Walker 的眼动控制框架

Findlay 和 Walker (1999) 针对眼跳产生提出了一个简单的理论模型，这个模型针对眼跳计划的空间和时间方面分别建立了两个独立的通路假设。这两个通路之间都存在一定的层级结构，低水平的层级是自动进行的，视觉信息通过低水平自动进入眼动控制系统，在每一个通路上各种结点相互联系和抑制。空间通路中，即眼跳目标的选择和执行方式，强调“显著图” (salience map) 决定了下一次的 eye jump 目标。这个框架的原理在很大程度上与我们所知道的控制眼球运动的神经过程是一致的。它的一些假设启发了后来的 SWIFT、Glenmore 等多个眼动控制模型。本文的模型中决定眼睛何时移动的机制也受到了这个框架的启发，即眼跳单元的激活超过一定阈值时，会触发眼跳运动。本文的模型只有一个眼跳单元，执行起来也比较简单。

10.3.4 拼音文字阅读中的眼动控制

如前所述，E-Z 阅读者模型是阅读过程中眼动控制的第一个正式的计算模型 (Reichle et al., 1998, 2003)。这个模型假设词汇加工按照序列的方式进行，一个词被识别后注意转到下一个词。该模型还假设注意和词汇识别是彼此相关的认知过程，不过受到不同机制的控制。控制眼睛移动的信号是由一个叫做词汇熟悉度检查的过程 (lexical familiarity check) 触发的，而注意转移是由词汇识别的完成触发的。不过在当前的模型中，我们假设眼动控制和词汇识别是两个不同但相关的过程，由不同的机制控制。在当前的模型中，我们假设注意主要集中在

激活强度最高的节点上，但其他不属于当前注视词的汉字也可以被平行激活，直到完成对当前注视词的识别。即眼动系统控制眼睛的移动。

和前面提到的 SWIFT 模型的不同之处在于，它假设一次可以平行加工四个词，但是在拼音文字阅读中是否可以平行加工多达四个词的问题上有很大的争论 (Inhoff, Eiter, & Radach, 2005; Inhoff, Radach, & Eiter, 2006; Pollatsek, Reichle, & Rayner, 2006; Reichle, Liverdedge, Pol-latsek, & Rayner, 2009)。我们认为当前的模型主要解决中文阅读中的眼动控制，无需关注这一争论点。在当前的模型中，我们假设知觉广度范围内的汉字都被平行加工，被激活的汉字所组成的所有词都相互竞争。在加工不同位置的词方面，当前模型和 SWIFT 之间存在一些差异。由于中文文本中词与词之间没有空格，词边界是在词汇加工过程中确定的。

Glenmore 模型也假设英文阅读中多个词被平行加工，它还使用交互激活假设来模拟词汇加工。和 SWIFT 模型一样，该模型在解释中文阅读时也存在一些问题，因为它无法解释中文阅读中缺少词间空格所带来的问题。

10.3.5 中文阅读中眼动控制的独特性与共性

当前的模型主要关注中文阅读中的词汇加工和眼动控制。那么这个模型中哪些方面是中文阅读所特有的，哪些是与其他语言所共有的呢？模型中一些假设是中文阅读中所特有的：由于中文文本中词与词之间没有空格，中文读者无法利用低水平的视觉信息获知词边界，因此不能使用大多数拼音文字读者所使用的眼跳落点选择的机制。当前模型提出的基于加工效率的策略假设是中文阅读中特有的。

拼音文字读者之所以不采用基于加工效率的策略，可能是因为他们来说选择词中央作为眼跳落点位置更容易且最有效。拼音文字阅读中读者可以利用副中央凹视觉区获取词边界信息，帮助他们眼跳落点选择在下一个词的中央位置。不过这并不意味着拼音文字读者完全不使用基于加工效率的策略，拼音文字读者可能会将基于效率的策略和基于 PVL 的策略相结合 (Liu et al., 2016)。有一些证据表明，阅读拼音文字时，当前注视词的难度会影响下一次眼跳长度。比如说，高频词相比低频词更容易被跳读，离开高频词的眼跳长度比离开低频词时更长 (White & Liverdedge, 2006)。这就表明，

从副中央凹视觉区所获取的信息量影响眼跳目标的选择,这与中文阅读中的基于加工效率的策略所说的相似。

虽然在当前的模型中有一些独特的假设,但其中许多假设与大多数阅读系统可能是共用的。比如交互激活模型的很多假设在英文阅读和中文阅读中是共用的。我们在模型中也假设词汇加工对眼动控制的重要影响,这一点在英文阅读和中文阅读中也是一致的。我们认为,人们在阅读不同书写系统的文本时,眼动控制可能有许多共同的机制。

当前的模型提出了一种读者不借助词间空格进行词切分的方法。也许可以利用该模型的这一原则来模拟复合词的阅读,复合词在很多日耳曼语族语言(德语、荷兰语、瑞典语)和芬兰语中很常见。在这些语言中,三个或四个成分的复合词并不少见,例如德语中“Datenschutzbeauftragter”,意为“数据保护官员”。虽然是连接在一起的,但是每个成分都是独立的词,这与中文类似,成分之间的界限在视觉上没有标记。这个模型还可以在其他缺少词间空格的语言中使用,比如泰语。

10.3.6 当前模型的限制性

尽管模型成功的模拟了中文句子阅读中的词汇加工和眼动控制,还是有一些局限性。首先,模型只考虑了词汇加工,没有考虑很多高级认知加工过程。我们知道句法加工、语义加工和篇章加工都会影响眼动行为。不过,我们想从较为简单的开始入手,主要模拟了第一遍阅读中的眼动行为。模型主要关注的是中文读者在阅读缺少词间空格的中文文本时,如何进行词切分 and 如何控制眼睛移动的时间和位置。因此,词汇加工是最相关的认知过程。

其次,我们没有考虑汉字位置编码的最新发现。在当前的模型中,我们假设汉字受到插槽的限制。然而,已经有研究表明,汉字位置的编码可能没有那么严格。即使两个汉字改变了位置,读者仍然能够识别词汇(Gu & Li, 2015; Gu et al., 2015)。未来的工作需要了解这些发现,不过也可以修改当前的模型来解释这一发现。比如,可以假设从视觉层到汉字层的连接可能不会严格限制在一个插槽内。而是,视觉层的一个节点可能与相邻的汉字节点有连接。由于汉字位置编码机制还在研究探索中,我们没有在当前的模型中考虑汉字位置编码。

这个模型成功的模拟了预视效应的有关研究。不过由于模型中没有语音加工模块也没有语义加

工模块,所以模型没有模拟中文阅读中和预视效应相关的语音预视效应和语义预视效应的研究发现。即使现有的模型还不能模拟这些发现,但是可以在未来进一步发展以考虑这些影响。当前的模型假设副中央凹视觉区的字词可以达到一定程度的激活,通过扩展模型可以对这些被激活的字词的语音和语义信息如何影响目标词的加工做出新的假设。这样,模型就可以模拟语音预视效应和语义预视效应。另外,由于模型没有语义加工模块,所以无法模拟在加工重叠歧义字段时的回视眼动行为。因此,模型在加工的初始阶段出现错误时,不能像人类读者一样进行检测和纠正。

在模型中,汉字节点和词汇节点在不同位置之间有重复(不同插槽有不同的汉字节点和词汇节点)。这里出于方便,我们直接遵从了交互激活模型的假设。交互激活模型具有相似的重复(仅在字母层),TRACE模型在语音和词汇层均有相似的重复。不过,我们承认这可能是不现实的,因为出于不同位置的词应该使用相同的词典进行加工(Reichle et al., 2009),尽管这个假设可能不切实际,但在我们对认知结构有一个完整的理解之前,运用这个假设作为一个启发式的探索是有用的。当然,今后需要做更多的理论工作来解决这个问题。

虽然模型可以模拟不同数据集中不同测量值的平均值,但不能模拟这些观测值的方差。模型中有两个随机因素:(1)随机选择了句子中的第一个或第二个汉字作为眼动起始点;(2)眼跳落点位置服从高斯分布,中点位于目标落点位置。在自然阅读中,读者在阅读能力、阅读策略和阅读动机等多方面存在差异。今后,需要考虑这些因素来模拟观测数据的变化。

11 结论

在当前的模型中,我们实现了一个模拟中文阅读中词汇加工和眼动控制之间直接关系的计算模型。模型解释了中文阅读中有关读者如何进行词切分,如何进行眼跳目标的选择等重要问题。模型成功的模拟了中文阅读中一些重要的眼动研究发现。

参考文献

- Bai, X., Yan, G., Liversedge, S. P., Zang, C., & Rayner, K. (2008). Reading spaced and unspaced Chinese text: Evidence from eye movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 34(5), 1277-1287.

- doi:10.1037/0096-1523.34.5.1277
- Balota, D. A., Pollatsek, A., & Rayner, K. (1985). The interaction of contextual constraints and parafoveal visual information in reading. *Cognitive Psychology*, *17*, 364-390.
- Becker, W., & Jürgens, R. (1979). An analysis of the saccadic system by means of double step stimuli. *Vision Research*, *19*(9), 967-983.
- Brunelli, R. (2009). *Template matching techniques in computer vision: Theory and practice*. West Sussex, UK: Wiley.
- Brunelli, R., & Poggio, T. (1997). Template matching: Matched spatial filters and beyond. *Pattern Recognition*, *30*(5), 751-768. doi:10.1016/S0031-3203(96)00104-5
- Cheng, C. M. (1981). Perception of Chinese-characters. *Acta Psychol Taiwan*, *23*, 137-153
- Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., & Ziegler, J. (2001). DRC: A dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, *108*(1), 204-256. doi:10.1037//0033-295x.108.1.204
- Engbert, R., Nuthmann, A., Richter, E. M., & Kliegl, R. (2005). SWIFT: A dynamical model of saccade generation during reading. *Psychological Review*, *112*(4), 777-813. doi:10.1037/0033-295x.112.4.777
- Findlay, J. M., & Walker, R. (1999). A model of saccade generation based on parallel processing and competitive inhibition. *Behavioral and Brain Sciences*, *22*(4), 661-721.
- Grossberg, S. (1978). A theory of visual coding, memory, and development. In E. L. J. Leeuwenberg & H. F. J. M. Buffart (Eds.), *Formal theories of visual perception*. New York: Wiley.
- Gu, J., & Li, X. (2015). The effects of character transposition within and across words in Chinese reading. *Attention Perception & Psychophysics*, *77*(1), 272-281. doi:10.3758/s13414-014-0749-5
- Gu, J., Li, X., & Liversedge, S. P. (2015). Character order processing in Chinese reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *41*(1), 127-137. doi:10.1037/a0038639
- Henderson, J. M. & Ferreira, F. (1990). Effects of foveal processing difficulty on the perceptual span in reading: Implications for attention and eye movement control. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *16*, 417-429.
- Huang, L., & Li, X. (2020). Early, but not overwhelming: The effect of prior context on segmenting overlapping ambiguous strings when reading Chinese. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*. Online first publication. <https://doi.org/10.1177/1747021820926012>
- Huang, L. & Li, X. (in preparation). The interaction of word frequency and prior sentence context on word segmentation during Chinese reading.
- Inhoff, A. W., Eiter, B. M., & Radach, R. (2005). Time course of linguistic information extraction from consecutive words during eye fixations in reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *31*(5), 979-995. doi:10.1037/0096-1523.31.5.979
- Inhoff, A. W., & Liu, W. M. (1998). The perceptual span and oculomotor activity during the reading of Chinese sentences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *24*(1), 20-34. doi:10.1037/0096-1523.24.1.20
- Inhoff, A. W., Radach, R., & Eiter, B. (2006). Temporal overlap in the linguistic processing of successive words in reading: Reply to Pollatsek, Reichle, and Rayner (2006a). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *32*(6), 1490-1495. doi:10.1037/0096-1523.32.6.1490
- Ishida, T., & Ikeda, M. (1989). Temporal Properties of Information Extraction in Reading Studied by a Text-Mask Replacement Technique. *Journal of the Optical Society of America a-Optics Image Science and Vision*, *6*(10), 1624-1632. doi:10.1364/Josaa.6.001624
- Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1980). A theory of reading: From eye fixations to comprehension. *Psychological Review*, *87*(4), 329-354.
- Kennison, S. M. & Clifton, C. (1995). Determinants of parafoveal preview benefit in high and low working memory capacity readers: Implications for eye movement control. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *21*, 68-81.
- Kliegl, R. (2007). Towards a perceptual-span theory of distributed processing in reading: A reply to Rayner, Pollatsek, Drieghe, Slattery, & Reichle (2007). *Journal of Experimental Psychology: General*, *138*, 530-537.
- Kliegl, R., Nuthmann, A., & Engbert, R. (2006). Tracking the mind during reading: The influence of past, present, and future words on fixation durations. *Journal of Experimental Psychology: General*, *135*, 12-35.
- Lexicon of Common Words in Contemporary Chinese Research Team (2008). *Lexicon of common words in contemporary Chinese*. Beijing, China: Commercial Press.
- Li, X., Bicknell, K., Liu, P., Wei, W., & Rayner, K. (2014). Reading is fundamentally similar across disparate writing systems: A systematic characterization of how words and characters influence eye movements in Chinese reading. *Journal of Experimental Psychology: General*, *143*(2), 895-913. doi:10.1037/a0033580
- Li, X., Gu, J., Liu, P., & Rayner, K. (2013). The advantage of word-based processing in Chinese reading: Evidence from eye movements. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *39*(3), 879-889. doi:10.1037/a0030337
- Li, X., Liu, P., & Rayner, K. (2011). Eye movement guidance in Chinese reading: Is there a preferred viewing location? *Vision Research*, *51*(10), 1146-1156. doi:10.1016/j.visres.2011.03.004
- Li, X., Liu, P., & Rayner, K. (2015). Saccade target selection in Chinese reading. *Psychonomic Bulletin & Review*, *22*(2), 524-530. doi:10.3758/s13423-014-0693-3
- Li, X., & Logan, G. (2008). Object-based attention in Chinese readers of Chinese words: Beyond Gestalt principles. *Psychonomic Bulletin & Review*, *15*(5), 945-949. doi:10.3758/PBR.15.5.945
- Li, X., & Ma, G. (2012). Word boundaries affect visual attention in Chinese reading. *Plos One*, *7*(11). doi:journal.pone.0048905
- Li, X., & Pollatsek, A. (2011). Word knowledge influences character perception. *Psychonomic Bulletin & Review*, *18*(5), 833-839. doi:10.3758/s13423-011-0115-8
- Li, X., Rayner, K., & Cave, K. R. (2009). On the segmentation of Chinese words during reading. *Cognitive Psychology*, *58*(4), 525-552. doi:10.1016/j.cogpsych.2009.02.003
- Li, X., Zang, C., Liversedge, S. P., & Pollatsek, A. (2015). The Role of Words in Chinese Reading. In A. Pollatsek & T. Rebecca (Eds.), *The Oxford Handbook of Reading*. New York, NY: Oxford University Press.
- Li, X., Zhao, W., & Pollatsek, A. (2012). Dividing lines at the word boundary position helps reading in Chinese. *Psychonomic Bulletin & Review*, *19*, 929-934. doi:10.3758/s13423-012-0270-6
- Liu, W. M., Inhoff, A. W., Ye, Y., & Wu, C. L. (2002). Use of parafoveally visible characters during the reading of Chinese sentences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *28*(5), 1213-1227. doi:10.1037/0096-1523.28.5.1213
- Liu, Y., Reichle, E. D., & Li, X. (2015). Parafoveal Processing Affects Outgoing Saccade Length During the Reading of Chinese. *Journal of Experimental Psychology: Learning*

- Memory and Cognition*, 41(4), 1229-1236. doi:10.1037/xlm0000057
- Liu, Y., Reichle, E. D., & Li, X. (2016). The effect of word frequency and parafoveal preview on saccade length during the reading of Chinese. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 42(7), 1008-1025. doi:10.1037/xhp0000190
- Liversedge, S. P., Drieghe, D., Li, X., Yan, G. L., Bai, X. J., & Hyona, J. (2016). Universality in eye movements and reading: A trilingual investigation. *Cognition*, 147, 1-20. doi:10.1016/j.cognition.2015.10.013
- Liversedge, S. P., Hyona, J., & Rayner, K. (2013). Eye movements during Chinese reading. *Journal of Research in Reading*, 36, S1-S3. doi:10.1111/jrir.12001
- Ma, G., Li, X., & Pollatsek, A. (2015). There is no relationship between the preferred viewing location and word segmentation in Chinese reading. *Visual Cognition*, 23, 399-414.
- Ma, G., Li, X., & Rayner, K. (2014). Word segmentation of overlapping ambiguous strings during Chinese reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 40(3), 1046-1059. doi:10.1037/a0035389
- McClelland, J. L., & Elman, J. L. (1986). The TRACE model of speech perception. *Cognitive Psychology*, 18(1), 1-86.
- McClelland, J. L., & Rumelhart, D. E. (1981). An interactive activation model of context effects in letter perception. I. An account of basic findings. *Psychological Review*, 88(5), 375-407.
- McConkie, G. W., Kerr, P. W., Reddix, M. D., & Zola, D. (1988). Eye-movement control during reading. 1. The location of initial eye fixations on words. *Vision Research*, 28(10), 1107-1118. doi:10.1016/0042-6989(88)90137-x
- McConkie, G. W., & Rayner, K. (1975). The span of the effective stimulus during a fixation in reading. *Perception & Psychophysics*, 17, 578-586.
- McConkie, G. W., & Rayner, K. (1976). Asymmetry of the perceptual span in reading. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 8, 365-368.
- Muhlenbein, H., Schomisch, M., & Born, J. (1991). The parallel genetic algorithm as function optimizer. *Parallel Computing*, 17(6-7), 619-632. doi:10.1016/s0167-8191(05)80052-3
- Perfetti, C. A., Liu, Y., & Tan, L. H. (2005). The lexical constituency model: Some implications of research on Chinese for general theories of reading. *Psychological Review*, 112(1), 43-59. doi:10.1037/0033-295x.112.1.43
- Perfetti, C. A., & Tan, L. H. (1998). The time course of graphic, phonological, and semantic activation in Chinese character identification. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 24(1), 101-118.
- Pollatsek, A., Drieghe, D., Stockall, L., & de Almeida, R. G. (2010). The interpretation of ambiguous trimorphemic words in sentence context. *Psychonomic Bulletin & Review*, 17, 88-94. https://doi.org/10.3758/PBR.17.1.88
- Pollatsek, A., Reichle, E. D., & Rayner, K. (2006). Serial processing is consistent with the time course of linguistic information extraction from consecutive words during eye fixations in reading: A response to Inhoff, Eiter, and Radach (2005). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32(6), 1485-1489. doi:10.1037/0096-1523.32.6.1485
- Pollatsek, A., Tan, L. H., & Rayner, K. (2000). The role of phonological codes in integrating information across saccadic eye movements in Chinese character identification. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26(2), 607-633. doi:10.1037/0096-1523.26.2.607
- Rayner, K. (1975). The perceptual span and peripheral cues in reading. *Cognitive Psychology*, 7, 65-81.
- Rayner, K. (1978). Foveal and parafoveal cues in reading. In J. Requin (Ed.), *Attention and performance VII* (pp. 149-162). Hillsdale: Erlbaum
- Rayner, K. (1979). Eye guidance in reading: Fixation locations within words. *Perception*, 8, 21-30.
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 124(3), 372-422.
- Rayner, K. (2009a). Eye movements and attention in reading, scene perception, and visual search. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 62(8), 1457-1506. doi:10.1080/17470210902816461
- Rayner, K. (2009b). Rayner's 1979 paper. *Perception*, 38, 895-906.
- Rayner, K., & Duffy, S. A. (1986). Lexical complexity and fixation times in reading: effects of word-frequency, verb complexity and lexical ambiguity. *Memory & Cognition*, 14(3), 191-201.
- Rayner, K., Li, X., Juhasz, B. J., & Yan, G. L. (2005). The effect of word predictability on the eye movements of Chinese readers. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12(6), 1089-1093.
- Rayner, K., Li, X., & Pollatsek, A. (2007). Extending the E-Z Reader model of eye movement control to Chinese readers. *Cognitive Science*, 31(6), 1021-1033.
- Rayner, K., & McConkie, G. W. (1976). What guides a reader's eye movements? *Vision Research*, 16, 829-837.
- Rayner, K., & Pollatsek, A. (1981). Eye-movement control during reading - Evidence for direct control. *Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A: Human Experimental Psychology*, 33(Nov), 351-373.
- Rayner, K., Pollatsek, A., Ashby, J., & Clifton, J. C. (2012). *Psychology of Reading*. New York and London, UK: Psychology Press.
- Rayner, K., & Well, A. D. (1996). Effects of contextual constraint on eye movements in reading: A further examination. *Psychonomic Bulletin & Review*, 3(4), 504-509.
- Rayner, K., Well, A. D., & Pollatsek, A. (1980). Asymmetry of the effective visual field in reading. *Perception & Psychophysics*, 27, 537-544.
- Rayner, K., Well, A. D., Pollatsek, A., & Bertera, J. H. (1982). The availability of useful information to the right of fixation in reading. *Perception & Psychophysics*, 31, 537-550.
- Reicher, G. M. (1969). Perceptual recognition as a function of meaningfulness of stimulus material. *Journal of Experimental Psychology*, 81(2), 275-280.
- Reichle, E. D., Liversedge, S. P., Pollatsek, A., & Rayner, K. (2009). Encoding multiple words simultaneously in reading is implausible. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(3), 115-119. doi:10.1016/j.tics.2008.12.002
- Reichle, E. D., Pollatsek, A., Fisher, D. L., & Rayner, K. (1998). Toward a model of eye movement control in reading. *Psychological Review*, 105(1), 125-157. doi:10.1037/0033-295x.105.1.125
- Reichle, E. D., Rayner, K., & Pollatsek, A. (2003). The E-Z Reader model of eye-movement control in reading: Comparisons to other models. *Behavioral and Brain Sciences*, 26(4), 445-476.
- Reichle, E. D. & Yu, L. L. (2018). Models of Chinese reading: Review and analysis. *Cognitive Science*, 42, 1154-1165.
- Reilly, R. G., & Radach, R. (2006). Some empirical tests of an interactive activation model of eye movement control in reading. *Cognitive Systems Research*, 7(1), 34-55. doi:10.1016/j.cogsys.2005.07.006
- Schotter, E. R., Angele, B., & Rayner, K. (2012). Parafoveal processing in reading. *Attention Perception & Psychophysics*, 74(1), 5-35. doi:10.3758/s13414-011-0219-2
- Seidenberg, M. S., & McClelland, J. L. (1989). A distributed, developmental model of word recognition and naming.

- Psychological Review*, 96(4), 523-568. doi:10.1037/0033-295x.96.4.523
- Shen, W., & Li, X. (2012). The uniqueness of word superiority effect in Chinese reading. *Chinese Science Bulletin*, 57(35), 3414-3420.
- Shen, W., Li, X., & Pollatsek, A. (2018). The processing of Chinese compound words with ambiguous morphemes in sentence context. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 71(1), 131-139.
- Snell, J., van Leipsig, S., Grainger, J., & Meeter, M. (2018). OBI-reader: A model of word recognition and eye movements in text reading. *Psychological Review*, 125(6), 969-984.
- Sun, F., Morita, M., & Stark, L. W. (1985). Comparative patterns of reading eye movement in Chinese and English. *Perception & Psychophysics*, 37, 502-506.
- Lexicon of Common Words in Contemporary Chinese Research Team (2008). *Lexicon of common words in contemporary Chinese*. Beijing, China: Commercial Press.
- Tsai, J. L., Lee, C. Y., Tzeng, O. J. L., Hung, D. L., & Yen, N. S. (2004). Use of phonological codes for Chinese characters: Evidence from processing of parafoveal preview when reading sentences. *Brain and Language*, 91(2), 235-244. doi:10.1016/j.bandl.2004.02.005
- Tsai, J. L., & McConkie, G. W. (2003). Where do Chinese readers send their eyes. In R. Radach, J. Hyona, & H. Deubel (Eds.), *The mind's eye: Cognitive and applied aspects of eye movement research* (pp. 159-176). Oxford: Elsevier.
- Wei, W., Li, X., & Pollatsek, A. (2013). Word properties of a fixated region affect outgoing saccade length in Chinese reading. *Vision Research*, 80, 1-6. doi:10.1016/j.visres.2012.11.015
- White, S. J., & Liversedge, S. P. (2006). Foveal processing difficulty does not modulate non-foveal orthographic influences on fixation positions. *Vision Research*, 46, 426-437.
- White, S. J., Rayner, K., & Liversedge, S. P. (2005). Eye movements and the modulation of parafoveal processing by foveal processing difficulty: A reexamination. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12, 891-896.
- Whitley, D. (1994). A genetic algorithm tutorial. *Statistics and Computing*, 4(2), 65-85.
- Whitney, C., Bertrand, D., & Grainger, J. (2012). On coding the position of letters in words: A test of two models. *Experimental Psychology*, 59(2), 109-114. doi:10.1027/1618-3169/a000132
- Wolverton, G. S., & Zola, D. (1983). The temporal characteristics of visual information extraction during reading. In K. Rayner (Ed.), *Eye movements in reading: Perceptual and language processes* (pp. 41-52). New York: Academic Press.
- Yan, G., Tian, H., Bai, X., & Rayner, K. (2006). The effect of word and character frequency on the eye movements of Chinese readers. *British Journal of Psychology*, 97(2), 159-268.
- Yan, M., & Kliegl, R. (2016). CarPrice versus CarpRice: Word boundary ambiguity influences saccade target selection during the reading of Chinese sentences. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 42(11), 1832-1838.
- Yan, M., Kliegl, R., Richter, E., Nuthmann, A., & Shu, H. (2010). Flexible saccade-target selection in Chinese reading. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 63, 705-725.
- Yan, M., Kliegl, R., Shu, H., Pan, J. G., & Zhou, X. L. (2010). Parafoveal load of word N+1 modulates preprocessing effectiveness of word N+2 in Chinese reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 36(6), 1669-1676. doi:10.1037/a0019329
- Yan, M., Richter, E. M., Shu, H., & Kliegl, R. (2009). Readers of Chinese extract semantic information from parafoveal words. *Psychonomic Bulletin & Review*, 16(3), 561-566. doi:10.3758/pbr.16.3.561
- Yang, H. M., & McConkie, G. W. (1999). Reading Chinese: Some basic eye-movement characteristics. In H. C. Chen (Ed.), *Reading Chinese script: A cognitive analysis* (pp. 207-222). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates., Inc.
- Yang, J., Wang, S., Xu, Y., & Rayner, K. (2009). Do Chinese readers obtain preview benefit from word n+2? Evidence from eye movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35(4), 1192-1204. doi:10.1037/a0013554
- Yang, J., Staub, A., Li, N., Wang, S., & Rayner, K. (2012). Plausibility effects when reading one-and two-character words in Chinese: Evidence from eye movements. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 38(6), 1801-1809.
- Yang, J. F., Wang, X. J., Shu, H., & Zevin, J. D. (2011). Brain networks associated with sublexical properties of Chinese characters. *Brain and Language*, 119(2), 68-79. doi:10.1016/j.bandl.2011.03.004
- Yen, M. H., Radach, R., Tzeng, O. J. L., Hung, D. L., & Tsai, J. L. (2009). Early parafoveal processing in reading Chinese sentences. *Acta Psychologica*, 131(1), 24-33. doi:10.1016/j.actpsy.2009.02.005
- Yen, M. H., Tsai, J. L., Tzeng, O. J. L., & Hung, D. L. (2008). Eye movements and parafoveal word processing in reading Chinese. *Memory & Cognition*, 36(5), 1033-1045. doi:10.3758/mc.36.5.1033
- Yen, M. H., Radach, R., Tzeng, O. J. L., & Tasi, J. L. (2012). Usage of statistical cues for word boundary in reading Chinese sentences. *Reading and Writing*, 25(5), 1007-1029.
- Yu, L., & Reichle, E. D. (2017). Chinese versus English: Insights on cognition during reading. *Trends in Cognitive Sciences*, 21(10), 721-724. doi:10.1016/j.tics.2017.06.004
- Zang, C., Fu, Y., Bai, X., Yan, G., & Liversedge, S.P. (2018). Investigating word length effects in Chinese reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 44(12), 1831-1841.
- Zang, C. L., Liang, F. F., Bai, X. J., Yan, G. L., & Liversedge, S. P. (2013). Interword spacing and landing position effects during Chinese reading in children and adults. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 39(3), 720-734. doi:10.1037/a0030097
- Zang, C. L., Liversedge, S. P., Bai, X., & Yan, G. L. (2011). Eye movements during Chinese reading. In S. P. Liversedge, I. D. Gilchrist, & S. Everling (Eds.), *The Oxford Handbook of Eye Movements* (pp. 961-978). New York: Oxford University Press.