

脑研究的策略问题

——论还原论与反还原论的互补

肖 静 宁

随着分子神经生物学的兴起,脑研究的微观化进程已成主流,面对这一现实,在科学家中掀起了“脑研究向何处去?”的讨论。本文认为,这个问题的实质涉及的仍是生命科学中还原论与反还原论的古老哲学争论,在对这一争论进行简略的历史回顾后,着重论述了现代科学理论对还原论与反还原论综合互补趋势的认识与考察,并以脑研究中关于学习、记忆研究的新进展作为实例对互补研究的趋势作了进一步的分析和强化,从而得出了还原论与反还原论两种思维方式与研究方法的互补乃是脑研究策略应有的出发点的结论。

一、问题的提出

探索具有生物——社会两重性的大脑的奥秘是现代科学面临的真正挑战。本世纪中期以来,随着神经生物学的兴起与发展,脑研究与之同步相长,取得了令人瞩目的进展。70年代分子生物学与神经科学相结合,产生了分子神经生物学,其任务是在分子水平上阐明脑的结构与功能。分子神经生物学与细胞神经生物学密不可分,共同推进神经递质、受体、离子通道三个主要方面的研究,进展十分显著。分子生物学及其它现代技术,如重组DNA技术,基因克隆技术,离子单通道记录技术,细胞内记录及各种标记技术的应用,使科学家开始有可能阐明神经系统活动的细胞与分子机制,致使神经系统的知识呈爆炸性更新。面对脑研究微观化进程明显加速,国外一些造诣精深的科学家不约而同地提出了神经科学向何处去、以及如何驾驭它的发展的尖锐问题。日本著名神经科学家伊藤正男于1986年发表的一篇署名文章的标题就是“神经生理学家往何处去?”同年,为纪念美国生理学会成立100周年,百年纪念会主席费希曼也发表了题为《百年启示——生理学往何处去?》的重要文章,并引发了一场超越国界的、至今仍方兴未艾的讨论,其中主要涉及的是脑研究问题。这些表明,当脑研究的微观化进程成为一种主要趋势时,科学家不得不考虑这对在系统与整体水平上研究脑、对探索脑的思维意识活动有多大意义,以及它在整个研究中应处于何种地位。这里涉及的实质上仍然是生命科学中还原论与反还原论之争的古老问题。科学家就脑研究这样提出问题和展开讨论是很有意义的,它实际上蕴藏着还原论与反还原论两种对立的思维方式与研究方法互补思想的丰富内涵,可能预示着脑研究策略与方法学上的改变。

本文试图从回顾生命科学历史发展中还原论与反还原论之争出发,依据现代科学成就,阐明还原论与反还原论这样两种对立的思维方式与研究方法的互补,乃是脑研究策略的出发点。

二、远未结束的还原论与反还原论之争

生命科学中的还原论与反还原论的哲学争端源远流长,最初是在本体论的意义上进行的。早在公元前两千多年的古希腊有关生命现象曾有所谓的自然生成论与神创论的争论,随后又演变为原子论和活力论的对立。争论的焦点在于宇宙万物是否可以用还原为它们的构成要素(原子)的方式来说明。亚里士多德用作为事物自身的形式和动力的“内在目的”也即所谓“隐得来希”来代替“神的目的”,以之解释生命现象,从而成为影响巨大的活力论的最早渊源。活力论的实质即为反还原论。在整个欧洲中世纪,由于自然科学与哲学只是神学的科目,唯物主义的原子论必然受到排斥,活力论与神创论结合盛行久长。

文艺复兴后,随着近代科学的崛起,以自然科学为基础的近代机械唯物主义哲学的形成,还原论与反还原论之争出现了以功能上的机械论与活力论相对峙的新局面。当时,一些生理学家看到了机械论在解释哈维发现血液循环所起的重大作用,都热心于把生命现象与机械进行类比。法国二元论哲学家、科学家笛卡儿以及唯物主义哲学家、医生拉美特利都是这一时期机械论的主要代表人物。近代最早的活力论者帕拉塞尔苏斯主张生命是化学过程,提出一种所谓“生基”的“力”来控制体内的化学变化,决定着机体的健康、疾病与死亡。由于这一观念的神秘主义色彩使人难以接受,致使机械论在当时占有绝对优势。

到了19世纪前半叶,科学的蓬勃发展对人是机器的机械论提出了严重挑战,在这种形势下,活力论与机械论之争又重新爆发,并直接转向还原论与反还原论之争。在从19世纪到20世纪上半叶这一时期内,反还原论在总体上处于有利地位。反还原论的先驱、法国生物学家、进化论者拉马克为反还原论者强调生命的整体性和不可还原性奠定了基础。二十世纪初,德国实验胚胎学家杜里舒通过对海胆胚胎发育的潜心研究,给机械论以严重打击,进一步提出了他的反还原论的整体论思想。而德国化学家维勒于1824年首次在体外合成了尿素,给活力论以巨大冲击,曾促使一大批生物学家转向还原论。

直到本世纪中期,随着现代科学的飞速发展,还原论找到了新的立足点与生长点,还原论与反还原论之争逐渐集中到方法论上来。现代还原论者不仅认为生命规律可以还原为物理化学规律,而且只有这样才能对各种生命现象作出本质的解释。现代还原论从分子生物学的划时代成就中得到支持,一些卓有成就的分子生物学家实际上成为现代还原论的主要代表。与此不同,反还原论强调生物的特殊性,认为生物规律不能完全归结为物理化学规律,生命的自我调节离不开生命的整体性,故反还原论也称为“整体论”(holism)。反还原论的方法主要表现为对生命机体从整体上进行观察与描述。现代反还原论者以英国牛津大学波拉尼为代表,他在《生命的不能还原的结构》一文中,把还原论与反还原论之争推到了意识领域,认为意识原理不仅超越于物理化学,而且也超越于生物的机制原理。但是正如美国分子生物学家、DNA双螺旋结构发现者之一的克里克所说,为了理解神经活动较高层次,我们显然应该尽可能多的研究较低层次,神经科学的胜利进程已充分表明还原论方法具有无可替代的优势,用物理化学等成熟学科方法揭示大脑奥秘不仅可行,而且必需。而反还原论者不断对现代还原论进行尖锐的批评,并且从还原论不可避免的局限性方面显示出其合理的一面。可见,脑——意识堡垒,实际上已成为还原论与反还原论争论的焦点与难点。

还原论与反还原论双方的争论如此激烈,以至到了本世纪70年代国外有的学者还预言:机械论与活力论的传统矛盾具有永久的性质。这种看法显然只突出了还原论与反还原论相互

排斥的一面。与此同时,也确有一些学者看到,为了阐明生命的本质,揭示大脑的奥秘,客观上需要还原论与反还原论这两种思维方式与研究方法的相互结合与相互补充。而这样一种强调二者互补的倾向的形成与发展是值得注意的。

三、现代科学对还原论与反还原论互补必然性的认识与考察

如何认识还原论与反还原论的关系,在现代科学中,首先是伟大的丹麦物理学家尼尔斯·玻尔的互补或并协原理(complementarity principle)提供了一个崭新的视角。

玻尔是一位善于进行哲学思考的科学家。1927年9月他提出“互补性”(complementarity)这一基本观点来概括他对当时微观物理学的看法,通常称之为互补原理。虽然玻尔对于这一基本原理从未作过定义式的表述,但它实际上包括两层意思:1)是对量子力学的互补解释;2)是据此作出的认识论推广,以建立“互补哲学”体系。

在创立量子力学的过程中,科学家揭示出牛顿力学所不能解释的微观客体的“波粒二象性”,即象光与电子之类的物理实体既有波动性又有粒子性的双重属性。德国著名物理学家海森堡从这种微观现象出发,提出微观客体的位置与速度甚至在理论上也不能同时精确地测定,而这种结果与测量仪器和测量技术的不完备无关,这就是海森堡的“测不准原理”。它表明微观客体不可能体现经典力学那样全面的决定论。面对把经典力学波和粒子概念用于原子客体出现的两难局面,玻尔蕴育着建立量子力学的新概念。反映微观客体粒子特性的位置、动量、能量与反映波特性的波长、位相、振幅只能在两大类互相排斥、得此失彼的实验场合分别予以测定,根本不可能有一种实验安排能满足同时测定两种特性的要求,而只能在两者之间作出选择。既然如此,从这点来看,这两种特性是互斥的;但对于完备地描述光、电子等微观客体来说,这两者又是同等重要的,因而是互补的。这样,玻尔就提出“互补性”这个概念来说明微观物理学取得的各种实验证据不能纳入单一图景,而只能互相补充以构成事物的总体的现象。在他看来,互补原理不仅对量子力学具有根本的意义,他还希望对这个问题的研究会导致一个普遍适用的认识论哲理的产生。因此玻尔极其自然地把互补性引伸到人类一切知识领域,认为它甚至对更深奥的生命和精神活动问题也有指导意义。

玻尔曾直接了当地指出:“机械论和活力论之间的关系,这是互补关系的一个范例”;^⑤并进一步表明:“对于一个生物学的现象来说,生物学的描述方式和物理、化学的描述方式是互补的”。^⑥鉴于生物学问题的复杂性,玻尔告诫说:“即使有了关于物理学和化学的一切规律的最完善的知识,实际上也不能预见由这样复杂的结构将得到什么种类的机体,我们必须意识到,为了得到关于机体的完全理解,我们需要机能这个概念”。^⑦玻尔在晚年十分满意地注视着分子生物学的惊人成果。认为“从最近的进展中可以看到用物理学术语来充分说明生物学过程具有无限的前景,而同样不会损害对它们机能的阐述”^⑧玻尔就这样用互补原理把阐明生命现象中的特定因果关系的物理、化学分析与对生命整体机能的的目的性阐述结合起来,从而表明了还原论与反还原论之间应有的合理的综合。

心理学领域是玻尔将互补性扩大涉及的又一感兴趣的领域。他声称:“精神现象当然提供着关于互补性的突出范例……”。^⑨在涉及意识能否还原为一般的物理、化学运动时,玻尔指出,尽管物理和化学中没有任何东西产生意识,然而意识是自然的一部分,因此现在的问题是:现实的带有意识的这一部分,如何同物理和化学中论述的那一部分联结起来,怎样才能使这些部分中占统治地位的规律不致于冲突?这里,我们显然有一个真正互补的事实。当我们对它可

以作更详细的分析时,我们才可以比现在对生物了解的更多一些。玻尔就这样用互补性思想对这一难题的现状与未来给了研究方法的启示。

玻尔的互补原理告诉我们,对于还原论与反还原论的传统争论而言,问题不是要一方压倒一方,一方排斥一方,而是要在它们之间架起互补的桥梁,吸收两者的合理内容,兼收并蓄,走向综合统一的道路。

现代科学的进展,特别是一些新兴横断学科的创立已为还原论与反还原论的互补提供了越来越多的新框架、新理论和新根据。下面择其几个方面作一些说明。

现代进化论。进化论始终保持着生物学重要的理论基础的地位。随着分子生物学的发展,进化论的概念也更完善、更充实。如进化因素之一的遗传性的概念已大大扩展和深化了。如已确定 DNA 在遗传信息传递中起着决定作用,人工合成 DNA 分子的基因工程展现了进一步研究遗传现象的形成和发展的前景。又如另一重要进化因素的变异性研究表明,突变的性质是由基因和整个生命系统的特点决定的,它是由外部或内部的强力因素引起遗传密码中某些核苷酸顺序的变化,通过 DNA 自我复制而巩固下来的。可见,分子生物学的进展把达尔文进化论提到了现代高度,对原来的一些抽象的生物学概念赋予更明确的解释。研究方法的多样性是现代进化论的一个显著特点。前苏联学者 H. H. 冈恰连科指出:“生物界是整体化的各个层次的等级系列,如果把它的高层次简单地归结为低层次,那就意味着忘记了它的特殊性和质的确定性,而恢复到旧的机械论”。他强调,“研究进化规律的两种方法都有效,即一方面以关于整个有机体、物种和生态系统的结构和过程的有效概念去描述进化规律,另一方面又能以物理和化学规律去解释进化规律,那就不要把两种方法对立起来,毋宁说要把它们看作是互补的”。^⑥对于进化的最高产物——人的大脑的科学探索,这种还原论与反还原论方法的互补更是至关重要。

一般系统论。系统论的创始人、著名奥地利理论生物学家贝塔朗菲对生物学中的哲学问题特别关注。贝塔朗菲回顾系统论的发展时指出:“当我开始科学生涯的时候,生物学中正进行着机械论与活力论的论战。机械论方法本质上是把生命有机体分解为各个部分和局部过程……。至于这些部分如何组织起来……的问题都被忽视了;要不然就根据活力论,用灵魂之类的因素来解释”。^⑦贝塔朗菲在否定机械论与活力论的局限性时,主张生物现象需要用一种新的思维方式来研究。他在前人提出的机体论思想的基础上,主张把有机体作为有组织的整体或系统来考察。他大步向前,于 1937 年首次提出了“一般系统论”的概念。60 年代以后,系统论才真正受到广泛重视,与信息论、控制论等结合起来,不仅给物理科学的发展开辟了新的道路,而且奠定了研究生命现象的新的理论基础。在系统论中,系统与其组成要素是一对主要范畴,整体性是系统思想的核心。一方面,系统的整体特性不能归结为各组成要素特性的简单迭加,但系统的整体特性又必然依赖于要素,而且可以从各组成要素之间的相互关系中找到根据。正如贝塔朗菲所说:“如果我们知道了一个系统所包含的所有组成部分以及它们之间的各种关系,那么就可能从组成部分的行为推导出这个系统的行为”;^⑧另一方面,要素对系统也有依赖性。贝塔朗菲在说明“整体大于部分之和”的著名原则时,特别强调“要素”复合体的“组合性(constitutive)特征”,把它作为系统特征的重要概念。进一步说,系统是相互作用着的具有组合性特征的若干要素的复合体,“组合性特征不能用孤立的部分的特征来解释”,“组合性特征就是依赖于复合体内部特定关系的那些特征”。^⑨可见,要素的存在、活动只有在整体目标中考察,只有特别注重它们之间的相互关系才有意义。据此,从系统论思想出发,对于整体性功能的考察,要注意落实到它的组成要素及其相关协调的运动中去,吸收还原分析的营养,才能排除对整体机能作空洞肤浅的描述;而在将还原方法作为研究系统功能的一种手段时,则要经常根据整体的目的要

求来调整和把握研究的方向。系统论就这样对克服还原论与反还原论的局限性作出了自己的贡献,并在这种新的基础上促进了二者在方法论上的互补综合。

耗散结构论。耗散结构理论也称非平衡系统的自组织理论,是著名比利时物理学家普里戈津于1969年正式提出的一种研究复杂系统的理论。普里戈津以无比深刻的思想,对涉及自然界的一系列根本问题都进行了深刻的研究。可以说,耗散结构理论本身是将还原论方法与反还原论的整体性方法巧妙结合起来研究自组织现象的成功产物。它也必将推动这种研究方法的发展,使之对揭示人脑的奥秘作出贡献。耗散结构理论研究的是一个系统从混沌向有序转化的机理、条件和规律,这样它就把演化概念引入物理学,建立了一种统一的系统的进化学说,为消除无生命的物理世界与生物世界之间的深刻对立提供了广阔的前景。目前已经开始出现用耗散结构等理论来探索和解释生命现象。一般认为大脑这个复杂系统是一种远离平衡的开放系统、一种高级耗散结构。人脑每时每刻都在不断地同外界进行物质、能量和信息交换,不断地从无序走向有序。不仅如此,人脑通过自身的思维活动不断分析、选择、加工、储存信息,从而创造新的信息。这种与外界环境以及内部自身进行的信息过程不断促进大脑的有序化。这些新颖的思想给脑研究带来新的启发。耗散结构等理论从研究复杂系统的自组织行为出发,在物理世界与生物世界之间、低级生物运动形式与大脑思维运动形式之间架起了一座桥梁,从而找到了一种理解生物世界与物理世界发展规律的统一语言,为用物理学、化学的新成就研究生命、研究人脑提供了新的前景,也为还原论与反还原论的互补提供了新的框架与根据。

值得注意的是,普利高津对玻尔的互补原理极为关注,并作了进一步的发挥。他认为“互补性原理可以看作海森堡测不准关系的一个推广”,他从“我们能测量坐标或动量,但不能同时测量这两者”出发,提出“没有一种理论语言能把一个系统的物理内容表达无遗,各种可能的语言和对系统的各种可能的观点可以是互补的”。^⑩对于一般系统的物理内容的表达尚须如此,对于人脑这个特别复杂的巨系统的表达更不待言。耗散结构理论为脑研究中还原论方法与反还原方法的互补提供了又一新视角。

总之,玻尔的互补原理以及现代科学对它的充实使我们看到,尽管还原论与反还原论在思维方式与研究方法方面存在着重大差异,但它们却不可避免地趋向互补,实实在在走向综合统一。看来这是科学发展的必然结果,也是科学进一步发展的客观要求。对于揭示大脑奥秘而言,这种互补综合研究是多视角、多学科、多水平的,是一种扎根在现代科学、现代观念沃土中的还原论与反还原论(或整体论)之间的高度综合与互补。

四、脑研究中还原论方法与反还原论方法互补实例分析

一般而言,还原论用物理化学方法揭示生命活动中特定的因果关系,反还原论则从机体与环境的相互关系出发揭示整体机能的目的性。正如玻尔所说:“决定论与自由意志是一个有机体行动互补的两个方面”。^⑪当前神经科学已逐步发展成为一门其内涵所要求的从分子扩张到行为的统一的学科。高科技的兴起,多学科的协作,正在驱使神经科学朝着微观和宏观两极发展。虽然一般都认为脑研究应走分子水平与整体综合相结合的道路,但这过于笼统。而学习、记忆研究的新突破却为宏观描述与微观机制研究的互补提供了一个实例。

学习、记忆是脑的高级整合功能之一。本世纪初杰出的俄罗斯生理学家巴甫洛夫创造性地提出了条件反射的新概念,建立了一整套条件反射研究法,从宏观领域打开了学习、记忆的生理学实验性行为分析的大门,使人们把心理研究的注意力集中到脑本身。巴甫洛夫的条件反射

被公认为一种典型的学习模式。他提出的暂时联系接通的条件反射机理暗示着学习、记忆的行为变更乃是神经联系通路发生变化的结果。上世纪末,西班牙著名神经形态学家、神经元学说的倡导者卡哈最早强调在细胞水平研究精神活动机制的重要性,预示学习是突触迅速增长的结果,智力训练能促进神经侧支的发育。将近半个世纪以后,波兰心理学家康诺斯金与加拿大心理学家赫布进一步独立发展了卡哈的设想,提出了突触可塑性与学习改变突触效力的重要概念,这就为阐明巴甫洛夫学说中暂时性联系的神经基础指出了方向,从而把宏观行为分析、现象描述引向行为的微观机制的神经生物学研究。

但是研究突触可塑性决非易事,这需要深入到微观领域的先进的科学水平和实验条件,才能充分发挥还原分析的作用。又过了20年,直至60年代末期美国神经科学家坎德尔^⑧大胆采用低等无脊椎动物海兔的极其简单的神经系统作为研究学习、记忆突触机制的天然模型,成功地打开了在细胞与分子水平研究学习、记忆的突破口。海兔神经细胞数量少而胞体巨大、又具有极好的可鉴别性,海兔的特殊行为效应——缩鳃反射提供了研究学习、记忆的行为变更的绝妙指标。坎德尔用系统思想进行低层次的还原研究,采用多种先进的实验手段,对海兔的习惯化与敏感化学习进行了严密、系统、深入的研究,将海兔的宏观行为变化与细胞、分子水平的研究结合起来,将细胞间的信息传递与细胞内的生化过程联系起来,准确地绘出了行为反应的神经线路图,细致地阐明了习惯化与敏感化学习的细胞、分子水平事件。坎德尔用现实的实验证据表明在学习、记忆过程中,突触的使用与突触的功能之间存在着一种直接关系,使突触可塑性的假说第一次得到了客观实验的支撑。这种在低等动物身上进行的学习、记忆的突触机制的研究,为高等动物和人类的学习、记忆研究带来可贵的新的启迪。

坎德尔的工作是诱人的,但科学家最关心的是在高等动物的比较复杂的神经系统内能否进行这类研究。1973年,英国神经生物学家布里斯等终于发现并研究了哺乳动物脑的一个部位海马上的显著的突触传递效能增强效应——长时程增强(LTP)^⑨。当以短暂的特定电刺激为条件刺激作用于家兔海马,后用单个刺激测试,令人惊异地出现了海马电活动的持续增强效应,时间不是几分钟,而是长达10小时以上。随着研究方法的改进,已观察到持续时间更长的LTP,甚至可达几个月。由于这一突触效能增强现象如此显著,又是在与记忆密切相关的海马部位得到的,科学家对此高度重视,认为LTP反映突触水平的信息贮存过程,可能提供一种记忆巩固的机制。对LTP的研究正在成为神经科学的热点,向着分子水平、网络水平、系统水平三个层次迅速发展。特别是关于LTP与学习行为的相关性研究,已把整体行为实验与LTP变化结合起来,表明二者之间有很好的相关性。直接研究条件反射训练过程中的长时程增强变化,发现条件反射的建立过程与以LTP为指标的突触效率提高的程度呈平行关系。这类研究为条件反射的宏观现象描述提供了微观神经机制的根据,证实了从卡哈到赫布的关于“神经元的某些性质有可能为经验所改变”^⑩的预言,也为巴甫洛夫宏观的条件反射学说增添了细胞与分子水平的新的证据,表明微观机制研究对整体综合研究必不可少的作用。

总之,从学习、记忆研究的新进展可以看出,还原论方法与反还原论的整体论方法正在日益交汇融合,以整体水平的宏观行为表现为出发点,充分发挥还原方法的微观机制探讨的作用,就能把学习、记忆的研究不断引向深入。

脑研究向何处去?这一问题实质上涉及的是如何对待生命科学中从古及今的还原论与反还原论之争的问题:是依旧停留在“还原论或反还原论”的圈子里左冲右突呢?还是实行一种新的策略,将两者有机配合起来,使之相互补充,彼此促进,相得益彰呢?玻尔的互补原理从理论

上指明了一条超出传统的争论范围而把还原论与反还原论综合统一起来的途径。同时如前所述,还原论与反还原论的互补不仅得到现代科学的支撑与充实,而且它的可行性和有效性也不断地为脑研究的实践所证明。正如著名神经科学家、1981年诺贝尔奖金获得者之一的韦塞林在谈到视觉脑机制研究时指出的:“建立在分子的、细胞的、系统的和理论的多个水平上的视觉脑机制的研究是过去10年中最富成果的领域,今后这一领域进展的最大推动力必然来自这些不同水平研究的会聚”。^⑨视觉脑机制研究如此,学习、记忆研究的新突破也是如此。

脑研究向何处去?这个问题关系着脑研究的策略与方法论原则,值得从宏观调控的高度进行深入探讨。建立在依据于还原论观点的研究方法与依据于反还原论观点的研究方法互补基础上的综合研究,不仅有利于在细胞与分子水平,而且更有利于注重在系统与整体水平上探讨和认识脑与意识问题。脑研究需要各个学科在各个水平上继续研究的共同奉献,这种综合互补研究的策略与方法是全方位的。它不仅是神经生物学的,物理化学的,数学模型的,工程技术的,也是它们之间的,而且是它们与哲学、人文科学之间的。脑研究向何处去?面对当前脑研究在细胞与分子水平全面铺开的压倒优势,科学家反复提出这样的问题,他们思考的正是应当如何来驾驭神经科学突飞猛进的发展。关于脑研究策略的总体考虑,美国生理学家莫尔根有一段很精辟的表述:“不管用什么技术或在哪一层次进行研究,生理学家都应持整合的,而不是还原论者(reductionist)的观点”。并告诫研究者们:“在系统水平工作的生理学家必须充分了解细胞和分子水平的进展;而研究分子机制的生理学家也应把自己的资料综合到系统功能的原型中去理解”。^⑩莫尔根在这里深刻地表明了脑研究中应遵循的还原论与反还原论的互补原则,他的思想与玻尔不谋而合。莫尔根以系统整体综合为出发点,以还原分析为整体综合的前提与手段的思想反映了脑研究的发展趋势,代表了许多科学家在脑研究策略上的共识与愿望。

注 释:

- ①④ [比]L. 罗森菲尔德:《玻尔》,《科学与哲学》1980年第1·2辑,第169、179页。
- ② 戈革:《厄里斯·玻尔和他的互补原理》,《自然辩证法通讯》,1987年第5期,第6页。
- ③ [比]L. 罗森菲尔德:《量子理论的基础和互补性》,《科学与哲学》,1985年第3期,第146页。
- ⑤ 戈革:《厄里斯·玻尔——他的生平·学术和思想》,上海人民出版社1985年版,第319页。
- ⑥ [苏]H. H. 冈恰连科:《现代进化论的整体功能与辩证法》,《自然科学哲学问题丛刊》,1985年第4期,第93页。
- ⑦⑧⑨ [美]冯·贝塔朗非:《一般系统论基础、发展与应用》,清华大学出版社1987年版,第83、51、52页。
- ⑩ [比]伊·普里戈津等:《从混沌到有序》,上海译文出版社1987年版,第274—275页。
- ⑪ 卢鹤绂:《哥本哈根学派量子论考释》,复旦大学出版社1984年版,第118页。
- ⑫ [美]Kandel, E. R.: Science 164:847—850,1969.
- ⑬ [英]Bliss, T. V. P et al: J. Physiol 232:331,1973.
- ⑭ [美]Burke, R. E. et al:《神经生理学手册④,中枢神经系统电生理学》,上海科学技术出版社1986年版,第248页。
- ⑮ [美]Wiesel, T. N. et al: Visual cortex, Trends in Neuroscience 9:511,1986.
- ⑯ [美]Morgan, H. E.:《美国生理学会100年》,译文载《生理通讯》1988年第2期,第20页。

(本文责任编辑 彭昌林)