

时间生物学的研究范畴与发展历程

为适应地球自转的 24 小时周期,地球上的动物、植物、微生物等绝大多数生物都具有生物钟(又称为近日时钟)系统,在不同层面上调节生理、代谢和行为的节律。生物节律现象自古就被人们所关注,研究生物节律及其生理功能、调节机制的学科称为时间生物学(Chronobiology)。

尽管人类对节律现象很早就开始观察并保存了一些记录,但是真正科学意义上的生物节律现象与机制研究则是到很晚才开始。其中一个重要原因可能是当时尚缺少可用的研究设备和方法,与其他学科的发展类似,生物节律研究的发展也需依赖其他相关学科和研究方法的不断进步(王正荣,2006)。

从 18 世纪开始,生物节律研究开始步入科学的轨道。19 世纪末到 20 世纪中期,生物节律相关的表型研究突飞猛进,从 20 世纪后半叶到现在,分子水平、基因调节通路以及网络调控方面的生物节律研究不断前行。

1.1 生物节律现象的早期文献记录与研究历史

在西方,对于生物节律现象的记载最早可以追溯至公元前 650 年,古希腊诗人在诗歌里提到过生命的节律现象。古希腊时期,医生希波克拉底(Hippocrates,前 460—前 370)注意到疟疾、伤寒等疾病的症状具有周期性,希波克拉底建议医生要注意病人症状的规律性,认为不规律的生活习惯可能影响健康。古罗马时期的医生盖伦(Claudius Galenus,129—199)也观察和记录了一些疾病的节律特征。公元前 4 世纪,在古代马其顿国王亚历山大大帝时代,生于希腊萨索斯岛(Thasos)的安德罗斯申尼斯(Androsthenes)船长随亚历山大大帝远征时,在波斯湾地区的提罗斯(Tylos,现为巴林岛)地区发现,罗望子(*Tamarindus indica*)类植物叶片具有在白天舒展、夜晚合拢的节律,并将之记录下来,当地人认为这种特征与睡眠有类似之处(McClung,2006)。实际上,人类最早对昼夜节律的描述多体现在对植物的观察上,因为一些植物叶片的昼夜运动非常明显。图 1.1 显示了欧文·邦宁(Erwin Bünning)记录的菜豆叶片的运动节律(Bünning,1973),菜豆叶片在白天舒展,在夜晚合拢。

古希腊著名的思想家、哲学家亚里士多德(Aristotle)认为早睡早起有助于健康。以上这些先哲们在当时的条件下能够提出这些正确认识非常可贵,但是揭示节律如何影响健康的谜底还需要等到千百年之后。1614 年,意大利医生散克托留斯·桑托里奥(Sanctorius

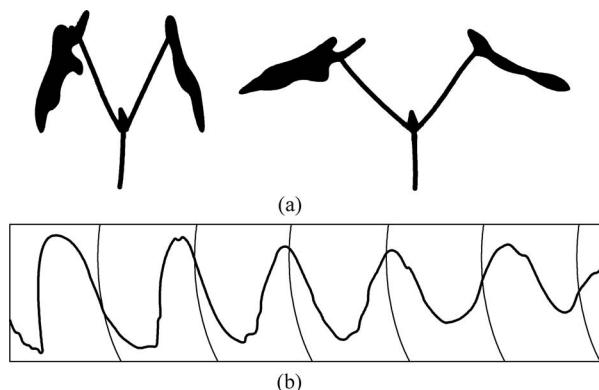


图 1.1 菜豆叶片的运动节律

(a) 叶片闭合和舒展的示意图；(b) 记录的叶片运动曲线

Santorio, 1561—1636)制作了巨大的秤,可以在秤盘上用餐或看书。他通过这个装置对饮食量的变化、人体的体重、尿液混浊度等指标进行了长达 30 年的检测,发现其中一些指标存在昼夜节律、月节律或季节性节律特征(席泽宗,2010)。



图 1.2 迪马伦画像(Édouard, 1861)

1729 年,法国天文学家、时间生物学家让·雅克·德奥图斯·迪马伦(Jean-Jacques d'Ortous de Mairan,1678—1771)(图 1.2)将含羞草在持续黑暗条件下培养,发现含羞草仍像处于自然状态的昼夜光暗交替条件下那样,在外界是白天的时候叶片张开,而在外界是夜晚的时候叶片合拢,保持叶片运动的节律。迪马伦的实验提示含羞草叶片的运动节律具有持续性和内源性。1757—1759 年,杜哈麦·杜·芒修(Duhamel DuMonceau,1700—1782)等重复或进行了条件更为严格的实验,确证含羞草在光照、温度保持恒定的条件下仍会表现出叶片运动的节律性(McClung, 2006)。这几个实验的重要意义在于,它们揭示了生物节律不依赖光照或温度的变化,即使在恒定的光照(或黑暗)和温度条件下

仍然会表现出节律性,因此生物节律是一种自主调节的内在机制。

欧洲在后来很长的一段时间里,与生物节律相关的文献记录非常稀少。13 世纪时,德国天主教会的阿尔伯特·马格努斯(Albertus Magnus,1193—1280)在他的书里提到植物的睡眠。1751 年,瑞典植物学家卡尔·冯·林奈(Carl von Linné)根据一天当中不同植物开花、凋谢的时间特征提出了花钟的设计构想,即用不同的花卉组成时钟,根据植物开花来判断时间。德国医生克里斯托夫·胡费兰(Christoph Wilhelun Hufeland,1762—1836)在 1797 年出版的著作中,提及了一些与人体生理有关的节律,并注意到了人在睡前和醒后的身高差异(Hufeland, 1880)。与胡费兰同时代的药剂师朱利安·维雷(Julien Joseph Virey)在他的博士学位论文里提到了生理水平的节律,后来在编纂医学词典时又提到了疾病和死亡的节律特征。

在迪马伦对含羞草叶片运动节律研究之后约一百年,奥古斯丁·德·坎多勒(Augustin de

Candolle)于1832年发现,在持续黑暗的环境里,含羞草的叶片运动每天都会提前1~2 h,因此这种周期并不是准确的24 h,而是介于22~23 h(McClung,2006)。这一发现意味着在不受外界环境影响的恒定环境里,生物节律能够自主运行,但内在周期会略微偏离24 h。

1.2 时间生物学的近现代发展历程

生物节律的生理和行为研究在20世纪取得了一系列重要进展。1910年,瑞士动物行为学家奥古斯特·罗雷尔(August Rorel)发现蜜蜂的觅食行为具有明显的节律特征,后来卡尔·冯·弗里施(Karl von Frisch)和英格堡·贝林(Ingeborg Beling)对蜜蜂觅食行为的节律和时间特征进行了更多的研究(Moore-Ede et al.,1982)。

从19世纪20年代起,人们注意到下丘脑的病变与睡眠障碍存在关联。1922年,柯特·里克特(Curt Richter)最早采用跑轮来研究啮齿类动物的行为节律(Moore-Ede et al.,1982)。里克特对哺乳动物生物节律的起搏器也做出了重要贡献,于1967年将之定位于下丘脑前端。1972年,罗伯特·摩尔(Robert Moore)、欧文·扎克(Irving Zucker)等众多科学家鉴定出了视网膜-下丘脑神经束(retinohypothalamic tract),并证实切除哺乳动物下丘脑前端的视交叉上核(suprachiasmatic nuclei)可导致多种生理、行为的丧失。1958年,Lerner等发现了对睡眠和节律具有重要调节作用的褪黑素(Karasek,1999)。

在时间生物学研究历程中,涌现出了一大批杰出的科学家。由于在时间生物学领域的先驱性工作及重大贡献,欧文·邦宁(Erwin Bünning,1906—1990)、尤尔根·阿朔夫(Jürgen Aschoff,1913—1998)和柯林·皮腾德里格(Colin Pittendrigh,1918—1996)三人被认为是时间生物学的奠基人(图1.3)。阿朔夫的主要贡献在于发现生物的各种节律、揭示节律的特征以及节律响应环境的变化规律等方面,皮腾德里格的贡献则主要在于生物节律振荡器的作用机理方面。



图1.3 生物钟研究领域的重要科学家(Pittendrigh,1993; Honma et al.,2001)

照片依次为:Erwin Bünning、Collin Pittendrigh、Jürgen Aschoff、Franz Halberg、Seymour Benzer、Michael Rosbash、Jeffery Hall和Michael Young

在 20 世纪后半叶,从事生物钟相关研究的科学家由于研究侧重点的不同而分为“clock”和“chronome”两个学派。其中,皮腾德里格代表的是以生物节律调节机制为研究方向的“clock”学派,以美国明尼苏达大学的弗朗兹·哈伯格(Franz Halberg,1919—2013)为首的“chronome”学派更注重对节律特征的研究及其在医学中的应用(Halberg,1969)。1960 年,在美国冷泉港实验室召开了第一次学术会议,不同学派的人共同讨论时间生物医学问题,来自全世界不同国家逾 150 人参加了这次会议。这次冷泉港会议被认为是不同学派的联合与统一(Refinetti,2016; Dunlap et al.,2004)。

1932 年,德国生物学家欧文·邦宁将周期长短不同的豆科植物进行杂交,发现子代的周期长短介于母本之间,说明调控生物钟的因素是可遗传的(McClung,2006; Bünning,1973)。19 世纪 60—70 年代,人们在草履虫、粗糙链孢霉、衣藻、果蝇等物种里发现了生物节律表型的突变品系,通过遗传学方法开展生物钟基因的克隆工作始于 19 世纪 70 年代。

1971 年,加州理工学院的罗纳德·科诺普卡(Ronald Konopka)和西摩·本泽(Seymour Benzer)(图 1.3)筛选出生物钟周期异常的果蝇,1984 年迈克尔·罗斯巴什(Michael Rosbash)课题组、杰弗里·霍尔(Jeffrey Hall)课题组和迈克尔·杨(Michael Young)最先克隆了果蝇的 *period (per)* 基因(Steingrimsson,2017)。1989 年,杰伊·邓拉普(Jay Dunlap)课题组克隆了粗糙链孢霉的生物钟基因 *frequency*(McClung et al.,1989); 1994 年约瑟夫·高桥(Joseph Takahashi)课题组克隆了小鼠的 *Clock* 基因(Vitaterna et al.,1994)。随后,哺乳动物的 *Per1* 基因以及与啮齿类动物 *tau* 表型的相关基因——CKI 基因也相继被克隆或鉴定出来。2017 年,迈克尔·罗斯巴什(Michael Rosbash)、杰弗里·霍尔(Jeffery Hall)和迈克尔·杨(Michael Young)三位科学家(图 1.3)由于对生物钟研究的杰出贡献而荣膺诺贝尔生理学或医学奖。生物钟研究的一些重要历史事件如图 1.4 所示。

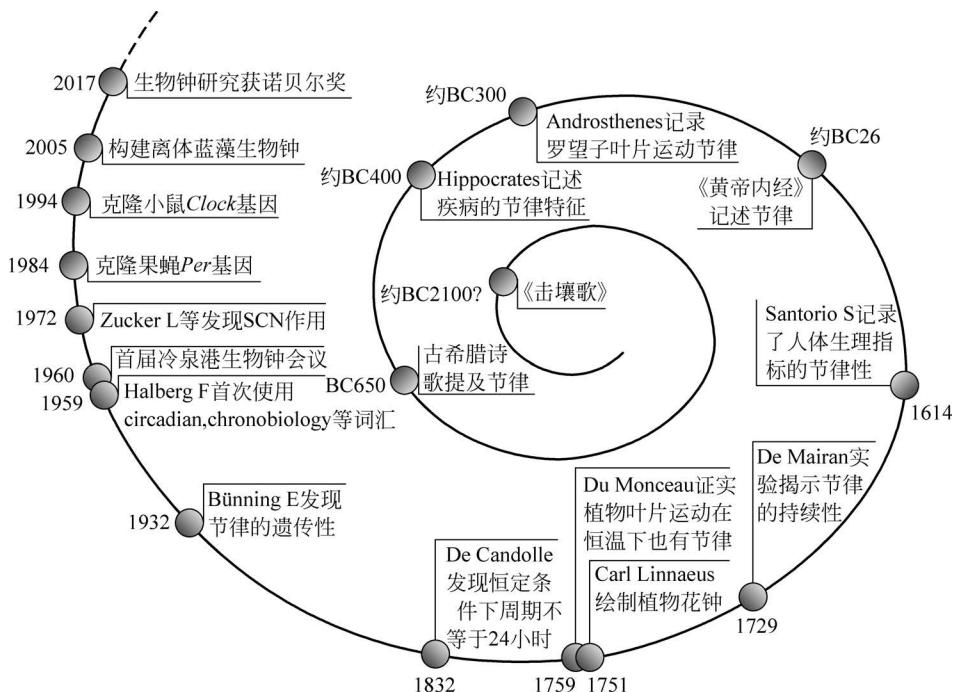


图 1.4 生物钟研究的一些重要历史事件

迄今,一系列模式生物的生物钟核心基因都已经被鉴定出来,生物节律的基本调节方式与机制也已经大概清楚。

1.3 时间生物学的研究范畴

“近日的”(circadian)和“时间生物学”(chronobiology)这两个词,都是由哈伯格最早提出的(Halberg, 1969; Refenitti, 2016; Cornélissen et al., 1989)。Chronobiology 包含 chrono 和 biology 两个词根,前者来源于希腊文 $\chiρόνος$ (*chrónos*),意思是时间,后者是生物学的意思。

在最初的文献里,时间生物学是指研究各种生物现象的时间特征,以达到客观描述生物的时间结构的目的(Halberg, 1969)。随着相关研究的进展,时间生物学的研究范畴也不断扩展,涵盖了各种生物的节律或周期性的现象与内在的调节机制研究,同时也关注生物节律与环境之间的相互作用。

时间生物学研究各种生物当中有明显节律特征的生理、行为现象及规律,这些节律现象可按周期长短进行分类,通常将周期位于 19~28 h 范围内的节律称为近日节律(circadian rhythm),周期短于 19 h 的节律称为超日节律(ultradian rhythm),周期长于 28 h 的节律称为亚日节律(infradian rhythm)(吴今义, 1987; Refenitti, 2009)。需要说明的是,时间生物学的涵盖范畴除了昼夜节律和近日节律以外,也包括月节律、潮汐节律、季节节律等。如皮腾德里格所说:“All biological clocks are adaptations to life on a rotating planet”,即所有生物钟都是生命对所在星球运转的适应,其中最为明显的节律特征,如潮汐节律、昼夜节律、月节律以及季节节律等(图 1.5)。

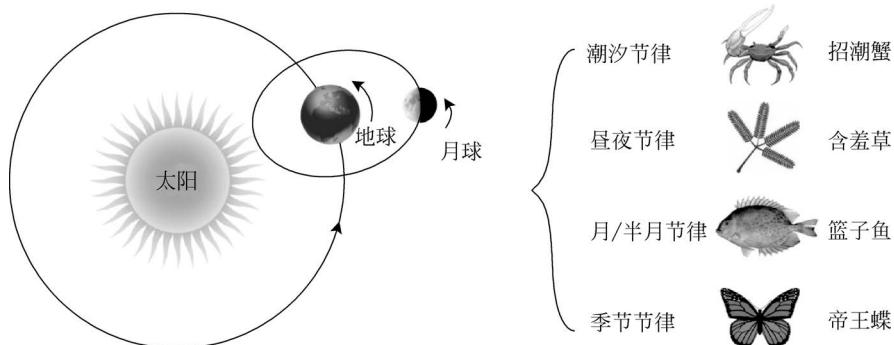


图 1.5 时间生物学研究不同周期的节律以及举例

不同生物在自然的光照、温度、潮汐等周期性变化条件下会表现出这些节律,而有些生物即使长时间处于光照、温度不变或不再有潮汐变化的恒定条件下,仍然会表现出周期与自然状态下接近的节律,分别称为近潮汐节律(circatidal rhythm)、近日节律(circadian rhythm)、近月节律(circalunar rhythm)以及近年节律(circannual rhythm)等(海老原等, 2012)。关于近日节律与昼夜节律的区别,将在后面有关章节中讨论。在潮汐节律当中需注意,不同地区的潮汐类型不同,如全日潮(一天内只有一次高潮和一次低潮)、半日潮(一天内有两次高潮和两次低潮)及混合潮(有时出现全日潮,有时出现半日潮)等,在不同类型

的潮汐地区,生物潮汐节律的周期也不同。

在各种节律当中,其他形式节律的研究在受重视程度和研究进展等方面都远不及近日节律。对于周期过短或过长的一些节律一般不在时间生物学的主要研究范畴之内,例如人的心律、呼吸以及神经元放电等,但是分析这些生理功能变化的昼夜特征则属于时间生物学的研究范畴。时间生物学研究涵盖多个研究层面,包括分子、细胞、生化和遗传,也包括生理、心理、认知和行为,甚至涉及生态和环境层面。时间生物学所用到的模式生物也有很多种类,包括原核生物(蓝藻)、真菌(粗糙链孢霉)、昆虫(果蝇、蟑螂、帝王蝶、蜜蜂、蚊子、蟋蟀、蚜虫等)、植物(拟南芥、大麦、番茄、大豆、菜豆等)、软体动物(海兔)、鸟类(麻雀、鸽子、企鹅等)、爬行动物(蜥蜴)、鱼类(斑马鱼等),以及哺乳动物(大鼠、小鼠、猕猴、松鼠猴、驯鹿等)。

时间生物学具有非常突出的交叉学科特征,经过近一个世纪以来的不断发展,时间生物学与生理学、行为学、心理学、医学、药理学、神经生物学、生态学、发育生物学、农学以及空间科学等诸多学科、方向存在广泛的交叉与渗透,相互支撑。时间生物学与一些热门或前沿学科也存在密切关联,如代谢、免疫、衰老、肿瘤等相关学科(郭金虎 等,2014)。

1.4 我国时间生物学的发展历程

我国古代人民很早就认识到了各种生物(包括人类自身)的一些节律。据考证,《击壤歌》是我国有关节律记载的第一首诗歌,这首诗歌据传是尧帝时代所作,但具体年代不详。《击壤歌》的歌词为:“日出而作,日入而息。凿井而饮,耕田而食。帝力于我何有哉?”其中前两句就表现了人们的劳动和作息节律(杨海明,1987)。

成书于战国至秦汉时期的古代医学宝典《黄帝内经》里提出了“人与天地相参也,与日月相应也”的观点,这里所说的人与日月相应,反映的是人的生理和健康受到日月运转周期的影响,体现了古代人民对环境和人体节律特征的认识。

中医针灸中的子午流注思想也体现了古代医生对于人体生理节律的朴素认识。《黄帝内经》认为,“五脏之气,必应天时”,意思是说人的脏器的功能遵循季节更替的规律而变化。中医认为,人体功能活动、病理变化受自然界气候变化、时日等影响而呈现一定的规律。春生夏长,秋收冬藏,是气之常也,人亦应之。人的脉搏也有“春弦、夏洪、秋毛、冬石”的说法,体现出了人体生理的季节性特征。根据这种规律,选择适当的时间治疗疾病,可以获得较佳疗效,因此有“因时施治”“按时针灸”“按时给药”等观点(宋为民,1986)。

古代中医在针灸中提出了子午流注学说,以“人与天地相应”的观点为理论基础,认为针灸治疗应当遵循医学穴位的开合时间。明代针灸医家杨继洲在《针灸大成》中认为,人体穴位的开合具有一定的时辰规律。子午是指时辰,流是流动,注是灌注,子午流注理论是把一天24小时分为12个时辰,对应十二地支,与人体十二脏腑的气血运行及五腧穴的开合进行结合。子午流注学说认为,人身之气血周流出入皆有定时,根据这种学说可以推算出什么疾病应当在什么时辰取什么穴位进行治疗。中医凝结了数千年来古代医生的宝贵经验,但是,仅靠经验难以自证,更难以阐释其中的机理,现代科学思维与科学技术的发展将有助于古老中医中的瑰宝部分重放光彩。

20世纪80—90年代,从国外生物钟研究相关实验室进修回国的王正荣、童建、赵子健、冼励坚,以及在国外工作的丁健明等人,为推动国内的时间生物学发展做出了重要贡献。1982年,时任国际时间生物学学会会长的美国明尼苏达大学哈伯格教授访问中国,后来中国中西医结合学会时间生物医学分会成立,对国内时间生物学研究的起步产生了很大的推动作用(王正荣,2006)。进入21世纪后,随着更多学者的回归,从事生物钟研究的队伍不断壮大,国内的时间生物学研究进入快速发展时期,与国际同行的学术交流在数量和质量上都有了很大的提升。2013年11月3—5日,国家自然科学基金委员会在生命科学部、医学科学部会同政策局,在苏州联合举办了主题为“生物钟及其前沿科学问题的探讨”的“双清论坛”(郭金虎等,2014)。共有27个单位的36名专家、学者参加了这次会议,对后来一段时期内引领和推动生物钟研究的发展起到了推动作用,是我国时间生物学研究的一个里程碑。

近十余年来,回国从事生物钟研究的科研人员不断增加,研究队伍不断壮大。目前,国内约有50个从事生物钟相关研究的实验室,分布于众多高校和研究所(表1.1)。2015年,中国细胞生物学学会生物节律分会成立,迄今已多次举办国际、亚洲地区以及国内的生物钟研究学术会议,对促进国内外生物钟研究人员的学术交流起到了很大的推动作用。时间生物学的发展推动了一些重大科研项目的立项,包括生物钟相关的农业转基因计划、科技部重大研究计划、航天医学项目、中国脑科学计划以及求索太空脑计划等项目,这些项目在时间生物学的基础和应用基础研究等领域的不同学科方向上进行深入探索。

表1.1 国内从事时间生物学研究的部分单位、机构

地 区	单 位、机 构
东北地区	哈尔滨工业大学,吉林大学,吉林农业科技学院
华北地区	北京生命科学研究所,中国农业大学,清华大学,北京大学,中国医学科学院,北京师范大学,中国科学院微生物研究所,中国科学院动物研究所,中国科学院北京植物研究所,中国航天员科研训练中心,首都医科大学,北京中医药大学,山西医科大学
西北地区	西北农林科技大学,西北大学
华中地区	武汉大学,华中科技大学,河南大学,华中农业大学,湖北工业大学,中南大学
华东地区	复旦大学,苏州大学,中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心,华东师范大学,浙江大学,南京理工大学,中国药科大学,东南大学,浙江理工大学,福州大学,安徽大学,中国科技大学,安徽农业大学,皖南医学院,蚌埠医学院
西南地区	四川大学,成都中医药大学,陆军军医大学,云南大学,贵州医科大学,遵义医学院
华南地区	中山大学,深圳大学,广东中医药大学,广西医科大学,中国科学院先进技术研究院

1.5 三周期“理论”

在英文中,“biorhythm”一词看起来也是“生物节律”的意思,与在学术范畴里代表生物节律的“biological rhythm”一词很像。但是,“biorhythm”反映的是一种缺乏客观依据的伪科学“理论”,这种“理论”主观臆断地认为人体内包含智力、情绪和体力三种节律,其中智力节律的周期为33 d,情绪节律为28 d,体力节律为23 d,因此这种“理论”也被称为三周期“理论”。三周期“理论”认为,这三种节律的周期自出生以来便是始终不变的,因此可以很

容易推测出人的一生中任何时间的生理状况,用以指导人们趋利避害,如同算命。“biorhythm”原本也有类似 circadian rhythm 的含义(Halberg,1969),但后来一般都是指三周期“理论”的节律。三周期“理论”所提及的三种节律只是出自臆断,而非源于任何的实验依据,并且三周期“理论”通常只吹嘘少数的“成功”案例来彰显其预测的准确性,但实际上由于掩盖了更多不支持的例证而缺乏客观性,存在幸存者偏差。

在一些书籍当中,三周期“理论”被认为是属于神话(mythology)而非科学的范畴。尽管具有很强的蛊惑性,但三周期“理论”只建立在主观臆测的基础上,这三种节律从何而来,何以不受环境影响?为什么没有个体差异?这些问题三周期“理论”都无法回答。与建立在客观实验观察与分析基础上的时间生物学不同,三周期“理论”缺少严格的科学依据,因此这种“理论”是一种伪科学。

郭金虎 审稿:徐瓔

参考文献

- 陈善广,王正荣,2009.空间时间生物学[M].上海:科学出版社.
- 郭金虎,曲卫敏,田雨,2019.生物节律与行为[M].北京:国防工业出版社.
- 郭金虎,徐瓔,张二荃,等,2014.生物钟研究进展及重要前沿科学问题[J].中国科学基金,28(3): 179-186.
- REFINETTI R,2009.近日生理学[M].陈善广,王正荣,等,译.北京:科学出版社.
- 宋为民,1986.时间中医学[M].南京:南京中医药学院生物教研室.
- 王正荣,2006.时间生物学[M].北京:科学出版社.
- 吴今义,1987.英汉时间生物学术语[M].北京:科学出版社.
- 席泽宗,2010.科学编年史[M].上海:上海科技教育出版社.
- 杨海明,1987.唐宋词史[M].南京:江苏古籍出版社.
- 海老原,史树文,吉村,2012.时间生物学[M].东京:化学同人.
- BÜNNING E,1973. The physiological clock[M]. 3rd ed. New York: Springer Verlag New York, Inc.
- CORNÉLISSSEN G, HALBERG F,1989. The chronobiologic pilot study with special reference to cancer research is chronobiology or, rather, its neglect wasteful? cancer management in man[M]. Springer,9: 103-133.
- DUDAI Y,2008. Seymour Benzer(1921—2007)[J]. Neuron,57(1): 24-26.
- DUNLAP J C, LOROS J J, DECOURSEY P J, 2004. Chronobiology-biological timekeeping[M]. Sinauer Associates, Inc.
- ÉDOUARD C,1861. Pittoresque[M]. Paris: Aux Bureaus D'Abonnement et de Vente.
- PITTENDRIGH C S,1993. Temperoral organization: reflections of a Darwinian clock-watcher[J]. Annual Review of Physiology,55: 16-54.
- HALBERG F,1969. Chronobiology[J]. Annual Review of Physiology,31: 675-725.
- HONMA K, HONMA S,2001. Zeitgebers, entrainment and masking of the circadian clock[M]. Sapporo: Hokkaido University Press.
- HUFELAND C W,1880. The art of prolonging life[M]. Edited by Wilson E. Philadelphia: Lindsay & Blakiston.
- KARASEK M,1999. Melatonin in humans-where we are 40 years after its discovery[J]. Neuroendocrinology Letters,20(3/4): 179-188.
- LUCE G G,1971. Biological rhythms in human and animal physiology[M]. New York: Dove Publications, Inc.

- MOORE-EDE M C, SULZMAN F M, FULLER C A, 1982. The clocks that time us-physiology of the circadian timing system[M]. Cambridge: Harvard University Press.
- MCCLUNG C R, 2006. Plant circadian rhythms[J]. *Plant Cell*, 18(4): 792-803.
- NAKAJIMA M, IMAI K, ITO H, et al., 2005. Reconstitution of circadian oscillation of cyanobacterial KaiC phosphorylation in vitro[J]. *Science*, 308(5720): 414-415.
- REFINETTI R, 2016. Circadian physiology[M]. 3rd ed. CRC Press.
- STEINGRIMSSON E, 2017. Circadian rhythm and the Nobel prize in physiology and medicine 2017[J]. *Laeknabladid*, 103(11): 471.
- VITATERNA M H, KING D P, CHANG A M, et al., 1994. Mutagenesis and mapping of a mouse gene, *Clock*, essential for circadian behavior[J]. *Science*, 264(5159): 719-725.

生物节律的概念

2.1 环境信号的周期变化

地球母亲如一叶扁舟,承载着无数生灵,巡游在浩瀚宇宙中,穿梭于时间长河里。从太阳系的视角看,地球自转的同时也在围绕太阳公转,月球则围绕着地球进行公转。这些天文现象导致了自然界的光照、温度、湿度、潮汐、重力、磁场、营养/食物等环境因素产生周期性变化,而诸多周期性变化的信号直接影响着地球上生命的生存和行为方式。在长期的进化历程中,从单细胞生物到高等动植物乃至人类,绝大多数生物都表现出与环境相适应的周期性生命活动,进化出不同的内源性生物钟(biological clock)机制,使得生命体可以随时感受、预测并应对关键环境因子的周期变化(Jabbur et al., 2024)。作为万物之灵的人类,不仅在日月盈昃中感受到生命的美好,感叹逝者如斯,同时也在上下求索生命节律现象的奥义。

2.1.1 昼夜 24 小时周期

由于地球保持着自西向东方向的自转,因此从北极点上空看,地球进行逆时针方向旋转,从南极点上空看地球是顺时针方向旋转。地球自转轴与黄道面(地球绕太阳公转的轨道平面,任一时间这个平面总是通过太阳中心)大约成 $66^{\circ}34'$ 夹角,与赤道面垂直,因此赤黄交角约为 $23^{\circ}26'$ 。以距离无限遥远的恒星作为参照物,地球每自转一周,转动了 360° ,耗时约为 23 小时 56 分 4 秒(恒星日)。但如果以太阳作为参照物,由于地球绕太阳每公转一圈相对太阳而言就抵消了一个自转周期,因此地球自转一周,实际转动了 $360^{\circ}59'$,一个太阳日就是约 24 h,这里所讲的太阳日指平均长度的太阳日(即平太阳日),与之对应的是真太阳日,但由于地球在椭圆轨道上做的是不等速运动,一年之内真太阳日的长度处于变化之中,不宜选作计时单位(Chaisson et al., 2016; Williams, 2024)。地球自转产生了对生命影响深远的自然现象——昼夜,在地球自转过程中,面向太阳的一面处于白天称为“昼”,背向太阳的一面处于晚上则为“夜”。一般说来,一天之内光照和温度都表现为昼夜周期性,但是地球不同位置上光照和温度的昼夜周期存在时间和地域性差异,简而言之就是地球上同一纬度在一年中不同时间,或者地球上不同纬度在一年中相同时间,它们的光照和温度的