



不同书写系统之间阅读机制的普遍性和特异性

李兴珊 黄林洁琼 药盼盼 Jukka Hyönä

翻译：陈汝淇、赵蕙 中国科学院心理研究所

校对：赵蕙、陈汝淇、黄林洁琼 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., Huang, L., Yao, P. & Hyönä, J. (2022). Universal and specific reading mechanisms across different writing systems. *Nature Reviews Psychology*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1038/s44159-022-00022-6>

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>。

不同书写系统之间阅读机制的普遍性和特异性

李兴珊^{1,2*}黄林洁琼^{1,2}药盼盼^{1,3}Jukka Hyönä⁴

1 中国科学院行为科学重点实验室, 中国科学院心理学研究所, 北京, 中国

2 中国科学院大学心理学系, 北京, 中国

3 北京语言大学心理学院, 北京, 中国

4 图尔库大学心理学与言语病理学系, 图尔库, 芬兰

*电子邮件: lixs@psych.ac.cn

摘要 | 字母书写系统如英语的阅读已被广泛研究, 并且大多数阅读理论和模型都是基于这些研究的成果。这产生了一个现实问题, 即字母书写系统的发现是否可以推广到其他书写系统, 如韩文或中文, 以及一个更根本的问题, 即阅读机制的普遍性。在这篇综述中, 我们讨论了来自不同书写系统的研究成果如何帮助我们理解阅读的普遍性机制。首先, 我们描述不同书写系统的独特属性。然后, 我们综述了指向所有书写系统普遍性机制的证据, 接着综述了表明不同书写系统的读者为高效阅读发展出独特的感知和认知机制的证据。这些发现提示, 为字母书写系统开发的计算模型并不总能解释其他文字的阅读。我们的结论是, 非字母书写系统的研究对于理解阅读的普遍性机制和文字特异性机制是有价值的。

受心理语言学领域寻求语言加工普遍性的趋势启发¹, 阅读研究者试图找出适用于所有书写系统的普遍性认知机制^{2,3}。书写系统是一种用书面字母或字符在视觉上表示口语的方法。字母文字(如英语)的阅读已被广泛研究, 并且大多数阅读模型和理论都是基于这些研究^{4,5}。然而, 从字母文字研究得出的结论不一定可以推广到其他书写系统, 这些书写系统在外观以及视觉符号如何映射到声音和意义上都有所不同。字母文字如英文在单个声音的层面上对口语进行编码, 而音节文字如韩语是在音节层面上进行编码。相比之下, 表意文字如中文可以不借助于口语来表示词的意义。

研究者考察了书写系统的差异是否伴

随着读者认知机制的差异, 还是无论书写系统如何, 这些机制都是普遍的。寻找阅读的普遍性认知机制通常采取的形式是寻找能够应用于整个写作系统的阅读计算模型。研究者开发了许多模型来解释阅读的核心方面: 如词汇加工⁶⁻⁸、句子加工^{9,10}和眼动控制¹¹⁻¹³。这些模型都启发了进一步的研究并促进了领域对阅读机制的理解。然而, 这些模型大多是为了解释英语阅读中的发现而开发的, 迄今还没有模型在不同的书写系统中被系统地检验过。虽然已经有人尝试扩展字母文字模型来解释其他书写系统中的发现, 但大多数尝试只是做了一些小的修改来拟合其他语言的一小部分数据¹⁴, 并预期这些模型足够强大, 可以推广到所有语言。目

前尚不清楚这些模型是否真的可以用来捕捉在性质上截然不同的文字的特点。随着不同语言研究的积累，尤其是那些和字母文字有实质不同的书写系统（例如，包括中文在内的表意书写系统）的研究^{15,16}，这个问题能够得到广泛的解决。

a Mapping to phonology

Finnish	kissa	Letters represent phonemes
Korean	고양이	Characters represent syllables, each symbol within a character represents a phoneme
Chinese	猫	Characters represent syllables

b Grapheme forms

English	A a	uppercase lowercase
Arabic	ق ق	connected isolated
Arabic	ب ب	letter at word initial, middle or end
Japanese	胃 い	kanji kana

c Word boundaries

English	lovely cat
Hindi	काली बिल्ली
Arabic	قطنة جميلة
Japanese	素敵な猫
Chinese	可爱的猫

d Morphemes

English	post office
Finnish	postitoimisto
Chinese	邮局

图 1 | 书写系统的独特属性

a) 字母、音节和表意书写系统的示例。所有词的意义都是“猫”。b) 不同书写系统中的视觉形式。每行中的符号是同一字母的不同形式（用颜色表示）。c) 书写系统标记词边界的不同方式。所有的例子都意为“可爱的猫”，词边界用蓝色突出显示。d) 不同书写系统中的语素。第一个语素用蓝色突出显示，第二个语素用黄色突出显示。

在这篇综述中，我们比较了不同书写系统的阅读机制，主要关注词汇识别和阅读中的眼动。我们首先描述了区分书写系统的关键属性。然后，我们综述了阅读认知过程的一般原则，这些原则适用于不同书写系统，接着综述了不同书写系统特有的过程。最后，我们认为研究非字母书写系统的阅读机制是非常必要和有价值的。我们的结论是，尽管存在所有书写系统共有的加工原则，但不同书写系统的读者会自然地适应特定的文

字，以便高效地理解书面文本。

书写系统的独特属性

世界上有七千多种语言，其中有数百种也以书面形式或正语法形式呈现

(<http://www.ethnologue.com/>)。所有书写系统都使用由一组被称为**字素**的书写符号组成的文字来表示口语。书写系统根据字素如何映射到口语分为字母型、音节型和表意型文字¹⁷⁻¹⁹（图 1a）。字母书写系统用于书写英语、法语和芬兰语等语言，主要在**音素**水平上编码声音，使读者即便不知道书面词的意义也能读出它的读音。字母文字包含少量的字母（根据一项调查，字母文字包含 16 到 166 个字母，平均包含 36 个字母）²⁰，每个音素通常由一个或两个字母（如“s”，“oo”）表示。相比之下，音节书写系统如韩语和日语假名在音节水平上表示口语，每个字符代表一个音节。

表意文字如中文、日文汉字和韩文汉字主要表征了语义信息。在表意书写系统中，每个字符通常对应一个语义单位，或**语素**。因此，语素是这些文字的主要单位。每个表意字符对应一个音节，但是该字符的发音不能像字母书写系统那样由字符的各个部分组合而成。因此，表意文字的读者必须记住每个字符的发音。

中文有 6000 多个汉字²¹，大多数汉字代表一个语素。日语汉字有 2000 多个汉字，是从中文借来的，用来书写名词等实词²²。每个汉字都是呈现在一个方框中，由一个或多个部首组成，每个部首由一个或多个笔画组成。有些部首本身就是一个字。在现代汉语中，约 66% 的常用汉字包括一个在一定程

度上代表汉字的发音的部首（声部），其他部首则代表汉字的含义²³。然而，声部往往和整字的读音不同。

除了语音表征方式的差异，许多书写系统都有多种形式的字形，每个字形映射到相同的发音（图 1b）。在字母文字中，字母以大写和小写形式出现（例如，“A”和“a”）。在其他的文字如阿拉伯语中，当字母出现在词的不同位置时以及当字母单独出现时，它们的书写方式是不同的²⁴。在音节文字如日语中，一个音节可以用假名和日语汉字来表示²⁵。

书写系统在词和句子的物理布局上也有所不同。尽管字素总是线性排列，但方向因语言而异。大多数语言都是从左到右阅读，但也有一些是从右到左（阿拉伯语和希伯来语）或从上到下阅读（传统的蒙古语，目前在中国内蒙古使用）。书写系统在如何标记词之间的边界上也有所不同。大多数书写系统使用词间空格和/或其他视觉线索来标记词的边界（图 1c）。相反，其他书写系统如中文不包含明显的词边界标记，属于不同词的汉字都相邻地呈现，中间用小空格隔开。

不同的语言在语素组合成词的方式上也不相同。例如，词的组合可以从现有的词中构造出新的词（图 1d）。例如，“football”由“foot”和“ball”两个语素组成，其意义也来源于这两个语素。在某些语言中，如中文，大多数词是两个或两个以上汉字的复合词²⁶。相比之下，英语中复合词的比例要小

得多²⁶。尽管语素是表意文字的一个重要单位，但在字母文本中，构成语素的字母数量因词而异，而且大多数复合词没有明确的标记表明语素边界。

在字母和表意书写系统中，语素是线性连接的；如“football”中，“foot”后面直接跟着“ball”。然而，在一些系统中，包括希伯来语和阿拉伯语，语素是交错混杂的。在希伯来语中，很多词是由两个语素组成的：词根和词-模式²⁷。词根通常由三个辅音组成，承载着词的核心含义。词-模式是在词根意义上产生变化的其他字母。词根和词-模式都不是独立的词；只有它们的交错组合才能构成一个词。这里用英文字母来说明这一特点：词根“g_d_l”可以和词-模式“_a_a_”结合成词“gadal”（意思是“他长大了”）。在标准的希伯来语和阿拉伯语中，元音被省略了。因此，尽管这些都是字母文字，词的发音在书写形式中并没有被完全表示出来。

综上所述，不同的书写系统在字素编码声音的方式、字素的视觉形式、物理的布局还有词法上都有所不同。为了成功理解特定书写系统中的文本，读者必须考虑到该系统的独特属性。因此，这些独特的语言文字属性可能会导致对该文字系统特有的感知和认知加工机制。在下一部分中，我们首先概述阅读不同语言文字的共同过程，这些过程构成了阅读机制的共同基础。

阅读机制的普遍性机制

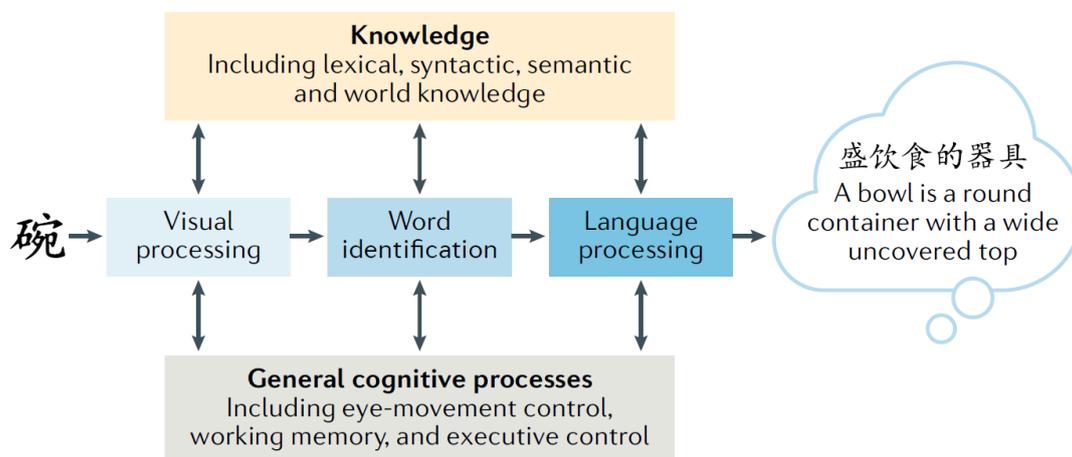


图 2 | 阅读的主要过程

所有文本的读者都将书面语言转换为可由语言加工系统用来理解文本的代码。读者以交互的方式使用自上而下的信息（如存储在长时记忆中的词汇、句法、语义和世界知识）和自下而上的信息（视觉信息）。一般的认知过程，如视觉加工，眼动控制，工作记忆和执行控制也被使用。

在较广的层面上，阅读认知过程的结构在书写系统之间是相似的（图 2）。读者交互地使用存储在长期记忆中的知识（如词汇、句法、语义和世界知识）和现实中的自下而上输入（视觉信息）来理解词、句子和文本^{6,15}。

视觉输入首先使用视觉加工系统进行编码，该系统探测文本的视觉特征，如汉字的笔画。然后，通过将视觉信息和存储的关于词的视觉形式的知识相结合来识别词。语言加工系统进一步加工被识别的词，以通达相关的存储的意义²⁹。

阅读中会用到一般认知功能，如视觉加工，工作记忆，长时记忆和执行控制¹⁸。由于视敏度和工作记忆容量的限制，当阅读任何文字时，文本都是在注意的帮助下一个一个组块地被加工的³⁰。外显的和内隐的注意都涉及其中。外显注意指的是，通过将眼睛移到某个位置，选择性地将注意聚焦于这个位置而同时牺牲了其他位置；而内隐注意指

的是在不移动眼睛的情况下做到这一点。

研究表明，在所有语言中，词都是基本的加工单元^{18,31}，尽管书写系统的物理布局不同，词的边界也不总是被明确地标记出来。即使是在没有空格的文字如中文中，也有很强的证据表明词是以整体单元加工的³²⁻³⁴。一些研究表明，破坏被作为整体加工的词会减慢中文阅读^{33,34}。在句子阅读过程中，词长³⁵和词频³⁶对不同语言的词识别有相似的影响³⁷，词长短和/或词频高的词阅读速度更快。词的预测性，即在给定的前文词语下猜出后续词的概率，也影响着阅读，因此高预测性的词被阅读得更快^{38,39}。在识别单个词的研究中词频和词长也有相似的影响⁴⁰。词在阅读过程中的重要性也得到了眼动研究的支持，这些研究表明词的属性对不同语言的眼动有相似的影响^{30,41}。

在表意和字母书写系统中，词的开头部分都比最后部分重要⁴²⁻⁴⁴。而且，当中文汉字只有一部分被显示出来时，与去掉最后的笔画相比，如果去掉汉字开头的笔画，读者

不太可能识别它^{45,46}。同样，在英语或韩语汉字中，与只显示下半部分相比，当上半部分显示时读者识别词的速度更快也更准确^{47,48}，这表明在词识别中词的上半部分也比下半部分更重要。

另一种阅读的普遍性加工机制是，不同的字素形式可以映射到同一个抽象的正字法词表征。抽象的正字法表征得到了一些研究的支持，即当一个同样身份的字母刚刚被识别后，被试识别该字母的速度更快。这种启动效应在英语中的视觉不相似的启动-靶子对（例如 a 与 A）与视觉相似的启动-靶子对（例如 c 与 C）上是大小相似的^{49,50}。阿拉伯字母⁵¹、日语假名^{22,25,52}和中文的部首⁵¹中也有类似的发现。抽象的正字法编码使读者能够阅读不同字体印刷的文字，以及应对手写风格的个体差异。

自然阅读是一个渐进的过程，在这个过程中，新感知到的信息一旦可用就会与已有的信息进行整合¹⁰。读者为了构建一个一致的文本表征，会试图立即将感知到的词整合到逐渐发展的句子结构中⁵³。读者也会根据之前的文本信息和他们的世界知识做出推断和预测^{53,54}。因此，阅读时间会受到词义的歧义性和合理性和/或句子结构的影响^{55,56}。在字母语言⁹和表意语言⁵⁷中，当错误地解析了句子的结构或遇到理解困难时，眼动指标反映读者会回视到文本的前面部分来解决困惑。

综上所述，阅读的感知和认知机制的许多方面具有普遍性。有两个因素可能导致了这些普遍的机制。首先，书面文本的许多特征（例如文本的线性排列）在不同的文字中是相似的。第二，支持阅读一般的认知过程

（如视觉感知、工作记忆和长时记忆）是共有的。这些共同的文本特征和独立于语言的感知和认知过程可能导致了阅读的普遍性机制。理解普遍的阅读机制对于全面了解阅读机制非常重要，同时也为理解书写系统特异性机制提供了一个脚手架。

书写系统的特异性机制

如上所述，书写系统在表达口语的方式、物理布局、词边界的标记方式和构词法方面上有所不同。这些差异影响了感知和认知系统加工不同书写系统的方式。

从视觉形式到语义的通路

读者根据书写系统编码口语的方式以不同的方式加工词。大多数阅读模型假设，词的识别包括基于视觉输入计算正字法（视觉）、语音（声音）和语义（意思）代码，最终目标是通达词和文本的意义^{7,8}。一个有影响力的词加工模型，即三角模型，假设一个词的意义可以通过两条通路通达。直接语义通路直接将正字法编码为语义，而语音中介通路则先将正字法编码为语音，再将语音编码为语义⁷。

对于字母书写系统，这两条通路在阅读过程中同时且交互地工作^{7,8,58,59}（图 3a）。由直接语义通路组成的网络和由语音中介通路组成的网络协同地从视觉形式计算语义。词水平的语音单元以级联的方式，在完全说明所有字母单元之前就开始激活。因此，在加工字母文字时，语音中介通路可以与直接语义通路协同地运作以激活语义单元⁵⁹。对于音节文字如韩语字母，正字法和语音之间的关系清楚并且直接，因此直接语义通路和语音中介通路都被用来通达语义^{60,61}。

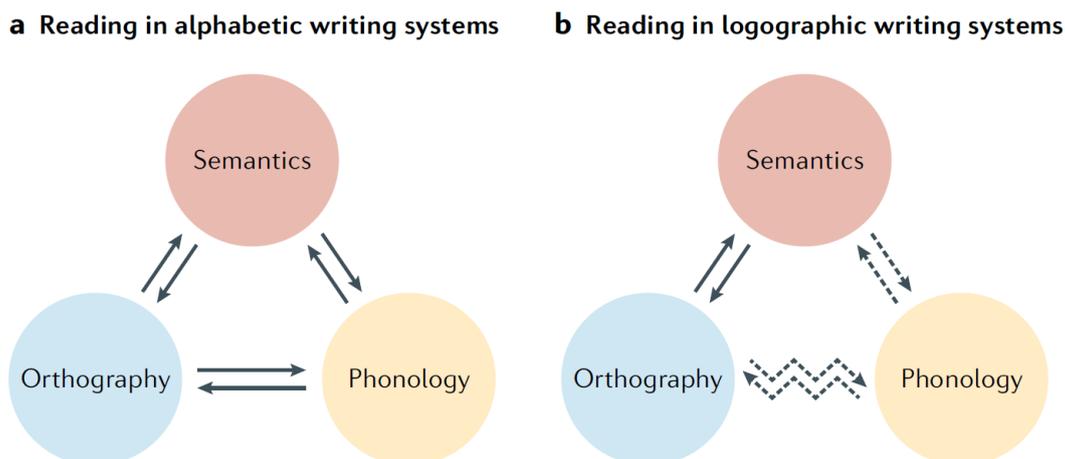


图 3|不同文本从视觉形式到语义的通路

A) 对于字母书写系统，正字法和语音层之间的信息是级联的，正字法单元的激活持续地传播到语音单元，从而能够同时利用直接语义通路和语音中介通路（实线箭头）。B) 对于表意文字系统，只有当一个字被识别时，相应的语音单元才会被激活（阶梯式箭头）；语音中介通路所起的作用非常小（虚线直箭头）。

希伯来语和阿拉伯语的加工不同于其他字母书写系统^{2,62,63}，因为它们的语音没有被完全编码。因此，准确的发音只有在词被识别后才变得可用。由于词根携带词的核心含义，因此一些语义信息可能会在整个语音表征被激活之前被通达，这提示了从正字法到语义的直接语义通路⁶⁴⁻⁶⁶。由于只有词根语素和词模式语素的结合才能产生特定词形的确切意义，因此词的意义不能通过单独通达语素来获得⁶³。

与字母文字的读者不同，没有明确的证据表明表意文字的成年读者通过语音中介的通路通达词的意义⁶⁷⁻⁶⁹（但语音仍然被自动激活）^{68,70-75}。中文^{67,76-78}、日语汉字^{79,80}和韩语汉字^{60,61}的研究一致表明，从正字法到语义的直接语义通路在表意文字阅读中起主导作用，而语音中介通路对成年读者的作用非常小（图 3b）。

汉语单个词的阅读过程中，直接语义通路与语音中介通路的关系在一个计算的联

结主义模型中得到了阐释¹⁶。在该模型中，正字法水平和语音水平之间的联系在阈限的基础上被激活。即只有达到特定的正字法阈限时，相应的语音单元才会被激活^{16,81}。在表意语言中，中文的每个口语音节都映射到一个完整的字上，而这个字的任何部分都不对应着音节的任何子集。因此，中文读者不可能在字的词汇形式被识别出来之前就不知道字的发音。由于在表意文字中语音中介通路比直接语义通路慢得多，中文读者不太可能通过语音中介通路通达词义。中文阅读的阈限式加工与字母文字中正字法和语音水平之间级联式的信息转换形成对比^{7,58}。

这些研究证实，在不同的书写系统中，从视觉形式到意义的通路是不同的。对于字母和音节书写系统，将视觉形式转化为意义的通路既有直接语义通路，也有语音中介通路。对于表意书写系统，直接语义通路是主要的加工通路。

知觉广度和内隐注意

知觉广度在传统上是指，当眼睛注视文本中的一个位置时可以加工的信息量，通常以注视点周围的字母或字符的数量来测量。读者必须移动他们的眼睛来阅读比知觉广度更宽的文本。知觉广度的宽度受限于人类视觉加工系统和内隐视觉注意的一般属性。视敏度最高的中央凹区域很窄且通常比知觉广度更窄。知觉广度是不对称的；对于从左到右阅读的文本，它的右边更宽（英文：注视点左侧 3-4 个字母，注视点右侧 14-15 个字母）⁸²⁻⁸⁴（图 4）。以往研究提出了英语知觉广度的向右不对称有两种可能的机制：大脑半球专门化和注意偏向⁸³。

大脑半球专门化观点认为，知觉广度不对称是由于注视点右侧的信息最初被投射到专门用于语言加工的大脑左半球，从而产生更大的注视点右侧广度。与此相反，注意偏向假说认为注意会偏向于阅读方向，在从左到右阅读的文本中知觉广度向右扩展。对从右到左书写的文字（希伯来语、阿拉伯语、维吾尔语和乌尔都语）的研究显示，左边的知觉广度更大，与阅读方向一致⁸⁵⁻⁸⁷，这与注意偏向假说相符合⁸⁵。其他研究表明，在从上到下阅读的语言（传统的蒙古文和日文）中知觉广度向下方会更宽^{88,89}。对于双语阅读者来说，知觉广度不对称的方向因所阅读的特定语言的属性而变化⁸⁵，这提示读者可以适应阅读不同的文本⁹⁰。

知觉广度大小也因语言而异。如上所述，英语的知觉广度总共可以扩展到 18-20 个字母⁸²⁻⁸⁴。不同书写系统的知觉广度差异可能反映了字母/字符**视觉复杂性**的差异²⁰。与英语相比，在阅读用阿拉伯字母书写的维吾尔

语时知觉广度要窄一些（共 18 个字母），在阅读藏文时知觉广度更窄一些（共 11-12 个字母）⁹¹，藏语是一种字母文字，其包含的字母在视觉上比英语字母更复杂。在阅读中文汉字时，知觉广度也非常窄（共 5 个字）⁸⁴，这支持了文字复杂性影响知觉广度的假设。

综上所述，这些发现提示，读者通过动态地分配注意来适应他们特定的书写系统⁹⁰。知觉广度在阅读方向上是不对称的，这表明视觉注意会优先集中在接下来要阅读的文本上。阅读过程中的眼动模型对注意的精确分配做出了不同的假设（框 1）。一些模型假设注意是序列分配的，一次一个词，在当前注视的词被识别出来之后，注意转移到下一个词上¹¹。根据 E-Z Reader 模型，对于从左到右阅读的文本，注意通常在眼睛移动之前就会转移到注视点右侧的词，导致向右的知觉广度大于向左的知觉广度。其他模型如 SWIFT（Saccade-generation With Inhibition by Foveal Targets），假设注意可以同时被分配到多个词上^{12,92}。根据 SWIFT，对于从左向右阅读的文本，由于更多的注意被分配到注视点的右侧，因此注视点右侧的知觉广度大于左侧的知觉广度。目前，这两种模型都得到了支持，但阅读过程中注意分配的确切机制仍存在争议。

无词间空格的阅读

大多数字母书写系统的读者习惯于阅读词之间有空格的文本；词间空格用于将字母组合成词（词切分）和计划眼球运动。读者利用副中央凹视觉（高视敏度中央凹区以外的视觉）的低水平视觉信息来感知词间空格，以将字母组合成词。从通常有空格的文

本中移除空格会极大地干扰阅读理解^{93,94}。那些不使用词间空格来划分词的语言的读者使用不同的方法将连续的字符组合成词并且计划词间的眼动。因此，利用字母文字的研究没有回答词在没有空格的文字中是如何被视觉加工的^{11,12}。

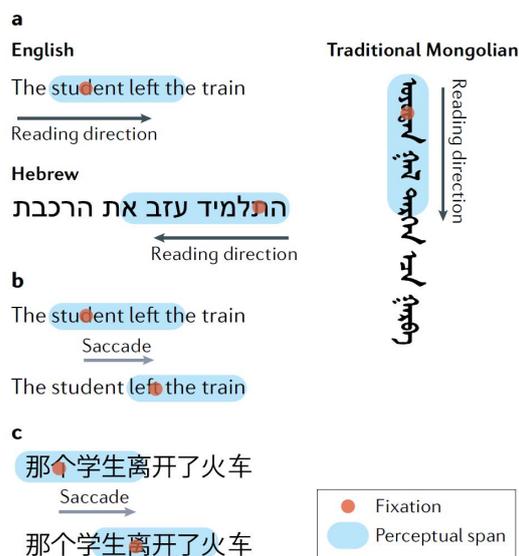


图 4 | 文本的物理属性会影响注意和眼动

A) 知觉广度在阅读方向上是不对称的（英语向右，希伯来语向左，蒙古语向下）。B) 在英语中，通过来自当前注视点的副中央凹信息，计划眼跳到下一个词的偏好注视位置（PVL）。C) 在中文中，眼跳被计划到包含尚未加工的新信息的位置。所有例句的意思都是“那个学生离开了火车”。

词切分。一些书写系统即使没有词间空格也会携带词边界信息。在泰语阅读中，读者利用不对齐的元音，相对字符频率和指示音调的标记来切分词^{28,95}。在日语中，因为日语汉字经常出现在词的开头，这种视觉上截然不同的字符可以表示一个新词的开头。当日语假名被日语汉字包围时，日语汉字和其后的假名能够更容易地被识别为词，提示日语汉字在词切分中的作用^{96,97}。

相比之下，中文文本由连续的字符组成，没有任何明确的词边界信息。这个属性有时

会导致一些字符串能够以多种方式被切分⁹⁸⁻¹⁰⁰。例如，三字字符串“从小吃”可以将前两个字符切分为一个词（如“从小-吃”），也可以将后两个字符切分为一个词（如“从-小吃”）。为了成功理解文本，读者必须依靠词汇知识来切分词。中文阅读模型(CRM)能够解释中文读者在没有词间空格的帮助下如何进行词切分^{15,101}(框 1)。根据 CRM，知觉广度内所有可能的候选词都被激活，这些被激活的词竞争一个获胜者。当一个词在竞争中“获胜”时，它同时被识别并从文本中被切分出来。因此，在中文阅读中词切分和词识别是一个统一的过程。

眼跳目标选择。在句子阅读过程中，字母书写系统读者的眼球运动（眼跳）指向短词的中央，但指向长词中央偏左的位置（这个目标位置被称为偏好注视位置，PVL）^{102,103}。注视词的中央是加工词的最佳选择，因为这种情况下尽可能多的字母可以落在视敏度最高的中央凹上¹⁰²。当眼睛落在词的中央时，注视时间通常比落在词边界时（又叫反向最佳注视位置）更长^{104,105}。反向最佳注视位置效应主要是对错误定位的注视的校正导致的：当注视点在词边界时，读者立即规划一个新的眼跳到一个更优的位置，导致在词边界位置的注视更短¹⁰⁵。

与字母文字相比，中文文本没有词间空格。因此，在副中央凹视觉中，读者无法借助词间空格对词进行预先切分，也无法眼跳到下一个词的中央。事实上，在中文阅读中词的中央周围没有 PVL¹⁰⁶。一些研究表明，如果对一个词仅有一次注视，则相比有多次注视的情况，眼球运动的落点位置更有可能在词的中央^{107,108}。一种可能的解释是，如

果读者的注视恰好落在词的中央，他们就不需要在同一个词内再进行一次注视。一些研究为该观点提供了证据。首先，一个假设眼睛移动的距离是恒定（包含了一些变异）的模型能够产生非常类似的结果¹⁰⁶。第二，阅读随机的汉字字符串（相邻的汉字不构成词）也能够产生非常相似的结果模式¹⁰⁹。在这两种情况下，眼跳的计划都不是基于词的，所以读者无法尝试眼跳到词的中央。因此，在只有一次注视的情况下，PVL在词的中央达到峰值不能被作为读者有目的地眼跳到词中央的证据。总的来说，没有很强的证据表明中文读者会偏好将词的中央作为眼动的目标。

相反，中文读者在眼跳目标选择上可能采用一种基于加工的策略，即在一个给定的注视点加工尽可能多的信息，然后将眼睛移动到包含新信息的位置¹¹⁰。根据这个观点，读者能在注视点右侧加工的字越多，眼跳长度就越长。该预测得到了研究的证实：在中文阅读中，中央凹和副中央凹信息都能影响眼睛移动的位置¹¹¹。在句子阅读中，当前注视词的属性如词长或词频，会影响下一个眼跳的长度¹¹¹⁻¹¹³：中央凹视觉的加工越容易，向外眼跳长度就更长。并且，在副中央凹信息不可用的时候，当前注视词的词频不影响眼跳的计划^{112,113}，这提示副中央凹信息在眼跳目标选择中的决定性作用。总之，中文读者根据他们在注视点右侧加工了多少信息来动态地调整眼跳长度。

有证据表明，字母文字系统的读者不仅使用基于词中央的目标选择策略，也使用基于加工的策略来计划眼跳。首先，虽然眼跳落点位置分布的峰值在词的中央，但其变异

很大，且眼跳落点系统地受到眼跳发起的位置（眼跳起跳位置）与目标词之间距离的影响¹¹⁴。对于从左到右阅读的文字，当起跳点离目标词较远时，眼跳落点位置的分布向左边移动，而当起跳点离目标词较近时，眼跳落点位置的分布向右移动。这一发现反映了基于加工的策略；当起跳点离目标词很近时，读者可能已经较多地加工了目标词，所以他们的眼睛可以多往右看一些。第二，在当前注视词的加工比较容易时，相比注视词较难加工时，字母文字的读者能加工更多的信息¹¹⁵⁻¹¹⁸。例如，离开高频英语词的眼跳比离开低频词的眼跳更长，提示副中央凹加工的信息量影响眼跳的计划¹¹⁹。

在泰语（一种没有空格的字母文字）中，读者能够利用辅音出现在词首和词尾的相对频率等统计信息，将眼跳引导至词的中央^{120,121}。当日语读者阅读混合的日语汉字-日语假名文本时，只有在日语汉字位于词的开头时才能观察到偏好注视位置。也就是说，读者采用了注视日语汉字的简单策略^{96,122}。在阅读日语纯假名文本时，没有在词的开头和中间发现眼跳落点位置的区别⁹⁶。因此，泰语和日语读者能够利用物理上的词边界信息而不是词间空格来帮助他们进行眼跳目标的选择。

总之，这些发现表明词的加工是眼动控制的重要因素，并且词间空格在字母书写系统的加工中非常重要³⁰。在一些没有空格的书写系统如日语和泰语，读者利用其他可用的信息和线索来计划眼跳以高效地加工词。对于其他无空格的书写系统如中文，读者使用一种基于加工的策略来计划眼跳。因此，

读者发展出不同的眼动控制机制以适应他们的书写系统¹²³。

阅读复合词

复合词存在于各种性质不同的文字。阅读研究的一个关键问题是明确复合词在多大程度上是作为整体单元加工，或是通过其成分语素加工的。为此，成分语素和整词的频率被独立地操纵¹²⁴。例如，复合词

“headstand”是一个相对罕见的词，但它的第一个成分（“head”）作为单独的词出现的频率相当高。如果成分语素的频率影响词的识别过程，则将其作为通过成分进行加工的证据。而整词频率的效应被解释为整词表征在阅读过程中被激活的证据。眼动研究证实，在字母书写系统中，成分语素的频率和整词频率都会影响词的识别¹²⁵。该结果的模式产生了一个平行的双通路竞争模型，在该模型中词的识别是通过同时通达成分语素和整词的表征来进行的。无论哪条通路提前完成，都将赢得为复合词提供词汇表征的竞争¹²⁵。

来自芬兰语（一种字母文字）的证据表明，复合词的词长影响两种加工通路之间的竞争¹²⁶⁻¹²⁸。中央凹区域能够覆盖短复合词（例如“etuovi”，意为“前门”）的全部或大部分字母，使得整词占优先地位。然而，中央凹区域只能覆盖长复合词字母的一部分（例如“posttoimisto”，意为“邮局”），导致成分语素在词汇加工的初始阶段占据优先地位，而通达整词表征则在加工时间线中发生得较晚（框2）。

尚不清楚复合词在中文中是如何加工的。在独立的词识别任务中，已经发现了高频成分语素（字）的促进作用^{129,130}，即和低频成分语素相比，高频成分语素导致更短

的反应时。在句子阅读中，不同的研究已经发现了成分语素频率的促进作用^{131,132}，或没有发现成分语素的频率效应^{37,133-135}，或发现了反向的成分语素频率效应^{135,136}。然而，整词频率却有着稳定的效应，频率高的复合词比频率低的复合词阅读时间更短^{109,131,136}。眼动追踪研究表明，在中文阅读过程中，当单个汉字构成两字复合词的一部分时，单个汉字的语义信息并不会被激活¹³⁷⁻¹³⁹。总的来说，这些不一致的结果挑战了整体加工和分解加工之间的绝对区分；不管是用整体单元还是成分语素来描述中文复合词识别可能都是一种过分简化的说法。CRM模型为复合词加工提供了另一种解释¹⁵。根据CRM，当一个多字词落在知觉广度范围内时，复合词和由单个字构成的嵌入词都被激活。对于一个复合词来说，整词比它的成分语素更有可能赢得竞争，因为它接受了来自多个汉字的激活。

复合词加工中字频效应的矛盾结果可能是因为研究没有区分字频和单字词的词频。根据CRM，单字词的词频和字频在两个不同的水平上对词的加工时间产生方向相反的影响。在字的水平上，高频字对它们构成的词产生促进的前馈激活，从而加快词的加工。但在词的水平上，一个高频的单字词与整词的竞争更激烈，导致阅读时间变长。由于以往的研究没有区分这两种频率类型，在字和词的水平上相反效应的平衡很可能导致了不同研究结果的不同模式。

综上所述，并行双通路竞争模型可以解释字母书写系统中多语素词加工的发现，而CRM可以解释表意书写系统的发现。复合词特征的差异可能会导致不同书写系统的

加工机制部分不同。首先，字母书写系统中词的视觉长度通常大于表意书写系统，其变异也通常更大。因此，词长在字母文字中可能对复合词加工有更大的影响。第二，在字母文字中，复合词的语素长度变化很大，语素之间没有空格，而在表意文字中，一个字符通常代表一个语素，字符之间有一个小空格隔开。因此，在表意书写系统中语素的切分可能比在字母书写系统中更容易。

不同语言的加工差异

在这个部分，我们综述了证实不同的书写系统中感知和认知阅读机制不同的证据（表 1）。这些差异主要是由文字特征引起的，如语音编码方式、物理布局和构词法的特点。加工机制可以在多个层次上分为普遍性机制和文字特异性机制。加工的不同方面可能采用普遍性机制或文字特异性机制。例如，表意文字的读者通常不使用语音中介通路来通达词的意义，这反映了文字特异的加工。相反，语音在阅读表意文字时仍然被自动激活，这表明它是一种普遍的特征。此外，有些机制可能不是所有语言文字的普遍性机制，而是仅在语言文字的一个子集中是普遍的。例如，即使中文中没有观察到 PVL 效应，但是在有空格的文字和一些无空格但有物理词边界线索（如日语和泰语）的文字中也能观察到 PVL 效应。因此可以说，只要语言文本包含词边界的线索，PVL 效应就会在这些语言文本中普遍存在。总之，尽管研究阅读过程的普遍性和书写系统的特

异性是有价值的，但是两者的区分不是绝对的。

来自非字母文字的启示

尽管一些与阅读相关的认知过程在不同的书写系统中是普遍的，但其他认知过程对于特定的书写系统是独特的。来自不同书写系统的研究发现有助于我们理解阅读的普遍性和书写系统特异性机制，并为正式的阅读模型提供重要的启示。

对不同书写系统的研究增强了对阅读普遍性机制的理解。首先，比较不同书写系统的研究结果可以帮助研究者得出单一语言研究不可能得出的结论²。例如，仅通过研究一种语言是不可能得出阅读方向会影响知觉广度的不对称性的结论。其次，研究性质不同的书写系统的阅读可以突显出在单一语言研究中可能被掩盖的问题。实际上，一些研究者得出结论，对非字母书写系统的研究可以定义和影响阅读理解中一些尚未解决的关键问题¹⁴。例如，对中文阅读的研究可以揭示读者如何在没有词间空格的情况下切分词，以及如何在无空格的情况下引导眼球运动。最后，非字母书写系统的发现可能为字母书写系统相关问题的研究提供可能的解决方案。例如，CRM 可以解释中文阅读过程中复合词是如何加工的，也可能可以解释字母书写系统（如德语或芬兰语）中复合词识别的研究发现¹⁵

表 1 | 普遍性机制和文本特异性的实现方式

普遍性原则	书写系统	文本特异性考虑	文本特异性实现
眼睛在阅读方向上向前移动, 以便逐块地加工文本	字母	英语: 词间空格	以词中央为目标的眼跳 ¹⁰³
	音节	日语: 不同的字符类型标记词的开头	眼跳目标为日本汉字 ⁹⁶
	表意	中文: 连续字符	眼跳的目标为新信息, 无论词的位置如何 ¹⁰⁶
词义是从视觉形式中提取出来的	字母	语音可以很容易地从形式中提取出来	使用语音和语义通路 ^{7,8,58}
	音节	语音可以很容易地从形式中提取出来	使用语音和语义通路 ^{60,61}
	表意	形式并不表示语音	主要使用直接语义通路 ^{67,76-78}
复合词可以由成分或整体加工	字母	对于连接形式的复合词, 词长差异很大, 没有空格来标记语素边界	短复合词是整体加工的, 而长复合词的识别最初是通过成分进行的 ¹²⁶⁻¹²⁸
	表意	每个字符通常代表一个语素, 而且大多数词在视觉范围上都很短	复合词和嵌入词在阅读过程中都会被激活, 并争夺一个获胜者 ¹⁵

一些阅读机制是跨语言通用的, 但大多数普遍性机制本质上是一般的和抽象的, 且它们的实现方式在不同的书写系统中是不同的(表 1)。因此, 这些普遍性加工机制可能有不同的实施方式。这一点可以在词识别的研究中得到说明。阅读所有文字的第一步是将视觉文本转换为可以被语言加工系统加工的代码。然而, 这个过程在字母和表意阅读中实现的方式不同^{16,19}。尽管字母语言的读者同时使用语音中介和直接语义通路, 但表意文字的成年读者主要使用直接语义通路来理解词的意义^{16,19,141}。

书写系统特异的属性使得我们很难建立一个通用的模型来解释不同语言之间的阅读。例如, 在表意语言中缺乏词间空格挑战了基于字母文字建立的模型(框 1)。目前, 人们已经提出了一些表意文字阅读的计算模型, 但这些模型是否能够解释字母阅读的

现象还不清楚。当前还没有一个模型可以解释各种性质不同的文字的阅读。

迄今为止还没有一种通用的阅读模型, 这一事实对非字母文字阅读的研究者具有重要影响。研究者在使用现有模型来指导他们的研究之前, 应该认真考虑是否可以将其应用于特定的文字。例如, E-Z Reader 模型和 SWIFT 模型是字母书写系统阅读中具有影响力的眼动控制模型, 但这两种模型都不能直接解决中文阅读中的词切分问题。但是, 为了方便起见, 一些研究(包括我们自己的一些研究)已经使用这些模型来驱动和解释中文的阅读研究。因此, 应谨慎地解释这些研究得出的结论。

总结和未来方向

在这篇综述中, 我们展示了不同的书写

系统在语音编码方式、字素形式、物理布局和构词法上不同。即使有这些值得注意的差异，一些认知阅读机制仍然是普遍的。所有文字的读者都将书面文本转换成可由语言加工系统使用的代码，利用自上而下和自下而上的信息交互地获得意义，并在移动眼睛时渐进地加工文本。书写系统的独特属性也导致了一些文本特异的阅读机制。由于语音编码的差异，字母和表意书写系统的读者使用不同的通路来通达词的意义。由于物理布局的不同，不同语言的读者会使用书写系统特异的方式来切分词和引导他们的眼动。总之，在不同的书写系统中研究阅读是必要且有价值的。

尽管在不同书写系统中的阅读研究已经取得了很大的进展，但仍有许多有趣的问题没有得到解答。更多的研究应该考察书写系统的独特属性如何促进读者发展出阅读特定文字的特异性认知机制。例如，一个需要进一步研究的有趣问题是，中文读者如何在没有屈折语素（如时态、人称、性别、数字、语气、语态和格）的帮助下解析和理解句子，而屈折语素在许多其他语言中都存在。

在未来的研究中，当尝试使用为特定语言开发的模型时，研究者应该分析和论证该模型是否可以应用于新的语言。此外，如果研究者使用未经测试的模型进行预测，那么在得出结论时应该仔细考虑书写系统特异

的属性。此外，当发布新的模型时，作者应该广泛地讨论模型适用的条件和书写系统。探索为非字母书写系统开发的模型是否可以扩展到字母书写系统是一个有趣的议题。为非字母文字开发的模型可能侧重于与字母书写系统不太相关的问题。例如，CRM使用基于加工的策略来选择眼跳目标。或许该模型可以扩展到字母阅读，来研究基于加工的阅读策略与基于词中央的阅读策略是如何结合起来的，以模拟字母阅读过程中的眼球运动。

另一组问题涉及跨语言研究。例如，对于字母和表意文字书写系统的读者，直接语义通路的应用是否类似还有待观察。虽然在两种书写系统中都采用了直接语义通路来通达词义，但表意书写系统的字符携带语义信息，而字母书写系统不携带语义信息。这种差异很可能导致直接语义通路在不同书写系统中的不同使用。为了直接比较不同书写系统的认知机制，不同文字的阅读机制应该在同一个研究中进行比较^{142,143}。对不同书写系统的研究有助于我们理解支持阅读的一般感知和认知过程，以及不同书写系统的差异是如何导致特异性阅读过程的。

原文线上发表于 2022 年 2 月

框 1 | 阅读过程中的眼动控制模型

眼动控制的第一个正式模型是 E-Z Reader 模型¹¹（最初是为英语设计的）。该模型假设在任何给定时间只能加工一个词。在完成对所注视的词的早期加工之后，眼跳被设定为以下一个词的中央为目标，并在一段延迟之后执行眼跳。只有在注视的词被完全识别之后，内隐注意才会转移到下一个词，并且开始加工下一个词。E-Z Reader 模型已经被用来模拟中文阅读中的一些发现¹⁴。然而，中文版的 E-Z Reader 模型假设词是按照字母书写系统进行切分的，眼动的控制方式与英语阅读类似。因此，这个模型无法解释词是如何切分的，以及如何在没有词间空格的帮助下选择眼跳目标的。然而，尽管存在这样的局限性，E-Z Reader 模型的中文版仍然有助于理解中文阅读（例如，这个模型突出了词切分问题，从而激发了许多关于这一主题的研究）^{101,106}。

其他模型假设多个词是并行加工的^{12,144}。一个例子是 SWIFT（Saccade-Generation with Inhibition by Foveal Targets）模型，该模型最初是为英语阅读而开发的，并用德语的实验数据进行了测试¹²。并行加工模型面临的一个挑战是如何在句子阅读过程中对词的顺序进行编码。词的顺序编码对理解非常重要；“男孩踢女孩”和“女孩踢男孩”的意思不同。OB1 Reader 模型是为了解决字母书写系统中词的顺序编码问题提出的¹³。根据 OB1 Reader 模型，读者利用副中央凹视觉中可用的词间空格来感知即将到来的词的词长信息，然后使用词长信息来确定词在句子中的位置。

所有这些模型都是为字母书写系统设计的，没有提供阅读无空格文本的解决方案。相比之下，CRM（中文阅读模型）是为中文阅读设计的，以说明中文的独特性¹⁵。它在一个模型中整合了词汇加工，词切分和眼动控制。该模型包括两个模块：词汇加工模块和眼动控制模块。词汇加工模块激活由感知范围内的字符组成的所有可能的候选词。被激活的（空间重叠的）候选词彼此竞争。当一个词在竞争中获胜时，它会同时被识别和切分。眼动控制模块使用由词汇加工模块提供的激活信息来计划眼跳。CRM 假设读者在给定的注视下加工尽可能多的字符，然后将他们的眼睛移到包含新信息的位置。CRM 成功地模拟了中文阅读中的许多重要发现^{99,111,113,145,146}。然而，目前还不清楚 CRM 是否能解释其他无空格文本的阅读。

现有的任何模型都不能同时解释字母和表意书写系统的发现。对于不同的书写系统，词是序列加工还是并行加工的问题可能会采取不同的形式。对于有明确词边界的文本，读者可以用副中央凹视觉来切分词，因此他们可能会序列加工词语（尽管争论仍在继续¹⁴⁷⁻¹⁵⁰）。在没有词间空格的情况下，读者不知道词的边界在哪里，直到知觉广度内的词被识别出来，所以他们不太可能一次只加工一个词。解释不同书写系统中的发现似乎需要一个考虑到书写系统特异性的模型。

框 2 | 书写格式影响复合词阅读

复合词有串连的（‘doorbell’）、连字符的（‘high-speed’）或空格的（‘tennis ball’）形式。关于书写格式对复合词阅读的影响，可以做出以下预测。一方面，用连字符或空格直观地标记语素边界可能有助于将词拆成语素。另一方面，当整体加工是可行的情况下，这些标记鼓励读者使用分解路径，例如字符都可以落入中央凹内的短复合词。最后，非法插入空格（“door bell”）或连字符（“door-bell”）可能会降低阅读速度，因为这种情况下词的视觉外观是不熟悉的。

在拼音文字（德语或英语）的串连复合词中非法增加空格似乎有利于长复合词的阅读¹⁵¹，但却干扰了短复合词的阅读¹⁵²。在汉语复合词中加一个空格（一种没有空格的表意文字），会干扰阅读¹⁵³。最后，删除语素边界的空格（“tennisball”）对阅读短的空格英语复合词没有显著的影响¹⁵²。

芬兰语的两项研究表明，当必须使用连字符（当同一元音跨越语素边界）时，长连字符复合词（‘vaihto-ohjelma’，意为“交换程序”）的阅读速度更快，但短连字符复合词（‘palo-ovi’，意为“消防门”）的阅读速度比没有连字符的情况下更慢^{127,154}。相比之下，在语素边界非法添加连字符会干扰长的芬兰语和荷兰语复合词的阅读。同样，在希伯来语复合词中添加可选的合法连字符（但不是偏好的连字符）也会阻碍阅读¹⁵⁶。

总而言之，目前的证据表明，当需要进行语素切分时，非法插入空格（但不是连字符）会促进复合词的阅读，这可能是由于字母文字中的词长。然而，语素边界的视觉标记（通过空格或连字符）阻碍了表意文字复合词和字母文字中短复合词的阅读。正如双路径竞争模型和 CRM 模型所提示的，那些干扰阅读的操作可能是因为格式干扰了整体加工。

术语表

字素：表示声音的最小书写单位（例如在字母书写系统中代表音素的字母或字母串，在音节和表意书写系统中的字符）。

音素：语言中使一个词区别于其他词的最小发音单位。

语素：最小的具有意义的语言单位（例如，“baseball”包含语素“base”和“ball”，“cats”包含语素“cat”和“s”）。

联结主义模型：受神经网络启发的计算网络，该网络在简单单元之间传播激活，也被称为并行分布式加工模型。

视觉复杂性：图像中包含的细节或复杂程度，反映了加工图像所需要的心理努力。

参考文献

- 1 Chomsky, N. *Aspects of the theory of syntax*. (MIT Press, 1965).
- 2 Frost, R. Towards a universal model of reading. *Behavioral and Brain Sciences* **35**, 263-279, doi:10.1017/S0140525X11001841 (2012).
- 3 Perfetti, C. in *Dyslexia across languages: Orthography and the brain-gene-behavior link* (eds P. McCardle, JR. Lee, OJL Tzeng, & B. Miller) 18-32. (Brookes Publishing, 2011).
- 4 Reichle, E. D. *Computational Models of Reading*. (Oxford University Press, 2021).
- 5 Share, D. L. On the Anglocentricities of current reading research and practice: the perils of overreliance on an "outlier" orthography. *Psychol Bull* **134**, 584-615, doi:10.1037/0033-2909.134.4.584 (2008).
- 6 McClelland, J. L. & Rumelhart, D. E. An interactive activation model of context effects in letter perception .1. An account of basic findings. *Psychol Rev* **88**, 375-407, doi:10.1037/0033-295x.88.5.375 (1981).
- 7 Seidenberg, M. S. & McClelland, J. L. A distributed, developmental model of word recognition and naming. *Psychol Rev* **96**, 523-568, doi:10.1037/0033-295x.96.4.523 (1989).
- 8 Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R. & Ziegler, J. DRC: A dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychol Rev* **108**, 204-256, doi:10.1037/0033-295x.108.1.204 (2001).
- 9 Frazier, L. & Rayner, K. Making and correcting errors during sentence comprehension: Eye movements in the analysis of structurally ambiguous sentences. *Cognitive Psychology* **14**, 178-210 (1982).
- 10 McRae, K., Spivey-Knowlton, M. J. & Tanenhaus, M. K. Modeling the influence of thematic fit (and other constraints) in on-line sentence comprehension. *Journal of Memory and Language* **38**, 283-312 (1998).
- 11 Reichle, E. D., Pollatsek, A., Fisher, D. L. & Rayner, K. Toward a model of eye movement control in reading. *Psychol Rev* **105**, 125-157, doi:10.1037/0033-295x.105.1.125 (1998).
- 12 Engbert, R., Nuthmann, A., Richter, E. M. & Kliegl, R. SWIFT: A dynamical model of saccade generation during reading. *Psychol Rev* **112**, 777-813, doi:10.1037/0033-295X.112.4.777 (2005).
- 13 Snell, J., van Leipsig, S., Grainger, J. & Meeter, M. OB1-reader: A model of word recognition and eye movements in text reading. *Psychol Rev* **125**, 969-984, doi:10.1037/rev0000119 (2018).
- 14 Rayner, K., Li, X. & Pollatsek, A. Extending the E-Z reader model of eye movement control to Chinese readers. *Cognitive Science* **31**, 1021-1033, doi:10.1080/03640210701703824 (2007).
- 15 Li, X. & Pollatsek, A. An integrated model of word processing and eye-movement control during Chinese reading. *Psychol Rev* **127**, 1139-1162, doi:10.1037/rev0000248 (2020).
- 16 Perfetti, C. A., Liu, Y. & Tan, L. The lexical constituency model: some implications of research on Chinese for general theories of reading. *Psychol Rev* **112**, 43-59, doi:10.1037/0033-295X.112.1.43 (2005).
- 17 Kessler, B. & Treiman, R. in *Edited by Alexander Pollatsek and Rebecca* (eds A Pollatsek

- & R. Treiman) 10-25 (Oxford University Press, 2015).
- 18 Rayner, K., Pollatsek, A., Ashby, J. & Clifton, J. C. *Psychology of Reading*. (Psychology Press, 2012).
- 19 Yang, J., McCandliss, B. D., Shu, H. & Zevin, J. D. Simulating language-specific and language-general effects in a statistical learning model of Chinese reading. *Journal of Memory and Language* **61**, 238-257, doi:10.1016/j.jml.2009.05.001 (2009).
- 20 Chang, L. Y., Plaut, D. C. & Perfetti, C. A. Visual complexity in orthographic learning: Modeling learning across writing system variations. *Scientific Studies of Reading* **20**, 64-85, doi:10.1080/10888438.2015.1104688 (2016).
- 21 SAC, S. A. o. C. *GB 2312-1980: Information technology—Chinese ideogram coded character set for information interchange (basic set)*. (1980).
- 22 Kinoshita, S., Schubert, T. & Verdonschot, R. G. Allograph priming Is based on abstract letter identities: Evidence from Japanese Kana. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* **45**, 183-190, doi:10.1037/xlm000563 (2019).
- 23 Hu, R., Cao, B. & Du, J. Research on phonetic symbols of phonograms in Chinese Mandarin. *Journal of Chinese Information processing* **27**, 41-47 (2013).
- 24 Carreiras, M., Perea, M. & Abu Mallouh, R. Priming of abstract letter representations may be universal: The case of Arabic. *Psychonomic Bulletin & Review* **19**, 685-690, doi:10.3758/s13423-012-0260-8 (2012).
- 25 Schubert, T., Gawthrop, R. & Kinoshita, S. Evidence for cross-script abstract identities in learners of Japanese kana. *Memory & Cognition* **46**, 1010-1021, doi:10.3758/s13421-018-0818-4 (2018).
- 26 McBride-Chang, C. & Liu, P. D. in *The extraordinary brain series. Dyslexia across languages: Orthography and the brain-gene-behavior link* (eds P. McCardle, B. Miller, J. R. Lee, & J. L. O. Tzeng) 33-43 (Paul H Brookes Publishing, 2011).
- 27 Deutsch, A., Velan, H., Merzbach, Y. & Michaly, T. The dependence of root extraction in a non-concatenated morphology on the word-specific orthographic context. *Journal of Memory and Language* **116**, 104182, doi:10.1016/j.jml.2020.104182 (2021).
- 28 Winskel, H. Insights into reading processes through investigating diversity. *Australian Journal of Psychology* **69**, 151-161, doi:10.1111/ajpy.12136 (2020).
- 29 Perfetti, C. A. The universal grammar of reading. *Scientific Studies of Reading* **7**, 3-24, doi:10.1207/S1532799xssr0701_02 (2003).
- 30 Rayner, K. Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. *Psychological Bulletin* **124**, 372-422, doi:10.1037/0033-2909.124.3.372 (1998).
- 31 Reicher, G. M. Perceptual recognition as a function of meaningfulness of stimulus material. *J Exp Psychol* **81**, 275-280, doi:10.1037/h0027768 (1969).
- 32 Li, X., Zang, C., Liversedge, S. P. & Pollatsek, A. in *The Oxford Handbook of Reading* (eds A. Pollatsek & T. Rebecca) (Oxford University Press, 2015).
- 33 Li, X., Gu, J., Liu, P. & Rayner, K. The advantage of word-based processing in Chinese reading: Evidence from eye movements. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* **39**, 879-889, doi:10.1037/a0030337 (2013).
- 34 Li, X., Zhao, W. & Pollatsek, A. Dividing lines at the word boundary position helps reading in

- Chinese. *Psychonomic Bulletin & Review* **19**, 929-934, doi:10.3758/s13423-012-0270-6 (2012).
- 35 Just, M. A. & Carpenter, P. A. A theory of reading: From eye fixations to comprehension. *Psychol Rev* **87**, 329-354 (1980).
- 36 Rayner, K. & Duffy, S. A. Lexical complexity and fixation times in reading: effects of word frequency, verb complexity, and lexical ambiguity. *Memory & Cognition* **14**, 191-201, doi:10.3758/bf03197692 (1986).
- 37 Li, X., Bicknell, K., Liu, P., Wei, W. & Rayner, K. 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**, 895-913, doi:10.1037/a0033580 (2014).
- 38 Balota, D. A., Pollatsek, A. & Rayner, K. The interaction of contextual constraints and parafoveal visual information in reading. *Cognitive Psychology* **17**, 364-390 (1985).
- 39 Rayner, K. & Well, A. D. Effects of contextual constraint on eye movements in reading: A further examination. *Psychonomic Bulletin & Review* **3**, 504-509, doi:10.3758/BF03214555 (1996).
- 40 Balota, D. A. & Chumbley, J. I. Are lexical decisions a good measure of lexical access? The role of word frequency in the neglected decision stage. *Journal of experimental psychology: Human perception and performance* **10**, 340-357, doi:10.1037/0096-1523.10.3.340 (1984).
- 41 Rayner, K. Eye movements and attention in reading, scene perception, and visual search. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* **62**, 1457-1506, doi:10.1080/17470210902816461 (2009).
- 42 Li, X. & Pollatsek, A. Word knowledge influences character perception. *Psychonomic Bulletin & Review* **18**, 833-839, doi:10.3758/s13423-011-0115-8 (2011).
- 43 Blais, C. *et al.* Reading between eye saccades. *Plos One* **4**, doi:10.1371/journal.pone.0006448 (2009).
- 44 Rayner, K. & Kaiser, J. S. Reading multilined text. *Journal of Educational Psychology* **67**, 301-306, doi:10.1037/h0077015 (1975).
- 45 Wang, H.-C. *et al.* Using singular value decomposition to investigate degraded Chinese character recognition: Evidence from eye movements during reading. *Journal of Research in Reading* **36**, S35-S50, doi:10.1111/j.1467-9817.2013.01558.x (2013).
- 46 Zhai, M. & Fischer-Baum, S. Exploring the effects of knowledge of writing on reading Chinese characters in skilled readers. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* **45**, 724-731, doi:10.1037/xlm0000604 (2019).
- 47 Perea, M. Revisiting Huey: On the importance of the upper part of words during reading. *Psychonomic Bulletin & Review* **19**, 1148-1153, doi:10.3758/s13423-012-0304-0 (2012).
- 48 Pae, H. K., Bae, S. & Yi, K. Horizontal orthography versus vertical orthography: The effects of writing direction and syllabic format on visual word recognition in Korean Hangul. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* **74**, 443-458, doi:10.1177/1747021820971503 (2021).
- 49 Kinoshita, S. & Kaplan, L. Priming of abstract letter identities in the letter match task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* **61**, 1873-1885,

- doi:10.1080/17470210701781114 (2008).
- 50 Norris, D. & Kinoshita, S. Perception as evidence accumulation and Bayesian inference: Insights from masked priming. *Journal of Experimental Psychology: General* **137**, 434-455, doi:10.1037/a0012799 (2008).
- 51 Li, X. P. D., Law, S. P., Lau, K. D. & Rapp, B. Functional orthographic units in Chinese character reading: Are there abstract radical identities? *Psychonomic Bulletin & Review* **28**, 610-623 (2021).
- 52 Kinoshita, S., Whiting, D. & Norris, D. What masked priming effects with abbreviations can tell us about abstract letter identities. *Journal of Memory and Language* **117**, 104209, doi:10.1016/j.jml.2020.104209 (2021).
- 53 Kintsch, W. The role of knowledge in discourse comprehension: A construction integration model. *Psychol Rev* **95**, 163-182, doi:10.1037/0033-295x.95.2.163 (1988).
- 54 Pickering, M. J. & Garrod, S. An integrated theory of language production and comprehension. *Behavioral and Brain Sciences* **36**, 329-347, doi:10.1017/s0140525x12001495 (2013).
- 55 MacDonald, M. C., Pearlmutter, N. J. & Seidenberg, M. S. Lexical nature of syntactic ambiguity resolution. *Psychol Rev* **101**, 676-703, doi:10.1037/0033-295x.101.4.676 (1994).
- 56 Ehrlich, S. E. & Rayner, K. Contextual effects on word perception and eye movements during reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* **20**, 641-655 (1981).
- 57 Lin, C. & Bever, T. G. in *Processing and producing head-final structures* 277-297 (Springer, 2010).
- 58 Plaut, D. C., McClelland, J. L., Seidenberg, M. S. & Patterson, K. Understanding normal and impaired word reading: Computational principles in quasi-regular domains. *Psychol Rev* **103**, 56-115, doi:10.1037/0033-295x.103.1.56 (1996).
- 59 Harm, M. W. & Seidenberg, M. S. Computing the meanings of words in reading: Cooperative division of labor between visual and phonological processes. *Psychol Rev* **111**, 662-720, doi:10.1037/0033-295x.111.3.662 (2004).
- 60 Yan, M., Wang, A., Song, H. & Kliegl, R. Parafoveal processing of phonology and semantics during the reading of Korean sentences. *Cognition* **193**, 104009, doi:10.1016/j.cognition.2019.104009 (2019).
- 61 Cho, J. R. & Chen, H. Orthographic and phonological activation in the semantic processing of Korean Hanja and Hangul. *Language and Cognitive Processes* **14**, 481-502, doi:10.1080/016909699386167 (1999).
- 62 Frost, R. Becoming literate in Hebrew: The grain size hypothesis and Semitic orthographic systems. *Developmental Science* **9**, 439-440, doi:10.1111/j.1467-7687.2006.00523.x (2006).
- 63 Frost, R. in *How children learn to read: Current issues and new directions in the integration of cognition, neurobiology and genetics of reading and dyslexia research and practice* (eds K. Pugh & P. McCardle) 235-254 (2011).
- 64 Frost, R. Toward a strong phonological theory of visual word recognition: True issues and false trails. *Psychological Bulletin* **123**, 71-99, doi:10.1037/0033-2909.123.1.71 (1998).
- 65 Frost, R. Prelexical and postlexical strategies in reading: Evidence from a deep and a shallow orthography. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* **20**, 116-129 (1994).

- 66 Frost, R. Phonological computation and missing vowels: Mapping lexical involvement in reading. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* **21**, 398-408 (1995).
- 67 Zhou, X., Marslen-Wilson, W., Taft, M. & Shu, H. Morphology, orthography, and phonology in reading Chinese compound words. *Language and Cognitive Processes* **14**, 525-565, doi:10.1080/016909699386185 (1999).
- 68 Tan, L. & Perfetti, C. A. Visual Chinese character recognition: Does phonological information mediate access to meaning? *Journal of Memory and Language* **37**, 41-57, doi:10.1006/jmla.1997.2508 (1997).
- 69 Zhou, X. & Marslen-Wilson, W. The relative time course of semantic and phonological activation in reading Chinese. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* **26**, 1245-1265, doi:10.1037//0278-7393.26.5.1245 (2000).
- 70 Chua, F. K. Phonological recoding in Chinese logograph recognition. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* **25**, 876-891, doi:10.1037/0278-7393.25.4.876 (1999).
- 71 Xu, Y., Pollatsek, A. & Potter, M. C. The activation of phonology during silent Chinese word reading. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* **25**, 838-857, doi:10.1037//0278-7393.25.4.838 (1999).
- 72 Zhang, S. L., Perfetti, C. A. & Yang, H. Whole word, frequency-general phonology in semantic processing of Chinese characters. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* **25**, 858-875, doi:10.1037/0278-7393.25.4.858 (1999).
- 73 Liu, Y., Perfetti, C. A. & Hart, L. ERP evidence for the time course of graphic, phonological, and semantic information in Chinese meaning and pronunciation decisions. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* **29**, 1231-1247, doi:10.1037/0278-7393.29.6.1231 (2003).
- 74 Perfetti, C. A. & Tan, L. The time course of graphic, phonological, and semantic activation in Chinese character identification. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* **24**, 101-118, doi:10.1037/0278-7393.24.1.101 (1998).
- 75 Perfetti, C. A. & Zhang, S. Very early phonological activation in Chinese reading. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* **21**, 24-33 (1995).
- 76 Zhou, X. & Marslen-Wilson, W. *Direct visual access is the only way to access the Chinese mental lexicon.* (1996).
- 77 Wong, A. W. K., Wu, Y. & Chew, H. C. Limited role of phonology in reading Chinese two-character compounds: Evidence from an ERP Study. *Neuroscience* **256**, 342-351, doi:10.1016/j.neuroscience.2013.10.035 (2014).
- 78 Zhang, H. *et al.* The time course of orthographic and semantic activation in Chinese character recognition: Evidence from an ERP study. *Lang Cogn Neurosci* **35**, 292-309, doi:10.1080/23273798.2019.1652762 (2020).
- 79 Dylman, A. S. & Kikutani, M. The role of semantic processing in reading Japanese orthographies: An investigation using a script-switch paradigm. *Reading and Writing* **31**, 503-531, doi:10.1007/s11145-017-9796-3 (2018).
- 80 Moscicka, A. K., Jost, L. B., Raith, M. & Maurer, U. Neurocognitive mechanisms of learning

- to read: Print tuning in beginning readers related to word-reading fluency and semantics but not phonology. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 47-47 (2013).
- 81 Coltheart, M., Curtis, B., Atkins, P. & Haller, M. Models of Reading Aloud - Dual-Route and Parallel-Distributed-Processing Approaches. *Psychol Rev* **100**, 589-608, doi:Doi 10.1037/0033-295x.100.4.589 (1993).
- 82 Rayner, K. The perceptual span and peripheral cues in reading. *Cognitive Psychology* **7**, 65-81 (1975).
- 83 McConkie, G. W. & Rayner, K. Asymmetry of the perceptual span in reading. *Bulletin of the Psychonomic Society* **8**, 365-368 (1976).
- 84 Inhoff, A. W. & Liu, W. M. The perceptual span and oculomotor activity during the reading of Chinese sentences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* **24**, 20-34, doi:10.1037/0096-1523.24.1.20 (1998).
- 85 Pollatsek, A., Bolozky, S., Well, A. D. & Rayner, K. Asymmetries in the perceptual span for Israeli Readers. *Brain and Language* **14**, 174-180, doi:10.1016/0093-934x(81)90073-0 (1981).
- 86 Zhou, W., Wang, A. & Yan, M. Eye movements and the perceptual span among skilled Uighur readers. *Vision Research* **182**, 20-26, doi:10.1016/j.visres.2021.01.005 (2021).
- 87 Paterson, K. B. *et al.* Reading direction and the central perceptual span in Urdu and English. *Plos One* **9**, e88358, doi:10.1371/journal.pone.0088358 (2014).
- 88 Su, J. *et al.* Flexibility in the perceptual span during reading: Evidence from Mongolian. *Attention Perception & Psychophysics* **82**, 1566-1572, doi:10.3758/s13414-019-01960-9 (2020).
- 89 Osaka, N. in *Perception and cognition: Advances in eye movement research* (eds G. d'Ydewalle & J. Van Rensbergen) 275-283 (North Holland, 1993).
- 90 Liu, W., Inhoff, A. W. & Li, X. Attention shifting during the reading of Chinese sentences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* **46**, 979-990, doi:10.1037/xhp0000755 (2020).
- 91 Wang, A. P., Yan, M., Wang, B., Jia, G. D. & Inhoff, A. W. The perceptual span in Tibetan reading. *Psychological Research-Psychologische Forschung* **85**, 1307-1316, doi:10.1007/s00426-020-01313-4 (2021).
- 92 Schad, D. J. & Engbert, R. The zoom lens of attention: Simulating shuffled versus normal text reading using the SWIFT model. *Visual Cognition* **20**, 391-421, doi:10.1080/13506285.2012.670143 (2012).
- 93 Rayner, K., Fischer, M. H. & Pollatsek, A. Unspaced text interferes with both word identification and eye movement control. *Vision Research* **38**, 1129-1144, doi:Doi 10.1016/S0042-6989(97)00274-5 (1998).
- 94 Perea, M. & Acha, J. Space information is important for reading. *Vision Research* **49**, 1994-2000, doi:10.1016/j.visres.2009.05.009 (2009).
- 95 Winkler, H. in *Attention and Vision in Language Processing* (eds R. Mishra, N. Srinivasan, & F. Huettig) (Springer, 2015).
- 96 Sainio, M., Hyona, J., Bingushi, K. & Bertram, R. The role of interword spacing in reading Japanese: An eye movement study. *Vision Research* **47**, 2575-2584, doi:10.1016/j.visres.2007.05.017 (2007).

- 97 Reilly, R. & Radach, R. The dynamics of reading in non-Roman writing systems: A Reading and Writing Special Issue. *Reading and Writing* **25**, 935-950, doi:10.1007/s11145-012-9369-4 (2012).
- 98 Huang, L. & Li, X. Early, but not overwhelming: The effect of prior context on segmenting overlapping ambiguous strings when reading Chinese. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* **73**, 1382-1395, doi:10.1177/1747021820926012 (2020).
- 99 Ma, G., Li, X. & Rayner, K. Word segmentation of overlapping ambiguous strings during Chinese reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* **40**, 1046-1059, doi:10.1037/a0035389 (2014).
- 100 Huang, L., Staub, A. & Li, X. Prior context influences lexical competition when segmenting Chinese overlapping ambiguous strings. *Journal of Memory and Language* **118**, 104218, doi:10.1016/j.jml.2021.104218 (2021).
- 101 Li, X., Rayner, K. & Cave, K. R. On the segmentation of Chinese words during reading. *Cognitive Psychology* **58**, 525-552, doi:10.1016/j.cogpsych.2009.02.003 (2009).
- 102 O'Regan, J. K. & Jacobs, A. M. Optimal viewing position effect in word recognition: A challenge to current theory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* **18**, 185-197 (1992).
- 103 Rayner, K. Eye guidance in reading: Fixation locations within words. *Perception* **8**, 21-30 (1979).
- 104 Vitu, F., McConkie, G. W., Kerr, P. & O'Regan, J. K. Fixation location effects on fixation durations during reading: An inverted optimal viewing position effect. *Vision Research* **41**, 3513-3533, doi:10.1016/s0042-6989(01)00166-3 (2001).
- 105 Nuthmann, A., Engbert, R. & Kliegl, R. Mislocated fixations during reading and the inverted optimal viewing position effect. *Vision Research* **45**, 2201-2217, doi:10.1016/j.visres.2005.02.014 (2005).
- 106 Li, X., Liu, P. & Rayner, K. Eye movement guidance in Chinese reading: Is there a preferred viewing location? *Vision Research* **51**, 1146-1156, doi:10.1016/j.visres.2011.03.004 (2011).
- 107 Yan, M., Kliegl, R., Richter, E. M., Nuthmann, A. & Shu, H. Flexible saccade-target selection in Chinese reading. *Q J Exp Psychol* **63**, 705-725, doi:10.1080/17470210903114858 (2010).
- 108 Yan, M. & Kliegl, R. 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**, 1832-1838, doi:10.1037/xlm0000276 (2016).
- 109 Ma, G., Li, X. & Pollatsek, A. There is no relationship between the preferred viewing location and word segmentation in Chinese reading. *Visual Cognition* **23**, 399-414 (2015).
- 110 Li, X., Liu, P. & Rayner, K. Saccade target selection in Chinese reading. *Psychonomic Bulletin & Review* **22**, 524-530, doi:10.3758/s13423-014-0693-3 (2015).
- 111 Wei, W., Li, X. & Pollatsek, A. 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 (2013).
- 112 Liu, Y., Reichle, E. D. & Li, X. The effect of word frequency and parafoveal preview on saccade length during the reading of Chinese. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance* **42**, 1008-1025, doi:10.1037/xhp0000190 (2016).
- 113 Liu, Y., Reichle, E. D. & Li, X. Parafoveal processing affects outgoing saccade length during

- the reading of Chinese. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* **41**, 1229-1236, doi:10.1037/xlm0000057 (2015).
- 114 McConkie, G. W., Kerr, P. W., Reddix, M. D. & Zola, D. Eye movement control during reading: I. The location of initial eye fixations on words. *Vision Research* **28**, 1107-1118, doi:10.1016/0042-6989(88)90137-x (1988).
- 115 Henderson, J. M. & Ferreira, F. Effects of foveal processing difficulty on the perceptual span in reading: Implications for attention and eye movement control. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn* **16**, 417-429, doi:10.1037//0278-7393.16.3.417 (1990).
- 116 Drieghe, D. Foveal processing and word skipping during reading. *Psychonomic Bulletin & Review* **15**, 856-860, doi:10.3758/pbr.15.4.856 (2008).
- 117 Risse, S. & Kliegl, R. Evidence for delayed parafoveal-on-foveal effects from word n+2 in reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* **38**, 1026-1042, doi:10.1037/a0027735 (2012).
- 118 Slattery, T. J. & Yates, M. Word skipping: Effects of word length, predictability, spelling and reading skill. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* **71**, 250-259, doi:10.1080/17470218.2017.1310264 (2018).
- 119 White, S. J. & Liversedge, S. P. Foveal processing difficulty does not modulate non-foveal orthographic influences on fixation positions. *Vision Research* **46**, 426 – 437 (2006).
- 120 Reilly, R. G., Aranyanak, I., Yu, L., Yan, G. & Tang, S. Eye movement control in reading Thai and Chinese. *Studies of Psychology and Behavior* **9**, 35–44 (2011).
- 121 Winkler, H., Radach, R. & Luksaneeyanawin, S. Eye movements when reading spaced and unspaced Thai and English: A comparison of Thai-English bilinguals and English monolinguals. *Journal of Memory and Language* **61**, 339-351, doi:10.1016/j.jml.2009.07.002 (2009).
- 122 White, S. J., Hirotsu, M. & Liversedge, S. P. Eye movement behaviour during reading of Japanese sentences: Effects of word length and visual complexity. *Reading and Writing* **25**, 981-1006, doi:10.1007/s11145-010-9289-0 (2012).
- 123 Liu, Y. *et al.* The effects of parafoveal word frequency and segmentation on saccade targeting during Chinese reading. *Psychonomic Bulletin & Review* **26**, 1367-1376, doi:10.3758/s13423-019-01577-x (2019).
- 124 Taft, M. & Forster, K. I. Lexical storage and retrieval of prefixed words. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* **14**, 638-647, doi:10.1016/S0022-5371(75)80051-X (1975).
- 125 Hyönä, J. in *The Oxford handbook of reading* (eds A. Pollatsek & R. Treiman) 114-128 (Oxford University Press, 2015).
- 126 Bertram, R. & Hyönä, J. The length of a complex word modifies the role of morphological structure: Evidence from eye movements when reading short and long Finnish compounds. *Journal of Memory and Language* **48**, 615-634, doi:10.1016/S0749-596x(02)00539-9 (2003).
- 127 Bertram, R. & Hyona, J. The role of hyphens at the constituent boundary in compound word identification facilitative for long, detrimental for short compound words. *Experimental Psychology* **60**, 157-163, doi:10.1027/1618-3169/a000183 (2013).
- 128 Hyönä, J., Pollatsek, A., Koski, M. & Olkonieni, H. An eye-tracking study of reading long and short novel and lexicalized compound words. *Journal of Eye Movement Research* **13**,

- doi:10.16910/jemr.13.4.3 (2020).
- 129 Peng, D. L., Liu, Y. & Wang, C. in *Reading Chinese script: A cognitive analysis* (eds J. Wang, A. W. Inhoff, & H.-C. Chen) 65–89 (Erlbaum, 1999).
- 130 Tse, C.-S. & Yap, M. J. The role of lexical variables in the visual recognition of two-character Chinese compound words: A megastudy analysis. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* **71**, 2022-2038, doi:10.1177/1747021817738965 (2018).
- 131 Yan, G., Tian, H., Bai, X. & Rayner, K. The effect of word and character frequency on the eye movements of Chinese readers. *British Journal of Psychology* **97**, 259-268, doi:10.1348/000712605x70066 (2006).
- 132 Chen, H. C., Song, H., Lau, W. Y., Wong, K. F. E. & Tang, S. L. in *Reading development in Chinese children* (eds C. McBride-Chang & H. C. Chen) 157–169 (Praeger, 2003).
- 133 Cui, L. *et al.* Processing of compound-word characters in reading Chinese: An eye-movement-contingent display change study. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* **66**, 527-547, doi:10.1080/17470218.2012.667423 (2013).
- 134 Ma, G., Li, X. & Rayner, K. Readers extract character frequency information from nonfixated-target word at long pretarget fixations during Chinese reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* **41**, 1409-1419, doi:10.1037/xhp0000072 (2015).
- 135 Cui, L. *et al.* Compound word frequency modifies the effect of character frequency in reading Chinese. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* **74**, 610-633, doi:10.1177/1747021820973661 (2021).
- 136 Yu, L., Liu, Y. & Reichle, E. D. A corpus-based versus experimental examination of word- and character-frequency effects in Chinese reading: Theoretical implications for models of reading. *Journal of Experimental Psychology: General* **Advance online publication**, doi:10.1037/xge0001014 (2020).
- 137 Yang, J., Staub, A., Li, N., Wang, S. & Rayner, K. Plausibility effects when reading one- and two-character words in Chinese: Evidence from eye movements. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* **38**, 1801-1809, doi:10.1037/a0028478 (2012).
- 138 Shen, W., Li, X. & Pollatsek, A. The processing of Chinese compound words with ambiguous morphemes in sentence context. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* **71**, 1-10, doi:10.1080/17470218.2016.1270975 (2017).
- 139 Zhou, J. & Li, X. On the segmentation of Chinese incremental words. *Journal of experimental psychology: Learning, memory, and cognition*, doi:10.1037/xlm0000984 (2021).
- 140 Liversedge, S. P., Hyona, J. & Rayner, K. Eye movements during Chinese reading. *Journal of Research in Reading* **36**, S1-S3, doi:10.1111/jrir.12001 (2013).
- 141 Seidenberg, M. S. in *The extraordinary brain series. Dyslexia across languages: Orthography and the brain-gene-behavior link* (eds P. McCardle, B. Miller, J. R. Lee, & O. J. L. Tzeng) 146–168 (Paul H Brookes Publishing, 2011).
- 142 Cop, U., Dirix, N., Drieghe, D. & Duyck, W. Presenting GECO: An eyetracking corpus of monolingual and bilingual sentence reading. *Behavior Research Methods* **49**, 602-615, doi:10.3758/s13428-016-0734-0 (2017).
- 143 Liversedge, S. P. *et al.* Universality in eye movements and reading: A trilingual investigation.

- Cognition* **147**, 1-20 (2016).
- 144 Reilly, R. G. & Radach, R. Some empirical tests of an interactive activation model of eye movement control in reading. *Cogn Syst Res* **7**, 34-55, doi:10.1016/j.cogsys.2005.07.006 (2006).
- 145 Gu, J., Li, X. & Liversedge, S. P. Character order processing in Chinese reading. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* **41**, 127-137, doi:10.1037/a0038639 (2015).
- 146 Rayner, K., Li, X., Juhasz, B. J. & Yan, G. The effect of word predictability on the eye movements of Chinese readers. *Psychon Bull Rev* **12**, 1089-1093, doi:10.3758/bf03206448 (2005).
- 147 Pollatsek, A., Reichle, E. D. & Rayner, K. 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**, 1485-1489, doi:10.1037/0096-1523.32.6.1485 (2006).
- 148 Pollatsek, A., Reichle, E. D. & Rayner, K. Attention to one word at a time in reading is still a viable hypothesis: Rejoinder to Inhoff, Radach, and Eiter (2006). *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* **32**, 1496-1500, doi:10.1037/0096-1523.32.6.1496 (2006).
- 149 Inhoff, A. W., Eiter, B. M. & Radach, R. Time course of linguistic information extraction from consecutive words during eye fixations in reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* **31**, 979-995, doi:10.1037/0096-1523.31.5.979 (2005).
- 150 Schotter, E. R. & Jia, A. N. Semantic and plausibility preview benefit effects in English: Evidence from eye movements. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* **42**, 1839-1866, doi:10.1037/xlm0000281 (2016).
- 151 Inhoff, A. W., Radach, R. & Heller, D. Complex compounds in German: Interword spaces facilitate segmentation but hinder assignment of meaning. *Journal of Memory and Language* **42**, 23-50, doi:10.1006/jmla.1999.2666 (2000).
- 152 Juhasz, B. J., Inhoff, A. W. & Rayner, K. The role of interword spaces in the processing of English compound words. *Language and Cognitive Processes* **20**, 291-316, doi:10.1080/01690960444000133 (2005).
- 153 Bai, X., Yan, G., Liversedge, S. P., Zang, C. & Rayner, K. Reading spaced and unspaced Chinese text: Evidence from eye movements. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* **34**, 1277-1287, doi:10.1037/0096-1523.34.5.1277 (2008).
- 154 Haikio, T., Bertram, R. & Hyona, J. The development of whole-word representations in compound word processing: Evidence from eye fixation patterns of elementary school children. *Appl Psycholinguist* **32**, 533-551, doi:10.1017/S0142716411000208 (2011).
- 155 Bertram, R., Kuperman, V., Baayen, R. H. & Hyona, J. The hyphen as a segmentation cue in triconstituent compound processing: It's getting better all the time. *Scandinavian Journal of Psychology* **52**, 530-544, doi:10.1111/j.1467-9450.2011.00914.x (2011).
- 156 Kuperman, V. & Deutsch, A. Morphological and visual cues in compound word reading: Eye-tracking evidence from Hebrew. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* **73**, 2177-2187, doi:10.1177/1747021820940297 (2020).