

负熵经济学：热力学定律下的经济范式重构与可持续发展路径

任天泥

(中国负熵生命科学研究院首席研究员 香港 999077)

摘要：本文以热力学熵增定律为基石，构建负熵经济学的理论框架，旨在破解传统经济学忽略物理约束的根本缺陷。研究揭示，现代线性经济模式本质上是依赖化石能源、加速资源耗散的高熵系统，其不可持续性根植于物质循环断裂、能量转化低效与系统韧性丧失。负熵经济学提出以“物质循环、能量层级、信息调控”三大公理为核心的新范式，通过量化熵流、重塑产业系统、创新政策工具，推动经济系统从熵增走向反熵增。本文系统阐述了负熵经济学的理论体系、测度方法、转型路径及治理创新，为可持续发展提供基于热力学定律的经济学理论基础和实践指南。

关键词：负熵；经济学范式；热力学定律；循环经济；系统韧性；熵流核算

引言：经济学的热力学觉醒

热力学第二定律表明，孤立系统总是自发地向熵增（无序度增加）的方向演化。薛定谔在《生命是什么》中深刻指出，生命体通过不断从环境摄取“负熵”来维持低熵有序状态。经济系统作为地球生态系统的子系统，同样遵循这一物理规律。然而，传统经济学建立在“资源无限”和“环境无价”的假设上，忽视经济活动的热力学基础，导致 GDP 增长与生态熵增同步加速的困境。

现代工业文明依赖化石能源驱动，本质是将地下低熵资源（石油、煤炭）转化为高熵废弃物（CO₂、污染），这一过程急剧提升地球系统的熵值。据研究，全球经济每年消耗约 600 艾焦（EJ）能源，其中超过 85%来自化石燃料，同时产生近 400 亿吨工业废物和 360 亿吨 CO₂ 排放。这种线性经济模式已逼近地球边界，使人类面临气候危机、生物多样性丧失和资源枯竭等多重挑战。

负熵经济学正是回应这一危机的新范式。它从热力学定律出发，重新定义经济活动的本质：不是货币的流动，而是低熵资源的转化和熵流的控制。其核心命题是：可持续的经济系统必须最大化可持续负熵输入，优化负熵转化效率，最小化熵增输出，构建物质循环、能量高效、信息丰富的低熵耗散结构。

一、经济学的范式重构与负熵经济学的崛起

1.1 负熵经济学定义

负熵经济学（Negentropy Economics）是一门以热力学定律，特别是熵增定律为哲学基础和物理约束，来重构经济学理论与实践的交叉学科。

它将经济系统理解为一个依赖于自然生态系统的、开放的耗散结构，其核心命题是：一切经济活动的本质，是对低熵物质与能量的有效转化和利用，以产生、维持并提升经济系统的有序性（即产生经济价值与服务），并在此过程中不可避免地产生高熵废物。

因此，可持续的经济发展的核心任务，并非传统意义上的无限资本积累或 GDP 增长，而是如何以最小化的熵增（资源耗竭与环境污染）为代价，来最大化地获取和利用可持续的负熵流，以维持并提升人类社会的长期繁荣与系统韧性。

1.2 该定义的核心内涵解析：

①物理学的根基（Thermodynamic Foundation）：

它承认熵增定律是宇宙的终极规律，经济过程无法逃脱其约束。经济活动是一个将 concentrated, low-entropy natural resources（高品位矿产、化石能源、森林、清洁水）转换为 dispersed, high-entropy waste（垃圾、污染、废热）的过程。

它引入了“负熵”的概念（由物理学家薛定谔提出），即“有序性的输入”。经济系统要维持并发展其有序结构，必须持续从环境中汲取“负熵”（如太阳能、风能、地热及未开采的矿产）。

②经济系统的重新界定（Redefinition of the Economic System）：

传统经济学常将经济视为一个近乎封闭的货币循环流。负熵经济学则将其视为一个开放的物质-能量转换流，它嵌入并完全依赖于更大的全球生态系统。

它强调，货币仅仅是价值的符号表征，而负熵流才是价值的物理载体和实质内容。

③目标的转变（Shift in Objectives）：

从“增长”到“发展”：它区分了“量”的增长（Throughput Growth，即物质能量吞吐量的增长）与“质”的发展（Qualitative Development，即在既定甚至减少的物质能量规模下，提升福祉、效率和系统韧性）。

核心目标：追求高的生态经济效率，即单位熵增所能产生的经济价值和人类福祉。

④政策与实践的导向（Policy Implications）：

循环优先：倡导循环经济，旨在封闭物质循环，将“废物”重新定义为“资源”，极大化减少从环境汲取新负熵和向环境排放熵增的需求。

能源转型：从依赖地下有限的、高熵增的化石燃料，转向依赖地表无限的、低熵增的太阳能、风能等可再生能源。

系统性设计：要求所有经济决策，从产品设计、工业生产到城市规划和国际贸易，都必须进行全生命周期的熵流核算，以评估其真实的生物物理成本和可持续性。

1.3 负熵经济学与传统经济学的相关性及根本区别：一场范式的演进

负熵经济学与传统经济学之间的内在联系与根本分野。传统经济学（以新古典经济学为代表）专注于在稀缺性约束下研究市场机制中的资源配置与价格决定，其核心是价值流（货币流）的优化。而负熵经济学则将经济系统视为一个嵌入自然生态系统的物理系统，其核心是熵流（物质能量流）的管理。二者并非完全对立，而是处于不同维度、具有不同前提假设的互补范式。负熵经济学并非要取代传统经济学，而是为其提供不可或缺的生物物理基础和长远约束条件，共同致力于解决人类社会的可持续发展问题。

1.3.1 相关性：继承、扩展与修正

负熵经济学与传统经济学共享一些基本的研究对象和目标，并在特定层面继承了后者的分析工具，其相关性体现在以下三个方面：

①终极目标的一致性：

应对稀缺性，提升人类福祉 两者都承认“稀缺性”

尽管存在关联，但负熵经济学在哲学基础、核心假设和研究方法上与传统经济学存在着根本性的范式区别，如下表所示：

（Scarcity）是核心经济问题。传统经济学研究如何配置稀缺的生产要素（土地、劳动力、资本）以最大化产出和效用。负熵经济学则进一步追问，这些要素背后的根本性稀缺是什么？其答案是：低熵物质和能量的稀缺性。一切经济活动的起点都是开采低熵资源（高质量的矿产、化石能源、自然生态系统的服务），终点都是排放高熵废物（垃圾、废热、污染）。因此，负熵经济学将稀缺性的概念从表象深化到了物理本质，但其最终目标同样是为了更持久、更稳固地提升人类福祉。

②分析工具的借鉴与融合：

负熵经济学并不完全抛弃传统经济学的分析工具。例如，在评估不同技术的成本效益时，仍会使用成本收益分析；在设计环境政策时，会借鉴“庇古税”或“科斯定理”的思想，发展出更先进的生态税收和产权界定方案（如可交易的碳排放配额）。它要求将这些工具的应用建立在坚实的物质能量流核算之上，使价格信号能够真实反映资源的物理稀缺性和环境成本。

③对“效率”追求的深化：

传统经济学追求配置效率（Allocative Efficiency），即通过市场机制将资源分配到价值最高的用途上。负熵经济学完全认同这一目标，并进一步提出了“生态效率”（Eco-Efficiency）和“资源生产率”（Resource Productivity）的概念。它要求不仅要货币价值上，更要从物理尺度上衡量效率，即单位熵增所能带来的经济福利。这将对“效率”的追求从单一的经济维度扩展到了经济-生态复合维度。

1.3.2 根本区别：范式层面的革命

维度	传统经济学（新古典范式）	负熵经济学（生物物理范式）
哲学基础	机械论：将经济视为一台可以精准调节的机器，强调均衡、最优化和确定性。	进化论/系统论：将经济视为一个复杂的、演化的、耗散的生命系统，强调适应、韧性和不确定性。
核心关注点	货币流的循环（生产、分配、消费、交换）。	熵流的单向演进（低熵资源输入 → 经济过程转化 → 高熵废物输出）。
系统边界	相对封闭的孤立系统：主要研究市场内部的交换关系，常将环境视为外部性。	开放的嵌入系统：经济是地球生态系统的子系统，完全依赖于母系统的物质能量输入和废物接收能力。
核心假设	1. 资源替代性无限（资本/技术可替代任何自然资源）。 2. 经济增长可无限持续。 3. 环境成本是外部因素，可被内部化或忽略。	1. 资源互补性有限（关键自然资本不可替代）。 2. 经济规模存在物理极限（地球边界）。 3. 环境成本是内在的、根本的约束。
增长观	数量型增长：GDP 增长是核心目标，通常假设增长是无害且永续的。	质量型发展：在物理规模稳态化（Throughput Stabilization）的前提下，通过提升资源生产率和福祉效率来实现发展。

价值论	主观价值论：商品价值由消费者的偏好和效用决定。	价值二元论：承认主观效用，同时强调客观的能值/熵值是价值的物质载体。一杯水的使用价值是主观的，但其生存价值（能值）是客观的。
政策工具	财政政策、货币政策、市场自由化。	熵管理政策：物质流核算（MFA）、生态税改革（ETR）、严格的总量 cap-and-trade、循环经济立法、生态红线。
危机视角	周期性波动：危机源于市场失灵、信息不对称或外部冲击，可通过政策调整恢复均衡。	系统性蜕变：危机源于经济子系统与生态母系统之间日益加剧的规模冲突，需进行结构性范式转型。

1.4 从“无物理学的经济学”到“为经济学注入物理学”

传统经济学在研究和优化市场行为、价格机制和短期资源配置方面取得了巨大成功，但其忽略热力学定律的“无物理学”特性，使其在应对全球生态危机和长期可持续发展问题时显得力不从心，甚至常常误导政策。

负熵经济学的革命性在于，它为经济学注入了物理学，将经济过程重新锚定在不可违背的物质和能量规律之上。它并非否定市场或价格机制的重要性，而是为其划定了清晰的活动边界和约束条件。

二者的关系可以比喻为：传统经济学研究的是如何在一条船上更高效地分配物资和进行交易（货币流）。负熵经济学则提醒我们，这条船是一个封闭的系统（地球），其承载能力、淡水和空气的存量是有限的，并且废物正在舱内不断累积（熵流）。我们必须首先遵守这些物理规则，否则任何精巧的分配方案最终都将失效。因此，负熵经济学是对传统经济学的必要补充和根本性修正。它代表了一种范式的演进，要求我们将经济学的核心任务从“无限扩张的优化”转变为“有限星球上的负熵管理”，为实现真正的可持续发展提供了不可或缺的理论基础和行动指南。

总结而言，负熵经济学是一次经济范式的根本性转变。它不再是一门“没有物理学的经济学”，而是将经济学牢固地建立在生态物理现实之上，为应对全球生态危机、实现真正的可持续发展提供了全新的理论基础和行动路线图。

二、负熵经济学的理论内核：三大公理与系统韧性

2.1 物质循环公理：从线性耗散到闭环再生

自然生态系统无废物，所有物质均参与循环。经济系统必须模仿这一法则，实现养分、金属、水等关键物质的闭环流动。线性经济中，90%以上原材料最终成为废物，仅不到10%被循环利用。负熵经济学强调：

设计循环路径：通过“废物-资源”转化技术（如再生金属、有机肥还田）降低新材料开采熵增

产业共生：构建企业间物质交换网络（如卡伦堡生态工业园），使一企业的废物成为另一企业的原料

案例：荷兰循环农业将畜禽粪便转化为沼气发电，残余物作有机肥，氮磷循环率达95%以上

2.2 能量层级公理：匹配能量品质与用途

不同能量具有不同“能质”（负熵密度）。奥德姆的能值理论指出，1焦耳电能≠1焦耳热能，因前者具有更高转化能力。负熵经济学主张：

优先利用太阳能：源头负熵，每年地球接收太阳能约3,850,000 EJ，远超人类需求

能量梯级利用：避免高能质能源用于低能质需求（如用天然气发电而非直接加热）

可再生替代：发展光伏、风能等低熵能源，其能量投资回报率(EROI)已超过化石燃料(光伏 EROI 达 30:1, 煤炭降至 20:1)

2.3 信息调控公理：数据驱动熵减决策

信息是负熵的高级形态，能优化系统调控。数字技术使实时监测、预测和优化成为可能：

物联网与大数据：精准管理资源流动，如智能电网平衡供需，减少能源耗散

区块链：追溯产品生命周期，激励绿色选择（如碳足迹交易）

人工智能：优化复杂系统运行，如阿里云“城市大脑”降低杭州交通拥堵35%，减少碳排放15%

2.4 系统韧性：多样性对抗熵增

高多样性增强系统抗扰动能力，是“负熵储备”。经济韧性需：

生物多样性：农业生态系统中，混作种植比单作减产风险降低30%

经济多样性：地方产业多元化抵御市场波动

模块化设计：避免单点失效引发系统崩溃

三、负熵经济测度：从 GDP 到国内熵值核算 (DEA) 体系

这是一个将物理学核心概念“熵”应用于国家治理和经济发展评估的前瞻性理论框架。它旨在构建一套超越 GDP（国内生产总值）的核算体系即国内熵值核算（Domestic entropy accounting. 缩写为 DEA）体系，以衡量一个国家经济社会的运行效率、可持续性和内在有序性。

其核心思想是：一个国家的发展过程，不仅是物质财富的创造过程，也是一个能量转换、消耗和秩序演变的过程。这个过程必然伴随着“熵”的产生（即混乱度

的增加)。国内熵值核算就是试图量化这种“熵增”，并评估其带来的风险和成本。

3.1 核心定义

国内熵值核算可以被定义为：一套借鉴热力学熵、信息熵等理论，用以定量测度一国经济社会系统在运行

国内熵值核算是一个多维度、综合性的体系，通常包含以下几个关键方面：

维度	核心解读	具体核算内容（“熵”的体现）
1. 能源-物质熵	衡量经济活动中能源和原材料的使用效率及浪费程度。高熵值意味着资源被大量转化为无用的废热、废气和废物。	单位 GDP 能耗（能源熵强度） 单位 GDP 物料消耗（物质熵强度） 碳排放强度 工业固体废物产生量与综合利用率 循环经济指标（如资源产出率、再生资源回收利用率）
2. 生态环境熵	衡量人类活动对自然生态系统造成的无序化干扰和破坏。熵增表现为污染、退化与生物多样性丧失。	PM2.5、臭氧等污染物平均浓度 地表水水质劣 V 类比例 水土流失、荒漠化、石漠化土地面积 生物多样性指数（下降即为熵增） 生态系统服务价值变化量
3. 社会经济熵	衡量社会资源配置、运行结构和制度规则的效率与公平性。高熵值社会内耗高、成本高、稳定性差。	基尼系数（收入/财富分配不均度） 宏观税负与社会保障成本 行政办事效率与营商环境指数 社会诚信度与合同违约率 重大社会冲突事件发生频率与成本
4. 信息熵	衡量社会信息环境的秩序、真实性和有效性。高熵信息环境意味着噪音多、共识难、决策效率低。	网络谣言与虚假信息的传播规模与影响 数据安全事件造成的损失 信息冗余度（重复、无效信息的比例） 公共信息的透明度与可得性

3.3 与中国特色发展理念的结合

“国内熵值核算”的理念与中国当前的发展战略高度契合，它可以为这些战略提供一个统一的、科学的衡量框架：

高质量发展：高质量发展的核心就是从追求“量”的增长转向追求“质”的提升。熵值核算正是衡量这种“质”的标尺——熵增越慢甚至减少（创造“负熵”），意味着发展质量越高、越绿色、越高效。

“双碳”目标（碳达峰、碳中和）：本质上就是一场大规模的能源熵和物质熵管理行动。通过减少化石能源消耗，从源头上降低熵的产生，并将已产生的碳（一种熵的形式）通过生态系统的“负熵”能力（如植树造林）和技术手段（如碳捕获）进行固定。

生态文明建设：其核心理念就是减少对自然生态系统的熵增，保护并增强生态系统的“负熵”能力（即自我净化、自我修复的能力）。

国家治理体系和治理能力现代化：目标就是降低社会经济系统的运行熵，通过优化制度、提高政府效能、

中产生的混乱度、无效能、环境负担与社会成本的综合性核算理论与方法体系。其根本目标是从“质”而非仅从“量”的角度，评估国家发展的真实效益与可持续性。

3.2 核心维度与核算内容

促进社会公平，减少社会内耗和摩擦成本。

3.4 目的与意义

①更全面的发展“体检表”：

弥补 GDP 仅反映经济总量的不足，揭示增长背后的资源环境代价和社会成本。

②风险预警系统：

通过监测熵值变化趋势，提前预警资源枯竭、环境危机和社会不稳定等系统性风险。

③政策效果评估新工具：

为评估一项政策（如环保政策、产业政策、社会政策）的真实、综合效益提供量化依据，看其是降低了社会总熵值，还是以牺牲其他领域为代价（如牺牲环境换取经济增长）。

④引导可持续发展：

引导全社会关注发展的质量和可持续性，推动形成绿色、低碳、循环的生产方式和生活方式。

3.5 现状与挑战

理论前沿，尚未成熟：目前“国内熵值核算”仍主

要是一个学术概念和理论框架，尚未形成一套被官方统计部门采纳的、可操作的标准化核算体系。

量化整合难度大：如何将不同性质、不同量纲的物理熵、生态熵、社会熵整合成一个具有可比性和可操作性的综合指数，是最大的技术挑战。

数据基础薄弱：许多关于社会熵和信息熵的指标缺乏系统、权威的统计数据支持。

总结来说，国内熵值核算是一个极具启发性的理念。它为我们审视中国的发展提供了一种深刻的系统论视角，强调发展的本质在于创造和维持“秩序”（负熵），而不仅仅是积累“财富”。虽然目前实践操作仍面临困难，但其思想已深刻体现在中国的高质量发展、生态文明建设和“双碳”战略等诸多重大国策之中。

3.6 国内熵值核算(DEA)体系

传统 GDP 核算鼓励熵增活动（污染治理计入增长），负熵经济学构建新指标体系：

3.6.1 熵流核算方法：

物质流分析（MFA）× 生命周期评价（LCA）：追踪资源从开采到废弃的熵变

能值转换率（Transformity）：以太阳光焦耳（sej）统一度量不同能量熵值

案例：日本构建国家 MFA 体系，目标 2050 年资源生产率（GDP/天然资源投入）提高 150%

3.6.2 核心指标：

经济系统熵密度（ESED）：单位经济产出的熵增（吨 CO₂ 当量/万美元）

净负熵产出率（NNEO）：（可持续负熵输入 - 熵增输出）/ 总产出

生态经济效率指数（EEEI）：结合 GDP、生态足迹、人类发展指数

3.6.3 企业负熵资产负债表：

资产端：负熵技术专利、循环基础设施、生态资本
负债端：熵债（未来环境治理成本）、资源负债

案例：联合利华公布“负熵平衡表”，2023 年通过循环包装减少塑料熵增 12 万吨

四、产业系统负熵转型路径

4.1 农业：地球最大负熵引擎

生态农业：模仿自然系统（如稻渔共生），减少外部输入

精准技术：无人机施肥降低氮熵增 30%

案例：古巴转型有机农业，化肥使用减少 85%，粮食自给率升至 80%

4.2 工业：循环再设计

工业 4.0+循环经济：3D 打印减少材料浪费 70%

化学过程绿色化：酶催化替代高温高压反应，能耗

降 50%

案例：Interface 地毯公司采用再生尼龙，产品碳足迹下降 60%

4.3 能源：太阳能主导

光伏+储能：成本十年下降 90%，成为最低熵能源

氢能智慧：绿氢替代灰氢，避免每吨氢产生 10 吨

CO₂

能源互联网：多能互补，消纳波动性可再生能源

4.4 城市：降低代谢熵增

海绵城市：雨水收集利用，减少水处理熵增

绿色建筑：被动式设计+生物材料，运行能耗降

80%

城市矿山：电子废物含金量是金矿的 50 倍以上

五、治理与政策创新

5.1 熵税制度：

碳税→资源熵税：按产品全生命周期熵值征税

激励设计：负熵活动税收减免（如再生材料退税）

5.2 法律强制：

生产者责任延伸（EPR）：要求企业回收处理产品

生态红线：保护关键负熵源（森林、湿地）

5.3 金融重构：

负熵债券：募集资金用于熵减项目，利率与熵效挂钩

央行绿色通道：对负熵企业提供优惠再贷款利率

5.4 国际治理：

《负熵国际公约》：设定全球熵增预算

熵转移补偿：发达国家为历史熵债付费

六、结论与展望

负熵经济学不是否定经济增长，而是重新定义发展质量：以最小熵增实现最大人类福祉。它要求：

理论层面：将热力学定律深度融入经济学，修正最大化假设

实践层面：推动技术—政策—金融协同转型

文明层面：从征服自然转向共生智慧

未来研究需深化：①熵值精确计量标准②复杂系统熵变预测模型③负熵转型社会成本收益分析④全球熵治理机制。

中国作为最大发展中国家，可率先探索：

建立“国家负熵核算中心”

实施“东西部熵补偿机制”

发起“一带一路负熵伙伴计划”

负熵经济学指引人类走向负熵文明：一个与地球物理边界和谐共生的未来。这不仅是技术经济转型，更是深刻的文明范式跃迁。