

《心理学报》审稿意见与作者回应

题目：羽毛球运动重塑成年早期的大脑灰质和白质结构

作者：白学军 邵梦灵 刘婷 尹建忠 金花

第一轮

审稿人 1 意见：

该研究通过短时干预证实了运动是改变大脑灰质和白质结构的有效途径，实验设计突破了前人横向对照的实验设计，研究方法上具有一定创新性，但存在以下一些主要问题：

意见 1：前言部分缺乏对羽毛球训练只进行 3 个月干预的现实意义的阐述。以往的横向对照研究意义明确，均旨在阐明具有某种专家知识系统的神经机制，如果采用 3 个月训练，是想说明该运动在教育学习中的意义，还是在于其基础研究的价值？

回应：非常感谢审稿专家的宝贵意见！这一稿中，我们在引言部分增加了对羽毛球只训练进行 3 个月干预的现实意义的阐述，“1 引言”部分最后一段增加了如下内容（见正文“1 引言”最后一段红色字体）。

在干预研究中，干预时长的设置非常关键，干预时间过短可能观察不到干预的效果；而干预时间过长可能导致数据脱落率增加也不利于得到可靠的实验结果，另外还可能使干预方案的可行性下降。本研究将干预时长设置为 12 周，一是先前研究发现 12 周的训练能引发训练相关脑区的结构变化（如 Draganski et al., 2004; Rogge et al., 2018），二是 12 周的时长可以最大限度地避免因开学和复习考试而可能产生的被试参与度降低及数据脱落等现象，也增加了干预方案的可行性。

意见 2：该研究假设，干预组在与视运动知觉有关的大脑结构出现差异，但研究内容并不能说明出现结构的脑区与该能力有关，缺乏行为学证据，削弱了该假设或者说该假设并不能成立。

回应：如审稿专家所言，本实验确实没有应用如随机点阵等范式直接分析比较被试在羽毛球训练前后视运动知觉敏感性的变化，难以推定本研究观察到的脑结构的变化是否伴随着个体视运动知觉行为表现上的变化及二者之间的关系，这是本研究的不足之处。因此，本研究的目的和假设均聚焦于“训练对脑结构的变化”（见修改稿“1 引言”最后一段第一句）。以此为中点，基于文献和本实验所属同一大项目另一个实验的行为结果，在正文引言和讨论中对羽毛球运动与视运动知觉变化的关系做出了一定的推测。

为了更清晰地明确前述的局限性，修改稿在正文二处进行了内容修正或是增删。

1) 在本稿的局限部分增加了下面的内容（见修改稿“4 讨论”部分最后一段的红色字体）。

最后，本实验没有应用如随机点阵等范式直接分析比较被试在羽毛球训练前后视运动知觉敏感性的变化，难以推断本研究观察到的脑结构的变化与个体视运动知觉行为表现上的变化之间的关系。未来研究可以增加行为测量，以更直接地揭示脑功能区结构变化与行为变化间的关系。

2) 另外，和本实验属于一个大项目的另一个实验采集了这批被试训练前后球路判断的行为反应准确率及脑电活动，分析发现实验组训练后球路预期的判断准确显著高于训练前，而对照组没有发生这种行为变化。结果提示羽毛球训练可能改善了被试对训练过的动态信息

的视觉加工能力。修改稿讨论部分增加了下面的内容（见“4 讨论”部分第三段红色字体）。

本实验所属项目下的另一个实验确实发现，被试进行 3 个月的羽毛球训练后，对羽毛球的视觉预期能力显著提高（Liu et al., 2017）。

意见 3：研究方法部分，实验程序还缺乏对细节的详细介绍，如为干预实验，需要具体到干预的频率、强度和含量，如果有附件说明，能帮助读者更好了解该研究。

回应：非常感谢审稿专家的宝贵意见！我们在修改稿的“2.2 实验程序”部分补充如下内容（见“2.2 实验程序”部分的红色字体）。

具体干预(羽毛球训练)细节见附件 1。

将干预（羽毛球训练）的频率、强度、含量写在了附件里，附件附在了在修改稿的最后一页。具体干预细节的描述如下：

羽毛球训练的具体实施细节

时间：每周三次（周一、周三、周五），每次一小时，连续 12 周。

地点：某大学体育馆。

内容：每次羽毛球训练包括三个部分。第一部分：讲解并演示。羽毛球老师讲解并演示某个或某些正确的羽毛球运动动作（如，发球、杀球）或技能（如，根据对手肢体动作预期球路轨迹，根据对手所在位置，将球反击到左半场或右半场，前半场或后半场）。这一部分大约持续 10 分钟。第二部分：练习。两人一组，练习老师在第一部分讲解的动作或技能，在此期间，老师观察每个被试的动作和姿势，如有不正确的，就前去指导。这一部分大约持续 30 分钟。第三部分，自由打球。两人一组打羽毛球。这一部分大约持续 20 分钟。在最后一周的运动中，老师组织小组赛。

意见 4：结果部分，请对研究结果进行一定归纳和总结，如对图标进行适当合并，优化呈现内容。

回应：如审稿人所言，原稿中结果的描述、表格和图确实过于冗长和琐碎。根据审稿人的意见，这一稿中我们对结果部分的表格和图进行了适当的合并和增减，由原来的 5 个表、5 个图，缩减到 3 个表、4 个图，具体见正文“3 结果”部分。

表格的改动：将原稿中表 1 的内容写在了修改稿正文的图 1 的图注中。将原稿中表 3 的内容写在了修改稿正文的图 3 的图注中。删去了原稿中的表 1 和表 3。原稿中表 2、表 4、表 5 内容不变，依次修改表号为修改稿中的表 1、表 2、表 3。

图的改动：在原稿的图 1 中，增加了对脑区的标注、详细的图注，见修改稿中的图 1。将原稿中图 2、图 3、图 4 进行了合并，见修改稿中的图 2。将原稿件中图 5 进行了精简，增加了详细的图注，见修改稿中的图 3。增加了一个 RD 结果条形图，见修改稿中的图 4。

此外，为了更清晰的呈现结果，我们对白质结果的描述做了适当修改，具体见“3.2 白质结果”部分的红色字体，描述如下。

结果显示，在 AD 方面，4 个 ROIs 的交互作用均不显著（ $p > 0.05$ ）。在 RD 方面，双侧内囊后肢（左： $F(1, 37) = 19.13, p < 0.001, \eta^2 = 0.34$ ；右： $F(1, 37) = 29.01, p < 0.001, \eta^2 = 0.44$ ）、双侧上放射冠（左： $F(1, 37) = 15.68, p < 0.001, \eta^2 = 0.30$ ；右： $F(1, 37) = 34.70, p < 0.001, \eta^2 = 0.48$ ）交互作用均显著。简单效应结果显示，实验组训练后，双侧内囊后肢、右上放射冠显著下降了（ $p < 0.01$ ），左上放射冠前后测无显著差异（ $p > 0.05$ ）；对照组后测的双侧内囊后肢、双侧上放射冠显著增加了（ $p < 0.01$ ）。见图 4、表 3。

意见 5：讨论部分，对照组出现灰质体积以及 FA 下降，被试均为年轻人，解释为老化过于牵强。请作者仔细阅读关于毕生发展中大脑结构变化的文献，思考其变化原因，给出合理

解释。

回应：非常感谢审稿专家的宝贵意见！我们查找并认真研读了毕生发展中大脑结构变化的相关文献，认为上一稿中将对照组颞中回灰质体积下降、内囊后肢和上放射冠 FA 下降归因为“正常老化”是不恰当的。修改稿重新组织了语言且增加了新的文献，从大脑的毕生发展角度解释了这一现象。原来的内容修正成如下（见“4 讨论”部分的倒数第二段绿色字体）。

出乎我们的预期，实验还观察到了对照组脑结构的变化，实验后对照组颞中回灰质体积的下降、白质 FA 下降。这一现象可能符合大脑毕生发展的规律。大量研究发现，个体大脑的灰质体积在儿童期甚至更早的发育期就开始了下降（Pfefferbaum et al., 1994; Ge et al., 2002; Kalpouzos et al., 2009; Sowell et al., 2003）。如 Pfefferbaum 等人(1994)以 161 名年龄在 3 个月到 70 岁的健康人为被试，测量脑容量，发现灰质体积在 4 岁时达到峰值，之后开始下降。Kalpouzos 等人（2009）以 20 岁-83 岁的健康人为被试，考察灰质体积的毕生发展，发现颞中回灰质体积随年龄增加而下降。一项考察白质纤维在生命全程中变化的研究表明，大部分白质较早达到成熟，如枕叶、额叶的白质 FA 在青少年后期达到最大值，50%的皮质脊髓束体素在 20 岁左右达到峰值，然后呈下降趋势（Westlye et al., 2010）。更值得注意的是，Lovden 等人（2012）的干预实验也曾得到了和我们类似的结果，即发现成人脑灰质容积在较短的时间跨度内出现了下降。Lovden 等人（2012）分别以年轻人（20-30 岁）和老年人（60-70 岁）为实验对象，实验请两个年龄段的实验组参加 42 天的导航训练（在虚拟的动物园中寻找动物），对应的对照组执行和实验组相同运动量的走路。结果发现实验组中的老年人和年轻人海马（与导航有关）灰质体积都增加了，而对照组中的老年人和年轻人海马体积均下降了（年轻人左海马下降了 0.59%，右海马下降了 1.12%；老年人左海马下降了 0.85%，右海马下降了 1.94%）。Tamnes（2013）对处于发育期的 8-19 岁被试的灰质体积进行了 2.6 年的追踪，也得到了类似的结果。他们发现许多皮层的年下降率超过 1%，在 20 岁时，下降最多的脑区在额叶、外侧颞叶。本研究中被试的年龄和干预训练持续时间均与上述研究中成人被试的情况相近，因此，我们推测，本实验观察到的对照组颞中回灰质体积下降也属于大脑毕生发展现象。

意见 6：文字表述还需要更为精炼；英文摘要需要请专业人士进行把关；全文标点符号中的逗号大多数为英文逗点。

回应：非常感谢审稿人的宝贵意见！我们已仔细检查并更正了全文的标点符号，英文摘要也请专业人士进行了校正。

意见 7：头动是扫描过程中所关注的重点，扫描过程缺乏对被试的头动要求，分析方法中也没有对头动允许范围以及可能进行的变量分析进行交代。

回应：非常感谢审稿专家的宝贵意见！我们上一稿中对 DTI 数据进行了头动矫正，是我们没有描述清楚，对 DTI 数据进行的涡流矫正就包括了涡流和头动矫正。我们在这一稿中进行了详细的描述，描述如下（见“2.5TBSS 数据分析”部分的红色字体）。

涡流矫正，用来矫正在数据采集过程中，由头动和涡流引起的图像形变。

在稿件中批注的意见：

意见 1：摘要部分应该增加对对照组的介绍。

回应：非常感谢审稿专家的宝贵意见！我们在“摘要”部分增加了对对照组的介绍，描述如下（见“摘要”部分的红色字体）。

对照组在此期间不进行任何有规律的运动训练。

意见 2：引言第一段“但是这些特殊经历对大多数人来说不具代表性。在高压力的现代社会中，体育运动已成为人们强身健体、放松身心的首选活动，因此，研究体育运动的脑可塑性的效应更具有代表性。”这句话表述欠妥，音乐和游戏对于普通人而言，也是从事较多的活动。

回应：非常感谢审稿专家的宝贵意见！确实，如审稿人所言，音乐、电子游戏对普通人而言确实是从事较多的活动，初稿中这段话的描述欠妥，没有清楚表达采用羽毛球作为训练手段的意义。因此，修改稿做了如下四处修改。

1) 引言第一段红色字体：研究已表明音乐家、专业运动员、电子游戏玩家等，具有某种专业技能的专家的脑结构或功能不同于非专业人员或新手（Gaser & Schlaug, 2003; Gong et al., 2016; 2017; Luo et al., 2012; Park, Lee, Kwon, Lee, & Rhyu, 2015; Wang et al., 2013; Zhang et al., 2013）。

2) 引言倒数第四段红色字体：但是，上述研究均为横向研究，不能排除运动员先天优势的影响，也不能排除运动员幼年时期的运动训练的影响。因此，球类运动训练是否改变成人视知觉脑区的结构可塑性仍然不清楚。

3) 引言倒数第三段红色字体：对成人进行运动训练引起脑可塑性改变的研究发现，对成人进行 3 个月的杂耍训练（Draganski et al., 2004）或是体育训练（Baeck et al., 2012; Rogge, Roder, Zech, & Hotting, 2018）能够改变成人脑结构或功能。如 Rogge 等人（2018）对成人分别进行 12 周平衡训练和放松训练发现，与放松训练组比较，平衡训练组训练后平衡能力提高，且与视觉、前庭和自我运动知觉相关的脑区（如视觉联合皮层、颞上皮层、扣带皮层后部、额上沟和中央前回等脑区）的皮层厚度增加，壳核体积下降。这表明生活中的运动经历会改变成人脑可塑性，但是，球类运动训练是否改变成人视知觉脑区的结构可塑性仍然不清楚。

4) 引言倒数第二段绿色字体：最新基于 120 万被试的大数据研究发现，拍类运动是综合价值最高的体育活动时间，对于促进心理健康、减少各种致命疾病的患病风险非常有效（Chekroud et al., 2018）。而羽毛球运动是最受国人欢迎的健身运动之一，羽毛球运动人口达到 2 亿以上，仅次于跑步人口数（艾瑞咨询, 2015; 刘凌云, 2018）；其次，相对于其它拍类运动，羽毛球运动对场地、个体的技术或身体素质要求较低，可行性较强。因此以羽毛球运动为模型探讨生活经历对成人脑结构的可塑性具有较好的普遍性、社会意义和生态效应。

意见 3：引言第二段，什么是视运动知觉能力？属于感觉还是知觉？

回应：非常感谢审稿专家的宝贵意见！视运动知觉能力属于知觉。原稿中我们对视运动知觉能力的概念描述不清，修改稿增加了对视运动知觉能力的定义的表述（见“1 引言”部分第二段红色字体），描述如下。

视运动知觉（visual motion perception）是人脑对外界物体的运动特性的知觉，如，对协同运动（coherent motion）的知觉、对生物运动（biological motion）的知觉、对快速变化的视觉事件的加工，是一项重要的信息加工能力（李开云, 陈功香, 傅小兰, 2018）。

意见 4：2.3 脑结构扫描部分，EPI 请写全称。

回应：非常感谢审稿专家的意见！修改稿中，我们补充了 EPI 的全称（见“2.3 脑结构扫描”部分第二段的红色字体），描述如下。

DTI 由平面回波成像序列（echo-planar imaging sequence, EPI）获得。

意见 5：2.3 脑结构扫描部分，在结构扫描中至于是否睡着，不想其它事情，没有必要进行要求。

回应：非常感谢审稿专家的意见！修改稿中我们删除了“以上所有扫描过程中，要求被试闭上眼睛，不要睡着，不想其他的事情。”这句话，见“2.3 脑结构扫描”部分的第二段。

意见 6：2.4VBM 分析部分，一般要求是将颅内体积 ICV 加入协变量。

回应：非常感谢审稿专家的宝贵意见！我们已将颅内体积加入了协变量，在初稿中我们对“intracranial volume”的翻译不准确，修改稿中，我们将“全脑体积”修改为“颅内体积”，描述如下（见“2.4VBM 分析”部分的红色字体）。

把颅内体积（intracranial volume, ICV）加入协变量。

意见 7：文中部分词语的使用。

回应：非常感谢审稿专家对文中用词的斟酌和修改！我们仔细阅读并接受了审稿专家对文中用词的修改。具体修改如下：

标题由原来的“羽毛球运动对成人脑结构可塑性的影响”改为“羽毛球运动重塑年轻成人的大脑灰质和白质结构”。

摘要部分：“横向研究表明”改为“以往研究发现”。“结构或功能不同于非运动员”改为“结构不同于非运动员”。“横向研究难以排除先天因素的影响”改为“横向研究的实验设计难以排除先天因素对大脑可塑性的影响”。“本研究拟采用纵向设计考察该问题”改为“本研究拟采用纵向设计”。“收集”改为“采集”。在“双侧内囊后肢、上放射冠各向异性分数（FA）增加”后，插入“进一步分析发现，FA 增加的原因是径向扩散系数（RD）下降。”

关键词部分：“羽毛球运动训练”改为“羽毛球训练”。

引言部分：“本研究旨在考察成人时期的一段羽毛球运动经历是否可以改变脑结构可塑性”改为“本研究旨在考察成人时期短时羽毛球运动训练是否可以改变大脑结构”。

审稿人 2 意见：该研究采用磁共振技术考察了 12 周羽毛球运动训练对脑灰质密度和脑白质特征的改变。结果发现，经过训练后的被试在左侧枕下叶、颞中回等脑区的灰质显著增加，在双侧内囊后肢、上放射冠的 RD 显著下降。但是同时，控制组也出现了一些脑灰质和白质的变化。

意见 1：前言部分，已有很多纵向研究考察过脑功能或结构的可塑性变化，只是没有羽毛球运动相关的类似研究。作者应清晰描述这一现状，并阐述研究羽毛球运动的特殊理论价值或应用价值。

回应：非常感谢审稿专家的宝贵意见！我们引言部分补充了羽毛球运动的特殊理论价值或应用价值，描述如下（见“1 引言”部分的倒数第二段绿色字体）。

最新基于 120 万被试的大数据研究发现，拍类运动是综合价值最高的体育活动方式，对于促进心理健康、减少各种致命疾病的患病风险非常有效（Chekroud et al., 2018）。而羽毛球运动是最受国人欢迎的健身运动之一，羽毛球运动人口达到 2 亿以上，仅次于跑步人口数（艾瑞咨询, 2015; 刘凌云, 2018）；其次，相对于其它拍类运动，羽毛球运动对场地、个体的技术或身体素质要求较低，可行性较强。因此以羽毛球运动为模型探讨生活经历对成人脑结构的可塑性具有较好的普遍性、社会意义和生态效应。

意见 2：2.3 的小标题应为脑影像扫描或脑结构扫描。另外，2.2 提到静息态磁共振，但是 2.3 中并没有提及。在数据分析和结果等部分中也未提及，作者应说明。

回应：非常抱歉，这是我们的疏忽，很感谢审稿专家的细心和耐心指正！

本实验没有对被试进行静息态功能磁共振扫描，所以，本次修改稿中，我们把 2.2 实验程序中的“静息态功能磁共振扫描”去掉了，改成了“前测和后测的内容一样，均为脑结构扫描。”详见“2.2 实验程序”部分的蓝色字体。

另外，2.3 的小标题也改为了“脑结构扫描”。

意见 3：3.1 灰质结果，实验组和控制组前测是否有显著差异？特别是图 3 左侧颞下回，实验组和控制组的前测好像差异比较大。

回应：非常感谢审稿专家的宝贵意见！我们将交互作用显著的脑区的灰质体积信号提取出来，使用 spss22.0，对实验组 and 对照组的前测灰质体积进行了独立样本 t 检验，结果显示，两组被试的这些脑区的灰质体积在前测均无显著差异 ($p > 0.05$)。具体统计结果如下：左下枕叶： $t(37) = 1.33, p = 0.191 > 0.05$ 。左颞下回： $t(37) = 1.91, p = 0.065 > 0.05$ 。左颞中回： $t(37) = 0.91, p = 0.369 > 0.05$ 。我们将这部分结果补充在了“3.1 灰质体积结果”部分，见蓝色字体。

意见 4：如何解释控制组脑结构的变化？脑的发育或老化通常发生的时间较长，是否有证据表明正常青年被试在 12 周的时间内能够观察到脑结构的自然改变？另外，研究中的被试均为青年被试，为什么在讨论中提到与正常老化有关？

回应：非常感谢审稿专家的宝贵意见！我们查找并认真研读了毕生发展中大脑结构变化的相关文献，认为上一稿中将对照组颞中回灰质体积下降、内囊后肢和上放射冠 FA 下降归因为“正常老化”是不恰当的。修改稿重新组织了语言且增加了新的文献，从大脑的毕生发展角度解释了这一现象。原来的内容修正成如下（见“4 讨论”部分的倒数第二段绿色字体）。

出乎我们的预期，实验还观察到了对照组脑结构的变化，实验后对照组颞中回灰质体积的下降、白质 FA 下降。这一现象可能符合大脑毕生发展的规律。大量研究发现，个体大脑的灰质体积在儿童期甚至更早的发育期就开始了下降（Pfefferbaum et al., 1994; Ge et al., 2002; Kalpouzos et al., 2009; Sowell et al., 2003）。如 Pfefferbaum 等人（1994）以 161 名年龄在 3 个月到 70 岁的健康人为被试，测量脑容量，发现灰质体积在 4 岁时达到峰值，之后开始下降。Kalpouzos 等人（2009）以 20 岁-83 岁的健康人为被试，考察灰质体积的毕生发展，发现颞中回灰质体积随年龄增加而下降。一项考察白质纤维在生命全程中变化的研究表明，大部分白质较早达到成熟，如枕叶、额叶的白质 FA 在青少年后期达到最大值，50% 的皮质脊髓束体素在 20 岁左右达到峰值，然后呈下降趋势（Westlye et al., 2010）。更值得注意的是，Lovden 等人（2012）的干预实验也曾得到了和我们类似的结果，即发现成人脑灰质容积在较短的时间跨度内出现了下降。Lovden 等人（2012）分别以年轻人（20-30 岁）和老年人（60-70 岁）为实验对象，实验请两个年龄段的实验组参加 42 天的导航训练（在虚拟的动物园中寻找动物），对应的对照组执行和实验组相同运动量的走路。结果发现实验组中的老年人和年轻人海马（与导航有关）灰质体积都增加了，而对照组中的老年人和年轻人海马体积均下降了（年轻人左海马下降了 0.59%，右海马下降了 1.12%；老年人左海马下降了 0.85%，右海马下降了 1.94%）。Tamnes（2013）对处于发育期的 8-19 岁被试的灰质体积进行了 2.6 年的追踪，也得到了类似的结果。他们发现许多皮层的年下降率超过 1%，在 20 岁时，下降最多的脑区在额叶、外侧颞叶。本研究中被试的年龄和干预训练持续时间均与上述研究中成人被试的情况相近，因此，我们推测，本实验观察到的对照组颞中回灰质体积下降也属于大脑毕生发展现象。

第二轮

审稿人 1 意见：该修改稿并未完全回答之前的问题，建议修改。此外，还发现以下问题：

意见 1: 题目中的年轻成人在发展心理学中不常用, 建议改为“成年早期”。

回应: 非常感谢审稿专家的宝贵意见! 这一稿中, 我们将题目改为了《羽毛球运动重塑成年早期的大脑灰质和白质结构》。此外, 还将文中其他类似的表述进行了修改, 如: 将“关键词”中的“成人”改成了“成年早期”。将“4 讨论”部分第一段第一句“本研究考察了羽毛球运动对成人脑结构可塑性的影响”改成了“本研究考察了羽毛球运动对成年早期脑结构可塑性的影响”。将“5 结论”部分的“成人脑的灰质和白质均具有一定的可塑性”改为了“成年早期的脑灰质和白质均具有一定的可塑性”。将英文题目“Altered Structural Plasticity in Young Adults after Badminton Training”改为了“Altered Structural Plasticity in early adulthood after Badminton Training”。将英文关键词的“adult”改为了“early adulthood”。详见“标题”、“关键词”、“4 讨论”第一段第一句、“5 结论”、“英文标题”、“英文关键词”部分的标黄字体。具体描述如下:

- 1) 标题: 《羽毛球运动重塑成年早期的大脑灰质和白质结构》
- 2) 关键词: “成年早期”
- 3) 讨论部分: “本研究考察了羽毛球运动对成年早期脑结构可塑性的影响”
- 4) 结论部分: “成年早期的脑灰质和白质均具有一定的可塑性”
- 5) 英文标题: “Altered Structural Plasticity in early adulthood after Badminton Training”
- 6) 英文关键词: “early adulthood”

意见 2: 摘要中“但横向研究的实验设计难以排除先天因素对大脑可塑性的影响”, 建议改为“但这些脑区结构的差异是训练经历引起还是天生结构不同所导致的, 尚未可知”。

回应: 非常感谢审稿专家提出的意见! 本稿中已将摘要部分的“但横向研究的实验设计难以排除先天因素对大脑可塑性的影响”, 改为了“但这些脑区结构的差异是训练经历引起还是天生结构不同所导致的, 尚未可知”。也将“英文摘要”的这部分进行了相应修改, 由“However, these cross-sectional studies failed to exclude the effects of nature regarding their differences between experts and novices. These findings cannot fully explain the role of sport experience in brain plasticity.”改为了“However, these findings cannot fully explain the role of sport experience in brain plasticity. It is still not clear whether these differences in brain structure are due to training experiences or innate differences.”。详见“摘要”、“英文摘要”第一段的标黄字体。具体描述如下:

- 1) 摘要部分: “但这些脑区结构的差异是训练经历引起还是天生结构不同所导致的, 尚未可知”。
- 2) 英文摘要部分: “However, these findings cannot fully explain the role of sport experience in brain plasticity. It is still not clear whether these differences in brain structure are due to training experiences or innate differences.”

意见 3: 摘要里未突出成人早期这一年龄范围的人群。

回应: 非常感谢审稿专家提出的意见! 为了突出本研究中被试的年龄范围特点, 我们将“摘要”部分的“对实验组的成人非运动员进行 12 周的羽毛球运动训练”改成了“以处于成年早期的成人非运动员为被试 (23-27 岁), 随机分成实验组和对照组, 实验组参加 12 周的羽毛球运动训练”。将英文摘要中“A group of young adults without any professional or amateur sports training were recruited and randomly divided into the experimental group (including 21 non-athletes) and the control group (including 17 non-athletes).”改成了“A group of young adults (23 – 27 years) without any professional or amateur sports training were recruited and randomly divided into the experimental group (including 21 non-athletes) and the control group (including 17 non-athletes).”详见摘要部分、英文摘要部分的标黄字体。具体描述如下:

1) 摘要部分: “以处于成年早期的成人非运动员为被试 (23-27 岁), 随机分成实验组和对照组, 实验组参加 12 周的羽毛球运动训练”。

2) 英文摘要部分: “A group of young adults (23 – 27 years) without any professional or amateur sports training were recruited and randomly divided into the experimental group (including 21 non-athletes) and the control group (including 17 non-athletes).”

意见 4: 摘要中“采集训练前后结构像和弥散张量成像数据”, 建议改为“采集干预实验前后所有被试的结构像和弥散张量成像数据。”。

回应: 非常感谢审稿专家的宝贵意见! 本次修改稿中, 已将“摘要”部分的“采集训练前后结构像和弥散张量成像数据”, 改为了“采集干预实验前后所有被试的结构像和弥散张量成像数据”。此外, 还将“英文摘要”对应的部分进行了修改, 由“T1 images and DTI data from all participants were collected before and after this training”改成了“T1 images and DTI data from all participants were collected before and after this intervention experiment.”。详见“摘要”、“英文摘要”第二段的标黄字体。具体修改如下:

1) 摘要部分: “采集干预实验前后所有被试的结构像和弥散张量成像数据”。

2) 英文摘要部分: “T1 images and DTI data from all participants were collected before and after this intervention experiment.”

意见 5: 前言中建议不要突出羽毛球运动员的视知觉能力, 因为该研究并未进行相关分析, 全文不能以视知觉能力作为故事的核心去讲述。

回应: 非常感谢审稿专家的宝贵意见! 确实如此, 我们没有测试被试的视知觉能力, 所以不应该以视知觉能力作为故事的核心去讲述。我们重新调整了前言的思路, 详见“1 引言”部分的标黄字体。此外, 根据调整后的思路, 也删除了“英文摘要”中有关视运动知觉的部分表述, 并重新进行了修改, 如, 将“Behavioral researches have demonstrated that elite ball players perform better in visual motion perception tasks than non-players. Brain imaging studies also found that the athletes engaged in ball games showed different brain structure and function in brain regions associated with visual motion perception processing based on expert-novice paradigm.”改成了“Brain imaging studies have found that the athletes engaged in racquet sports showed different brain structure and function based on expert-novice paradigm.”。将“These results may imply that badminton training may improve the visual motion perception ability and increase the efficiency of information transmission between brain cortices and spinal neurons.”改成了““These results may imply that in early adulthood, the gray matter and white matter of the brain have a degree of plasticity.””。详见“英文摘要”第一段、最后一段的标黄字体。具体修改如下:

1) 引言部分:

“脑可塑性是指在环境或经验作用下, 脑结构或功能发生变化。脑可塑性已广泛应用在神经康复、延缓老年人脑衰老、促进青少年脑发育等领域, 并成为近年来的研究热点。研究已表明音乐家、专业运动员、电子游戏玩家等, 具有某种专业技能的专家的脑结构或功能不同于非专业人员或新手 (Abreu et al., 2012; Bishop, Wright, Jackson, & Abernethy, 2013; Gaser & Schlaug, 2003; Gong et al., 2016; 2017; Luo et al., 2012; Park, Lee, Kwon, Lee, & Rhyu, 2015; Wang et al., 2013; Zhang et al., 2013)。

对成人进行运动训练引起脑可塑性改变的研究发现, 对成人进行 3 个月的杂耍训练 (Draganski et al., 2004)、射击训练 (Baeck et al., 2012) 或平衡训练 (Rogge, Roder, Zech, & Hotting, 2018) 能够改变成人脑结构或功能。如 Rogge 等人 (2018) 对成人分别进行 12 周平衡训练和放松训练发现, 与放松训练组比较, 平衡训练组训练后平衡能力提高, 且与视觉、

前庭和自我运动知觉相关的脑区（如视觉联合皮层、颞上皮层、后扣带皮层、额上沟和中央前回等脑区）的皮层厚度增加，壳核体积下降。这表明生活中的运动经历会改变成人脑可塑性，但是，拍类运动训练是否改变成人脑结构可塑性仍然不清楚。

然而，对拍类运动的横向研究结果提示，拍类运动也可能重塑成人脑结构或功能。如静息态功能研究发现，羽毛球运动员的小脑低频振幅（amplitude of low-frequency fluctuation, ALFF）大于新手，左上顶叶 ALFF 小于新手，左上顶叶和额叶 FC 大于新手（Di et al., 2012）。电生理研究发现在观看羽毛球比赛视频时，羽毛球运动员枕叶的 C1 成分（被认为反映了初级视觉皮层电位活动）波幅显著大于非运动员（Jin et al., 2010）。当观看径向运动刺激时，羽毛球运动员诱发的颞中回的 N2 潜伏期小于非运动员（作者认为他们所选的电极代表了颞中回）（Hulsdunker, Struder, & Mierau, 2017）。任务态功能研究发现在视觉预期任务中，羽毛球运动员不仅正确率高于非运动员，且颞中回激活也高于非运动员（Wright, Bishop, Jackson, & Abernethy, 2011）。

在结构方面，Di 等人（2012）发现羽毛球运动员的小脑灰质密度大于新手。而吴殷，张剑，曾雨雯，沈城（2015）发现羽毛球运动员主要在右侧中央前回、右侧眶额回、左侧额上回、左侧顶下小叶和左侧楔前叶的灰质体积大于非运动员。沈国华等人（2014）比较了篮球运动员和非运动员的脑白质差异，发现篮球运动员枕中回的各向异性分数（fractional anisotropy, FA）显著大于非运动员。

但是，上述研究均为横向研究，但这些脑区功能或结构的差异是训练经历引起还是天生不同所导致的，尚未可知。因此，已有横向研究结果虽为纵向干预研究的可行性提供了一定的依据，但拍类运动训练是否能改变成人脑结构的可塑性仍然不清楚。

最新基于 120 万被试的大数据研究发现，拍类运动是综合价值最高的体育活动方式，对于促进心理健康、减少各种致命疾病的患病风险非常有效（Chekroud et al., 2018）。而羽毛球运动是最受国人欢迎的健身运动之一，羽毛球运动人口达到 2 亿以上，仅次于跑步人口数（艾瑞咨询, 2015; 刘凌云, 2018）；其次，相对于其它拍类运动，羽毛球运动对场地、个体的技术或身体素质要求较低，可行性较强。因此以羽毛球运动为模型探讨生活中的运动经历对成人脑可塑性的影响具有较好的普遍性、社会意义和生态效应。

在此，本研究旨在以羽毛球运动为例考察短时拍类运动训练是否可以改变成年早期的大脑结构。在干预研究中，干预时长的设置非常关键，干预时间过短可能观察不到干预的效果；而干预时间过长可能导致数据脱落率增加也不利于得到可靠的实验结果，另外还可能使干预方案的可行性下降。本研究将干预时长设置为 12 周，一是先前研究发现 12 周的训练能引发训练相关脑区的结构变化（如 Draganski et al., 2004; Rogge et al., 2018），二是 12 周的时长可以最大限度地避免因开学和复习考试而可能产生的被试参与度降低及数据脱落等现象，也增加了干预方案的可行性。研究以无运动健身习惯的大学生为被试，随机分成实验组和对照组，实验组进行 12 周的羽毛球运动训练，对照组在此期间不进行任何规律性的体育运动，保持原有生活习惯，采集干预实验前后所有被试的结构像和弥散张量成像（diffusion tensor imaging, DTI）数据。使用形态学测量（voxel-based morphometry, VBM）和基于追踪的空间统计（tract-based spatial statistics, TBSS）方法分别考察羽毛球运动经历引起的脑灰质体积和白质纤维 FA 的变化。根据上述研究，运动员的灰质体积或白质 FA 均大于非运动员，我们假设：实验组羽毛球训练后，脑灰质体积和白质 FA 会增加。由于羽毛球运动伴随着对复杂动态视觉信息的知觉训练（Hulsdunker et al., 2017），因此，羽毛球运动很可能使和视运动知觉有关的脑区发生结构变化。枕叶和颞中回是视运动知觉加工的关键脑区，而且羽毛球运动员的这两个脑区的功能显著不同于非运动员（Jin et al., 2010; Hulsdunker et al., 2017; Wright et al., 2011）。此外，研究表明运动诱导的脑功能可塑性的变化伴随着脑结构的变化（Wei & Luo, 2010; Wei, Luo, & Li, 2009; Wei, Zhang, Jiang, & Luo, 2011）。据此，我们假设：实验组

羽毛球训练后，结构发生变化的脑区可能位于枕叶和颞中回。”

2) 英文摘要部分：

“Brain imaging studies have found that the athletes engaged in racquet sports showed different brain structure and function based on expert-novice paradigm.”

“These results may imply that in early adulthood, the gray matter and white matter of the brain have a degree of plasticity.”

意见 6：正文 2.2 实验程序，作为一个干预实验，干预部分的具体描述不应该在正文中一带而过。

回应：非常感谢审稿专家的宝贵意见！根据审稿意见，我们对“2 方法”部分进行了三处修改。

1) 如审稿专家所言，本实验为一个干预实验，确实不应该将干预部分简单描述，因此，在本次修改稿中，我们在“2 方法”部分增加了“2.3 羽毛球训练”的内容，对羽毛球训练的干预时间、干预内容等细节进行了具体描述，详见“2.3 羽毛球训练”标黄字体。表述如下：

“2.3 羽毛球训练

羽毛球训练在某大学体育馆的羽毛球训练馆举行，在本研究中，羽毛球训练的干预时间为每周三次（周一、周三、周五），每次一小时，连续 12 周。每次的羽毛球训练包括三个部分，具体安排如下：第一部分，老师讲解并演示。羽毛球老师讲解并演示某个或某些正确的羽毛球运动动作（如，发球、杀球）或技能（如，根据对手肢体动作预期球路轨迹，根据对手所在位置，将球反击到左半场或右半场，前半场或后半场）。这一部分大约持续 10 分钟。第二部分，练习。两人一组，练习第一部分讲解的动作或技能，在此期间，老师观察每个被试的动作和姿势，如有不正确的，就前去指导。这一部分大约持续 30 分钟。第三部分，自由打球。两人一组打羽毛球。这一部分大约持续 20 分钟。在最后一周的运动中，老师组织小组赛，两人一组，进行单打比赛”。

2) 将“2.2 实验流程”改为了“2.2 实验设计”，并增加了对实验设计、自变量的描述。详见“2.2 实验设计”标黄字体。具体描述如下：

“2.2 实验设计

采用 2×2 的实验组、对照组前后测设计。其中组别（实验组/对照组）是被试间变量，测试时间（前测/后测）是被试内变量”。

3) 由于增加了“2.3 羽毛球训练”部分，所以将后面的“脑结构扫描”、“VBM 分析”、“TBSS 分析”、“ROI 分析”的序号依次改为“2.4 脑结构扫描”、“2.5VBM 分析”、“2.6TBSS 分析”、“2.7ROI 分析”。详见“2 方法”部分的二级标题中标黄的序号。

意见 7：文章主旨强调视运动知觉有关的脑结构变化，但被试视力水平的基线差异会不会影响到脑结构，如果影响，干预的效果就会受到污染。在研究方法部分，应该进行视力情况的文字说明。

回应：非常感谢审稿专家的宝贵意见！我们确实没有考虑被试视力水平的基线差异对脑结构的影响，只确保了被试“视力正常或矫正正常且不是色盲或色弱”，详见“2 方法”部分的“2.1 被试”部分第二段第二行内容。因此，将这一点写入到了本研究的局限性。但是，根据以往研究，视力水平差异应该不会污染运动干预效果。首先，我们搜索了大量文献，没有找到有关非盲人的视力水平差异会改变脑结构的文献。其次，有关运动训练引起脑结构可塑性的大量研究（Bezzola, Merillat, Gaser, & Jancke, 2011; Draganski et al., 2004; Hamzei, Glauche, Schwarzwald, & May, 2012; Jonasson et al., 2017; Lakhani et al., 2016; Reid et al., 2017; Rogge et al., 2018; Taubert et al., 2010; Tavor, Botvinik-Nezer, Bernstein-Eliav, Tsarfaty, & Assaf, 2019），或者没有提及对被试的视力水平要求，或者仅确保了被试的视力或矫正视力正常。

如，和羽毛球运动训练最相似的一些运动训练中，Rogge等人（2018）考察了12周的平衡训练（平衡控制需要整合视觉、本体感觉和运动相关的多感觉线索）对脑皮层厚度的影响，发现平衡训练后，颞上皮层、视觉联合皮层、后扣带皮层、额上沟、中央前回的皮层厚度增加了，该研究没有对被试的视力水平进行任何描述。Bezzola等人（2011）对被试进行平均149.82天的高尔夫运动训练，发现训练后，顶枕联合区灰质体积增加，这篇文章也没有对被试在训练前的视力水平进行任何描述。Draganski等人（2004）对被试进行三个月的三球杂耍训练，结果发现颞中回灰质体积增加，没有对被试的视力水平进行任何描述。所以，本研究只保证了被试的视力或矫正视力正常，没有考虑被试的基线视力水平可能会对脑结构变化产生影响。详见“4讨论”部分的最后一段，标黄字体。具体描述如下：

“最后，虽然本实验将被试随机分成了两组，但是不能完全控制视力水平的基线差异。虽然还没有研究发现，非盲人的视力水平与脑可塑性存在相关；以往研究也没有考虑视力水平在运动引发脑结构可塑性中的作用（Bezzola, Merillat, Gaser, & Jancke, 2011; Draganski et al., 2004; Hamzei, Glauche, Schwarzwald, & May, 2012; Jonasson et al., 2017; Lakhani et al., 2016; Reid et al., 2017; Rogge et al., 2018; Taubert et al., 2010; Tavor, Botvinik-Nezer, Bernstein-Eliav, Tsarfaty, & Assaf, 2019）。但是，我们不能完全排除基线视力水平在运动训练引发脑结构变化中的作用，因此，未来的干预实验应该控制被试的基线视力。”

意见 8：与 DTI 扫描对应，序列梯度回波序列也应标明英文全称和简写扫描序列。

回应：非常感谢审稿专家的宝贵意见！本次修改稿中，我们标明了梯度回波序列的英文全称和简写。详见“2.4 脑结构扫描”部分的标黄字体。具体描述如下：

“T1 加权结构像由梯度回波序列（gradient recalled echo sequence, GRE）获得”。

意见 9：图 2 和 4 欠规范，如果想表明前后变化，应该用一个连续变量来表达，而不是类别变量，请修改。

回应：非常感谢审稿专家的宝贵意见！为了便于观看和表述训练引起的变化，我们将图 2、图 4 修改成了折线图。如下图所示：

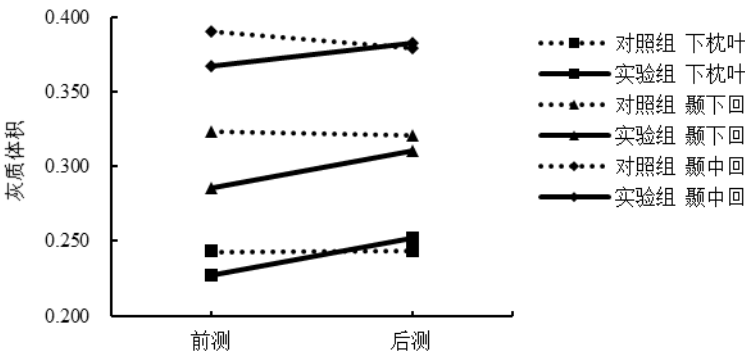


图2 灰质体积变化图

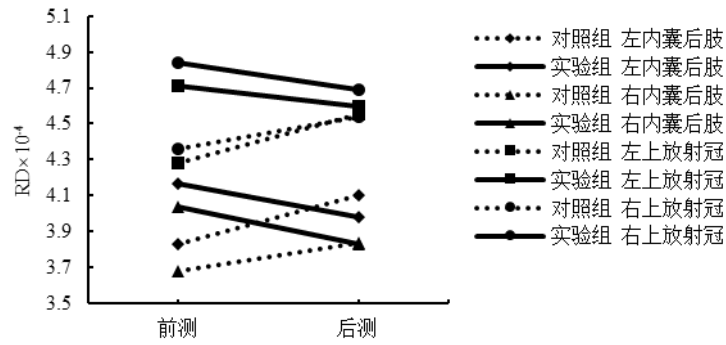


图4 4个ROIs脑区的RD变化图

此外，为了排除前测的影响，我们增加了协方差分析结果（见最后一页的补充材料），将前测值作为协变量，对后测进行统计检验，该结果和重复测量结果一致，具体描述如下：

“附件 1：协方差分析结果

将前测作为协变量，对后测进行统计检验，该结果和重复测量结果一致，具体描述如下：

（1）灰质体积的协方差分析结果：

分别将左下枕叶、左颞下回、左颞中回的前测体积作为协变量，对实验组、对照组的这些脑区的后测体积进行协方差分析，结果显示，左下枕叶：两组后测差异显著（ $F(1, 36) = 45.59, p = 0.000, \eta^2 = 0.56$ ），实验组（ 0.260 ± 0.003 ）显著高于对照组（ 0.234 ± 0.003 ）。左颞下回：两组后测差异显著（ $F(1, 36) = 46.18, p < 0.001, \eta^2 = 0.56$ ），实验组（ 0.327 ± 0.003 ）显著高于对照组（ 0.301 ± 0.003 ）。左颞中回：两组后测差异显著（ $F(1, 36) = 49.91, p < 0.001, \eta^2 = 0.58$ ），实验组（ 0.393 ± 0.003 ）显著高于对照组（ 0.266 ± 0.003 ）。

该结果说明，在控制了前测差异后，实验组羽毛球训练后，左下枕叶、左颞下回、左颞中回灰质体积显著高于对照组。该结果和重复测量方差分析结果一致，说明羽毛球训练干预有效。

（2）白质 FA 的协方差分析结果：

分别将双侧内囊后肢、双侧上放射冠的前测 FA 作为协变量，对实验组、对照组的这些脑区的后测 FA 进行协方差分析，结果显示，左内囊后肢：两组后测差异显著（ $F(1, 36) = 21.07, p < 0.001, \eta^2 = 0.37$ ），实验组（ 0.665 ± 0.004 ）显著高于对照组（ 0.634 ± 0.005 ）。右内囊后肢：两组后测差异显著（ $F(1, 36) = 22.53, p < 0.001, \eta^2 = 0.39$ ），实验组（ 0.685 ± 0.003 ）显著高于对照组（ 0.662 ± 0.003 ）。左上放射冠：两组后测差异显著（ $F(1, 36) = 17.62, p < 0.001, \eta^2 = 0.33$ ），实验组（ 0.639 ± 0.004 ）显著高于对照组（ 0.615 ± 0.004 ）。右上放射冠：两组后测差异显著（ $F(1, 36) = 30.10, p < 0.001, \eta^2 = 0.46$ ），实验组（ 0.593 ± 0.003 ）显著高于对照组（ 0.570 ± 0.003 ）。

（3）白质 RD 的协方差分析结果：

分别将双侧内囊后肢、双侧上放射冠的前测 RD 作为协变量，对实验组、对照组的这些脑区的后测 RD 进行协方差分析，结果显示，左内囊后肢：两组后测差异显著（ $F(1, 36) = 17.72, p < 0.001, \eta^2 = 0.33$ ），实验组（ $3.87 \times 10^{-4} \pm 6 \times 10^{-6}$ ）显著低于对照组（ $4.23 \times 10^{-4} \pm 6 \times 10^{-6}$ ）。右内囊后肢：两组后测差异显著（ $F(1, 36) = 13.62, p = 0.001, \eta^2 = 0.27$ ），实验组（ $3.73 \times 10^{-4} \pm 4 \times 10^{-6}$ ）显著低于对照组（ $3.96 \times 10^{-4} \pm 4 \times 10^{-6}$ ）。左上放射冠：两组后测差异显著（ $F(1, 36) = 5.93, p = 0.02, \eta^2 = 0.14$ ），实验组（ $4.47 \times 10^{-4} \pm 6 \times 10^{-6}$ ）显著低于对照组（ $4.71 \times 10^{-4} \pm 7 \times 10^{-6}$ ）。右上放射

冠：两组后测差异显著 ($F(1, 36) = 12.64, p = 0.001, \eta^2 = 0.26$)，实验组 ($4.50 \times 10^{-4} \pm 4 \times 10^{-6}$) 显著低于对照组 ($4.77 \times 10^{-4} \pm 5 \times 10^{-6}$)。

(4) 白质 AD 的协方差分析结果：

分别将双侧内囊后肢、双侧上放射冠的前测 AD 作为协变量，对实验组、对照组的这些脑区的后测 AD 进行协方差分析，结果显示，在这些脑区中，两组被试的后测均无显著差异（左内囊后肢： $p = 0.106$ ；右内囊后肢： $p = 0.140$ ；左上放射冠： $p = 0.228$ ；右上放射冠： $p = 0.165$ ）。

该结果表明，在控制了前测差异后，实验组羽毛球训练后双侧内囊后肢、双侧上放射冠的 FA 显著高于对照组。进一步的结果显示，在控制了前测差异后，实验组羽毛球训练后双侧内囊后肢、双侧上放射冠的 RD 显著低于对照组，AD 和对照组无显著差异，表明，实验组双侧内囊后肢、双侧上放射冠 FA 增加是由 RD 下降引起的。该结果和重复测量方差分析结果一致，说明羽毛球训练干预有效。”

意见 10：正文中的一个主要问题在于前言和讨论部分相互重叠，作者对于哪些内容应该放前言，哪些应该放入讨论，含混不清，多次出现重复引用的情况。建议重新调整文章结构，进行大修。

回应：非常感谢审稿专家的宝贵意见！首先，我们对前言的结构进行了调整和大修，对前言和讨论相互重叠的部分，在前言进行了重新表述，详见“1 引言”部分的标黄字体。其次，我们检查了讨论部分的语言表达，对表述不恰当或重复引用的语句进行了修改。如，将“4 讨论”部分的第三段中“羽毛球运动是一项有高度时间制约的对抗性运动，视觉分析对手的生物运动、理解对手动作意图对正确判断球的落地点（进行视觉预期）非常重要。”修改为“羽毛球运动是一项有高度时间制约的对抗性运动，视觉预期球的落地点对赢得比赛非常关键，而视觉分析对手的生物运动、理解对手动作意图对正确判断球的落地点（进行视觉预期）非常重要”。将“4 讨论”部分的第三段中“专业羽毛球运动员的球路预期准确率显著高于非运动员或是新手”修改为“专业羽毛球运动员的视觉预期能力优于非运动员或新手”，详见“4 讨论”部分第三段的标黄字体。详见具体描述如下：

1) 引言部分

“脑可塑性是指在环境或经验作用下，脑结构或功能发生变化。脑可塑性已广泛应用在神经康复、延缓老年人脑衰老、促进青少年脑发育等领域，并成为近年来的研究热点。研究已表明音乐家、专业运动员、电子游戏玩家等，具有某种专业技能的专家的脑结构或功能不同于非专业人员或新手 (Abreu et al., 2012; Bishop, Wright, Jackson, & Abernethy, 2013; Gaser & Schlaug, 2003; Gong et al., 2016; 2017; Luo et al., 2012; Park, Lee, Kwon, Lee, & Rhyu, 2015; Wang et al., 2013; Zhang et al., 2013)。

对成人进行运动训练引起脑可塑性改变的研究发现，对成人进行 3 个月的杂耍训练 (Draganski et al., 2004)、射击训练 (Baeck et al., 2012) 或平衡训练 (Rogge, Roder, Zech, & Hotting, 2018) 能够改变成人脑结构或功能。如 Rogge 等人 (2018) 对成人分别进行 12 周平衡训练和放松训练发现，与放松训练组比较，平衡训练组训练后平衡能力提高，且与视觉、前庭和自我运动知觉相关的脑区（如视觉联合皮层、颞上皮层、后扣带皮层、额上沟和中央前回等脑区）的皮层厚度增加，壳核体积下降。这表明生活中的运动经历会改变成人脑可塑性，但是，拍类运动训练是否改变成人脑结构可塑性仍然不清楚。

然而，对拍类运动的横向研究结果提示，拍类运动也可能重塑成人脑结构或功能。如静息态功能研究发现，羽毛球运动员的小脑低频振幅 (amplitude of low-frequency fluctuation, ALFF) 大于新手，左上顶叶 ALFF 小于新手，左上顶叶和额叶 FC 大于新手 (Di et al., 2012)。电生理研究发现在观看羽毛球比赛视频时，羽毛球运动员枕叶的 C1 成分（被认为反映了初

级视觉皮层电位活动)波幅显著大于非运动员 (Jin et al., 2010)。当观看径向运动刺激时,羽毛球运动员诱发的颞中回的 N2 潜伏期小于非运动员 (作者认为他们所选的电极代表了颞中回) (Hulsdunker et al., 2017)。任务态功能研究发现在视觉预期任务中,羽毛球运动员不仅正确率高于非运动员,且颞中回激活也高于非运动员 (Wright, Bishop, Jackson, & Abernethy, 2011)。

在结构方面,Di 等人 (2012) 发现羽毛球运动员的小脑灰质密度大于新手。而吴殷,张剑,曾雨雯,沈城 (2015) 发现羽毛球运动员主要在右侧中央前回、右侧眶额回、左侧额上回、左侧顶下小叶和左侧楔前叶的灰质体积大于非运动员。沈国华等人 (2014) 比较了篮球运动员和非运动员的脑白质差异,发现篮球运动员枕中回的各向异性分数 (fractional anisotropy, FA) 显著大于非运动员。

但是,上述研究均为横向研究,但这些脑区功能或结构的差异是训练经历引起还是天生不同所导致的,尚未可知。因此,已有横向研究结果虽为纵向干预研究的可行性提供了一定的依据,但拍类运动训练是否能改变成人脑结构的可塑性仍然不清楚。

最新基于 120 万被试的大数据研究发现,拍类运动是综合价值最高的体育活动方式,对于促进心理健康、减少各种致命疾病的患病风险非常有效 (Chekroud et al., 2018)。而羽毛球运动是最受国人欢迎的健身运动之一,羽毛球运动人口达到 2 亿以上,仅次于跑步人口数 (艾瑞咨询, 2015; 刘凌云, 2018); 其次,相对于其它拍类运动,羽毛球运动对场地、个体的技术或身体素质要求较低,可行性较强。因此以羽毛球运动为模型探讨生活中的运动经历对成人脑可塑性具有较好的普遍性、社会意义和生态效应。

在此,本研究旨在以羽毛球运动为例考察短时短时拍类运动训练是否可以改变成年早期的大脑结构。在干预研究中,干预时长的设置非常关键,干预时间过短可能观察不到干预的效果;而干预时间过长可能导致数据脱落率增加也不利于得到可靠的实验结果,另外还可能使干预方案的可行性下降。本研究将干预时长设置为 12 周,一是先前研究发现 12 周的训练能引发训练相关脑区的结构变化 (如 Draganski et al., 2004; Rogge et al., 2018),二是 12 周的时长可以最大限度地避免因开学和复习考试而可能产生的被试参与度降低及数据脱落等现象,也增加了干预方案的可行性。研究以无运动健身习惯的大学生为被试,随机分成实验组和对照组,实验组进行 12 周的羽毛球运动训练,对照组在此期间不进行任何规律性的体育运动,保持原有生活习惯。训练前后,对所有被试进行结构像扫描和弥散张量成像 (diffusion tensor imaging, DTI) 扫描。使用形态学测量 (voxel-based morphometry, VBM) 和基于追踪的空间统计 (tract-based spatial statistics, TBSS) 方法分别考察羽毛球运动经历引起的脑灰质体积和白质纤维 FA 的变化。根据上述研究,运动员的灰质体积或白质 FA 均大于非运动员,我们假设:羽毛球训练后,脑灰质体积和白质 FA 会增加。由于羽毛球运动伴随着对复杂动态视觉信息的知觉训练 (Hulsdunker et al., 2017),因此,羽毛球运动很可能使和视运动知觉有关的脑区发生结构变化。枕叶和颞中回是视运动知觉加工的关键脑区,而且羽毛球运动员的这两个脑区的功能显著不同于非运动员 (Jin et al., 2010; Hulsdunker et al., 2017; Wright et al., 2011)。此外,研究表明运动诱导的脑功能可塑性的变化伴随着脑结构的变化 (Wei & Luo, 2010; Wei, Luo, & Li, 2009; Wei, Zhang, Jiang, & Luo, 2011)。据此,我们假设:羽毛球训练后,结构发生变化的脑区可能位于枕叶和颞中回。”

2) 讨论部分:

“羽毛球运动是一项有高度时间制约的对抗性运动,视觉预期球的落地点对赢得比赛非常关键,而视觉分析对手的生物运动、理解对手动作意图对正确判断球的落地点 (进行视觉预期) 非常重要”

“专业羽毛球运动员的视觉预期能力优于非运动员或新手”

意见 11: 结论部分仍然在论述老化这一问题，但研究对象处于成年早期，老化不能作为其中意义的描述。该问题在前一稿中已提及，并未作出修改。

回应: 非常感谢审稿专家的宝贵意见！非常抱歉，由于我们用词和表述不当，导致审稿人理解错误，我们是想从毕生发展角度进行论述，对照组的颞中回灰质体积下降、白质 FA 下降属于与年龄相关的正常发展现象。这一稿中，我们新增加了一些支持短期内无干预组被试灰质下降的实证研究（Thomas et al., 2009），还修改了不恰当的措辞。（详见“4 讨论”部分第 8 段的标黄字体）。

首先，毕生发展的文献表明，大脑的灰质体积、白质 FA 在生命早期（儿童期、青春期）就开始下降（Ge et al., 2002; Kalpouzos et al., 2009; Pfefferbaum et al., 1994; Sowell et al., 2003）。其次，有干预研究（Lovden et al., 2012; Thomas et al., 2009）发现对照组在短时期内脑容量降低（达到统计学的显著差异），如，Lovden 等人（2012）对成年早期被试（20-30 岁）进行了为期 4 个月（每天 50 分钟，共训练 42 天）的导航训练。结果发现，对照组海马体积显著下降了，该作者认为这是正常的下降现象。Thomas 等人（2009）对平均 32.5 岁的健康被试，进行了三次结构像扫描，第一次与第二次扫描间隔 2 周，在此期间，没有对被试进行任何干预；第二次与第三次扫描间隔 2 周，在此期间，对被试进行一项每次 25 分钟，共 6 次的视运动训练（操纵杆任务）。结果发现，在无干预阶段，双侧海马旁回、右脑岛、右楔前叶的灰质密度显著下降了。因此，我们可以合理地推测本实验中对对照组灰质体积、白质 FA 下降是成年早期毕生发展的正常现象。此外，为了表达的准确性和不引起歧义，我们删除了“5 结论”部分最后一句“羽毛球运动不仅可以在一定程度上抵消成人脑老年化的负性表现，还能使其发生逆年龄性的积极变化”。具体描述如下：

1) 讨论部分：

“出乎我们的预期，实验还观察到了对照组脑结构的变化，实验后对照组颞中回灰质体积的下降、白质 FA 下降。这一现象可能符合大脑毕生发展的规律。大量研究发现，个体大脑的灰质体积在儿童期甚至更早的发育期就开始了下降（Ge et al., 2002; Kalpouzos et al., 2009; Pfefferbaum et al., 1994; Sowell et al., 2003）。如 Pfefferbaum 等人（1994）以 161 名年龄在 3 个月到 70 岁的健康人为被试，测量脑容量，发现灰质体积在 4 岁时达到峰值，之后开始下降。Tamnes（2013）对处于发育期的 8-19 岁被试的灰质体积进行了 2.6 年的追踪，也得到了类似的结果。他们发现许多皮层的年下降率超过 1%，在 20 岁时，下降最多的脑区在额叶、外侧颞叶。一项考察白质纤维在生命全程中变化的研究表明，大部分白质较早达到成熟，如枕叶、额叶的白质 FA 在青少年后期达到最大值，50% 的皮质脊髓束体素在 20 岁左右达到峰值，然后呈下降趋势（Westlye et al., 2010）。更值得注意的是，有干预研究表明，在短时间跨度内，对照组的脑容量下降达到统计学显著水平，如，Lovden 等人（2012）以年轻人（20-30 岁）为实验对象，实验组参加 4 个月（42 天，每天 50 分钟）的导航训练（在虚拟的动物园中寻找动物），对应的对照组执行和实验组相同运动量的走路任务。结果发现实验组的海马（与导航有关）灰质体积增加了，而对照组的海马体积下降了，该作者认为这是正常的与年龄相关的下降现象。Thomas 等人（2009）对平均 32.5 岁的健康被试，进行了三次结构像扫描，第一次与第二次扫描间隔 2 周，在此期间，没有对被试进行任何干预；第二次与第三次扫描间隔 2 周，在此期间，对被试进行一项每次 25 分钟，共 6 次的视运动训练（操纵杆任务）。结果发现，在无干预阶段，双侧海马旁回、右脑岛、右楔前叶的灰质密度显著下降了。因此，我们推测，本实验观察到的对照组颞中回灰质体积下降属于大脑毕生发展的正常现象。”

2) 结论部分：

“短期羽毛球训练可增加成人与视运动知觉有关的脑功能区的灰质容量，增加成人内囊后肢和上放射冠这两个纤维束的髓鞘厚度。总之，成年早期的脑灰质和白质均具有一定的可塑性。”

意见 12: 文章全文还需要有经验的作者进行文字梳理, 方能考虑发表。

回应: 非常感谢审稿专家的宝贵意见和温馨提醒! 我们已让有经验的同行作者进行了检查和校正。

审稿人 2 意见: 作者很好地回答了前面的问题, 修改稿的质量有很大提高。

第三轮

审稿人 1 意见: 作者较好地回答了我之前两次审稿提出的疑问, 同意发表。

编委意见: 该研究采用磁共振技术研究了羽毛球训练对大脑结构的可塑性。虽然国际上已经有类似的研究(运动训练对脑结构和功能的塑造), 但是该研究也为脑可塑性领域提供了一个有益的证据。两位评审人对修改后的稿件表示满意, 建议接受该论文并发表。

主编意见: 我觉得该研究存在一个天生的缺陷。即, 对照组的设置问题。既然作者事先注意到羽毛球运动为拍类运动训练; 当观看径向运动刺激时, 羽毛球运动员诱发的颞中回的 N2 潜伏期小于非运动员(作者认为他们所选的电极代表了颞中回)(Hulsdunker, Struder, & Mierau, 2017)。任务态功能研究发现在视觉预期任务中, 羽毛球运动员不仅正确率高于非运动员, 且颞中回激活也高于非运动员(Wright, Bishop, Jackson, & Abernethy, 2011), 而且该研究旨在以羽毛球运动为例考察短时拍类运动训练是否可以改变成年早期的大脑结构。那么, 对照组就应该选取“非拍类运动”(如室内跑步等等), 而不是在此期间不进行任何规律性的体育运动, 保持原有生活习惯。我猜测, 如果采用类似的对照组, 或许就不会有“出乎我们的预期, 实验还观察到了对照组脑结构的变化, 实验后对照组颞中回灰质体积的下降、白质 FA 下降”。我理解这已经是无法修改的既成事实, 但我还是希望作者对此做出讨论, 然后再审。

回应: 非常感谢主编提出的宝贵建议! 本研究在对照组的设置上, 存在一定缺陷, 如果采用“非拍类运动”如室内跑步作为对照组, 是否会有不同的结果。针对主编提出的问题, 我们做出了两方面的修改: 首先, 将对照组的设置写入本研究的不足。本研究的目的是考察真实生活中的运动训练是否可以改变成年人的脑结构(因为羽毛球运动的综合价值高, 所以以羽毛球运动为例)。对照组设置为“不进行任何体育运动训练”, 这种设置能够说明本研究要考察的问题。但是, 如主编所述, 这种设置确实存在缺陷, 该结果不能说明是身体活动(或任意一种运动)引起的, 还是羽毛球训练特异性引起的, 因此, 我们将这一点写在了研究不足之中(见“4 讨论”最后一段紫色字体)。其次, 在讨论部分增加了对“如果采用‘非拍类运动’(如室内跑步)作为对照组, 是否不会观察到‘颞中回灰质体积下降’的讨论”(见“4 讨论”倒数第二段的紫色字体)。非常感谢主编的宝贵建议, 这带给我们很大的启示和新的角度, 在后续的研究中, 我们会尝试增加两个对照组, 即“非拍类运动训练组”和“不进行任何运动训练组”, 来考察不同运动训练引起的相同的、不同的脑结构变化。

1) 不足部分: “第五, 本研究的对照组为“不进行任何体育运动训练”, 虽然使用这种设置得出的结果能够说明羽毛球作为一种运动训练, 能够改变成人脑结构; 但是, 不能直接有力地证明这种脑结构变化是羽毛球运动训练的特异性结果。因此, 未来研究可以以非拍类运动训练, 如室内跑步为活动对照组, 进一步研究该问题。”

2) 讨论部分:“但是, 如果以“非拍类运动”如室内跑步为对照组, 是否可能观察不到颞中回下降的现象? 或者说, 对照组颞中回的变化是因为没有进行运动而非没有进行羽毛球运动引起的? 虽然本研究因为没有设置活动对照组而无法直接排除这种可能性, 但间接的文献综合提示这种可能性存在的概率很低。首先, 已有研究发现颞中回和视运动知觉有关 (Peuskens, Vanrie, Verfaillie, & Orban, 2005); 而Sumiyoshi等人 (2014) 对小鼠进行7天的跑笼运动训练发现, 运动皮层和视觉皮层灰质体积增加, 该作者认为运动区的变化和运动量有关, 视觉脑区的变化和环境的丰富度有关。这提示, 即使本研究设置了“室内跑步”这样的活动对照组, 跑步组和羽毛球运动组也只能是在运动量上匹配, 但无法经历如羽毛球组那样丰富的视觉动态环境, 二组可能在运动皮层的变化上差异不显著, 但难以推断二组在视知觉相关脑区的变化上差异不显著。其次, 我们另一个横断研究比较了羽毛球运动员、短跑运动员和普通成人的运动知觉, 结果发现羽毛球运动员的知觉敏感性显著高于短跑运动员和普通成人, 但后二者间的差异不显著; 具体到径向运动, 羽毛球运动员的知觉敏感性显著高于短跑运动员和普通成人, 普通成人的显著高于短跑运动员 (Liang, Yin, Liu, Zhu, Lin, & Jin, 审稿中)。这证明单纯的跑步可能不易引起个体运动知觉的行为变化, 提示单纯的跑步可能也不易引发个体与视运动知觉相关脑区的结构或功能变化。无论如何, 更直接的有效证据需要未来更严谨的实验设计结合单变量、多变量模式分析方法来考察该问题。”

参考文献:

- Sumiyoshi, A., Taki, Y., Nonaka, H., Takeuchi, H., & Kawashima, R. (2014). Regional gray matter volume increases following 7 days of voluntary wheel running exercise: A longitudinal VBM study in rats. *Neuroimage*, 98, 82-90.
- Liang, Z., Yin, D., Liu, T., Zhu, Z., Lin, H., & Jin, H. (2019). High perceptual sensitivity to global motion in badminton players. *International Journal of Sport Psychology*, under review.

第四轮

主编意见: 谢谢作者认真考虑, 我满意修改回应。