生态系统控制论的整体论意蕴

The Holistic Features of Ecosystem Cybernetics

赵绪涛 /ZHAO Xutao

（北京交通大学马克思主义学院，北京，100044）
(School of Marxism, Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044)

摘　要：生态系统控制论将生态系统视为一个整体，其构成要素由反馈机制控制和调节，使系统维持动态平衡。该理论是整体论的，但并不是涌现论的，因为它并不承诺各个层次上具有新颖的涌现性质；然而它是一种实用的整体论，有助于生态学家以还原论的方式得到整体论的认识。生态系统二阶控制论，作为该理论的新发展阶段，在主体性、认知能力等方面将生态系统类比为生命体，可视为现代化的有机论，具有明显的整体论意蕴。

关键词：生态系统　控制论　整体论　涌现论　奥德姆

Abstract: The ecosystem cybernetics perceives ecosystem as an integrated whole, wherein its constitutive elements are controlled and regulated through feedback mechanisms, to ensure that the system maintains dynamic equilibrium. The theory embodies a holistic not an emergentist perspective, as it fails to promise novel emergent properties at various levels. However, it serves as a practical holistic approach, which assists ecologists in attaining a holistic understanding through reductionist means. The second-order ecosystem cybernetics, a newer phase of this theory, likens the ecosystem to a living organism in terms of subjectivity and cognitive abilities, thus positioning it as a modern-day organicism and bearing evident holistic features.

Key Words: Ecosystem; Cybernetics; Holism; Emergentism; Odum

中图分类号：Q811.3; Q148　DOI: 10.15994/j.1000-0763.2025.05.006　CSTR: 32281.14.jdn.2025.05.006

生态系统控制论（ecosystem cybernetics）是生态学与系统科学跨学科研究成果的例子。顾名思义，该理论用控制论来理解生态系统：生态系统的诸要素在生态系统整体层面上由控制论机制（主要是负反馈机制）整合为紧密联系的整体。在奥德姆（E. P. Odum）的生态学中，生态系统控制论具有基础地位，它解释了调节生态系统中的物质循环和能量流动过程的信息过程，这种调节使得生态系统保持动态平衡。

奥德姆的生态学影响巨大近乎范式，因而受到了细致的审查。博甘迪（D. Bergandi）认为，奥德姆在本体论和认识论上是整体论者，但在方法论层面则是还原论者；[1] 在生态学中使用控制论模型，实质上是将生态系统中的能量还原为热，这种“生态控制论”是一种还原论的方法。[2]

然而，在《生态学基础》第五版中，生态系统控制论不仅是方法，也在本体论上解释了系统整体层次的稳定性。此后二阶控制论与生态系统理论的结合展示了新的整体论进路。本文将基于博甘迪相关研究来考察生态系统控制论的整体论意蕴和特征。

基金项目：北京社会科学基金规划项目“生态系统本体的实在论问题研究”（项目编号：22ZXC012）。
收稿日期：2023 年 10 月 3 日；**返修日期：**2025 年 3 月 12 日
作者简介：赵绪涛（1986–）男，山东青岛人，北京交通大学马克思主义学院讲师，研究方向为生态学哲学。Email: xtzhao@bjtu.edu.cn

一、控制论视角下的生态系统整体图景

控制论在生态系统研究中的应用大致可以分为三个阶段：引入及展开、集中的争论、深化和拓展。[3]在此历程中，控制论视角下生态系统的整体图景愈发清晰。

生态学家哈钦森（G. E. Hutchinson）是系统科学的奠基者之一，他在1946年的论文[4]中阐述了生态学中的因果循环路径和自我纠正机制等系统观念，并在随后指出这正是维纳（N. Wiener）的控制论所阐明的系统机制。[5]在哈钦森的理解中，自然世界的生物与非生物藉由生物地球化学过程和生物地理过程而形成了一个整体，其中的自我纠正机制，比如大气、海洋和地壳的化合物转化机制、植物光合作用等，使生物圈能够保持稳定状态。

然而，当时的哈钦森并未重视生态系统的概念，也并未明确认识到能量转移和转化过程在自然世界中的关键作用。生态能量学作为生态系统分析的核心成为下一代生态学家研究的主要议题。[6]

从1953年起，奥德姆开始出版生态学教科书《生态学基础》，第五版出版于2005年，此时他已去世。《生态学基础》系列在生态学之中如此重要，以至于20世纪后半叶生态学几乎由奥德姆范式统一起来。根据博甘迪的总结，[1]奥德姆范式的核心有两方面：一是以生态系统作为生态学研究的基本单元和核心概念；二是以能量分析为生态系统研究的核心问题。

控制论能够很好地解释生态系统的稳定性，奥德姆起初将这种稳定性称为“内稳态”（homeostasis），后来更准确地表述为“动态平衡”（homeorhesis）；并且，控制论观点能够解释一个比较特殊的能量现象，即负反馈信号的较少能量决定着整个生态系统很大的能量转移过程。（[7]，pp.59–63）

除了物质和能量，信息在生态系统中也至关重要，关于生态系统控制论合理性的争论促使人们更清楚地认识到这一点。早在1959年，帕滕（B. C. Patten）就已以“介绍生态系统的控制论”为题分析了熵和信息对生态系统保持稳定性的关键作用。[8]在20世纪70年代，用控制论的反馈机制解释生态系统的稳定和自我纠正，已经成为相当流行的普遍观点。然而在1979年，两位生理学家英格伯格（J. Engelberg）和博亚斯基（L. L. Boyarsky）否定了生态系统在本质上是控制论的，他们的主要观点是，生态系统并不具有整体层面的信息网络，因而无法实现控制机制。[9]此观点在1981年遭到生态学家的集中反驳，他们阐释了生态系统控制论的主要观点，并且使其成为生态系统生态学的一个基本观点。

其中，乔丹（C. F. Jordan）用控制论分析了袖蝶和藤蔓植物的共生关系，[10]袖蝶在藤蔓植物之间传粉并摄食，而且在其中一种西番莲上产卵，而这种西番莲为袖蝶的幼虫提供保护并抵御害虫。他指出这一共生关系路径具有唯一性（这种袖蝶只在这一种西番莲上产卵），这不太可能只是一种巧合，合理的解释就是，该系统中有反馈机制控制着生物的共生行为；而且，对不同生态系统的调查研究表明，共生关系在自然世界中普遍存在，这种普遍性使得人们很难否认生态系统具有整体性的信息网络。

上述这些观点足以表明，在生态学家的头脑中，生态系统是内部要素相互联系的整体，可以从控制论视角在机制上解释这种整体性，生态系统是由信息网络调节和控制的。

然而，在博甘迪看来，这些运用了控制模型的生态学研究并不是真正的整体论，控制论模型“实际上是为了达到认识论上的还原论的目的。这类模型用于从能量的角度、从物质循环的角度来描述生态系统的营养级网络。”[1]奥德姆生态学实质上是一种“超级还原论”，通过生态控制论将生态系统之中的主要能量形式（包括太阳能、化学能、动能等，但并不包括电磁能）全都还原为热能这种单一的能量形式。[11]

二、从生态控制论到生态系统控制论

博甘迪从整体论与还原论争论的角度仔细审查了奥德姆的《生态学基础》前四个版本，揭示了其中拼凑着两种对立的哲学思想：一种是奥德姆在本体论和认识论层面上宣称的整体论或涌现论；另一种则是生态控制论方法所体现的还原论。博甘迪为这种拼凑起了数个名字：哲学的奇美拉（Chimera，不同动物肢体拼接的希腊神话怪物）、还原论者的整体论、隐秘的还原论（crypto-reductionism）、隐秘的还原论者的系统论，意在表明，奥德姆生态学并不是真正的整体论。[2]

根据博甘迪的梳理，[2]尽管奥德姆以涌现论为根本原则，强调“既要研究森林（即整体），又要研究树木（即部分）”，也明确指出还原论方法的局限性，即无法将一个层次上的现象完全还原至另一层次之中；但是生态控制论并不是真正的整体论方法，主要原因是（1）它没有贯彻多层次分析方法。控制论模型虽然符合多层次方法——亦即考虑了不同层次之间的反馈作用，但是，生态控制论在奥德姆生态学之中只是分析物质和能量变化过程的工具；进而（2）它事实上反映了一种还原论的观点，即生态系统的过程可以完全还原为物质和能量的变化过程，这与奥德姆所宣称的涌现论思想相矛盾。

所谓的多层次分析方法，在博甘迪看来是真正的涌现论方法，即当人们研究某个特定的组织层次时，还需要研究在它之上的层次和在它之下的层次。

在涌现论的观点中，不同层次的组织具有新颖的“涌现性质”，这样的性质是由多个层次共同决定的，尤其不能忽视较高层次的作用，即所谓的“整体大于部分之和”。然而在还原论的视角中，用分析加和方法就能够完全揭示研究对象的全部性质——亦即“整体等于部分之和”，那些所谓的涌现性质，只不过是受限于人类已有知识范围而暂时无法还原的现象。因此博甘迪强调，[12]“涌现”概念正是整体论与还原论冲突的核心，这种冲突实质上是涌现论与还原论的冲突。

或许博甘迪长期的批评起了作用，2005年《生态学基础》第五版已经非常明确地把涌现性原理列为生态学的范畴之一，（[7]，pp.6–7）也反复强调了多层次的涌现论研究方法。

在该版中，奥德姆生态学中的控制论观点，以“生态系统控制论”为题得到了集中阐述。（[7]，p.59）生态系统控制论（ecosystem cybernetics）与生态控制论（eco-cybernetics）名称近似但含义并不相同。博甘迪将生态控制论定义为“在生态学中，对控制论模型的运用”，[11]这个定义显然侧重于方法论；但是《生态学基础》第五版中的生态系统控制论更接近于一种阐述生态系统本体论性质的基础理论。

生态系统控制论将生态系统视为一类特殊的控制论系统（图1），（[7]，p.60）其特殊之处在于，生态系统是多层次的（具有多个子系统）、非目的论的（系统并非趋向某个特定状态）和非定点的（没有明确的控制中心）。

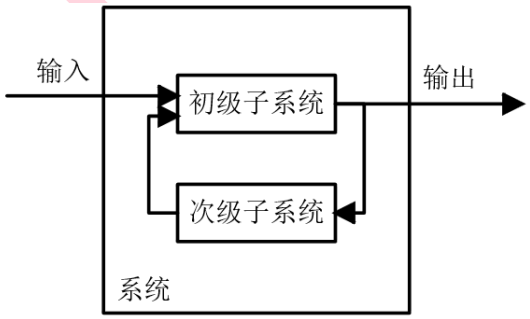

图1 适用于生态系统的反馈控制模型

一个例子是寄生作用对光合作用的调节：在草地生态系统中，微小的寄生昆虫使得食草昆虫数量减少，从而使更多的草存活，在整体上产生更多的光合作用。在这幅图景中，生态系统的控制机制是内在的和分散的，“物质循环和能量流动相互影响，以及来自亚系统的反馈，共同产生一个自我调整的动态平衡。”（[7]，p.61）

奥德姆意在通过反馈、信息网络、控制作用等控制论观点解释生态系统整体的动态平衡和稳定性，重点不在于将各种能量还原为热能。在生态系统控制论中，信息与物质和能量都十分重要。

事实上，博甘迪也承认，在《生态学基础》第五版中真正的涌现论方法论成为了奥德姆生

态学的必要部分，[2] 或许在他看来，此时的奥德姆生态学已经可以算作真正融贯的涌现论的生态学了。

三、生态系统控制论作为实用的整体论

博甘迪的相关研究事实上有助于人们更清晰地理解生态系统控制论究竟在什么意义上是整体论的。博甘迪认为真正的整体论是本体论、认识论和方法论上融贯的涌现论，这种涌现论有如下的核心主张：[2]

本体论层次：（O1）整体论。现象之间具有内在的、结构性的、时空上的相互依存；（O2）组织层次。现实具有多个层次，每个层次具有特定的涌现性质；（O3）新颖性。每个层次的涌现性质是新颖的，不能由更基础的层次而得到解释。

认识论层次：（E1）根本的不可预测性。这是指，即使完整了解了各部分，也无法预测它们组成的整体的涌现性质。为了解释涌现性质，需要新的科学学科。

方法论层次：（M1）避免“误置的具体性”。这是指，诸如整体、部分、关系这样的概念只是为了实现研究目标而在心灵上建构出来的，涌现论方法要避免将它们视为实在之物。（M2）多层次进路。即如前所述的三层次分析方法。（M3）警惕对涌现性质的错误归属。这是指，应当仔细考察涌现性质究竟从何而来。

以此框架分析，生态系统控制论显然不是涌现论的：（O1）（M2）符合。（M1）（M3）并未明确承诺。（O2）将系统视为多层次的，但并未承诺这些层次具有涌现性质。（O3）（E1）并未明确承诺。生态系统控制论从机制上解释了诸如“具有特殊控制论机制”“是动态平衡的”“具有稳定性”这样一些在生态系统层面才具有的性质，但是它并未确切表明，这些性质究竟是不是新颖的、是不是可从分析各部分的性质而进行预测。

事实上，博甘迪的主张确实反映了整体论与涌现论在概念范围上的区别。简单来说，涌现论的一定是整体论的，但整体论的不一定是涌现论的。“整体论”是一个相当松散的概念，泛指“任何强调整体优先于部分的学说”。[13] 而涌现论的基本观点是“一个特定的整合层次上的‘涌现性质’不能通过对其组成部分的研究来解释、预测或推导。”[11] 这是一种更加严格的整体论，或者用博甘迪的术语来说，“真正的整体论”。

博甘迪的涌现论框架更适用于分析整个奥德姆的生态学，而生态系统控制论只是这个理论体系中的一个必要部分。控制论本质并不是生态系统的唯一本质，正如葛永林等人指出生态系统“至少还可以是进化系统、信息系统、适应系统、协同系统等”。[14] 尽管生态系统控制论能够从机制上解释动态平衡，但它并不能回答“为什么会动态平衡”的问题，它并不能完全解释生态系统所有的根本性质。将这一认识置于博甘迪的涌现论框架中便会发现，如果将整个奥德姆生态系统生态学视为一个涌现论学说，那么生态系统控制论就只是其（O1）之一，即在本体论层次承诺了生态系统是以控制论机制得到整合的整体。

上述分析表明，生态系统控制论尽管不是涌现论的，但显然是一种整体论的学说。澄清了这一点，更有助于理解它对生态学研究的意义——它是一种实用的整体论观点。

生态学研究无法彻底抛弃还原论，奥德姆也强调了整体论与还原论方法并重。尽管研究对象的复杂性使生态学倾向于整体论，但技术进步使更加有效的还原论方法成为可能，比如，航空拍摄、卫星拍摄技术的发展应用使得生态学家能够了解更大尺度的生态系统；分子生物学技术使生态学家能够更细致和精确地研究生物遗传特征与环境的相互关系；电子计算机技术使生态学家能够存贮和处理关于生态现象的巨量的复杂的数据，并对生态现象进行精确的定量分析。与之对应的景观生态学、分子生态学、数量生态学等分支的兴起和发展，促进了生态学领域的广度和深度。

很显然，博甘迪所倡导的涌现论在很大程度上只是一种认识论的和方法论的原则，但并不是生态学家必须遵循的戒律。无论是在生态系统理论的发展之中，还是在生态学家的研究实践之中，还原论的观点和方法是必要的，比如，

哪怕是作为整体论的生态系统控制论，也至少需要将生态系统的过程还原为信息网络、子系统反馈才能对其机制作出描述。

然而，这并不意味着生态学家是遮遮掩掩的还原论者，恰恰相反，生态学家明确地将整体论或涌现论作为生态学理论最根本的一项哲学基础，正是秉持整体论的思想，他们才能够在没有（或者不可能）完全了解生态现象所有细节的情况下进行生态学的研究。（[7]，p.7）比如，后奥德姆时代的系统生态学家明确地认为该领域的主要研究方法之一——环境子网络分析（ENA），是一种“还原论的整体论”（reductionistic holism），这是因为这种方法通过分析生态系统要素及其相互作用的细节而去揭示或阐明那些塑造了系统结构功能的整体模式，[15] 或者简单地说，以还原论方法达成整体论认识。这正是博甘迪所批评的隐秘的还原论。

尽管如此，博甘迪并不是奥德姆的学术敌人，毋宁说，这恰恰是生态学哲学家对生态学家作出贡献的一个显著的例子。这样的澄清巩固了生态学的哲学基础，在持续的整体论-还原论争论中，博甘迪的工作毫无疑问具有重要价值。

四、生态系统二阶控制论向机体论的复归

生态系统控制论并不是一个已经完成了的理论，生态学家尼尔森（S. N. Nielsen）关于生态系统二阶控制论的研究，[16] 更加深刻地揭示了生态系统之中复杂的控制论机制。

二阶控制论最初是指用控制论的方法研究控制论，20世纪70年代藉由冯·福尔斯特（H. Von Foerster）等人的工作，二阶控制论成为控制论的重要发展。二阶控制论的核心观点在于观察者不可避免地对系统造成影响，以至于观察者和被观察系统构成了一个更大的自主性的（autonomous）或自我指涉的（self-referential）系统。[17] 亦即，一个二阶控制论系统，不仅包含作为控制论系统的被观察系统，还包含一个观察系统（observing system），观察系统是由作为观察者的行动者主体构成的，对被观察系统所具有的调节功能和控制过程产生调节和控制作用。

二阶控制论涉及世界观的重大转变，比如上述这样的核心主张将导向反实在论的立场：关于实在世界的知识并不是客观的，而是观察者基于其自己的立场、观点、理念和目的而建构出来的。然而，尼尔森事实上并不打算削弱生态系统理论的客观性，他的方法是去除“观察”概念所蕴含的主观性，他指出，观察并不是人类特有的行为，“而是存在于生物等级的大多数层次，尽管观察的性质和‘机制’可能大不相同。”[16]

根据尼尔森的分析，一阶控制论系统从根本上说缺乏自主性，它的控制机制不是由系统本身确定的，而是系统的制造者构造的，比如一个温控装置的控制机制是由工程师设计的，这样的装置在本质上是一个还原论的机械论的物理系统。然而，自然世界之中的二阶控制论系统并不是由系统外部的因素决定或塑造的。大部分生物系统至少具有一定程度的自主性，构成生物系统的各个子系统共同作用，确保整个生物系统的稳态。生态系统也是如此，它由各个子系统（群落、无机环境等）组成，这些子系统发生相互作用，维持生态系统持续存在。

这里的关键问题就在于，如果生态系统是二阶控制论系统，那么它的观察系统是什么？尼尔森提出，应该宽泛地将“观察”定义为系统内部或系统部分之间的差异的记录。[16] 亦即，只要这种差异得到了体现，那么就可以被认为是实现了“观察”行为。因而即使是二层食物链这种简单的模型，也可以被认为是包含了若干个观察和调节机制。例如在狐狸捕食兔子这个例子中，狐狸的饥饿程度以及捕食的冲动，被视为上述意义的“观察”，从而对这两个种群之间的捕食与被捕食关系产生调节作用。

因此在尼尔森看来，并不需要为生态系统引入一个外部的观察者或观察系统，系统内部要素的相互作用——尤其是发生在生物体内的调节和生物体之间的调节过程，构成了二阶控制论所强调的观察作用。在此理解中，生态系统是一个自主性的、自生性的系统，与包括人在内的生物体类似，具有主体性，具有认知、学习和记忆能力，并用这样的能力建构其所处

的现实。[16]

尼尔森并不是要断言生态系统是有思维意识的存在，而是暗示了一种功能主义的立场，比如说，在他看来，生态系统确实会说话（talk），但这是指以人们不理解的“语言”进行交流（communication），因为自然界中充满了交流和信息流，人们需要研究的是这种“语言”究竟是什么。[16]人们通常会认为，在诸如说话、观察、认识这样的概念之中隐含着一个前提，只有拥有思维意识的存在（尤其是指人）才具有这些性质或能够实施这类行为，但是尼尔森的分析表明，只要去除这个前提而关注这些概念对应的功能和过程，人们就可以用这些概念去描述生态系统同时又不会削弱生态学的科学性。

帕滕及其合作者关于生命在生态系统中的决定作用的论述也体现了这一点。他们认为非生命的东西只能被动接受外界的物理输入，而有生命的东西则能根据物理输入而作出适应性的反应，生命系统的这种能力被称为塑造模型的能力，是否拥有这种能力就是生命系统与非生命系统的根本区别。[18]这实质上是一种控制论的观点：生命实体将物理输入转换为信号，并根据这种信号作出响应行为。一个有助于理解的例子是，当绿叶植物接收到太阳光时，它接收到了太阳能（物理输入）并在器官中将其转换为一种信号（塑造模型），使植物自身开始光合作用。对于整个生态系统，情况当然复杂得多，但帕滕等人认为生命的特殊作用使生态系统成为“活的”。

尽管尼尔森和帕滕的思考进路不同，但他们汇聚到了一个类似结论：生态系统不单纯是一个物质的、能量的存在，而是一个关系的、过程的、信息的存在，一定程度上具有自组织能力、通信感知能力、优化能力、目标驱动能力、推理和规划能力、协作协商能力和适应能力。生态系统所具有的复杂的控制论机制对揭示这样一些更加具有复杂系统科学特征的性质起到了重要作用。

这种揭示，事实上以更加现代化的方式复活了生态学的机体论思想。

机体论（organicism）的核心主张在于将生态学研究对象类比为或者视为单个有机体。[11]在福布斯（S. A. Forbes）那里，湖泊之于其中有机体的关系类似于人体之于人体器官的关系；时至20世纪20年代，藉由克莱门茨（F. E. Clements）等人的工作，植物群落的发展历程被类比为生物体的发育过程，这种有机整体论观点成为彼时生态学的主流思想。

坦斯利拒绝了这种机体论的自然观，而提出了替代性的生态系统概念。他认为生态系统是一个由生物与其环境构成的物理系统，[19]并不是“超–有机体”（super-organism）——一个超级复杂超级巨大的生物体，充其量只是一个“类–有机体”（quasi-organism）——类似但并不是一个生物体。

奥德姆时代的生态学家发展了坦斯利的观点，他们至多承认生态系统的发展与生物体的发育有一些类似之处，但生态系统肯定不是一个单独的生物体。当然，他们也大致抛弃了生态系统是一个“物理系统”这种表述，而认为它是一个由生物及其无机环境组成的整体，包含着大量的复杂的物质、能量、信息转移或转化过程。

作为奥德姆生态学的一个基本观点，生态系统控制论显然也拒绝了机体论自然观，尽管奥德姆认为生态系统的信息网络类似于生物体的神经系统或激素系统，但他明确强调生态系统是“一个超生物体的组织层次，但是它不是一个超级生物体”。（[7]，p.63）

尼尔森关于生态系统二阶控制论的研究进一步发展了生态系统控制论，以控制论的控制论解释了生态系统之中对“调节功能的调节”，从而更加深刻地揭示了生态系统作为一个自主性的、自生性的系统所体现出的主体性。观点更加复杂更加具体，生态系统不再是在生长发育这种表象上被类比为生物体，而是在功能性和认知能力方面被类比为生物体。

在很大程度上，生态系统二阶控制论超越了博甘迪对生态控制论的批评，它不再以物质和能量变化为核心，而是以更加抽象的符号过程（semiosis）为核心，这当然有很大的讨论余地，但很显然，生态系统二阶控制论体现了生态学与系统科学的密切结合，而且，是一种更加复杂的整体论观点。

结　　语

本文从三个方面阐述了生态系统控制论的整体论意蕴或特征：

（1）生态系统的整体图景。生态系统控制论描述了生态系统之中信息的沟通、传递、控制和调节的整体图景，系统要素由于控制论机制而形成关系密切的整体。但是它并不承诺不同层次上必然具有新颖的涌现性质，因而不是涌现论的。

（2）整体论者的还原论方法。生态学中的控制论方法被批评为“还原论者的系统论”，但生态学家并不认为这种略显矛盾的“还原论的整体论”存在问题，他们事实上正是要从还原论方法得到对生态系统的整体论认识，就此而言，生态系统控制论是一种实用的整体论。

（3）机体论的复活。生态系统控制论进一步扩展为生态系统二阶控制论，在此视角中，生态系统具有自主性、自生性和主体性，它将生态系统在功能方面类比为生物体。这可视为当代生态学中的机体论，这无疑是生态系统控制论具有整体论特征的又一个重要体现。

控制论的观点和方法在生态系统生态学的发展过程中具有重要的作用，使人们更加理解了生态系统除了物质和能量之外的信息维度。然而这并不意味着生态学家已经彻底理解了生态系统，生态系统二阶控制论表明生态系统具有更加复杂的性质，这在一定程度上为生态学哲学之中传统的整体论–还原论之争带来了一些新的理论视野。至少，“整体论”观点需要更加具体地与生态学理论和复杂系统科学的新进展结合起来。

［参 考 文 献］

[1] Bergandi, D. '"Reductionist Holism": An Oxymoron or a Philosophical Chimera of EP Odum's Systems Ecology?: An Oxymoron or a Philosophical Chimera of EP Odum's Systems Ecology?'[J]. *Ludus Vitalis*, 1995, 3(5): 145–180.

[2] Bergandi, D. Multifaceted Ecology Between Organicism, Emergentism and Reductionism[A], Schwarz, A., Jax, K. (Eds.) *Ecology Revisited*[C], Dordrecht: Springer, 2001, 31–43.

[3] 赵绪涛、肖显静. 生态系统控制论的发展历程及其合理性分析[J]. 广东社会科学, 2021, (6): 68–78.

[4] American Society For Cybernetics. 'Foundations History of Cybernetics'[EB/OL]. https://asc-cybernetics.org/foundations/timeline.htm. 2024–10–15.

[5] Hutchinson, G. E. 'Circular Causal Systems in Ecology'[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1948, 50(4): 221–246.

[6] Odum, E. P. 'Energy Flow in Ecosystems: A Historical Review'[J]. *American Zoologist*, 1968, 8(1): 11–18.

[7] 奥德姆、巴雷特. 生态学基础：第五版[M]. 陆健健、王伟、王天慧 等译, 北京：高等教育出版社, 2009.

[8] Patten, B, C. 'An Introduction to the Cybernetics of the Ecosystem: The Trophic-Dynamic Aspect'[J]. *Ecology*, 1959, 40(2): 221–231.

[9] Engelberg, J., Boyarsky, L. L. 'The Noncybernetic Nature of Ecosystems'[J]. *The American Naturalist*, 1979, 114(3): 317–324.

[10] Jordan, C. F. 'Do Ecosystems Exist?'[J]. *The American Naturalist*, 1981, 118(2): 284–287.

[11] Bergandi, D., Frank, H. 'George Research Award–Highly Commended Paper: Eco-cybernetics: The Ecology and Cybernetics of Missing Emergences'[J]. *Kybernetes*, 2000, 29(7/8): 928–942.

[12] Bergandi, D, Blandin, P. 'Holism vs. Reductionism: Do Ecosystem Ecology and Landscape Ecology Clarify the Debate?'[J]. *Acta Biotheoretica*, 1998, 46(3): 185–206.

[13] Blackburn, S. *The Oxford Dictionary of Philosophy*[M]. Oxford: Oxford University Press, 2008.

[14] 葛永林、徐正春. 奥德姆的生态思想是整体论吗？[J]. 生态学报, 2014, 34（15）: 4151–4159.

[15] Nielsen, S. N., Fath, B. D., Bastianoni, S., et al. *A New Ecology: Systems Perspective*[M]. Amsterdam: Elsevier, 2020, 47.

[16] Nielsen, S. N. 'Second Order Cybernetics and Semiotics in Ecological Systems: Where Complexity Really Begins'[J]. *Ecological Modelling*, 2016, 319: 119–129.

[17] 万百五. 二阶控制论及其应用[J]. 控制理论与应用, 2010, 27（8）: 1053–1059.

[18] Patten, B. C., Straškraba, M., Jørgensen, S. E. 'Ecosystems Emerging: 1. Conservation'[J]. *Ecological Modelling*, 1997, 96(1): 221–284.

[19] Tansley, A. G. 'The Use and Abuse of Vegetational Concepts and Terms'[J]. *Ecology*, 1935, 16(3): 284–307.

［责任编辑　王巍 谭笑］