

题目：数量适应后效的皮层映射特征

作者：张智君，刘炜，赵亚军，张婧姝，吴彬星

## 第一轮

**审稿人 1 意见：**这篇文章研究了数量和对比度的后效对网膜位置、空间位置的依赖(实验一)，以及是否受到运动的影响(实验二)，由此得出数量和对比度在视觉过程中加工层次和水平的不同。这样的研究非常有意义，因为目前数字认知领域里，一个有争议的问题是，视觉刺激的数量特征是否像颜色、朝向、对比度一样是视觉的首要属性。然而，在研究方法及结果展示和推论上，我有几点疑虑。

**意见 1：**实验中借鉴了 Burr & Ross (2008) 研究数量适应后效的方法，但是，本研究中关于数量适应前后的比较，所用测试点范围对于适应后的曲线拟合很合适，但是对于适应前的拟合则不一定可靠，可能会有很强的右偏趋势(从作者给出的适应前的  $pse$  值  $> probe30$  可以看出来，所以能否给出适应前的拟合曲线的结果?)，所以直接比较适应前与后可能没有太大的意义。对比度可能存在同样的问题。接第 1 点，实验二中由于适应前的  $pse$  可能带来的不可靠(接近 50)，所以对比度在运动条件下没有发现适应，如果适应前的  $pse$  是可靠的，那么原则上说  $pse$  应该接近参考对比度值(30)，那么观察到的对比度适应后的  $pse$  值相对于适应前在运动条件下是否会有适应效应?

### 回应：

感谢审稿专家提出的宝贵意见！关于数量适应范式中反应序列的选定和比较适应前后 PSE 的实验方法，我们进行过一些讨论，简单说明如下。(由于前两个问题有较大联系，我们将其合并后进行回答)

在 Burr 和 Ross (2008a) 提出的数量适应范式中，选定的适应刺激点数为 (400: 5)，适应时间为 30s(每个 trail 前有 7s 的重复适应时间)，要求被试对 30 个点的探测刺激(probe)进行数量判断，无适应和适应条件下采用了类似的数量判断反应序列(从其判断曲线拟合图的坐标可知，大于和小于 30 的刺激点比值为 7: 3 或 8: 2)，其中，控制组的 PSE 接近(略小于) 30，这表明无适应条件下，被试在用上述反应序列进行比较时，对 30 个点的数量判断达到了相当准确的水平(需要注意的是，上述实验采用了四名被试，其中两人为文章作者)。Burr 和 Ross (2008a) 对数量适应的效应量进行衡量的指标是“匹配率”(ratio of test to probe number at PSE)，即 50% 被判断为“多”的比较刺激与恒定刺激(30)的比值。由于 Burr 和 Ross (2008a) 的实验目的是确定数量适应的存在，并对其进行初步量化，同时，在上述实验条件下，数量适应量非常显著，匹配率可达到 3 以上，可以认为采用上述指标是合理的。

我们在此基础上对数量适应的性质进一步进行研究，并采用与 Burr 和 Ross (2008a) 类似的实验参数，以方便实验结果的比较，此时我们发现了一些问题。首先，对不同性质的适应刺激进行适应之后，其适应效应量的匹配率不一定能达到 Burr 和 Ross (2008a) 报告的水平；如果要比较不同材料的适应量差异，仅用匹配率作为单一指标也是不够的。其次，我们选用了大量不知道实验目的的被试，PSE 拟合结果表明，不均衡的反应序列(8: 2)给被试

的判断结果带来了影响。这样的影响往往具有统计上的显著性，比如，相关研究（刘炜，张智君，赵亚军，2012）中，被试在无适应条件下采用类似反应序列进行数量比较的 PSE 平均值为 34 左右，虽然直观上差异不大，但被试组的 PSE 与 probe 的实际值（30）进行 t 检验已达到统计显著性水平。又如本研究中，PSE 可大于 45，与实际值的差异非常直观（我们推测，两个研究中无适应条件的 PSE 差异比较大，可能是由于两者进行数量判断的条件有差别）。

正如专家指出的，在上述实验中，无适应条件下测得的 PSE 出现了强烈的右偏趋势，如果用无适应条件去单独地衡量被试在未加工适应刺激时的感知水平，那么实验的说服力是比较低的。如果要对这一基线进行“矫正”，可以采取一些方法：① 调整无适应条件下的反应序列，比较刺激在恒定刺激两侧均匀分布。此时，如果同样调整适应条件下的反应序列，根据相关实验结果可知，仍然会存在数量适应效应，表现为 PSE 比 probe 实际值（30）显著增加（如：60 左右），同时这一 PSE 小于原来实验条件下测得的 PSE（如：80 左右）。这种效应量减小的趋势是可以解释的：适应之后，原有的 PSE（80 左右）已居于反应序列的最右端，被试的按键反应出现了新的不均衡，由于期待效应等原因，他们将判断反应进行了无意识调整（左偏趋势）。这种反应策略无形中“抵消”了部分适应效应，会使比较小的数量适应效应消失，或使比较大的效应间出现“天花板效应”，效应量间的差异被掩盖。另一方面，如果不调整适应条件下的反应序列，即无适应和适应条件下采用不同的反应序列，则此时又引入了额外变量，我们会观察到一个“扩大”的适应效应，并且很难将两种条件下 PSE 差异归结为适应刺激的作用。② 将反应序列的比例（8：2）告知被试，或者进行（大量）有反馈的练习。这些处理方式有助于提高被试在无适应条件下的反应准确率，使得 PSE 接近 30，但同样会干扰被试在适应条件下的判断反应，增加其使用间接策略的倾向。总的来说，如果要调整无适应条件下的基线水平，使之能够准确地反映此时的数量感知情况（或者更严格地，使之能准确地反映恒定刺激的物理强度），那么将很难避免对适应条件的影响，而后者经常是研究兴趣所在。因此，我们对研究的结果进行了小心的解释，并未将适应前、后的 PSE 作为衡量某一实验条件下数量感知水平的指标，单独对其提出研究结论。

参照相关的适应后效研究，我们采用适应前后 PSE 的差值对效应量进行衡量；参照 Durgin(2001)的研究，我们进一步采用适应前后 PSE 对数的差值来衡量数量适应的效应量。正如专家所指出的：此类研究中，直接比较适应前后 PSE 得到的“适应效应量”也不一定能准确的衡量适应效应，这一因变量的效度是有限的。这提醒我们，不可根据某一条件下的效应量单独地下结论（即：不能仅根据某一条件下的“适应效应量”大小，断定此时存在或不存在适应后效）。针对这一问题，我们将不同实验条件下的效应量作为因变量进行了方差分析，在此基础上得出了研究结果和结论（数量适应中，采用对数和线性尺度的数据所得到的结果是一致的，我们报告的是对数结果）。在本研究中，数量和对比度组在实验一和实验二中都有四种适应条件，每种实验条件下都对“适应效应量”进行了计算，假设“适应效应量”对真实的“适应后效”存在一定的歪曲（缩小），那么：① 可以假设两个实验的各种条件下，这种“歪曲”主要是针对适应前的 PSE（即：无适应 PSE），四种实验条件歪曲的程度是一致的，即，它带来了系统性的偏差，这种偏差不会影响主效应和交互效应。② 考虑到某些适应条件下 PSE 变化比较大（居于反应序列右侧），需要考虑反应序列对四种适应条件下 PSE 的歪曲不一致。以实验一为例，数量组反应序列：20, 27, 33, 40, 55, 67, 81, 99, 122, 148, 当

PSE 在 55-67 范围内时，被试的按键行为是均衡的；对比度组：10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 当 PSE 在 50-60 内，被试按键均衡。考察两组四种条件下的适应后 PSE, 数量组在“网膜位置相同，屏幕位置相同/不同”两个条件下，PSE 居右 (112, 103)，可以推测此时被试有“左偏”倾向，在后两个条件下，PSE (56, 51) 接近序列中心，被试的偏向较小。这种反应模式将导致数量组网膜位置主效应下降。对比度组中，网膜位置相同的两个条件的 PSE (73, 67) 略偏右，另外两个条件 PSE 接近反应中心 (48, 47)，其偏向模式和数量组是一致的，同样导致网膜位置主效应下降，并且其歪曲程度小于数量组。考察实际结果，两个组（歪曲后的）网膜位置主效应都是显著的，即，这两组的偏差并未在方差分析的结果中表现出来，方差分析得到的主效应和交互效应仍然是有效的。在实验一中，数量适应组的网膜和屏幕位置主效应都显著，我们在此基础上得出结论：数量适应后效具有网膜定位特征，也存在一定程度的空间定位特征。对比度组的网膜位置主效应显著而屏幕位置主效应不显著，交互作用不显著，我们在此基础上得出结论：对比度适应后效表现出完全的网膜定位特征，这一结果与前人 (Burr & Morrone, 2011; Melcher, 2005) 提出的结果是一致的。对实验二的结果也可进行类似的分析。总的来说，假设本研究采用的“适应效应量”对于对比度的适应后效有“缩小”，那么在屏幕位置相同 (A1B1, A2B1) 和屏幕位置不同 (A1B2, A2B2) 的两类实验条件下，这一因变量对我们关注的心理现象（对比度适应后效）的“缩小”应该是在各种实验条件下发生系统性的缩小，其作用不会表现为“屏幕位置” (B) 因素主效应或者交互效应的消失。

下面为实验一适应前后各种条件下的拟合曲线的结果示意图（数量组），由于实验条件过多，四种适应前条件（与四种适应条件对应的无适应基线）的水平也比较相似，此处仅用一种图例（空心圆）对各种无适应曲线进行标注。为简明起见，正文的拟合曲线示意图中删去了适应前的拟合曲线。

审稿老师提出，如果对比度组无适应条件下的 PSE 可以更加准确地被测得，那么对比度在运动发生时是否仍会保留适应效应？为此，我们根据实验数据进行一些直观的讨论。就对比度来说，在实验一中，与四种条件对应的适应前 PSE 分别为 34, 34, 39, 39，后两个 PSE 与 probe (30) 偏差较大，它们分别是“网膜位置不同” (A2) 水平上两种适应条件的基线，如果这两种条件的 PSE 准确度增加 (PSE 减小，更接近 30)，应该会增大 A2 水平上的效应量，从而使得网膜位置 (A) 因素主效应减少，而屏幕位置 (B) 因素的主效应不会受到显著影响，从而对比度不太可能随着适应前 PSE 的准确性增加而出现空间-皮层映射。在实验二中，适应前 PSE 在水平和垂直方向差异不大，如果同时校正两条基线，实验结果中也不太可能出现交互作用，从而改变实验的结论。考虑到实验二对比度组仅 10 名被试，参考两位专家的意见，我们补充了 6 名被试，请老师审阅。

针对审稿老师提出的前两条观点，我们进行了上述讨论和分析。总的来说，可以认为本研究的结果和结论仍是具有参考价值的，同时，我们也意识到，在本研究的实验范式下进行后效研究会增加结果解释的复杂性，事后检验也难以完全排除其干扰。再次感谢审稿老师为我们指出上述问题，在今后的研究中我们将对其进行完善。

**意见 2:** 另外，实验方法中对适应前的四种网膜/空间位置的意义没有描述，所以我不明白的是，既然直接进入测试，适应前的条件怎么还会有四种位置参数？

回应：

非常感谢审稿专家对此提出的宝贵意见！由于作者的疏忽，此处对于适应前 PSE 的描述是不准确的。我们已经把适应前 PSE 的称谓统一为“无适应 PSE”，并在文中进行了相应修改：“在无适应条件下，直接进入测试阶段，其 PSE 作为基线。共有四种基线条件，它们的 probe 和 test 所呈现的位置分别与实验中四种适应条件相对应。”“无适应 PSE 为各种适应条件所对应的无适应（基线）条件的 PSE。”由于原文描述不清晰给审稿老师带来了麻烦，请老师包涵。

**意见 3：**适应条件中数量和对比度的测试都是先呈现测试区域的测试图形，然后在对侧区域呈现参考图形（probe，比如 30 个点），然而由于适应图形在呈现时是测试区域和对侧区域同时呈现数或者对比度相对于参考图形极性相反的刺激（如导致高估趋势的 5 个点和导致低估趋势的 400 个点），所以实际上作者测试出来的适应区域（400 个点对应的区域）相对于参考图形的低估趋势，混入了参考图形呈现在对侧区域（5 个点）时被高估的因素。因此，实验结果反映出来的低估，无论是对于数量还是对比度，都夸大了相对于恒定刺激的低估程度，源自于这样的实验设计导致的恒定刺激其实很不恒定。

回应：

感谢专家提出的宝贵意见！在适应阶段呈现单一还是成对的适应刺激，不同类型的研究确实存在不同的做法，比如，人脸身份认知、表情、倾斜度适应后效的相关研究中，其经典范式是在适应阶段对被试呈现单一的相关刺激（Zimmer & Kovacs, 2011; Melcher, 2008）；另一方面，数量、密度、对比度适应后效的相关研究中，比较常见的范式是在适应阶段对被试呈现成对的相关刺激（Burr & Ross, 2008a, 2010; Durgin, 1996, 2001, 2008）。在后一类研究中，研究者往往在适应阶段在不同视野区域分别呈现强度位于两极的适应刺激对（数量：特别多和特别少；密度：特别密集和特别稀疏；对比度：特别强烈和特别柔和），并在测试阶段分别在相应位置呈现（强度适中的）恒定刺激和比较刺激，要求被试对两类刺激的强度进行比较。对于这一现象，我们在此进行一些初步的分析，不足之处还请老师进一步指导。

首先，后一类实验采用适应刺激对，其原因可能是需要与测试阶段的测试区域进行对应。在数量、密度、对比度等研究中，被试对刺激属性的感知水平往往要通过间接的比较行为才能反映出来（哪一个更多/密/亮？），因此测试阶段需要在不同区域呈现两个刺激，与之对应，适应区域也是成对的。正如专家所言，在这类设计中，其适应效应既包括了视觉系统对强度较大区域的适应，也存在对强度较小区域的适应，是一种“夸大”的效应。或者说，在这类研究中，“适应区域”的范围指代更广泛一些，除了强度极大的适应刺激（适应阶段）和恒定刺激（测试阶段）所呈现的区域外，还应该包括强度极小的适应刺激（适应阶段）和恒定刺激（测试阶段）所呈现的区域。在人脸认知、注视知觉、倾斜度等适应后效的研究中，可以通过被试对单一测试刺激的反应（男还是女？高兴还是生气？直视还是斜视？垂直还是不垂直？）对被试的感知水平进行衡量，测试阶段涉及的视觉区域单一，因此适应阶段也只对单一区域呈现适应刺激。综上，研究对象属性的差异可能是造成两类研究范式有差别的原因之一。

其次，如果要测量某一区域的适应效应，那么在适应阶段，测试区域仍可设计为单一的，即，在 probe 刺激出现的区域呈现适应刺激，另一区域（比较刺激呈现的区域）则呈现背景

色进行空余 (blank)。我们曾考虑过这一实验方法, 然而这一方法也有其缺点: 第一, 这种方法是否可以矫正现有方法的“夸大”效应? 答案可能是否定的, 因为“空余”在数值上是等同于“0”的; 第二, 适应阶段的刺激区域是单一的, 测试阶段的测试区域却是成对的, 这导致被试在适应和测试阶段注意分配不均衡的程度进一步加大, 更易造成被试的注意转移。我们猜测, Burr 和 Ross (2008a) 在研究中采用成对的适应刺激, 其理由之一可能也是来控制被试的注意转移倾向。在他们的研究中, 测试阶段的恒定刺激 (probe) 和比较刺激 (test) 并不是同时出现的, 而是相继出现在不同区域。我们曾发现, 在适应和测试阶段之间, 如果被试由于明度等因素的突然变化而发生注意转移 (指向 probe 或者 test 之一), 那么其数量判断反应会受到显著的干扰。相对于同时呈现来说, 刺激对继时呈现有助于消弭这一反应倾向。因此, 我们猜测 Burr 和 Ross (2008a) 采用上述适应和反应刺激的呈现方式进行研究, 是要防止被试的注意转移对实验结论造成影响。

第三, 如审稿老师所指出的, 这类研究采用的范式导致“低估效应”的夸大, 这一结果是不可否认的, 其影响在于研究结果中混入了非适应区域 (适应阶段呈现小强度刺激、测试阶段呈现比较刺激的区域) 的适应效应。这一趋势进一步要求我们, 在各种实验条件下应该采用统一的反应序列, 进行这样的处理, 有助于将这一额外变量的效应尽量恒定, 使其不对实验结果产生交互性的影响。在 Burr 和 Ross (2008a) 的研究中分析了被试在适应后进行数量判断的最小可觉差 (JND, 其大小也可通过高斯正态积累分布拟合曲线的“陡峭程度”直观地反映出来), 他们认为适应后曲线更加“陡峭”, JND 与适应前差异不显著。在我们的研究中, 各种适应条件下的标准差相对于无适应条件有增大的趋势, 这可能是由于被试属性造成的 (我们采用了大量不知道实验目的的被试), 也确实反映了适应条件下其 PSE 的变化程度有所增加。另一方面, 各种条件下的方差能够满足方差分析的齐性要求。我们可以认为, 在这一实验范式下的适应效应还是比较稳定的, 实验范式导致的干扰并未对不同实验条件产生有区别的影响, 即, 上述影响同样也表现为系统性的偏差。因此, 在此范式下得到的实验结果还是具有一定参考价值的。

以上三点是我们对于实验范式及其影响的初步分析, 请审稿老师进一步加以斧正。同时, 审稿老师的意见再次提醒我们, PSE 绝对值的准确性是有限的, 对它的意义进行解释需要谨慎。再次对审稿老师的宝贵意见表示感谢。

**意见 4:** 对比度的研究中没有发现空间位置改变带来的低估效应, 有没有可能是因为对比度刺激条件中使用的测试区域 (对比度 100) 和对侧区域 (对比度 10) 相对于参考图形的低估和高估趋势 (比值分别为 30/100 和 30/10), 跟数量研究中的低估和高度趋势 (比值分别是 30/400 和 30/5) 相比较更小? 因为正如 2 中所提到的, 实验结果反映出来的低估实际上是放大的了, 是上面两种趋势效应的综合叠加。

**回应:**

感谢审稿专家的宝贵意见! 审稿老师提出, 在我们的研究中, 对比度没有发现空间皮层映射特征, 这一结果可能是由于适应刺激对、恒定刺激和反应序列的选值特殊性所导致的, 具体的说, 数量组中, probe 相对于两个适应区域的比值为 30/400 和 30/5, 在对比度组中, 这一比值为 30/100 和 30/10, 这两个组别的高/低估趋势差异悬殊, 可能导致两个实验组出现不同的结果, 比如, 对比度组由于趋势较小而不再表现出基于空间映射的适应后效, 类似

于“地板效应”。这是一个很关键的问题，我们对此进行了认真讨论。下面从三个方面进行阐述。

首先，考虑两个实验组 probe 的数值选择。30/400 和 30/100 的比例差异悬殊，根据两组适应刺激的数值，最好对 probe 的值做出相应的调整，使两个组的比例大致相等。具体的说，考虑到视觉强度，对比度组的 probe 值 (30) 不宜再减少，应该考虑增加数量组的 probe 数值。在我们的研究中，没有对这一点进行仔细考虑，这是本研究的不足之处。下面我们将分析 probe 的取值是否会影响实验结果和结论，即，当测试阶段的恒定刺激 (probe) 与适应刺激 (400: 5) 之间的差异程度 (比例) 不同时，是否会导致适应效应量的变化？对于数量适应，这一问题 Burr 和 Ross (2008a) 曾进行过研究。他们指出，对 400: 5 的刺激对进行适应后，probe 的数量从 12 变化到 100 (以上) 时，适应的效应量 (匹配率，即 PSE 所对应的 test 与 probe 的比值) 是恒定的。当 probe 小于 12 时，匹配率才发生显著下降，适应效应几乎消失 (由于此时涉及 subitizing 范围，需要另行分析)。因此，probe (从 12 到 100 及以上) 与适应刺激的比值和适应效应量并无显著的共变关系。我们的研究中，未对数量组的 probe 取值进行细致的控制，但参照上述分析，可以认为这一疏忽未对实验结果造成显著影响，也没有改变研究的结论。

其次，考虑两个实验组适应刺激的数值选择。如审稿老师所言，如果两个组别中，适应刺激的对比差异悬殊 (400: 5 和 100: 10)，那么数量和对比度的适应效应量确实会有较大的差异，间接导致两个实验组中出现不同的结果和误导性的结论。要解决这个问题，可能需要对两种物理刺激进行 (心理感受性上的) 等效 (刘炜等, 2012)。我们没有对数量和对比度组的刺激物理值进行心理等效，是基于以下原因：①我们选取适应刺激时，对两个实验组遵循了一致的原则 (“极大”对比“极小”刺激)。数量和对比度在物理量值范围上差异比较大，仅就本研究而言，数量值是点刺激的个数，在保证视觉可区分度的条件下，我们仍能在指定区域内呈现 400 个以上的点刺激，而对比值是一种计算结果，其量值范围为(0, 100]。虽然两者在绝对数量值上的差异比较显著 (400 与 100)，但我们在选择较强适应刺激时遵循的原则是一致的 (较强刺激值“极大”)。对于较弱对比度适应刺激的值，考虑到在实际实验环境下，其值为 10 时，在视觉上已经非常微弱，我们选择了 10 作为较弱刺激的值，而不是 5 及以下。(实际刺激图片附于修改说明后面，请老师过目。)②要进行心理等效，需要涉及传统心理物理学中的某些方法，这类方法也有一定的局限性，在增加研究复杂性的同时，还可能为研究带来新的额外变量。③本研究中，我们的主要目的是考察观察者与观察目标有相对运动时，数量适应后效的皮层定位规律，在此基础上，通过比较对比度的定位特征，并综合其他视觉特征的相关研究结果，对上述研究的结果和意义进行推论和分析。参照前人研究结果，对比度特征并不会参与眼跳中的信息整合过程 (Burr & Morrone, 2011; Melcher, 2005)，我们的实验结果与之一致。④参考 Durgin (2001) 的研究，他在同一研究中，将密度和对比度的特征进行了比较研究，两个实验组中，密度和对比度的适应刺激比值、它们与 probe 的比值并未 (在物理和心理数值上) 进行平衡。

第三，针对审稿老师的意见，我们分析了两个实验组中可能存在的适应刺激强度对比不一致是否对实验结果和结论产生了影响。具体的说，如果对比度组的适应刺激对比偏小，那么在对比值组中，适应效应会偏小，这一倾向在实验一和实验二的各种适应条件下应该是一致的，同样，这一偏差也是系统性的，不会影响方差分析的主效应和交互效应。此外，实验

二的四种适应条件中，对比度适应 PSE 的绝对数值在其中三种条件下接近或超过了数量适应的 PSE，再考虑到两组反应序列的绝对数值范围是有差异的，可以认为由于对比度组的适应刺激对比不够强烈而导致这一组出现“地板效应”的可能性不大。

综上所述，审稿老师为我们提出了一个没有仔细控制的潜在变量，在今后的研究中，我们会对此进行完善。就本研究而言，这一缺憾导致实验结果和结论受到影响的可能性不是很大，实验的结果仍具有一定的参考价值。再次对老师表示诚挚的谢意。

**意见 5:** 讨论中，作者提到数量加工是一个高级认知过程，但是实验一中的结果很明显网膜位置相比较空间位置更能影响数量的适应后效，反映了数量加工的初级水平特征。作者如何解释？

**回应:**

感谢审稿专家提出的宝贵意见！我们在写作过程中，对这一结果的讨论不够细致和深入。两位审稿专家都指出了这一缺漏，我们对此进行了认真的分析，并在文章的结果和讨论部分进行了补充，请专家进一步指导。

在各类视觉特征后效皮层映射特征研究中，一些研究对所涉及视觉特征的网膜映射和空间映射的效应量进行了比较，并对此进行了分析 (Melcher, 2005; van Boxtel & Alais, 2008; Afraz & Cavanagh, 2009)。Melcher (2005) 比较了对比度、倾斜度 (tilt)、形式 (form) 和人脸适应后效的皮层映射特征，并统计了各个特征的空间映射效应量与网膜映射效应量的比值，其中，对比度后效完全没有空间皮层映射特征，倾斜度和形式后效的空间皮层映射效应量约为网膜映射的一半，人脸后效的空间皮层映射则与网膜映射效应量相等。不过，也有研究表明人脸后效的空间皮层映射的效应量不足网膜皮层映射的一半 (Boxtel, et al., 2008; Afraz & Cavanagh, 2009)。总的来说，各种 (较高级) 特征后效的映射规律表现为：空间和网膜-皮层映射两者都存在，并且更多地表现出网膜-皮层映射。数量适应后效与上述特征的映射规律类似。当研究者提出某一特征具有空间-皮层映射的加工机制时，他们依据的往往是空间-皮层映射效应的存在性，而不是它与网膜-皮层映射效应量相比的优势性 (Melcher, 2005; Boxtel, et al., 2008; Afraz & Cavanagh, 2009)。或者说，多数研究者对于其关注特征后效的“空间-皮层映射”的判断持有一种较弱的标准。

考察视觉信息的加工过程，可以对“特征后效的空间-皮层映射 (如果存在) 往往小于其网膜-皮层映射效应量”的现象作出一些解释。视觉信息经网膜输入后，首先在初级视皮层上形成与网膜图象同构的映射 (网膜-皮层映射)，然后沿视觉通路进入其他脑区进行加工。如果某一特征涉及较高水平的加工阶段，如，其加工基础包括 V6、LIP、VIP、LO 等较高级的皮层，由于这些皮层内的神经细胞可以按照环境坐标进行反应，当加工过程中发生眼跳时，该特征 (及其后效) 在上述脑区加工时就可能存在网膜坐标到空间坐标的转化过程，即网膜-皮层映射到空间-皮层映射的转变，这一过程可能是通过视觉系统将特征信息和眼跳信息进行整合来实现的 (Burr & Morrone, 2011)。从这个意义上来说，空间-皮层映射效应是 (眼跳时) 经网膜-皮层映射转化而来的。此外，存在“空间反应坐标”的皮层中，其神经细胞的反应坐标也不是完全一致的，可能同时存在空间坐标和网膜坐标，如，V3A 区约有 52% 的细胞按照空间坐标进行反应 (Hadak, Wilkinson, Zakher, & Wilson, 2004)，这可能是刺激从网膜转换为空间-皮层映射时经常达不到 100% 的原因之一，因此较高级特征的后效也往往只表现

出一定程度的空间-皮层映射，更主要的则是网膜-皮层映射。另一方面，较高级的视觉特征存在空间-皮层映射，较低级的特征仅有网膜-皮层映射，大多数研究支持这一观点。如果某一特征后效表现出空间-皮层映射，另一特征后效仅存在网膜-皮层映射，那么可以推测前者涉及较高水平的加工，后者则局限于初级皮层（如 V1 区）的低水平加工阶段。

前人研究表明，数量加工可能涉及较高水平脑区，如 LIP, LO 等，这些脑区都在一定程度上表现出了空间-皮层映射特征。另一方面，数量加工过程也可能同时涉及了不同水平的加工阶段。Dehaene 和 Changeux (1993) 的数量探测模型 (the number detector model) 提出，数量抽取包括两个平行的加工阶段。首先，每一个从网膜输入的刺激项 (item) 按照网膜皮层映射 (retinotopic map) 的方式在皮层内激活；其次，不同的刺激项被常态化 (normalized)，前述映射被转换成位置编码 (position code)，与具体数值对应并完成数量表征 (Nieder & Dehaene, 2009)。由此，数量加工中同时保留了低级和较高级的平行加工过程，我们推测，这可能也是数量适应后效既表现出空间-皮层映射、又主要表现为网膜-皮层映射的原因。按照老师的意见，我们在讨论部分对此进行了简要解释。上述改动还请审稿老师进一步指导。

审稿老师指出，文章中的讨论部分提出“数量加工是一个高级认知过程”这一观点不太准确。我们检查后发现，讨论部分确实有描述不准确的语句，如：“并为数量的加工和适应发生在较为高级水平上的观点提供了进一步的支持”，这对读者产生了误导，我们对此进行了修改：“并进一步证实数量的加工和适应可以涉及较高级的加工水平”。此外，讨论中提出“并进一步支持数量是对观察对象较高水平的描述信息”，我们认为，由于数量加工的空间-皮层映射特征表明其涉及较高水平的加工过程，可以认为数量是“较高水平的描述信息”，因此在此处保留原文。上述改动还请审稿老师进一步斧正。

**审稿人 2 意见：**《数量适应后效的皮层映射特征》一文在两个实验中，分别通过改变注视点引入眼跳和固定注视点改变客体空间位置，对比了数量适应后效和对比度适应后效，考察数量加工的皮层映射特征规律，从而为人类感知数量信息的加工机制提供证据。论文的写作较规范，实验设计较为严格精巧，但存在下述问题需请作者注意：

**意见 1：**摘要写作中提到观察者与观察目标存在相互运动，是否表述为“相对运动”更为合适？

**回应：**此处作者用词不准确，应改为“相对运动”，感谢老师为我们指出错误。

**意见 2：**前言：逻辑还需进一步整理，应紧扣本研究中的 2 个实验展开。既然该研究最终关注的是数量信息的加工机制，通过数量适应后效中皮层映射特征作为论据。那么：①数量适应后效主要表现为怎样的后效？文中无论前言、结果和讨论中都未清晰描述其规律；②如何引入客体映射特征，两者的关系如何应在前言中表述清晰。

**回应：**

感谢审稿专家的宝贵意见！我们已经按照老师的要求对前言进行了相应修改，调整了其逻辑和结构，使其比较紧密地围绕两个实验展开，并进行了相应的增补：①在介绍数量适应



后效的定义之后，对其规律进行了补充描述：“例如，某一视野区域对较多的数量（刺激个数）进行适应后会导致该区域的数量感知水平下降；适应较少的数量则会导致数量感知水平上升。这些感知变化可以通过后续的数量判断反映出来。”②如何引入客体映射特征，客体映射特征与数量适应的关系如何？我们修改了表述方式，对这个问题进行了较为清晰的描述，提出研究客体映射特征可以进一步明确数量适应后效进行皮层映射的加工机制，并将眼跳和非眼跳情境下的映射规律进行统一。上述内容还请专家进一步指导。

**意见 3：实验一部分：**① 实验材料、实验设计和程序部分的描述较为繁琐，需更好的组织以便表述清晰；

**回应：**感谢审稿专家的宝贵意见！我们已经按照老师的要求对实验一的材料、设计和程序部分进行重新组织和修改，请老师审阅。

②部分语句容易引起歧义，如 P8 最后一段“恒定刺激与每一个比较刺激的等效图片随机配对，生成 8 张刺激对图片”，是否为“恒定刺激与每一个比较刺激的其中一张等效图片随机配对，生成 8 张刺激对图片”；

**回应：**感谢老师为我们指出此处错误！文中已进行了相应改正。

③数据分析部分。表 1 给出了适应前和适应后的 PSE，此处，“适应前”是否是“无适应”条件？适应前的给出的 4 个值分别设计网膜位置相同（不同）×屏幕位置相同（不同），在无适应条件下，如何定义这些位置的相同或不同？

**回应：**

非常感谢审稿专家对此提出的宝贵意见！由于作者的疏忽，表格中，适应前 PSE 的指代不明。我们已经把适应前 PSE 的称谓统一为“无适应 PSE”，与文中对应，在表格下方注明“无适应 PSE 为各种适应条件所对应的无适应（基线）条件的 PSE”，并在文中进行了相应修改：“在无适应条件下，直接进入测试阶段，其 PSE 作为基线。共有四种基线条件，它们的 probe 和 test 所呈现的位置分别与实验中四种适应条件相对应。”由于原文描述不清晰给审稿老师带来了麻烦，请老师包涵。

④实验一报告结果或展开讨论时，应描述数量适应后效表现为什么样的效果？即给予被试一定的数量适应后，PSE 应有什么变化？尤其是在 2 个不同位置给予被试不同的数量，引起的后效是什么？

回应：

非常感谢审稿专家对此提出的宝贵意见！我们对此进行了相应的补充，除了在前言中对数量适应后效的规律进行描述之外，在实验一报告实验结果前，我们对数量适应后效的具体效果进行了描述：“数量适应后效表现为，某一视野区域对较多的数量（刺激个数）进行适应后会导致该区域的数量感知水平下降；适应较少的数量则会导致数量感知水平上升。这些感知变化可以通过后续的数量判断反映出来（将恒定刺激呈现在适应“多”的区域、比较刺激呈现在适应“少”的区域时，对恒定刺激进行数量判断的 PSE 会增大）。在实验中，对两个适应区域分别呈现 400 个点和 5 个点，所测得的数量适应的后效实际上是两个区域数量感知情况变化的综合，适应效应统一表现为 PSE 的增大。”上述改动请老师审阅。

⑤实验一结果发现数量适应表现出部分的空间-皮层映射，但更为主要的是网膜-皮层映射，这确实与对比度的结果不同，但作者是否应该对数量适应中两者都存在，并且更多表现出的网膜-皮层映射给予一定的说明。

回应：

感谢审稿专家提出的宝贵意见！我们在写作过程中，对这一结果的讨论不够细致和深入。两位审稿专家都指出了这一缺漏，我们对此进行了认真的分析，并在文章的讨论部分进行了补充，具体内容还请老师参照前面（审稿专家一，意见 5），请老师进一步指导。

意见 4：实验二部分：① 为何数量和对比度实验中的被试数量差别很大？

回应：

感谢审稿专家提出的宝贵意见！在实验过程中，由于对比度组在被试为 10 人时，客体运动因素的主效应不显著，客体运动与测试位置因素的交互作用也不显著，两种效应  $\eta_p^2$  均小于 0.2，我们认为该组实验结果不会因为样本量增加而改变，因此只采用了 10 名被试的数据。经审稿专家指出，20: 10 的人数安排非常不均衡，不利于两个实验组间的对比，且考虑到对比度组人数过少则更可能影响基线水平（无适应）等条件下 PSE 的准确性，我们在该组中补充了 6 名被试，共 16 人参加对比度实验，并对相应数据重新进行了统计。上述改动请专家审阅。

②建议图例中适应条件（1）（2）（3）（4）等标识直接改为某种适应条件的名称或较好记忆的简称；

回应：

感谢专家提出的宝贵意见！图例中用序号替代实验条件缺乏意义性，会增加读者的阅读难度，我们已经用相应的简称对实验一和实验二的拟合结果示意图进行替代，请老师进一步斧正。

③文中统计均是用适应前后的 PSE 的对数差作为结果进行统计，建议作者直接比较一下适应前后的某些条件下 PSE 是否有显著差异，这样可以更为确定的了解在某些条件下是否出现数量适应后效。如作者在 P14 提到，“条件（2）（4）的适应量差异不显著，这表明适应客体运动时，虽然有显著的适应效应‘追随’客体运动到了新位置，但……”，并无证据表明在条件 2 和 4 中有显著的适应后效追随客体；

回应：

感谢审稿专家提出的宝贵意见！此处为我们的疏漏之处，我们已在实验的结果报告中对需要明确适应效应的条件进行了检验，将这一条件下的 PSE 与其对应基线的 PSE 进行配对  $t$  检验，从而推测适应效应是否存在，以便于对结果进行分析。上述改动请老师审阅。

④作者对垂直和水平条件下客体旋转与否表现出适应后效的差别还缺乏深入的讨论。

回应：

感谢审稿专家提出的宝贵意见！对于垂直和水平条件下客体旋转与否表现出适应后效的差别，我们在文中仅列出了简单效应分析的结果：“客体旋转和不旋转的情况下，水平方向的数量适应量有显著差异；而无论适应刺激客体是否旋转，竖直方向上的数量适应量都没有受到显著影响。”而对于两个方向上受到客体旋转的影响为何不一致，没有深入分析。根据专家的意见，我们对此进行一些讨论。

回应：

适应条件下，如果数量客体旋转，那么水平方向上的 PSE 显著大于其基线水平，且显著大于不旋转时该方向的 PSE，提示部分适应效应“追随”客体旋转到了水平位置；另一方面，无论客体旋转与否，竖直方向的适应量差异不显著，表明在适应客体运动时，原位置保留的适应量仍与不运动条件下无显著差异，即适应后效没有随着客体的运动而“离去”。在 Melcher

(2008)的研究中,部分倾斜度适应后效会随着适应客体的运动而“离去”,而在我们的研究中,对数量适应效应却没有发现同样的现象,对这一现象有三种可能的解释。

首先,这一现象可能是被试的期待造成的。适应条件(2)中,客体虽然旋转到了水平方向,但测试刺激却100%地出现在原位置(竖直方向),可以理解为,测试时刺激实际上返回到了原位置,因此,在心理上“旋转”客体是不必要的,这一加工可能受到了抑制。

第二,这一现象可能是测试目标的位置不确定性造成的。在Melcher(2008)的研究中发现,客体运动后,如果测试刺激出现的位置没有可预测性(不一定出现在运动的目标位置),那么适应后效将保留在原位置,目标位置上的后效几乎消失。我们曾对这一解释进行过验证,当条件(2)中测试刺激出现在原位置(竖直位置)的概率为60%时,12名被试的测试结果表明,竖直位置上的PSE为68.34,与实验二条件(4)的PSE无显著差异( $p > 0.05$ ),提示适应效应仍完全保留在原位置;水平方向上的PSE为41.75,与基线水平差异不显著( $p > 0.05$ ),提示水平位置不再有显著的适应效应。Melcher(2008)认为,要将客体与其特征进行绑定,必须建立在观察者能对客体运动轨迹进行预测的基础之上。现实情境中,客体的运动轨迹往往是可预测的,因此,客体和其特征的整合加工才能够实现。我们的研究结果支持了这一观点。

第三,这一现象也可能是数量加工和特征信息皮层映射加工的复杂性造成的。数量加工可能存在不同水平的并行加工阶段(Dehaene & Changeux, 1993),客体特征的皮层映射加工也具有阶段性,特征与运动信息的整合(空间-皮层映射)过程往往选择性地发生在较高水平的加工阶段,建立在网膜-皮层映射加工的基础上。上述加工过程可能导致了(数量)特征皮层映射规律的复杂性。具体地说,在不同条件下,两个位置上的后效并无线性关系

(Melcher, 2008),即,两个位置的效应量之和并不是一个常数,空间-皮层映射和网膜-皮层映射两种效应也不一定是此消彼长的关系。

以上三点是我们对实验现象的初步探讨和分析,我们在文中的相应位置(实验一的结果部分)也对此进行了增补,请老师斧正。

**意见 5:** 讨论部分:作者在 P16 提到,“上述结果可以作为反对数量加工是初级非数量视觉信息加工副产品观点的一个新证据”,是否证据不足。有理由相信作者支持的观点可能是正确的,但本研究中提供的证据不能完全反对上述观点。数量加工如果是建立在多个初级信息加工的基础上,是否也可能由量表到质变,表现出与单个初级视觉信息加工不同的机制?

**回应:**

感谢审稿专家提出的宝贵意见！在原文中，我们提出“上述结果可以作为反对数量加工是初级非数量视觉信息加工副产品观点的一个新证据”，这一论断的证据不是很充分，也缺乏直接的证明过程。从本研究来看，我们考察了数量加工的皮层映射特征规律，从而分析了人类感知数量信息的加工机制。通过对比数量适应和对比度适应后效的映射规律，我们指出两种特征的加工基于不同的机制，他们可能具有不同的神经基础，并涉及不同的加工阶段。后两个“不同”是将本研究所揭示的现象置于前人研究的背景中推论出来的结果，这就决定了本研究所提供的证据应该是间接的、有一部分研究意义是经过推测得到的，下面对此进行简要分析。

数量加工是基于数量本身，还是基于明度、对比度和密度特征等其他初级视觉线索，这是目前数量加工研究的一个关键问题。一些研究提出，数量判断任务的加工基础是对非表面信息的综合与推导，数量感知是上述特征知觉的副产品。即，数量认知并不是独立存在的，而是由于外显任务要求而表现出来的加工副产品。要对这一观点进行反驳，如果直接针对数量感知（外显数量判断）阶段进行研究，就需要讨论数量信息与非数量线索在数量判断过程中的主次关系（Allik & Tuulmets, 1991; de Hevia, 2011），或者采用排除法，考察明度、密度等初级特征缺失时数量判断任务的结果是否会受到影响（Kramer et al., 2011）。这类研究往往需要进行复杂的控制，对其结果进行解释时，也通常难以完全排除其他因素的潜在影响。

适应效应可以为研究视觉特征加工提供有效的行为指标。我们认为，通过考察数量适应后效的性质，并与其他特征的规律进行比较，有助于澄清上述争论：从时间进程上来看，数量适应发生在（测试阶段）外显的数量比较任务之前，是一个相对内隐的加工过程。虽然数量比较中被试可能对密度、对比度等非数量线索进行综合推导，但上述过程却不会自动地引发数量适应（Burr & Ross, 2008a）。因此，数量适应和对比度等因素的适应过程是可区分的。对数量适应特征的后效进行考察，有助于从加工基础的水平上对数量感知的机制进行明确。具体的说，如果数量适应的后效与其他表面特征的适应后效存在不同性质，那么就可以认为数量认知与其他表面特征在加工基础上就存在差异，而不是建立在对后者加工基础上的综合与推导，由于任务要求才表现出来。

本文着重考察了数量适应后效的映射规律，作为研究参照，我们考察了对比度后效的映射特征，并借鉴了 Durgin（1996）对于密度后效映射特征的研究结果，提出数量适应后效与对比度、密度后效有不同的映射特征，推测其涉及不同水平的加工阶段。我们的研究立足于特征加工的适应阶段，有助于从加工基础上对数量 and 对比度等视觉特征的机制进行区分，为数量特征加工的独立性提供了较好的支持，这是本研究比较有意义的地方。不过，本研究

涉及的对照组仅“对比度”一种特征，且由于各种特征在参数和性质方面的差异性，将其直接进行对比的有效性受到一定的限制，关于“加工水平”的讨论也是建立在前人研究基础上的推论，因此，正如审稿专家所言，尚不能完全排除“数量加工建立在某些初级特征加工基础上”的观点。我们在文中修改了相应的语句，比如，原文中“上述结果可以作为反对数量加工是初级非数量视觉信息加工副产品观点的一个新证据”被修改为“上述结果可以间接地支持‘数量加工不是初级非数量视觉信息加工副产品’的观点”，以避免文中出现过度的推论。再次对审稿专家的宝贵意见致以诚挚的谢意，今后我们会进一步完善对于这一问题的研究。

## 第二轮

**审稿人 1 意见：**基本上回答了我对研究范式和分析方法提出的问题。希望作者在以后的实验设计中尽量控制无关因素及实验基线，而不是后期借助于“几个研究的条件都有系统的基线偏差，所以不影响条件之间的关系比较”这样的解释。几个小问题见下面：

**意见 1：**P.27 “某一视野区域对较多的数量（刺激个数）进行适应后会导致该区域的数量感知水平下降；适应较少的数量则会导致数量感知水平上升。”不应该说感知水平，而应该是感知的数量幅度。因为水平高低是指数量的感知能力，以 JND 为指标的。

**回应：**

感谢审稿老师提出的宝贵意见，此处为作者用词错误，已在文中进行相应修改，并增加了“数量幅度”一词对应的英文：**numerical magnitude**。上述改动请老师审阅。

**意见 2：**P.28 “将恒定刺激呈现在适应“多”的区域、比较刺激呈现在适应“少”的区域时，对恒定刺激进行数量判断的 PSE 会增大”。这句话中恒定刺激与比较刺激的位置是否反了？应该是对比较刺激做数量判断吗？

**回应：**

感谢审稿老师提出的宝贵意见，此处为作者表述错误，已在文中进行相应修改，请老师审阅。在恒定刺激法中，通过变化的比较刺激，对恒定刺激的值进行判断。

**审稿人 2 意见：**拒审。

**审稿人 3 意见：**作者采用心理物理学方法考察了目标静止(实验 1)和运动(实验 2)情况下，数量和对比度后效对网膜位置和空间位置的依赖程度，结果发现数量适应后效和对比度后效表

现出不同的特征。以此推测人类对数量和对比度的感知在视觉过程中处于不同的加工层次和水平，为人类数量感知的加工机制提供心理学的证据。

该研究具有较强的理论意义，实验设计巧妙，两个实验之间的逻辑关系紧密，创新水平高，论文写作较规范。

作者对两位审稿专家的疑义进行了认真地修改和讨论，修改和讨论合理。有几点细节的问题详见文中标注，希望作者做进一步的修改。

**回应：**

感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见和仔细修改，作者已经对专家的意见逐条进行了核对，并接受了修改意见。

**编委复审：**该文作者针对审稿人意见做了较为满意的修改。同意发表。

**主编终审：**我阅读了稿件《数量适应后效的皮层映射特征》的最新版本和审稿流程，作者根据评审人的意见作了认真的修改，文章质量有了明显的提高。同意责任编辑和审稿人的意见，同意发表。