工程科学学报
Chinese Journal of Engineering

协同开采技术的演化原理与模型

黄昊 陈庆发

Coevolution principle and model for synergetic mining technology

HUANG Hao, CHEN Qingfa

引用本文:
黄昊, 陈庆发. 协同开采技术的演化原理与模型[J]. 工程科学学报, 2024, 46(6): 1054–1064. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2023.07.07.002
HUANG Hao, CHEN Qingfa. Coevolution principle and model for synergetic mining technology[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, 46(6): 1054–1064. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2023.07.07.002

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2023.07.07.002

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

炼钢厂多尺度建模与协同制造
Multiscale modeling and collaborative manufacturing for steelmaking plants
工程科学学报. 2021, 43(12): 1698 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.09.27.010

钢铁智能制造背景下物质流和能量流协同方法
Synergetic method between materials flow and energy flow in iron and steel intelligent manufacturing
工程科学学报. 2017, 39(1): 115 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2017.01.015

一个基于孔洞演化机制的韧性断裂预测模型
A micromechanically motivated uncoupled model for ductile fracture prediction
工程科学学报. 2017, 39(4): 557 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2017.04.011

综放开采顶煤与覆岩力链结构及演化光弹试验研究
Photoelastic experimental study on the force chain structure and evolution in top coal and overlaying strata under fully mechanized top coal caving mining
工程科学学报. 2017, 39(1): 13 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2017.01.002

协同式多目标自适应巡航控制
Multi–objective adaptive cruise control (ACC) algorithm for cooperative ACC platooning
工程科学学报. 2020, 42(4): 423 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.05.21.002

剪切浓密床层孔隙网络模型与导水通道演化
Pore network model of tailings thickener bed and water drainage channel evolution under the shearing effect
工程科学学报. 2019, 41(8): 987 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.08.004

工程科学学报, 第 46 卷, 第 6 期: 1054−1064, 2024 年 6 月
Chinese Journal of Engineering, Vol. 46, No. 6: 1054−1064, June 2024
https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2023.07.07.002; http://cje.ustb.edu.cn

协同开采技术的演化原理与模型

黄　昊[1)]，陈庆发[1,2)]✉

1) 广西大学土木建筑工程学院, 南宁 530004　2) 广西大学资源环境与材料学院, 南宁 530004
✉通信作者，E-mail: chqf98121@163.com

摘　要　为推动传统开采技术变革, 弥补协同开采技术基础理论的部分空缺. 从技术分类、技术构成等方面对协同开采技术体系进行了完善; 通过协同开采技术协同演化支持证据、自组织演化条件及自组织演化特征的分析, 论证了协同开采技术的形成与实施过程是协同演化的过程, 揭示了协同开采技术的协同演化原理: 前提是开放与非平衡态, 动力是由竞争与协同产生的非线性相互作用, 诱因是随机涨落, 路径是相变与分叉; 论证了基于哈肯模型构建协同开采技术演化模型的适用性, 结合协同开采协同演化类型的分析, 构建了普适于协同开采技术的协同演化模型, 得出了协同开采技术的协同演化方程及势函数, 指出了构建协同演化方程及势函数的意义; 引入基于哈肯模型的实证分析方法, 提出了协同开采技术协同演化模型的应用方法, 主要分为指标体系构建、子系统状态测算、协同演化机制分析 3 个步骤. 结合高峰矿 105 号矿体的协同开采技术实例, 对模型进行了应用验证. 研究结果可为协同开采技术的实践及决策提供理论依据.

关键词　协同开采; 自组织理论; 协同演化原理; 协同演化模型; 哈肯模型
分类号　TD801

Coevolution principle and model for synergetic mining technology

HUANG Hao[1)], *CHEN Qingfa*[1,2)]✉

1) School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China
2) School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China
✉Corresponding author, E-mail: chqf98121@163.com

ABSTRACT　This study primarily analyzes the coevolution principle and derives the coevolution model of synergistic mining technology to promote change in traditional mining technology and make up for some vacancies in the basic theory of synergetic mining technology. First, the system of synergetic mining technology is improved from technology classification and composition aspects. According to the synergetic mining system subsystems, synergetic mining technology is classified into three types, and the three components of synergetic mining technology are analyzed. Second, drawing on biological coevolution, we provide supporting evidence for the coevolution of synergetic mining technology, showing that its formation and implementation are processes of coevolution. We analyze the self-organized evolution conditions and characteristics and reveal the coevolution principle of synergistic mining technology based on the following principles: the premise is an open and nonequilibrium state; the driving force is the nonlinear interaction generated by competition and synergy; the causative factor is the random uptick and downturn; and the pathway is the phase transition and bifurcation. Because the Haken model can effectively study the self-organized coevolution of complex systems, this study argues that constructing the evolution model of synergistic mining technology based on the Haken model is feasible. Along with analyzing the type of coevolution of synergistic mining, this study constructs a coevolution model based on the Haken model, derives the coevolution equations and the potential function of synergistic mining technology, and highlights its significance. The application of the constructed model is ensured by introducing an empirical analysis based on the Haken model, and the application method of the coevolution model

收稿日期: 2023−07−07
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51964003)

of synergetic mining technology is proposed and divided into three steps: constructing the index system, measuring the state of subsystems, and analyzing the coevolution mechanism. It realizes the precise identification of sequential parameters, the quantitative characterization of the synergy degree, and the analysis of the positive and negative feedback mechanisms of the subsystem on the synergetic mining system based on the parameters of the sequential parameter equation. Finally, the applicability and reliability of the model are verified by combining the example of synergetic mining technology in the No. 105 ore body of the Gao Feng Mine. The innovation of the article primarily lies in the following: the coevolution principle of synergistic mining technology is analyzed in depth concerning biological coevolution, and a coevolution model that can be practically applied is established based on the Haken model, quantitatively manifesting the coevolution mechanism of synergistic mining technology and the synergism degree. The results of this study can provide a theoretical basis for the practice and decision-making of synergetic mining technology.

KEY WORDS　synergetic mining; self-organization theory; coevolution principle; coevolution model; Haken model

在对开采新技术需求日益增加的时代背景下，协同开采已成为矿业界研究热点之一[1−5]，近年来的理论研究及工程实践表明，协同开采技术对传统开采技术的变革起着重要的作用[6−11]. 然而，新理念的成熟与发展离不开基本原理的支撑，加之现代技术的高精细化要求，使得协同开采的技术原理及数学模型的相关研究势在必行.

截至目前，与技术原理相关的协同开采技术体系、科学内涵及技术开发流程相关研究已有较好的进展，这些研究主要从协同开采定义[12]、协同开采与协同学的基本概念耦合[13]、协同开采技术开发流程与协同学基本原理的耦合[14] 等角度展开了研究，偏向定义、概念及应用研究范畴，缺乏对技术原理的深度探索；协同开采在数学模型及量化发展方面也有一定进展，陈庆发等[15] 对协同采矿方法协同度的测算建立了数学模型，该模型主要解决了协同采矿方法的协同度测算问题，尚未构建普适于协同开采技术的数学模型.

协同开采技术的目的是通过技术系统各要素之间的协同合作，实现系统协同效应的最大化输出. 协同合作是一个复杂的动态演化过程，这种动态演化过程最早从生物有机体的形成开始研究. 故可借鉴生物学协同演化的思想，结合自组织理论对协同开采技术原理进行揭示. 而对其演化模型，则可基于协同学创始人哈肯提出的哈肯模型进行构建.

为保证结论的普适性、科学性及可应用性，本文首先对协同开采技术体系进行了完善；其次对协同开采技术协同演化的证据、满足自组织演化的条件、哈肯模型的适用性分别进行了论证；然后构建了协同开采技术的协同演化模型，探讨了模型应用方法；最后结合广西高峰矿 105 号矿体协同开采技术工程案例，讨论了所建模型的适用性及可靠性.

1　协同开采技术体系的完善研究

文献 [16] 按照实现协同开采总目标的先后顺序，将协同开采划分为协同前期、中期和后期，主要从时间维度构建了协同开采技术体系. 但协同开采技术还存在技术类型、技术结构、系统状态等多方面的内涵，这些多方内涵对演化原理的深度挖掘、构建具有普适性的模型具有重要意义. 基于此，在时间演化维度的基础上，结合技术结构演化，技术类型演化、演化状态等多个维度对协同开采技术体系进行完善，示意图如图 1 所示.

协同开采技术沿着时间维度纵向演化；演化状态则是时间的非线性映射，无序到有序的状态变化是技术演化目标；类型演化和结构演化是技术演化的横向拓展，是演化的主体和重要途径. 协同开采技术的演化既可以是类型或结构中某一种情况的单独演化，也可以是彼此交叉的变类型、变结构演化.

1.1　协同开采技术的类型划分

据协同开采所定义的协同开采工程目标，将协同开采技术分为 3 种类型：A+B 型；A+C 型；A+B+C 型. 其中，A、B、C 分别代表资源开采子系统、影响有序开采因素处理子系统、其他工程目的处理子系统. 判断某种协同开采技术属于哪种类型，只需要根据系统中存在的子系统情况判断即可. 此外，上述“ + ”比数学中的加号含义丰富，体现了协同效应的产生.

1.2　协同开采技术的构成分析

协同开采技术主要功能之一是围绕采矿方法展开的，即在采矿方法结构基础上加以处理复杂的其他开采活动前置条件的某种或某些工程技术集成模式，形成协同开采技术，最终实现协同开采目标. 以为后续研究奠定基础，首先应厘清协同开采技术构成的结构.

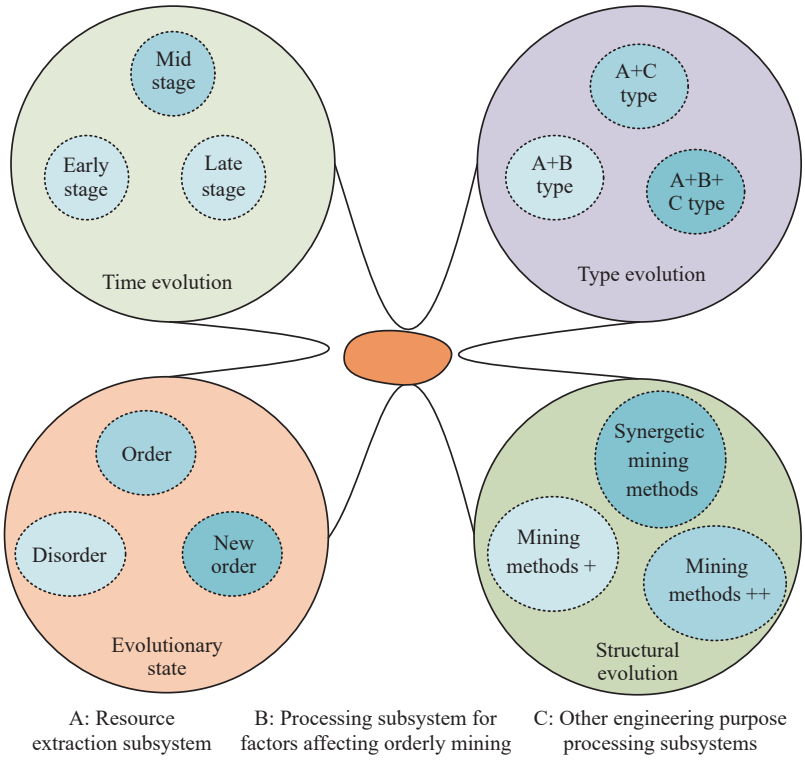

图 1　协同开采技术演化维度示意图

Fig.1　Schematic of the evolution dimension of synergistic mining technology

结合协同开采系统结构与采矿方法主要工艺, 认为协同开采技术主要由“协同采矿方法”、“采矿方法 +”、“采矿方法 ++”3 大结构组成, 开拓系统对协同开采技术体系中的技术实施起到辅助和基础作用.

(1)协同采矿方法是指现已成型的既能实现资源开采, 又能处理复杂开采活动前置条件的采矿方法, 理论上来说, 协同采矿方法在 3 种协同开采技术类型中均可出现.

(2)“采矿方法 +”对应“A+B 型”或“A+C 型”, 技术结构由采矿方法+处理影响有序开采因素的工程技术或+处理其他工程目的的工程技术所构成, 技术构成示意图如图 2 所示, 图 2 中某种其他工程技术与采矿方法工艺之间通过协同耦合产生协同效应, 形成协同开采技术.

(3)“采矿方法 ++”对应“A+B+C 型”, 由采矿方法+处理影响有序开采因素的工程技术+处理其他工程目的的工程技术所构成, 技术构成示意图如图 3 所示, 图 3 中处理不同开采活动前置条件的两类其他工程技术与采矿方法工艺之间通过耦合产生协同效应, 形成协同开采技术.

1.3　协同开采技术类型与技术结构之间的关系探讨

据上述协同开采技术类型及构成分析可知, 技术类型与技术结构之间存在一定的对应关系,

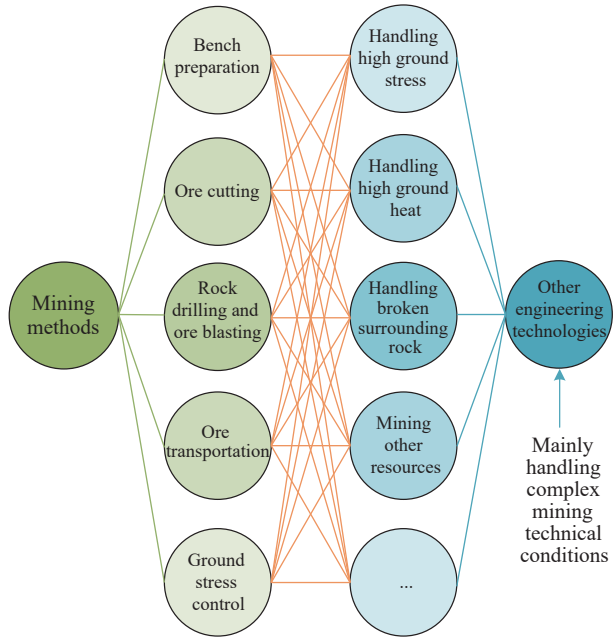

图 2　“采矿方法 +”技术构成示意图

Fig.2　Schematic of the technical composition of "mining methods + "

但不同技术类型对应的技术结构有所不同. 例如文献 [14] 所述的碎裂环境和采空区双重隐患下协同开采技术模式: 技术类型为“A+B+C 型”, 技术结构由“无间柱分段分条连续采矿法+采空区协同利用技术”构成.

图 3　“采矿方法 + +”技术构成示意图

Fig.3　Schematic of the technical composition of “mining methods + +”

2　协同开采技术协同演化原理分析

“协同演化”由 Ehrlich 和 Raven 在 1964 年正式提出[17], 用以描述互作物种之间的相互作用与相互进化. 比 1973 年 Haken 提出“协同”概念[18] 更早. 这也顺应了协同演化研究的发展过程: 从生物学领域向非进化生物学领域的广泛扩展.

生物学中的协同演化是指物种之间在进化中相互选择和适应而表现出的相互影响和响应关系[19], 后来发展为指不同主体特性相互影响从而加强组织应变性和适应性的重要过程[20], 或是指系统之间的一种耦合变化、有机体间因相互适应而共同发生演化的过程[21−22].

目前, 协同演化已在经济学、管理学等社会学科中得到广泛运用, 用以反映经济社会系统之间复杂的互动关系和演化机制[23]. 协同开采技术系统中复杂的互动关系和演化机制可借鉴协同演化理论来研究. 如此, 既能体现系统中各要素相互耦合过程背后的本质特征和机制, 又可从底层逻辑上揭示协同开采的技术原理.

2.1　协同开采技术协同演化支持证据及内涵分析

2.1.1　协同开采技术协同演化支持证据分析

协同演化具备相互作用、交互选择、系统发生 3 个支持证据[24]. 要基于协同演化揭示协同开采技术内涵, 首先需要分析协同开采技术是否具备协同演化的属性. 可结合协同演化的 3 个支持证据进行分析.

相互作用: 指两个或多个主体对彼此造成影响的行动. 协同开采系统中包含的多个技术主体之间存在多种相互影响: 宏观上, 采矿方法与处理复杂开采活动前置条件工程技术之间的相互影响, 如采矿方法与采空区协同利用技术之间的相互影响; 中观上, 技术主体内部的相互影响, 如采准、切割、回采、空区位置之间的相互影响; 微观上, 各参数之间的相互影响等, 如爆破参数、采场形状参数、空区形状参数之间的相互影响.

交互选择: 选择是演化的基本要素. 协同开采技术中多个技术主体之间的选择是交互的, 选择的目的是减小彼此之间的不利影响, 放大彼此之

间的有利影响, 保持双赢互惠的演化方向. 如在采矿方法与采空区协同利用技术之间的交互选择中, 采矿方法将空区利用为其部分切割工程、硐室空间等, 减小了空区对采矿活动的不利影响且减少了采矿方法的部分工作量, 保证了双方双赢互惠的演化方向.

系统发生: 指协同演化是系统发生的, 而非局部, 单一的. 协同开采技术中多技术主体的演化具有相似性, 由于协同开采系统中的交互选择, 使得技术主体系统发育树拓扑结构具有一定相似性, 这说明协同开采技术的演化是系统发生的. 如在采矿方法与采空区协同利用技术的交互选择中, 由于受到采空区位置及形状的影响, 采矿方法的参数、工艺(从微观到宏观)等都会发生系统的变化, 而非单一参数的优化.

综上可见, 协同开采技术的形成与实施过程具有协同演化的特征.

2.1.2　协同开采技术协同演化内涵阐释

结合协同开采技术构成分析及协同演化概念, 可得出协同开采技术的协同演化含义: 指采矿方法技术与处理复杂开采活动前置条件工程技术相互作用、交互选择、在系统中协同发生, 使得协同开采技术更具有应变性和适应性, 实现开采系统从无序向有序转变的过程.

以二元主体相互作用为例, 结合生态学 logistic 模型[25], 认为采矿方法与处理复杂开采互动前置条件的工程技术协同演化过程中存在竞合关系. 竞争表现为技术各方由于某一矛盾造成的类似此消彼长的现象, 合作表现为通过控制参量的调节, 系统发生协同作用最终实现协同开采技术系统有序程度增加的现象. 以 logistic 模型为微元, 形成协同开采技术协同演化的宏观演化示意图, 如图 4 所示. 技术主体或技术主体内部工艺之间相互影响导致的有序状态的此消彼长体现了竞争, 交互选择带来的总体有序状态的增加体现了协同合作, 且各技术要素的演化具有相似性, 体现了系统发生的特征.

2.2　协同开采技术协同演化原理阐述

基于自组织演化研究协同演化机理及原理已被证明是可行的, 可用如下步骤对协同开采技术的协同演化原理进行揭示[26].

2.2.1　协同开采系统满足自组织演化条件的说明

耗散结构是判断系统是否具备自组织演化条件的关键性依据[27], 根据耗散结构理论可说明协同开采系统满足自组织演化的 4 个条件[28].

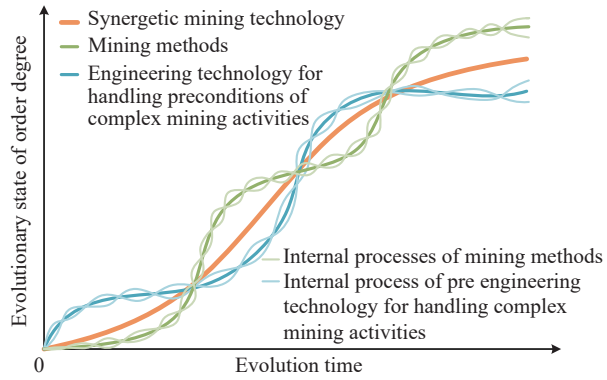

图 4　协同开采技术协同演化示意图(基于 logistic 模型)

Fig.4　Schematic of the coevolution of synergetic mining technology (based on the logistic model)

(1) 开放性: 形成耗散结构系统, 其必要条件是系统与外界交流所产生的负熵流值要大于系统自身产生的熵增. 协同开采系统通过控制参量(物质流、能量流、信息流)的变化从外界引入负熵流, 控制参量的变化由协同开采技术进行调控, 当控制参量达到一定阈值时, 协同开采系统发生相变.

(2) 非稳定性: 系统的开放性、控制参量的可变性、开采活动前置条件的非均质性都会引起协同开采系统的非稳定性, 正是这种非稳定性使得系统与外界产生势差, 进而促进控制参量的流动, 持续维持系统的开放性, 为自组织演化提供原始动力.

(3) 非线性: 线性与非线性的一个明显区别是叠加性是否有效, 非线性系统不具有叠加性. 协同开采系统中一个微小因素的变化可能会引起一系列宏观变化, 最终导致系统结构失稳, 即这种微小因素变化的幅值不能衡量最终的结果, 不能用叠加性说明; 且子系统之间相互竞争与协同形成新的结构, 这种竞争与协同无法用线性关系表示.

(4) 持续涨落性: 涨落指系统状态对稳定性的偏移, 分为微涨落和巨涨落, 微涨落一般会被耗散结构吸收, 巨涨落则会推动系统向新的结构状态演化. 协同开采系统中的涨落持续存在, 主要表现在开采活动前置条件的持续变化及协同开采技术的实施过程对系统稳定性产生的不确定性影响.

综上, 可判断协同开采系统具备自组织演化的条件.

2.2.2　协同开采技术自组织演化的基本特征

(1)涨落的产生: 协同开采系统在维持系统内部稳定并适应复杂的开采活动前置条件的过程中, 会在系统内部各要素之间产生各种微小的随机涨落.

(2)涨落的作用: 当它出现在系统结构突变的临界区域附近时, 系统则会在随机涨落的作用下偏离稳定的定态解.

(3)序参量的形成: 系统的非线性作用的放大效应会使得微小涨落形成巨涨落, 形成能够役使其他参量的序参量.

(4)新的有序结构的出现: 序参量出现后, 系统的组织结构、时–空–功能结构发生整体性的突变, 即发生相变, 系统呈现新的有序状态, 并实现新的功能.

可以看出, 系统的随机涨落和非线性是协同开采系统实现自组织演化的关键所在, 是系统从无序向有序、有序向高级有序演化的关键所在, 涨落则是在开放的非平衡的系统中形成, 巨涨落又导致相变和分叉的发生.

2.2.3　协同开采技术协同演化原理剖析

基于上述分析, 可对协同开采技术的协同演化作如下概括: 由于复杂的开采活动前置条件及不断变化的外部环境条件, 协同开采系统内部产生竞争及不稳定性, 经过系统各要素间的非线性相互作用, 导致系统远离平衡态; 系统在远离平衡态时, 系统结构可向失稳或新的稳定两个方向发展, 当以非线性作用方式作用于系统的控制参量达到阈值时, 巨涨落形成, 相变发生, 系统向新的稳定的方向发展, 并实现分叉, 系统达到新平衡态并形成新的有序结构.

综上, 可将协同开采技术的协同演化原理概括为: 协同开采技术演化的前提是开放与非平衡态; 动力是由竞争与协同产生的非线性相互作用[29]; 诱因是随机涨落; 路径是相变与分叉. 协同开采技术协同演化原理示意图如图 5 所示.

协同开采技术的协同演化原理为协同开采实际问题的解决奠定了理论基础, 并为相应研究提供了新方向和新思路. 如在矿山开采有序化过程中遇到矛盾时, 可引入非线性、涨落、相变及分叉等理论, 从协同开采技术协同演化的前提条件、动力、诱因、路径等关键阶段入手展开研究, 更有针对性的促进实际开采问题的科学化解决.

3　协同开采技术协同演化模型的构建

由于开采活动前置条件的复杂程度不同, 导致协同开采系统中存在的子系统数目及技术结构有较大差异, 进而导致不同的演化类型. 因此, 需首先对协同开采技术的不同演化类型进行系统分析, 然后构建具有普适性的模型.

3.1　协同开采的协同演化类型

根据协同开采类型及技术构成, 可将协同开采演化类型分为多种.

(1)单类型、单结构随时间的协同演化: 这种演化类型的变量只有时间和系统状态, 协同开采类型和结构从一开始固定, 后面不再发生变化, 一种结构或一种协同开采类型可对应一种演化类型.

(2)多类型、多结构随时间的协同演化: 这种演化类型的变量包括时间、系统状态、技术类型和技术结构, 技术类型和技术结构在开采过程中会发生各种组合变化, 一种组合方式可对应一种演化类型.

虽然演化类型丰富多样, 但是抓住其共性: 一种是系统内存在两个子系统的协同演化, 另一种是系统内存在 3 个及以上子系统的协同演化. 由此可构建具有普适性的模型.

3.2　基于哈肯模型构建协同开采协同演化模型的适用性讨论

协同学是协同开采的重要基础理论, 协同学创始人哈肯把在一定外部条件下由系统内部不同变量相互作用而使系统发生的协同演化的过程用数学模型表述出来, 即哈肯模型[30]. 哈肯模型的原

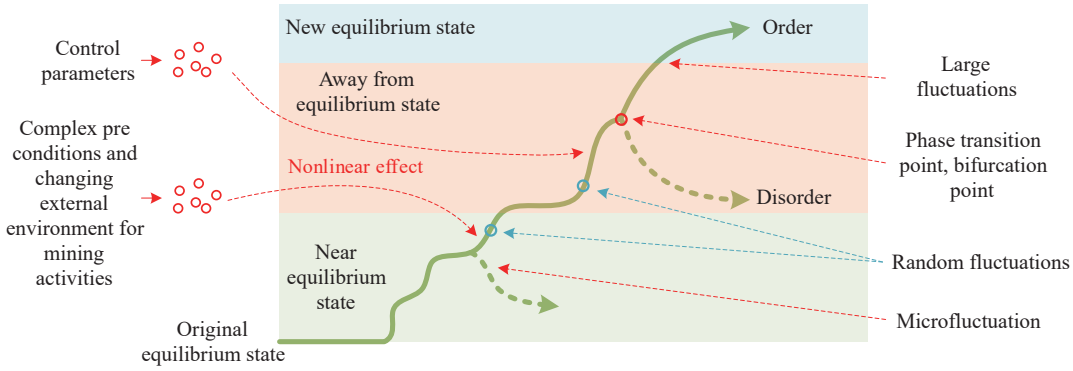

图 5　协同开采技术协同演化原理示意图

Fig.5　Schematic of the coevolution principle of synergetic mining technology

理如下: 首先将系统变量设为快、慢两类, 然后通过计算找出系统快变量及线性失稳点, 再利用绝热近似原理消去系统快变量, 得到序参量方程和演化方程组, 哈肯模型可有效研究复杂系统自组织协同演化[31].

哈肯模型能用于构建协同开采技术协同演化模型的原因有二: 首先, 协同开采系统具有复杂系统自组织协同演化特征, 满足了哈肯模型适用的前提条件; 其次, 本文构建模型的目的在于用数学模型表述出协同开采技术系统内部相互作用使技术发生协同演化的过程, 这与哈肯模型的作用具有高度一致性. 所以认为这种思路是可行的.

考虑到具有代表性的协同开采技术演化类型, 对于两子系统, 哈肯模型一般首先假设两个子系统的状态变量, 然后进行计算; 对于多个子系统, 则可将子系统两两划分为一组, 多次重复两子系统计算过程, 由于篇幅有限及计算过程的复杂性, 本文仅以两子系统的协同演化[32]为例进行介绍.

3.3　基于哈肯模型的协同开采系统协同演化模型构建

3.3.1　系统演化方程

设q_1, q_2分别代表协同开采系统中两个子系统的状态变量, q_1为 A 子系统状态, q_2为 B 或 C 子系统状态, 且q_1驱动系统演化, q_2伺服. 则系统的演化方程为:

$$\dot{q}_1 = -r_1 q_1 - a q_1 q_2 \tag{1}$$

$$\dot{q}_2 = -r_2 q_2 + b {q_1}^2 \tag{2}$$

式中, r_1, r_2为阻尼系数, a, b为描述状态变量之间相互作用强度的系数, $\dot{q}_1$, $\dot{q}_2$为状态变量对时间的导数, 当系统达到一个定态解, 即$q_1 = q_2 = 0$时, 若$|r_2| > |r_1|$, 且$r_2 > 0$, 则表明q_2为快变量. 此为该系统的“绝热近似假设”.

若绝热近似假设成立, 则可令$\dot{q}_2 = 0$, 由式(2)可得:

$$q_2 \approx \frac{b}{r_2} {q_1}^2 \tag{3}$$

将式(3)代入式(1), 可得到协同开采系统的协同演化方程:

$$\dot{q}_1 = -r_1 q_1 - \frac{ab}{r_2} {q_1}^3 \tag{4}$$

3.3.2　势函数

式(3)表明, q_2的变化由q_1决定, 故q_1为系统序参量, 主宰系统的协同演化过程, 对序参量演化方程的等号右边取相反数后, 再进行积分得到协同开采系统的势函数.

$$V = \frac{1}{2} r_1 {q_1}^2 + \frac{ab}{4 r_2} {q_1}^4 \tag{5}$$

$\dot{q}_1 = 0$确定了势函数的平衡点, $r_1 \times r_2 \times a \times b > 0$时, 方程有唯一定态解: $q_1 = 0$; $r_1 \times r_2 \times a \times b > 0$时, 方程存在3 个解: $q_1' = 0$; $q_1'' = -\sqrt{\left|\frac{r_1 r_2}{ab}\right|}$; $q_1''' = \sqrt{\left|\frac{r_1 r_2}{ab}\right|}$. 其中, 零解为不稳定解, 一般不予考虑, 非零解是系统可以通过突变形成新稳定态的稳定解.

在协同开采系统的协同演化过程中, 得到连续数据存在较大困难, 故对哈肯模型进行离散化:

$$q_1(t) = (1 - r_1) q_1(t-1) - a q_1(t-1) q_2(t-1) \tag{6}$$

$$q_2(t) = (1 - r_2) q_2(t-1) + b q_1(t-1) q_1(t-1) \tag{7}$$

式中, t为离散后的时间变量, $q_1(t)$、$q_2(t)$分别表示两子系统在t时间点的状态变量, $q_1(t-1)$、$q_2(t-1)$分别表示两子系统在t时间的前一时间点的状态变量. 基于哈肯模型, 获取协同开采系统中两子系统状态变量的数据后, 通过绝热近似假设及回归分析, 即可求出系统演化的序参量方程, 再通过势函数及r_1、r_2、a、b的值, 即可对协同开采系统两子系统的协同演化规律进行分析.

4　基于哈肯模型的协同开采技术协同演化模型的应用方法

4.1　指标体系的构建

协同开采系统包括资源开采子系统、影响有序开采因素处理子系统及其他工程目标处理子系统. 本文以资源开采子系统为例构建指标体系, 如图 6 所示. 其他子系统指标体系可根据实际工程进行构建. 由于定量指标和定性指标的数据处理方式不同, 故在图 6 中进行区分.

4.2　子系统状态测算

子系统测算的方法诸多, 本文提出一种方法作为参考, 主要步骤为:

(1)选取协同开采技术推进过程中各时间段的指标数据, 其中定性指标采取专家打分法获取定量数据.

(2)采用极差法对原始数据进行标准化处理.

(3)运用改进群决策层次分析法–熵权法确定各指标权重.

(4)采用模糊综合评价测算子系统状态得到状态变量.

4.3　协同演化机制分析

4.3.1　协同演化方程及势函数的建立

分别假设 3 个子系统序参量为役使其他参量

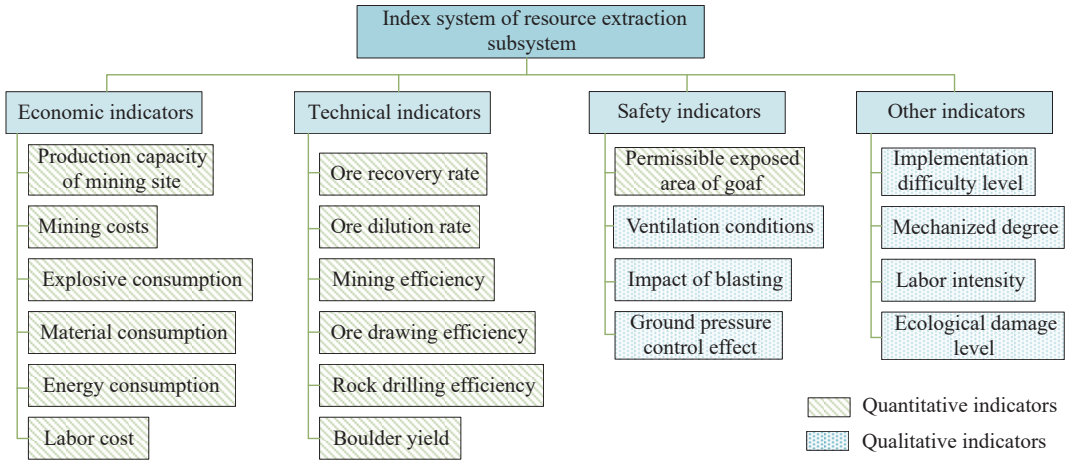

图 6　资源开采子系统指标体系

Fig.6　Index system of the resource extraction subsystem

的总序参量，运用 stata 软件进行回归，当满足“绝热近似假设”时，原假设成立，即可得出系统的总序参量，继而得出子系统相互作用的演化方程. 根据演化方程可得到协同开采系统协同演化的势函数，当 $V\left(q_1''=-\sqrt{\left|\frac{r_1r_2}{ab}\right|}\right)=V\left(q_1'''=\sqrt{\left|\frac{r_1r_2}{ab}\right|}\right)<0$时，势函数在定态解处取极小值，此时系统协同程度最高. 协同开采技术协同演化的势函数图像如图 7 所示.

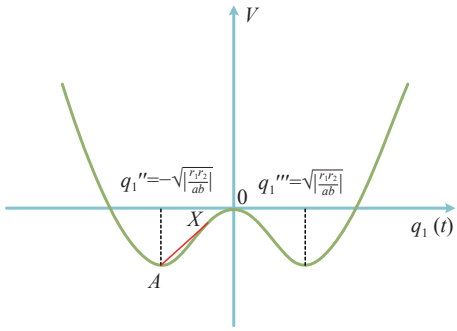

图 7　协同开采技术协同演化的势函数图像

Fig.7　Potential function image of the coevolution of synergetic mining technology

在一定的系统控制参量下，协同开采系统要素间发生非线性作用，通过涨落的作用，在定态解 $q=\pm\sqrt{\left|\frac{r_1r_2}{ab}\right|}$ 处产生新的有序结构，并由总序参量役使其他子系统参量，主宰系统的演进方向.

图 7 所示势函数曲线的第 2、3 象限上任意一点 X 距离点 A 的直线距离反映了系统在点 X 处的协同状态，距离越小表示此时的协同程度越高，反之则越低. 可以用直线距离公式表征协同开采系统协同程度随时间的变化.

4.3.2　协同演化机制分析

得出系统演化的序参量方程后，根据 a，b，r_1，r_2 的值对协同演化机制进行分析[33]，据前文，假设 q_1 为驱动系统演化的子系统，q_2 为被役使子系统，分别对应系统序参量及被役使参量.

参数 a 反应了被役使子系统对序参量的协同影响，当 $a>0$ 时，说明被役使的子系统对序参量的发展具有抑制作用，a 越大，说明抑制作用越强；当 $a<0$ 时，说明被役使的子系统对序参量的发展具有增益作用，$|a|$ 越大，增益作用越强. 参数 b 反应了序参量对被役使子系统的协同影响，当 $b>0$ 时，说明序参量对被役使子系统的发展具有协同增益作用，b 越大，增益作用越大；当 $b<0$ 时，说明序参量对被役使子系统的发展具有抑制作用，$|b|$ 越大，抑制作用越强. 当 $r_1\,(r_2)<0$ 时，说明序参量（被役使子系统）已建立起促进系统协同演化的正反馈机制，且 $|r_1|\,(|r_2|)$ 越大，促进作用越大，系统当前有序度越高；当 $r_2\,(r_1)>0$ 时，说明被役使子系统（序参量）形成了抑制系统协同演化的负反馈机制，且 $|r_2|\,(|r_1|)$ 越大，抑制作用越大，系统当前有序度越低. 基于这些参数表明的含义，即可对具体协同开采系统的子系统之间的相互作用关系有更清晰直观的认识，并基于此在关键时刻做出科学决策.

5　协同开采技术协同演化模型的工程案例应用

以文献 [34] 所述广西高峰矿 105 号矿体单空区碎裂矿段开采与空区协同治理技术为例，对协同开采技术协同演化模型进行应用验证. 文献 [34] 已对案例子系统状态量进行了计算，结果如表 1 所示，故本案例仅采用哈肯模型对协同演化机制进行详细分析.

（1）协同演化方程及势函数的建立.

假设资源开采–处理碎裂矿岩条件子系统为

表 1　单空区碎裂矿段开采与空区协同治理技术子系统状态量

Table 1　State variables of the subsystem of single goaf fragmentation mining and goaf synergetic governance technology

Subsystem	Execution time of synergetic mining technology			
	Before execution, t_0	After execution (early stage), t_1	After execution (mid stage), t_2	After execution (late stage), t_3
Subsystem of single goaf fragmentation mining	0.2168	0.4252	0.6092	0.8929
Goaf management subsystem	0.2168	0.6097	0.6667	0.8824

伺服子系统, 选取表 1 中执行协同开采技术后的子系统状态量数据, 带入式(6)、式(7), 采用高斯消去法得出哈肯模型中的各参数值为: $r_1 = -0.7329$, $r_2 = 2.7369$, $a = 0.6720$, $b = 4.3883$. 有 $|r_2| > |r_1|$, 且 $r_2 > 0$, 表明 q_2 为快变量, "绝热近似假设"成立, 说明空区处理子系统驱动系统演化, 结果与文献 [34] 所述"空区处理子系统对系统有序状态程度的贡献程度更大"相吻合.

将 r_1, r_2, a, b 的值带入式(4), 得到单空区碎裂矿段开采与空区协同治理技术的协同演化方程:

$$\dot{q}_1 = 0.7329q_1 - 1.0774{q_1}^3 \tag{8}$$

将 r_1, r_2, a, b 的值带入式(5), 得到势函数:

$$V = -0.3665{q_1}^2 + 0.2694{q_1}^4 \tag{9}$$

势函数图像如图 8 所示, 可见, 在式(8)的定态解 $q_1'' = -\sqrt{\left|\frac{r_1 r_2}{ab}\right|} = -0.8248$ 及 $q_1''' = \sqrt{\left|\frac{r_1 r_2}{ab}\right|} = 0.8248$ 处, 势函数取极小值, 系统在此时形成新的有序结构, 且此时系统的协同程度最高. 图 8 中点 A 与曲线在第 2、3 象限的任意一点 X 之间的距离可反映系统在点 X 处的协同程度. 将定态解 $q_1''' = 0.8248$ 与表 1 中 t_3(协同开采技术执行后期)时刻的空区处理子系统状态量 0.8824 对比可见, 吻合度较高, 但结果存在较小偏差, 这可能是由于文献 [34] 中的前、中、后期时间区间划分较大所引起的.

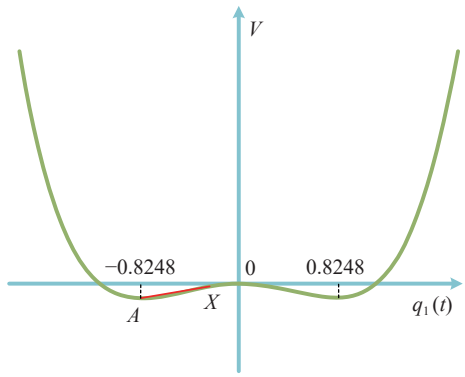

图 8　单空区碎裂矿段开采与空区协同治理技术协同演化的势函数图像

Fig.8　Potential function image of the subsystem of single goaf fragmentation mining and goaf synergetic governance technology

(2)协同演化机制分析.

由协同演化方程中参数 a, b, r_1, r_2 值可知: $a > 0$, 表明资源开采–处理碎裂矿岩条件子系统对空区处理子系统的发展具有抑制作用, 这主要是因为采矿方法采切工程的布置位置与空区位置不一定完全相符, 导致空区不能被全部利用, 但 a 值较小, 说明抑制作用较弱; $b > 0$, 表明空区处理子系统对资源开采-处理碎裂矿岩条件子系统的发展具有协同增益作用, 这主要是因为空区处理技术在将空区作为采矿方法部分采切工程时, 节省了采矿方法的采切工程量, 且 b 值较大, 说明增益作用较大, 这说明了该技术的优越性. $r_1 < 0$, 说明序参量已建立起促进系统协同演化的正反馈机制, 但 $|r_1|$ 较小, $r_2 > 0$, 说明被役使子系统形成了抑制系统协同演化的负反馈机制, 且 $|r_2|$ 较大, 这表明当前系统的有序度仍有提升空间, 需进一步分析原因并完善和优化现有技术. 本案例分析结果与文献 [34] 分析结果高度吻合, 说明该模型具有较好的适用性及可靠性.

6　结论

基于自组织协同演化原理、哈肯模型, 阐明了协同开采系统协同演化的原理, 构建了协同开采技术协同演化模型. 研究结果补充了协同开采技术基础理论的部分空缺, 对推动协同开采技术的科学发展具有一定借鉴意义. 本文主要结论如下:

(1)分析了协同开采技术构成及分类, 认为协同开采技术主要有"协同采矿方法"、"采矿方法 +"、"采矿方法 + +"3 大结构, 类型主要有 A+B 型; A+C 型; A+B+C 型. 探讨了技术类型与技术构成之间的关系. 研究结果厘清了协同开采技术结构, 完善了协同开采技术体系, 为后续研究奠定了部分基础.

(2)对协同开采系统协同演化支持证据、自组织演化条件进行了说明, 结果表明, 协同开采系统满足自组织协同演化的条件. 在此基础上, 结合协同开采技术协同演化的特征分析, 得出了协同开

采技术协同演化的原理：前提条件是开放与非平衡态；动力是由竞争与协同产生的非线性相互作用；诱因是随机涨落；路径是相变与分叉. 研究结果对协同开采技术的创新发展具有一定推动作用，为协同开采理论的更深一步研究奠定了基础.

（3）对哈肯模型用于构建协同开采系统协同演化模型的适用性进行了论证，结果表明是可行的. 在此基础上，归纳总结了协同开采技术的普适性演化类型，构建了协同开采系统协同演化的普适模型，给出了协同开采技术的协同演化方程及势函数，研究成果有助于推动协同开采技术的精细化发展，为数学理论的引入指出了新方向.

（4）为模型的实际应用，引入基于哈肯模型的实证分析方法，给出了基于哈肯模型的协同开采技术协同演化模型的实证应用方法，主要分为指标体系构建、子系统状态测算及协同演化机制分析 3 个步骤，分析结果能清晰识别序参量，明确表明子系统之间相互作用的抑制或增益关系，表征子系统对系统协同演化发展的正负反馈机制，结合广西高峰矿 105 号矿体单空区碎裂矿段开采与空区协同治理技术工程实例，验证了所建模型的适用性及可靠性. 研究结果可为协同开采技术的实践及决策提供重要理论依据.

参　考　文　献

[1] Wang L M, Luo Y K, Yin S H, et al. Exploration study of synergistic mining between the fluidized leaching process enhancement of deep metal mines and geothermal energy development. *Chin J Eng*, 2022, 44(10): 1694
（王雷鸣, 罗衍阔, 尹升华, 等. 深地金属矿流态化浸出过程强化与地热协同共采的探索. 工程科学学报, 2022, 44(10): 1694）

[2] Zhang J X, Wang J Y, Zhou N, et al. Collaborative mining system of geothermal energy and coal resources in deep mines. *Chin J Eng*, 2022, 44(10): 1682
（张吉雄, 汪集暘, 周楠, 等. 深部矿山地热与煤炭资源协同开发技术体系研究. 工程科学学报, 2022, 44(10): 1682）

[3] Li Q Y, Liu K, Li X B. Sublevel filling method for a heavy orebody in deep mining based on collaborative stoping. *Chin J Eng*, 2016, 38(11): 1515
（李启月, 刘恺, 李夕兵. 基于协同回采的深部厚大矿体分段充填采矿法. 工程科学学报, 2016, 38(11): 1515）

[4] Xu Y, Li Z J, Chen Y, et al. Synergetic mining of geothermal energy in deep mines: An innovative method for heat hazard control. *Appl Therm Eng*, 2022, 210: 118398

[5] Tu S H, Hao D Y, Miao K J, et al. Research of synergetic mining for mining, dressing and backfilling integrated deep mines with complicated systems. *J China Univ Min Technol*, 2021, 50(3): 431
（屠世浩, 郝定溢, 苗凯军, 等. 深部采选充一体化矿井复杂系统协同开采. 中国矿业大学学报, 2021, 50(3): 431）

[6] Xu Y, Li Z J, Wang J J, et al. Research on simulation experiment for synergetic mining of geothermal energy to heat hazard control. *J Cent South Univ (Sci Technol)*, 2023, 54(6): 2162
（徐宇, 李孜军, 王君健, 等. 矿井热害治理协同地热开采相似模拟实验研究. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(6): 2162）

[7] Li S L. Study on misspacing of close distance cooperative mining of upper and lower coal seams based on stable pressure zone theory. *Coal Sci Technol*, 2022, 50(Suppl 2): 44
（李胜利. 基于稳压区理论近距离上下煤层协同开采错距研究. 煤炭科学技术, 2022, 50(增刊 2): 44）

[8] Zhang B, Xue P Y, Liu L, et al. Exploration on the method of ore deposit–geothermal energy synergetic mining in deep backfill mines. *J China Coal Soc*, 2021, 46(9): 2824
（张波, 薛攀源, 刘浪, 等. 深部充填矿井的矿床–地热协同开采方法探索. 煤炭学报, 2021, 46(9): 2824）

[9] Xu Y, Li Z J, Tao M, et al. An investigation into the effect of water injection parameters on synergetic mining of geothermal energy in mines. *J Clean Prod*, 2023, 382: 135256

[10] Zhang T, Yuan L, Yang K, et al. Modeling of multiphysical-chemical coupling for coordinated mining of coal and uranium in a complex hydrogeological environment. *Nat Resour Res*, 2021, 30(1): 571

[11] Xu Y, Li Z J, Jia M T, et al. Conceptualization and method for synergetic mining of geothermal energy as solution to heat hazard control in deep mines. *Chin J Nonferrous Met*, 2022, 32(5): 1515
（徐宇, 李孜军, 贾敏涛, 等. 深部矿井热害治理协同地热能开采构想及方法分析. 中国有色金属学报, 2022, 32(5): 1515）

[12] Chen Q F. Connotation analysis and development prospect of “synergetic mining”. *Met Mine*, 2020(5): 2
（陈庆发. “协同开采”内涵析理与发展方向展望. 金属矿山, 2020(5): 2）

[13] Chen Q F, Huang H. Interpretation of scientific connotation of synergetic mining based on synergetics. *Met Mine*, 2022(5): 37
（陈庆发, 黄昊. 基于协同学的协同开采科学内涵诠释. 金属矿山, 2022(5): 37）

[14] Chen Q F, Huang H. Core modules and general development process of synergetic mining technology. *Met Mine*, 2022(9): 1
（陈庆发, 黄昊. 协同开采技术的核心模块与一般开发流程. 金属矿山, 2022(9): 1）

[15] Chen Q F, Hu H R, Jiang T L. Study on measure evaluation of synergy degree of synergy mining methods. *Met Mine*, 2020(9): 15
（陈庆发, 胡华瑞, 蒋腾龙. 协同采矿方法协同度测度评价研究. 金属矿山, 2020(9): 15）

[16] Chen Q F, Su J H. Synergetic mining and its technology system. *J Cent South Univ (Sci Technol)*, 2013, 44(2): 732
（陈庆发, 苏家红. 协同开采及其技术体系. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(2): 732）

[17] Ehrlich P R, Raven P H. Butterflies and plants: A study in

coevolution. *Evolution*, 1964, 18(4): 586

[18] Haken H. *Synergetics-An Introduction: Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry and Biology*. Berlin: Springer, 1977

[19] Janzen D H. When is it coevolution? *Evolution*, 1980, 34(3): 611

[20] Wang F Q, Jiang J H. Crossing the chasm: Construction mechanism of the business model loop for new economy startups: A multi-case study from the co-evolutionary perspective of value creation and value capture. *Nankai Bus Rev*, 2023, 26(1): 195
(王烽权, 江积海. 跨越鸿沟: 新经济创业企业商业模式闭环的构建机理——价值创造和价值捕获协同演化视角的多案例研究. 南开管理评论, 2023, 26(1): 195)

[21] Huang J F, Yang D C, Cao B. Spatial-temporal process and interaction mechanism of co-evolution between tourism industry and urbanization: A case of the Yangtze River Delta. *Econ Geogr*, 2021, 41(6): 213
(黄剑锋, 杨德才, 操彬. 旅游业与城镇化共同演化的时空过程及交互机制——以长三角地区为例. 经济地理, 2021, 41(6): 213)

[22] Althoff D M, Segraves K A, Johnson M T J. Testing for coevolutionary diversification: Linking pattern with process. *Trends Ecol Evol*, 2014, 29(2): 82

[23] Huang K N. Comments on the theory of coevolution. *J China Univ Geosci* (*Soc Sci Ed*), 2008, 8(4): 97
(黄凯南. 共同演化理论研究评述. 中国地质大学学报(社会科学版), 2008, 8(4): 97)

[24] Tong Z Y, Huang S Q. The development, misuse and evidence of the concept "coevolution". *Sci Sin* (*Vitae*), 2019, 49(4): 421
(童泽宇, 黄双全. 协同演化概念的发展、使用误区与研究证据. 中国科学:生命科学, 2019, 49(4): 421)

[25] Qiu S R. Dynamic analysis of the natural reserves growth based on logistic model in China. *Acta Ecol Sin*, 2020, 40(3): 1015
(邱胜荣. 基于 logistic 模型的中国自然保护区增长动态分析. 生态学报, 2020, 40(3): 1015)

[26] Cheng Q, Shi L N. Study on mechanism of the industry-university-research institute synergetic evolution based on the self-organization theory. *Soft Sci*, 2016, 30(4): 22
(程强, 石琳娜. 基于自组织理论的产学研协同创新的协同演化机理研究. 软科学, 2016, 30(4): 22)

[27] Zhuge C X. *Dynamic Evolution Mechanism of Urban Transport-Land Use Based on Self-Organizing Theory* [Dissertation]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014
(诸葛承祥. 基于自组织理论的城市交通和土地利用动态演化机理研究[学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2014)

[28] Li B H, Liu P L, Dou Y D. Analysis of self-organizing evolution mechanism of rural human settlement system. *Econ Geogr*, 2014, 34(9): 130
(李伯华, 刘沛林, 窦银娣. 乡村人居环境系统的自组织演化机理研究. 经济地理, 2014, 34(9): 130)

[29] Meng Q, Han B. Construction of collaborative dynamic model for self-organization evolution of enterprise strategic alliance. *Sci Technol Prog Policy*, 2010, 27(8): 111
(孟琦, 韩斌. 企业战略联盟自组织演化的协同动力模型构建. 科技进步与对策, 2010, 27(8): 111)

[30] Wang X B, Zhang X L. Research on co-evolution mechanism of monetary policy transmission system—Based on theory and empirical analysis of haken model. *Manag Rev*, 2014, 26(11): 57
(王祥兵, 张学立. 货币政策传导系统协同演化机制研究——基于哈肯模型的理论与实证分析. 管理评论, 2014, 26(11): 57)

[31] Xiong X L, Fan J. Synergistic evolution mechanism and the synergistic differences of financial ecosystem in provinces of "the Belt and Road" area in china—The empirical analysis based on haken model. *J Ind Technol Econ*, 2021, 40(12): 58
(熊晓炼, 樊健. "一带一路"沿线省域金融生态系统协同演化机制与水平差异——基于哈肯模型的实证分析. 工业技术经济, 2021, 40(12): 58)

[32] Su Y, Jiang X S, Lei J S, et al. Research on collaborative evolution of regional innovation system. *China Soft Sci*, 2016(3): 44
(苏屹, 姜雪松, 雷家骕, 等. 区域创新系统协同演进研究. 中国软科学, 2016(3): 44)

[33] Xiong X L, Fan J. Synergistic evolution mechanism between fintech and manufacturing green transformation and regional synergistic differences: An empirical analysis based on haken model. *Sci Technol Prog Policy*, 2022, 39(11): 63
(熊晓炼, 樊健. 金融科技与制造业绿色转型协同演化机制及区域协同差异——基于哈肯模型的实证分析. 科技进步与对策, 2022, 39(11): 63)

[34] Huang H, Chen Q F. Dynamic evolution model and application of synergistic effect in Synergetic Mining technology. *Chin J Nonferrous Met*,DOI:10.11817/j.ysxb.1004.0609.2023-44362
(黄昊, 陈庆发. 协同开采技术协同效应的动态演化模型及应用. 中国有色金属学报,DOI:10.11817/j.ysxb.1004.0609.2023-44362)