

我们的“倒置”视网膜真的是“糟糕的设计”吗？

最初发表于《创造杂志》第 13 卷第 1 期（1999 年 4 月）：37-44 页。

抽象的

本文回顾了我们拥有倒置视网膜的原因，以及为什么相反的排列方式（正置视网膜）在拥有倒置视网膜的生物体中容易出现故障。

概括

脊椎动物视网膜的“倒置”结构，即光线必须穿过其神经系统的多个内层才能到达感光细胞，长期以来一直是进化论者的嘲讽对象，他们声称这种结构效率低下，因此是反对设计论的证据。本文探讨了拥有倒置视网膜的原因，并解释了为什么相反的结构（即正置视网膜，感光细胞位于最内层，是接收入射光的第一层）在拥有倒置视网膜的生物体中容易出现故障。我认为，为了保护视网膜免受光线（尤其是短波长光）的有害影响以及聚焦光产生的热量，拥有倒置视网膜的生物体必须采用这种结构。

介绍

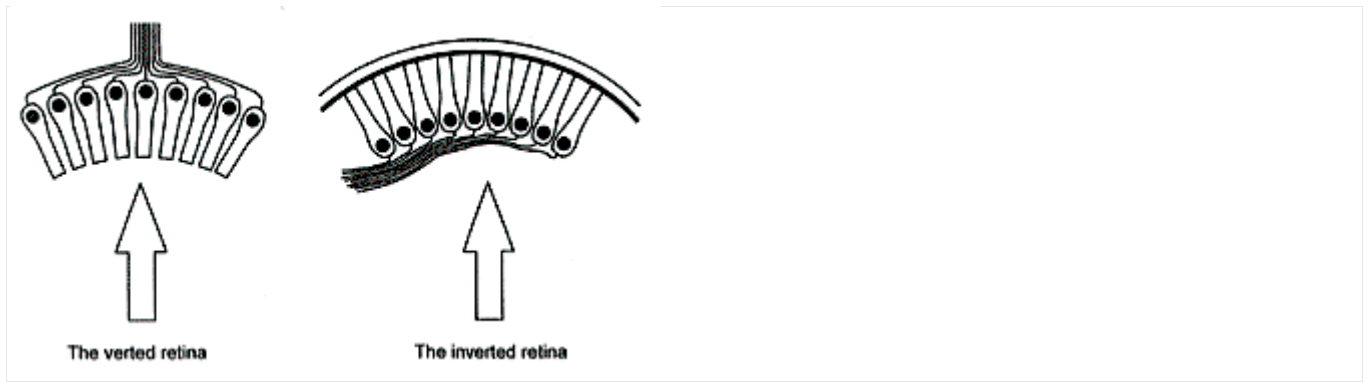


图 1. 感光细胞的两种排列方式。箭头指示入射光的方向。

进化论者经常认为，脊椎动物视网膜具有一种特征，表明它并非人为设计，因为其结构似乎并不理想。他们指出，光线要到达感光细胞，必须穿过视网膜的大部分神经装置，并推测这会导致感光细胞成像质量下降。从生物学角度来看，这种视网膜结构被称为倒置，因为视觉细胞的感光端朝向远离入射光的方向(图 1)。这种结构在脊椎动物中很常见，但在无脊椎动物中则很少见，仅在少数软体动物和蛛形纲动物中发现。

¹

另一种排列方式，在无脊椎动物中更为常见，被称为倒置式，即感光细胞朝向表面。许多进化论者认为这种排列方式效率更高，他们嘲笑倒置式排列是“本末倒置”或“里外颠倒”。然而，著名无神论进化论者

道金斯虽然承认光线穿过倒置视网膜到达感光细胞的过程中不会受到显著干扰，但他写道：

任何工程师都会自然而然地认为，光敏细胞应该指向光源，其导线则向后延伸至大脑。如果有人提出光敏细胞可能背离光源，导线从靠近光源的一侧伸出，他肯定会嗤之以鼻。然而，这正是所有脊椎动物视网膜的真实情况。实际上，每个光敏细胞的导线都是反向连接的，其导线从靠近光源的一侧伸出。导线必须穿过视网膜表面，到达一个穿过视网膜盲点（即所谓的“盲点”）的孔洞，最终与视神经连接。这意味着光线无法畅通无阻地到达光敏细胞，而是必须穿过密集的连接导线，这必然会造成一定的衰减和失真（实际上可能并不严重，但这种原理本身就足以让任何一位严谨的工程师感到不适）。我目前还不清楚这种奇特现象的确切原因。相关的进化时期已经非常久远了。

2

在考虑这种进化观点的有效性之前，简要回顾一些基本的眼部解剖结构和术语可能会有所帮助（图 2）。

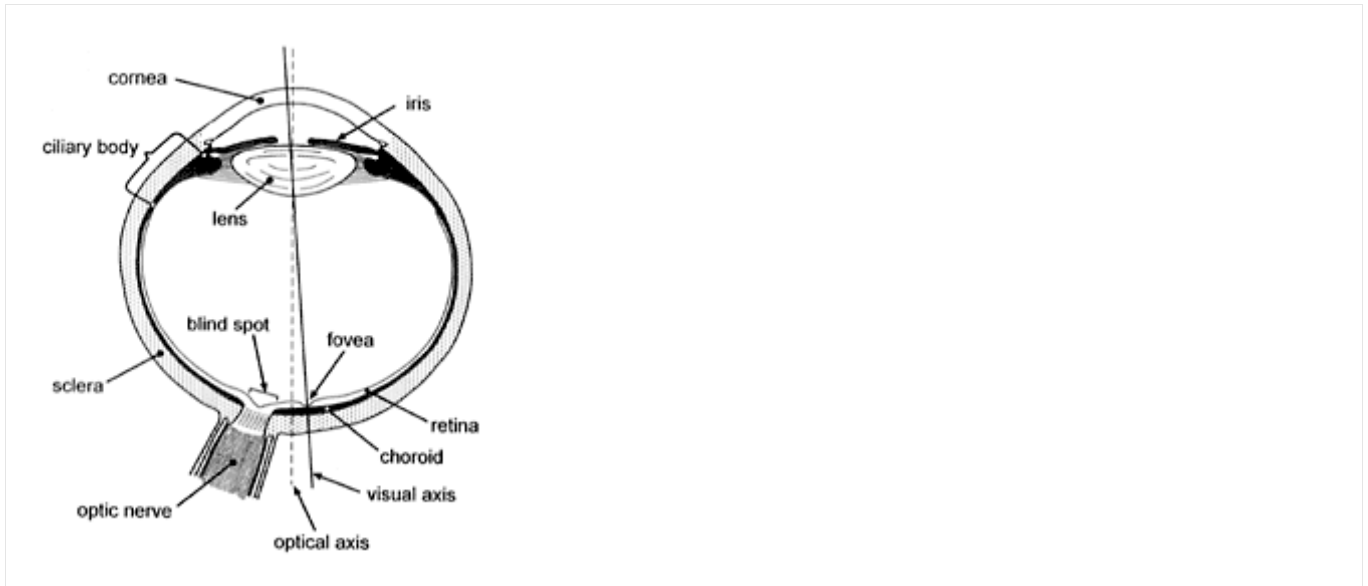


图 2. 眼睛横截面示意图。

光线通过透明的角膜进入人眼，角膜是眼睛的前窗，它像一个强大的凸透镜。光线穿过瞳孔（虹膜上的小孔）后，会被晶状体进一步折射。由此，外部环境的图像聚焦在视网膜上，视网膜将光信号转化为神经信号。视网膜是眼球后段三层膜中最内层的一层（相对于眼球的几何中心）。眼球后段的另外两层膜分别是：最外层的白色坚韧的纤维状巩膜，它与前方的角膜相连；以及脉络膜，它是一层色素丰富、血管密集的组织，位于视网膜和巩膜之间。

视网膜由十层组成（图 3），最外层是深色的视网膜色素上皮(RPE)，由于含有黑色素，因此对光不透明。RPE 细胞内表面有细小的毛发状突起，称为微绒毛，

这些微绒毛位于感光细胞外节末端之间并将其包裹。因此，RPE 和感光细胞之间存在一个潜在的分离平面，当神经感觉视网膜与 RPE 分离时，例如由于损伤，这种情况被称为视网膜脱离。

每个感光细胞，无论是视杆细胞还是视锥细胞，都由内节和外节组成。内节含有用于制造外节中存在的视觉色素的细胞器（细胞内装置）。视杆细胞层、视锥细胞层及其内部的八层（与视网膜色素上皮层不同）构成了所谓的 *神经感觉视网膜*，它对光线几乎是透明的。光线到达感光细胞后产生的电脉冲，通过神经感觉视网膜内复杂的神经连接进行处理，并传递到视网膜的神经纤维层，然后经由视神经传递到大脑。

在许多对极低光照条件下视觉至关重要的物种中，视网膜色素上皮（RPE）或脉络膜中含有一层反射性晶体物质，称为视网膜反射层（拉丁语：*tapetum*，意为“地毯”）。³ 视网膜反射层如同镜子一般，反射穿过感光细胞之间的光线，从而增强照射到感光细胞上的光线。因此，当一束光照射到黑暗中时，就会形成我们常说的“猫眼”。

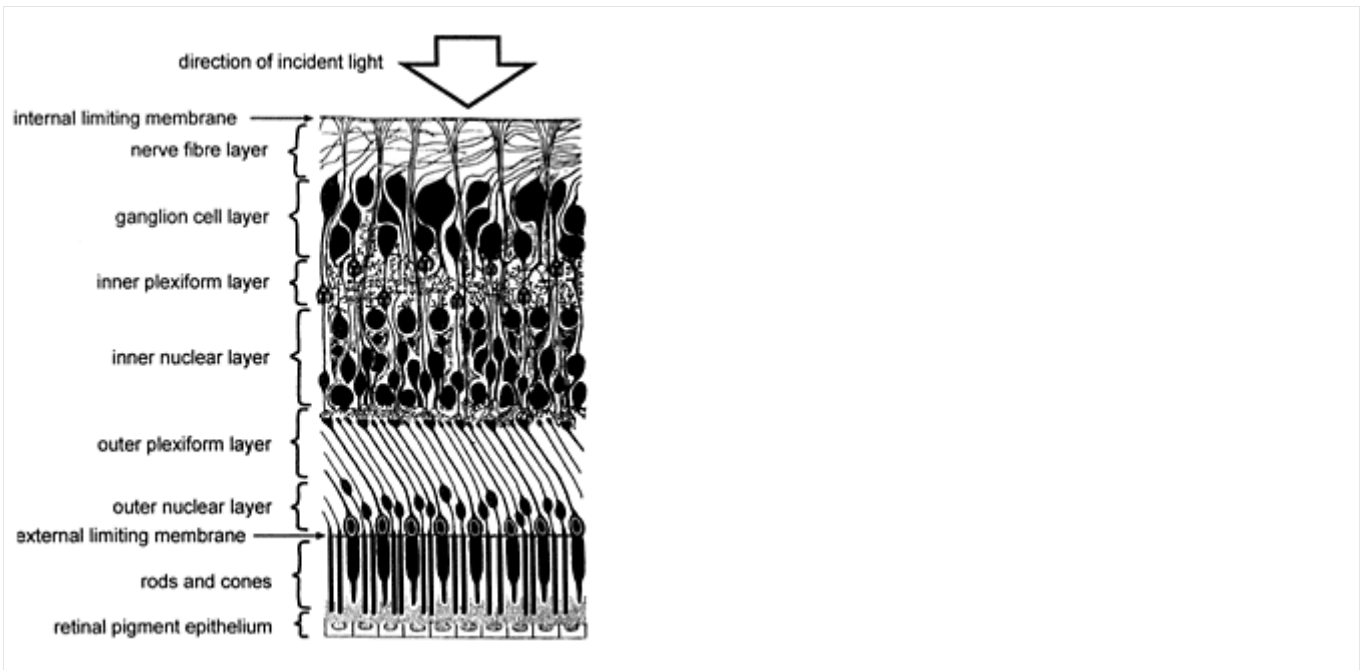


图 3. 视网膜各层示意图（经牛津大学出版社许可，改编自 Brash JC [ed.], 1951 年 *Cunningham 解剖学教科书*, 第 1169 页）。

视网膜色素上皮

理解视网膜倒置的关键在于视网膜色素上皮（RPE）所起的重要作用。RPE 的许多重要功能现已广为人知。

^{4, 5} 每个 RPE 细胞都与 20 个或更多感光细胞外节的末端紧密接触，这些感光细胞的数量超过 1.3 亿个。⁶ 如果没有 RPE，感光细胞和其余的神经感觉视网膜就无法正常运作，最终会萎缩。因此，如果神经感觉视网膜与 RPE 分离（“脱离”），受影响视网膜区域的视力会逐渐恶化，甚至最终丧失。

感光细胞的外节由一叠含有感光色素的圆盘组成。这些圆盘由内节不断形成，并依次向外节移动，最终到达视网膜色素上皮细胞（RPE）。RPE 吞噬（希腊语：*phago*，意为“吃”）这些圆盘，并回收其化学成分（图 4）。⁷

视网膜色素上皮（RPE）储存维生素 A，它是感光色素的前体，因此参与感光色素的再生。视网膜上有四种感光色素，它们在光照下都会褪色：视紫红质（存在于视杆细胞中，用于夜视）以及三种不同类型的视锥细胞各自对应的感光色素（分别对应三种原色）。RPE 还合成感光细胞间质所需的糖胺聚糖，即位于感光细胞之间并将其分隔开的物质。

除了氧气，视网膜色素上皮（RPE）还能选择性地将营养物质从脉络膜输送到视网膜外三分之一区域，并将感光细胞代谢产生的废物清除至脉络膜循环系统。通过选择性地泵送代谢物以及其紧密的细胞间连接，RPE 形成一道屏障，称为**血视网膜屏障**，阻止较大分子或有害化学物质进入视网膜组织，从而有助于维持稳定且最佳的视网膜环境。^{8、9、10}

视网膜色素上皮细胞（RPE）拥有复杂的机制来处理光作用产生的有毒分子和自由基。其中存在一些特定的酶，例如超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和过氧化物酶，它们能够催化分解超氧化物和过氧化氢等潜在有害分

子。此外，RPE 还含有 α -生育酚（维生素 E）和抗坏血酸（维生素 C）等抗氧化剂，用于减少氧化损伤。

因此，我们的感光细胞不断合成新的外节盘片及其特有的光色素，并回收利用视网膜色素上皮（RPE）消化的旧盘片中的物质。这就引出了一个问题：“为什么会有如此复杂的过程？”答案必然是，这是生物更新的一个例子，通过这种更新，暴露于有害化学物质、辐射、机械创伤等的组织得以存活。如果没有自我更新，皮肤、肠道内壁、血细胞等组织会迅速积累致命的缺陷。同样，感光细胞通过不断替换盘片来对抗由毒性物质（尤其是短波长光）加速的持续分解过程。

¹¹ · ¹²

视网膜色素上皮（RPE）细胞含有黑色素颗粒，能够吸收散射光和过量光，从而提高视力（VA，即视觉清晰度或区分相邻两点的能力）。进入眼内的光线中，有 25%至 33%被 RPE 和脉络膜中的色素颗粒吸收。

¹³ 黑色素的光谱吸收率随波长减小而增加，波长越短，能量越高。¹⁴ 因此，黑色素还能保护感光细胞免受光损伤，并被认为是具有抑制光敏分子（包括单线态氧）¹⁵ 以及清除自由基的功能。¹¹此外，RPE 和脉络膜中的黑色素还能屏蔽经巩膜进入眼内的光线，从而保护感光细胞。

RPE 中如此强烈的代谢活动需要良好的血液供应，而接下来我们将要讨论的是，与 RPE 接触的脉络膜能够提供充足的血液供应。

脉络膜散热器

实验模型中观察到的光感受器损伤与温度密切相关¹⁶，其他研究也证实热会加剧光化学损伤。任何旨在防止后者损伤的系统也应能防止前者损伤¹⁷。

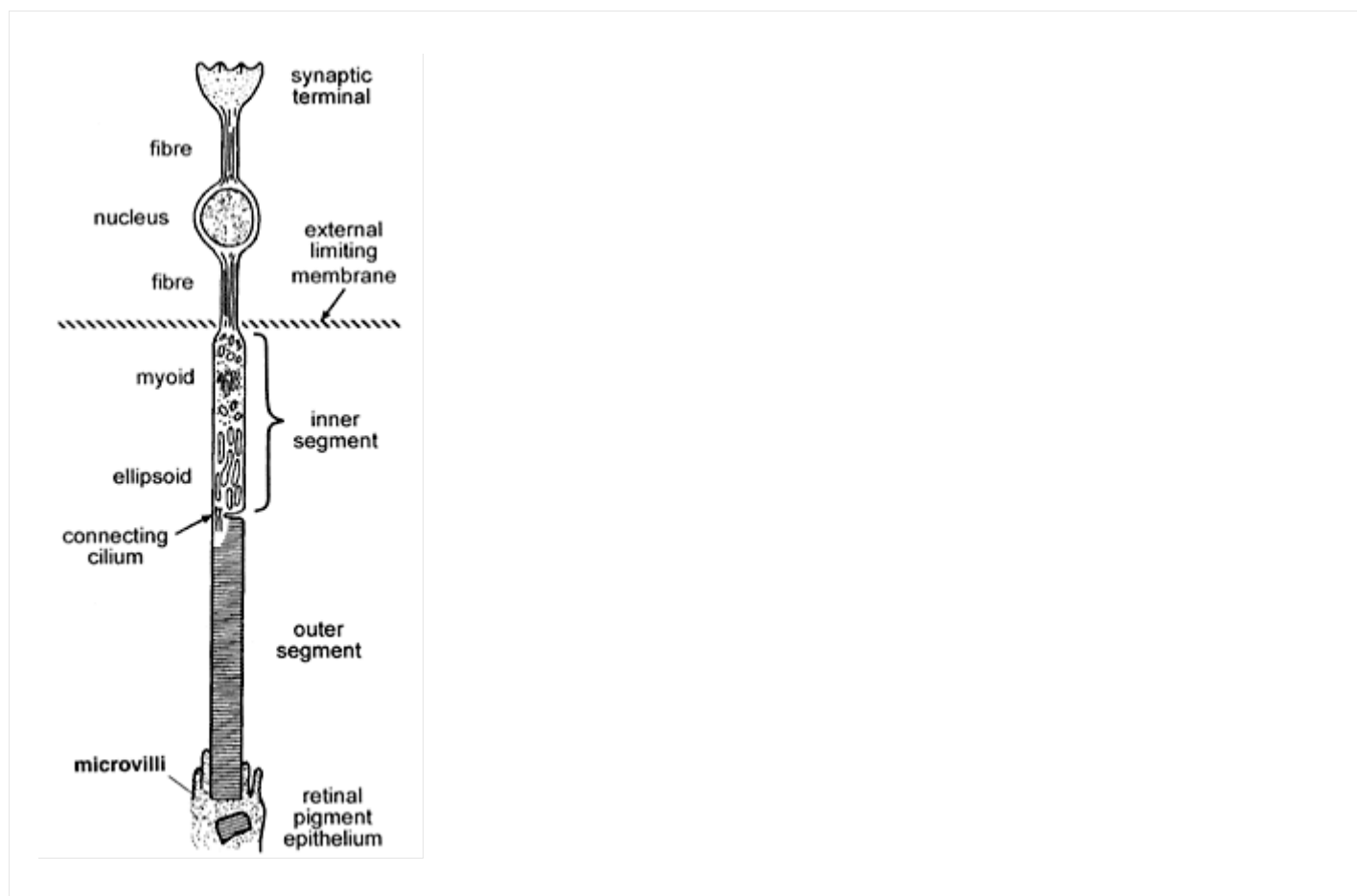


图 4. 视杆感光细胞示意图。（经伦敦皇家眼科医师学会许可，改编自 Young RW, 《鲍曼讲座：生物更

新：在眼睛中的应用》，*英国眼科学会 会刊*
102 :60, 1982 年。)

1980 年发表的一篇论文首次解释了脉络膜的一个已知特性。¹⁸ 也就是说，脉络膜的血流量非常高，远远超过视网膜的营养需求，尽管视网膜的代谢非常活跃，正如前文所述。该论文引用了早期的实验，这些实验表明，在死亡动物身上造成视网膜灼伤所需的光能远低于在活体动物身上造成的灼伤。

文章接着描述了动物实验，这些实验表明，脉络膜血流量减少会使视网膜更容易受到光致热损伤。脉络膜承担了眼部 85% 的血流量，其单位组织血流量在人体所有组织中最高，甚至比肾皮质高出四倍。作者还指出，流经脉络膜的血液中氧气含量极低。

脉络膜毛细血管（*脉络膜毛细血管层*）形成丰富的血管丛，紧邻视网膜色素上皮（RPE）外侧，主要位于其中央区域，两者之间仅由一层极薄的膜（*布鲁赫膜*）分隔。RPE 吸收过量光线会在外层视网膜产生热量，必须将这些热量散发出去，才能避免对自身及其周围精细复杂的生物机制造成热损伤。

本研究的作者有力地论证了脉络膜的一项重要功能，即凭借其（局部而言）丰富的血流以及与视网膜色素上皮（RPE）的紧密相邻，起到散热器和冷却装置的作用。

用。更令人着迷的是，同一批研究人员的进一步研究表明，存在中枢（通过大脑）光介导的神经反射来调节脉络膜血流，光照越强，血流量越大。

^{19 , 20}

因此，显而易见，人视网膜要发挥作用，视网膜色素上皮（RPE）和脉络膜都必不可少。但这两个结构都是不透明的，RPE 是因为含有黑色素，脉络膜是因为含有血液和黑色素。由此可见，为了使光线能够到达感光细胞，RPE 和脉络膜都必须位于神经感觉视网膜的外部；因此，我们可以得出结论，人类和脊椎动物视网膜的倒置结构是有其合理原因的。^{21, 22}

</sup> 还有两个与这种倒置结构相关的设计特征需要考虑。

中央凹

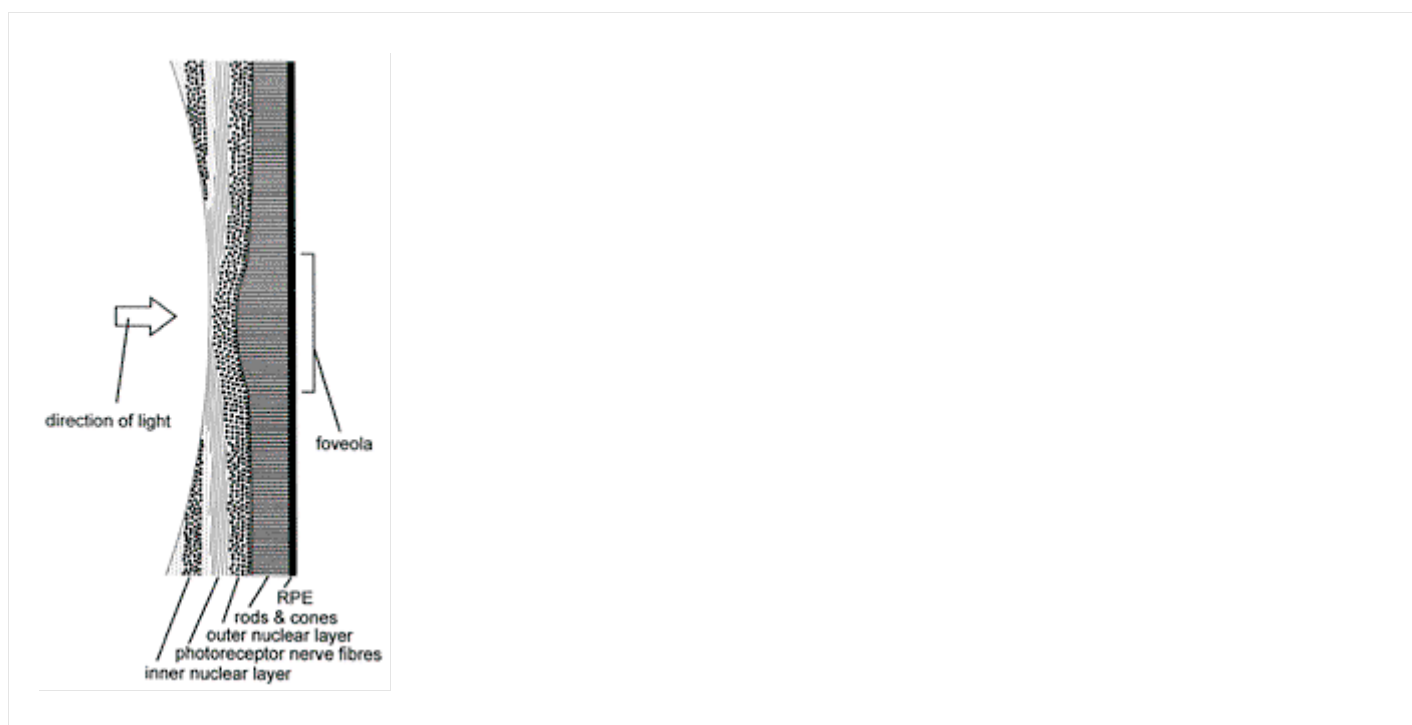


图 5. 人类中央凹横截面示意图。

尽管除了细小血管中的血液外，神经感觉视网膜几乎是透明的，但其中央区域（称为黄斑）的结构更为精细。视网膜和大脑枕叶皮层（也称为视觉皮层）²³（视网膜将视觉信息传递至该区域）的结构使得视觉轴（视线方向——见图 2）上的视力达到最大值。视觉轴穿过中央凹，中央凹位于黄斑中心，是一个圆形凹陷的底部，凹陷边缘倾斜（图 2 和图 5）。从中央凹向视网膜周边，视力逐渐下降。因此，负责感知红色、绿色以及可能还有蓝色的感光细胞²⁴在中央凹处的密度最高，达到每平方毫米 150,000 个²⁵，而中央凹的直径仅为 300-330 微米²⁶。

此外，中央凹的视锥细胞与其他区域的视锥细胞不同，它们更高、更细长、更笔直，并且精确地沿轴向排列，以达到最佳的视力和敏感度。在这个区域，血管缺失，视网膜也更薄，仅由感光细胞（视锥细胞）和极少的支撑组织构成。神经感觉视网膜的内部神经元从中央凹呈放射状移位，以确保光线畅通无阻地进入，并消除其他区域发生的少量光散射（图 5）。中央视网膜主要负责颜色和形状感知，而周边视网膜则更多地负责光线和运动检测以及夜视。与这些功能相一致，中央凹的感光细胞与神经节细胞的比例较低（1 : 1.2

或更低），光学像差也最小。相比之下，视网膜其他区域的感光细胞与神经节细胞的比例则相反，每个神经节细胞对应 4-6 个视锥细胞或多达 100 个视杆细胞。

28、29

叶黄素

人眼的光学系统使得环境光强度在视网膜黄斑区达到峰值，而视网膜周边区域的强度则低得多。因此，黄斑区黑色素含量更高（因为其视网膜色素上皮细胞更高，单位面积内的数量也更多）这一点意义重大，而且视网膜中央区域还含有黄色色素叶黄素（希腊语：*xanthos*，意为黄色）。在视网膜的这一区域，叶黄素渗透到两层界膜之间的所有神经感觉视网膜层，并集中在视网膜细胞中，包括神经元和支持组织细胞。

³¹ 近年来，人们注意到在中央凹内表面存在一簇视网膜支持组织细胞（以首次描述它们的穆勒细胞命名），它们形成一个锥体，其顶端堵塞了中央凹（图 5）。³² 除了为中央凹提供结构支持外，人们认为穆勒细胞，特别是在这个位置，还起到叶黄素储存库的作用。

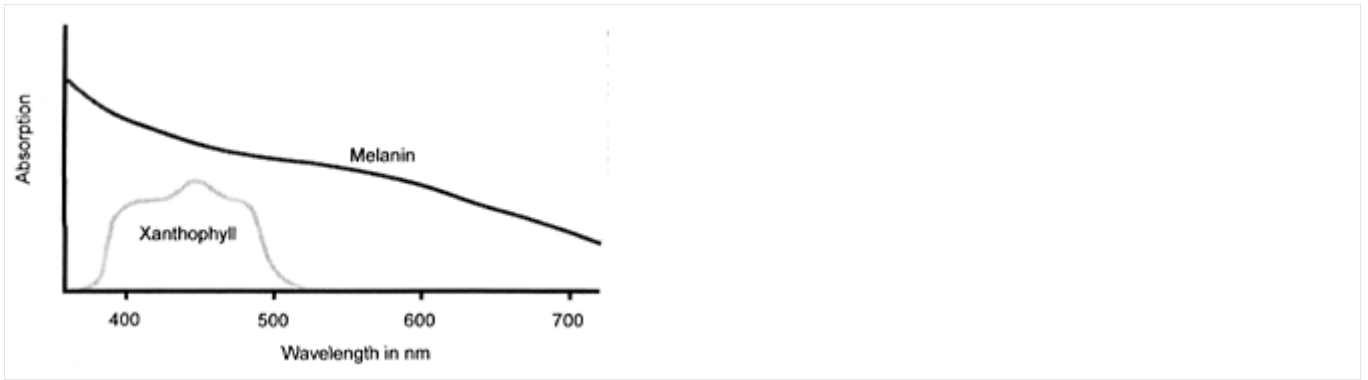


图 6. 眼色素光谱吸收（来自各种来源）。

视黄酸叶黄素是一种类胡萝卜素，其化学结构与维生素 A 相关，其吸收光谱峰值约为 460 nm，范围从 480 nm 到 390 nm（图 6）。

³³、³⁴、³⁵、¹³、³⁶ 它通过吸收大部分可能造成损伤的短波长可见光（即蓝光和紫光）来帮助保护神经感觉视网膜，因为这些光更容易被小分子和结构散射。³⁸研究表明，视网膜对光损伤的敏感性随波长的减小呈指数级增长，对紫外线（UVR）的敏感性是蓝光的六倍。

³⁹然而，几乎所有波长短于 400 nm 的非电离辐射都会被角膜和晶状体阻挡，

⁴⁰只剩下光谱蓝光部分 420-450 nm 的危险波段，而叶黄素可以有效地屏蔽这一波段的辐射。

⁴¹

这种色素的存在在实践中得到了充分证实。过去眼科医生使用氩激光时，最初并未去除发射的蓝光；叶黄素会吸收蓝光，从而对神经感觉视网膜造成不必要的灼伤。因此，现代眼科氩激光器被设计成只发射绿光。

³⁵

盲点

由于视网膜的倒置排列，将信息传递到大脑的轴突（神经纤维）穿过视网膜内表面下方，汇聚到视神经乳头这一小区域，然后所有轴突一起从眼球发出，形成视神经。视神经乳头没有感光细胞，因此是盲的，从而在视野中形成一个小的盲点。进化论者也对此提出批评，认为这种盲点会给拥有这种盲点的生物带来显著的劣势。正如威廉姆斯所说：

“我们的视网膜盲点很少会造成任何困难，但很少并不等同于从不。当我暂时遮住一只眼睛驱赶昆虫时，另一只眼睛的盲点可能就会聚焦于一件重要的事情。” 42

尽管如此，这个问题需要从整体上看待：盲点位于视觉轴 15° 处（距中央凹 3.7 毫米），相对于眼球的视野而言非常小，仅占不到 0.25%。⁴³如上所述，视网膜上某一点距离中央凹越远，其视力和敏感度就越低。在光适应状态下，视神经乳头周围的视网膜的视力仅为中央凹视力的约 15%。

⁴⁴ 我们可以合理推断，威廉姆斯所提到的单眼患者盲点带来的理论风险可以忽略不计；因此，单眼患者驾驶私家车（即非职业用途）被认为是安全的。

由于双眼视野重叠程度很大，一只眼睛的盲点会被另一只眼睛的视野覆盖。诚然，一只眼睛被遮挡或丧失是一种障碍，但这并非由于上述原因导致的盲点。更重要的是，在视力至关重要的危险情况下，立体视觉（双眼距离或深度知觉）的丧失以及*周边* 视野的中度**缩小**才是真正的障碍。

然而，假设造物主为了避免威廉姆斯所描述的情况，创造了一只巨大的单眼，这只眼睛拥有两个相同的光学系统，能够汇聚它们的视觉轴，并且两个中央凹之间的距离足够远，从而达到我们所享有的立体视觉水平。结果显然是不切实际的。事实上，这种假设的独眼生物一旦受伤或被遮挡，反而会更加脆弱。

人类和动物的视觉

人眼的视觉敏锐度虽然不错，但不如某些动物（例如鸟类）那么高，这些动物的视网膜也是倒置的。不过，视觉表现的差异与个体生物的生活方式需求有关。

人类的视觉系统无法像苍蝇那样精确灵敏地感知运动，但如果真能做到，我们就会看到所有的荧光灯和电视

屏幕都在不停地闪烁。我们的夜视能力不如猫，但在其他方面却胜过猫。例如，猫没有色觉。人眼在多功能性和性能之间达到了完美的平衡，这使得人类在古代取得了惊人的科技成就。近年来，人类制造出能够看清远方、微观世界以及在漆黑的夜晚也能视物的设备，极大地拓展了我们视觉的实际范围，使其超越任何其他生物。

无脊椎动物的垂直视网膜

一些进化论者声称，头足类动物（例如鱿鱼和章鱼）的倒置视网膜比脊椎动物的倒置视网膜效率更高。⁴⁶但这预设了倒置视网膜本身效率低下。如上所述，进化论者未能证明倒置视网膜是一种糟糕的设计，也未能证明其功能不佳；他们忽略了倒置视网膜的诸多合理之处。

此外，他们从未证明头足类动物的视力实际上更好。相反，它们的眼睛在“效率上仅接近某些低等脊椎动物的眼睛”⁴⁷，而且它们很可能是色盲⁴⁸。此外，头足类动物的视网膜除了是“倒置的”之外，实际上比脊椎动物的“倒置”视网膜要简单得多；正如布德尔曼所说，“头足类动物的视网膜结构比脊椎动物的眼睛简单得多，只有两个神经成分：感受器细胞和传出纤维”⁴⁹。它是一种波浪状结构，具有“长

圆柱形感光细胞，其视杆由微绒毛组成”

⁵⁰，因此头足类动物的眼睛被描述为“具有单个晶状体的复眼”。⁵¹视杆起到导光作用，其微绒毛的排列方式使得动物能够探测偏振光的方向——这破坏了基于反射的伪装。

最后，在自然环境中，头足类动物所处的光照强度远低于大多数脊椎动物，而且它们的寿命通常最多只有两到三年。人们对巨型鱿鱼的寿命一无所知；无论如何，人们认为它们经常出没于光线昏暗的深海。

⁵²因此，头足类动物对光损伤的防护需求较小。由于其结构是为了适应不同的环境，头足类动物的眼睛即使视网膜“倾斜”也能正常运作。

⁵³

总结与结论

乍看之下，视网膜倒置似乎存在一些缺点，效率也不高，但实际上这些反对意见微不足道。即使是进化论者也承认，倒置的视网膜对拥有这种结构的生物来说非常有利；⁴¹它赋予了它们极佳的视觉敏锐度。我们已经探讨了这种结构的必要性，而这取决于感光细胞的特性。

总结：

不同波长的光会对生物体造成极大的损害。视网膜除了是一个极其精密的传感器和图像处理器外，其结构显然也能够承受光的毒性和加热效应。眼睛具备完善的机制来保护视网膜免受日常生活中常见的辐射。除了角膜和晶状体几乎完全阻挡紫外线辐射外，视网膜本身也拥有多种额外的保护机制来抵御此类损伤：

- 视网膜色素上皮产生一些物质，可以对抗光辐射产生的有害化学副产物。

-
-
- 视网膜色素上皮在维持感光细胞的功能方面起着至关重要的作用。这包括回收和代谢感光细胞的产物，从而使感光细胞在不断受到光照损伤的情况下得以更新。

-
-
- 视网膜中央充满叶黄素，可以过滤和吸收短波长的可见光。

-
-
- 因此，感光细胞需要与不透明的视网膜色素上皮紧密接触。而视网膜色素上皮又需要与同样不透明的脉络膜紧密接触，这既是为了满足其营养需求，也是为了

防止（通过其大量血液流动产生的散热效应）聚焦光线导致视网膜过热。

如果人类视网膜像道金斯等进化论者所提出的那样，以另一种方式“连接”（即倒置配置），那么这两个不透明层就必须位于光线到达感光细胞的路径中，这将使感光细胞处于黑暗之中！

因此，我认为，视网膜倒置结构存在的主要原因（如果不是唯一原因的话）是，我们需要保护眼睛免受光损伤，而我们自然环境中的倒置视网膜无法提供同样的保护。

致谢

我衷心感谢 JD Sarfati 博士提出的建议，以及他在物理化学方面的信息和对头足类动物和其他动物眼睛的贡献，这些都对本文的撰写起到了重要作用。

读完这篇文章，你心里是否有一些触动？有没有一些新的想法，或者值得你认真思考的问题？或许，你也开始重新思考自己的信仰和人生的方向。

如果你愿意，现在就可以向上帝祷告，打开心门，成为祂的儿女。祷告不需要华丽的言辞，只要一颗真诚的心。你可以这样祷告：

天父上帝，

今天我来到你面前，愿意立定心志，宣告我相信耶稣基督是我的救主，是我生命的主。我愿意离开过去那些不讨你喜悦的生活方式，求你赦免我的过犯。靠着你的恩典，帮助我学习顺服你、爱人如己，活出你所赐的新生命。求圣灵每天引导我、扶持我，使我一生荣耀你的名。奉主耶稣基督的名祷告，阿们。

如果你已经做了这个祷告，愿你知道，你并不孤单。信仰的道路需要陪伴和成长。鼓励你在自己居住的地方，寻找一间合适的教会，与弟兄姐妹一同聚会、学习和成长。

如果你有任何疑问，或在信仰上需要帮助，欢迎随时写信与我们联系。我们愿意倾听，也愿意与你一同前行。