# 科学发明问题解决中大脑自动响应机制再探*

朱海雪[1] 张庆林[2]
（[1]滁州学院教育科学学院，滁州，239000）（[2]西南大学心理学部，重庆，400715）

**摘 要** 从科学发明材料库中选取 40 个题目为实验材料，采用“五对五”实验范式和 fMRI 成像技术手段记录大脑的 BOLD 信号变化，对科学发明问题解决中大脑自动响应机制进行了再探。结果发现：左侧颞中回及其他脑区被激活，将所激活脑区的 BOLD 信号变化与原型启发的关键自变量（原型启发量、创造性倾向）进行相关分析，结果显示只有左侧颞中回相关显著，表明左侧颞中回在大脑自动响应机制中起重要作用。

**关键词** 自动响应 顿悟 科学发明 颞中回

## 1 引言

近年来对顿悟的研究内容越来越丰富，尤其顿悟的产生是一种“突然性”和难以“预测性”的过程，这与灵感的发生类似，灵感不仅是创造性思维的关键要素，而且是难以进行实证研究的思维现象。灵感的捕捉是“神秘”的过程，也是难以直接观测的过程，很难在实验室中直接模拟灵感捕捉（朱海雪等，2012）。但因灵感对人们的创造性思维开发具有重要的作用，既然难以直接观测，又与顿悟的个别特点类似。因此，研究者通常采用顿悟问题研究来推测灵感捕捉的认知神经机制，最初对灵感机制的探索研究始于大脑自动响应机制。“自动响应机制”是一种基于“语义相似性”的大脑自动加工机制的观点（张庆林，田燕，邱江，2012），类似于物理学上的“共振”现象。将共振现象迁移至问题解决中，大脑在解决难题时，呈现的情境问题产生特定的频率，而对问题产生启发的知识表征以更大的振幅做振动，与之前的情境问题频率产生共振，促成问题解决。

“自动响应机制”最早由张庆林等（2012）研究灵感认知机制时发现的。他们认为，“自动响应机制”的启动应满足以下条件：第一，被试在解决科学发明问题时，必须明确认识到“目标”是实现某种“功能”即“目标”与“功能”呼应；第二，被试在原型知识表征阶段能够形成“构造 - 功能”抽象语义表征；第三，满足“特征性功能（原型表征）-需求性功能（问题表征）”具有语义上的（高度）相似性。由此看来，这种自动响应机制并未脱离顿悟问题研究，而是基于顿悟的原型启发理论即顿悟的发生条件是大脑中激活恰当的原型及其所包含的“关键启发信息”（张庆林，邱江，2005）。以设计一种在沼泽地带也能前行的机动车这一实验材料为例，科学家被这一难题困住了，后来看到毛毛虫在松软地面上行走时，几乎整个身体贴着地面，能在任何地面上行走自如，从中受到启发解决了问题。根据自动响应机制与原型启发理论，被试在解决科学发明问题的时候，首先“目标 - 功能”呼应阶段，目标即在沼泽地自如前行，功能即通过某种“构造”实现机动车在沼泽地前行。其次，“构造—功能”形成阶段，对毛毛虫行走时“几乎整个身体贴着地面”形成“构造”语义表征，对毛毛虫“能在任何地面上行走自如”形成“功能”语义表征。最后，原型表征“能在任何地面上行走自如”与问题表征

* 本研究得到安徽省高校自然科学研究一般项目（KJ2016B14）、滁州学院本科教学质量与教学改革工程项目（2017kcgg070）和山东省自然科学基金项目（ZR2016CL10）的资助。

** 通讯作者：张庆林。E-mail: zhangql@swu.edu.cn。

DOI:10.16719/j.cnki.1671-6981.20180607

中“在沼泽地带也能前行”具有语义上的高度相似性。原型中的“构造”语义表征即原型所包含的“关键启发信息”，激活了原型及“构造”语义，问题便得以解决。除此之外，自动响应机制还进一步发展和完善了顿悟的表征转换与进程监控理论（张庆林等，2012）。

以上研究是在认知行为层面上对科学发明问题解决中的自动响应机制进行的探索，也证实了人们在解决科学问题时，大脑中对原型和问题的激活之间存在某种联系，问题才得以解决。“自动响应”的脑机制还未进行研究，这也是本研究需要探索验证的。科学发明问题解决的脑机制前人进行了一系列研究，也得到了一些成效，为本研究探索“自动响应”的脑机制提供了基础和参考。如朱海雪等人（2012）采用“问题 - 原型”和“原型 - 问题”两种学习范式，利用 fMRI 技术比较两种范式下激活的共同脑区，其中，左侧枕中回、左侧内侧额叶、左侧豆状核和 右侧舌回显著激活。李文福、童丹丹、邱江和张庆林（2016）采用“原型 - 问题”学习范式，利用静息态 fMRI 技术，在控制被试性别、年龄和常规性问题解决能力后，结果发现，左侧前扣带回在科学发明问题解决过程中的重要作用。童丹丹等人（2016）采用“先问题 - 后原型”实验范式探讨发明问题解决中的蔡格尼克效应，实验结果发现，蔡格尼克效应主要与双侧的海马及海马旁回的区域性灰质体积存在显著正相关性。

从上述脑机制的研究中可以看出，目前研究科学发明问题解决的实验范式主要有两种：“问题 - 原型”和“原型 - 问题”。有研究表明，人们对于那些未能完成的任务记忆效果更好（Zeigarnik, 1927），对未解决问题的持续操作使被试对问题有更好的注意和记忆。这与实验范式中“问题 - 原型”吻合，后续一系列的实验研究也证实了“问题 - 原型”实验范式下问题解决正确率比“原型 - 问题”要高，是一种生态学效度较好的顿悟研究范式（朱海雪，张庆林，2014）。“问题 - 原型”实验范式中，先呈现情境问题，被试在看到情境问题时，会有意识地将问题表征在大脑中，一旦原型材料呈现，被试就会自动将表征在大脑中的问题与相似表征的原型材料相匹配，那么，大脑中是不是存在这样一个区域来执行这一过程?

因此，本研究在前人研究的基础上，沿用“问题 - 原型”实验范式，既然大脑在解决科学发明问题时，行为实验已经证明看到情境问题与原型材料大脑会自动产生响应（张庆林等，2012），那么，在实际解决科学发明问题时，大脑中是否也存在某个“共振”脑区？“自动响应机制”的脑机制是怎样的？这也是本研究所要解决的问题。基于此，研究假设：在解决科学发明问题时，情境问题与原型材料的激活之间存在“共振”脑区，即“自动响应”的脑机制，而且这些脑区与科学发明问题解决中的关键自变量—原型启发量、创造性倾向高度相关。

## 2 方法

### 2.1 实验被试

选取某大学在校学生 17 人，其中男生 8 人（$M = 21.63$ 岁，$SD = 1.32$ 岁），女生 9 人（$M = 21.89$ 岁，$SD = 1.17$ 岁），所有被试视力正常，均未接触过此类相关测验，且有初步的电脑操作技能，实验开始前向被试详细介绍实验要求及注意事项，待被试了解实验要求之后，自愿按照实验要求签订知情同意书。完成所有的实验后，均会支付被试适量报酬。

### 2.2 实验材料

从《科学发明创造问题材料库》中选取 40 个题目为实验材料，每个题目都包括一个情境问题和一个原型。该材料库中的问题均来自科学发明创造实例，下面是一个样例：

情境问题: 在非常松软的土地上，或在沼泽地带，汽车的轮子很容易陷进去，无法前行。如何设计一种在沼泽地带也能前行的机动车?

原型：毛毛虫在松软地面上行走时，几乎整个身体贴着地面，能在任何地面上行走自如。

### 2.3 实验变量

自变量 1: 原型启发量。材料库在编制的过程中，实验者对每个题目均进行了一系列测试，并建立了一系列评估指标，其中“原型启发量”的评价指标为指只呈现科学问题时的正确率减去学习原型后再解决科学问题的正确率。

自变量 2：创造性倾向。创造性倾向分数采用 Lin 和 Wang（1994）修订的《威廉姆斯创造性倾向测验》测量获得，量表的内部一致性系数为 .549~.670，其折半信度系数为 .845。测验包括 4 个维度（冒险性、想象力、好奇性、挑战性），经验证，该测验具有较高的内部一致性，可用于心理测量。

因变量：被试解决科学发明问题的正确率及激活的脑区。

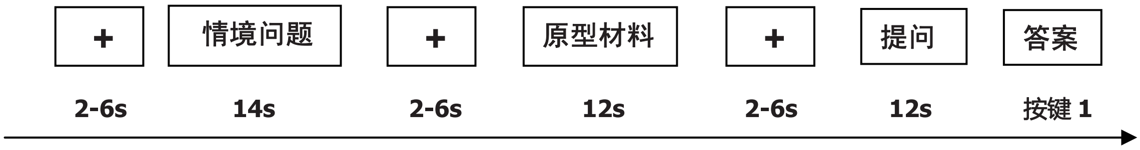


图 1 实验流程图

### 2.4 实验程序

在脑成像实验室进行实验采集数据，被试在进行正式实验之前，由主试告知被试实验应注意事项及实验指导语，并指导被试首先完成《威廉姆斯创造性倾向测验》，完成后由实验人员带其进入脑成像数据采集室，完成实验材料的随机呈现并自动记录被试的按键反应。5 个问题全部测试完后，进入下一个 trial，直至实验全部完成之后，要求被试将这些组织过的解决方案写在事后答题纸上。具体流程如图 1。

### 2.5 实验评分

根据被试在电脑程序测验上的按键反应和事后写在答案纸上的答案进行综合评分，具体评分标准为：首先，由三位评分者（均为经过训练的实验者）根据被试在答案纸上写下的答案，对被试的问题解决方案进行细致评分，根据评分情况分为正确解决和未正确解决两种情况；其次，统计被试在机器上的按键反应,分为：正确解决问题和未解决问题两类；最后，综合两部分结果，划分为 2 种情况 ：正确解决问题，记 1 分；没有正确解决问题，记 0 分。

### 2.6 数据采集及处理

功能像在 3.0 T 全身磁共振成像仪 (Siemens Magnetos Trio Tim) 上获得。采用标准功能像相关参数，在实验中，主要采集了每个 RUN 每个被试在实验所需条件下的大脑激活状态,在本研究条件下，主要采集“情境问题”、“原型”、“提问”处的大脑激活状态。对采集的 fMRI 数据，研究采用 Brain Voyager QX v2.0 软件进行随机效应模式统计分析。

## 3 结果

### 3.1 行为结果

对 17 名被试在科学发明问题解决上的正确率进行统计，统计之前控制了性别差异对实验的影响，采用独立样本 *t* 检验，结果发现性别变量在科学问题解决上不存在显著差异（$p$>.05）。科学问题解决行为结果显示，被试正确解决问题的概率为 81.7%，没有正确解决问题的概率为 18.3%。为了研究科学问题解决中的大脑自动响应机制，研究所叠加 的 fMRI 数据均来自被试正确解决问题的 trial，行为结果表明，被试正确解决问题的概率可达到叠加要求，可以进行 fMRI 数据叠加。

### 3.2 脑成像结果

#### 3.2.1 “conjuction”分析结果

为探索科学发明问题解决中大脑自动响应机制，运用 Brain Voyager QX v2.0 分析软件中“conjuction”指令进行共振脑区激活的分析。数据分析显示，共振激活脑区有：右侧枕中回、左内侧额叶、左侧枕中回、左侧丘脑、左侧楔前叶、左侧中央前回和左侧颞中回（见表 1），说明大脑在看到“情境问题”与“原型材料”进行问题解决时，存在自动响应，但是不是激活的这些脑区都是自动响应产生的，需进一步验证。

#### 3.2.2 自动响应脑机制验证分析结果

为进一步验证科学发明问题解决中大脑自动响应机制，研究将原型启发中的重要自变量之一原型启发量作为研究自变量与激活的共振脑区进行相关性分析，相关分析包括所有被试原型启发量与共振脑区的相关及单个被试原型启发量与共振脑区的相

表 1 “情境问题”与“原型材料”激活的共同脑区

| 大脑区域 | 半球 | BA | Talairach 坐标 | | | *t* | 激活量 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | X | Y | Z | | |
| 枕中回 | RH | 18 | 24 | -85 | -5 | 7.28 | 22774 |
| 内侧额叶 | LH | 6 | -9 | -1 | 58 | 7.09 | 4585 |
| 枕中回 | LH | 18 | -24 | -91 | 7 | 8.54 | 19086 |
| 丘脑 | LH | | -24 | -28 | 1 | 7.07 | 3934 |
| 楔前叶 | LH | 7 | -21 | -64 | 49 | 7.57 | 1002 |
| 中央前回 | LH | 6 | -45 | -4 | 40 | 7.00 | 16689 |
| 颞中回 | LH | 21 | -57 | -31 | -2 | 4.61 | 770 |

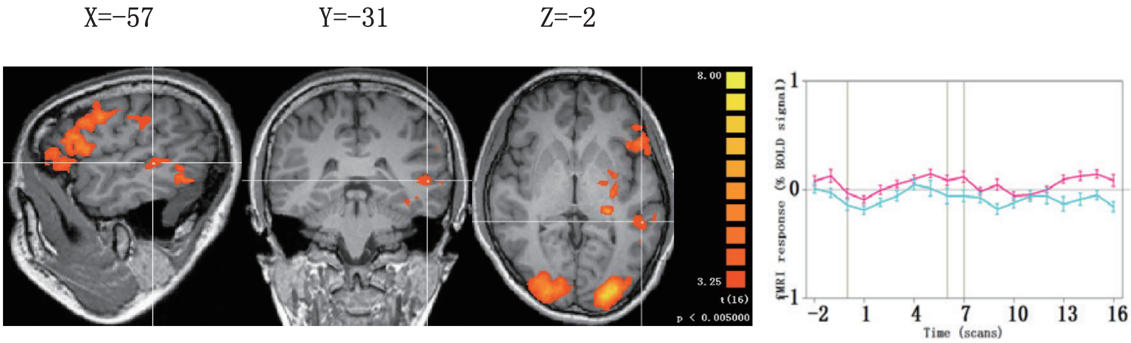


图 2 颞中回的脑区激活图及 BOLD 信号变化

关，结果均显示：只有颞中回与原型启发量呈现显著相关性（所有被试 $r=-.39$，$p<.05$；单试次 $r=-.11$，$p<.01$）。

上述结果表明颞中回在科学发明问题解决中起了重要的作用，已有行为研究已经证明：创造性倾向在原型启发中产生重要的影响，尤其是高创造性倾向群体，他们能迅速找到原型知识材料中的对问题产生启发的关键信息（朱海雪和张庆林，2014），与情境问题产生“共振”，产生自动响应。为进一步从大脑层面检验自动响应机制，本研究将将颞中回的信号强度与被试在创造性倾向测验上的得分进行相关分析，结果显示：颞中回与创造性倾向呈现显著正相关（$r=.53$，$p<.05$）。这一结果同样印证了颞中回在科学发明问题解决大脑自动响应起了重要的作用。

以上结果表明：科学发明问题解决中大脑存在自动响应，并且主要是颞中回在起作用。颞中回的脑区激活图及信号变化如图 2。

## 4 讨论

### 4.1 自动响应脑机制的探索分析

采用磁共振技术对科学发明问题解决中大脑自动响应脑机制进行探索，研究结果显示：右侧枕中回、左内侧额叶、左侧枕中回、左侧丘脑、左侧楔前叶、左侧中央前回和左侧颞中回被激活。其中，左侧枕中回主要参与视觉性注意活动（Kounios et al., 2006），“情境问题”和“原型材料”首先通过视觉呈现的方式进入大脑，大脑参与材料的初步视觉编码；丘脑的作用是对感觉进行粗糙的分析与综合，通过丘脑对境问题与原型材料进行初步视觉表征层面上的匹配；中央前回的作用主要在于将与语义、句法、音韵有关的信息整合在一起（Amunts et al., 2004），在本研究中，中央前回按照语义、句法、音韵等信息进一步匹配情境问题和原型，初步解决问题。从创造性思维的四个阶段来看，左侧枕中回、丘脑及中央前回的作用可能主要在准备期阶段。

内侧额叶主要参与问题解决之前的认知控制（Mayseless, Eran, & Shamay-Tsoory, 2015），在本研究中，内侧额叶根据情境问题与原型材料之间的特征或功能性表征匹配，执行大脑自动激活这一指令；而被试想要解决科学发明问题，就要排除大量无关信息的干扰，提取原型中与情境问题相关的关键启发信息，从而将问题解决。这一结果与以往研究发现的楔前叶在记忆中进行信息提取加工有关的作用是一致的（Qiu et al., 2010）。由此看来，内侧额叶和楔前叶可能主要作用于创造性思维的酝酿期阶段。

创造性思维中顿悟的特点就是它的“突然性”，它需要人们对创造性问题能够进行灵活性、变通性思考，这就需要大脑参与语义转换与加工，这一操作主要由颞中回在起作用，前人研究中也已经证实颞中回的这一重要作用（朱海雪等，2012）。本研究中，在解决科学发明问题时，被试在前两阶段的准备与酝酿期之后，迅速对情境问题与原型材料进行匹配，由于之前储存在大脑中的未解决的情境问题与呈现原型材料两者之间包含了相同的语义，大脑对情境问题与原型材料之间的语义表征进行分析转换，自动激活原型中的关键启发信息，进而能够自动激活“科学难题”，正是原型材料与情境问题之间存在的相似语义表征促成了自动激活（张庆林等，2012），这种相似的语义表征也正是启动“自动响应机制”的重要条件，而这一阶段主要由颞中回在起作用。

### 4.2 自动响应脑机制的验证分析

创造性思维的最后一个阶段是验证期，前面探索大脑的自动响应机制，研究发现激活了多个脑区，

说明自动响应机制在大脑中确实存在，虽然这些脑区在顿悟问题解决上都起到了一定的作用，但是究竟哪一个脑区或哪几个脑区在大脑自动响应中更占优势？这都需要进一步验证。已有研究也表明：启发信息的获得（激活）是顿悟的重要影响因素 (张庆林，1989)，启发信息的获得主要表现形式即为启发量；科学发明创造问题解决测试的得分可以预测个体的创造性倾向（朱海雪等，2012）。因此，可用原型启发量、创造性倾向这两个因素对大脑自动响应机制进行验证。

假设大脑中存在某一区域在科学发明问题解决的自动响应中起作用，那么这个区域与原型启发量和创造性倾向分数都会显著相关。启发量前面已经提到，即呈现原型，激活问题时的正确率减去没有呈现原型时激活问题的正确率，问题呈现时，问题在大脑中进行初步表征，大脑对情境问题中的目标及关键信息进行加工,在原型呈现时,迅速与之匹配,自动激活原型中的关键信息，将问题解决，在这一过程中，原型材料中的启发信息自动呼应情境问题中的信息，产生“共振”现象。同样，科学发明创造问题解决能力与个体的创造性倾向关系密切，尤其是高创造性倾向的群体，他们在问题呈现后，首先对问题进行精细加工,对问题解决方向进行把握，在呈现原型知识材料后，他们可以迅速找到与之匹配的关键启发信息（朱海雪，张庆林，2014），与情境问题自动响应。本研究中相关分析结果发现，只有颞中回与原型启发量、创造性倾向高度相关。这一结果进一步证实了主要是颞中回在大脑自动响应机制中起作用。

当然研究也存在某些不足，比如，未考虑个体创造性的差异，创造性不同的个体对实验结果造成的影响,这也是后期研究需要进一步拓展和延伸的，后期的研究可以以静息态状态下的数据为基线，结合近红外等技术，采用多种分析手段，对灵感的捕捉进行更为深入的研究，以期得到更有价值的系列成果。

## 5 结论

以科学发明创造题目为实验材料,采用“五对五”实验范式，运用 fMRI 技术手段对科学发明问题解决中大脑自动响应机制进行了再探。脑区定位与相关分析的结果一致指向左侧颞中回在大脑自动响应机制中起了重要作用，为进一步揭示顿悟问题解决的灵感机制提供了部分证据，也是在脑机制层面对灵感机制进行的研究。

### 参考文献

李文福 , 童丹丹 , 邱江 , 张庆林 . (2016). 科学发明问题解决的脑机制再探 . *心理学报 , 48(4),* 331–342.

童丹丹 , 杨文静 , 李亚丹 , 郭亚男 , 邱江 , 张庆林 . (2016). 发明问题解决中的蔡格尼克效应 . *科学通报 , 60(36),* 3583–3593.

张庆林 . (1989). 顿悟心理机制的实验分析 . *心理学杂志 , 4,* 23–28.

张庆林 , 邱江 . (2005). 顿悟与源事件中启发信息的激活 . *心理科学 , 28(1),* 6–9.

张庆林 , 田燕 , 邱江 . (2012). 顿悟中原型激活的大脑自动响应机制 : 灵感机制初探 . *西南大学学报 ( 自然科学版 ), 34(9),* 1–10.

朱海雪 , 杨春娟 , 李文福 , 刘鑫 , 邱江 , 张庆林 . (2012). 问题解决中顿悟的原型位置效应的 fMRI 研究 . *心理学报 , 44(8),* 1025–1037.

朱海雪 , 张庆林 . (2014). 创造性倾向对科学问题解决中原型位置效应的影响 . *心理与行为研究 , 12(5),* 616–620.

Amunts, K., Weiss, P. H., Mohlberg, H., Pieperhoff, P., Eickhoff, S., Gurd, J. M., et al. (2004). Analysis of neural mechanisms underlying verbal fluency in cytoarchitectonically defined stereotaxic space—the roles of Brodmann areas 44 and 45. *NeuroImage, 22(1),* 42–56.

Kounios, J., Frymiare, J. L., Bowden, E. M., Fleck, J. I., Subramaniam, K., Parrish, T. B., et al. (2006). The prepared mind: Neural activity prior to problem presentation predicts subsequent solution by sudden insight. *Psychological Science, 17(10),* 882–890.

Lin, X. T., & Wang, M. R. (1994). *Williams' creative tendency test.* Taibei: Psychological Press.

Mayseless, N., Eran, A., & Shamay–Tsoory, S. G. (2015). Generating original ideas: The neural underpinning of originality. *NeuroImage, 116,* 232–239.

Qiu, J., Li, H., Jou, J., Liu, J., Luo, Y. J., Feng, T. Y., et al. (2010). Neural correlates of the “Aha” effects: Evidence from an fMRI study of insight problem solving. *Cortex, 46(3),* 397–403.

Zeigarnik, B. (1927). Uber das behalten von erledigten und unerledigten handlungen. *Psychologische Forschung, 9,* 1–85.

# Neural Mechanism of Automated Response in Scientific Innovation Problems Solving: Inspiration Revisited

*Zhu Haixue*[1], *Zhang Qinglin*[2]
([1]College of Education Science, Chuzhou University, Chuzhou, 239000)([2]Faculty of Psychology, Southwest University, Chongqing, 400715)

**Abstract** When scientists encounter an invention problem that they have thought for a long time but have found no sally port, they may come across a prototype superficially irrelevant to the problem and catch inspiration from the prototype for solving the problem. The inspiration is an important part in insight study and the study of inspiration is hardly to catch. How to catch inspiration and why scientists can see what others cannot (catch inspiration from the irrelevant prototype)? This is still an interesting topic on which this study focuses.

In this study, we selected 40 scientific invention problems (SI, to which scientists have actually undergone but college students did not know the answers) to explore neural mechanism of automated response in scientific innovation problems solving. Each problem consisted of a heuristic prototype and the corresponding contextual question. The modified learning-test two-phase paradigm and five (heuristic prototypes) - five (contextual questions) were used. In the scanner, 40 test SI problems were presented in an event-related design in two separate blocks. Each stimulation was initiated by a "+" at the center of the screen for 2~6s. Firstly, five contextual questions were randomly presented at the center of the screen and recycled five times for 14s. The participants were instructed to press "1" key quickly once they familiarized the goal of the problem. After that, five heuristic prototypes were randomly presented at the center of the screen for 12s. Participants were asked to associate a presented prototype with a scientific problem that the students familiarized before. They were instructed to press "1" key quickly once these were associated. Subsequently, the problem (only without context) was presented for 12s, during which the participants were asked to resolve the problem. They were instructed to press "1" key if they found the answer. They should write the answer in a questionnaire after the experiment finished. After scanning, the participants were asked to complete a questionnaire that included all the problems in the formal test and rewrite the answer they thought out in the scanner and complete Williams' creative tendency test.

According to behavioral response in the scanner and written questionnaire answers, the accuracy rates for the tasks was 81.7% ($SD$ = .093). Through the contrasts between the heuristic prototype and contextual question, the fMRI data showed that the left/right middle occipital gyrus, left medial frontal gyrus, left thalamus, left precentral gyrus, left precuneus and left middle temporal gyrus were more active. This result showed that college students could associate the scientific problems with the related prototypes. Moreover, the correlation analyses revealed a positive correlation between the mean β-values for only the left middle temporal gyrus and creative tendency scores. Also, the activation intensity of left middle temporal gyrus in the contextual problems were significantly negatively correlated with their elicitation.

These results of the left middle temporal gyrus further confirmed that the left middle temporal gyrus might be the important region for automated response..

**Key words** automatic response, insight, scientific innovation, left middle temporal gyrus