

## Regulation of the Beta Rhythm Energy Induced by Different Action Cues

Zhang Lingli Hao Junyi Liao Yu\*

School of Education, Suzhou University, Suzhou

**Abstract:** The Mu rhythm and the Beta rhythm of the motor area are considered to be associated with exercise-related EEG components. Although Mu rhythm has many similarities with the Beta rhythm to a certain extent, there are many evidences that Mu and Beta rhythms are two distinct components, Beta is independent of Mu rhythm and is likely to have different psychological functions. For the inhibition of the curative-induced Beta rhythm, the inhibition of the Beta rhythm may be an indicator of exercise preparation. In this experiment, the variational task is used to determine the effect of the cue on the subsequent suppression of Beta energy by using a single action and combination action to determine how the Beta rhythm plays in the process of motion preparation a role. It was found that there was no significant difference between the single action and the Beta energy caused by the combined action cue when the clue appeared, but the Beta energy produced by the single action and the combined action cue was significantly different for some time before the action was about to be performed. This suggests that there is a slight difference in the effect of the representation of the cue on the subsequent suppression of the Beta energy, and that, as the time progresses progressively, the maximum amount of Beta energy suppression

caused by a single cue is increasing. The energy of the Beta rhythm is gradually rising; and the combined action in the course of the whole process of clues disappear after the stage are at a low level, no smaller and smaller trend. Thus we further confirm that the Beta rhythm explains the process of motion preparation and participates in the action representation in the action preparation process. It also explains that the human brain can optimize the state of motion for existing tasks.

**Key words:** Beta rhythm; Movement preparation; Action characterization

Received: 2020-04-26 ; Accepted: 2020-05-07 ; Published: 2020-05-13

# 不同动作线索对 Beta 节律能量的调节

张伶俐 郝俊懿 廖 渝\*

苏州大学教育学院, 苏州

邮箱: 1390670829@qq.com

**摘 要:** 运动区 Mu 节律与 Beta 节律是被同时看作与运动相关的脑电成分。虽然在一定程度上, Mu 节律与 Beta 节律有很多相似的地方, 但是, 诸多证据表明, Mu 和 Beta 节律是两个具有不同意义的成分, Beta 独立于 Mu 节律, 很可能具有不一样的心理功能。而对于线索诱发的 Beta 节律的抑制而言, Beta 节律的抑制可能是运动准备的指标。本实验采用延迟任务的变式, 通过以单个动作和组合动作为线索, 以探究提示线索对随后产生的 Beta 能量的抑制的影响作用, 从

而判定 Beta 节律在运动准备的过程中扮演着怎样的一个角色。结果发现在线索出现后, 单个动作与组合动作线索所引发的 Beta 能量并没有显著差异, 而在即将执行动作之前的一段时间里单个动作与组合动作线索所引发的 Beta 能量有了显著差异。这表明对提示线索的表征对随后产生的 Beta 能量的抑制的影响作用是有一定的差异的, 并且, 随着时间进程的逐步推进, 单个线索引发的 Beta 能量的抑制的最大值越来越小, Beta 节律能量逐步上升; 而组合动作在整个实验过程中的线索消失后的阶段均处于一个较低的水平, 没有越来越小的趋势。由此我们进一步证实 Beta 节律解释了运动准备的过程, 并参与了动作准备过程中的动作表征。也解释了人脑可以对现有任务作最优化的运动准备状态。

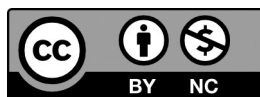
**关键词:** Beta 节律; 运动准备; 动作表征

收稿日期: 2020-04-26; 录用日期: 2020-05-07; 发表日期: 2020-05-13

Copyright © 2020 by author(s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



## 1 引言

EEG (electroencephalograph) 是在头皮上用电极记录到的大量神经元的同步发所引起的宏观水平的振荡, 不同意识状态下比如睡眠、觉醒状态、安静状态脑电的频率有差异。基于此, 研究者认为不同频率可能反映了不同的神经加工过程。一个稳定被观察到的现象是, 人们运动时会引起大脑运动皮层中电信号特定频段节律的变化 [1]。当人们处于运动状态时, 运动区的 Mu 节律 (8-14 Hz) 和 Beta 节律 (15-30 Hz) 的能量会显著地受到抑制; 而当人们处于非运动状态时,

Mu 节律和 Beta 节律能量则较高 [2]。

## 1.1 Beta 节律是独立于 Mu 节律的成分

在很多前人的研究中,运动区 Mu 节律与 Beta 节律是被同时看作与运动相关的脑电成分。由于人类运动时运动区 Mu 与 Beta 节律能量降低,停止运动时能量则较高,因此运动区 Mu 节律与 Beta 节律被共同称为中央区域的空闲节律(idling rhythm) [3]。有研究用中央 Mu 节律统称运动区的 Mu 节律与 Beta 节律,将 Mu 节律看作中央 Mu 节律的 10 Hz 成分,而将 Beta 节律看作中央 Mu 节律的倍频成分 [4]。

虽然在一定程度上, Mu 节律与 Beta 节律有很多相似的地方,但是,诸多证据表明, Mu 和 Beta 节律是两个具有不同意义的成分。对于 Beta 节律的相关研究,特别是从儿童发展的角度来看,运动区 Beta 节律在生命初期的信号并不明显 [5]。所以很多对于婴儿和儿童的相关研究并没有报告他们在观察他人执行动作时的运动区 Beta 节律变化。而与此不同的是,有关 Mu 节律的相关研究发现,研究对象是婴儿和儿童时,9 个月大的婴儿在执行动作和观察他人执行动作时,相比较于非运动的状态,运动区 Mu 节律会出现显著的能量降低 [6]。基于以上两个研究的比较,表明运动区 Mu 节律所反映的心理过程和脑机制更可能是先天的 [7]。而运动后 Beta 节律能量受运动调制则是 4 岁左右才出现,并且 PMBR 会随着年龄增加而增强,这表明运动区 Beta 节律很可能反映了后天习得的心理过程和脑机制 [8]。所以运动区 Beta 节律与 Mu 节律的发展趋势不一致。

另一方面,虽然在被试的动作结束后,运动区 Mu 节律和 Beta 节律的能量都会发生回复上升,但运动区 Beta 节律能量开始回复上升的时间更早。另外,运动区 Mu 节律的能量仅仅回复上升到执行动作前的基线水平,而 Beta 节律的能量不仅仅回到基线水平,它还会继续上升一直到高于基线水平,有研究称之为 Beta 节律的回复增强(Post-movement Beta“rebound”, PMBR),并保持一段时间。所以, Beta 节律并不是 Mu 节律的一部分,而是具有不同的独特功能意义的另一个独立的成分。因此,在本实验中,我们仅探究 Beta 节律的特殊心理意义。

## 1.2 Beta 节律能量在运动过程中不同时间节点的变化

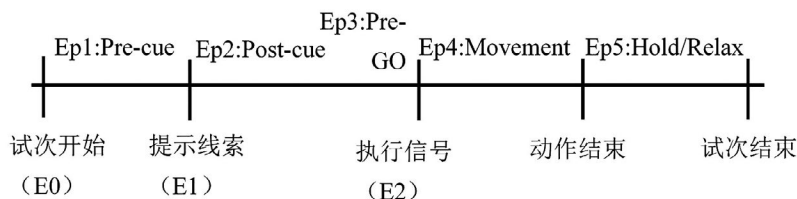


图1 延迟任务 [9]

Figure 1 Delay task [9]

研究者们通常会采用延迟任务 (Delay Task, 图1), 即一个有动作参与的反应任务, 在运动信号来临之前会有一个提示线索以告知被试运动信号即将到来, 采用这个任务可以引发被试的运动区 Beta 节律变化 [9]。而 Beta 节律在提示线索之前 (Ep1)、提示线索之后 (Ep2)、运动信号之前 (Ep3)、运动信号之后 (Ep4) 以及执行完动作之后 (Ep5) 都会有不同的变化。

许多研究表明, 在提示线索 (E1) 出现之前 (Ep1), Beta 能量处于上升的状态 [9] [10]。在 Saleh 等人 (2010) 的研究中, 被试需要执行动作之前会有五个提示性线索呈现, 其运动区的 Beta 节律从试次开始到那个任务相关的线索出现之前都处于上升的状态, 且就在与任务相关的线索之前达到能量的顶峰。在提示线索 (E1) 之后 (Ep2), Beta 节律的能量骤降 [10], 前提是在与任务有关的线索出现之后。与线索出现之前的 Beta 能量相比, 提示线索之后产生的 Beta 能量的下降有更加精确的源定位区域, 并且可能有早期运动准备的作用 [9], 这在下一部分中会详细描述。在提示线索出现后期, 包括运动区的整个额叶的 Beta 能量均处于上升的趋势, 高峰期处于线索出现后 800 ms [11] [12]。然而, 这个显著的、稳定的 Beta 能量调节的现象的研究较少, 解释其功能性意义较为困难 [9], 未来还需再做深入的针对性研究。

在大多数情况下, 运动执行信号 (E2) 出现之前 (Ep3), 即运动开始前大约 1-2 秒, Beta 能量逐渐降低 [11] [13] [14]。这种逐渐减少在 GO 或运动开始时达到最大值 [13]。在动作执行阶段 (Ep4), 对于成人的研究发现,

运动区 Beta 节律能量显著降低 [15]。而运动信号出现后在动作执行时的 Beta 能量的抑制与在运动信号前的 Beta 能量的下降之间的差异目前仍然不太明确, Kilavik 等人认为这两个部分也许会有相同的基本加工过程 [9]。在动作执行完之后 (Ep5), 运动区的 Beta 节律会有一个明显的回复增强。很多研究都观测到了 PMBR 现象, 且这个现象十分稳定, 一般认为 PMBR 出现于运动停止后的 300 到 400 ms 并且持续超过 500 ms [2] [13]。有关 PMBR 的功能性意义还在逐步的探索中, 本文暂不叙述。

### 1.3 提示线索对运动区 Beta 节律的调制作用

已有研究表明, 被试在准备做动作而还没真正执行动作的运动准备状态时, 运动区 Beta 节律的能量就已经开始降低 [17]。通过延迟任务, 许多研究发现对侧感觉运动区的 Beta 节律的能量在提示线索之后的 300 到 500 ms 之后会有显著的下降 [9] [10] [12] [13] [18] [19] [20]。

目前研究较为一致地显示, 线索的有效性是影响 Beta 节律能量变化的一个因素, 线索的高效性与 Beta 节律能量的高抑制相关联。van Wijk 等人的研究中使用两种提示线索 [20]: 50% 有效和 100% 有效, 其中 50% 有效的线索不包含预测动作信息, 而 100% 有效的提示线索则包含预测动作信息。结果发现包含预测动作信息的线索引发了更多的运动区 Beta 节律能量下降。Tzagarakis 等人使用 MEG 考察了线索的确定性对于运动区 Beta 节律的影响, 结果发现线索中包含的动作方向信息的确定性越高时, 运动区 Beta 节律的能量也会有更多的下降, 反之亦然 [19]。相似的, Williams 等人发现, 丘脑底核的 Beta 节律在无预见性信息的线索提示后会比有预见性信息的提示产生的 Beta 能量有较少的下降幅度 [21]。Alegre 等人使用 EEG 技术也考察了线索的确定性对于运动区 Beta 节律的影响 [11] [12]。结果发现当运动信号变得很难预测时, 运动信号前的运动区 Beta 节律抑制会很少甚至消失。基于上述研究结果, 研究者指出, 运动区 Beta 的能量下降可能是动作准备的指标 [16]。或者说, 运动区 Beta 节律的抑制可能反映了与运动准备相关的感觉运动区的激活程度的增加 [22]。

## 1.4 对现状的分析及问题提出

由上述文献回顾我们看到,在运动准备状态时,心理过程的变化已经可以通过 Beta 的节律的变化来反映。但是,人体的运动准备是一个包含了许多不同时期心理过程的复杂的心理操作,比如刺激识别、反应选择、动作计划等[9]。尽管目前的研究主要集中于考虑线索确定性对 Beta 能领的影响,但是更广泛的考察其他可能因素的影响也是有必要的。例如,有研究表明 Beta 节律的变化可能与动作选择过程有关。Doyle 的研究中发现,在需要执行动作的手具体已知的情况下,对侧脑区产生更大的 Beta 节律的抑制,这表明 Beta 节律的抑制有关于动作准备过程中的反应选择过程[13]。但是,由于 Tzagarakis 的研究中 Beta 节律的抑制也会产生在方向不确定的情况下,而这个时候是人脑是无法做出有效的动作计划的,所以,基于这一点, Beta 节律的抑制是否反映了动作计划还存有怀疑。

另一方面,Doyle 等人(2005)在其研究中并没有发现提示线索的确定性影响了感觉运动区的 Beta 节律,即其确定与不确定的提示线索所产生的线索的 Beta 能量的抑制是相似的(不显著)。所以,尽管在感觉运动区提示线索诱发的 Beta 能量的抑制存在一致的结论,其线索的诱发效果仍有争论。而且,除了线索信息的有效性,是否提示线索的其他属性的差异也会引起 Beta 能量的差异变化?或者这个提示线索与随后的运动动作相关联,是否会诱发不同的 Beta 能量的降低?都是尚待回答的问题。

## 1.5 本实验目的及预期结果

从以上的文献综述中,我们知道运动区 Beta 节律可能与动作准备过程的一个或者几个过程有关。因此为了进一步探究 Beta 节律能量变化的影响因素以及其有关的动作准备的过程,本实验中采用延迟任务的变式,所使用到的线索是与确定的、包含随后的运动动作方向信息的提示线索,包括单个动作和组合动作。通过以单个动作和组合动作为线索,让被试在看到下一个执行动作的提示后执行所看到的线索。实验以探究提示线索对随后产生的 Beta 能量的抑制的影响作用,从而判定 Beta 节律在运动准备的过程中扮演着怎样的一个角色。



基于实验目的及前人研究,我们假设,线索后的 Beta 能量的变化反映了动作准备过程中的表征的不同,即在线索出现后,单个动作与组合动作线索所引发的 Beta 能量显著有差异。并且,随着时间进程的逐步推进,其中,单个线索的运动准备过程越来越少,即单个线索引发的 Beta 能量的抑制的最大值越来越小, Beta 节律逐步上升;而组合动作没有变化,即组合动作在整个实验过程中的线索消失后的阶段均处于一个较低的水平,没有越来越小的趋势。

## 2 方法

### 2.1 被试群体

被试为 12 名成人(4 男, 19—26 岁,  $M=21.9 \pm 1.7$ )。被试均是通过广告招募,以自愿原则为前提召集被试进行实验。所有被试均为苏州大学在校大学生,实验任务结束后获得一定的报酬(约 35 元人民币)。所有被试为右利手、视力正常或矫正视力正常。所有成人被试以及在实验前均会被告知实验的所有内容。

### 2.2 数据收集与实验流程

实验进行时,被试坐在 28 英寸的屏幕(Dell, Inc., USA)之前,实验程序的编写和呈现使用了基于 Python 的“刺激与神经科学应用平台”(Stimulation and Neuroscience Application Platform, SCCN, Christian A. Kothe)。被试佩戴 64 导 actiCap 电极帽记录 EEG (Brain Product, Germany)。我们把 actiCap 的帽子进行了改动,帽子原本的参考电极与接地电极所在的位置为 FCz 和 AFz。为了获得 FCz 和 AFz 这两个电极点的信号,我们将参考电极和接地电极换至头部后中央两侧 5 mm 位置处,将原来的参考电极和接地电极的位置恢复为 FCz 和 AFz。双眼外侧位置的贴有电极以记录水平眼电(HEOG),而左眼上下位置也贴有电极以记录垂直眼电(VEOG),脑电信号的采样率为 500 Hz。在实验开始前,通过打脑电膏将每个电极点处的头皮和电极点之间的阻抗降低至小于 10 k $\Omega$ 。实验通过 Lab Stream Layer (LSL, SCCN, Christian A. Kothe)来同步被试按键时的行为反应与脑电数据。



实验使用延迟任务 (Delay Tasks) 的变式, 被试需要使用游戏手柄和脚踏板完成反应。被试首先将看见 500 ms 的注视点, 之后会呈现 500 ms 的线索, 线索的内容是提示被试之后需要做的动作, 线索使用“左”“右”“下”箭头的排列组合来标注, 左箭头表示之后使用手柄左侧按键反应, 右箭头表示之后使用手柄右侧按键反应, 下箭头表示之后踩脚踏板反应, 被试使用左脚踩脚踏板。线索分为两类, 若线索中只有一个箭头, 则表明被试之后需要反应一次; 若线索中有两个箭头, 则表明被试之后需要反应两次, 先根据线索图片中上方的箭头反应, 再根据线索图片中下方的箭头反应。线索呈现完后会有 0 ~ 500 ms 的空屏, 之后会呈现 500 ms 注视点。然后屏幕中央会出现一个蛋的图片, 被试看见蛋的图片就按照之前线索所提示的动作反应, 并且反应得越快越好。若反应正确, 则会显示蛋碎裂的动画, 若反应错误那么蛋就不会碎裂。在需要反应一次的试次中, 试次到此结束, 试次与试次的间隔为 2500 ~ 3000 ms。在需要反应两次的试次中, 之后会呈现 1000 ~ 1500 ms 的空屏, 再出现第二个蛋, 被试同样需要根据线索中的第二个箭头尽快反应, 之后试次结束。被试每次反应结束后屏幕上方会出现一个细长的矩形长条, 长条的长度代表被试之前反应的反应时间。长条越长代表被试的反应时间越长, 反之亦然。实验流程参见图 2 和图 3。

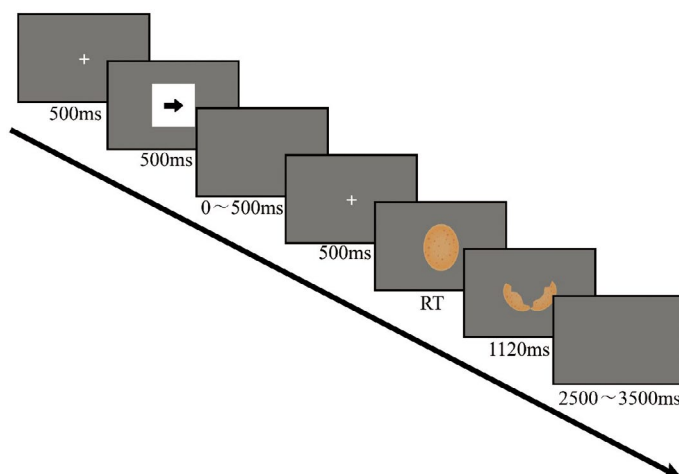


图 2 单个动作条件流程图

Figure 2 Experimental process of single-action conditions

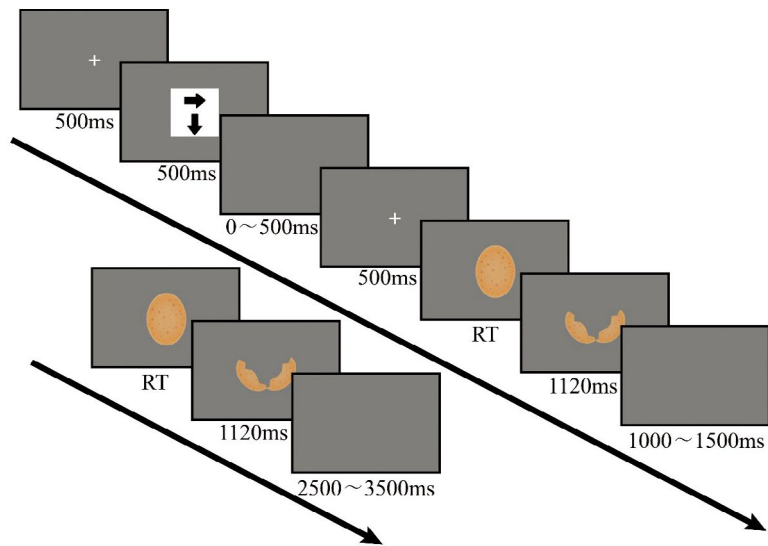


图 3 组合动作条件流程图

Figure 3 Experimental process of connected-action conditions

实验有 6 个练习试次，共 420 个正式试次。每 60 个试次为一个组块，其中有 140 个试次需要被试右手反应一次，此为无后续动作的条件。有 140 个试次需要被试右手左脚先后反应，此为有后续动作的条件。其他为无关试次，具体设置见表 1。每种条件平均分布在每个组块中，即每个组块有 20 个无后续动作条件的试次、20 个有后续动作条件的试次，20 个无关条件的试次。组块内部的试次顺序采用随机排序。

表 1 实验条件设置

Table 1 Experimental condition settings

	单个动作	组合动作		无关试次		
动作要求	右	右下	左右	左下	下左	下右
试次数量	140	140	35	35	35	35

2.3 数据处理和统计

由于被试执行动作前经历了较长时间的动作准备状态，因此本实验划分的时间窗相对较长。实验只分析被试只做右手按键的无后续动作条件和被试右手

按键接着左脚踩脚踏板的有后续动作条件。所有的试次锁时在被试第一次用右手按键反应的时刻,截取  $-750\text{ ms}$  至  $-500\text{ ms}$  的时间窗作为一个分段。由于运动区 Beta 节律会受到运动线索的调制 [11],就是说在实验开始的注视点出现时被试的运动区 Beta 节律能量就已经开始降低,因此基线阶段应取在注视点出现之前的试次与试次间隔的阶段。基线取  $-750\text{ ms}$  至  $-500\text{ ms}$ ,根据被试的反应时,基线阶段落在试次与试次之间的间隔阶段。分段后使用 EEGLAB 中的自动去噪,超过  $800\text{ }\mu\text{V}$  的试次将被去除。将去过噪的数据进行短时傅里叶变换,得到每个被试的 ERSP。基于数据结果中 Beta 节律的峰值频率,运动区 Beta 节律取  $19\sim 22\text{ Hz}$ 。

为了考察 Beta 节律随着时间进程的变化情况,将单个动作条件与组合作条件中每种条件的 140 个试次都分成三个阶段。第一阶段为第 1 个试次至第 47 个试次,第二阶段为第 48 个试次至第 93 个试次,第三阶段为第 94 个试次至第 140 个试次。为了防止去噪对于试次顺序的改变,处理数据时会先将数据分段再使用 EEGLAB 中的自动去噪,超过  $800\text{ mV}$  的试次将被去除。

在进行数据的预处理过程中,我们做了如下两个不同的锁时的尝试。首先,锁时在线索出现的位置时,此时发现由于流程中随机时间的存在,所有被试的第二个注视点出现的时间点处在一个区间里。在这样的情况下,我们发现一个动作和两个动作整体差异最大的时间点在注视点出现的时间区间里面。但是因为随机时间较长,可能存在较大误差的可能,我们做了第二种锁时的分析,即锁时在第二个注视点。此时,受随机插入时间的影响,前面线索出现的时间就会不确定,成为一个出现时间的区间。此时,最大差异时间点发生在线索出现的区间里。所以为了精确每个刺激出现的精准时间点从而得到最准确的差异点,我们使用了类似于延迟补偿 (Timewrap) 的算法,锁时在线索出现的位置,将每个人的每个试次的随机时间平均,然后将多于平均时间的数据点去除,再把随机时间之后的数据点接在平均时间之后。通过延迟补偿的方式,使得原本因随机时间的插入变得不一样长的各试次的时间长度变得一致,关键事件的节点也能对齐,从而我们可以看到最精准的差异最大的时间区域。

从统计上,为了检验线索个数和任务阶段对 Beta 节律能量的调节,首先进

行每个任务阶段时不同线索个数之间的两两比较，目的是探究线索对 Beta 能量的影响作用具体发生在哪个任务阶段；然后比较每个线索条件下不同任务阶段中 Beta 能量，从而判定不同的线索其 Beta 能量的抑制程度出现差异的具体时间窗。我们对线索出现（图 2，时间点为 0）到注视点消失（图 2，时间点为 1.25 s）的这一段数据（即 0 ~ 1.25 s）的各个数据点进行了各条件间的两两配对比较 t 检验。之所以选择时间窗截止时间在注视点消失，是由于注视点消失后就会信号出现使被试开始执行动作，所以选择被试还未发生动作的从线索出现到注视点消失这一时间窗。

### 3 结果

#### 3.1 不同线索对 Beta 能量的调节作用

如前文所述，本研究的首要目的是检验不同的动作线索是否会引起 beta 节律能量的不同变化，以及这种可能的差异具体出现的时段。因此，我们对两种线索条件下，从线索出现到线索消失，直至随后的注视点消失的整个时段（0 ~ 1.25 s），即包含了线索已出现，但动作尚未执行的这个时间窗口的每个采样点进行了配对 t 检验，结果表明（图 4A），两种线索条件下，Beta 节律的能量在 0.75 ~ 1.25 s 这个时间窗内所有的采样点上都有显著的差异，组合动作线索条件下 Beta 能量低于单个动作线索条件下 Beta 的能量； $p < 0.05$ 。为了对这个时间阶段总体的情况做一个描述，我们对两个条件下 0.75 ~ 1.25 s 这个时间窗内 beta 的能量各自做了平均，对应的 t 检验的结果为； $t(11) = 2.98$ ， $p < 0.05$ 。上述结果表明，总体来说，线索所提示的动作信息会引起 beta 能量的变化，但是这个变化并没有发生在线索出现的时间段（0 ~ 0.5 s），也没有出现在线索消失的后，注视点出现之前的时间窗（0.5 ~ 0.75 s），而是出现在注视点出现之后（0.75 ~ 1.25 s）。这可能表明，被试的动作准备是在注视点出现后才开始的。值得注意的是，两个条件间 Beta 节律能量变化的差异是从线索消失（0.5 s）时开始逐渐扩大的，但是到注视点出现（0.75 s）才达到了显著水平。

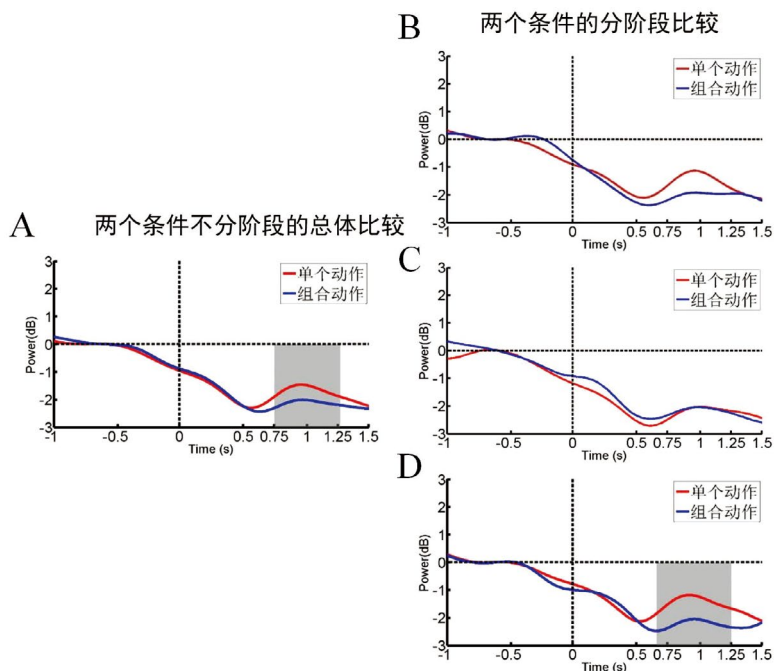
表 2 不同线索条件下 beta 能量的总体差异 ( dB )

Table 2 The overall difference in beta energy under different cue ( dB )

	0.75 ~ 1.25 s		
	Mean/SD	t ( df )	p
单个动作	-1.64/1.29	2.98 ( 11 )	0.013
组合动作	-2.10/1.36		

上述分析从总体的时间进程上明确了条件间差异所出现的时间窗。但是这个总平均的并不能告诉我们这个差异是在实验进程中逐渐出现的，还是在实验开始就人脑就会自动对两种不同复杂程度的动作做出不同的准备状态。为此我们更进一步地分别在任务的前、中、后三个阶段里对不同线索条件下 Beta 能量之间的差异进行了两两配对比较 t 检验。具体操作方式仍然遵循上述在 0 ~ 1.25 s 时窗内，对每个采样点进行两两比较的方式进行。结果发现，两个线索条件下，在实验前期和实验中期，Beta 的能量均未发现显著的差异（图 4B、图 4C）。其差异主要集中在实验后期，具体时间是 0.75 ~ 1.25 s，即注视点出现前至注视点消失之间产生了显著的差异（图 4D），与总体趋势相同，同样是组合动作条件下 Beta 能量低于单个动作条件，表现出更强的 Beta 能量抑制。这一结果表明，线索所引起的 Beta 能量的差异是在实验进程中逐步显示出来的差异。这说明复杂动作和简单动作之间在动作准备时所存在的准备状态的差异并不是一个单纯的自上而下的认知过程，而是通过动作的反复练习，由动作执行系统和动作控制系统共同协调的一个结果。

但是至此，我们还不清楚，在任务的后阶段，两个线索条件间 Beta 能量的差异究竟是由于单个动作条件下 Beta 能量下降的减小造成，还是由于组合动作条件下 Beta 能量下降的增加造成的？为此，我们不同线索条件下，Beta 能量的在不同任务阶段的变化做了进一步分析。



注：A&D 的灰色区域表明这一段时间内，单个动作与组合动作在每个时间点上均有显著差异。

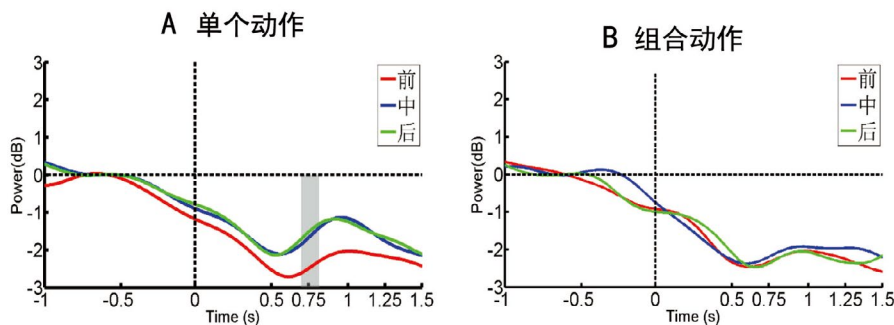
图 4 总体及每个实验阶段两个条件所引发的 Beta 能量的比较

Figure 4 Comparison of the Beta energy caused by the two conditions in the overall and each experimental stage

### 3.2 不同线索条件下 Beta 能量在不同任务阶段的变化

同上述方法，我们对线索出现到注视点消失的这一段时间内（即 0 ~ 1.25 s），分别在两个线索条件下，对每个时间采样点上前、中、后三个阶段的 Beta 能量进行了两两配对 t 检验，结果发现，仅在单个动作条件下（图 5A），只有在 693 ~ 817 ms，即注视点出现（0.75 s）左右出现了实验前期与实验后期的显著差异； $t(11) = -2.31$ ,  $p = 0.041$ 。实验后期的 Beta 能量的抑制显著小于前期，而前期与中期、中期与后期均未有显著的差异。这表明单个动作时，随着实验进程 Beta 能量在注视点出现前后的能量有显著的上升，即此时实验前期 Beta 能量

的抑制程度最大,并随着时间进程的推进,Beta 能量的抑制逐渐减小。而组合动作条件下(图 5B)的 Beta 能量在实验任务阶段之间均未发生显著的变化,即在整个实验阶段组合条件下的 Beta 能量均处于较低的水平。



注:灰色区域表明这段时间内(693 ~ 817 ms),实验前期与后期在每个时间点上均有显著差异。

图 5 不同条件下 Beta 能量在各个阶段的变化

Figure 5 Beta energy changes in various stages under different conditions

上述结果表明,在相对简单的单个动作线索条件下,实验进程对线索引起的 Beta 能量的变化有影响,随这实验的进程,练习的增多,Beta 能量的下降变得越来越大。相对而言,在较为复杂的组合动作线索条件下,整个实验进程中,Beta 节律的能量没有显著的变化。这一说明单个动作条件下,随实验进程,被试需要更少的努力来做动作的准备。

总的来说,上述分析表明,预示动作复杂程度提示线索会引起 Beta 能量的下降,其中组合动作的提示线索会引起 Beta 能量更多的下降。但是这个差异表现在即将开始动作的阶段,也就是动作准备的阶段。并且,这个差异也是随着任务的进程逐渐形成的,主要原因是由于单个动作条件下,Beta 能量下降程度的减小所造成。

## 4 讨论

本实验通过两种线索对被试产生了不同的 Beta 能量的抑制程度,进一步证实了前人研究中所说的运动区 Beta 节律能量的抑制很可能是运动准备的指标[16]。从图 4 和图 5 中可以看出,线索所引发的 Beta 能量的下降明显在线索



消失后立即达到其最大值,然后回升。这表明,在线索出现(0点)后,人脑开始对线索进行一定的加工,在加工过程中 Beta 能量保持持续的下降。然后线索消失后(0.5 s 时),人脑要立即在脑内进行对线索的表征与回忆,从而记住线索所要表达的内容在表征与记忆的过程中,但线索消失并不意味着开始执行动作,而是出现了注视点(0.75 s),被试需要抑制住自己的执行动作的冲动,所以 Beta 能量回升。

实验结果中,注视点出现前后的单个动作在实验前期明显比后期抑制程度更大(图 5A),即在整个实验过程中单个动作引发的 Beta 能量的抑制有越来越小的趋势,而组合动作引发的 Beta 能量的抑制一直处于较低水平。这表明,假设运动区 Beta 节律能量的抑制很可能是运动准备的指标成立,那么单个动作的运动准备便处于逐渐减小的状态,而组合动作由于动作的复杂性,将 Beta 能量一直抑制于一个较大的水平下。而两个条件诱发出不同的 Beta 能量的抑制,表明这可能是在表征所看到的线索刺激,从而会引发不同的能量的变化。

由图 4D 和图 5A 可以知道,实验后期的 Beta 能量与之前有了显著的变化,并且其显著的变化均是发生在注视点出现至注视点消失这一时间段,显著时间窗发生在注视点出现左右这一结果表明,由于注视点的出现意味着动作执行的信号即将到来,所以由于线索的不同,Beta 能量抑制的表现也不同,所以在不同的线索条件下产生了有显著的差异的 Beta 节律的抑制,即单个动作的动作准备较少,回升程度较大,而组合动作由于其动作的复杂性,仍需要较大程度的动作准备,所以抑制程度较大。而 Beta 能量之所以在这个时间段有了较为显著的差异,这是对现有任务的最优化的运动准备状态[20],从而能在需要保持稳定姿势的时候较好地抑制住自己的执行动作的冲动,同时能够在可以执行动作的时候又快又准地完成动作。

这样的最优化的运动准备状态并非是自上而下的、从实验开始之时就有的,由于线索的差异在实验后期才达到其显著水平,这表明人脑活动会对现有的任务进行随时的调整,从实验前期开始探索,到后期最终找到最佳的反应方式,即更加有效地利用大脑认知资源,从而更加经济地达到较为完美的结果。

另一方面,在线索消失后,这里的运动准备过程是否有短时记忆存在的影

响,这一点值得考虑。因为在大部分前人相关研究中,线索之后出现的执行信号可以让被试立即做出反应,而本实验中线索消失后出现的是另一个注视点,在这个注视点出现之后蛋才出现,被试需要在蛋出现后才能执行动作(图2、3)。所以相比于前人研究,本实验中抑制动作的时间较长,短时记忆也许在其中发挥了作用。在线索消失后,可能是由于短时记忆的存在,使得两个条件下的 Beta 能量的抑制发生了显著的差异。在将来的研究中,我们可以比较看到线索后立即做动作和延迟做动作这两个条件下在感觉运动区分别产生的 Beta 能量的变化情况,从而判断短时记忆的影响效果。但是,不管是短时记忆还是其他的加工过程,很清楚的一点是,两个不同线索条件的加工过程在执行动作前注视点出现的左右出现了显著的差异。

本实验结果证明了当提示线索与随后动作相关联时,有线索引发的 Beta 能量的抑制会有显著的差异。这个差异不仅仅只是因为线索本身属性而引发的差异,因为在线索出现后有的差异,在注视点出现左右进一步的增大,为执行动作做最佳的准备状态。表明线索对于进而产生的 Beta 能量的抑制有一定的调制作用。但由于本实验中未涉及之后的执行动作阶段,所以没有将动作执行的反应时纳入研究范围,也就没有继续探究这样的差异对之后的动作执行是否会有影响。未来的研究中我们还要将线索诱发的效果与后面的动作执行阶段,包括对随后的 Beta 节律的回复增强(Post-movement Beta“rebound”, PMBR)的影响一起结合起来,相信会有更大的收获。另一方面,关于 Beta 节律的研究,更多人关注的是它在人体发展中的功能。所以未来的研究中我们将寻找合适的儿童甚至婴儿群体来进一步探讨其功能意义。

## 5 结论

本实验中采用延迟任务的变式,通过以单个动作和组合动作为线索,发现在注视点出现后,单个动作与组合动作线索所引发的 Beta 能量显著有差异。这表明提示线索对随后产生的 Beta 能量的抑制的影响作用是有一定的差异的,并且,随着时间进程的逐步推进,线索消失后两个条件线索所产生的 Beta 能量的抑制均达到其最大值,然后回升。其中,随着实验进程的推进,单个线索引发

的 Beta 能量的抑制的最大值越来越小, Beta 节律能量逐步上升;而组合动作在整个实验过程中的线索消失后的阶段均处于一个较低的水平,回升的能量较小。由此我们进一步证实 Beta 节律解释了运动准备的过程,并在该过程中可能扮演着动作表征的角色。

## 参考文献

- [ 1 ] Chatrian G E, Petersen M C, Lazarte J A. The blocking of the rolandic wicket rhythm and some central changes related to movement [ J ] . Eeg Clin Neurophysiol, 1959, 11 ( 3 ) : 497-510.  
[https://doi.org/10.1016/0013-4694\(59\)90048-3](https://doi.org/10.1016/0013-4694(59)90048-3)
- [ 2 ] Pfurtscheller G. Central beta rhythm during sensorimotor activities in man [ J ] . electroencephalogr clin neurophysiol, 1981, 51 ( 3 ) : 253-264.  
[https://doi.org/10.1016/0013-4694\(81\)90139-5](https://doi.org/10.1016/0013-4694(81)90139-5)
- [ 3 ] Pfurtscheller G, Stancák Jr A, Neuper C. Post-movement beta synchronization. A correlate of an idling motor area? [ J ] . Electroencephalography & Clinical Neurophysiology, 1996, 98 ( 4 ) : 281-293.  
[https://doi.org/10.1016/0013-4694\(95\)00258-8](https://doi.org/10.1016/0013-4694(95)00258-8)
- [ 4 ] Hari R. Action-perception connection and the cortical mu rhythm [ J ] . progress in brain research, 2006, 159 ( 1 ) : 253-260.  
[https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(06\)59017-X](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(06)59017-X)
- [ 5 ] Gaetz W, Macdonald M, Cheyne D, et al. Neuromagnetic imaging of movement-related cortical oscillations in children and adults: Age predicts post-movement beta rebound [ J ] . neuroimage, 2010, 51 ( 2 ) : 792-807.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.01.077>
- [ 6 ] Liao Y, Acar Z A, Makeig S, et al. EEG imaging of toddlers during dyadic turn-taking: Mu-rhythm modulation while producing or observing social actions [ J ] . Neuroimage, 2015, 112: 52-60.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.02.055>

- [ 7 ] Marshall P J, Meltzoff A N. Neural mirroring mechanisms and imitation in human infants [ J ] . Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 2014, 369 ( 1644 ) : 20130620.  
<https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0620>
- [ 8 ] 郝俊懿, 廖渝. 运动区 Beta 节律的活动特点及功能意义 [ J ]. 心理科学进展, 2016, 24 ( 9 ) : 1409–1421.
- [ 9 ] Kilavik B E, Zaepffel M, Brovelli A, et al. The ups and downs of Beta oscillations in sensorimotor cortex [ J ] . Exp Neurol, 2012, 245: 15–26.  
<https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2012.09.014>
- [ 10 ] Saleh M, Reimer J, Penn R, et al. Fast and slow oscillations in human primary motor cortex predict oncoming behaviorally relevant cues. [ J ] . Neuron, 2010, 65 ( 4 ) : 461–471. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.02.001>
- [ 11 ] Alegre M, Gurtubay I G, Labarga A, et al. Alpha and beta oscillatory changes during stimulus–induced movement paradigms: effect of stimulus predictability [ J ] . NeuroReport, 2003, 14 ( 3 ) : 381–385.  
<https://doi.org/10.1097/00001756-200303030-00017>
- [ 12 ] Alegre M, Imirizaldu L, Valencia M, et al. Alpha and beta changes in cortical oscillatory activity in a go/no go a randomly–delayed–response choice reaction time paradigm [ J ] . Clinical Neurophysiology, 2006, 117 ( 1 ) : 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2005.08.030>
- [ 13 ] Doyle L M F, Yarrow K, Brown P. Lateralization of event–related beta desynchronization in the EEG during pre–cued reaction time tasks [ J ] . Clinical Neurophysiology, 2005, 116 ( 8 ) : 1879–1888.  
<https://doi.org/10.1016/j.clinph.2005.03.017>
- [ 14 ] Andrej Stancák Jr, Rimpl A, Pfurtscheller G. The effects of external load on movement–related changes of the sensorimotor EEG rhythms [ J ] . Electroencephalography & Clinical Neurophysiology, 1997, 102 ( 6 ) : 495–504. [https://doi.org/10.1016/S0013-4694\(96\)96623-0](https://doi.org/10.1016/S0013-4694(96)96623-0)

- [ 15 ] Pfurtscheller G, Aranibar A. Event-related cortical desynchronization detected by power measurements of scalp EEG [ J ] . *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology*, 1977, 42 ( 6 ) : 817–826.  
[https://doi.org/10.1016/0013-4694\(77\)90235-8](https://doi.org/10.1016/0013-4694(77)90235-8)
- [ 16 ] Cheyne, Owen D. MEG studies of sensorimotor rhythms: A review [ J ] . *Experimental Neurology*, 2013, 245: 27–39.  
<https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2012.08.030>
- [ 17 ] Caetano G, Jousmaki V, Hari R. Actor's and observer's primary motor cortices stabilize similarly after seen or heard motor actions[ J ]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2007, 104 ( 21 ) : 9058–9062. <https://doi.org/10.1073/pnas.0702453104>
- [ 18 ] Pastotter B, Berchtold F, Bauml K H T. Oscillatory correlates of controlled speed-accuracy tradeoff in a response-conflict task [ J ] . *Human Brain Mapping*, 2012, 33 ( 8 ) : 1834–1849. <https://doi.org/10.1002/hbm.21322>
- [ 19 ] Tzagarakis C, Ince N F, Leuthold A C, et al. Beta-band activity during motor planning reflects response uncertainty [ J ] . *J Neurosci*, 2010, 30 ( 34 ) : 11270–11277. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.6026-09.2010>
- [ 20 ] van Wijk B C M, Daffertshofer A, Roach N, et al. A Role of Beta Oscillatory Synchrony in Biasing Response Competition?[ J ]. *Cerebral Cortex*, 2009, 19( 6 ) : 1294–1302. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhn174>
- [ 21 ] Williams D. Behavioural cues are associated with modulations of synchronous oscillations in the human subthalamic nucleus [ J ] . *Brain*, 2003, 126 ( 9 ) : 1975–1985. <https://doi.org/10.1093/brain/awg194>
- [ 22 ] Kilner J, Bott L, Posada A. Modulations in the degree of synchronization during ongoing oscillatory activity in the human brain [ J ] . *European Journal of Neuroscience*, 2005, 21 ( 9 ) : 2547–2554.  
<https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2005.04069.x>