

《当代语言学》第! " 卷 # \$! % 年第 & (e) (% ' 页, 北京
! " # \$ % & ' () * + , # - . / \$, 0 / , + , - ! " , / , . & , # \$! % , 0 1 . (& e) (% ' .

阅读能力个体差异的神经机制研究进展

薛红莉 薛 贵

提要 阅读是人脑的高级功能之一,也是现代社会人们生活中不可缺少的一部分。由于文字短暂的进化史,人类缺乏专门的基因和神经模块负责文字加工,阅读需要经过多年的专门学习和系统训练,这一过程也带来了阅读能力的显著个体差异。随着功能影像技术的发展,研究者在阅读的认知神经科学领域取得了较大进展,并逐步揭示了阅读能力的个体差异,特别是正常群体内部个体差异的认知和神经机制。本文首先概述阅读所涉及的基本认知过程及神经机制,然后从脑功能和脑结构方面,综述近年来对阅读能力个体差异的认知神经机制研究的主要发现,并进一步讨论建立个体神经水平差异与阅读能力之间因果关系的几种重要的研究方法及有关成果。文章最后对阅读能力个体差异的未来研究方向提出几点建议。

关键词 阅读能力 个体差异 神经机制 因果关系

R67 /7@B=- F@N<5B=57< P; 87B-M9; D
567 \; 89K98@=- I 9>>7B7; C7< ,> I 7=89; D LN9-9597<

i P4 h, ; D-9 =; 8 i P4 O@9

! " # \$ % & ' \$ I 7=89; D 9< =; 9; 89<17; <9N-7 1=B5 ,> 6@: =; -9>7 9; 567 : , 87B; 7B=. I @7 5, 567
B7=-59K7-M <6, B5 69-5, BM ,> JB9557; --; D@=D7< 9; 6@: =; 7K, @59; ; E 95 9< D7; 7B=-M N7-97K78 56=5
567 6@: =; 9< @-9S7-M 5, 6=K7 87K7-, 178 <17C9=-9T78 D7; 7< , B ; 7@B=- C9BC@95B97< 5, 1B, C7<<
JB9557; --; D@=D7<. OB, N=N-M 8@7 5, 569< B7=<, ; E >@7; 5 B7=89; D 9; K, -K7< M7=B<X ,> , B: =-
78@C=59, ; =; 8 5B=9; 9; DE =; 8 567B7 =B7 <9D; 9-9C=; 5 9; 89K98@=- 89>>7B7; C7< 9; B7=89; D =N9-9597<.
L 956 567 87K7-, 1: 7; 5 ,> ; , ; 9; K=<9K7 >@; C59, ; - 9: =D9; D 57C6; 9Z@7< 9; 567 -=<5 5J, 87C=87<E
B7<7=BC67B< 6=K7 : =87 : =', B 1B, DB7<<7< 9; @; 87B<5=; 89; D 567 ; 7@B=- <@N<5B=57< ,> 9; 89K98@=-
89>>7B7; C7< 9; B7=89; D =N9-9597<.

R67 1B7<7; 5 1=17B =9: < =5 B7K97J9; D 567 C, D; 959K7 1B, C7<< =; 8 ; 7@B=- : 7C6=; 9< : < ,>
B7=89; D =< J7-- =< <, ; 7 ,> 567 7AC959; D =8K=; C7< 9; @; 87B<5=; 89; D 567 ; 7@B=- N=<9< ,>
9; 89K98@=- 89>>7B7; C7<. 4A9<59; D <5@897< 6=K7 B7K7=-78 =5-7=<5 56B77 NB=9; B7D9, ; < 9; K, -K78 9;
B7=89; DE 9; C=@89; D 567 57: 1, B, , CC9195=- C, B57AE 567 57: 1, B, 1=B975=- C, B57A =; 8 567 9; >7B9, B
>B, ; 5=- C, B57A. G, ; <9<57; 5 J956 567 8@=-LB, @57 : , 87- <@DD7<578 NM 567 N76=K9, B=-E
> 7@B, 1<MC6, -, D9C=-E =; 8 C, : 1@5=59, ; =- <5@897<E 567 -7>5 <@1B=: =BD9; =- DMB@<E 1, <57B9, B
<@17B9, B 57: 1, B=- DMB@<E =; 8 8, B<=- 9; >7B9, B >B, ; 5=- DMB@<=B7 : =9; -M 9; K, -K78 9; =<<7: N-78
16, ; , -, DME 9.7. E 567 9; 89B7C5 B, @57E J69C6 5B=; <, B: < K9@=- J, B8< 9; 5, 16, ; , -, DM 56B, @D6
DB=167: 7UB, U16, ; 7: 7 C, BB7<1, ; 87; C7< V OOGW. \; C, ; 5B=<5E 567 K7; 5B=- 1=B5 ,> 567 -=57B=-
57: 1, B=- C, B57A =; 8 567 9; >7B9, B >B, ; 5=- DMB@<=B7 : =9; -M 9; K, -K78 9; 567 =88B7<<78

16, ; , DME 9. 7.E 567 89B7C5 B, @57E J69C6 =C697K7< 16, ; , D9C=- =CC7<< K9= 567 89B7C5 =<<, C9=59, ; < N75J77; 567 K9<@=->, B: < , > J, B8< =; 8 5679B <, @; 8<.

k@B567B: , B7E 7A9<59; D <5@897< 6=K7 <6, J; 56=5 567 : =; M ; 7@B=- : 7=<@B7< =B7 =<<, C9=578 J956 9; 89K98@=- 89>>7B7; C7< 9; B7=89; D =N9-9597<E 9; C=@89; D NB=9; =C59K95M -7K7-<E DB=M : =557B K, -@: 7E J6957 : =557B 9; 57DB95M =; 8 >@; C59, ; =- C, ; ; 7C59K95M =: , ; D : @-591-7 NB=9; B7D9, ; <E J69C6 9< : , 8@=-578 NM 567 C6=B=C57B9<59C< , > 89>>7B7; 5 JB959; D <M<57: <. \; 1=B59C@=-BE 9; CB7=<78 =C59K95M 9; -7>5L67: 9<167B7 : 988-7 57: 1, B=- =; 8 9;>7B9, B >8, ; 5=- DMB9 =; 8 87CB7=<78 =C59K95M 9; B9D65 9;>7B, 57: 1, B=- C, B59C=- =B7=< =B7 =<<, C9=578 J956 N7557B B7=89; D =N9-9597<. 1>67B7=< 567 C, B59C=- 569CS; 7<< , > 567 57: 1, B, 1=B975=- =B7= 9< 1, <959K7-M C, BB7=-578 J956 567 B7=89; D , > 9BB7D@=-B J, B8<E 567 DB=M : =557B K, -@: 7 9; 567 -7>5 : 988-7 >8, ; 5=- DMB@< 9< C, BB7=-578 J956 G69; 7<7 J, B8 B7=89; D. \; C, ; 5B=<5E 567 C, B59C=- 569CS; 7<< 9; 567 -7>5 : 98U@<9>, B: DMB@< J=< 1, <959K7-M C, BB7=-578 J956 17B>, B: =; C7 , ; B7=89; D =N9-9597< , > N, 56 G69; 7<7 C6=B=C57B< =; 8 4; D-9<6 J, B8<E <@DD7<59; D 95< C, : : , ; B, -7 9; 567 B7=89; D , > 89>>7B7; 5 JB959; D <M<57: <. P<9; D 89>>@<9, ; 57; <, B 9: =D9; D V I R W 5, : 7=<@B7 567 J6957 : =557B 9; 57DB95M 9; 87A78 NM -B=C59, ; =- =; 9<, 5B, 1M V kLWE 95 6=< N77; <6, J; 56=5 567 kL , > -7>5 57: 1, B, 1=B975=- =B7=E -7>5 >8, ; 5=- -, N7 =; 8 C, B1@< C=-, <@: J=< =<<, C9=578 J956 B7=89; D =N9-95M. k@; C59, ; =- C, ; ; 7C59K95M <5@897< >@B567B <@DD7<578 56=5 567 C, ; ; 7C59, ; <5B7; D56 N75J77; 567 -7>5 57: 1, B, 1=B975=- B7D9, ; =; 8 567 HB, C= =B7= 9< 1, <959K7-M C, BB7=-578 J956 B7=89; D =N9-95M. k9; =-ME B7<59; DU<5=57 >@; C59, ; =- C, ; ; 7C59K95M V I FkGW J9569; 567 B7=89; D ; 75J, BS 6=< =-<, N77; -9; S78 5, B7=89; D =N9-9597< 9; ; =59K7 -; ; D@=D7 V g! W =; 8 <7C, ; 8 -; ; D@=D7 V g#W.

() * +, %-# B7=89; D =N9-95ME 9; 89K98@=- 89>>7B7; C7<E ; 7@B=- : 7C6=; 9< <E C=@<=- B7=-59, ; <691

./ 引言

在当今信息驱动的社会，阅读对于个体的生存和发展起着至关重要的作用。同时，在全球化的今天，掌握一种或多种外语也越来越普遍。语言是人类特有的技能，但语言能力的不同方面具有不同的进化和文化起源。例如，虽然口语是生物进化的结果，而阅读和书写却是近五千年来的文化发明。相对于人类漫长的进化史，这个短暂的时间不足以让人类进化出特定的基因或者先天的神经网络负责文字加工(?CG=; 8-9<<, 75 =-. #\$\$\$*)。相反，阅读能力的获得和发展是一个渐进累积的过程，即在一定的遗传基础上，通过早期家庭的自发式学习，以及后期的系统教育和训练逐步掌握，最后在成人期进一步发展和完善。基于此，I 76=7; 7 和 G, 67; (#\$\$') 的神经元再利用假说(; 7@B, ; =- B7CMU C-9; D 6M1, 567<9<) 认为，文化的获得(如阅读) 需要找到一系列负责该功能的神经回路(如视觉加工、物体识别)，并在此基础上发展新的用途。人脑需要在多年的系统学习中，重新利用并塑造该网络的结构和功能，来实现高效和自动化的阅读加工。

虽然阅读能力的获得和发展在各个文化和群体中存在相似的规律，但不同个体之间的阅读能力差异却是广泛存在的。例如，有人可以快速有效地学会阅读多种语言，但是有人却存在阅读困难(如阅读障碍)，尽管他们具有正常的智

力、完整的神经结构以及相等的学习机会。此外，尽管大部分人能够流利地阅读母语，但在学习第二语言时却存在较大的困难。因此，从遗传、行为、认知以及脑结构和脑功能等多个角度揭示阅读能力的个体差异，具有重要的理论和实践意义，并得到了学术界的广泛关注。

阅读能力的个体差异包含阅读障碍和正常人之间的差异，以及正常人群内部的差异。对于前一个问题已经有很多文章进行了综述(O@D6, 75 =-. #\$\$\$=; F6=MJ95T =; 8 F6=MJ95T #\$\$*, #\$\$(; +7--@59; , , 75 =-. #\$\$&; O@D6 #\$\$\$; +=; 87B: , <57; , 75 =-. #!#N)。本文重点探讨正常人群内部阅读能力个体差异的神经机制。文章首先概述阅读的认知神经机制，接着从神经层面探讨阅读能力个体差异的机制，并进一步探讨建立个体神经水平差异与阅读能力之间因果关系的研究方法，最后对未来有关研究做出简要的展望。

0/ 阅读的认知神经机制概述

阅读加工包含多个认知成分和加工过程。在神经机制上，阅读也是由一个广泛的神经网络来支持。在本节中，我们将首先简述阅读的认知过程，然后介绍与阅读有关的脑区以及阅读中语音通达的神经双通路机制。

早在上个世纪，认知心理学家们就阅读所包含的各种认知成分和过程提出了很多模型，包括模块化的认知加工模型和联结主义模型(C, ; ; 7C59; ; 9-5 : , 87- , F7987; N7BD =; 8 ?CG-7--; 8 !e"e; OB9C7 =; 8 kB9<5; ; !ee'; OB9C7 #\$\$\$)。其中，G, -567=85 等(!ee*) 提出的“双通路模型”得到了普遍的认可，并对阅读的神经机制研究有很大的影响。该模型认为，阅读者首先从“视觉特征分析”开始。经过视觉分析，识别词中的各个字母，视觉文字被转换成抽象的形式(-757B 987; 59>9C=59; ;)，这种抽象的形式独立于其位置、大小、颜色等外部信息。视觉分析之后，词开始进入不同的加工过程。阅读者认识和熟悉的词进入“视觉输入词典”，如果与词典中的某个表征一致，该词就被识别了。之后词进入语义系统，与阅读者已有的知识发生联系并被理解。接着词进入“语音输出词典”进行语音提取，阅读者随后产出言语。这个过程就是直接的语音提取通路。对于不熟悉、不认识的词或者无意义的假词，阅读者在视觉识别之后利用形音转换规则，通过拼读词的语音进行言语产出。这就是间接的拼读通路。G, -567=85 等(#\$\$!) 修订版的双通路模型认为，语音提取通路和拼读通路并不是完全分离的。两个过程会同时参与，甚至说是相互竞争。同时，词汇阅读使用哪条通路并不是不变的，随着阅读经验的增加、词汇熟悉性的增强，会越来越多地使用直接的语音提取通路，而拼读通路的作用会慢慢减弱。

采用功能磁共振技术(>@; C59; ; =- : =D; 759C B7<; =; C7 9: =D9; D , >?I \)，以阅读障碍和正常群体为被试，研究者发现了阅读中最重要的三个脑区(颞枕皮层、

颞顶皮层和额下皮层)。其中,位于颞枕区域的左侧梭状回在词汇的视觉字形加工中具有非常重要的作用(G,67; , 75 =. #\$\$\$)。元分析结果发现它在不同文字系统中的作用是非常相似的(H,-D7B, 75 =. #\$\$() ,除了母语加工,也参与第二语言(R=; , 75 =. #!!)以及新语言(i@7, 75 =. #\$\$=, #\$\$%N)的加工。位于左脑外侧裂的颞顶皮层包括三个子区域:颞上回后部、缘上回和角回。对于颞上回后部的功能,研究一致认为其是负责语音加工的区域(OB9C7 #\$\$\$; +9D; 7=@, 75 =. #\$\$\$)。对于缘上回和角回的作用,目前研究还没有得到一致的结论。有研究认为缘上回和角回与语义加工有关(OB9C7 #\$\$\$; +9D; 7=@, 75 =. #\$\$\$),但是还有研究报告缘上回是阅读中跨通道(形音)转换的区域(H,56, 75 =. #\$\$\$, #\$\$&),角回负责语音通达过程,不涉及语义加工(F6=MJ9T, 75 =. !ee"; O@D6, 75 =. #\$\$\$=; F6=MJ9T, 75 =. #\$\$\$#; F6=MJ9T =; 8 F6=MJ9T #\$\$* , #\$\$(; h,7>5, 75 =. #\$\$')。进一步白质连接的研究发现,缘上回和角回所在通路上的分离导致两者在功能上的差异:缘上回主要连接语音加工的额下皮层后部,而角回则连接语义加工的区域(G=5=; 9, 75 =. #\$\$\$#; G=5=; 9, 75 =. #\$\$()。最后,额下回也分为三个子区域:额下回眶部、三角部和盖部。研究者通过比较一系列只有语音或语义的任务,发现背侧后部的额下回盖部负责语音加工,而背侧前部的三角部和腹侧的眶部负责语义加工(O,-8B=CS, 75 =. !eee)。这一发现后来得到了大量实证研究和元分析研究的证实(I 7: N, 75 =. !ee(; b=BN@B5,; , 75 =. !ee%; q=5,BB7, 75 =. !ee%; o7<<7; , 75 =. !eee; O=@-7<@, 75 =. #\$\$\$; L8=: < =; 8 0=; =5= #\$\$\$#; H, ,56, 75 =. #\$\$\$#; O@B8, 75 =. #\$\$\$#; H9; 87B, 75 =. #\$\$*; HB9D65, 75 =. #\$\$&; I, ; ; N7BD, 75 =. #\$\$\$&)。

与阅读的双通路模型对应,拼读和语音提取也涉及两种不同的神经通路(o,N=B8, 75 =. #\$\$*),拼读通路主要由颞上回、缘上回和前额叶颞盖部负责;语音提取通路主要由颞下回、颞中回后部和额下回的三角区域负责,这些区域在语义加工中扮演着重要的角色。这些结果主要来自于真词和假词的阅读比较(h7BN<57B, 75 =. !ee'; HB@;<J9CS, 75 =. !eee; k97T, 75 =. !eee; h=D, ,B5, 75 =. !eee; k97N=C6, 75 =. #\$\$\$#; F9: ,<, 75 =. #\$\$\$#; ?7C67--9, O,B; ,UR7: 19; 9, 75 =. #\$\$*; ?7C67--9, GB9; 5,; , 75 =. #\$\$(; /,<=B59, 75 =. #!\$),发音不规则词汇和发音规则词汇的阅读比较(k97T, 75 =. !eee; ?7C67--9, 75 =. #\$\$(; /,<=B59, 75 =. #!\$),汉字和汉语拼音的阅读比较(G67; , 75 =. #\$\$\$#; k@, 75 =. #\$\$\$#)以及词汇3语义判断和语音判断任务比较(I@: <7M, 75 =. !ee'; O,-8B=CS, 75 =. !eee; H@B5,; , 75 =. #\$\$*; I 7K-9; , 75 =. #\$\$*; ?C1 7B: ,55, 75 =. #\$\$*; p@, , 75 =. #\$\$\$&)。以上研究多使用自然语言为材料,虽然具有

较强的生态学效度，但无法完全控制材料之间在视觉复杂性、材料的熟悉性、语音或语义等方面的差异。为了克服这些困难，Zhang等(2008)采用人工语言训练的范式，严格控制拼读(形音对应规则)和语音提取(形音对应规则被打乱)两组实验材料的视觉复杂性、语音、熟悉性及学习经验等方面的差异，以期能够更清晰地揭示两条阅读通路的神经机制。结果发现，语音提取在前扣带皮层、后扣带皮层、右眶额皮层、角回以及颞中回有较强的激活，而拼读在左侧中央前回、额下回和缘上回有较强的激活。由此证实了阅读的神经双通路模型。有趣的是，研究还发现，随着对材料熟悉性的增加，拼读组材料在神经通路上从拼读通路向语音提取通路转换，从而在神经层面支持了修订版的双通路模型(Goldman-Rakic, 1985; Hagoort, 1993; Zhang et al., 2008)。

1/ 阅读能力个体差异的神经机制

研究者经常发现，无论在阅读的行为表现，如阅读速度和正确性，还是在阅读的神经机制上均存在不可忽略的个体差异(DeFries, 1976; Zhang et al., 2008)。这个领域一个重要的问题是，个体差异在阅读过程中的神经机制是怎样的？近年来磁共振技术的进步为探讨阅读能力个体差异提供了多种手段。利用这些手段，研究者们不仅能探讨传统任务状态下脑激活强度与阅读能力个体差异的关系，还能开始探讨脑灰质结构、脑白质结构与阅读能力个体差异的关系，以及多个脑区(皮层)功能连接与阅读能力个体差异的关系。本节将对各种脑成像技术下取得的脑阅读能力关系的研究进行讨论。

*.1 大脑功能层面的阅读能力个体差异

对于大脑功能与阅读能力个体差异的关系，早期通过对比阅读障碍者与正常人在阅读任务中大脑激活强度差异后发现，与正常人相比，阅读障碍者在阅读时相关脑区(左侧颞顶、颞枕以及额下区域)存在激活异常(Fox et al., 2006; Zhang et al., 2008; Zhang et al., 2009; Zhang et al., 2010)。在正常群体中，研究发现，大脑左侧阅读相关脑区(颞中、额下皮层)的正激活与阅读能力有关，而右侧颞下皮层的负激活与阅读能力有关(Rosen et al., 2005)。另外，采用事件相关电位(Zhang et al., 2008; Zhang et al., 2010)和fMRI同时考察视觉词汇识别脑机制的研究发现，fMRI的波幅(被认为是特异于字形加工的成分)和左侧梭状回的活动与被试的阅读成绩存在正相关，即被试的阅读成绩越好，波幅越大，其在左侧梭状回的激活也越强(Hagoort, 2005)。其他研究也发现了相似的结果(Rosen et al., 2005; Fox et al., 2006; Zhang et al., 2008; Zhang et al., 2009; Zhang et al., 2010)。

采用脑功能成像的方法揭示阅读能力的个体差异具有非常明显的优势，可以直接反映阅读加工过程。但采用任务态脑成像的一个重大挑战是，大脑激活水平的差异可能仅仅反映了不同认知过程的差异，而不是大脑功能的差异。由于个体阅读能力的差异，相同的阅读任务可能带来任务难度的差异。一方面，如果难度太大，有些个体无法完成该任务，就会导致个体放弃加工或者使用猜测的方式，从而导致不同认知过程的参与和激活模式的差异；为了减少这个过程对激活模式的影响，在分析中一般需要排除错误的材料。另一方面，任务难度的差异还反映在加工时间以及大脑参与时间的差异。为了克服这个影响，往往需要把反应时作为协变量排除。但这些统计的方法并不能应对反应时和大脑活动的非线性关系。更重要的是，如果个体采用不同的认知加工策略或者一些补偿机制，情况就更加复杂。为此，研究者往往采用非常简单的阅读任务来减少任务表现对大脑激活的影响。近年来，研究者开始考察非任务状态下大脑结构和静息态功能活动的差异与阅读能力之间的关系。

*.# 脑灰质结构层面的阅读能力个体差异

同任务态相比，采用非任务状态下的脑结构数据考察阅读能力个体差异的神经机制，具有独特的优势。例如，测量数据不受任务的影响，可以采用自动化的分析技术，从而方便进行大样本的研究，并提高研究的效率和结果的可靠性。对于脑结构的研究通常考察灰质和白质的结构。其中，灰质是中枢神经系统中大量神经元聚集的部位，能够对信息进行深入处理；白质由神经元的轴突组成，本身不具有处理信息的功能，但是能在不同灰质之间或者灰质与外周器官之间传递信息，协调脑区之间的正常运作。对于大脑结构灰质的研究通常以皮层厚度和灰质密度(或体积)为测量指标，采用的方法包括基于体素的形态学测量(K, A7-UN=<78 : ,B16. : 75BM, +H?) 方法(L<6N@B; 7B =; 8 kB9-5; ; #\$\$\$) 及基于表面的(<@B=C7UN=<78) 分析方法(l=-7, 75 =. !eee; k9<C6-, 75 =. !eee) 等。

在阅读能力与大脑皮层厚度的关系上，研究发现负责形音转换区域(如颞顶区域)的皮层厚度与不规则词汇的阅读能力呈正相关(H=-CS: ; , 75 =. #!\$)，而中文阅读和书写相关脑区(如左侧额中回)的灰质体积与中文的阅读能力有关(F9,S, 75 =. #\$\$\$)。另有研究发现左侧梭状回中部的皮层厚度不仅与母语(表义文字)的阅读能力有关，也与第二语言(表音文字)的阅读成绩呈正相关(q6=D, 75 =. #!*=)，说明大脑灰质结构在不同语言的阅读能力中都起到重要作用。阅读能力包括语音解码和文本理解两个基本过程，研究发现大学生被试的语音解码能力与颞顶区域皮层厚度的左侧化程度呈正相关，而文本理解能力与右侧额叶的皮层厚度呈正相关(b7-C; 7, 75 =. #!!)。

上述研究主要采用单个阅读任务来定义个体的阅读能力。但阅读是一个复

杂的过程，包含多个不同的成分，单个任务往往无法涵盖所有成分，也无法对各个成分进行准确区分。h7 等 (#\$! *) 以 &!% 名大学生为被试，采用 7 个阅读任务系统，分离出阅读能力的三个成分：语音解码、形音连接和阅读速度。他们进一步采用多元模式分析(: @-59K=B9=57 1=557B; =; =-M<9<, ?+0L) 的方法探讨了其中 #(* 名被试的大脑灰质体积和阅读能力各个子成分之间的关系。结果发现，左上顶叶延伸到缘上回的灰质体积与语音解码有关，海马和小脑的灰质体积能够预测形音连接的成绩，大脑枕叶、颞叶、顶叶以及额叶皮层的灰质体积与阅读速度存在相关；同时，语音解码和形音连接独立于一般的认知能力，如智力、记忆和加工速度，而阅读速度和智力以及加工速度存在一定相关。

*. * 脑白质结构层面的阅读能力个体差异

阅读的完成需要大脑多个区域的协同活动，而白质纤维的连接在其中起到重要作用。研究者主要采用弥散张量成像(89>>@<9, ; 57;<, B 9: =D9; 7, l R\) 来考察白质的特性。目前有许多量化的参数来描述白质的弥散张量，其中各向异性(>B=C59, ; =- =; 9<, 5B, 1M, kL) 能很好地反映白质纤维束连接的有效性(kL 值越大，白质纤维连接越有效)，从而在认知神经科学研究中得到广泛使用。利用 l R\ 中的纤维追踪技术，研究者找到了连接语言重要脑区的多条白质纤维，包括连接枕叶和颞叶的下纵束(9; >7B9, B -, ; D95@89; =- >><C9C@-@<, \gk)、连接枕叶和额叶的下额枕束(9; >7B9, B >B, ; 5, U, CC9195=- >><C9C@-@<, \k[k)、连接额叶与颞叶、顶叶和枕叶的上纵束(<@17B9, B -, ; D95@89; =- >><C9C@-@<, Fgk) 等。

p-9; DN7BD 等(#\$\$\$) 第一次考察了 kL 与阅读能力的关系，结果发现阅读能力强的被试双侧颞顶区域的 kL 值更高。后来许多研究者多次验证了左侧颞顶区域的白质纤维 kL 值与阅读能力的关系(H7=@-97@, 75 =-. #\$\$\$(; l 7@5<C6, 75 =-. #\$\$\$(; /9, D9 =; 8 ?CG=; 8-9<< #\$\$\$; F579; NB9; S, 75 =-. #\$\$"; G=857B, 75 =-. #\$\$e; [87D=B8, 75 =-. #\$\$e; l 9: B, 85, 75 =-. #!\$; g7N7-, 75 =-. #! *; q6=; D, 75 =-. #!&)。除了颞顶区域，左侧额叶(l 7@5<C6, 75 =-. #\$\$\$(; l 9C6=B8<, 75 =-. #\$\$"; F579; NB9; S, 75 =-. #\$\$"; G=857B, 75 =-. #\$\$e; l 9: B, 85, 75 =-. #!\$) 以及胼胝体(l , @D67B5M, 75 =-. #\$\$'; kB7M, 75 =-. #\$\$"; [87D=B8, 75 =-. #\$\$e) 的 kL 值都与阅读能力相关。还有研究发现下额枕束和下纵束的 kL 值与阅读能力有关(+=; 87B: , <57; , 75 =-. #!# =)。

目前为止，有关白质纤维束的连接与阅读能力关系的证据大都来自于小样本阅读障碍者与正常人的比较。一项针对正常群体的大样本研究发现，大脑双侧区域尤其是额叶、顶叶以及颞叶之间连接的 kL 值与阅读能力呈正相关(g7N7-, 75 =-. #! *)。还有两项研究比较了表音文字和表义文字的阅读能力与大脑白质连接的关系。有研究在同一批被试身上比较了汉英双语者的阅读能

力，结果发现左侧内囊前肢的弥散值与中文阅读能力有关，双侧放射冠的弥散值与英语阅读能力有关($r = .75, p < .001$)。另有研究比较以中文和英文为母语的两组被试后发现，母语阅读能力(无论中文还是英文)都与左侧阅读有关脑区的 kL 值有关，如与语音加工有关的放射冠、胼胝体及上纵束，与语义加工有关的腹侧钩束、外囊及下额枕束；但位于上纵束中左侧颞叶部分的 kL 值对英文阅读能力的贡献大于中文，提示上纵束与表音文字的形音转换规则有关($r = .75, p < .001$)。

*. & 脑功能连接层面的阅读能力个体差异

除了大脑的白质纤维连接，大脑的功能连接强度也是阅读能力的有效神经指标。有多个指标可以考察大脑多个脑区协同活动的情况，包括任务状态下的功能连接(不带方向性)、有效连接(带方向性)，以及非任务状态下的静息态功能连接等。其中，种子点方法($r = .778, p < .001$)、聚类($r = .887, p < .001$)、独立成分分析($r = .871, p < .001$)、主成分分析($r = .891, p < .001$)是常见的全脑功能连接方法。与功能连接不同的是，有效连接探讨的是一个神经系统对其他神经系统的影响，方法包括结构方程模型($r = .77, p < .001$)、结构因果模型($r = .87, p < .001$)、动态因果模型($r = .89, p < .001$)、

身上，左侧视觉字形区和布洛卡区以及顶下区域的静息态功能连接与阅读能力呈正相关，左侧视觉字形区和默认网络的静息态功能连接与阅读能力呈负相关。但在儿童身上不存在这种关系，说明左侧视觉字形区与其他脑区的静息态功能连接对阅读的贡献是从儿童到成人中逐步发展起来的(p, M=, 75 =. # \$!!)。静息态功能连接不仅与母语阅读能力有关，也与第二语言的阅读有关。其中，视觉分析区域(如双侧梭状回后部、外侧枕叶皮层和右侧顶上小叶)与语音加工脑区(如中央前回、中央后回和威尔尼克区)的静息态功能连接越强，被试母语和第二语言的阅读能力越强(q6=; D, 75 =-. # \$! *N)。

可以看到，利用 fMRI 技术，研究者们发现多个神经活动指标，包括任务状态下脑激活强度与功能连接，非任务状态下脑灰质结构、白质结构，以及静息态功能连接均与阅读能力相关。这些研究大大加深了我们对阅读能力及其个体差异的认知神经机制的认识。但是上述研究主要是基于相关分析，因此不能为阅读能力的个体差异提供因果解释。由于大脑具有可塑性，这些结果可能反映了大脑先前的结构和功能对阅读能力的制约，也可能反映了不同阅读过程对大脑结构和功能的塑造，以及两者的交互作用。因此，研究者们试图采用基因、追踪和训练研究的方法，以期建立个体神经水平差异与阅读能力之间的因果关系。

2/ 建立个体神经水平差异与阅读能力的因果关系

2.1 基因研究

对于阅读能力个体差异的原因，最直接的方法是从遗传和基因的角度(包括行为遗传学和分子遗传学)进行探讨。对双生子阅读能力的探讨能够揭示不同阅读能力的遗传度，而利用分子遗传学分析技术则可以揭示与阅读能力有关的基因。

行为遗传学大多以双生子群体为被试，这方面的研究能够从遗传和环境两个方面回答阅读能力个体差异的原因。一系列双生子行为遗传学的研究证实了阅读能力受到遗传因素的影响(17k97<, 75 =-. !e''; O=M=; =; 8 [-<; #\$\$*; h=B==B, 75 =-. #\$\$(\$; h=JS7, 75 =-. #\$\$\$; l=K9<, 75 =-. #\$\$"; HMB; 7, 75 =-. #\$\$e; kb97; 8, 75 =-. #\$\$e)。一项对 &#e! 对双生子的追踪研究发现，语言能力在 7 岁、10 岁和 15 岁时都具有稳定的遗传度((') % ' z)，同时语言能力在一定程度上受到环境的影响(! \$) ! ' z) (h=B==B, 75 =-. #\$\$')。阅读能力的各个方面也在不同程度上受到遗传的影响(H9<6, 1, 75 =-. #\$\$\$; O75B9-- , 75 =-. #\$\$\$; G6, J, 75 =-. # \$!!)。例如语音短时记忆的遗传度为 %! z，词法形态为 ' & z，句法为 "# z，词汇为 ! z (H9<6, 1, 75 =-. #\$\$\$)。

不仅如此，随着分子遗传学分析技术的出现，研究者们开始在分子水平上

探讨阅读能力个体差异的原因。其中，最著名的便是对 KIAA0303 基因的研究。研究者通过染色体组型分析首先在一个患有言语障碍的三代家族——p4

此外,对不同年龄段(6-12岁)儿童的追踪研究发现,在年龄偏小组,与语音编码有关的脑区(如额下回、基底节)的激活越强,7年后的阅读能力越好;而在年龄偏大组,视觉分析区域(如颞枕梭状回)的激活越强,7年后的阅读能力越好(?C/BD=; , 75 =-. #S!)。这些结果说明,在不同的发展阶段,决定阅读能力的神经机制不同。

可以看到追踪研究能够有效地揭示影响阅读能力的重要因素,并实现阅读能力的早期预测,为早期干预提供了可能。但追踪研究需要持续较长时间,也带来了一些困难,包括样本维护和流失,影响因素多而且测量困难,脑功能成像仪器的更新或老化等导致的误差等。为了克服追踪研究的困难,一些研究者采用训练研究的方法探讨了阅读能力的个体差异。

&.* 训练研究

训练研究可以严格控制语言学习的经验和学习方法,并在相对较短的时间内达到较高的熟练性水平。特别是采用人工语言的训练,能够很好地分离学习阅读的不同成分,从而揭示阅读能力不同方面的神经机制。

通过训练被试学习外语音节模式,有研究发现,与训练前相比,训练后学习较好的被试在左侧颞上后部的激活较强,学习较差的被试在右侧颞上后部、右侧额下回、前额叶以及额叶中部区域的激活较强。更重要的是,研究者还发现,训练前两组被试在神经活动上就存在差异,学习较好的被试在颞上回区域有较强的活动(b, ;D, 75 =-. #S\$'),同时音节学习较差的被试在左侧颞横回的灰质体积较小(b, ;D, 75 =-. #S\$")。此外,外语语音训练的研究发现,学习较快的被试在左侧顶叶(O, -7<5=;9, 75 =-. #S\$#)、左侧颞横(O, -7<5=;9, 75 =-. #S\$')区域的白质体积较大。

采用人工语言训练的范式,研究者比较了阅读障碍和非阅读障碍者在学习语音和字形之间连接上的差异,发现阅读障碍者对字母组合能力的缺陷导致学习能力较差(LB=K7;=, 75 =-. #S!*)。在正常群体方面, i@7 等(#S\$%=)考察了在学习新的人工语言之前,被试阅读新语言的大脑激活与阅读能力的关系。结果发现,学习前阅读新语言时大脑梭状回左侧化程度越高的被试,新语言的字形学习成绩越好。另外,以往研究已经表明阅读中大脑活动的一侧化存在性别差异,男性主要表现出左侧化,而女性表现出双侧化的激活模式(p=; <=S@, 75 =-. #S\$\$)。与此一致,研究者们进一步发现,字形学习效率与大脑激活模式之间的关系模式也存在性别差异(G67; , 75 =-. #S\$')。并且,学习前梭状回激活的左侧化能够显著预测男性学习的长时保持(l, ;D, 75 =-. #S\$")。同时,除了字形学习,研究还发现学习前语音加工时左侧颞中回3颞上沟激活越强、右侧额下回激活越弱的被试,两周后的听力任务成绩越好(?79, 75 =-. #S\$")。

可以看到，采用人工语言训练的方式可以有效地揭示阅读能力的个体差异及其神经机制，并且建立因果关系。然而，以人工语言为实验材料在生态学效率方面仍然存在一定的缺陷。由于词汇数量的限制，难以研究元语言意识以及一些重要的阅读效应，如邻近效应和规则效应等。另外，成人和儿童在阅读能力习得上也存在认知和神经机制的差异。

3/ 研究展望

近年来，有关阅读能力个体差异的多学科研究取得了很大的进展。来自基因、行为、脑功能及脑结构的研究发现，阅读能力与大脑多个神经指标都存在关系，并且随着个体发展的不同阶段，阅读能力的神经机制也存在一定的差异。对母语和第二语言阅读能力的考察发现，二者在神经机制方面存在一致性和差异性。另外，研究发现阅读前大脑神经模式的差异可以预测后来的阅读能力。这些结果一方面大大加深了对脑与语言关系的认识，也为阅读能力的早期预测和早期干预提供了重要的研究基础。未来的研究有望在如下几个方面取得更大的突破。

第一，开展大样本研究，更加全面系统地探讨阅读能力各个成分的个体差异及其认知和神经机制。通过综合采集基因、脑、阅读能力等方面的数据，并运用复杂的数据分析方法，可以建立更加准确的阅读能力预测模型。另外，目前的研究对象主要集中在词汇水平，未来研究需加强探讨句子和篇章等水平的阅读能力的个体差异。

第二，从发展的角度深入揭示阅读能力个体差异的遗传和环境机制及其相应的神经基础。遗传和环境及其交互作用对阅读能力的获得至关重要，其中大脑发育和阅读能力发展的关系值得深入研究，这对于更加深入地揭示阅读能力个体差异的产生机制具有重要意义。

第三，开展阅读能力个体差异神经机制的跨文化研究，尤其是母语和第二语言之间的交互作用。由于受到文化背景的影响，不同文字系统可能存在不同的神经机制。已有研究开始揭示母语和第二语言阅读能力个体差异在神经机制方面的异同，今后的研究需要进一步揭示这些异同，并从同化和顺应的角度揭示其内在的机制。

第四，开展阅读能力干预训练的研究。在阅读能力的早期预测的基础上，今后的研究需要重点开展基于脑的阅读能力干预训练的研究，包括一些行为的干预方案、无损脑刺激的干预方案、脑机接口和神经反馈训练的方案以及神经药物的干预方案。另外，研究者需要关注个体对不同的训练方案的反应，从而实现个性化的阅读训练和矫正。

I 7>B7; C7< [引用文献]

L8=: < , I . H. =; 8 O. o=: =5=. #\$\$\$#. L C, : 1=B9<; , > ; 7@B=- C9BC@95< @; 87B-M9; D =@895, BM =; 8 K9<@=-
 , N'7C5 C=57D, B9T=59, ; . S% ("=&)-% !% #: *%!) ' ' .

LB=K7; = , F. , O. F; 7--9; D< , o. R9': < , =; 8 ? . b. K=; 87B ? , -7; . # \$! * . L -=NLC ; 5B, --78 <9: @=-59, ; , > =
 -7557Bk-177C6 < , @; 8 N9; 89; D 87-9C95 9; 8M<-7A9=. N" . (#)4 "6 C>'% (&#%)4 ! 1,43 : /*01"4"-* ! ! (&:
 %e!) ' \$' .

L<6N@B; 7B , o. =; 8 p.o. kB9-5, ; . #\$\$\$\$. +, A7-LN=<78 : , B16, : 75BM: R67 : 756, 8<. S% ("=&)-% ! ! %: "\$ (< >) # ! .

H7=@-97@ , G. , G. O-7J7< , g. L. O=@<; , 75 =-. #\$\$\$ (. \ : =D9; D NB=9; C, ; ; 7C59K95M 9; C69-8B7; J956
 89K7B<7 B7=89; D =N9-95M. S% ("=&)-% # (&: ! #%) ' ! .

H9; 87B , o. I . , p. L. ? Cp97B; =; , ? . 4. O=B<; < , 75 =-. #\$\$\$* . /7@B=- C, BB7=-57< , > -7A9C=- =CC7<< 8@B9; D
 K9<@=- J, B8 B7C, D; 959, ; . N" . (#)4 "6 ! "-#,\$,A% S% (" / O, % # 0% ! (; * : *' #) e* .

H9; 87B , o. I . , I . L. ? 78-7B , I . I 7<=9 , g. g. G, ; =; 5 , =; 8 4. g97N7; 56=-. #\$\$\$ (. F, : 7
 ; 7@B, 16M<9, -, D9C=- C, ; <5B=9; 5< , ; ; , 87-< , > J, B8 ; =: 9; D. S% ("=&)-% #' * : %' ') e* .

H9<6, 1 , I . +. , G. +. L8=: < , =; 8 G. k. /, BN@BM. #\$\$\$%. I 9<59; C5 D7; 759C 9; >@7; C7< ; ; DB=: : =B =; 8
 16, ; , -, D9C=- <6, B5L7B: : 7: , BM 87-9C95<: 4K987; C7 >B, : %LM7=BU, -8 5J9;<. Q%#%# / , ?) , #) #3
 ?%1) A, " (# : ! (") %e.

H9<J=- , H. , k. q. Q75S9; , +. ? . h=@D65, ; , =; 8 o. F. hM87. ! ee (. k@; C59, ; =- C, ; ; 7C59K95M 9; 567 : , 5, B
 C, B57A , > B7<59; D 6@=: ; NB=9; @<9; D 7C6, UI=-; =B ? I \ . <) -#%\$, O T% / " #) # 0% , # <%3, 0, # % * & & : (* ')
 & ! .

H=-CS: ; , p. , b. H. H=BB , I . p@T; 97CSM , 75 =-. # \$! \$. O6 , ; 759C=-M 9BB7D@=-B J, B8 1B, ; @; C9=59, ; =; 8
 C, B59C=- 569CS; 7<< 9; 567 =8@-5 NB=9; . S% ("=&)-% (! &: ! & (*) " .

H, -D7B , I . o. , G. L. O7B>7559 , =; 8 b. FC6; 7987B. #\$\$\$ (. GB, <<LC@-5@B=- 7>>7C5 , ; 567 NB=9; B7K9<9578:
 P; 9K7B<=- <5B@C5@B7< 1-@< JB959; D <M<57: K=B9=59, ; . M. &) # ? () , # < > ' ' , # - # (! : e#) ! \$ & .

H, 56 , o. I . , I . I . H@B: =; , o. I . ? 7M7B , I . I . O957-: =; , R. H. O=BB9<6 , =; 8 ? . ? . ? 7<@=-: . #\$\$\$#.
 ? , 8=-95M 9; 8717; 87; C7 , > J, B8 C, : 1B767; <9, ; . M. &) # ? () , # < > ' ' , # - 1% & : # (!) % ! .

———. #\$\$\$&. I 7K7-, 1: 7; 5 , > NB=9; : 7C6=; 9<: < > , B 1B, C7<<9; D , B56, DB=169C =; 8 16, ; , -, D9C
 B71B7<7; 5=59, ; <. N" . (#)4 "6 ! "-#,\$,A% S% (" / O, % # 0% ! % ; ; ! # * &) &e.

HB7: , F. , p. H@C67B , O. h=-87B , 75 =-. #\$\$\$%. 4K987; C7 > , B 87K7-, 1: 7; 5=- C6=; D7< 9; 567 K

9; C69-887; J956 8M<-7A9=. : /*01,)(*(T%/)(01 ! ' # ; * : # ! () e.
G=5=; 9 , ? . , l . p . o . ; 7 < , = ; 8 l . h . k <M5C67. #\$\$\$(. 07B9<M-K9=; -=; D@=D7 ; 75J, BS< , > 567 6@= =; NB=9; .
9##)4/ "6 S%. ("4" -* (' ! : ") ! %.
G=5=; 9 , ? . , l . o . h , J=88 , F . O =7K9C , = ; 8 l . p . o . ; 7 < . #\$\$\$. +9B5@=- 9; K9K , 9; 57B=C59K7 89<<7C59 , ; , >
J6957 : =557B >><C9C@-9 9; 567 6@= =; NB=9; . S%. ("=&)-% ! ' ! : ' ') e&.
G67; , G . , O . i @7 , v . l , ; D , 75 =- . #\$\$' . F7A 8757B: 9; 7< 567 ; 7@B , >@; C59 , ; =- 1B789C5, B< , > K9<@=- J , B8
-7=B; 9; D . S%. ("/*01"4"-)) & (& : ' & !) ' .
G67; , Q . , F . k @ , F . l . N\K7B<7; , F . ? . F : 956 , = ; 8 O . ? . ? =5567J<. #\$\$\$. R7<59; D > , B 8@=- NB=9;
1B , C7<<9; D B , @57< 9; B7=89; D : L 89B7C5 C , ; 5B=<5 , > G69; 7<7 C6=B=C57B = ; 8 19; M9; B7=89; D @<9; D
k?I \ . N". (#)4 "6 ! "-#,\$A% S%. ("0,%#0% ! & ; : ! \$" "") e".
G6 , J , H . b . , G . F . h , , F . b . b , ; D , ? . ? . b =M7 , = ; 8 l . + . H9<6 , 1 . # \$! ! . O7 ; 759C = ; 8 7 ; K9B , ; : 7 ; 5=-
9 ; >@7; C7< , ; G69; 7<7 -=; D@=D7 = ; 8 B7=89; D =N9-9597<. : +ED ESC % # : 7 ! %&&\$.
G , 67; , g . , F . l 76=7; 7 , g . / =CC=C67 , 75 =- . #\$\$\$. R67 K9<@=- J , B8 > , B : =B7= : F1=59=- = ; 8 57 : 1 , B=-
C6=B=C57B9T=59 ; , > = ; 9 ; 959-- <5=D7 , > B7=89; D 9 ; , B : =- <@N'7C5< = ; 8 1 , <57B9 , B <1-95UNB=9; 1=597; 5<.
?() , # ! # * # : #e !) * \$ ' .
G , -567=B5 , ? . , p . l =-5-7 , G . 07BBM , = ; 8 ? . h =-7B . l ee* . ? , 87< , > B7=89; D =- , @8 : l @=-LB , @57 = ; 8
1-B=-7-LB9<5B9N@578UIB , C7<<9; D =11B , -C67< . : /*01"4"- , 0)4 T%A,% ! ! \$ \$ & : ("e) % \$ " .
G , -567=B5 , ? . , p . l =-5-7 , G . 07BBM , l . g =; D8 ; , = ; 8 o . q97D-7B . # \$! ! . l l G : L 8@=- B , @57 C=C=878
: , 87- > K9<@=- J , B8 B7C , D ; 959 ; , = ; 8 B7=89; D =- , @8 . : /*01"4"- , 0)4 T%A,% ! ! \$ " ! : # \$ &) (% .
G , 17 , / . , l . h =B , -8 , O . h9- , 75 =- . #\$\$\$(. F5B ; D 7K987; C7 56=5 p\LL\$* ! e , ; C6B , : , < , : 7 % 1 9< =
<@C7159N9-95M D7 ; 7 > , B 87K7- , 1 : 7 ; 5=- 8M<-7A9=. P1% 9&%(0) # N". (#)4 "6 M . &) # Q%#%\$, O / ' % & : (" !
) e ! .
G , B87< , l . , + . h=@D65 ; , o . l . G =B7J , p . LB= ; =S9< , = ; 8 p . ? =B=K9=- . #\$\$\$. h97B=BC69C=- C-@<57B9; D
5 , : 7<@B7 C , ; 7C59K95M 9 ; >?I \ B7<59; DU5=57 8=5= . <) -#%\$, 0 T%"#) #0% =&) - , # - # \$ & : * \$ () ! ' .
l =-7 , L . ? . , H . k9<C6- , = ; 8 ? . \ . F7B7 ; , ! eee . G , B59C=- <@B=C7UN=<78 = ; =M<9< , \ : F7D : 7 ; 5=59 ; , = ; 8
<@B=C7 B7C , ; <5B@C59 ; , . S%. ("=&)-% e # : ! ' e) e&.
l =K9< , [. F . , Q . p , K = , / . h =B=-B , 75 =- . #\$\$\$. O7 ; 7B=9<5 D7 ; 7< = ; 8 567 \ ; 57B ; 75 D7 ; 7B=59 ; , : 459 , - , DM
, > -7=B ; 9 ; D =N9-9597< NM J7N 57<59; D =5 =D7 ! Q . % # % / , ? () , #) # 3 ? % 1) A , " (' & : & () % # .
l 7k897< , o . G . , l . b . k @-S7B , = ; 8 ? . G . g =H@8= . ! e " ' . 4K987 ; C7 > , B = D7 ; 759C =759 , - , DM 9 ; B7=89; D
89<=N9-95M , > 5J9 ; < . S) . (% * # e % ! * e : (*) e .
l 76=7 ; 7 , F . , 4 . l @1 , @A , o . ? 76-7B , 75 =- . ! ee' . L ; =5 ; 9C=- K=B9=N9-95M 9 ; 567 C , B59C=- B71B7<7 ; 5=59 ; ,
> , >B<5 = ; 8 <7C ; 8 =- ; D@=D7 . S%. ("(% "\$ " ! ' : * "\$e) ! (.
l 76=7 ; 7 , F . = ; 8 g . G , 67 ; . # \$ \$ ' . G @5@B=- B7CMC-9 ; D , > C , B59C=- : =1< . S%. (" # (% # : * "&) e" .
l 7 : N , o . H . , o . 4 . l 7< ; , 8 , L . l . b =D ; 7B , 75 =- . ! ee(. F7 = ; 59C 7 ; C , 89 ; D = ; 8 B75B97K=- 9 ; 567 -7>5
9 ; >7B9 , B 1B7>B ; 5=- C , B57A : L >@ ; C59 ; =- ? I \ <5@8M , > 5<=S 89>9C@-5M = ; 8 1B , C7<<<17C9>9C95M . N". (#)4
"6 S%. ("0,%#0% ! (e : (" \$) " .
l 7@5<C6 , O . p . , l . k . l , @D67B5M , l . H = : 7B , 75 =- . #\$\$\$ (. G69-887 ; K< B7=89; D 17B> , B : = ; C7 9< C , BB7=-578
J956 J6957 : =557B <5B@C5@B7 : 7<=@B78 NM 89>>@<9 ; 57 ; < , B 9 : =D9 ; D . ! ("(\$> & ! * : * (&) % * .
l 7K-9 ; , o . R . , O . ? . ? =5567J< , = ; 8 ? . k . l @<6J , B56 . #\$\$\$. F7 : = ; 59C 1B , C7<<9 ; D 9 ; 567 -7>5 9 ; >7B9 , B
1B7>B ; 5=- C , B57A : L C ; N9 ; 78 >@ ; C59 ; =- =D ; 759C B7< , = ; C7 9 : =D9 ; D = ; 8 5B ; <CB= ; 9-- =D ; 759C
<59 : @=-59 ; , <5@8M . N". (#)4 "6 ! "-#,\$A% S%. ("0,%#0% ! (! : !) !) & .
l , ; D , v . , g . ? 79 , O . i @7 , 75 =- . #\$\$\$. F7ALB717 ; 87 ; 5 ; 7@B , >@ ; C59 ; =- 1B789C5, B< , > - , ; DU57B:
: =9 ; 57 ; = ; C7 , > K9<@=- J , B8 -7=B ; 9 ; D . S%. ("0,%#0% + % \$\$\$ (/ & * \$ # : " ') e ! .
l , @D67B5M , l . k . , ? . H7 ; UF6=C6=B , O . p . l 7@5<C6 , 75 =- . #\$\$\$. R7 : 1 , B=-LC=- , -- 1=56J=M 89>>@<9K95M
1B789C5< 16 ; , - , D9C=- <S9< 9 ; C69-887 ; . : ("0%#3, #- / "6 \$1% S) \$, "#)4 90) 3%& * "6 DO,%#0% / "6 \$1%
J # , \$ % 3 D \$) \$ % / "6 9&%(0) (: S9D) ! \$ & # \$: " (%) % ! .
k97N=C6 , G . o . , L . l . k B9787B9C9 , p . ? @-7B , = ; 8 l . Q . K , ; GB = ; , . # \$\$\$. >?I \ 7K987 ; C7 > , B 8@=- B , @57<
5 , 567 : 7 ; 5=- -7A9C ; 9 ; K9<@=- J , B8 B7C , D ; 959 ; . N". (#)4 "6 ! "-#,\$A% S%. ("0,%#0% ! & ! : ! !) # * .
k97T , o . L . , l . L . H = , =5 , ? . 4 . l =9C6-7 , = ; 8 F . 4 . 0757B<7 ; . ! eee . 4>>7C5< , > -7A9C=-95M , >B7Z@7 ; CM , = ; 8
<17--9 ; DU5 , Uk , @ ; 8 C , ; <4<57 ; CM , ; 567 >@ ; C59 ; =- = ; 5 , : M , > B7=89; D . S%. (" # # & ! : # \$ () ! " .

k9<C6- , H. , ? . \. F7B7; , , =; 8 L. ? . I =-7. !eee. G, B59C=- <@B=C7UN=<78 =; =-M<9< , \: \; >=59; , ; , >=-557; 9; D , =; 8 = <@B=C7UN=<78 C, , B89; =57 <M<57: . S%. ("=&)-%e #: !e(C) # \$' .

kB7M , F. , o. F. G=: 1N7-- , O. H. O9S7 , =; 8 ? . O75B987<. # \$ \$' . I 9<, C9=59; D 567 6@: =; --; D@=D7 1=56J=M< J956 69D6 =; D@=B B7<, -@59; , 89>>@<9; , >9N7B 5B=C5, DB=16M. N". (#)4 "6 S%. (" /0,%#0% #' " &(: !! &* () &&.

kB97; 8 , L. , o. G. I 7k897< , I . p. [<; , ; 75 =-. # \$ \$e. h7B95=N9-95M , > 69D6 B7=89; D =N9-95M =; 8 95< 9; 57B=C59; , J956 1=B7; 5=- 78@C=59; , . ?%1)A," (Q%#%\$,0/ *e &: &#') *%.

kB9<5; , , p.o. , G. I . k8956 , O. k. g988-7 , =; 8 I . F. kB=C5, J9=S. !ee*. k@; C59; , =- C; ; ; 7C59K95M: R67 1B9; C91=-L; , 1; ; 7; 5 =; =-M<9< , > --BD7 (O4R) 8=5= <75<. N". (#)4 "6 ! %(%F)4 ?4""3 B4" I)#3 <%\$)F"4,/ &! * !: () !&.

kB9<5; , , p.o. , g. h=BB9<; , =; 8 b. 07; ; M. # \$ \$* . I M; =: 9C C=@<-: , 87--9; D. S%. ("=&)-% !e &: !# ' *) * \$ #.

k@ , F. , Q. G67; , F. F: 956 , F. \K7B<7; , =; 8 O. ? . ?=5567J<. # \$ \$ #. 4>>7C5< , > J, B8 >, B: ; ; NB=9; 1B, C7<<9; D , > JB9557; G69; 7<7. S%. ("=&)-% !' * ; ! (* ") &".

O=M=; , o. =; 8 I . p. [<; , ; . # \$ \$* . O7; 759C =; 8 7; K9B; , ; 7; 5=- 9; >@7; C7< , ; ; 9; 89K98@=- 89>>7B7; C7< 9; 1B9; 578 J, B8 B7C, D; 959; , . N". (#)4 "6 C>' %(&%# \$)4 ! 1,43 : / *01"4"- * '& #: e') ! #* .

O, -7<5=; 9 , / . , / . ? , -S, , F. I 76=7; 7 , I . g7H96=; , =; 8 G. 0=-97B. # \$ \$' . HB=9; <5B@C5@B7 1B789C5< 567 -7-B; 9; D , >>, B79D; <177C6 <, @; 8<. ! %(%F)4 ! " (\$> !' * ; ' () " # .

O, -7<5=; 9 , / . , R. 0=@< , =; 8 I . o. q=5, BB7. # \$ \$ #. L; =5; : 9C=-C, BB7=57< , > -7=B; 9; D ; , K7- <177C6 <, @; 8<. S%. (" # * (, : ee') ! \$! \$.

OB79C9@< , ? . I . , O. FB9K=<5=K= , L. g. I 79<< , =; 8 +. ?7; , ; . # \$ \$ &. I 7>=@5U , 87 ; 75J, BS =C59K95M 89<59; D@&<67< L-T679: 7BK< 89<7=<7 -B; , 67=56M=D9; D: 4K987; C7 -B; , >@; C59; , =- ? I \ . : S9D ! \$! , ! * : &%* ') & #.

O@B8 , o. ? . , p. L. : @; 5< , o. h. b79<< , 75 =-. # \$ \$ #. O, <57B9, B 1=B975=- C, B57A 9< 9: 1-9C=578 9; C; , 59; @, @< <J95C69; D N75J77; K7BN=- >@7; CM 5=<S<: L; >? I \ <5@8M J956 C-9; 9C=- 9: 1-9C=59; , <. ?() , # ! # (, (: ! \$ # &) * " .

h=D, B5 , O. , O. \; 87>B7M , G. HB, J; , 75 =-. !eee. R67 ; 7@B=- C9BC@95BM 9; K, -K78 9; 567 B7=89; D , > O7B: =; J, B8<=; 8 1<7@8, J, B8<: L O4R <5@8M. N". (#)4 "6 ! "-#,\$,A% S%. (" /0,%#0% !! &: * " *) e".

h=: 1<; , ? . , k. R, S, D-@ , q. F@; , 75 =-. # \$ \$ % . G, ; ; 7C59K95MUN76=K9, B =; =-M<9< B7K7=< 56=5 >@; C59; , =- C; , ; ; 7C59K95M N75J77; -7>5 HL * e =; 8 HB, C=-B7=K=B97< J956 B7=89; D =N9-95M. S%. ("=&)-% * ! #: (! *) e.

h=; ; @=-lb, @119 , p. , / . p=: 9; 7; U6, =- , ? . R=91=-7 , 75 =-. # \$ \$ (. R67 =A; , D@98=; C7 B7C715, B D7; 7 I [H [! %< C=; 898=57 D7; 7 >, B 87K7<, 1: 7; 5=- 8M<7A9=. : +ED Q%#%\$,0/ ! &: 7(\$.

h=B=-B , / . , k. ? . F19; =56 , O. F. I =-7 , =; 8 I . O-; : 9; . # \$ \$ (. O7; 759C 9; >@7; C7< , ; ; 7=B-M J, B8 B7C, D; 959; , =N9-9597< =; 8 89<=N9-9597<: L <5@8M , >' UM7=BU, -8 5J9; <. N". (#)4 "6 ! 1,43 : / *01"4"- *) #3 : / *01,) \$ * & & : * ' *) " & .

h=B=-B , / . , O. F. I =-7 , =; 8 I . O-; : 9; . # \$ \$' . kB; : -7=B; 9; D 5, B7=8 5, B7=89; D 5, -7=B; : F@N<5=; 59=- =; 8 <5=N-7 D7; 759C 9; >@7; C7. ! 1,43 @%A%"' &%# \$ ' " !: !! %) * ! .

h=JS7 , o. g. , F. o. b=8<J, B56 , =; 8 o. G. I 7kB97<. # \$ \$ % . O7; 759C 9; >@7; C7< , ; ; B7=89; D 89>9C@-597< 9; N, M< =; 8 D9B<: R67 G, -, B=8, 5J9; <5@8M. @* /4%>,) ! # !: # !) e.

h7 , v. , O. i @7 , G. G67; , q. g. g@ , =; 8 v. I , ; D. # \$! * . I 7C, 89; D 567 ; 7@B, =; =5; : 9C=- N=<9< , > B7=89; D =N9-95M: L : @-59K, A7- : , B16; : 75B9C <5@8M. N". (#)4 "6 S%. (" /0,%#0% * * , * !: ! # " * () & * .

h7BN<57B , L. / . , ? . L. ?9; 5@; , I . I . /7N7< , =; 8 o. R. H7CS7B. !ee' . I 7D9; , =- C7B7NB=- N-, , 8 >, J 8@B9; D J, B8 =; 8 ; ; J, B8 B7=89; D. M. &) # ?() , # <') , # - (#: "&) e#.

h, 7>5 , k. , L. ?7M-7B , L. h7B; =; 87T , 75 =-. # \$ \$' . k@; C59; , =- =; 8 : , B16; : 75B9C NB=9; 89<<, C9=59; , N75J77; 8M<-7A9= =; 8 B7=89; D =N9-95M. : S9D ! \$ & ! \$: & # * &) e.

h, 7>5 , k. , H. I . ?CG=; 8-9<< , o. ? . H=CS , 75 =-. # \$! ! . /7@B=- <M<57: < 1B789C59; D -; ; DU67B: , @5C; : 7 9; 8M<-7A9= . : S9D ! \$ " !: * % !) % .

h, 7>5 , k. , R. P7; , , L. g. I 79<< , 75 =-. # \$ \$' . OB789C59; , ; > C69-8B7; K< B7=89; D <S9-< @<9; D N76=K9, B=- , >@; C59; , =- =; 8 <5B@C5@B=- ; 7@B, 9: =D9; D: 7=@B7<. ?%1)A," () 4 S%. (" /0,%#0% ! # ! * : % \$ #) ! * .

h, B, J, 95T, H, . o, ? . I @: <7M, =; 8 H. G. I, ; , 6@7. ! ee". k@; C59, ; =- C, ; ; 7C59K95M, > 567 =; D@=-B DMB@< 9;
; B: =-B7=89; D =; 8 8M<-7A9=. : S9D e(! (:"e*e) &&.
o7<<7; , k, . ? . 4BN, P, p-, <7, 75 =-. ! ee. LC59K=59, ; , > 6@: =; =-; D@=D7 1B, C7<<9; D NB=9; B7D9, ; <=-57B
567 1B7<7; 5=59, ; , > B=; 8; : -7557B <5B9; D< 87: , ; <5B=578 J956 7K7; 5LB7=578 >@; C59, ; =- : =D; 759C
B7<, ; =; C7 9: =D9; D. S%. (" / 0, % # 0 % + % \$ \$ % (/ # ' \$! : ! *) % .
o, N=B8, O, . k, GB9K7--, , =; 8 / . RT, @B9, U? =T, M7B. # \$ \$ * . 4K =-@=59, ; , > 567 8@=- B, @57 567, BM, > B7=89; D:
L : 75 =; =-M<9<, > * (; 7@B, 9: =D9; D <5@897<. S%. ("=&)-% # \$ #: %e*) ' ! # .
p=; <=S@, p, . L. Q=: =@B=, =; 8 F. p95=T=J=. # \$ \$ \$. F7A 89>>7B7; C7< 9; -=57B=-9T=59, ; B7K7=-78 9; 567
1, <57B9, B --; D@=D7 =B7=<. ! % (% F) 4 ! " (% > ! \$ e: " % %) ' # .
p-9; DN7BD, R, . ? . h7876@<, 4. R7: 1-7, 75 =-. # \$ \$ \$. ?9CB, <5B@C5@B7, > 57: 1, B, U1=B975=- J6957 : =557B
=< = N=<9<, B B7=89; D =N9-95M: 4K987; C7 -B, ; 89>@<9, ; 57;<, B : =D; 759C B7<, ; =; C7 9: =D9; D. S%. (" #
(#: &e*) (\$ \$.
p, M=, =, ? . F, . L. I 9 ?=B59; , , i . / . q@, , 75 =-. # \$! ! . I 7<59; DU5=57 >@; C59, ; =- C, ; ; 7C59K95M 9; 87A7<
B7=89; D C, ; 1757; C7 9; C69-8B7; =; 8 =8@-5<. N". (#) 4 " 6 S%. (" / 0, % # 0 % * ! # #: " % ! ') # & .
p@, , b. o, . R. G. Q76, o. l . g77, 75 =-. # \$ \$ & . [B56, DB=169C =; 8 16, ; , -, D9C=- 1B, C7<<9; D , > G69; 7<7
C6=B=C57B<: L ; > ? I \ <5@8M. S%. ("=&)-% # ! & : ! ' # !) * ! .
g=9, G. F. g, , F. 4. k9<67B, o. L. h@B<5, k. +=BD6=Up6=87: , =; 8 L. O. ? , ; =C, . # \$ \$! . L >, BS67=8U
8, : =9; D7; 7 9< : @5=578 9; = <7K7B7 <177C6 =; 8 --; D@=D7 89<, B87B. S)\$. (% & ! * % " ((: (! e) # * .
g7N7-, G, . H. F6=MJ95T, o. h, --6=; , 75 =-. # \$! * . I 9>@<9, ; 57;<, B 9: =D9; D C, BB7=-57<, > B7=89; D =N9-95M
9; 8M<@>7; 5 =; 8 ; ; ; U: 1=9B78 B7=87B<. (?) (#) #3 +) # - . -) % ! # (#: # ! () ## .
g79, g, . o. O=: , h. g9@, 75 =-. # \$! ! . I 7K7-, 1: 7; 5=- 5B=-7C5, B97<, > B7=89; D 87K7-, 1: 7; 5 =; 8
9: 1=9B: 7; 5 >B, : =D7< * 5, " M7=B< 9; G69; 7<7 C69-8B7; . N". (#) 4 " 6 ! 1, 43 : / * 0 1 " 4 " - *) # 3 : / * 0 1 ,) \$ (*
(# #: # ! #) # \$.
?=C1 7B: , 5, p. l . , 4. H, ; , B=, / . FMS7<, 75 =-. # \$ \$ (. \ 87; 59>9C=59, ; , > k [i O # 5B@; C=59, ; =< = ; , K7-
C=@<7, > 87K7-, 1: 7; 5=- <177C6 =; 8 --; D@=D7 87>9C95<. P1% 9&%(0) # N". (#) 4 " 6 M. &) # Q% # % \$, 0 / ' % ,
%: ! \$ &) " \$.
?=-, ; 7M, 4. , 4. k. I 9<S, , F. [X? =--7M, =; 8 I . H7<; 7B. # \$ \$ e. RB=C59; D 567 5B=-; <959, ; >B: : <@N-7A9C=- 5,
-7A9C=- 1B, C7<<9; D: [; 567 CB7=59, ; , >, B56, DB=169C =; 8 16, ; , -, D9C=- -7A9C=- B71B7<7; 5=59, ; <. P1%
X.) (\$ % (4 " N". (#) 4 " 6 C > ' % (, & % # \$) 4 : / * 0 1 " 4 " - * (M " A %) % # , (: " (") % ' .
?CHB987UG6=; D, G, . k. g=: , G. g=: , 75 =-. # \$! ! . 4=B-M 1B789C5, B<, > 8M<-7A9= 9; G69; 7<7 C69-8B7; :
k=: 9-9=- 69<5, BM, > 8M<-7A9=, --; D@=D7 87=-M, =; 8 C, D; 959K7 1B, > 9-7<. N". (#) 4 " 6 ! 1, 43 : / * 0 1 " 4 " - *
) # 3 : / * 0 1 ,) \$ (* (# #: # \$ &) ! ! .
?CG=; 8-9<<, H. I . , g. G, 67; , =; 8 F. I 76=7; 7. # \$ \$ * . R67 K9<@=- J, B8 >, B: =B7= 4A17B59<7 >, B B7=89; D
9; 567 >@<9; B: DMB@<. P(% # 3 / # ! " - # \$, A% DO, % # 0 % / ' ; : # e *) e .
?CGB, BM, 4. o, . L. ? 7C67--9, P. kB956, =; 8 G. o. OB9C7. # \$ \$ (. ? , B7 56=; J, B8<: L C, ; , ; ; 7@B=- N=<9<
>, B B7=89; D =; 8 ; =; 9; D 87>9C95< 9; 87K7-, 1: 7; 5=- 8M<-7A9=? (?) # ! # " #: # % !) ' .
?C1 7B: , 55, p. H. , F. 4. O757B<7; , o. ? . b=<9<, ; =; 8 o. O. [' 7DK(7) Tj O. 439564OTD(=) Tj O. 43956150TD(: OTD(6) Tj O. 4

#!()e.
?79 ,g. ,O. i @7 ,q.g. g@ ,75 =-. # \$! &. L859-9C9=-; D@=D7 5B=9; 9; D B7K7=-< 567 ; 7@B=- <@N<5B=57<
@; 87B-M9; D=88B7<<78 =; 8 =<<7: N-78 16, ; , -, D97<. : +ED ESC e ,*: 7e*(&" .
?7; D ,h. ,F. l. F: 956 ,p. h=D7B ,75 =-. # \$\$(. l G l G# 9< =<<, C9=578 J956 B7=89; D 89<=N9-95M =; 8
: ,8@=-57< ; 7@B, ; =- 87K7-, 1: 7; 5 9; 567 NB=9; . : S9D ! \$# &' : ! ' \$(*) " .
?, ->7<7 , l .g. #\$\$\$. OB789C59; D 8M<-7A9= =5 " M7=B< ,> =D7 @<9; D ; 7 ; ; =5=- NB=9; B7<1, ; <7<. ?() #
+) #-.)-% ' # ,*: #**") &(.
/7JN@BM , l .k. ,g. b9; C67<57B ,g. L889< ,75 =-. # \$ \$e. G? \O =; 8 LRO#G# : ,8@=-57 16, ; , -, D9C=-
<6, B5L57B: : 7: , BM 9; =-; D@=D7 9: 1=9B: 7; 5. P1% 9&%(, 0) # N". (#) 4 "6 M. &.) # Q%#%\$, O/ " (#: #%&)
' # .
/9, D9 ,F. / . =; 8 H. l . l . ?CG=; 8-9<<. # \$ \$%. g7>5 -=57B=-9T78 J6957 : =557B : 9CB, <5B@C5@B7 =CC, @; 5< >, B
9; 89K98@=- 89>>7B7; C7< 9; B7=89; D =N9-95M =; 8 89<=N9-95M. S%. (" / *01 "4"-,) && ! ! : # ! " ") " " " .
/ , <=B59 ,G. ,L. ?7C67--9 , l .b. OB77; , =; 8 G.o. OB9C7 , # \$! \$. R67 9: 1=C5 , > <7C, ; 8 --; D@=D7 -7=B; 9; D
; ; <7: =; 59C =; 8 ; ; ; <7: =; 59C >B<5 =-; D@=D7 B7=89; D. ! ! (%F() 4 ! ! (" %& # \$ # : * ! () # ' .
[87D=B8 ,R. / . , 4. L. k=BB9< , o. l 9; D , l . ?CG, -- , =; 8 o. H=CS. # \$ \$e. HB=9; C, ; ; ; 7C59K95M 9; ; ; ; U
B7=89; D 9: 1=9B78 C69-8B7; =; 8 C69-8B7; 89=D; , <78 J956 87K7-, 1: 7; 5=- 8M<-7A9=. S%. (" / *01 "4"-,)
&' ; ") e: ! e' #) ' .
O=@-7<@ , 4. , 4. ?CGB, BM , k. k=T9 , 75 =-. # \$ \$ \$. L C@=5@B=- 7>>7C5 ; ; NB=9; >@; C59; ; . S)\$. (%
S%. (" / 0, % # 0% * ! : e !) % .
O75B9-- ,F. L. ,g. L. R6: , 1< ; , , p. l 7=57BUI 7CS=B8 ,g. F. l 756, B; 7 , =; 8 G. FC6=5<C6; 7987B. # \$ \$ \$.
O7; 759C =; 8 7; K9B, ; ; 7; 5=- 7>>7C5< , > <7B9=- ; =: 9; D =; 8 16, ; , -, D9C=- =J=B7; 7<< ; ; 7=B-M B7=89; D
, @5C, ; 7< N". (#) 4 "6 C3. 0) #, #) 4 : / *01 "4"- * e " ; ! : ! ! #) # ! .
O , -8B=CS , l .L. , l .L. b=D; 7B , ? . b. OB@-- , 75 =-. ! eee. k@; C59; =- <7C9=-9T=59; , > B <7: =; 59C =; 8
16, ; , -, D9C=- 1B, C7<<9; D 9; 567 -7>5 9; >7B9, B 1B7>B, ; 5=- C, B57A. S%. (" =&) -% ! \$; ! : ! () * (.
OB9C7 ,G.o. # \$ \$ \$. R67 =; =5, : M , > -; =; D@=D7: G, ; 5B9N@59; ; < >B, : >@; C59; ; - ; 7@B, 9: =D9; D. N". (#) 4 "6
9#) \$ * & * ! e' , * : ** () (e .
OB9C7 ,G.o. =; 8 p.o. kB9<5, ; . ! eee'. R67 57: 1, B=- 8M; =; 9C< , > B7=89; D: L O4R <5@8M. (" 0%3, # - / " 6 \$ 1%
T" *) 4 D " 0, % \$ * ? : ? , " 4 " -, 0) 4 D0, % # 0% / # % & ! * " e: ! ' " () e ! .
O@d6 ,p. # \$ \$ \$. L ; 7@B, C, D; 959K7 , K7BK97J , > B7=89; D =CZ@<9<59; , =; 8 8M<-7A9= =CB, << --; D@=D7< .
@%A4" " & # % \$) 4 D0, % # 0% e , (: & & ") (\$; 89<C@<<9; ; & (!) & * .
O@d6 ,p. l . , b. 4. ?7; C- , l . l . o7; ; 7B , 75 =-. # \$ \$ \$. k@; C59; ; - ; 7@B, 9: =D9; D <5@897< , > B7=89; D =; 8
B7=89; D 89<=N9-95M (87K7-, 1: 7; 5=- 8M<-7A9=) . < % # \$) 4 T % \$) (3) # , #) # 3 @%A4" " & # % \$) 4 @ , /) F, 4, \$, %/
T % / %) (01 T % A, % l / % , * : # \$) ! * .
O@d6 ,p. l . , b. 4. ?7; C- , H. L. F6=MJ95T , 75 =-. # \$ \$ \$ N. R67 =; D@=B DMB@< 9; 87K7-, 1: 7; 5=- 8M<-7A9=:
R=<Suk17C9>9C 89>>7B7; C7< 9; >@; C59; ; - C, ; ; 7C59K95M J9569; 1, <57B9, B C, B57A. : / *01 "4"-, 0) 4 D0, % # 0%
! ! , ! : (!) % .
v9@ , l . , g. h. R=; , p. q6, @ , =; 8 O.g. p6, ; D. # \$ \$ " . l 9>>@<9; ; 57; < B 9: =D9; D , > ; , B: =- J6957 : =557B
: =5@B=59; ; >B, : -=57 C69-86, , 8 5, M, @; D =8@-56, , 8: +, A7-LJ9<7 7K=-@=59; ; , > : 7=; 89>>@<9K95M ,
>B-C59; ; =- ; 9<, 5B, 1M , B=89=- =; 8 =A9=- 89>>@<9K9597< , =; 8 C, BB7=59; ; J956 B7=89; D 87K7-, 1: 7; 5.
S%. (" =&) -% & ! # : # # *) * # .
l 9C6=B8< ,R. , o. F57K7; < ; , o. GB, @C6 , 75 =-. # \$ \$ " . RB=C5UN=<78 <1=59=- <5=59<59C< , > 89>>@<9; ; 57; < B,
9: =D9; D 9; =8@<5< J956 8M<-7A9=. 9&%(, 0) # N". (#) 4 "6 S%. (") 3, "4"- * e % : ! ! * &) e .
l 9: B, 85 ,F.g. , l .o. O757B<; , ? . H. l 7; CS= , b. 4. p=@: =; ; , =; 8 g. 4. G@559; D. # \$! \$. b6957 : =557B
: 9CB, <5B@C5@B=- 89>>7B7; C7< 9; S78 5, -7>5 17B9-M-K9=; =-; D@=D7 ; 75J, BS 9; C69-8B7; J956 8M<-7A9= .
! ! (" %> & % : * e) & e .
l , 7NB, 7CS ,L. , 4. k, B: 9<=; , , =; 8 l . O, 7N7-. # \$ \$ (. ? =119; D 89B7C578 9; >@7; C7 , K7B 567 NB=9; @<9; D
OB=; D7B C@=<=-95M =; 8 >? l \ . S%. (" =&) -% # (! : # * \$) & # .
l , ; ; N7BD , o. , ? . l @8; 7B , =; 8 ? . \ ; DK=B. # \$ \$ & . /7@B=- C, BB7=-57< , > J, BS9; D : 7: , BM >, B <9D;
--; D@=D7. ! " -# \$, A% ?() # T % / %) (01 # \$ # : ! % () " # .
l @: <7M , o. ? . , H. h, BJ95T , H.G. l , ; , 6@7 , 75 =-. ! eee'. O6, ; , -, D9C=- =; 8 , B56, DB=169C C, : 1, ; 7; 5< , >

J, B8 B7C, ... RUBGHK <5@8M. ?(), # ! # \$, (: ' * e) (e.
FC6=DD=B, H. G... CG=; 8-9<<. #\$\$'. I 7K7-, 1: 7; 5 , > ; 7@B=- <M<57: < >, B B7=89; D. 9##.)4
T%A,%I "6... &' (\$) (\$*.
F7987; N7BD , ?... -7--=: 8. !e"e. L 89<5B9N@578 , 87K7-, 1: 7; 5-- : , 87- , > J, B8 B7C, D: 959 ;
=; 8 ; =: 9; D... T%A,%I e% &: (#*)%".
F6=MJ95T , H. L. , ... p. l. O@d6 , 75 --. #\$\$\$. I 9<B@159; , > 1, <57B9, B NB=9; <M<57: < >, B
B7=89; D 9; C6... , 1: 7; 5-- 8M<-7A9=. ?,"4"-, 0)4 : /*01,)\$(* (# #: ! \$!) ! \$.
F6=MJ95T , F. 4. =; &... #\$\$\$. I M<-7A9= (<17C9>9C B7=89; D 89<=N9-95M) . : %3,)\$(/ , # T%A,%I
#& ,(: ! &') (*
——. #\$\$ (. I M<-... 89; D 89<=N9-95M) . ?,"4"-, 0)4 : /*01,)\$(* (' ! ! : ! * \$!) e.
F6=MJ95T , F. 4. , H. L... O@d6 , 75 --. !ee". k@; C59; ;= 89<B@159; ; 9; 567 , BD=; 9T=59; ; >
567 NB=9; > , B B7=... S9D e(,(: #**%)&! .
F9: < , O. O. , o. \. HB7... B , 75 --. #\$\$\$. HB=9; =C59K=59; ; 1B, >9-7< 9; 8M<-7A9C C69-8B7;
8@B9; D ; ; ; U, B8 B... C < , @BC7 9: =D9; D <5@8M. S%. (" / 0, % # 0% + % \$ \$ % (/ # e \$! : % !) (.
F9: < , O. O. , o. \. HB7... , 4. H7BD: =; , =; 8 L. G. O=1=; 9C, -=, @. #\$\$\$. G7B7NB=-
: 7C6=; 9<; < 9; K, -K7... ; 8M<-7A9C C69-8B7; : L : =D; 759C < , @BC7 9: =D9; D =11B, =C6.
! % (% F) 4 ! " (\$ % ! \$;
F9: < , O. O. , o. \. HB797... 75 --. #\$\$\$. HB=9; : 7C6=; 9<: < > , B B7=89; D J, B8
1<7@8, J, B8<: L: 9; 57... (% F) 4 ! " (\$ % ! # , * : # e ') * \$ (.
F9, S , b. R. , q. / 9@ , q. o9... 8 g. h. R=: . #\$\$\$. L <5B@C5@B=-U@; C59; ;
8M<-7A9= 9; 567 C, B57A , >... 59D ! \$ (, ! & : ((% !) % .
F579; NB9; S , G. , p. , +, D5 , L. p... R67 C , ; 5B9N@59; , ; > J6957 =; 8 DB=M
5, 87K7-, 1: 7; 5-- 8M<-7A9=: ... 8 +H? =5 * \$. R. S%. (" /*01"
R=91=7 , ? , / . p=: 9; 7; ; o. /... \$ \$ * . L C =; 898=57 D7; 7 > ;
7; C, 87< =; @C-7=B 575B=5B9C, ... 1B, 579; 8M; =: 9C=-
! \$ \$ # \$: ! ! (*) " .
R=: , g. h. , g. G67; , +. Q91 , 75--... ; 567 -7>5 67
1B789C5 6, J J7-- =<7C, ; 8 --; D... S9D ! \$ (, ! & : ((% !) % .
R@BS7-5=@N , O. 4. , g. O=B7=@ , I . g... ;
; 7@B=- : 7C6=; 9<; < >, B B7=89; D. S... ;
K=: 87B ?=BS , F. , p. H@C67B , P... #\$\$e. :
<17C9=-9T=59; ; < --; ; D 567 K9<@=- J, B... (sk) <M<57: . S
+=; 87B: <57; , ? , . H. H, 75< , h. O, 7... , 75 --. # \$! # =. L
/7@B, =; =5; : 9C C, BB7=-57< , > , B56, DB=1... , 16; ; -, D9C=-=; 8<17
)&" .
+=; 87B: <57; , ? , . H. H, 75< , o. b, @57... 8 O. O67<Z@97B7. # \$! # N.
B7K97J , > 89>>@<9; ; 57; < , B 9: =D9... ; B7=89; D =; 8 8M<-7A9=. S% .
T%A,%I / *(% (%) , ! (* #) (# .
+7--@59; , , k. l . , o. ? . k-75C67... ; 8 l . ? . FC=; -; . # \$ \$ & . F
(8M<-7A9=) : b6=5 6=... 5 > , @B 87C=87<? N". (#) 4 " 6
: /*01,)\$(* & (! : #)
+7B; 7< , F. G. , I . k... \$ \$ " . L >@; C59; ; =- D7; 759C -9-> N75J77; 89<59; C5
87K7-, 1: 7; 5... N". (#) 4 " 6 < % 3, 0, # % % % # * * *) & (.
+9D; 7=@ , ?... ? 75=U; =M... 7B7 --; D@=D7
=B7<... S%
b=D... / <59; D... 1=557B; <
b... ED ESC ' e: 7...
b... !ee% . / , @; =; 8 K...
(e) e .
b7-C, : 7 , F. 4. , G. G69=B7-- , ... I 7=89; D <S9-- 9< B7=-578 5,

9; 89K98@=- 89>>7B7; C7< 9; NB=9; <5B@C5@B7 9; C, --7D7 <5@87; 5<. M. &)# ?(), # <)' ,#- *# ;: !!e&)
#\$(
b6957 ,h. =; 8 i . g@. # \$!\$. OB=-; D7B C=@<=-95M =; 8 8M; =: 9C <5B@C5@B=- <M<57: <. N". (#)4 "6 B,#) #0,)4
C0"#"&%\$(0/ " ,!e*) #&*.
b, ; D ,O.G. ,G.?. b=BB97B ,+.H. 07; 6@; 7 ,75 =-. #\$\$". +, -@: 7 ,>-7>5 h7<C6-k OMB@< =; 8 -9; D@9<59C
195C6 -7=B; 9; D. ! %(%F<4 ! "(%> ! " &: "#") *%.
b, ; D ,O.G. ,R.p. 07BB=C69, ; 7 ,=; 8 R.H. O=BB9<6. #\$\$'. /7@B=- C6=B=C57B9<59C< ,> <@CC7<<@=- =; 8 -7<<
<@CC7<<@=- <177C6 =; 8 J, B8 -7=B; 9; D 9; =8@-5<. M. &)# ?(), # <)' ,#- "#" ! \$: ee() ! \$\$%.
i 9, ; D ,o. ,F. I =, ,o.h. O=, ,?. b, -8, B>> ,=; 8 O.R. k, A. !ee". 4K=-@=59, ; ,>67: 9<167B9C 8, ; 9; =; C7
>, B -=: D@=D7 @<9; D >@; C59, ; =- ?! \: L C, ; 1=B9<, ; J956 1, <95B, ; 7: 9<-9, ; 5, ; ,DB=16M. M. &)#
?(), # <)' ,#- % ! : &#) ("'.
i @7 ,O. ,G. G67; ,q. o9; ,=; 8 v. l , ; D. #\$\$%=. g=; D@=D7 7A17B97; C7 <6=17< >@<9, B: =C59K=59, ; J67;
1B, C7<<9; D =-, D, DB=169C =B59<9C9=- =; D@=D7: L; >? ! \ 5B=9; 9; D <5@8M. S%. ("=&)-% *! , *; ! *! () #%.
——. #\$\$%N. G7B7NB=- =M: : 75BM 9; 567 >@<9, B: =B7= < 1B789C578 567 7>>9C97; CM ,> -7=B; 9; D = ; 7J
JB959; D <M<57: . N". (#)4 "6 ! "-#,\$,A% S%. ("0,%#0% ! " %: e#*) *!
q=5, BB7 ,l .o. ,4. ?7M7B ,L. O'7887 ,=; 8 L.G. 4K=; <. !ee%. 04R <5@897< ,> 16, ; 759C 1B, C7<<9; D ,>
<177C6: l 7K97J ,B71-9C=59, ; ,=; 8 B7=; =-M<9<. ! %(%F ! "(%> % ! : #!) *\$.
q6=; D ,?. ,G. G67; ,O. i @7 ,75 =-. # \$! &. g=; D@=D7LD7; 7B=- =; 8 U<17C9<9C J6957 : =557B : 9CB, <5B@C5@B=-
N=<7< >, B B7=89; D. S%. ("=&)-% e" &*() &! .
q6=; D ,?. ,o. g9 ,G. G67; ,g. ?79 ,75 =-. # \$! *%. R67 C, ; 5B9N@59, ; ,> 567 -7>5 : 98U@<9, B: C, B59C=-
569CS; 7<<5, G69; 7<7 =; 8 4; D-9<6 B7=89; D 9; =-BD7 G69; 7<7 <=: 1-7. S%. ("=&)-% % (, #(\$) %.
q6=; D ,?. ,o. g9 ,G. G67; ,O. i @7 ,75 =-. # \$! *N. l 7<59; DU<5=57 >@; C59, ; =- C, ; ; 7C59K95M =; 8 B7=89; D
=N9-9597< 9; >9B<5 =; 8 <7C, ; 8 =; D@=D7<. S%. ("=&)-% "&G (&%) (*'.
q6=; D ,Q. ,o. g9 ,R. R=B89> ,75 =-. # \$! *C. L<<, C9=59, ; ,> 567 l Qi ! G! 8M<-7A9= <@<C7159N9-95M D7; 7 J956
, B56, DB=16M 9; 567 G69; 7<7 1, 1@=-59, ; . : +ED ESC ' e: 7&#e%e.
q6=; D ,Q. ,R. R=B89> ,h. F6@ ,75 =-. # \$! #. 06, ; ,-, D9C=- <S9-< =; 8 K, C=N@=-BM S; , J-78D7 : 789=57
<, C9, 7C, ; , 9C <5=5@< 7>>7C5< 9; 1B789C59; D B7=89; D ,@5C, ; 7< >, B G69; 7<7 C69-8B7; . @%A%A"'" &%#)\$4
: /*01"4"-* &e &: %%(' ! .

第一作者简介

薛红莉，女，博士，安徽师范大学教育科学学院讲师。研究兴趣主要为语言学习的认知和神经机制。电子邮件：A@76-9##(w ! %* . C, ;
i P4 h, ; D-9 ,>7: =-7, 06. l . , 9< = -7C5@B7B =5 567 G, --7D7 ,> 48@C=59, ; =- FC97; C7 , L; 6@9
/, B: =- P; 9K7B<95M. h7B B7<7=BC6 9; 57B7<5 9; C=@87< 567 C, D; 959K7 =; 8 ; 7@B=- : 7C6=; 9< : < ,>
=-; D@=D7 -7=B; 9; D. 4U =9: A@76-9##(w ! %* . C, ;

作者单位及通信地址：薛红莉 安徽师范大学教育科学学院
安徽省芜湖市北京东路！号 &! \$\$\$
薛 贵 北京师范大学认知神经科学与学习国家重点实验室
北京市海淀区新街口外大街！e 号 ! \$\$\$" ((通信作者)
4U =9: D@9A@7w D: =9-. C, ;