心理科学进展 2015, Vol. 23, No. 9, 1531–1539
Advances in Psychological Science DOI: 10.3724/SP.J.1042.2015.01531

注意网络间的关系及其心理与生理机制

荆秀娟[1] 王一峰[2]

([1]西南财经大学天府学院，成都 610052)
([2]电子科技大学生命科学与技术学院，神经信息教育部重点实验室，成都 611731)

摘 要 Posner 和 Petersen 把注意系统分为警觉、定向和执行控制三个网络。注意网络测验及其变式是研究注意网络间关系的主要工具。生物化学、神经影像和行为研究从神经递质广泛调节、脑功能区共享、注意资源竞争和认知策略调节的角度证明了三个注意网络之间既相互独立又有机统一的关系。测量信度低、定义模糊成为注意网络及其关系的研究中亟待解决的问题。将来的研究需要改进测量工具，并考虑注意网络的子成分对网络间关系的影响。

关键词 注意网络测验；警觉网络；定向网络；执行控制网络

分类号 B842

1 引言

注意是认知科学的核心主题。它是指准备或选择物理环境或记忆中的特定内容的心理过程(Raz & Buhle, 2006)。长期以来，研究者把注意视为一个单一的系统。随着研究的深入，已有的理论在解释注意现象时表现出越来越多的缺陷。为解决单一系统理论的缺陷，Posner 和 Peterson (1990)基于认知神经心理学的研究提出注意网络模型来描述人类注意系统的工作模式。该模型把注意系统分成警觉(alerting)、定向(orienting)和执行控制(executive control)三个子成分。警觉是指达到或保持一种状态，在该状态下对即将到来的信息的敏感度增加；定向是将注意力转移到将要选择或关注的刺激上；执行控制是指对预期、刺激和反应之间的冲突的监控和解决(Petersen & Posner, 2012)。该模型认为，注意系统的三个成分是相互独立的(Fan, McCandliss, Sommer, Raz, & Posner, 2002; Posner & Petersen, 1990)；但是大量研究发现三个注意网络之间存在复杂的交互作用(Callejas, Lupiáñez, & Tudela, 2004; Fan et al., 2009; Fuentes & Campoy, 2008; Wang et al., 2014)。注意网络间交互作用的研究对揭示注意系统的工作机制，阐释注意系统的发展和老化规律以及理解注意系统疾病的机理至关重要。近年来已有大量研究致力于探索注意网络独立性的测量及网络间交互作用的机制。

2 注意网络间关系的研究范式

Fan, McCandliss, Sommer, Raz 和 Posner (2002) 最早提出注意网络测验(Attention Network Test, ANT)来检验注意网络的效率及其独立性。该测验的目标刺激是呈现在屏幕偏上方或偏下方的 5 个排成一行的箭头。第三个箭头与两侧箭头的方向相同(一致条件)，或不同(不一致条件)。箭头出现前有 4 种线索条件：空间线索(一个星号出现在目标将要出现的位置)、中央线索(星号出现在注视点位置)、双线索(两个星号分别位于屏幕偏上或偏下方目标可能出现的位置)、无线索(注视点保持不变)。被试的任务是判断第三个箭头的方向。不同网络的效应通过不同条件的反应时(reaction time, RT)相减得到。其中，警觉效应 = *RT(无线索) – RT(双线索)*；定向效应 = *RT(中央线索) – RT(空间线索)*；执行控制效应 = *RT(不一致) – RT(一致)*。在 ANT 中，警觉和定向效应都是通过线索条件来定义的，因而二者之间的交互作用难以被测量；其次，ANT 中的空间线索是 100%有效的，因而对定向效应的测量同时包含了外源性和内源性

收稿日期：2015-01-06
通讯作者：王一峰, E-mail: 1984wyf@gmail.com

的注意转移(Chica, Bartolomeo, & Lupiáñez, 2013; Ishigami & Klein, 2010)。

为了研究警觉和定向之间的交互作用及测量单纯的外源性注意定向，Callejas 等(2004)在 ANT 基础上引入声音警觉刺激，并把空间线索的有效性改为 50%，开发出用于测量交互作用的 ANT (Attention Network Test for Interactions, ANT-I)。在 ANT-I 中，警觉和定向效应分别为 *RT(无声音提示) – RT(有声音提示)*和 *RT(无效线索) – RT(有效线索)*；执行控制效应仍为 *RT(不一致) – RT(一致)*。ANT-I 中只有 50%的空间线索是有效的，因而内源性注意不起作用；定向网络的测量依赖于外源性线索能在多大程度上吸引注意(Ishigami & Klein, 2011)。但是 ANT-I 范式存在诸多问题，比如听觉信号和空间线索都能诱发警觉效应(Ishigami, Fisk, Wojtowicz, & Klein, 2013)。当同时使用听觉和视觉信号时，还需要视听整合加工(Koelewijn, Bronkhorst, & Theeuwes, 2010)。因此，多感觉整合情境下警觉与定向的交互作用可能存在诸多干扰因素(Botta, Lupiáñez, & Chica, 2014)。

随着注意网络研究的深入，网络间交互作用得到广泛报告(Callejas, Lupiáñez, Funes, & Tudela, 2005; Fan et al.,2007; Fuentes & Campoy, 2008)。于是，Fan 等(2009)提出 ANT 的修正版(revised ANT, ANT-R)，以更深入地研究注意网络间的交互作用。ANT-R 将空闲线索的有效性设置为 75%，增加了位置冲突的条件，还设置了不同的线索-目标间隔，但没有引入声音刺激。该范式虽然细化了冲突的类型，考察了网络间交互作用的时间效应，但没有将内源性和外源性注意很好地分离，也不能测量警觉和定向之间的交互作用。

上述研究范式还存在两个共同的问题。一是它们都采用正交比较的方法计算网络分数，网络效应之间存在交叉干扰。比如，警觉和定向网络分数的计算都包含一致和不一致的目标，从而受执行控制网络的影响。交互作用的存在使得对注意网络的测量不适宜采用正交比较的方法(McConnell & Shore, 2011; Wang et al., 2014)。二是警觉和定向网络之间的关系不能得到有效揭示。ANT 和 ANT-R 不能计算警觉和定向网络的交互作用；而 ANT-I 中警觉和定向网络的关系受到视听整合、重复警觉等因素的干扰。鉴于此，Wang 等(2014, 2015)结合组块设计的 ANT 和非正交比较的方法对注意网络的效应和交互作用进行了有效分离。该方法在测量警觉网络时将所有目标刺激都置于中央位置并且不包含不一致条件，因此排除了定向和执行控制网络的干扰；在测量定向网络时取消了线索条件和不一致条件，因此排除了警觉和执行控制网络的干扰，测得了纯粹的外源性注意定向；在测量执行控制网络时取消了线索条件并将所有目标刺激都置于中央位置，从而排除了警觉和定向网络的干扰。在测量网络间的交互作用时，对注意网络两两配对，排除第三个网络的干扰。但是该方法没有考虑线索-目标间隔时间对网络间关系的影响，也没有细分瞬时/持续性警觉以及知觉/反应冲突之间的关系。

此外，一些研究者对 ANT 进行改进以适应不同的应用要求。比如，儿童版的 ANT (Rueda et al., 2004)，测量偏侧化的 ANT (Greene et al., 2008)及增加了唤醒水平测试的 ANT (Roca, Castro, López-Ramón, & Lupiánez, 2011)。这些改进的主要目的不是研究注意网络间的交互作用，因此我们不再赘述。

3 注意网络间的关系

3.1 注意网络间的相关性

尽管注意网络在复杂的任务以及日常生活中存在交互作用，但网络间存在较大的个体差异和较低的相关性(Petersen & Posner, 2012)。虽然有少数使用 ANT 及其变式的研究报告了注意网络间的显著相关(Fossella et al., 2002; Wang et al., 2014)，但是大部分研究认为三个注意网络之间是相对独立的。MacLeod 等(2010)指出，较低的测量信度可能导致网络间的相关性被低估。他们通过对 15 个研究中超过 1000 个样本的分析发现：警觉、定向和执行控制网络的分半信度分别为 0.2、0.32 和 0.65；而网络间的相关性小于 0.1。Habekost, Petersen 和 Vangkilde (2014)指出，警觉和定向网络的重测信度在 0.35 到 0.6 之间；而执行控制网络的重测信度在 0.65 到 0.8 之间。Wang 等(2014, 2015)的研究虽然获得了较高的分半信度，但没有得到稳定的网络间的相关性，表明注意网络间具有独立性。从发展和临床的角度来看，个体在发展中形成了独特的警觉-定向-执行控制的模式，一个或多个网络的异常发展往往与某些疾病具有关联。

3.2 注意网络间的交互作用

虽然注意网络之间相关性较弱，但许多研究

揭示了网络之间的交互作用。Fan 等(2002)最初的研究即发现了线索和目标的交互作用。随后的 ANT-I 范式(Callejas et al., 2004, 2005; Weinbach & Henik, 2012)揭示出执行控制网络受警觉网络的抑制并且被定向网络强化; 同时, 警觉网络在线索之后的 500ms 内加快了定向的效率(Fuentes & Campoy, 2008)。MacLeod 等(2010)的元分析表明, 执行控制网络与其他两个网络之间的交互作用得到最广泛的报道。其中, 警觉和执行控制网络之间的关系得到了最多的证据支持(Ishigami & Klein, 2010; Posner & Petersen, 1990; Roca et al., 2011), 定向与警觉、定向与执行控制网络间关系的报道相对较少(Raz & Buhle, 2006)。从发展的角度看, 自 2 岁开始, 执行控制网络逐渐从警觉和定向网络中分化出来, 并反过来调节警觉和定向功能, 成为认知控制的主体(Fjell et al., 2012; Rothbart & Posner, 2015)。由于大部分研究的被试都大于 2 岁, 这可能是执行控制网络与其他网络的交互作用得到更多报道的主要原因。

近年来, 研究者开始关注三个网络在不同情境下的交互作用以及注意网络的子成分对交互作用的影响。比如, 持续性警觉损害内源性而非外源性注意定向(Roca et al., 2012); 警觉线索能提高瞬时警觉及视觉敏感性, 而空间提示能够同时进行自上而下和自下而上的调节(Botta et al., 2014); Wang 等(2015)结合组块设计的 ANT 和非正交比较的方法揭示出注意网络间两两的相互抑制关系。注意网络间的关系是复杂的, 研究者也从不同角度对这些复杂关系进行了理论解释。这些理论可以从认知和神经生理两方面来理解。

4　注意网络间关系的认知机制

4.1　认知策略观点

大部分行为研究中关于注意网络间交互作用的解释是从认知策略的角度出发的。从线索的角度讲, 成功完成 ANT 任务需要聚焦于目标刺激的局部特征, 因此在等待线索或目标出现时的最优策略是集中注意于注视点位置而非将注意分配到目标可能出现的两个位置上。在无线索条件下, 注意在目标出现时仍处于聚焦状态, 从而更容易忽略侧翼刺激的干扰(Callejas et al., 2005; McConnell & Shore, 2011)。但是当各个线索条件交替出现时, 被试无法预期将要到来的是线索还是目标, 使得认知负荷增大; 在目标出现时被试会采用反应抑制策略以避免对线索作出误反应, 从而增加了无线索条件下的反应时(Boulinguez, Ballanger, Granjon, & Benraiss, 2009; Galvao-Carmona et al., 2014)。

中央线索提供了时间信息但未提供空间信息。由于空间信息的缺失, 被试会把注意力分配到两个目标位置上; 由于注意分散, 被试在目标出现时需要更高的执行控制能力以作出适当的反应(McConnell & Shore, 2011)。Weinbach 和 Henik (2011, 2012, 2013)的研究表明警觉线索在空间上能够诱发整体加工策略, 从而增强了无关刺激对目标的干扰; 在时间上则能诱发短时的高唤醒状态和长时的预期效应, 并且这两种时间因素独立地对冲突效应发生作用。此外, 警觉还是调节空间注意的关键因素。瞬时警觉能够通过增加对目标的知觉敏感性增加内源性定向效应(Botta et al., 2014)。Callejas 等(2005)用听觉信号诱发警觉反应, 发现了警觉对视觉定向的加速作用。由于听觉信号比视觉信号能更有效地提高警觉状态(Fuentes & Campoy, 2008), 这种警觉对定向的加速作用可能与感觉通道的加工有关, 而非单纯的注意效应。

在空间线索条件下, 被试提前将注意转移到目标位置。提前的注意聚焦会降低目标出现时的认知需求, 因而对执行控制的要求降低(McConnell & Shore, 2011)。与中央线索相比, 空间线索对目标位置的预期更准确, 因而预期难度会降低; 同时, 提前聚焦注意可以更有效地忽略无关刺激的干扰, 使冲突更易解决(Galvao-Carmona et al., 2014)。与无线索条件相比, 空间线索不仅提高了警觉水平, 还能降低时间预期和认知负荷(Galvao-Carmona et al., 2014)。

与中央线索条件一样, 双线索条件下被试需将注意分配在两个目标位置。扩大的注意范围使得确认目标特征和排除侧翼干扰变得困难, 从而增强冲突效应(McConnell & Shore, 2011)。虽然双线索和中央线索都提供了时间线索, 但二者的视觉效应不同; 目前还没有研究表明这种视觉特征的不等价是否会引起注意效应的差异。

当空间线索的有效性降为 50%时, 如果被试不对空间位置进行猜测, 内源性定向就不再起作用; 但是注意定向同时受到任务情境和被试策略的影响, 而非在线索或目标出现后就立即转向与线索相反的方向, 这就导致很多使用空间线索的

ANT 研究中返回抑制现象的消失(Girardi, Antonucci, & Nico, 2014)。一旦目标出现在与线索相反的位置(无效线索条件), 注意重定向就发挥作用, 但是在短时间内不能有效聚焦, 使注意范围扩大到侧翼刺激, 进而使冲突加强(Callejas et al., 2005)。

就目标刺激而言, 不一致条件涉及任务难度的增加、反应抑制以及知觉和反应等多个加工过程对反应时间需求的增加, 与之伴随的是脑电 P3 波幅的减小(Vázquez-Marrufo et al., 2014)。Galvao-Carmona 等(2014)发现线索和目标的交互作用还调节 N1 的潜伏期。他们认为这是由于执行控制系统不能利用空间线索去减少不一致条件下的冲突导致的。Salzer, Oron-Gilad 和 Henik (2015)则认为, 在需要高认知资源的任务中, 警觉线索可能没有被加工或者加工达到天花板水平。这些研究表明, 线索与目标的交互作用可能由线索引起也可能由目标引起; 复杂的线索和目标情境下被试会采取不同的认知策略以更好地完成任务。

总之, 认知策略的观点以不同线索条件引起的注意聚焦的差异为核心来解释三个网络的交互作用, 但对警觉与定向之间的关系缺乏有效的解释。此外, 这种观点用状态性的策略来解释注意网络间的关系, 受情境和任务影响较大, 因而难以将不同的注意网络有机整合在一起。

4.2 注意资源观点

与认知策略观点不同, 注意资源观点在一个统一的注意资源库中解释网络间的关系; 因而该理论具有较强的统一性且较少受情境制约。Fan 和 Mackie 等人认为, 注意系统的不同成分之间是有机联系的, 他们共同使用注意资源库, 协同提高注意效率(Fan, 2014; Fan et al., 2009; Mackie, van Dam, & Fan, 2013)。

在最初的研究中, Fan 等(2002)指出, 无线索条件下被试需要更长的时间作出反应, 从而提供了更长的时间去解决冲突。相似的, 双线索条件下更大的侧翼效应缩短了反应时间, 进而阻碍冲突解决。因此, 无线索条件下冲突效应减小和双线索条件下冲突效应增大共同导致了不一致条件比一致条件下警觉效应减小。此外, 不一致条件在空间线索比在中央线索下反应时更短, 导致定向效应增大。该研究用反应时差异反映注意资源的需求, 但该结果也可能是人为地通过正交比较法把多个网络的测量放在一起造成的, 而非真正反映了不同网络对注意资源的竞争。

Fan 等随后的研究为资源竞争理论提供了更有力的支持。首先, 警觉和执行控制都涉及前扣带回(anterior cingulate cortex, ACC)的活动(Fan, McCandliss, Fossella, Flombaum, & Posner, 2005)和 alpha 波的抑制(Fan, Byrne, Worden, Guise, McCandliss, et al., 2007)。其次, 有效的空间线索增强了执行控制能力, 而无效的空间线索则减弱了执行控制能力, 暗示定向和执行控制网络可能共享注意资源(Fan et al., 2009)。在注意功能理论中, 他们进一步指出注意的功能是支持认知控制以降低不确定性。其中, 警觉降低了时间的不确定性; 定向降低了空间的不确定性; 而执行控制在加工和反应阶段偏向任务相关的加工。三个网络协调合作, 共享注意资源(Mackie et al., 2013)。

最近, 资源竞争理论得到了更多的支持。Salzer 等(2015)认为, 警觉信号的加工受注意资源的制约。一方面, 警觉信号在低负荷的外源性定向过程中能得到更有效的加工; 另一方面, 在有效线索条件下警觉信号的加工需要更多注意资源。Wang 等(2015)最近的研究发现, 当两个注意网络同时工作时, 网络之间总是相互抑制的。这种现象符合资源竞争假设, 但无法用认知策略来解释。近年来, 注意资源的共享与竞争受到越来越多的生物化学和神经成像研究的支持。

5 注意网络间关系的神经生理机制

5.1 生物化学观点

早期研究认为, 不同的注意网络是由不同的神经递质及基因多态性驱动的。其中, 警觉受蓝斑-去甲肾上腺素(locus coeruleus-norepinephrine, LC-NE)系统及 ADRA2A、NET 等 NE 基因的驱动; 乙酰胆碱(Acetylcholine, ACh)及胆碱能系统的基因多态性(如 CHRNA4 和 APOE)影响对知觉线索的定向能力; 多巴胺(Dopamine, DA)受体(DRD4)、转运蛋白(DAT1)和酶(COMT)的多态性与执行控制能力有关(McConnell & Shore, 2011; Rothbart & Posner, 2015; Posner, Rothbart, & Sheese, 2007)。

近年来, 这种观点受到两方面挑战: 一是单一神经递质活动模式的复杂性, 二是神经递质之间复杂的相互作用。就前者而言, NE 和 DA 都表现出瞬时发放和持续性发放两种模式(Aston-

Jones & Cohen, 2005; Bromberg-Martin, Matsumoto, & Hikosaka, 2010), 并且这两种神经递质与行为绩效之间的关系都呈倒 U 形曲线(Aston-Jones & Cohen, 2005; Cools & D'Esposito, 2011)。从神经递质之间的关系来看, 三种递质都与多种认知活动相关联, 共同驱动着注意中的不同过程(Sara & Bouret, 2012; Sarter, Lustig, Howe, Gritton, & Berry, 2014)。

LC 是 NE 的唯一分泌源, 对 NE 的发放具有瞬时和缓慢两种模式。根据 Aston-Jones 和 Cohen (2005)的增益理论(gain theory), 瞬时发放能优化当前任务的绩效; 一旦当前任务的奖赏不再提高, 就转为缓慢发放, 以便探索更多可能的行为模式, 促使长期任务绩效的提升。缓慢发放时, 低水平的 NE 会使机体觉醒降低, 中等水平的 NE 下行为表现最好, 而高水平的 NE 下行为易受干扰。NE 的瞬时发放与高水平的行为表现相关联。NE 缓慢发放时, 瞬时发放受到抑制, 需要集中注意的任务受到干扰。在注意任务中, 无线索和中央线索条件会诱发缓慢的 NE 发放, 以促进对当前目标的快速反应(Gabay, Pertzov, & Henik, 2011)。NE 的瞬时发放会过滤无关刺激, 促进注意聚焦, 同时 NE 发放总量减少, 表现出执行控制对警觉网络的抑制(Gabay et al., 2011; Salzer et al., 2015)。NE 慢性发放增加使机体更有效地探测新刺激, 对周围刺激更加敏感, 行为更易受干扰, 因而使冲突效应增强。在不一致条件下, 认知负荷的增加会诱发 NE 的瞬时发放, 以付出更多努力去监控更难的任务。NE 的瞬时/缓慢发放主要通过与动机的相关性来影响行为, 与瞬时/持续性警觉不能混为一谈。大量研究表明, 持续性注意受到包括 NE 在内的儿茶酚胺系统、胆碱能及血清素系统的共同调节(Bartolomeo, 2014)。总之, LC-NE 系统在优化行为绩效和维持警觉状态中起重要作用, 能够调节警觉和执行控制两个网络的效率。

腹侧被盖区 DA 系统(ventral tegmental dopamine system)在目标导向的行为中起关键作用(Westlye, Grydeland, Walhovd, & Fjell, 2011)。与 NE 相似, DA 也有瞬时和缓慢发放两种模式。DA 的瞬时发放与凸显的感觉刺激的加工、注意转移及短时的注意高度集中有关, 主要受 D1 类多巴胺受体调节(Aboitiz, Ossandón, Zamorano, Palma, & Carrasco, 2014)。DA 的慢性发放主要受 D2 类多巴胺受体调节, 随着对不确定事件的期望升高而增加, 与警觉水平和对反应的准备有关, 并抑制瞬时发放。两种活动模式之间适当的交替平衡使注意力能维持一定的时间并能随环境信息的更新而变化(Aboitiz et al., 2014)。异常的 DA 慢性发放表现出动机缺失、注意力分散及焦虑等与 NE 的慢性发放类似的现象(Aboitiz et al., 2014; Aston-Jones & Cohen, 2005)。DA 神经元在有警觉信号时活动增强, 这种警觉性反应会随着对刺激的熟悉而逐渐消退, 并与定向反应的习惯化并行发生(Bromberg-Martin et al., 2010)。此外, DA 还是 NE 的代谢前体(Snyder, 2011), 二者与行为绩效都呈倒 U 形关系(Aston-Jones & Cohen, 2005; Cools & D'Esposito, 2011)。这些证据表明, DA 不仅驱动执行控制网络的活动, 而且参与对警觉和定向网络的控制。

ACh 在自上而下的注意控制中起重要作用, 并参与注意定向和刺激辨别(Klinkenberg, Sambeth, & Blokland, 2011)。ACh 的瞬时发放能够降低目标检测的不确定性(Sarter et al., 2014)。这种功能同样存在于 NE 和 5-羟色胺上行投射系统中, 从而支持了注意功能理论(Mackie et al., 2013)。因此, ACh 不仅参与注意定向过程, 还跟执行控制有密切联系。

综上所述, NE、DA 和 Ach 都与多种注意过程相关联, 而不是仅支持单一的注意网络。神经递质层面的广泛作用为注意网络间的交互作用奠定了基础, 使注意的子成分相互协调、有机统一成一个完整的注意系统。

5.2　神经成像观点

生物化学主要关注与注意相关的微观脑活动, 而神经成像主要从介观和宏观角度研究注意机制。早期功能定位的研究发现, 警觉响应与与额顶区域及丘脑(thalamus)的活动有关; 定向网络与顶上小叶(superior parietal lobe)、上丘(superior colliculus)、额叶眼动区(frontal eye fields)的活动有关; 而执行控制网络与 ACC、背外侧前额叶(dorsal-lateral prefrontal cortex, DLPFC)和右侧额下回(inferior frontal gyrus)的活动有关(McConnell & Shore, 2011; Westlye et al., 2011)。其中, ACC 被认为是调节警觉和执行控制功能的重要脑区。它一方面能监控冲突和唤醒水平并触发 DLPFC 去解决冲突, 另一方面与右侧额顶区域产生拮抗活

动，直接调节警觉状态(Raz & Buhle, 2006)。此外，ACC 与 NE 和 ACh 系统的皮层下结构有紧密的联系，能够通过这些系统调节警觉和定向功能(Bartolomeo, 2014)。

近年来对注意网络的研究更多从功能整合的角度入手，研究固有网络(intrinsic network)在注意调节中的作用。其中与注意系统相关的网络包括额顶网络(frontoparietal network, FPN)、背侧注意网络(dorsal attention network, DAN)、腹侧注意网络(ventral attention network, VAN)、凸显网络(salience network, SN)及默认网络(default mode network, DMN)。FPN 是执行控制网络的重要组成部分，主要负责任务的实时监控(Petersen & Posner, 2012)；FPN 的自发活动与警觉分数具有显著相关(Visintin et al., 2015)，它在警觉和执行控制任务中有相似的激活(Liu, Park, Gu, & Fan, 2010)。DAN 主要负责自上而下的注意(Chica et al., 2013)、持续性注意及工作记忆(Aboitiz et al., 2014); DAN 的顶叶部分的自发活动与知觉冲突、位置冲突及二者的交互作用有关(Visintin et al., 2015)。VAN 主要与自下而上的注意、注意转移与重新定向有关(Aboitiz et al., 2014; Chica et al., 2013)。SN 在执行控制网络中负责任务状态的保持(Petersen & Posner, 2012)；其额下回部分的自发活动与知觉和位置冲突的交互作用及知觉和注意定向的交互作用相关(Visintin et al., 2015)。DMN 调节注意在内部心理活动和外部刺激加工之间的转换(李雨，舒华，2014)；其自发活动水平与警觉和执行控制分数相关(Visintin et al., 2015)。由此可见，除 VAN 外，这些网络的活动一般与多个注意网络有关。

此外，神经递质的发放模式影响固有网络间的关系，进而调节注意网络间的关系。注意控制网络主要与 NE 和 DA 的瞬时发放有关(Dang, O'Neil, & Jagust, 2012)。DA 的瞬时发放能促使 SN 和 VAN 的活动，使注意从静息模式转到任务模式，促进对刺激的定向加工(Aboitiz et al., 2014)。低水平的 DA 缓慢发放能抑制注意控制网络的活动，促进 DMN 的活动；中等水平的 DA 缓慢发放能使机体保持适宜的唤醒水平，促进 DAN 和 SN 的活动；高水平的 DA 缓慢发放则促进 VAN 的活动，使行为易受干扰(Aboitiz et al., 2014)。由此可见，神经递质的活动不仅调节局部脑区的活动，还能调节神经网络水平的活动及网络间的关系，进而改变注意状态。在复杂情境下，注意系统的子成分并非单独活动，而是在神经递质和神经网络的驱动下互相调节，以有效完成注意任务、促进适应性行为。

6 总结与展望

从注意网络间是否彼此独立到注意网络间如何相互作用，人们对注意网络间关系的认识不断深入(Mackie et al., 2013; Petersen & Posner, 2012; Raz & Buhle, 2006; Wang et al., 2015)。遗传学研究主要关注与驱动注意网络的神经递质相关的基因多态性，局限在单个注意网络与基因表达的关系而非网络间的交互作用(Fossella et al., 2002; Newman et al., 2014; Posner et al., 2007)。生物化学研究表明每种神经递质主要驱动一个注意网络，同时又与多个注意过程相关联，对皮层活动进行广泛调节，因而支持注意网络间的交互作用(Aboitiz et al., 2014; Dang et al., 2012; Sara & Bouret, 2012)。神经成像研究从共享脑区及脑网络的角度阐述了注意网络间交互作用的机制(Fan et al., 2005; Galvao-Carmona et al., 2014; Visintin et al., 2015)。行为研究则揭示出注意网络相互作用时的认知策略及对资源的竞争(Fan et al., 2009; MacLeod et al., 2010; McConnell & Shore, 2011)。会聚的证据表明注意网络间独立而又统一的关系：注意网络分工合作以最少的资源适应复杂环境对注意的要求，共同调节适应性行为。

虽然对注意网络间关系的研究取得了可喜的进展，但是研究中还存在较多的问题。首先，虽然 ANT 已经被广泛应用于临床和发展研究中(Fjell et al., 2012; Habekost et al., 2014; Ishigami et al., 2013; Rueda et al., 2004)，但测量信度较低，尤其是警觉和定向网络的信度远远不能满足临床要求(Habekost et al., 2014; MacLeod et al., 2010)。有研究者认为执行控制网络是特质性的，而警觉和定向网络是状态性的，因此对警觉和定向的测量具有更多的不稳定性(McConnell & Shore, 2011; Posner et al., 2007)。但是最近 Wang 等(2014, 2015)研究表明，可以通过改进测量和统计方法来提高信度。因此，改进测量方法、找到影响注意网络独立性及交互作用的因素是当前研究亟待解决的问题。

其次，除了对测量工具的依赖，对注意网络的测量还取决于是否有恰当的定义。ANT 及其变

式对注意网络的定义不同，可能导致研究结果缺乏可比性。比如 ANT 和 ANT-I 对定向网络的测量包含了不同比例的内源性和外源性定向，使得不同研究间的结果难以比较。生物化学研究中的生理觉醒与心理警觉并不完全相同，但很多研究对警觉和觉醒的区分并不明确。对实验变量进行更加明确的定义必定会极大促进对注意网络及其相互关系的理解。

最后，ANT 已经成为神经心理学中的流行工具，用于测量特殊人群中特定的注意网络缺陷，指导特定注意网络缺陷的治疗及测量正常人群中注意网络的发展差异(Rothbart & Posner, 2015)。但是由于测量信度较低，注意网络间的关系还不完全清楚。将来的研究一方面要加强测量工具的改进，另一方面要加强对注意网络子成分的探索。作为人类认知活动的调节器，注意网络间如何分工合作以协调适应性行为将成为行为、临床、影像、遗传等多学科共同的研究主题。

参考文献

李雨，舒华. (2014). 默认网络的神经机制，功能假设及临床应用. *心理科学进展*, *22*, 234–249.

Aboitiz, F., Ossandón, T., Zamorano, F., Palma, B., & Carrasco, X. (2014). Irrelevant stimulus processing in ADHD: Catecholamine dynamics and attentional networks. *Frontiers in Psychology, 5*, 1–15.

Aston-Jones, G., & Cohen, J. D. (2005). An integrative theory of locus coeruleus-norepinephrine function: Adaptive gain and optimal performance. *Annual Review of Neuroscience, 28*, 403–450.

Bartolomeo, P. (2014). The attention systems of the human brain. In P. Bartolomeo (Ed.), *Attention Disorders After Right Brain Damage* (pp. 1–19). London: Springer.

Botta, F., Lupiáñez, J., & Chica, A. B. (2014). When endogenous spatial attention improves conscious perception: Effects of alerting and bottom-up activation. *Consciousness and Cognition, 23*, 63–73.

Boulinguez, P., Ballanger, B., Granjon, L., & Benraiss, A. (2009). The paradoxical effect of warning on reaction time: Demonstrating proactive response inhibition with event-related potentials. *Clinical Neurophysiology, 120*, 730–737.

Bromberg-Martin, E. S., Matsumoto, M., & Hikosaka, O. (2010). Dopamine in motivational control: Rewarding, aversive, and alerting. *Neuron, 68*, 815–834.

Callejas, A., Lupiáñez, J., & Tudela, P. (2004). The three attentional networks: On their independence and interactions. *Brain and Cognition, 54*, 225–227.

Callejas, A., Lupiáñez, J., Funes, M. J., & Tudela, P. (2005). Modulations among the alerting, orienting and executive control networks. *Experimental Brain Research, 167*, 27–37.

Chica, A. B., Bartolomeo, P., & Lupiáñez, J. (2013). Two cognitive and neural systems for endogenous and exogenous spatial attention. *Behavioural Brain Research, 237*, 107–123.

Cools, R., & D'Esposito, M. (2011). Inverted-U-shaped dopamine actions on human working memory and cognitive control. *Biological Psychiatry, 69*(12), e113–e125.

Dang, L. C., O'Neil, J. P., & Jagust, W. J. (2012). Dopamine supports coupling of attention-related networks. *The Journal of Neuroscience, 32*, 9582–9587.

Fan, J. (2014). An information theory account of cognitive control. *Frontiers in Human Neuroscience, 8*, 1–16.

Fan, J., Byrne, J., Worden, M. S., Guise, K. G., McCandliss, B. D., Fossella, J., & Posner, M. I. (2007). The relation of brain oscillations to attentional networks. *The Journal of Neuroscience, 27*, 6197–6206.

Fan, J., Gu, X. S., Guise, K. G., Liu, X., Fossella, J., Wang, H. B., & Posner, M. I. (2009). Testing the behavioral interaction and integration of attentional networks. *Brain and Cognition, 70*, 209–220.

Fan, J., McCandliss, B. D., Fossella, J., Flombaum, J. I., & Posner, M. I. (2005). The activation of attentional networks. *NeuroImage, 26*, 471–479.

Fan, J., McCandliss, B. D., Sommer, T., Raz, A., & Posner, M. I. (2002). Testing the efficiency and independence of attentional networks. *Journal of Cognitive Neuroscience, 14*, 340–347.

Fjell, A. M., Walhovd, K. B., Brown, T. T., Kuperman, J. M., Chung, Y., Hagler, Jr, D. J.,... Dale, A. M. (2012). Multimodal imaging of the self-regulating developing brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 109*, 19620–19625.

Fossella, J., Sommer, T., Fan, J., Wu, Y. H., Swanson, J. M., Pfaff, D. W., & Posner, M. I. (2002). Assessing the molecular genetics of attention networks. *BMC Neuroscience, 3*(1), 14.

Fuentes, L. J., & Campoy, G. (2008). The time course of alerting effect over orienting in the attention network test. *Experimental Brain Research, 185*, 667–672.

Gabay, S., Pertzov, Y., & Henik, A. (2011). Orienting of attention, pupil size, and the norepinephrine system. *Attention, Perception, & Psychophysics, 73*, 123–129.

Galvao-Carmona, A., González-Rosa, J. J., Hidalgo-Muñoz, A., Páramo, D., Benítez, M. L., Izquierdo, G., & Vázquez-Marrufo, M. (2014). Disentangling the attention network test: Behavioral, event related potentials, and neural source analyses. *Frontiers in Human Neuroscience, 8*, 1–16.

Girardi, G., Antonucci, G., & Nico, D. (2014). Timing the events of directional cueing. *Psychological Research*, doi:

10.1007/s00426-014-0635-8.

Greene, D. J., Barnea, A., Herzberg, K., Rassis, A., Neta, M., Raz, A., & Zaidel, E. (2008). Measuring attention in the hemispheres: The lateralized attention network test (LANT). *Brain and Cognition, 66*, 21–31.

Habekost, T., Petersen, A., & Vangkilde, S. (2014). Testing attention: Comparing the ANT with TVA-based assessment. *Behavior Research Methods, 46*, 81–94.

Ishigami, Y., Fisk, J. D., Wojtowicz, M., & Klein, R. M. (2013). Repeated measurement of the attention components of patients with multiple sclerosis using the Attention Network Test-Interaction (ANT-I): Stability, isolability, robustness, and reliability. *Journal of Neuroscience Methods, 216*, 1–9.

Ishigami, Y., & Klein, R. M. (2010). Repeated measurement of the components of attention using two versions of the Attention Network Test (ANT): Stability, isolability, robustness, and reliability. *Journal of Neuroscience Methods, 190*, 117–128.

Ishigami, Y., & Klein, R. M. (2011). Repeated measurement of the components of attention of older adults using the two versions of the attention network test: Stability, isolability, robustness, and reliability. *Frontiers in Aging Neuroscience, 3*, 17.

Klinkenberg, I., Sambeth, A., & Blokland, A. (2011). Acetylcholine and attention. *Behavioural Brain Research, 221*, 430–442.

Koelewijn, T., Bronkhorst, A., & Theeuwes, J. (2010). Attention and the multiple stages of multisensory integration: A review of audiovisual studies. *Acta Psychologica, 134*, 372–384.

Liu, X., Park, Y., Gu, X. S., & Fan, J. (2010). Dimensional overlap accounts for independence and integration of stimulus—Response compatibility effects. *Attention, Perception, & Psychophysics, 72*, 1710–1720.

Mackie, M. -A., van Dam, N. T., & Fan, J. (2013). Cognitive control and attentional functions. *Brain and Cognition, 82*, 301–312.

MacLeod, J. W., Lawrence, M. A., McConnell, M. M., Eskes, G. A., Klein, R. M., & Shore, D. I. (2010). Appraising the ANT: Psychometric and theoretical considerations of the attention network test. *Neuropsychology, 24*, 637–651.

McConnell, M. M., & Shore, D. I. (2011). Mixing measures: Testing an assumption of the attention network test. *Attention, Perception, & Psychophysics, 73*, 1096–1107.

Newman, D. P., Cummins, T. D. R., Tong, J. F. S., Johnson, B. P., Pickering, H., Fanning, P.,... Bellgrove, M. A. (2014). Dopamine transporter genotype is associated with a lateralized resistance to distraction during attention selection. *The Journal of Neuroscience, 34*, 15743–15750.

Petersen, S. E., & Posner, M. I. (2012). The attention system of the human brain: 20 years after. *Annual Review of Neuroscience, 35*, 73–89.

Posner, M. I., & Petersen, S. E. (1990). The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience, 13*, 25–42.

Posner, M. I., Rothbart, M. K., & Sheese, B. E. (2007). Attention genes. *Developmental Science, 10*, 24–29.

Raz, A., & Buhle, J. (2006). Typologies of attentional networks. *Nature Reviews Neuroscience, 7*, 367–379.

Roca, J., Castro, C., López-Ramón, M. F., & Lupiáñez, J. (2011). Measuring vigilance while assessing the functioning of the three attentional networks: The ANTI-Vigilance task. *Journal of Neuroscience Methods, 198*, 312–324.

Roca, J., Fuentes, L. J., Marotta, A., López-Ramón, M. -F., Castro, C., Lupiáñez, J., & Martella, D. (2012). The effects of sleep deprivation on the attentional functions and vigilance. *Acta Psychologica, 140*, 164–176.

Rothbart, M. K., & Posner, M. I. (2015). The developing brain in a multitasking world. *Developmental Review, 35*, 42–63.

Rueda, M. R., Fan, J., McCandliss, B. D., Halparin, J. D., Gruber, D. B., Lercari, L. P., & Posner, M. I. (2004). Development of attentional networks in childhood. *Neuropsychologia, 42*, 1029–1040.

Salzer, Y., Oron-Gilad, T., & Henik, A. (2015). Evaluation of the attention network test using vibrotactile stimulations. *Behavior Research Methods, 47*, 395–408.

Sara, S. J., & Bouret, S. (2012). Orienting and reorienting: The locus coeruleus mediates cognition through arousal. *Neuron, 76*, 130–141.

Sarter, M., Lustig, C., Howe, W. M., Gritton, H., & Berry, A. S. (2014). Deterministic functions of cortical acetylcholine. *European Journal of Neuroscience, 39*, 1912–1920.

Snyder, S. H. (2011). What dopamine does in the brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 108*, 18869–18871.

Vázquez-Marrufo, M., Galvao-Carmona, A., González-Rosa, J. J., Hidalgo-Muñoz, A. R., Borges, M., Ruiz-Peña, J. L., & Izquierdo, G. (2014). Neural correlates of alerting and orienting impairment in multiple sclerosis patients. *PLoS ONE, 9*(5), e97226.

Visintin, E., de Panfilis, C., Antonucci, C., Capecci, C., Marchesi, C., & Sambataro, F. (2015). Parsing the intrinsic networks underlying attention: A resting state study. *Behavioural Brain Research, 278*, 315–322.

Wang, Y. F., Cui, Q., Liu, F., Huo, Y. J., Lu, F. M., Chen, H., & Chen, H. F. (2014). A new method for computing attention network scores and relationships between attention networks. *PLoS ONE, 9*(3), e89733.

Wang, Y. F., Jing, X. J., Liu, F., Li, M. L., Long, Z. L., Yan, J. H., & Chen, H. F. (2015). Reliable attention network scores and mutually inhibited inter-network relationships revealed by mixed design and non-orthogonal method. *Scientific Reports, 5*, 10251.

Weinbach, N., & Henik, A. (2011). Phasic alertness can modulate executive control by enhancing global processing of visual stimuli. *Cognition, 121*, 454–458.

Weinbach, N., & Henik, A. (2012). The relationship between alertness and executive control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 38*, 1530–1540.

Weinbach, N., & Henik, A. (2013). The interaction between alerting and executive control: Dissociating phasic arousal and temporal expectancy. *Attention, Perception, & Psychophysics, 38*, 1530–1540.

Westlye, L. T., Grydeland, H., Walhovd, K. B., & Fjell, A. M. (2011). Associations between regional cortical thickness and attentional networks as measured by the attention network test. *Cerebral Cortex, 21*, 345–356.

The Relationships among Attention Networks and Their Psychological and Physiological Mechanisms

JING Xiujuan[1]; WANG Yifeng[2]

([1] *Tianfu College, Southwestern University of Finance and Economics, Chengdu* 610052, *China*)

([2] *Key laboratory for NeuroInformation of Ministry of Education, School of Life Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu* 610054, *China*)

Abstract: According to Posner and Petersen (1990), the attention system is divided into alerting, orienting, and executive control networks. The relationships among attention networks have been tested with attention network test (ANT) and its revised versions. Biochemical, neuroimaging, and behavioral studies have demonstrated the differentiated but integrated relation of attention networks. Specifically, the interaction between attention networks is supported by the evidence that different attention networks share functional brain regions and neurotransmitters, compete for attention resources, and are modulated by cognitive strategies. Urgent issues exist in measuring of attention networks and their relationships, such as the low reliability of the ANT and ambiguous definitions of attention networks. Future studies should focus on improving the ANT and take into account the influence of subcomponents of attention networks on inter-network relationships.

Key words: attention network test; alerting network; orienting network; executive control network.