

打开生命时钟, 重塑生命节律*

郑志刚[†]

(华侨大学系统科学研究所 信息科学与工程学院 厦门 361021)

2017-11-13收到

[†] email: zgzheng@hqu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20171203

Deciphering biological clocks, and reconstructing life rhythms

ZHENG Zhi-Gang[†]

(Institute of Systems Science, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

摘要 2017年诺贝尔生理学或医学奖授予了因“发现调控昼夜节律的分子机制”的三位美国科学家。发现的背后是一系列动人心魄的故事与一长串科学家的名字。文章对人类历史上关于生物钟的认识及基因机制研究的历程进行了回顾, 论述了包括生物节律涌现在内的生命复杂性研究的重要科学意义与应用价值, 并对研究范式及其中医科学化进行了反思。

关键词 生物钟, 昼夜节律, 基因调控, 系统生物学

Abstract The 2017 Nobel Prize in Physiology or Medicine was awarded to Jeffrey C. Hall, Michael Rosbash and Michael W. Young for their discoveries of molecular mechanisms controlling circadian rhythms. There are a number of exciting stories and a long list of scientists that contributed to these findings. In this review we review the history of the exploration of biological clocks and the studies of genetic and molecular mechanisms of circadian rhythms. The scientific significance and prospective applications of biological complexity including the emergence of biological clocks are discussed. We also discuss the paradigms of complex systems and the necessity of introducing scientific analysis into traditional Chinese medicine.

Keywords biological clock, circadian rhythm, gene regulation, systems biology

一年一度令人瞩目的诺贝尔生理学或医学奖于2017年10月2日揭晓, 三位美国遗传学家杰弗里·霍尔(Jeffrey C. Hall), 迈克尔·罗斯巴什(Michael Rosbash)和迈克尔·扬(Michael W. Young)由于“发现调控昼夜节律的分子机制(For their discoveries of molecular mechanisms controlling the circadian rhythm)”而获奖^[1]。他们的代表性工作包括: 克隆出能够调节果蝇生物钟的周期基因^[2-4]; 提出生物钟转录翻译负反馈回路概念^[5]; 揭示出

周期基因所编码的信使核糖核酸和蛋白质含量随昼夜节律而变化, 并揭示更多生物钟相关基因以及它们产物的运作情况^[6]。

生物钟是生物体内周而复始的节律, 生物节律在物理表现上与其他各种自然节律一样有幅度、周期、相位, 这是生物钟动态行为的外在表现, 而生物钟作为自我维持的生理和行为节律发生器则具有内在机理, 对外在表现的内在机制研究是科学的基本教义, 也是应用的基础^[7]。复杂系统凡是以涌现出现的行为往往都有微观层次的基本合作协同机制。

* 国家自然科学基金(批准号: 11475022)、福建省闽江学者专项资金(批准号: 15BS401)资助项目

“沉舟侧畔千帆过”，生物节律在分子层次的研究成果背后是一系列动人心魄的故事和一串长长的科学家名单^[7]，展开的是未来生物学与更多学科融合交叉式的发展范式和蓝图。

1 生命节律：一个古老而重要的话题

生物节律无处不在，不同生物有着不同节律，同一生物也有多种节律。有些动物每年周期的冬眠、有些植物每年周期的长叶落叶，动物还有如呼吸和心跳等更快的周期。人们最为熟知的节律便是昼夜节律。不仅动物睡眠有昼夜节律，很多其他行为和生理指标也都有昼夜节律。

人类很早就已注意到生物钟对身体健康的重要影响，中国人在两千多年前的中医经典《黄帝内经》中就已有“阴阳平衡”、“天人合一”、“子午流注”等概念。中医针灸认为“人与天地相应”，即人体功能、活动、病理变化等受自然界气候变化、时日等影响而呈现一定的规律，应“因时施治”、“按时针灸”、“按时给药”，选择适当时间治疗疾病以获得较佳疗效。中医认为人体中十二条经脉对应于每日的十二个时辰，不同经脉中的气血在不同时辰也有盛有衰。

公元4世纪，人们已经知道罗望子树叶活动的昼夜差别。意大利生理学家桑托里奥(Santorio Santorio, 1561—1636)曾用30年记录自己从早到晚的摄食量、排泄量和体重变化，发现有昼夜规律。1729年，法国天文学家麦兰(Jacques Ortous de Mairan, 1678—1771)进行了一个著名实验，他将含羞草放置在全暗处一段时间，观察其叶片和花的变化，发现叶片活动不依赖阳光，仍然有张有合，证明了植物内禀的昼夜节律和生物时钟，但他当时没有勇气在实验基础上提出生物时钟的观点(图1)。达尔文通过研究植物的节律，提出昼夜节律具有可遗传性，触碰到了生物钟的实质。

大量研究表明，无论是复杂生物还是简单生物，它们都拥有内部时钟帮助其调节生理活动以适应昼夜变化。所有地球上的生命都受其控制，以适应24小时的周期。这种调节机制被称为“昼夜

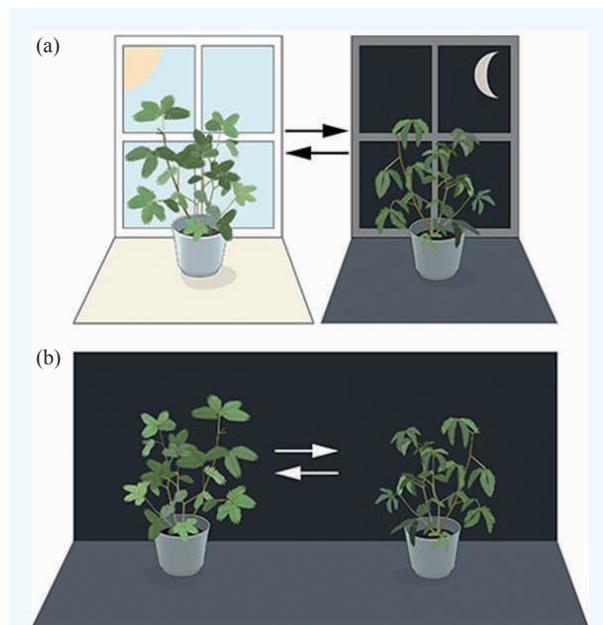


图1 含羞草内部生物钟实验 (a)含羞草叶片会在白天朝向太阳展开，在傍晚闭合；(b)置于完全黑暗的环境下发现，含羞草仍然保持其正常的展开—闭合的昼夜节律^[1]

节律(circadian rhythm)”，它源自拉丁文的“circa”(“周期”)及“dies”(“一天”)。

生物节律研究的生物学实际意义很重要，但迄今为止仍不十分清楚。一种可能理解是，在进化过程中生物活动与地球自转活动相匹配可以节省能量或提高效率。这已在蓝绿藻、拟南芥等培养生长实验中得到验证。蓝藻通过光合作用从阳光中获取能量，并利用二氧化碳和水生产有机分子和氧气。在内部生物钟的作用下，蓝藻在日出之前即可提前启用光合系统，而在日落之后光合系统亦会遵循生物钟的指令而关闭，这就避免了夜间无用的资源浪费，节约下来的能量和资源可用于DNA复制和阳光电离辐射的受损修复。由此可见，生物钟对生命活动的最优化是有利的。这些观察反映了只有当内外源周期保持一致时才最有利于植物生长。

生物的内部时钟究竟如何起作用一直以来是一个谜团。早期科学家用电生理和解剖学研究生物钟，通过电极观察细胞的电活动，发现脑内特定部位SCN(视交叉上核)电活动的昼夜周期节律性，在鸟类发现松果体和哺乳类动物的主钟(master clock)。后来人们用遗传学特别是用前馈遗传

学来研究生物现象，通过随机筛选影响特定生物现象的突变。这是遗传筛选的优点，但有人认为遗传筛选有很大的缺点，主要是由于很多行为恐怕不是单个或几个基因所决定的，复杂的行为需要有很多基因参与。用遗传筛选对单个和少数基因有效，而对更多基因参与的行为可能效果较差。

2 生命节律：走入分子尺度的基因研究

生物钟研究的突破缘于遗传学的应用，小小的果蝇居功至伟。科学家们历史上因研究果蝇曾分别于1933、1947、1995和2011年四次获诺贝尔奖，2017年关于生物钟研究而第五次获奖让果蝇再度引人瞩目，成为生物界当仁不让的实验明星。

在生物钟分子机制的研究历程中有六位具有代表性的科学家曾做出开创性贡献(图2)，其中五位研究果蝇，一位研究小鼠^[7]。加州理工学院的本泽尔(Seymour Benzer, 1921—2007)和康诺普卡(Ronald Konopka, 1947—2015)开创了生物钟的基因研究，他们发现了第一个生物钟基因period(PER)；洛克菲勒大学迈克尔·扬的实验团队和布兰迪斯大学霍尔与罗斯巴什两个实验室的合作团队成功克隆并分离出PER基因。美国西北大学的

高桥(Joseph S Takahashi, 1951—)首先在哺乳类生物钟基因的研究中取得突破。

本泽尔是生物节律研究第一个“吃螃蟹”的人。他原是一名物理学家，1953年转到生物系任教，并开始分子生物学研究。他早期在分子生物学做出的重要工作包括发现遗传突变对应于DNA碱基序列的变化(1955年)以及给出基因的顺反子定义(1959年)等。此后他转向神经生物学领域，并以一个物理学家的素养敏锐地认识到基因和分子机制与神经生物学的关系，1971年的发现使他成为生命节律基因研究的开创者和先驱。

行为研究是生物行为在宏观层次的研究，而分子基因研究则是微观层次的研究。生物钟作为一种典型的生物行为，一直以来的研究都处于宏观层次。本泽尔从基因层面研究生物钟，就如同物理学家从分子层面研究热力学，而选择以果蝇作为研究对象，就如同物理学家以Ising模型来研究铁磁相变。这种突破传统研究范式的变化与本泽尔的物理学背景密切相关，而这种范式的前瞻性在生物学家中引起很大争议，一些生物界同事笑话他选择果蝇过于简单了，“研究脑袋愚蠢的果蝇是不是研究者的脑子有毛病”。一些聪明的学生也认为研究风险太大，不愿意加入他的实验室一起开展这方面的工作。尽管如此，还是有一些勇敢的年轻人加入到他的团队之中，本泽尔的团队在之后的四十年中取得了瞩目的成果，在包括神经生物学的很多方面都国际领先，其中关于生物钟的基因机制研究取得了历史性突破^[7]。

1971年前后，本泽尔和他的学生康诺普卡致力于找到控制果蝇昼夜节律的基因。他们发现一种未知基因，其突变会打破果蝇的正常昼夜节律，因此将该基因命名为period(PER)(节律基因)^[8]。很多人不相信他们能够找到生物钟的基因，包括本泽尔的老师、1969年诺奖得主德尔布鲁克(Max Delbrück, 1906—1981)。但节律基因的发现已是不争的事实。这是生物钟研究历史上的惊天大事。遗憾的是，本泽尔2007年去世，康诺普卡2015年去世。更为遗憾的是，康诺普卡在发现生物钟基因之后个人机遇不佳，他毕业后在



图2 生物钟基因研究的几位开创者。上图：本泽尔，下图自左向右依次为2017年诺奖获得者霍尔、罗斯巴什、扬^[1, 7]

斯坦福大学做过短暂博士后，1974年回加州理工学院任助理教授，但评终身教授时未通过，之后到Clarkson大学任教，因人事变动再次未获终身教授，1990年回到加州辅导高中生。如果他们健在的话，生物钟的诺奖历史恐怕要重新改写。罗斯巴什为康诺普卡撰写的悼词中说，“无法想象如果没有康诺普卡这个领域会是什么样”，足见1971年发现节律基因的开山意义。

本泽尔等人的工作并没有能够进一步解释节律基因到底是如何影响昼夜节律的，这一问题的答案在基因克隆大行其道的1980年代逐步浮出水面。当时，洛克菲勒大学扬的课题组、布兰迪斯大学的霍尔与罗斯巴什的团队均在竞争先克隆出果蝇的PER基因。1984年，霍尔和罗斯巴什紧密协作，与扬领导的课题组分别成功分离出PER节律基因^[2-4]，随后发现该蛋白质会受到昼夜节律控制，在夜晚积累并在白天降解，其浓度水平存在24小时的周期性起伏，这与昼夜节律相一致。

为理解这种昼夜周期的蛋白质浓度起伏的产生与维持，1990年，霍尔、罗斯巴什与博士后哈丁(Paul Hardin)提出简单的模型^[5]。他们假设PER蛋白会抑制节律基因的活动，即PER的基因转录PER的mRNA、翻译产生PER蛋白质的过程存在负反馈，则通过一条抑制反馈回路可以阻止PER蛋白质自身的合成，而PER的mRNA或蛋白质产生后又可以影响PER基因自身的转录，从而在一个连续的昼夜周期中形成节律。如果这一假设正确，那么PER蛋白质就是基因的转录调控因子。之后的一系列实验证实了这一设想，这是一个重要突破，使人们真正看到了PER基因的调控作用。

抑制反馈回路导致的转录调控设想获得成功，但也产生出新的问题，需要解决由细胞质产生的PER蛋白质如何抵达细胞核以抑制节律基因活动的问题。表面上这是一个细胞层次的问题，但实际上是基因层次的问题。随后一系列实验证据

表明，转录的调控过程不只由PER参与，还与多个基因有关，这说明影响生物钟不可能只有一个PER基因。这促使人们走上了继续寻找其他调控基因的漫漫征程。1991年，康诺普卡等发现第二个影响果蝇生物钟的基因Andante；1994年，扬发现第二种能够产生维持正常昼夜节律必要成分的节律基因timeless(TIM)。扬进一步证明了一种调节反馈机制，即当PER和TIM这两种蛋白质相互结合时，它们就可以进入到细胞核并发挥作用，抑制节律基因的活动并关闭抑制反馈回路，从而解释了细胞内蛋白水平出现变动的原因(图3(a))。之后，扬又确定了能编码导致PER蛋白积累的doubletime(DBT)基因，它控制了这种变动的频率。这为解释蛋白质水平变动如何与24小时周期密切吻合提供了线索(图3(b))。

进一步的一个重要工作是确认能否在其他生物中找到同样的基因、调控因子和同样的调控机理，尤其找到哺乳类生物钟的基因。这个突破由西北大学的日裔科学家高桥完成，他成功发现了影响老鼠生物钟的“钟”(Clock)基因^[9]。高桥团队还发现人、鸡、蜥蜴、蛙、鱼等也都有Clock基因。之后人们陆续又发现哺乳类的三个PER基因PER1、PER2、PER3，并发现PER基因表达在SCN，其表达随昼夜节律变化而变化，这一节律受Clock基因的调节。有趣的是，1998年，霍尔—罗斯巴什组通过遗传筛选在果蝇中找到的Jrk基因即果蝇的Clock基因。这样，在果蝇中发现

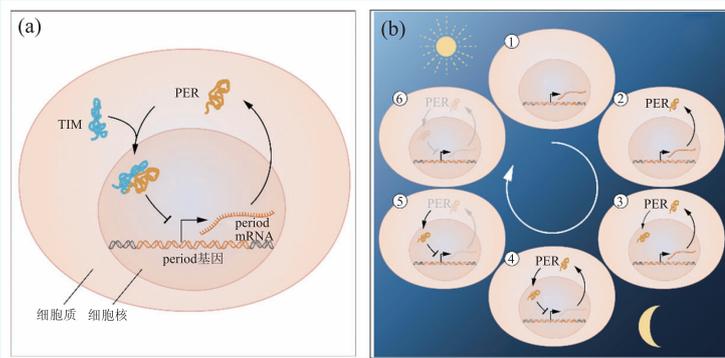


图3 (a)昼夜节律钟分子组成的简单图示；(b)以昼夜节律为例的节律基因反馈调节机制的简单图示^[1]

的PER基因在哺乳类中找到了，而在老鼠上发现的Clock基因也在果蝇中发现，这种生物钟基因的高度保守性显示了生物钟在基因水平的共同性、普适性和可遗传性。

随着一个个调控基因的发现和研究，驱动生物钟的内在机理也逐渐明朗。从果蝇到人存在同样一批控制生物钟的基因，它们编码的蛋白质合作共事，节律性地调节细胞内的基因转录，且都采用负反馈模式，并与光和温度等外界因素协调，从而对应于地球自转的近24小时节律。三位获奖者的发现建立了关键的生物钟机制原理。在接下来许多年里，生物钟机制的其他分子结构得到了阐释，解释了该机制的稳定性和功能。

3 生命节律:走入生命复杂性的研究

随着生物技术的发展，近年来人们对于生命深层次的行为有了越来越精确深入的认识，包括从早期生理学对生物体器官、组织和系统的认识，到细胞生物学对细胞层面生命过程的观察，再到分子生物学对蛋白质、DNA和基因层面结构的认识。人们在这些不同层次都获得了大量数据和经验结果，并总结了很多一般性结果。然而，

从微观到宏观层面的涌现行为研究不是生物学家的特长。

与此形成鲜明对比的是，物理学家自20世纪30年代起发现了一系列像超导、超流等有趣的平衡态相变现象，这些现象反映出热力学系统可以随温度降低出现有序及不同序之间的转变。对非平衡化学反应热力学的研究则发现了包括化学振荡(称为化学钟)等在内的一大批有趣现象，它们均是非平衡态相变行为。物理学家发展了基于统计物理学的相变与临界现象理论和耗散结构理论、协同学、自组织理论、非线性动力学等理论框架，成功揭示了这些复杂系统行为背后的物理机理。这些研究积累为进军生命复杂性提供了大量的理论方法和思想准备。

事实上，物理学家群体一直都在关注生物学的研究，且曾为生物学的发展无论是在基础理论还是实验手段、仪器设备等方面都贡献良多。对于生命现象，量子力学开创者之一薛定谔就曾撰写了《生命是什么》这本至今仍然畅销的高级科普读物，以独特的视角对生命现象的物理机理以及新陈代谢等生命活动与熵的关系进行了阐述。近年来，物理学家对生物学得到的大量实验数据结果表现出极大兴趣，并有一大批人投身生物物理学研究，结合生物实验的大数据，系统生物学作为一门全新的针对生命复杂性的交叉学科应运而生。

一批“不安分”的物理学家的研究触角在过去30多年里还延伸到物理学和生物学等传统自然学科以外的生态学、经济学、社会科学等诸多领域。自1998年和1999年的小世界网络和无标度网络提出以来，复杂网络研究成为复杂系统研究的焦点，网络科学本身逐渐建立起来，建立了复杂系统研究的新思路，它反过来又对其他具体学科起到了反哺作用。在此过程中，生命现象的研究获益良多，以复杂网络思想构建的基因调控网络、蛋白质作用网络、新陈代谢网络、神

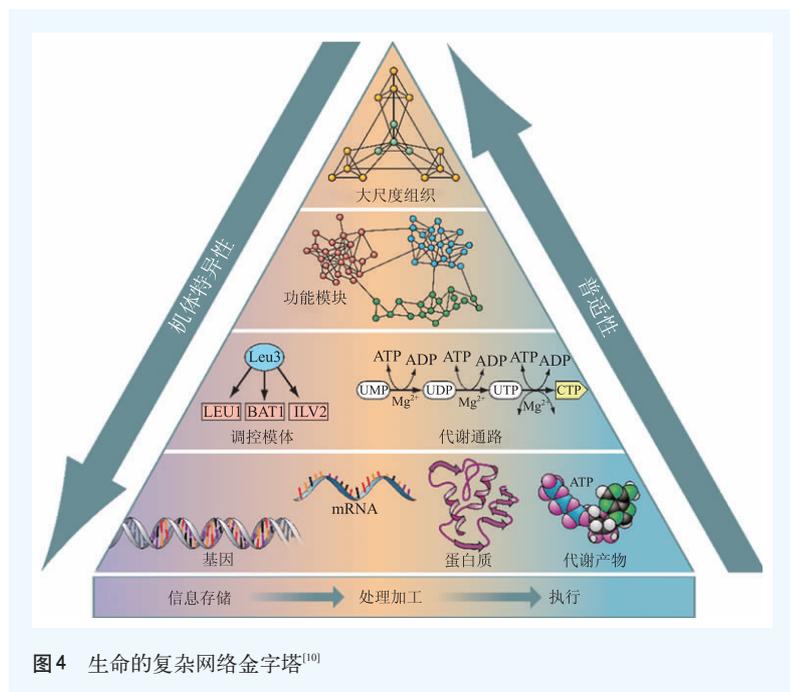


图4 生命的复杂网络金字塔^[10]

神经网络和脑网络等大大加深了人们对不同层面生命涌现的理解, 构筑起生命现象的网络金字塔(图4)。综合老三论(系统论、控制论和信息论)、新三论(耗散结构论、协同论、突变论)、非线性动力学理论和复杂网络理论, 系统科学作为一门处于方法论层次的学科逐步建立起来, 它强调将物理学家惯用的还原论和整体论有机结合来对付复杂系统。系统生物学就是系统科学的成功实践。

系统生物学的发展使得人们以全新视角来认识生物钟现象。自80年代以来, 科学家成功分离克隆了PER、TIM、Clock等10多种节律基因。每个生物钟都由多个基因来调控, 这说明生物钟的基因调控机制是通过一个复杂的基因调控网络来实现的。如果回顾历史, 就需要重新来认识本泽尔等人1971年的工作。他们的发现具有开创意义, 但最初认为一个基因即可决定生物节律的想法未免过于简单, 这在当时已经引起了很大争议。例如, 行为学家赫尔什(Jerry Hirsch)就认为不能用单一基因来解释生物节律等行为, 也不能通过遗传筛选的方法来研究节律行为, 必须通过同时改变多种基因进行代间选择来推断。他们为此还曾发生过激烈的争论, 赫尔什甚至给本泽尔所在加州理工学院的每一位教授写信, 称其研究是“伪科学”^[7]。现在看来, 赫尔什与本泽尔的争论焦点不无道理。生物体作为一个复杂系统, 其生物钟是典型的复杂行为涌现, 无法简单用单一基因来加以诠释。

对于高等生物特别是人类来说, 生物钟基因及其相互关系就变得高度复杂。1970年代, 人们发现生命节律主要取决于人类大脑中的主生物钟, 它位于大脑的视交叉上核(SCN)。此后, 研究者在其他器官、组织和单个细胞中又发现了次要或外周生物钟调控的迹象。有证据表明, 活跃在大脑中的生物钟基因在肝脏、肾脏、胰腺、心脏等组织的细胞中也会周期性地表达和关闭。因此主生物钟与外周生物钟以及外界环境(昼夜节律等)的相互影响就变得尤为重要。这联系着复杂系统的同步问题。不同组织中的局部生物钟扮演的角色可能迥然不同。科学家发现, 局部生物钟的

同步也很重要。如果任何一个外周生物钟和主生物钟不同步, 就有可能导致肥胖、糖尿病、抑郁症和其他复杂疾病。生物钟基因发生突变, 同步就会被破坏, 这将导致肥胖及代谢综合征。这方面研究的突破对于医学应用有着不可估量的价值。

4 结语

生物钟的分子机制研究获诺奖对于很多人来说有些意外, 毕竟生物学热点众多。但仔细想一下我们会发现, 获奖的不是生物钟, 而是其分子机制研究, 因此这一课题并不冷门, 它所涉及的分子生物学研究本身就是人们关注的焦点。其次, 该课题具有高度学科交叉性, 是复杂系统体现其涌现特征极好的实例, 值得不同学科背景的科学家共同探索。生物节律的研究虽然是一个老问题, 但由于其基本机理研究的复杂性, 从分子和基因层次到生物层次的节律产生实际上是典型的复杂系统涌现行为, 具有很强的挑战意义。

生物钟的分子机制研究是一段激动人心的历程。生物学家们在寻找和识别节律基因的路上经历了非常多的挫折、弯路甚至错误, 而正是由于像本泽尔等一批开拓者的科学坚守和信念, 才使得生物钟的分子机制研究不仅具有当下的意义, 而且具有未来的价值。

生物钟研究具有重要的基础研究和应用价值, 但目前依然是一个复杂而开放的课题, 仍然遗留相当多的“硬骨头”。例如, 已经发现的参与生物钟的基因其调控机理仍非完全清晰, 迄今仍不十分清楚PER等蛋白质如何调控基因转录, 参与生物钟的多种基因蛋白若能构建很好的、定性基础上的定量数学模型或许可以对此有更好理解。发现更多的调控基因也是必须继续坚持的方向。对于比果蝇更为复杂的生物, 主生物钟与外围生物钟的协同、调控关系则远未清楚。

在应用方面, 生物钟与代谢以及其相关疾病的关系和机理、非24小时节律及其与昼夜节律的关系等基本课题的深入开展是生物钟分子基因层

面应用的基础。昼夜节律紊乱与心脏病、胃病、多种癌症、神经疾病、神经退行性病变以及精神疾病存在关联。如果我们对机体生物钟的角色有了更深的理解,则有可能让医学发生一场彻底的革命。如果能将昼夜节律和醒睡周期的相关信息与对疾病的诊断和治疗更有效地整合在一起,那么将能更好地改善健康、预防疾病,将所需的疗法疗效最大化。

生物钟研究获奖消息公布后,很多人说中医理论早已有之,关于生物钟的论述已愈两千多年。这恰恰是一种误解,我们需要反思。中医的子午流注诊疗理论等体现了古人对人体生物钟的直观认识,但缺乏微观求证,理论只停留在直观层面,应用也仅仅停留在“因时施治”“按时给药”等经验层次,并没有深究其背后复杂的基因根源或机理。现代分子生物学技术的发展迫切需要中医理论的科学化。一个典型例子是青蒿素。

参考文献

- [1] 诺奖官网对2017年诺贝尔生理学和医学奖的报道和介绍相关材料:https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/2017/press.html
- [2] Reddy P, Zehring W A, Wheeler D A *et al.* Cell, 1984, 38: 701
- [3] Bargiello T A, Young M W. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1984, 81: 2142
- [4] Bargiello T A, Jackson F R, Young M W. Nature, 1984, 312: 752
- [5] Hardin P E, Hall J C, Rosbash M. Nature, 1990, 343: 536
- [6] Nature 官网对2017年诺奖的解读:<http://www.nature.com/news/>

中医对其的利用已经有两千多年的历史,而屠呦呦2015年因青蒿素的发现获诺奖是因其为科学方法中药提取,而非传统中药,即“从中医古籍里得到启发,通过对提取方法的改进,首先发现中药青蒿的提取物有高效抑制疟原虫的成分,其发现在抗疟疾新药青蒿素的开发过程中起到关键性的作用”。因此,我们需要做的不是在传统理论宝库上吃老本,而是需要借助现代科学方法深入研究,精心求证,剖析机理,去粗取精。这才是真正保护我们祖先留下的瑰宝,也是祖国医学的未来发展方向。这个工作必须我们中国人来完成,也必将由我们来完成。

致谢 作者在撰写过程中参考了文献[7]饶毅教授的详尽历史解读,并与顾长贵等教授进行了讨论,在此表示感谢。

- medicine-nobel-awarded-for-work-on-circadian-clocks-1.22736
- [7] 饶毅. 勇气和运气: 生物钟的分子研究——饶毅深度解读2017年诺奖. 刊登于“知识分子”微信公众号: <http://mp.weixin.qq.com/s/33lqGxZuwtYhLXYwsJrMqQ>
- [8] Konopka R J, Benzer S. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1971, 68: 2112
- [9] Vitaterna M H, King D P, Chang A M *et al.* Science, 1994, 264 (5159): 719
- [10] Oltvai Z N, Barabási A L. Science, 2002, 298: 763

物理新闻和动态

双光控制的分子机器

法国科学家使用两种分子机器制成一种材料,受光照射时会涨大和收缩。其中一种机器是Feringa分子马达,这种马达受到紫外光照射时沿某一方向转动。当马达与聚合物网络连接时,将聚合物链编织起来,使网络收缩,因而做有用的功。但是,这种马达的转动方向不能改变,很难用来生成复杂的纳米机器。如今,法国Strasbourg大学Nicolas Giuseppone团队,使用称作调制

器的第二种分子机器克服了这一困难。这种分子机器可以使编织起来的聚合物链松散开,使材料扩展。调制器只有当受到可见光照射时才使聚合物链松散开。这样一来,材料受紫外光照射时收缩,而换成可见光照射时则扩展。研究人员还可以使用紫外光和可见光的组合照射材料,来控制扩展与收缩的速度。该团队目前在试图建造用这种分子机器供电的装置。有关论文发表在2017年3月20日出版的*Nature Nanotechnology*上。

(周书华 编译自 *Physical World News*, Mar 21, 2017)