

从错误中学习: 大脑如何处理错误?

Knut Overbye¹, Rune Bøen², Rene J. Huster³ 和 Christian K. Tamnes^{2,4,5*}

¹奥斯陆大学, 心理学系, 脑与认知终生变化中心 (挪威, 奥斯陆)

²奥斯陆大学, 心理学系, PROMENTA 研究中心 (挪威, 奥斯陆)

³奥斯陆大学, 心理学系, 多模式成像和认知控制实验室 (挪威, 奥斯陆)

⁴奥斯陆大学, 临床医学中心, NORMENT (挪威, 奥斯陆)

⁵Diakonhjemmet 医院, 精神病学研究部 (挪威, 奥斯陆)

少年审稿人



ASHLEY

年龄: 12



JULIA

年龄: 14



SAMANTHA

年龄: 15

我们每个人都会犯错, 犯错对于大脑来说是一个调整行为和学习的好机会。为了研究大脑是如何发现和¹处理错误的, 研究人员使用了装有传感器的帽子来测量大脑的活动。研究人员通过这种方法发现, 当一个人犯错时, 大脑会产生一种特殊的大脑活动, 这种活动被称为“错误相关负波”或“ERN”, 几乎与错误同时发生。就好像在我们意识到错误之前, 大脑已经在几分之一秒内知道我们犯了错误。这种 ERN 来自大脑的哪个部位? 它如何帮助我们学习? 随着我们长大成人, 它会发生怎样的变化?

犯错

犯错的感觉很糟糕, 当飞镖没有击中镖盘时, 你会突然感到烦恼, 或者当你考试得了 F 时, 你会感到低沉。这些感觉可能是恼人的或痛苦的, 但大脑可以利用它们使你在未来取得成功。

我们远古的祖先生活在野外, 狩猎猎物, 躲避天敌, 犯错可能意味着受伤或死亡。我们祖先的大脑必须帮助他们从错误中吸取教训, 这样

人类才能生存下去。大脑的一个重要功能就是预测未来，包括我们如何在未来改变自己的行为，以避免犯同样的错误。因此，了解大脑如何发现和应对错误，有助于我们理解大脑如何工作、如何学习。

我们可以想象这样一个错误：你一开始就有一个想要实现的目标，也许你正在踢足球，准备踢任意球。你的目标就是进球，你要评估形势并选择行动计划。比如说，对方球队设置了一道人墙，于是你决定绕过球员，射入球门。但你对球的旋转力度太小，球击中门柱后发生偏转。

在这个例子中，错误是由不正确的预测造成的。你预测踢球的方式会导致进球，但出乎意料的是，球却击中了门柱！换句话说，你认为会发生的事情实际上并没有发生。虽然你可能会因为没有进球而感到失望，但这件事告诉你一件非常重要的事情，关于世界如何运作以及你如何影响世界的想法并不完全正确。现在你知道了，下一次，你需要用更多的旋转来踢球。有了这样的学习经验，你就会对踢球进行微调，直到最终得分。

大脑如何处理错误？

脑细胞之间通过电流进行交流，有些电活动会从脑细胞传到头部外面，沿途会经过脑组织、头骨和皮肤。通过使用带有特殊传感器（称为电极）的帽子，我们可以记录这种活动，这种方法称为**脑电图 (EEG)**。通过脑电图，我们可以研究人们在执行不同任务时的大脑活动。即使在睡觉时，大脑也不会停止工作，因此会不断产生这种电活动。通过观察这些“脑电波”的模式，可以了解大脑中正在发生的许多事情。我们可以看到人们是醒着还是睡着了，是放松的还是专注的，或者是否犯了错误。

在实验室中，我们通过给某人布置一项非常困难的任務来研究与错误有关的大脑活动，在这项任务中，他一定会犯很多错误。例如，当屏幕中央显示一个向左或向右的箭头时，可能会要求这个人快速按下键盘上的某个键，但这个箭头的周围却有许多指向其他方向的箭头干扰。每当人出错时，大脑就会出现一种特殊的活动模式：一种强烈的负电活动，在头顶最强。由于这种电活动带有负电荷并与犯错有关，因此被称为**错误相关负波 (error-related negativity) [1]**(图 1)。

ERN 被认为来自大脑前部深处的**扣带回皮层 [2]**(图 2)。ERN 很可能是扣带回皮层检测到错误并通过称为**扣带束**的连接向大脑其他部分发出警报信号的结果，从而集中人的注意力以降低犯新错误的可能性。

在你犯错后，ERN 发生得非常之快，事实上，它在你意识到错误之前就已经发生了。ERN 通常在错误发生后不超过 100 毫秒 (1/1000 秒) 的时间内出现，甚至可能与错误本身几乎同时发生。相反，你至少要在

脑电图 (Electroencephalography, EEG)

一种记录脑电活动的方法。

错误相关负波 (Error related negativity, ERN)

出错后迅速出现的带负电荷的脑电活动，是检测和处理错误的信号。

扣带回皮层 (Cingulate cortex)

大脑中部深处的一部分。

扣带束 (Cingulum bundle)

包含连接大脑许多不同部分的纤维集合的神经束。

图 1

错误相关负波 (ERN) 和错误正波。当我们犯错时,可以观察到大脑活动的特定模式。在图中,波浪线表示随时间变化的大脑活动,垂直线代表发生错误的时间。你可以看到,该 ERN (蓝色) 几乎是在错误发生后立即出现的,并且在头顶部最强,而错误正波 (红色) 则出现得稍晚一些。

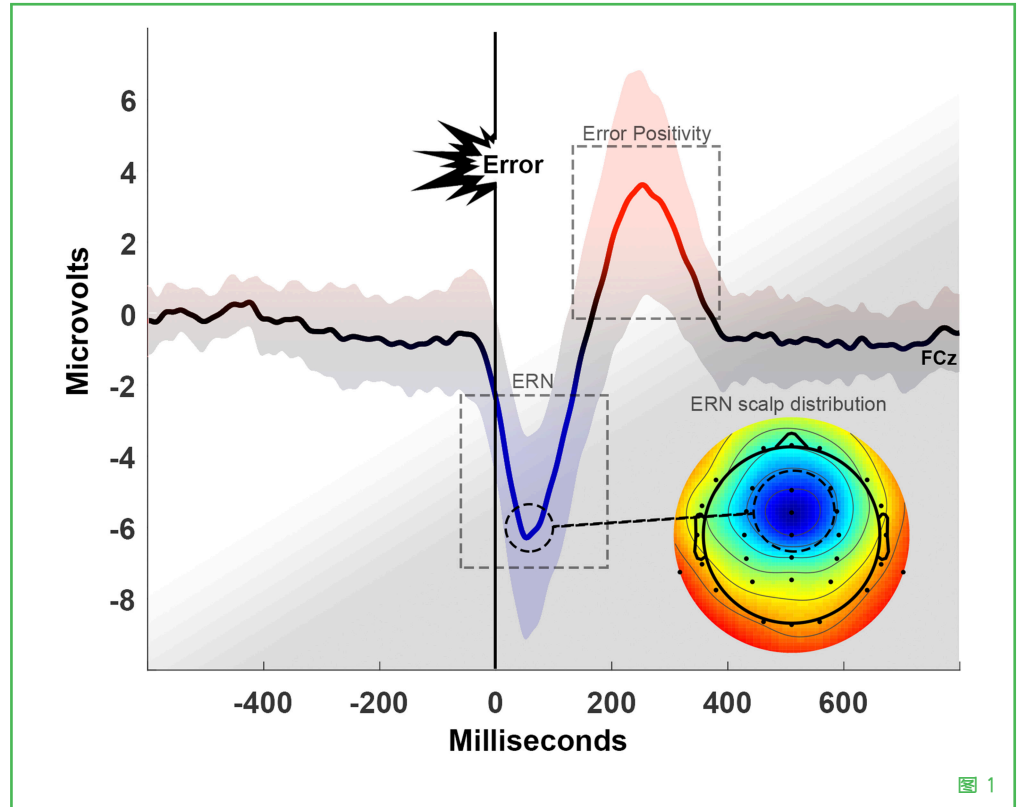


图 1

图 2

扣带回皮层和扣带束。左图:扣带回皮层 (绿色) 位于大脑中部深处,是 ERN 的来源。右图:扣带束是位于扣带回皮层下方的纤维连接,它连接着不同的大脑区域 (由 Sila Genc 制作)。

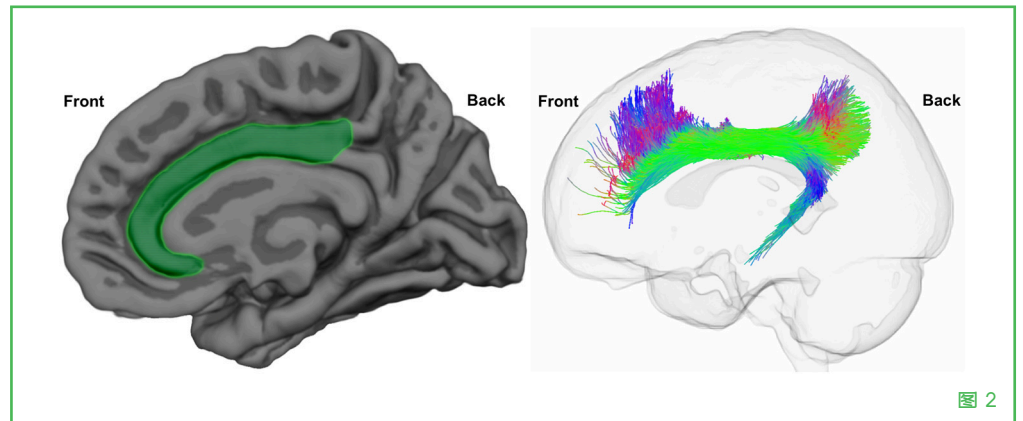


图 2

200 毫秒后才会有出错的感觉。这就好像你的大脑在“你”意识到之前就知道自己犯了错误!事实上,科学家们认为这正是实际发生的情况。扣带回皮层会将我们的实际行动与我们想要做的或应该达到的目标进行比较,然后 ERN 就会向我们的意识发出信号,告诉我们实际行动与我们预期的结果不符。因此,ERN 会让我们注意到这种错误或不匹配。在意识到自己犯错的同时,大脑还会发出一个信号,称为“错误正波”,科学家认为这与我们对犯错误的意识有关。

错误正波

(Error positivity, Pe)

出错后 200 毫秒开始出现的带正电的脑电波活动,与我们对出错意识有关。

错误如何帮助我们调整行为和学习？

许多科学研究发现，犯错后，我们在下一轮的反应会变慢。这可能是由于大脑试图给自己更多的时间，以避免再次犯同样的错误。出错后的 ERN 越强，下一轮的反应往往就越慢 [3]。

有些人的 ERN 比其他人大，这是否意味着这些人对犯错更敏感，从错误中学到的更多呢？一些研究似乎支持这一观点，例如，Hirsh 和 Inzlicht [4] 发现，较强的 ERN 与较好的学习成绩有关。在他们的研究中，研究人员测量了大学生的大脑活动，发现 ERN 较大的学生往往成绩也较好。

然而，强烈的 ERN 不一定总是好事。更焦虑的人往往会有更强的 ERNs [5]，而大脑对错误的强烈反应与注意力更加分散有关，而不是与注意力更加集中有关。如果 ERN 显示大脑对错误的反应，那么真正强烈的 ERN 可能是大脑反应过度，对犯错的不安和惊恐超过了必要的程度。

错误信号是如何随着我们的成长而变化的？

在童年和青春期，身体会经历许多生理变化，我们的思维、感觉和行为方式以及动机也会发生许多变化。这些变化，以及我们在生活中面临的越来越大的责任和期望，需要我们反复尝试和犯错，才能学会成年后所需的社交和学习技能。

研究表明，ERN 会随着年龄的增长而变化，成年人和年龄较大的青少年的 ERN 信号比儿童更强 [3]。ERN 的强度在儿童和青少年时期不断增强，这可能与大脑的发育方式有关。大脑不同部位的发育速度不同，有些脑区在儿童晚期就已完全成熟，而有些则一直发育到成年 [6]。产生 ERN 的扣带回皮层直到 20 多岁才停止发育。换句话说，与大脑的许多其他部分相比，大脑中与犯错相关的部分需要很长时间才能发育成熟。

结语

犯错有时会让人烦恼和沮丧，但是，从错误中吸取教训对我们来说也非常重要，这样我们就能纠正自己的反应，下次遇到同样的情况时就能以不同的方式行事。大脑对错误非常敏感，当我们犯错时，大脑会产生一种特殊的电活动，称为 ERN。这种错误信号：(1) 在我们意识到自己犯错之前就会出现；(2) 随着年龄的增长而变得更加强烈；(3) 可以预测我们在学校或大学中的表现。关于大脑对错误的反应，我们还有很多不了解的地方，对 ERN 进行更多的研究可能会帮助我们解开其中的一些谜团。

致谢

我们衷心感谢翻译了这个系列文章的人，他们让非英语国家的孩子们也可以阅读这篇文章；感谢 Jacobs Foundation 为翻译这些文章提供必要的资金支持。对于这篇文章，我们特别要感谢 Tieme Janssen 在荷兰语翻译方面的贡献。Christian K. Tamnes 获得了挪威研究委员会（230345，288083，223273）和东南挪威地区卫生局（2019069）的支持。

感谢脑与心智毕生发展研究中心、发展人口神经科学研究中心对本文中文翻译的贡献。感谢罗鑫澧对本文中文翻译及编辑的贡献；感谢左西年、张蕾对本文中文审校的贡献。

参考文献

1. Tamnes, C. K., Walhovd, K. B., Torstveit, M., Sells, V. T., and Fjell, A. M. 2013. Performance monitoring in children and adolescents: a review of developmental changes in the error-related negativity and brain maturation. *Dev. Cogn. Neurosci.* 6:1–13. doi: 10.1016/j.dcn.2013.05.001
2. Cavanagh, J. F., and Frank, M. J. 2014. Frontal theta as a mechanism for cognitive control. *Trends Cogn. Sci.* 18:414–21. doi: 10.1016/j.tics.2014.04.012
3. Overbye, K., Walhovd, K. B., Paus, T., Fjell, A. M., Huster, R. J., and Tamnes, C. K. 2019. Error processing in the adolescent brain: Age-related differences in electrophysiology, behavioral adaptation, and brain morphology. *Dev. Cogn. Neurosci.* 38:100665. doi: 10.1016/j.dcn.2019.100665
4. Hirsh, J. B., and Inzlicht, M. 2010. Error-related negativity predicts academic performance. *Psychophysiology* 47:192–6. doi: 10.1111/j.1469-8986.2009.00877.x
5. Hajcak, G. 2012. What we've learned from mistakes: insights from error-related brain activity. *Curr. Direct. Psychol. Sci.* 21:101–6. doi: 10.1177/0963721412436809
6. Amlien, I. K., Fjell, A. M., Tamnes, C. K., Grydeland, H., Krogsrud, S. K., Chaplin, T. A., et al. 2016. Organizing principles of human cortical development—thickness and area from 4 to 30 years: insights from comparative primate neuroanatomy. *Cereb. Cortex* 26:257–67. doi: 10.1093/cercor/bhu214

线上发布: 2023 年 12 月 29 日

编辑: Nienke Van Atteveldt

科学导师: Jessie Claire Newville 和 Iryna Omelchenko

引用: Overbye K, Bøen R, Huster RJ 和 Tamnes CK (2023) 从错误中学习: 大脑如何处理错误? *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2020.00080-zh

英文原文: Overbye K, Bøen R, Huster RJ and Tamnes CK (2020) Learning From Mistakes: How Does the Brain Handle Errors? *Front. Young Minds* 8:80. doi: 10.3389/frym.2020.00080

利益冲突声明: 作者声明, 该研究是在没有任何可能被解释为潜在利益冲突的商业或财务关系的情况下进行的。

版权 © 2020 © 2023 Overbye, Bøen, Huster 和 Tamnes. 这是一篇依据 [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](#) 条款发布的开放获取文章。根据公认的学术惯例, 在注明原作者和版权所有, 及在标明本刊为原始出处的前提下, 允许使用、传播、复制至其他平台。如违反以上条款, 则不得使用、传播或复制文章内容。

少年审稿人



ASHLEY, 年龄: 12

嗨, 我是 Ashley!! 我喜欢每天跳弗拉明戈舞, 因为它很有趣, 也是很好的身体活动。弗拉明戈舞和表演课是我今年最喜欢的课程。我所在的学校不仅注重普通课程, 也注重表演艺术。在我的空闲时间里, 我喜欢和我的家人讲笑话和玩纸牌游戏。



JULIA, 年龄: 14

我叫 Julia, 是来自柏林的九年级学生。我对数学、化学和科学非常感兴趣, 尤其是神经科学和空间科学或量子力学, 但我也喜欢学习语言。在家里, 我会用乌克兰语和我的父母交谈, 因为我们原本来自乌克兰, 此外, 我在学校还学习德语、英语和法语。在我的空闲时间里, 我特别喜欢弹钢琴、跳舞和阅读书籍。



SAMANTHA, 年龄: 15

嗨, 我的名字是 Samantha! 我喜欢阅读和写作, 我现在正在写一篇长篇故事。我最喜欢的课程是化学和英语。在我的空闲时间里, 我喜欢思考宇宙的奥秘, 凝视着太空, 写故事。

作者



KNUT OVERBYE

是一名心理学家和认知神经科学家。他研究青少年的大脑如何对错误和意外做出反应。他目前正在研究当我们长时间练习某事时, 大脑在物理上是如何变化的。无论是在工作还是在家, 该 Knut 都喜欢编程和找到虚拟现实的新用途。



RUNE BØEN

是一名研究助理, 帮助其他研究人员进行实验。他对大脑和其工作方式感兴趣, 并希望在未来成为一名认知神经科学家。他喜欢科学和学习新的东西。当他不工作时, 他喜欢阅读书籍, 听播客, 和看足球比赛。



RENE J. HUSTER

是一名认知神经科学家, 他研究大脑如何帮助我们适应环境变化, 以及我们如何在具有挑战性的条件下运作, 例如, 如果你现在忍住不吃一块饼干, 等待另外 30 分钟可能会获得三块, 你如何抵制这种诱惑? 当他不工作的时候, 他喜欢练习柔道或者贝斯。



CHRISTIAN K. TAMNES

是一名心理学家和发展性认知神经科学家。他研究大脑在童年和青少年时期是如何发展的。他也对大脑的发展如何塑造我们的人格感兴趣。在他的研究中, 他试图弄清发展中的大脑的形状和功能是否可以告诉我们为什么有些人非常外向或聪明, 甚至为什么有些人会精神病。闲暇时, 大多数时间他都和他的两个孩子在一起。

*c.k.tamnes@psykologi.uio.no