

液晶与光感受器的结构和功能

蔡浩然

(中国科学院生物物理研究所)

液晶早在八十多年以前就被人们所发现,并且进行了一些初步的探讨,然而只是在近年来对其所特有的物理性质进行了比较深入的研究,并且在实践中得到了广泛的应用,这样才引起人们进一步的重视。特别是从1968年报道了液晶的动态散射现象以后,继之又发现了很多其他的电光效应,因而七十年代在电子工业、航空工业以及医学等各方面越来越广泛地应用液晶,国内外在这些方面早已有了不少报道,不拟赘述。本文仅从视觉光-电能量转换的角度,来谈谈液晶与光感受器的结构和功能的关系。为了便于说明这一问题,先对液晶态以及液晶与生命现象等作一简单的介绍。

一、液晶态和液晶的分类

我们知道,一般固态的晶体,都是由分子(或原子)有序排列组成的,不具有流动性。若把任何一种普通的晶体加热到一定的温度,则晶体内的分子排列,很快由有序状态而转变成成为杂乱无章的无序状态,并且还具有流动性,晶体也就从固态变为液态。这种从固态转变成液态的温度,通常称之为熔点。从固态转变为液态这种相变现象,通常在比较狭窄的温度范围内(如 $1-2^{\circ}\text{C}$)发生。

有些有机化合物的相变则与上述情况完全不同,这些化合物不是由固态直接转变为液态,而是要经过一个介于固态与液态之间的过渡状态,人们把这种过渡状态称之为介晶态(Mesomorphism),或称液晶态,简称液晶(Liquid crystals)。液晶态既具有液态的流动性,同时又具有固态的有序性。把这类化合物从固态变为液态的温度范围称为相变温度范围,其下限

(T_1)称为熔点,低于熔点是固态;把相变温度范围的上限(T_2)称为清亮点,温度高于清亮点,就成为各向同性的液态。只有在 T_1-T_2 这个温度范围内才是液晶态。

目前发现具有液晶性质的有机化合物有几千种之多,而且还在继续不断地发现。对液晶材料进行分类的方法,通常有三种:

1. 按分子排列的方式,可分为四类:

(1) 近晶型(Smectic) 分子呈棒状,分子的长轴相互平行,排列成层,分子能在本层平面上活动,能绕长轴旋转,但不能来往于层与层之间,其规整性近于晶体,故称近晶型。

(2) 向列型(Nematic) 分子亦呈棒状,分子的长轴也是平行或几乎平行地排列,但不成层,而是有如一把铅笔装在一个长的圆筒之中,它的结构较灵活,对外来的激励较敏感,具有很多种的光电效应。

(3) 胆甾型(Cholesteric) 主要是胆固醇衍生物,分子呈扁平形,平躺着排列成层,同一层内的分子长轴相互平行,而层与层之间分子长轴是不平行的,而是稍有旋转,每层约旋转 15° ,就这样层层地叠起来形成螺旋结构。当若干层分子扭转达 360° 而又回到原来的方向时,在这种分子排列完全相同的两重复层之间的距离便是其螺距,不同的螺距能有选择地反射出不同波长的光波。微小的外界能量作用,即能使螺距改变。

(4) 多角型(Hexagonal) 主要是亲液性液晶,在本文第三节中将较详细地加以介绍。

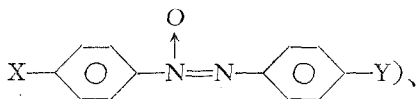
2. 按制备方式,可分为两类:

(1) 亲热性(Thermotropic) 液晶材料在晶体熔化或熔体冷却过程中出现液晶态。由于

化学结构的不同以及分子间的作用力不同,因而分子可以排列成不同类型的液晶态,如上述的近晶型、向列型、胆甾型等。它们之间可以是互变,也可以是单变。

(2) 亲液性 (Lyotropic) 这是由两种或两种以上的物质组成的体系。液晶材料溶于一定的溶剂中,根据溶质与溶剂的性质不同、比例不同,既可形成近晶型、向列型和胆甾型,也可以成为多角型。生物体内的液晶主要是亲液性液晶。

3. 按化学结构,又可分为: 苯叉型 (通式为: $X-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}=\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{Y}$)、偶氮型 (通式为: $X-\text{C}_6\text{H}_4-\text{N}=\text{N}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{Y}$)、氧化偶氮型 (通式为:



联苯型 (通式为: $X-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}_6\text{H}_4-\text{Y}$) 等等。这方面较详细的内容,可进一步参阅有关资料^[1]。

二、液晶与生命现象

从液晶的发展史来看,把液晶与生命现象连系起来考虑并不新鲜。最初发现液晶的是一位澳大利亚的植物学家 F. Reinitzer。他在 1888 年观察到一种胆甾醇脂 (Cholesteryl benzoate) 具有两个熔点 (145℃、175℃), 这种物质超过 145℃ 时,则呈混浊的液相 (即液晶相), 在 175℃ 时则变成透明的液相。后来德国物理学家 O. Lehmann 对上述问题作了进一步的研究,在 1915 年他用英文发表了有关液晶的论文,而且在这篇文章中也涉及到液晶在生物体中的作用问题。另外在液晶研究的初期,都是用一些与细胞有关的材料进行。因此,从一开始,液晶的研究就是和生命现象连系在一起的。可是后来由于缺少对液晶的实际应用,而且关于液晶的结构和性质的知识也有限,因此有关生物体内液晶态的研究进展较少。

随着液晶在工业上得到越来越广泛的应用,近十年来对液晶的研究有了很大的进展。自 1965 年召开第一次国际液晶会议以后,这种国际液晶会议几乎每隔一年就召开一次,在每次会议上都有关于生物学方面的液晶态研究的报告,而且逐届都有所增加。在 1974 年的第五届国际液晶会议上,生物液晶已成为八个专题之一。另外,近年来在一些生物专业性杂志上,有关生物体内液晶态的文章也愈来愈多。

我们知道,通过对生物的长期观察与研究,显然生物体既不可能是各向同性的液态,也不可能是固态。完全用固态或液态的观点,都不能较满意的解释生命现象,而液晶态则能较好地说明一些生物的特性和更能阐明生命的奥妙。液晶态是在生物体内进行生化反应较为适合的状态。可以说液晶在生命过程中的作用,它代表的不是生命物质的成分,而是生命本身的物理化学状态。

有人用量热法和核磁共振等,测量了一些细菌膜及其类脂的相变温度,发现培养基的温度若低于从固态到液晶态的相变温度时,则细菌停止生长,也就是说要维持其正常生理机能,则类脂必须处于液晶态^[2]。人的脑磷脂从凝固态转变为液晶态的温度也是与人的正常体温相一致的。另外人体肾上腺皮质,髓鞘等的类脂在 37℃ 时也是液晶态。这都充分说明在正常生理温度范围内,有机体的一些组织和细胞可能都处于液晶态,而液晶态对有机体保持正常的生理功能可能又是不可缺少的条件。

随着分子生物学的发展,生物膜的研究也愈来愈深入,而生物膜的结构与功能,现在看来又与膜的液晶态有密切的关系,甚至认为液晶态是膜的生命活动所必须的条件。有关生物膜的模型,有人认为以液晶态的模型较为合理,这与 Singer-Nicolson 的“流动镶嵌”学说^[3]也是一致的。另外,机体某些部分液晶态的改变,则可能导致某些疾病的出现,例如细胞的癌变,则可能与细胞内分子排列的有序性下降有关,还有胆石的形成,动脉粥样硬化等疾病的出现,都可能与液晶态的变化有关,因此研究生物液晶对

阐明某些疾病的发病机理也是会有帮助的。

我们知道,固态、液态和气态对机械和电磁现象等的反应都受到一定的局限。液晶态则由于它所固有的物理特性,能灵敏地反应外界的热、光、声和化学等环境变化,而本身耗能却很小。物质在液晶态内也象在液态内一样,能进行扩散,而且能有选择地把能量和信息向远处传播。因此,生物体的感觉器官(如眼、耳、鼻、舌等),接受外界的信息(如光、声、味等),并把它转变为电脉冲,通过神经最后传递到大脑,这些能量转换和神经传导等机能,可能都与生物体的一些感受器和神经组织是处于液晶状态有关。近年来的确不断地发现一些感受器和神经结构是处于液晶态,或具有液晶的性能。众所周知,人体或动物体的感受器,实际上就是相当于工程技术上的“换能器”,而且有机体的这种“换能器”具有极高的灵敏度,例如人眼的一种司暗视觉的光感受器(视杆细胞外段),在暗适应状态下,便能觉察出一个或数个光子,这是目前工业上最灵敏的辐射接受器所不能及的。所以对生物感受器液晶态的研究,从仿生学的角度来寻求工程技术上所需要的高灵敏度、高效能的换能器件,可能会有一定的实际意义。另外,在生物体内的液晶,多半为亲液性液晶,这种液晶态的产生和保持,主要依赖于溶质与溶剂的相互关系,受温度变化的影响较小,即相变温度范围要比亲热性液晶宽得多,因此研究生物体内的液晶态,对寻找环境温度变化范围很宽的器件所需要的液晶材料,也可能会有所帮助。

三、液晶与细胞结构

前面已经谈到,按液晶制备的方式不同,可以分为亲热性液晶和亲液性液晶。我们知道,亲液性液晶是通过控制水或其他极性溶剂的含量来处理一些化合物进行制备的,它一般都是由两种或两种以上的化合物所构成的体系。两性分子和水,或两性分子、肥皂和水就是亲液性液晶的典型例子。生物体一般都是由蛋白质、类脂、糖、无机盐和水等构成的复合体系,而且蛋白质、磷脂等都是两性分子,因此生物体内的

液晶多半都是亲液性液晶。

在生物体内的一些两性分子,它的一端是带有极性的,能与水或极性溶剂结合,另一端则是不带极性的疏水部分,例如构成各种生物膜的主要成分的磷脂就是一种两性分子,每一个分子都由磷脂酰碱基的极性部分和脂肪酸碳氢链的非极性部分所构成,磷脂的极性基团指向水,而其非极性的脂肪酸碳氢链则集在一起与水隔离。这种分子在水中的溶解特性如图1所示。

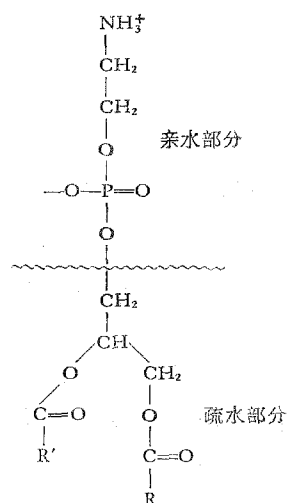


图1 磷脂分子在水中的状况

在有水和有机化合物存在的生物体内,磷脂分子是作生物膜的构筑材料用,它既可排列成片层的形式,又可排列成多角形的样子。例如从人脑中提取的脑磷脂与水组成的体系,用X射线衍射的方法进行研究,发现在这种体系中有片层和多角形两种液晶存在。片层由水和磷脂层相互交替而构成(如图2A)。而多角形则按水的多寡不同,有两种可能采取的形式,或是水分子充满圆柱间隙,或是磷脂分子充满圆柱间隙,水在圆柱之中。有人将人脑的磷脂经钨酸固定、染色后,用电镜观察,所得到的结果与X射线衍射所得到的结果是一致的。现在认为,在含水较少(5—22%)的情况下,则排列成片层结构,含水较多时则排列成多角形,其中,水为中等量时(34—60%)则如图2(B),水更多时(80—90%)如图2(C),水再多则变成各

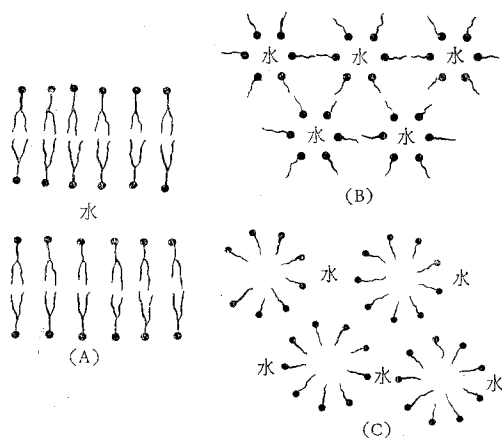


图2 磷脂分子在水中的几种排列方式

相同性的真溶液,没有水则呈固态。

一般认为,包在细胞外面的细胞膜(质膜)是由类脂与蛋白质组成的近晶型液晶,而在细胞膜内面的则是向列型液晶(如图3)。例如红血球就有可能是这样的液晶态体系。根据表面能的计算,若把一滴这样的液晶放到液体中,则液晶滴的形状将根据其周围液体的性质不同而形成扁圆形至长圆形等各种形状。而红血球恰好一般都是扁圆形的。

有髓神经纤维的外面,包着由许旺氏(Schwann's)细胞绕成一层层髓鞘,在电镜下观察,这种髓鞘也是一些排列整齐的片层结构。最近有实验事实表明,这种髓鞘就是类脂双分子层组成的近晶型液晶。而且用核磁共振的方法,测定了它的相变温度范围,在生理温度下髓

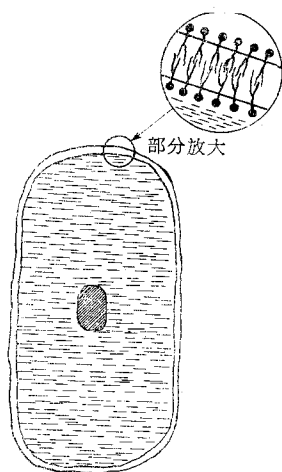


图3 细胞液晶结构的模式图

鞘处于液晶态^[4]。

有一些功能比较复杂的细胞,除了具有包在细胞外面的质膜外,在质膜的里面也还有一些膜结构,称这种膜为细胞内膜,特别是在前面提到的一些具有换能作用的感受细胞,就具有这种细胞内膜的结构。下面就着重谈谈眼睛中的光感受器结构与液晶态的关系。

人和脊椎动物司暗视觉的光感受器是视杆细胞的外段,在其中有近千个由两层膜构成的小圆盘有序地叠在一起。这些小圆盘是在个体发育过程中,由细胞膜向内陷而形成的。用电镜观察发现,每层膜又是由厚度为20埃的二个高电子密度层,夹着一个厚度为35埃的低电子密度层而组成的(图4A)。这些膜主要由类脂和蛋白质镶嵌而成,而在蛋白质中又主要是具有感光作用的视色素。由于这些小圆盘有序而整齐的排列,因而视杆外段具有明显的双折射等光学活性。我们知道,作为电镜观察的标本是经过固定、包埋和染色等手段而制作成的,不可能代表生活状态的实际情况。用X射线衍射的方法,则能采用未经上述处理的新鲜湿标本进行实验。通过X射线衍射研究发现,在这种盘膜上,蛋白质能沿盘膜表面在两维空间上自由运动,因而说明这种盘膜在生活状态下,并不具有与晶体一样的固定晶格,而是处于液晶态^[5]。其次,通过对蛙视杆外段二向色性的研究^[6,7],发现其视色素的生色团是平躺在盘膜上的,但生色团的取向经常不断的改变,因而也说明具有流动性。若用戊二醛固定后,则生色团的取向成为固定不变。这也进一步说明视杆

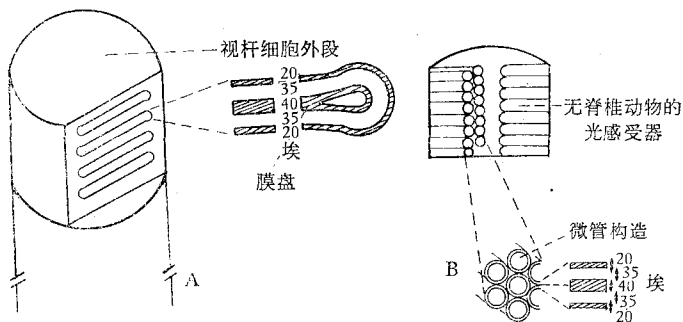


图4 脊椎动物和无脊椎动物光感受器模式图

盘膜在生活状态下处于液晶态。第三,在一定限度内,类脂能加到盘膜上或从中去掉,如果蛋白质是排列成固定的晶格,那末必然就会有固定的、适合积存于蛋白质中的类脂量,而不能较多或较少;对于液晶态的膜,则类脂分子的多少,仅会使蛋白质分子间的远近距离有所改变。第四,温度对X射线衍射图的影响,也进一步支持了盘膜是液晶态的看法,因为发现盘膜在较高温度时比在低温度(4.5℃)时,蛋白质分子靠得更近些^[5]。总之,通过电镜的观察,发现视杆外段盘膜片层结构的有序排列;通过X射线衍射和二向色性等研究,又发现在这些有序排列的片层结构内的分子,不是固定不变的,而是组成它的蛋白质和类脂分子,在沿片层表面的二维空间上能作相对的运动,因此现在认为这种盘膜的片层结构,可能就是近晶型液晶态。

在光感受器内,除了上述排列成片层的结构外,也还有一些排列成微管结构,例如,在无脊椎动物的光感受器内,就不是片层结构,而是彼此平行的微管结构。一般认为这种微管结构也是由光感受器两侧的细胞膜变形而成。在电镜下观察,这种微管也是由厚度为20埃的两个高电子密度层,夹着一个厚度为35埃的低电子密度层所构成(图4B)。故它的构造和脊椎动物光感受器构造基本相同,只不过它是微管的形状,而不是片层的形状。这种微管状结构是否就是前面所谈到的一种多角形的液晶态,需要进一步探讨。值得指出的是,具有这种微管的无脊椎动物感受器,按一定的形式镶嵌排列,就能检察偏振光,而人和脊椎动物则通常是没有这种机能的。

四、液晶态与早期感受器电位(ERP)

物质处在液晶态时,它兼具液体和晶体两个方面的种种特性。液体方面的特性主要指流动性、粘度、变形等;晶体方面的特性主要指热、光和电磁等物理特性。在这里不准备一般地介绍大家所熟知的液晶的一些特性,而着重谈谈液晶的光电效应,以及光感受器的早期感受器

电位(ERP)与液晶态的关系。

Kusabayashi 和 Labes 首先观察到了近晶型液晶的光电效应现象,后来又有人较详细地报道了向列型液晶的光电效应^[8],他们把向列型液晶装入涂有氧化锡或金作电极的玻璃板液晶屏中,当用聚光灯照射液晶屏时,即产生一个电动势,受照射侧电极的电位为负,照射另一侧,则极性倒转。在大约500勒克斯以下,这种光电效应的电压与照度成正比,在照度更高时达到饱和值,最大开路电压可达500毫伏。产生电位的作用光谱与该液晶材料的吸收光谱是一致的。当向列型液晶材料处于固态和各向同性的液态时,都没有这种光生伏特效应出现。其产生的机理虽然尚不清楚,但认为分子排列起重要作用。

我们知道,当以强光刺激眼睛时,能立即引起光感受器产生一种所谓的早期感受器电位(ERP)。用足够强的闪光作刺激时,这种电位是由两个成分(R_1 与 R_2)所组成。若从角膜表面进行引导, R_1 为正相, R_2 为负相,然而在生理温度下,是以引导电极为负相的 R_2 为主。ERP的振幅为毫伏数量级,亦与闪光强度呈直线关系,而且在闪光强度足够大时亦达到饱和值。ERP的作用光谱也和视色素的吸收光谱相一致,多次反复给以闪光刺激,随着视色素的不断被漂白,ERP振幅也不断降低;若再使眼睛暗适应,则由于视色素的再生,ERP振幅又可升高。ERP的产生机理也虽然还不大清楚,但有人认为与视色素分子在漂白过程中形成偶极子的电荷位移有系。有关ERP的较详细的情况,可参阅有关的资料^[9]。

从以上简单的叙述,就不难看出ERP与液晶材料的光电效应有很多相似的特点。还有一些实验事实表明,ERP的产生虽然与光感受器中视色素的光化学反应和热化学反应有关,但更离不开视色素分子在光感受器的片层结构上的有序排列和流动性。迄今为止,还未见有人报道用闪光照射视色素的溶液能引起ERP,下面就分别叙述一些有关ERP依赖于光感受器外段的有序性和流动性的实验事实。

温度实验: 有人将摘出的大鼠眼睛,在不同的温度下加温10分钟,然后冷却再引导 ERP,同时还用显微分光光度法对视网膜进行测量,发现在 48℃ 以下加温 10 分钟,对 ERP 的振幅和视色素分子的有序排列都无影响。高于这个温度,ERP 的振幅下降,视色素的排列也开始紊乱。而在 58℃ 加温 10 分钟,则 ERP 完全消失,视色素分子也完全失去有序的排列,就如同在溶液中一样。我们知道,在这样的条件下处理后,光感受器内的视色素分子,并不会发生热变性,光化反应仍能够正常地进行。因此 ERP 的消失,是可能与其在光感受器内有序排列的丧失有关的。

遗传缺陷动物的实验: Arden 等用有遗传性视网膜变性的大鼠作实验材料,观察其 ERP 变化与视杆细胞外段片层结构变化之间的关系。他们发现,这种动物在生后 17—20 天,外段组织结构正常,也能够引出正常的 ERP,其振幅甚至比正常对照组的振幅还大。可是到出生后的第 20—30 天,虽然视杆细胞外段的视色素分子仍继续增加,但 ERP 的振幅却显著下降,这时外段的结构已开始紊乱,在第 30 天有一半的外段受到影响,到生后第 60 天,外段结构完全破坏,ERP 也完全消失,从而也说明,若要能引出 ERP,则视色素分子必须有序地排列在视杆细胞外段的盘膜结构上。

胚胎发育实验: 一些日本学者,曾对鸡胚发育过程中 ERP 的出现进行了观察。他们发现在鸡胚发育的第 13 天,才有正负双相的 ERP 出现,这种电位亦随反复多次的闪光刺激,其振幅不断地下降,暗适应后,则能使之恢复,因而说明这种电位是与光化学反应有关。到孵化的第 17~18 日后,就能引出典型的、振幅很大的 ERP。结合形态学上的观察,证明在胚胎发育的第 12~13 日光感受器就出现了片层结构,而到第 18 日以后,片层结构的形成与视色素的合成迅速地增加。这也说明 ERP 的产生和振幅的大小,是与光感受器中的视色素以及片层结构形成都有密切关系的。

以上这些实验都充分说明,只有视色素分

子的有序排列,才能引导出 ERP。不仅如此,有序地排列在片层结构上的视色素分子或其生色团,还必须具有流动性,才能出现 ERP。

用甲醛浸泡过的大鼠眼睛,仍能引出正常的 ERP,只是波形稍有改变。然而用戊二醛处理后,则使 R_2 完全消失,只能引出很小的 R_1 。另外,经甲醛处理过的视网膜,用化学的方法仍能提取出占其总量 98% 的视色素,但用戊二醛处理后的视网膜,却只能提取出占其总量 3% 的视色素。这说明用戊二醛处理后,由于某种原因,使视色素在视杆细胞外段固定得更加牢固,而以甲醛处理则没有这种效应。有关视杆细胞外段的二向色性的实验表明,由戊二醛处理后,二向色性是恒定的,不随视色素分子被漂白后的时间而变化^[6],这说明视色素分子在盘膜上是不能运动的。而正常的视网膜,或用甲醛处理过的视网膜,只能观察到瞬时二向色性^[7],这也就是说这种二向色性是在漂白光作用后几十微秒内即消失,从而说明视色素分子在盘膜表面是能绕轴旋转的,这就证明视色素分子在盘膜上必能具有高度的流动性。从而说明经戊二醛处理后视网膜,正是由于这种流动性的丧失,因而不能引出正常的 ERP。另外,当温度降低到 5℃ 以下时,负向的 R_2 亦消失,这是否可能是由于在光感受器内已从液晶态转变为固态?值得进一步探讨。

总之,ERP (尤其是 R_2) 的出现,要求视色素分子在光感受器内既是有序的,又是能流动的,这也就是说,需要处在液晶状态。所以 ERP 有可能是由于处在液晶态的视色素分子受光子的作用而出现的一种光生伏特效应。

五、液晶态与光感受器激发

液晶态并不只是生物组织所特有的物理状态,也不是物质处在液晶态就会有生命活动。然而液晶态却能较好地使生物的结构与机能联系起来。例如不溶于水的物质,由于两性分子的存在,使之成为亲液性液晶,有序地排列成片层结构,并在流动时仍保持分子的定向。这样,分子内的一些化学基团,就有足够的机会与溶液

中的物质接触而起反应,因而提供了进行生化反应的非常有利条件。就光感受器而言,液晶态对于它完成感受光的机能,是很关键的。我们已指出,若光感受器处于液晶态,则能引出 ERP。那么液晶态与光感受器激发的关系又如何?

关于 ERP 在光感受器激发过程中的作用,我们以前曾指出^[9],ERP(尤其是 R₂)的出现,意味着光感受器膜上的视色素分子构型的改变而引起膜结构发生变化,因而改变膜对钠离子的通透性,出现 LRP。然后,再逐级地使视网膜中其他的神经元兴奋,以致最后影响神经节细胞的脉冲式神经冲动的发放,经视神经最后传递到大脑。现在从液晶的观点来加以考虑,所谓膜结构的变化,实际上有可能就是由于有序排列成液晶态的分子的流动性,暂时局部地发生改变。在有生命活动的情况下,这种改变,有可能使之对离子的通透性发生变化,而且还能沿着液晶态的结构向远方传播。

总之,处于溶液状态下的视色素分子,虽然可以正常进行一系列的光化反应和热反应,但引不出感受器电位。有序排列于盘膜上,处于液晶状态下的视色素分子,即使是无生命活动(如在缺氧数小时之后,以及模拟的人工类脂双分子膜^[10]),在进行光化反应时,也能引出 ERP 或类似 ERP 的电位。当然能够引出 ERP 时,并不一定能引出 LRP,例如在缺氧的情况下,光感受器的 LRP 很快就消失。但是只要能引出 LRP,就一定还能引出 ERP。由此看来,LRP 的产生,也要求光感受器处于液晶状态,不过还要不断地供给氧气,以及其周围环境还要有正常的离子浓度。在这样的条件下,构成膜的视色素分子在发生光化学反应时,既出现 ERP,又能使光感受器膜对离子的通透性发生变化,改变光感受器的极化状态,因而产生 LRP。极化状态的恢复,还需要有离子泵的参与,一些离子才能逆离子梯度而移动,这些都与生命现象所特有的新陈代谢过程供给其能量分不开。尽管如此,看来视色素分子以液晶状态存在,仍然是光感受器激发的重要基础。

以上是基于目前有关 ERP 和 LRP 产生的

学说,从液晶的观点,来说明液晶态与光感受器激发的关系。另外,我们还可以期待对液晶态(特别是亲液性液晶)进一步深入的研究,总结出更符合客观实际的理论,从只需要微小的能量作用下,就能使液晶的物理特性发生明显变化的角度,也有可能对阐明光感受器激发过程的能量转换问题提供理论依据。例如引起胆甾型液晶螺距改变所需的能量可用下列公式表示:

$$E = \frac{1}{2} K V \left(\frac{1}{P_1} - \frac{1}{P_2} \right)^2$$

式中 K 为常数; V 为体积; P 为螺距,其脚标则代表两个状态。Ferguson 等^[11]根据上述公式计算即可得出,若用可见光直接照射胆甾型液晶,引起其螺距变化所需的能量为 2×10^{-4} 尔格/厘米³,我们知道,螺距有了微小的改变,则反射出的光波的波长也不同。按脊椎动物视杆细胞那么大的体积计算,则引起螺距改变的能量仅需 10^{-16} 尔格,这比绿光的一个光子的量值 ($h\nu = 3.3 \times 10^{-13}$ 尔格)还小。前面已经提到,脊椎动物的视杆细胞,在暗适应的状态下,是能觉察出一个或数个光子的,因此若以螺距改变为尺度,则胆甾型液晶察觉可见光的灵敏度比视杆细胞还要高。在视杆细胞中,的确含有胆固醇一类的物质,有的动物这类物质的含量甚至还比较高,但到目前为止,还没有足够事实说明光感受器内就是胆甾型的液晶。然而,这却给我们提供了一个重要的启示:用液晶态的一些基本理论,也可能有助于阐明光感受器的激发过程。

参 考 资 料

- [1] 周梅初: 武汉大学学报(自然科学版), 1975, 1, 64.
- [2] Steim, J. M.: *Liquid Crystals and Ordered Fluids*, Plenum Press, N. Y. p. 1, 1970.
- [3] Singer, S. T. et al: *Sci.*, **175**, 720, 1972.
- [4] Lecar, H. et al: *Biophys. J.*, **11**, 141, 1971.
- [5] Vanderkooi, G. et al: *BioSci.*, **21**, 409, 1971.
- [6] Brown, P. K.: *Nature New Bio.*, **236**, 35, 1972.
- [7] Cone, R. A.: *ibid*, **236**, 39, 1972.
- [8] Hirotake Kamei, et al: *Jap. J. Appl. Phys.*, **11**, 1385, 1972.
- [9] 蔡浩然: 生物化学与生物物理进展, 1975, 3, 49.
- [10] Tein, H. T.: *Bilayer Lipid Membranes (BLM)*, Marcel Dekker, N. Y., 1974.
- [11] Ferguson, J. L. et al: *J. Amer. Oil Chem.*, **45**, 120, 1968.