

基于神经成像技术的青少年大脑发育研究*

鞠恩霞 李红 龙长权 袁加锦

(认知与人格教育部重点实验室(西南大学), 重庆 400715) (西南大学心理学院, 重庆 400715)

摘要 大脑成熟是一个动态过程, 高级神经活动的发育主要集中于个体发展的第二个 10 年: 青少年时期。青少年时期是行为、认知和脑迅速发展的时期。青少年普遍表现出来的注意、冲动控制、计划、决策等认知能力的提高都是基于神经系统的成熟发展起来的。运用神经成像等技术的研究指出, 大脑在青少年时期的发展经历着突触精简以及髓鞘化的过程; 白质、灰质在青少年时期的成熟有不同的发展轨迹。青少年大脑皮层的成熟顺序与认知功能的发展相联系, 人脑的高级认知功能在青少年时期发展完成。在这一过程中, 脑的发展会受到情绪、环境以及经验等因素的影响。

关键词 脑发育; 青少年; 认知; 神经成像

分类号 B845

1 引言

人类大脑的成熟是复杂、不断发展的过程, 大脑的成熟伴随着相应认知和行为的改变。尽管从婴儿期起直到儿童早期都是人类大脑发育最快和最重要的时期, 但目前的大量研究都表明大脑的成熟一直持续到青少年时期。青少年时期一般是指成年以前 11、12 岁到 18、19 岁的青春发育期。现在的研究表明, 直到青少年时期, 个体的大脑仍然是发育的(Thompson et al., 2000; Bergen & Coscia, 2001; Ashtari et al., 2007; Barnea-Goraly et al., 2005; Schmithorst, Wilke, Dardzinski, & Holland, 2002)。例如, Bergen (2001) 等人指出, 与青少年时期高级认知功能成熟相伴的大脑成熟会持续到 18 岁甚至是成年早期(Bergen & Coscia, 2001)。大脑所有的潜能和弱点都依赖于个体发展的前两个 10 年, 并且在这个过程中会受到环境、经验等因素的影响(Toga, Thompson, & Sowell, 2006)。

到上个世纪为止, 由于技术手段的局限, 关于青少年时期脑和神经系统发育的研究为数不多, 对于个体在青少年时期大脑和神经系统的继续发育知之甚少(Blakemore & Choudhury, 2006)。

自上世纪 50 年代起, 研究者开始尝试通过动物研究来揭示脑的发育。动物研究表明, 环境因素对处于青春发育期的动物有很大的作用(Yakovlev & Lecours, 1967; Huttenlocher, 1979)。早先以人为被试开始的青少年大脑发育的研究, 主要是尸检研究(von Economo, 1929)。由于青少年样本的缺乏, 所以关于脑发育方面的研究资料很少。随着高科技的发展, 研究技术也在不断的日新月异。现在有了多种多样的研究技术来研究不同年龄阶段个体的大脑发育变化, 所以对各个年龄阶段个体的脑研究也变得十分容易了。

现在, 由于有了无创性技术手段, 自从 2000 年以来, 关于青少年脑与神经系统发育的研究就大量出现了。脑和神经系统发育研究的进步在很大的程度上都是因为磁共振技术持续精确化的发展以及磁共振分析技术的不断日新月异。磁共振这种新技术手段提供了更多的有关于比率变化、脑区改变的可视化的细节和群组统计资料, 随着时间推移而发生的改变也能够被计算出来说明这种变化(Shaw et al., 2008)。这种进步表现在从模糊的成像到精确化的视图, 从病理性的数据、脑异常个体的检查到正常的被试群体(可以大规模做研究的样本), 从横断研究到对儿童青少年个体的追踪研究、纵向研究。在同一被试身上同时进行纵向研究, 有的纵向研究长达 15 年之久(Giedd et al., 1999)。美国国家心理健康研究所

收稿日期: 2009-11-26

* 教育部高校基本科研业务费(XDJK2009B038)。

通讯作者: 李红, E-mail: lihong@swu.edu.cn;

袁加锦, E-mail: yuan_jiajin@126.com

(National Institute of Mental Health, NIMH) Giedd 等人的一个研究团队对脑发育问题进行了系统的研究, 科研项目从 1989 年到 2007 年, 包括了 5000 次的扫描, 年龄跨度从 3.5 岁到 33 岁, 前后共研究了 2000 例典型的发育中的儿童青少年和成年个体, 每个被试连续两年做扫描。此外, Gogtay 等人对 13 名儿童进行了长达 10 年的追踪研究, 儿童每两年会扫描一次(Gogtay et al., 2004)。这项研究测量了从 4 岁到 21 岁个体的脑区变化, 分析了灰质减少的变化模式。Evans 和 Group (2006)对 500 名儿童进行了功能性核磁共振成像(fMRI)的扫描, 年龄范围为 7~18 岁, 得益于功能性核磁共振成像技术, 研究的数据包含了丰富的时间和空间信息(Evans & Group, 2006)。磁共振成像技术(MRI)以非侵入、无创的技术提供了对活的生物体和发育中的大脑分子结构详细和精确的成像。fMRI 技术为研究提供了一个新视角, 研究大脑的功能性发育。使用 fMRI 进行研究可以使研究人员能够对个体的脑部进行照相, 并对他们的结构和功能进行对比。这对于研究青春期的脑发育尤为重要。研究者通过使用 fMRI 对青少年个体在执行多种任务时进行观察并将这一观察结果与成人相对比, 可以研究出青少年不同于成人的脑部位的活动模式(Pine et al., 2001)。同样使用扩散张量成像技术(diffusion tensor imaging, DTI)的纤维映射技术可以对神经系统的发育作追踪研究(Cascio, Gerig, & Piven, 2007)。

由于神经科学研究的进步, 基于脑的教育与学习(brain-based education and learning)的观念随之兴起(Koizumi, 2004)。更深入的了解青少年脑与神经系统的发育, 能够为心理学工作者和教育工作者提供更有价值的信息, 使他们能够选择最佳的策略来促进青少年的大脑发育与学习。

2 青少年的大脑发育

2.1 髓鞘化的过程与突触的改变

青春期前后的大脑主要有两方面变化。第一个变化表现在神经元的发育。在青少年时期, 用来辅助神经胶质细胞、增加轴突髓鞘化、从而提高传输速度的髓鞘层充分形成。神经元的髓鞘化过程是指相连接成脑部回路的神经元突触被一层髓磷脂包围的过程, 髓磷脂是一种油脂性物质, 它能起到绝缘作用, 使神经冲动更为高效传递。

与感觉和运动相关的脑区是最早完成髓鞘化的脑区, 大约在人出生后的几年就已经完成, 但是额叶神经元的髓鞘化一直持续到青少年时期(Yakovlev & Lecours, 1967)。额叶信息的传递速度会在儿童到青少年时期有一个增加。在整个青春期, 前额叶皮层的神经元会继续髓鞘化(Huttenlocher, 1994; Paus et al., 1999; Sowell, Trauner, Gamst, & Jernigan, 2002)。青春期后期, 由于参与高级认知活动的脑部回路的精确化以及髓鞘化, 高级认知活动的加工要比儿童阶段更为有效(Sowell et al., 2002)。

第二个变化表现在突触的变化。通常, 突触的变化有两种模式。一种是突触增值, 主要发生在出生到儿童时期。此时, 神经元的数量迅速增加。个体在出生时只有很少的神经元(Pakkenberg & Gundersen, 1997), 在随后的几年时间, 神经元的数量、体积、突触的密度迅速增多, 神经元细胞之间的联系也逐渐加强。神经元的数量在儿童时期要远多于成人, 这一时期被称之为突触增值时期。另一种是突触裁剪。在生命的第一个 10 年中, 脑中产生的神经元数量远远超出了信息加工所需要的水平, 而在选择性地裁减了过多的不必要的神经元联结后, 信息加工的能力会有所提高(Sowell et al., 2002)。在青少年时期, 突触的密度会达到它的峰值, 之后就会面临着一个突触的修剪和消除。经常使用的大脑神经元的联系会得到加强, 而很少使用的大脑神经元之间的联系则会消除。这依赖于经验的过程, 会持续几年, 直到突触密度减少到成人水平。其中, 突触的削减和变化发生在青少年的中期和晚期(Huttenlocher, 1979; Yakovlev & Lecours, 1967)。因此, 青少年时期大脑最主要的活动就是突触精简。这一过程非常重要, 它决定了早期形成的通路中有哪些突触得以保留, 大脑将以何种方式思维、感觉和行动, 进而决定某种能力的整体水平(Giedd et al., 1999)。突触的精简过程使脑成形并使其具有独特的神经结构, 影响个体今后的学习、工作和其他生活方面。

最近的研究表明, 大脑和神经系统在青少年时期的髓鞘化和突触裁剪过程是并列进行的。例如, 在 Benes 等人用大样本做的一项工作中, 得出了髓鞘形成会在人发育的第三个十年继续进行, 这种神经细胞空间和时间的改变与突触密度

的变化是并行的,反映高级认知功能的大脑背侧区域其突触密度在青少年时期仍处于变化之中(Benes, Turtle, Khan, & Farol, 1994)。更多腹侧以及脑深部结构(这些结构代表大脑更原始的功能)的髓鞘化过程完成要早些(Paus, 2005)。在青少年时期,神经元的树突以很快的速度增长,突触之间联系的数量也在增加。随着髓鞘化的形成过程,连接不同脑区的纤维传导速度增加,使这种大脑联系多样化增加。同时,青少年时期大脑发育也是与树突的修剪和突触消除相联系的。这两个过程导致青少年大脑和神经系统形成更多的有效连接,并且在整个生命过程中不断的重新塑造(Toga et al., 2006)。

2.2 青少年大脑灰质的发育模式——皮层厚度的变化

大脑半球被覆灰质,称大脑皮质。一般认为,大脑半球中灰质厚度的变化与大脑认知能力的提高有关(Thompson et al., 2000; Ashtari et al., 2007; Gogtay et al., 2004; Schmithorst, Wilke, Dardzinski, & Holland, 2002)。皮层灰质的发育遵循功能性的成熟顺序。初级感觉皮层最先成熟,剩下的皮层是按照从顶叶到额叶(从后到前)的方向发育成熟的。包含了综合处理几种感觉信息的皮层联合区域(如,颞上回皮层)最晚成熟(Giedd et al., 1999; Gogtay et al., 2004)。

近期的研究都表明皮层厚度达到高峰期的年龄各有不同(Le Bihan et al., 2001; Sowell et al., 2004; Keating, 2004)。例如, Giedd使用fMRI对青少年个体进行纵向研究,研究结果表明,大约12岁时额叶和顶叶的发展曲线达到高峰,16岁时颞叶的发展曲线达到高峰,自此以后,灰质开始很明显的下降(Giedd, 2008)。青春期刚开始的时期,枕叶和额叶的皮层厚度达到高峰,在随后的整个青春期,额叶皮层经历着逐步变薄的趋势,从而影响着处于这一阶段个体的计划、决策、设置目标和元认知等复杂认知活动(Giedd, 2008)。一些研究者的研究指出了这种皮层灰质厚度的变化模式(Sowell et al., 2004)。Sowell等人(2004)的脑扫描结果表明,5~11岁的儿童大部分脑区以每年0.15~0.4mm的速率在生长,这种生长在额叶和枕叶最为明显,并会持续到青春期。Harwood (2000)等人的研究发现,正常发育中的青少年背侧额叶右侧以及双侧顶叶区域的皮层是以每年0.15~

0.3mm的速度在变薄(Harwood, Hinds, & Press, 2000)。总的来说,与相对简单的皮层(如边缘系统)发育模式不同,诸如前额叶皮层、枕叶皮层等复杂脑区的发育轨迹就很复杂,大脑皮层厚度的发育模式可以说是一个动态的异步发展模式(Shaw et al., 2008)。大脑皮层灰质密度随着时间流失的过程,特别是额叶皮层逐步变薄的过程,可能与青年前期和青春期由于突触修整的增加所造成的神经元死亡有关。这种儿童皮层的变厚以及青少年时期皮层厚度的变薄都会或多或少的依赖于经验的作用。经验是导致皮层变化的一个决定性因素(Giedd et al., 1999)。

2.3 青少年时期大脑白质的变化

神经纤维聚集在大脑内部,构成了白质。白质是神经细胞中突起集中的部分,承担着传递指令的功能。Giedd等人(1999)的研究指出,白质的体积和密度在整个青少年时期一直在增加,直到成人初期。这种增加表现为髓鞘化的增加。Giorgio等人(2008)用DTI研究了青少年至成人的白质变化,被试选取了42名青少年以及20名成人。其中,青少年组被试白质的变化表现出了广泛的大脑年龄相关的增长(13.5~21岁),而在成人组中,这种随着年龄增长白质的增长并不明显。这一结果说明青少年时期白质是持续增长的,并不仅仅停留在儿童时期的水平。同时,Giorgio等人(2008)的研究也发现,不同的白质通路成熟的速率也不同。右侧大脑胼胝体以及右侧放射冠上部区域的白质是随着年龄增长变化最快的区域。这一研究结果与Barnea-Goraly等人(2005)的结论不谋而合,他们的研究指出青少年时期直到青少年晚期是大脑右侧胼胝体结构改变的过程。这种大脑胼胝体持续纤维化的过程对联系运动与感觉皮层有重要作用,有助于提高这一阶段青少年个体的运动技能。

综合以上研究,大部分的白质在青少年时期表现为持续增长,并在成人初期趋于缓和,变化的趋势逐渐趋于平稳。白质的这种变化是与髓鞘化和轴突组织的功能性变化相对应的,这些变化最终都将导致神经信号更加有效传递,有助于青少年高级认知能力的发展(Casey, Tottenham, Liston, & Durston, 2005)。

2.4 青少年额叶的发育

青春期的很多行为都与大脑结构变化有着

密切的关系。这种大脑的发育主要集中于额叶的发育,尤其是前额叶皮层的发育。在人类,前额叶皮层占整个大脑皮层面积的29%左右,系统发生学上前额叶皮层出现最晚、也是与高级认知功能联系最紧密的一个脑区。神经心理学的研究发现,大脑前额叶是中枢神经系统的最高级部位,控制着认知、思维、意向、情绪等心理活动,影响着人的性格和行为(Sowell et al., 2002)。前额叶是脑的执行控制中枢,用以监控高级思维活动,指导问题解决和调节情绪系统。同时额叶也与注意功能有关。Smith和Jonides等人的研究指出工作记忆位于此,因此额叶也是注意集中的区域(Smith & Jonides, 1999)。此外,额叶也包含与自我意愿相关的脑区,额叶损伤可能会导致严重的甚至是永久的行为或人格改变。

当前一系列的MRI研究表明,青春期额叶仍然在发育中并且会持续到成年期(Casey et al., 2005)。在青春期,前额叶皮层会发生大量的突触修剪。生命早期,脑中产生的突触远远超出了信息加工所需要的水平。直到青春期,突触表现出了明显的结构重组,皮层突触的总数减少。在选择性的裁减了过多的而不必要的神经元联结后,信息加工的能力会有所提高,效率更高且信息加工也更为集中(Giedd et al., 1999)。随着额叶神经元髓鞘形成的不断完善,原始的边缘系统朝复杂的额叶功能转变,依赖于额叶的认知能力,如执行功能、社会认知等能力都是在青春期发生改变,青少年对事物的洞察力和对信息处理速度都会随年龄而增长。

3 青少年脑和神经系统的发育与行为的关系

概而言之,脑部发育的成熟程度与青春期行为、情绪及认知发展相联系(Keating, 2004)。Gardner和Steinberg(2005)等人指出,青少年时期主要脑结构的功能,包括检索记忆、将形式置于情景之中,并且回想起可能重要的过去事件的细节。大脑的计划、适应社会环境,预测未来可能行为的后果,或者是适度的估计情绪的重要性等方面能力在青少年时期仍然在发育。

3.1 青少年认知发展与脑和神经系统的发育

青少年的大脑可以像成人的大脑一样做很多复杂的事情,青少年尽管生理特征与成人高度相似,但是认知能力和成人有很大的差距。青少年时期大脑经历着复杂的发育过程,包括新的神

经环路会形成、部分神经环路会进一步巩固,同样一些神经环路会随大脑的不断发育而逐渐消失。因此相应的认知能力,比如,执行功能、注意、反应抑制、情绪调节、组织、长期计划等都会随着大脑神经环路的而变化而变化。例如,由于额叶突触密度的变化,青少年的记忆速度和效率继续增强,他们记忆的精确性已与成人类似(Sowell et al., 2002)。随着额叶发育成熟,青少年思维和解决问题的能力也更为突出。尽管已知在语言获得中起重要作用的脑区在前青春期仍然有快速的发育,但在青春期这些脑区发育就已经停止,这也解释了个体为什么在十几岁学习新的语言要比在儿童期难得多(Thompson et al., 2000)。青少年时期被认为是有着更多的冲动性行为、反社会行为和充满矛盾的时期,这与青少年额叶发育不完全有关,导致他们在执行功能方面存在缺陷。由于前额叶皮层的抑制功能,使成人明白不该做的事情不能去做。而对儿童甚至是青少年早期的个体,由于前额叶皮层发育尚不完全,他们常常出现注意力分散、无意义动作过多等现象,其极端表现便是在儿童青少年时期高发症之一:注意力缺陷多动症(Attention deficit hyperactivity disorder, ADHD)。因此更多的时候,青少年表现出来的是冲动行为的增多。由于冲动控制、计划、决策大部分都是前额叶皮层的功能,并且在青少年时期仍处于发展之中,所以青少年的个体容易出现各种不同的行为(Blakemore, 2008)。同时,成年人对刺激的反应更倾向于智慧性而青少年更多的表现出“意气用事”(Blakemore & Choudhury, 2006),处于青少年时期的个体也会更容易选择冒险(Dahl, 2008)。这些差异都可以从大脑成熟的角度来加以解释。由此,便不难理解为什么这一时期被称之为敏感期,或疾风骤雨期。

青少年行为和认知变化的不稳定性是与青少年大脑皮层的发育,尤其是前额叶的发育相伴随的。这种脑发育与认知行为相伴随的现象十分适合青少年满足他们生活的要求。当这种脑发育的神经回路形成的时候,青少年的行为水平和认知发育也会趋于稳定,同时青少年的大脑神经环路也变得更加复杂和有效(Evans & Group, 2006)。

3.2 青少年的社会性发展与脑和神经系统的发育

最近的研究已经表明青春期的各种社会认

知能力和他们的神经发育相关。例如,前额叶皮层发育没有达到一般水平的青少年,更有可能出现品行问题,他们对情感的控制和判断也存在较大问题(Bauer & Hesselbrock, 2003)。前额叶皮层,尤其是该区域与边缘系统所发生的联系,已经成为研究青春期冒险行为和行为问题的主要脑区。青春期额叶的情绪调节能力发育尚不完全,这就是为什么青少年比成人更容易受情绪的支配,并且有更多危险行为的原因。

青少年更加频繁的抱怨和冒险性行为是有神经化学基础的。与儿童相比,冒险行为在青少年中普遍存在(Ozer, Macdonald & Irwin, 2002)。青少年冒险行为的发生受到情绪因素的影响。过分自信,好斗以及喜欢追求感官刺激是青少年个体的一些典型行为特征。在加工情绪刺激的脑结构中,最主要的就是边缘系统区域,某些神经递质的水平也会有所变化,其中包括了多巴胺和5-羟色胺。这些变化可能会使个体更加情绪化,对压力有更大反应,与此同时对奖励的反应性会降低(Martin et al., 2002)。有些科学家相信,这种对奖励敏感性的下降将驱使青少年寻求更加强烈的新异性、更多的冒险性行为(Martin et al., 2002)。而且,青春期个体奖励敏感性的降低和对感官刺激的更多寻求,也许是降低个体对心理健康问题抵抗力原因(Spear, 2000)。从本质上来说,在与控制和决策相关的脑区还没有完全形成之前,脑部位一直发生着变化,这种变化导致了青少年儿童寻求新奇刺激以及尝试更多的冒险行为(Dahl, 2008)。内侧眶额叶后部脑区与边缘系统相联系,他们共同控制自主神经系统,显示了一个线性的发育轨迹,这些区域被认为是用来监视与行为相关的结果,尤其是惩罚或者回报的结果(Rolls, 2004; Kennerley, Walton, Behrens, Buckley, & Rushworth, 2006),这些区域发育的不完全也是导致青少年冒险性行为的原因。

4 研究展望

近些年来对青少年脑发育的研究不断出现,有利于更好的了解青少年时期的大脑发育,可以说是一个跨时代的进步。脑成像技术以及其他无创伤脑功能检测技术的应用,对脑高级功能的研究已经取得了重大进展,但是从发展的角度真正意义上对大脑的脑发育与相应的认知功能变化的研究还存在着许多需要进一步研究的必要。

首先,前人的研究一般都是对脑发育障碍,尤其是青少年脑发育异常个体的研究(Sparks et al., 2002; Catani, 2006)。随着技术的不断发展,青少年时期的大脑发育从结构和功能上都是一个非线性的过程,而理解正常大脑的成熟是理解神经发育失调的关键所在。充分利用现有研究手段研究大脑动态发育过程,并通过正常与异常青少年个体的大脑结构做对比,可以为拓展病理性的治疗提供依据。

其次,虽然脑科学已经取得了重大进展,但是试图要建立关于脑的总体理论的时机还不成熟,关于脑的整体的理论必须是整合的(杨雄里, 1998)。青少年大脑发育模式与认知能力之间可能联系的研究仍然是今后长期要做的工作。但是目前也是有一些成果的(Catani, 2006; Keating, 2004; Paus, 2005)。相比而言,有些脑区支持更复杂的心理功能,表现出了明显的发育梯度亦或表现出在关键期的迅速发育。目前的研究仅仅只能推测一种人类技能发展的关键期和发展轨迹之间的可能关系(Paus, 2005),人类技能发展关键期的描绘是复杂的,需要有更多的证据来支持这种大脑发育模式与认知之间的关系。同时,这种关系的研究对教育是有重大意义的(Koizumi, 2004)。

5 小结

不同于儿童、成人的大脑,青少年的脑发育,表现为大脑皮层厚度的变化、灰质和白质不同的发育变化模式、大脑髓鞘化以及额叶发展的过程。青少年脑的发育与其行为之间的关系也被考虑到。这些研究有助于理解青少年为什么被称之为是疾风暴雨的时期。通过对青少年的脑发育的神经机制的研究与探讨,可以让教育工作者更加有效地促进青少年的大脑发育和学习,预防青少年的冲动行为,从而在学校教育、家庭教育方面更加有效的预防、干涉。

参考文献

- 杨雄里. (1998). *脑科学的现代进展*. 上海: 上海科技教育出版社.
- Ashtari, M., Cervellione, K. L., Hasan, K. M., Wu, J., McIlree, C., Kester, H., et al. (2007). White matter development during late adolescence in healthy males: a cross-sectional diffusion tensor imaging study. *Neuroimage*, 35, 501-510.
- Barnea-Goraly, N., Menon, V., Eckert, M., Tamm, L., Bammer, R., Karchemskiy, A., et al. (2005). White matter

- development during childhood and adolescence: a cross-sectional diffusion tensor imaging study. *Cerebral Cortex*, *15*, 1848–1854.
- Bauer, L. O., & Hesselbrock, V. M. (2003). Brain maturation and subtypes of conduct disorder: interactive effects on P300 amplitude and Topography in Male Adolescents. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, *42*, 106–115.
- Benes, F. M., Turtle, M., Khan, Y., & Farol, P. (1994). Myelination of a key relay zone in the hippocampal formation occurs in the human brain during childhood, adolescence, and adulthood. *Archives of General Psychiatry*, *51*, 477–484.
- Bergen, D., & Coscia, J. (2001). *Brain Research and Childhood Education. Implications for Educators*. Olney, Maryland: Association for Childhood Education International.
- Blakemore, S. J. (2008). The social brain in adolescence. *Nature Reviews Neuroscience*, *9*, 267–277.
- Blakemore, S. J., & Choudhury, S. (2006). Development of the adolescent brain: implications for executive function and social cognition. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *47*, 296–312.
- Cascio, C. J., Gerig, G., & Piven, J. (2007). Diffusion tensor imaging: Application to the study of the developing brain. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, *46*, 213–223.
- Casey, B. J., Tottenham, N., Liston, C., & Durston, S. (2005). Imaging the developing brain: what have we learned about cognitive development? *Trends in Cognitive Sciences*, *9*, 104–110.
- Catani, M. (2006). Diffusion tensor magnetic resonance imaging tractography in cognitive disorders. *Current Opinion In Neurology*, *19*, 599–606.
- Dahl, R. E. (2008). Biological, developmental, and neurobehavioral factors relevant to adolescent driving risks. *American Journal of Preventive Medicine*, *35*, 278–284.
- Evans, A. C., & Group BDC. (2006). The NIH MRI study of normal brain development. *Neuroimage*, *30*, 184–202.
- Gardner, M., & Steinberg, L. (2005). Peer influence on risk taking, risk preference, and risky decision making in adolescence and adulthood: an experimental study. *Developmental Psychology*, *41*, 625–635.
- Giedd, J. N. (2008). The teen brain: insights from neuroimaging. *Journal of Adolescent Health*, *42*, 335–343.
- Giedd, J. N., Blumenthal, J., Jeffries, N. O., Castellanos, F. X., Liu, H., Zijdenbos, A., et al. (1999). Brain development during childhood and adolescence: A longitudinal MRI study. *Nature Neuroscience*, *2*, 861–863.
- Giorgio, A., Watkins, K. E., Douaud, G., James, A. C., James, S., De Stefano, N., et al. (2008). Changes in white matter microstructure during adolescence. *Neuroimage*, *39*, 52–61.
- Gogtay, N. et al. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood and adolescence. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *101*, 8174–8179.
- Harwood, M., Hinds, S., & Press, G. A. (2000). Normal brain development and aging: quantitative analysis at in vivo MR imaging in healthy volunteers. *Radiology*, *216*, 672–682.
- Huttenlocher, P. R. (1979). Synaptic density in human frontal cortex—developmental changes and effects of aging. *Brain Research*, *163*, 195–205. 转引自: Gogtay, N. et al. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood and adolescence. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *101*, 8174–8179.
- Huttenlocher, P. R. (1994). Synaptogenesis, synapse elimination, and neural plasticity in human cerebral cortex. In C. A. Nelson (Ed.), *Threats to optimal development: Integrating biological, psychological, and social risk factors. The Minnesota symposia on child development*, *27*. (pp. 35–54). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Keating, D. (2004). Cognitive and brain development. In R. Lerner & L. Steinberg (Eds.), *Handbook of adolescent psychology* (2nd ed., pp. 45–84). New York: John Wiley.
- Kennerly, S. W., Walton, M. E., Behrens, T. E., Buckley, M. J., & Rushworth, M. F. (2006). Optimal decision making and the anterior cingulate cortex. *Nature Neuroscience*, *9*, 940–947.
- Koizumi, H. (2004). The concept of ‘developing the brain’: a new natural science for learning and education. *Brain Development*, *25*, 434–441.
- Le Bihan, D., Mangin, J. F., Poupon, C., Clark, C. A., Pappata, S., Molko, N., et al. (2001). Diffusion tensor imaging: concepts and applications. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, *134*, 534–546.
- Martin, C. A., Kelly, T. H., Rayens, M. K., Brogli, B. R., Brenzel, A., Smith, W. J., et al. (2002). Sensation seeking, puberty, and nicotine, alcohol, and marijuana use in adolescence. *Journal of Amer Academy of Child & Adolescent*, *41*, 1495–1502.
- Ozer, E. M., Macdonald, T., & Irwin, C. E. Jr. (2002). *Adolescent health care in the United State: Implications and projections for the new millennium*. The changing adolescent experience: Societal trends and the transition to adulthood, New York: Cambridge University Press.
- Pakkenberg, B., & Gundersen, H. J. G. (1997). Neocortical neuron number in humans: effect of sex and age. *The Journal of Comparative Neurology*, *384*, 312–320.
- Paus, T. (2005). Mapping brain maturation and cognitive development during adolescence. *Trends in Cognitive Sciences*, *9*, 60–68.

- Paus, T., Zijdenbos, A., Worsley, K., & Collins, D. L. (1999). Structural maturation of neural pathways in children and adolescents: in vivo study. *Science*, 283, 1908–1911.
- Pine, D. S., Szeszko, P. R., Bilder, R. M., Ardekani, B., Grun, J., Zaragn, E. et al. (2001). Cortical brain regions engaged by masked emotional faces in adolescents and adults: an fMRI study. *Emotion*, 1, 137–147.
- Rolls, E. T. (2004). The functions of the orbitofrontal cortex. *Brain and Cognition*, 55, 11–29.
- Schmithorst, V. J., Wilke, M., Dardzinski, B. J., & Holland, S. K. (2002). Correlation of white matter diffusivity and anisotropy with age during childhood and adolescence: a cross-sectional diffusion-tensor MR imaging study. *Radiology*, 222, 212–18.
- Shaw, P., Kabani, N. J., Lerch, J. P., Eckstrand, K., Lenroot, R., Gogtay, N., et al. (2008). Neurodevelopmental trajectories of the human cerebral cortex. *Journal of Neuroscience*, 28, 3586–3594.
- Smith, E. E., & Jonides, J. (1999). Storage and executive processes in the frontal lobes. *Science*, 283, 1657–1661.
- Sowell, E. R., Thompson, P. M., Leonard, C. M., Welcome, S. E., Kan, E., Toga, A. W. (2004). Longitudinal Mapping of Cortical Thickness and Brain Growth in Normal Children. *Journal of Neuroscience*, 24, 8223–8231.
- Sowell, E. R., Trauner, D. A., Gamst, A., & Jernigan, T. L. (2002). Development of cortical and subcortical brain structures in childhood and adolescence: A structural MRI study. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 44, 4–16.
- Sparks, B. F., Friedman, S. D., Shaw, D. W., Aylward, E. H., Echelard, D., Artru, A. A., et al. (2002). Brain structural abnormalities in young children with autism spectrum disorder. *Neurology*, 59, 184–92.
- Spear, L. P. (2000). The adolescent brain and age-related behavioral manifestations. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 24, 417–763.
- Thompson, P. M., Giedd, J. N., Woods, R. P., MacDonald, D., Evans, A. C., & Toga, A. W. (2000). Growth patterns in the developing brain detected by using continuum mechanical tensor maps. *Nature*, 404, 190–193.
- Toga, A. W., Thompson, P. M., & Sowell, E. R. (2006). Mapping brain maturation. *Trends in Neurosciences*, 29, 148–159.
- Von Economo, C. V. (1929). The cytoarchitectonics of the human cerebral cortex. London: *Oxford Medical Publications*. 转引自: Fischl, B., & Dale, A. M. (2000). Measuring the thickness of the human cerebral cortex from magnetic resonance images. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97, 11050–11055.
- Yakovlev, P. I., & Lecours, A. R. (1967). Regional Development of the Brain in Early Life. Blackwell Scientific, *Oxford*. pp. 3–70. 转引自: Paus, T. (2005). Mapping brain maturation and cognitive development during adolescence. *Trends in Cognitive Sciences*, 9, 60–68.

A Neuroimaging-Based Review of the Teen Brain Development

JU En-Xia; LI Hong; LONG Chang-Quan; YUAN Jia-Jin

(Key Laboratory of Cognition and Personality, Ministry of Education (SWU), Chongqing 400715, China)

(School of Psychology, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Brain maturity is a dynamic process, the development of higher nervous activity lies mainly in the second decade: the period of adolescence. Adolescence is a period of rapid development in one's behavior, cognition and brain. The enhancement of teenagers' cognitive capabilities is based on the maturity of nervous system, e.g. attention, impulse-controlling, planning, decision-making, etc. Neuroimaging studies indicated that the development of teen's brain undergoes synaptic pruning and myelination. The maturity of white matter and gray matter has different development track in adolescents. The maturity sequence of the teen's cerebral cortex is associated with the development of cognitive function which, however, is completed in adolescent. In this process, the development of one's brain will be affected by emotion, experience, environment and other factors.

Key words: brain development; teenager; cognition; neuroimaging