

DOI: 10.5846/stxb201903130476

曹高航,冯连勇, Garvin Boyle, 苏锐. 基于 Agent 模型的生态公平指数的构建与模拟. 生态学报, 2019, 39(22): - .

Cao G H, Feng L Y, Garvin Boyle, Su R. Construction of Ecological Justice Indexes and simulation based on Agent-Based Models. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(22): - .

基于 Agent 模型的生态公平指数的构建与模拟

曹高航¹, 冯连勇^{1,*}, Garvin Boyle², 苏 锐¹

¹ 中国石油大学(北京), 北京 102249

² Orrery Software, Richmond, Ontario, Canada K0A 2Z0

摘要: 伴随着社会经济的发展, 社会公平逐渐成为热点话题。社会公平问题不但体现在社会现象上, 还对生态系统起着重要的影响。通过构建资本交换自主体模型, 模拟社会财富分配动态过程, 可观测资本交换熵指数变化情况, 从而解释熵增原理。除此以外, 不同系统的最终状态能达到的最大熵指数不同, 用熵增原理与本文构建的最大熵指数模型可以对系统的生态公平进行纵向或横向评价。本文构建的资本交换熵模型也可以证明最大熵原理, 同时, 财富集中的现象将会使生态环境的选择权完全交予富人群体, 影响可持续发展。

关键词: ABM; 资本交换; 熵指数; 最大熵; 社会公平; 财富分配; 生态公平

Construction of Ecological Justice Indexes and simulation based on Agent-Based Models

CAO Gaohang¹, FENG lianyong^{1,*}, Garvin Boyle², SU Rui¹

¹ China University of Petroleum, Beijing 102249

² Orrery Software, Richmond, Ontario, Canada K0A 2Z0

Abstract: With socioeconomic development, social justice has gradually become a focus topic. Not only is justice reflected in social phenomena, but also it plays an important role in the ecosystem. By constructing a capital exchange agent-based model and simulating the dynamic process of social wealth distribution, this paper observes the changes of capital exchange entropy to explain the entropy increase theory. Furthermore, the maximum entropy of the final state differs from system to system, ecological justice of the system can be evaluated vertically or horizontally based on entropy increase theory and the Maximum Entropy Index. The constructed entropy model of capital exchange can prove the maximum entropy theory. Meanwhile, the phenomena of wealth concentration would totally give the right of choice to the affluent group, harming sustainable development.

Key Words: ABM; Capital Exchange; Entropy Index; Maximum Entropy; Social Justice; Wealth Distribution; Ecological Justice

正如 Murray Bookchin 所说, “人与人之间的不平等及社会制度才是生态危机的真正元凶, 人对自然的支配本质上源于人对人的支配。”^[1] 人与人之间的协调关系与社会公平问题会直接或间接影响生态问题; 贫困人口为生存而攫取易获取的资源, 从而对自然资源过度依赖, 这将会造成一系列不合理开发利用引起的生态

基金项目: 国家自然科学基金项目(71874202/71874201)

收稿日期: 2019-03-13; 网络出版日期: 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fenglyenergy@163.com

问题。因此,在生态文明建设过程中需要重视社会公平问题。

衡量社会公平有许多指标,熵便是其中的一项重要指标。熵首先由克劳修斯于 1865 年命名,当时他提出了两个重要的概念:(1)宇宙的能量是恒定的;(2)宇宙的熵趋于最大^[2]。在熵概念提出后,科学史上有着诸多理解:其一,将熵理解为系统混乱度的量度;其二,熵是系统不可逆运动方向的指示器;其三,把熵看作是系统中的能量不可用程度;其四,熵是量度热力学体系自发变化能力耗散量的物理量。^[3] Dragulescu and Yakovenko (2000) 提出了资本交换模型 ABM (Agent based model) 以体现熵的增长。^[4] 本文基于 Yakovenko 资本交换模型定义的资本交换熵衡量系统混乱度进而反映系统的生态公平。

1 研究现状

“生态公平”作为一种可持续发展战略在国内外皆有着广泛的关注,在生态公平提出前,环境公平已是美国环境运动的热点,Stretesky (1988) 定义环境公平为所有人需共同承担环境污染^[5],此后的 1997 年的环境公平问题国际研讨会将环境公平的对象扩展到国家、国际和世代之间^[6]。Low and Gleeson (1998) 最先提出生态公平的概念,他们指出生态公平与环境公平是同一事物的两个方面,环境公平是人与人之间环境分配的公平,而生态公平是人类与自然界其他要素之间的公平^[7]。Cullinan (2003) 在其基础上将生态公平引申为人类与生物圈之间的公平并且认为生态公平的结果会体现在地球总体环境情况上^[8]。由前人的研究可以看出,生态环境公平是人与人、人与自然、人与社会之间协调的产物,因此,人与人之间或是人与社会之间矛盾最终将会体现在生态自然中。

社会公平会直接或间接的影响生态公平,但在影响的结果上学术界有着较大的争议。Boyce (1994) 率先提出了经济不平等是环境恶化的潜在原因^[9],Magnani (2000) 的结论与 Boyce (1994) 相一致,他证明了在高收入国家中,只有保证经济增长不会导致收入不平等大幅增加的情况下,经济增长才可以提高环境质量^[10]。Scruggs (1998) 对此有着相反的观点,他表明了收入分配决定了对环境退化的选择,而高收入群体将鼓励环境保护政策^[11]。结合前人的研究,Berthe and Elie (2015) 将不平等与生态环境之间的传导机理总结为个人经济行为的选择和社会群体的政治选择^[12]。因此,对财富分配公平的度量可以对生态公平进行评估。

国内外有数十种衡量收入差距的方法,其中基尼系数和熵是测量公平指数的常用方法。Cowell (1995) 证明了基尼系数具有总收入差距在不同分项收入差距之间可分解的特性^[13],林毅夫 (1998) 利用这一特性按产业分解人均 GDP 基尼系数分别计算基尼系数、基尼系数贡献率和基尼系数弹性从而说明地区差异的变化方式^[14]。李实 (1998) 也通过分解城乡之间、不同地区之间的收入差距发现总的收入差距变动的结构性原因^[15]。但是部分学者对用基尼系数来衡量收入差距的合理性提出的质疑,朱明宣 (2005) 通过敏感性分析得到变异系数衡量收入差异是优于基尼系数^[16],吴璟 (2008) 认为基尼系数不能反映贫富差距的性质并且其静态性并不能反映贫穷阶层和富裕阶层之间的流动状况^[17]。而引入熵指数作为衡量指标可以很好地反映贫富差距的动态性。

相比于基尼系数,熵的优点是能在时间上和空间上对贫富差距进行解释。Matteo Smerlak (2016) ^[18] 基于经济分层和统计熵确定了经济流动性和不稳定性是不平等的根本驱动力。熵指数主要衡量任何一种能量在空间中分布的均匀程度,广义熵指数、区位熵指数、泰尔熵指数被广泛应用到经济学领域上。乔占军 (2012) 针对不同性质的建立了结构熵指数并且基于熵指数对我国服务业总量与结构进行测算^[19],赵玉林 (2008) 将香农信息熵直接作为熵指数并基于熵指数和行业集中度对我国高技术产业集聚度研究^[20],蔡圣杨 (2018) 通过逆向采用鲁迈特的方法推出熵指数并基于熵指数对我国商业银行收入结构绩效研究^[21],宁亚东 (2014)、唐建荣 (2013)、杨远 (2009) 通过泰尔熵指数对能源效率、区域碳排放进行测量^[22-24],蓝相洁 (2015)、李欢 (2017) 通过广义熵指数对公共支出的均衡发展进行探讨^[25-26]。

虽然已有研究对生态环境公平进行了大量的探讨,也取得了阶段性进展,但是大多数是基于统计学方法进行定量研究,创新性略显不足。本文在 Yakovenko 文献的基础上,构造一套新的经济熵指数以期对不同系

统的有序程度进行对比,从而对经济不平等现象进行解释并且对生态公平进行定性度量。

2 模型构建

2.1 资本交换模型的构建

本文在 Dragulescu 和 Yakovenko 描述的模型^[4]的基础上进行调整,在模型中,并不考虑买卖双方的物品交换,仅将交换过程中的资本流动形态展现出来。本模型由三个参数 K (直方图中的区间数), A (代理商数)和 W (代理商所持有的总金额)构成。在 Yakovenko 的模型^[4]中,有着关于贷款对贫富差距的讨论,并得出银行的存在扩大了贫富差距的结论。而本模型重点聚焦于无贷款情景下的贫富差距状况,使每个代理商的财富都存在严格的上下限约束。为初始化模型, W 美元被平均(或是尽可能平均)分配给每一个代理商。并且模型以离散时间进行,在每个瞬间,执行以下过程:

- 步骤 1-从箱中随机选择两名代理商;
- 步骤 2-在两个代理商中,一个被随机选为“失败者”,另一个成为本回合的指定“获胜者”;
- 步骤 3-如果满足[{失败者超过 1 美元}, {赢家少于 4 美元}]的情况,两个代理商进行资金交换,即失败者为赢家支付 1 美元;如果不符合上述情况,则不进行交换;
- 步骤 4-两个代理商回到箱中。

2.2 资本交换熵指数构建

Baumgartner 等生态物理学家们认为,能源是唯一的初级生产要素,因为技术和替代对于能源的作用是有限的,经济发展必然需要能源,而能源(如石油)是一个给定的存量,且这一存量是可以减少的^[27]。因此经济不会无限地增长,本模型中假设代理商所拥有的财富总量 W 恒定。在一个封闭系统中, A 和 W 的量保持稳定,资本交换模型的代理商可以被视为类似于理想气体模型的原子。资本交换模型的财富可以被视为类似于理想气体模型中的能量。一旦定义了资本交换模型,模型从始至终,唯一的变化是位于每个箱中的代理商的数量。设 x_i 表示为箱 i 的金额,设 a_i 表示具有 x_i 的代理商的数量。则对于任何给定的某一瞬间,模型的状态由 K 个箱子组成的直方图 $(a_1, a_2, a_3, a_4, \dots, a_k)$ 完全描述。为便于解释原理,给每一个系统的状态指定序列号 h ,即每一个 k 元组 $(a_1, a_2, a_3, a_4, \dots, a_k)$ 和组合 $h(a_1, a_2, a_3, a_4, \dots, a_k)$ 相对应。

每一种状态的代理商数量表示如下:

$$A(h) = \sum_{i=1}^K a_i \quad (1)$$

每一种状态的代理商财富总量表示如下:

$$W(h) = \sum_{i=1}^K x_i a_i \quad (2)$$

基于玻尔兹曼熵,本文对资本交换模型进行熵的处理。对于每一种宏观状态 $h(a_1, a_2, a_3, a_4, \dots, a_k)$ 有着多种不同的微观状态。对于任何宏观状态 $h(a_1, a_2, a_3, a_4, \dots, a_k)$, 其微观状态总数 Ω 为:

$$(h) = C_A^{a_1} * C_{A-a_1}^{a_2} * C_{A-a_1-a_2}^{a_3} * C_{A-a_1-a_2-a_3}^{a_4} * \dots * C_{A-a_1-a_2-a_3-\dots-a_{k-1}}^{a_k} = \frac{A(h)!}{\prod_{i=1}^K (a_i!)} \quad (3)$$

同 Yakovenko 论文所示,可得到资本交换熵:

$$s = f \ln \left(\frac{A!}{\prod_{i=1}^K (a_i!)} \right) = f \left[\ln(A!) - \sum_{i=1}^K \ln(a_i!) \right] \quad (4)$$

假设最大熵状态为所有区间具有相同数量的代理商的状态,即如果存在 K 个箱,每个箱具有相等的概率,则对于所有 x_i, a_i 相同,那么最大熵 S_{Max} 为:

$$s_{\max} = f \ln \left[\frac{A!}{\prod_{i=1}^K (a_i!)} \right] = f [\ln(A!) - K \ln(a_i!)] \quad (5)$$

定义熵指数为 $S_{(h)} = s(h) / s_{\max}$, 则有:

$$S(h) \equiv \frac{[\ln(A!) - \sum_{i=1}^K \ln(a_i!)]}{[\ln(A!) - K \ln(a_i!)]} \quad (6)$$

由斯特林公式

$$\ln(n!) \cong (n \times \ln(n)) - n \quad (7)$$

联立(6)式与(7)式可得:

$$S(h) \cong \frac{1}{\ln(K)} \sum_{i=1}^K \left(\frac{a_i}{A} \right) \times \ln \left(\frac{A}{a_i} \right) \quad (10)$$

在某个箱中随机选取某一代理商的概率为 $p(x_i) = a_i/A$, 因此, 熵指数也可表示为:

$$S(h) \cong \frac{1}{\ln(K)} \sum_{i=1}^K p(x_i) \times \ln \left(\frac{1}{p(x_i)} \right) \quad (11)$$

若一种状态能达到绝对的最大熵状态, 由统计学知识可知在该状态中每一个箱子选取代理商的概率相同。若有 K 个箱子, 则从箱中随机选取某一代理商的概率为 $p(x_i) = 1/K$, 那么最大熵指数为:

$$S_{\max} = \frac{1}{\ln(K)} \sum_{i=1}^K \left(\frac{1}{K} \right) \ln \left(\frac{K}{1} \right) = \frac{1}{\ln(K)} K \left(\frac{1}{K} \right) \times \ln(K) = 1 \quad (12)$$

3 ABM 模拟结果

3.1 熵增现象模拟

在任何 $K > 4$ 且 $A = qK$ (其中 $q > 1$ 且 $A \in \mathbb{Z}$) 的 $H(K, A, W)$ 状态空间中, 其热力学性质一致。通过模型测试也可以发现, $H(K, A, W)$ 最终都会呈现熵增等现象, 为使模型简化, 下文将以 $H(K, A, W) = H(4, 8, 20)$ 作为特例进行探讨。

对于状态空间 $H(K, A)$, 从初始标准配置开始, 所有代理都位于箱 1 中, 并使用迭代转换规则 (一次向右移动一个代理商, 直到该箱中无代理商为止) 生成所有其他状态, 最终使所有代理商都在箱 4 中, 依上述条件规则按顺序每个状态分配唯一的序列号 h 。每一序列号对应的状态如附录所示:

假设初始化模型时设置 $W = 20$, 在表 1 中可观察到 $H(4, 8)$ 中只有 13 种状态具有这个总财富水平。即, 这 13 种状态形成模型的状态空间 $H(4, 8, 20)$ 。在这 13 种空间中, 只有 7 种不同级别的熵指数。

表 1 状态 $H(4, 8, 20)$ 所有熵指数水平

Table 1 Entropy index in $H(4, 8, 20)$

序列号 h	箱子 1 Bin 1	箱子 2 Bin 2	箱子 3 Bin 3	箱子 4 Bin 4	熵指数水平 Entropy index
78	2	0	6	0	0.405639
126	0	6	0	2	0.405639
35	4	0	0	4	0.500000
131	0	4	4	0	0.500000
100	1	2	5	0	0.649397
128	0	5	2	1	0.649397
53	3	0	3	2	0.780639
66	2	3	0	3	0.780639
73	2	1	4	1	0.875000

续表

序列号 h	箱子 1 Bin 1	箱子 2 Bin 2	箱子 3 Bin 3	箱子 4 Bin 4	熵指数水平 Entropy index
93	1	4	1	2	0.875000
49	3	1	1	3	0.905639
96	1	3	3	1	0.905639
69	2	2	2	2	1.000000

在资本交换模型中,在每一个瞬间都有两个代理商进行博弈。对于任何 $a_i > 2$ 的所有状态空间,总共有 K^2 个转化模式,但由于任何代理商不得拥有少于 1 或大于 $\$W$ 资金的条件限制, $2K-1$ 种状态空间是不可行的。因此只有 $(K-1)^2$ 种可行的转化模式,其中 $K-1$ 种转化模式并不能改变宏观状态空间,而 $(K-1)(K-2)$ 种转化模式可以改变宏观状态空间。因此,对于每一个状态,其转化为不同状态的概率不同,具体转化概率如下表所示:

表 2 H(4,8,20) 中各状态间一次转换概率

Table 2 The probability of transition from configuration to configuration in H(4,8,20)

从 A 状态\到 B 状态 From A to B	35	49	53	66	69	73	78	93	96	100	126	128	131
35	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
49	0.04	0.30	0.13	0.13	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
53	0.00	0.22	0.22	0.00	0.33	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
66	0.00	0.22	0.00	0.22	0.33	0.00	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
69	0.00	0.13	0.06	0.06	0.38	0.13	0.00	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00
73	0.00	0.00	0.11	0.00	0.32	0.27	0.03	0.00	0.22	0.05	0.00	0.00	0.00
78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.71	0.00	0.00	0.00	0.29	0.00	0.00	0.00
93	0.00	0.00	0.00	0.11	0.32	0.00	0.00	0.27	0.22	0.00	0.03	0.05	0.00
96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.14	0.00	0.14	0.35	0.07	0.00	0.07	0.02
100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.04	0.00	0.41	0.24	0.00	0.00	0.10
126	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.71	0.00	0.00	0.00	0.29	0.00
128	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.41	0.00	0.04	0.24	0.10
131	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.21	0.00	0.21	0.29

在资本交换模型中,两种状态之间的转换概率不会随时间而变化而且下一个转换独立于先前的转换,并在整个网络中,所有状态空间可以相互转化。因此,随着转化次数的增加,可利用马尔可夫链性质,将上述矩阵进行升幂处理,经过无穷次转化后,则可反映从某一状态最终转化为另一状态的概率。用 EXCEL 实现 100 次转化,得到的概率如下:

表 3 H(4,8,20) 中某一状态最终转化为另一状态概率

Table 3 The ultimate probability distribution of the model in H(4,8,20)

从 A 状态\到 B 状态 From A to B	35	49	53	66	69	73	78	93	96	100	126	128	131
35	0.004	0.095	0.056	0.056	0.298	0.115	0.004	0.115	0.178	0.030	0.004	0.030	0.014
49	0.004	0.095	0.056	0.056	0.298	0.115	0.004	0.115	0.178	0.030	0.004	0.030	0.014
53	0.004	0.095	0.056	0.056	0.298	0.115	0.004	0.115	0.178	0.030	0.004	0.030	0.014
66	0.004	0.095	0.056	0.056	0.298	0.115	0.004	0.115	0.178	0.030	0.004	0.030	0.014
69	0.004	0.095	0.056	0.056	0.298	0.115	0.004	0.115	0.178	0.030	0.004	0.030	0.014
73	0.004	0.095	0.056	0.056	0.298	0.115	0.004	0.115	0.178	0.030	0.004	0.030	0.014
78	0.004	0.095	0.056	0.056	0.298	0.115	0.004	0.115	0.178	0.030	0.004	0.030	0.014

续表

从 A 状态 \ 到 B 状态 From A to B	35	49	53	66	69	73	78	93	96	100	126	128	131
93	0.004	0.095	0.056	0.056	0.298	0.115	0.004	0.115	0.178	0.030	0.004	0.030	0.014
96	0.004	0.095	0.056	0.056	0.298	0.115	0.004	0.115	0.178	0.030	0.004	0.030	0.014
100	0.004	0.095	0.056	0.056	0.298	0.115	0.004	0.115	0.178	0.030	0.004	0.030	0.014
126	0.004	0.095	0.056	0.056	0.298	0.115	0.004	0.115	0.178	0.030	0.004	0.030	0.014
128	0.004	0.095	0.056	0.056	0.298	0.115	0.004	0.115	0.178	0.030	0.004	0.030	0.014
131	0.004	0.095	0.056	0.056	0.298	0.115	0.004	0.115	0.178	0.030	0.004	0.030	0.014

对上表以直方图呈现如下所示：

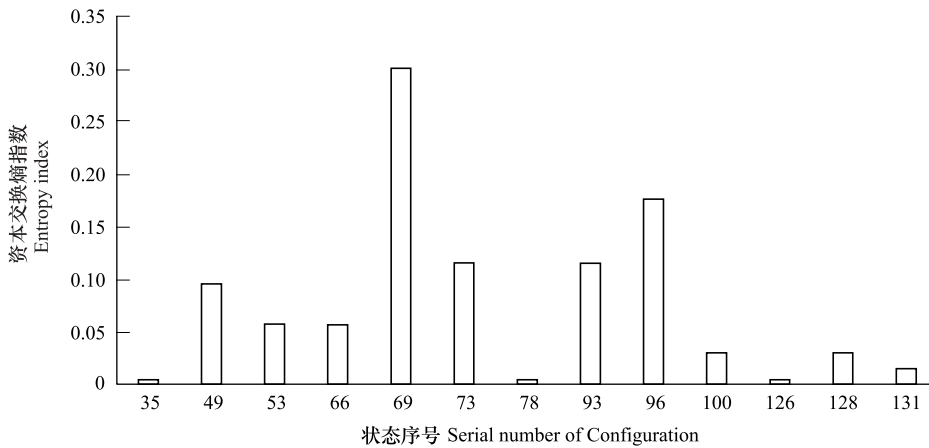


图 1 资本交换模型中不同状态的熵指数水平示意图
Fig.1 The entropy index of different configuration

由前文可看出状态之间的转移都是向熵增的状态方向转移,因此可得最大熵假设:在任何基于随机代理的模型(ABM)中,代理商的数量(对应于本文中的A)是守恒的,并且代理的测量变量特征(对应于本文中的W)也是守恒的,直方图的熵指数值呈现出不断上升的趋势,最终逼近于某个最大熵指数的渐近线上进行微小波动。

3.2 初始财富对最大熵指数的影响

在构建资本交换模型过程中,通过编制的程序(作者建立了Eilab模型)很明显观测到模型通过其状态空间从较不可能的状态移动到更可能的状态,同时,可以观测到资本交换熵不断增加,因此可得出伴随着模型趋向更可能的状态,系统熵指数在不断增加的结论。并且对于不同的初始状态(即改变了最大财富的状态),得到的最终状态不同,并且最大熵指数也不同。

若在一个较大的封闭系统中,该系统共有290代理商,现将系统中的代理商拥有最大财富控制为29,并且投入1450\$的总财富,系统的运行结果如下图所示,在此系统中,能达到的最大熵指数为0.736。

同理,若在上述描述的系统中投入4350\$的总财富,系统的运行结果如下图所示,在此系统中,能达到的最大熵指数为0.989。

同理,若在上述描述的系统中投入7250\$的总财富,系统的运行结果如下图所示,在此系统中,能达到的最大熵指数为0.734。

由此可见,初始财富会影响最终状态并且不同的初始财富最终达到的最大熵指数不同。在初始财富较少的情况下,最终达到的最大熵并不大,并且此时多数人处于贫穷的状态;随着初始财富的增加,最终达到的最大熵也随之增加,此时,各阶级的人数相近;伴随着初始财富继续增加,最终达到的最大熵减小,此时多数人处于富裕状态。

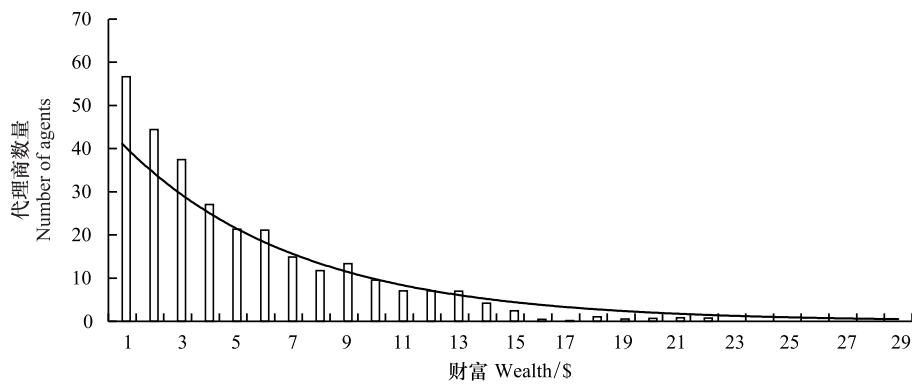


图2 H(29,290,1450) 最终状态资本概率分布示意图

Fig.2 H (29, 290, 1450) wealth probability distribution

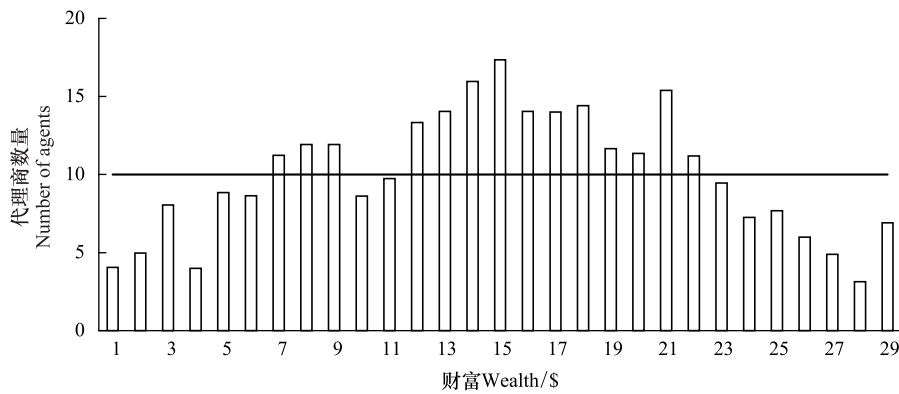


图3 H(29,290,4350) 最终状态资本概率分布示意图

Fig.3 H (29, 290, 4350) wealth probability distribution

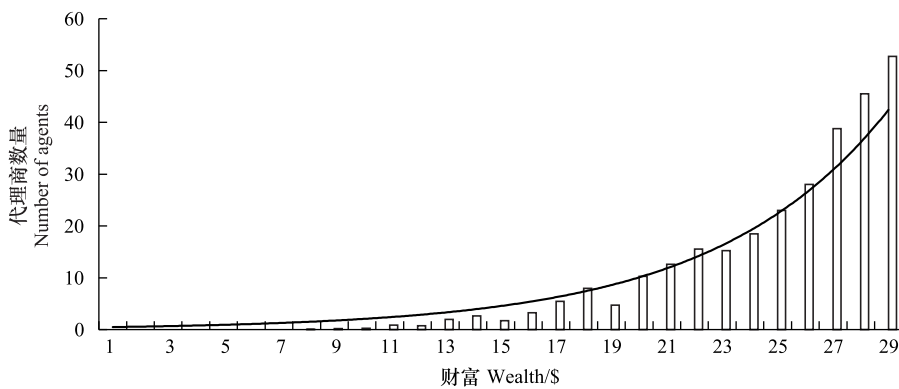


图4 H(29,290,7250) 最终状态资本概率分布示意图

Fig.4 H (29, 290, 7250) wealth probability distribution

4 资本交换熵的生态涵义

本文构建的资本交换熵指数衡量系统的混乱度在经济学中可以体现为财富分配的均衡程度。在经济学中,公平指的是收入分配的相对平衡。而经济不平衡发展的核心是经济发展的诸多要素之间发展质量存在较大差异。^[28]本模型中代理商间不存在任何差异,即不考虑教育情况、家庭背景等可能影响初始财富或是输赢概率的外在因素。即使在如此简单——近乎是自然选择的模拟情景下,由于 Crook 涨落定理,模型最终走向

了财富分配不平衡的状态。而在现实生活中,教育情况与家庭背景将会极大影响财富分配;不同的家庭背景决定了不同的教育质量,而教育质量又极大影响了收入水平,从而影响财富分配的不均。由此可见,无论是现实经济运行结果还是虚拟模型运行结果,都可以通过熵指数进行对比。

在 Yakovenko 的模型中,随着时间的推移,整个社会的财富分配的长尾效应会越来越严重,即贫富差距会及其悬殊,社会中大部分人处于贫穷的状态,而少数人占据大量财富^[4]。这意味着在毫无政府干预的自由交换的经济系统,将会自发地走向贫富差距悬殊的混乱状态,而这状态又相对稳定,难以一时逆转。在系统运行的后期,都是熵值较大的时期,而这时期要发生根本性变革,只靠微小变量的改动是远远不够的。所以系统在建立初期就应该有着相应的控制。

在本文建立的资本交换模型中,限制了每个代理商拥有财富的最大值,这一控制措施使模型最终状态的稳定性优于 Yakovenko 的模型的最终状态。在系统中投入少量资金(初始状态为每个代理商 5 美元),系统最终将会呈现与 Yakovenko 模型相似的长尾效应。若在系统中投入较多资金(初始状态为每个代理商 15 美元),系统最终将会呈现均匀财富分配。若在系统中投入大量资金(初始状态为每个代理商 25 美元),由于有最大财富的限制,系统最终呈负指数分布,这就意味着整个社会富人较多而穷人较少。在图 4 状态的熵指数没有达到最大,并且整个社会的状况相对改善。由此可见,在封闭的系统中,在财富积累到一定程度时,政府的控制可以在一定程度上使最大熵指数减低,并且改善社会状况。

但大部分国家在资本交换前,社会的总体财富并不富裕,难以实现图 4 的状态。以中东地区为例,中东大多数国家的经济发展严重依赖于石油的出口情况,并且自“石油繁荣”以来中东大多数国家的政策均围绕着石油而制定进行。因此中东地区的经济增长极大限度受能源的约束,可以认为在“石油繁荣”之前,中东地区的经济总量就已经被石油总储量所确定。并且在“石油繁荣”之前,中东地区大多数国家整体都是相对贫困,在这样的情况下选择资本交换的道路,则会产生如图 2 所示的情况,即富人愈富,穷人愈穷。据 2018 年世界不平等报告可知,中东是世界上最不平等的地区,前 10% 的富人拥有的财富占据了国民收入的 61%。

经济不公平带来的发展差距将会导致生态环境不公平问题。当社会整体处于较低的财富水平时,Boyce (1994) 认为每一单位的环境退化给富人带来的收益大于给穷人带来的收益,那么在短期的博弈中,富人将会选择破坏环境以获取较大的利润^[9]。并且,随着富人的财富的集中,富人则可以通过改变市场价值、操纵他人偏好以及确定技术发展路径等手段来实现其利益最大化,因此在整个社会在长期的选择中将会倾向于破坏生态以攫取利润。当社会整体处于较高的财富水平时,Dalton、Milbrath 等人认为每一单位的环境退化给穷人带来的收益大于给富人带来的收益,因此中产阶级会通过环境正义运动来反对生态环境的破坏,但贫困群体为解决温饱问题而加大生态环境的挖掘^[29-30]。生态环境不公平与生态破坏形成恶性循环从而导致生态环境危机。资本交换熵指数在衡量经济公平程度的同时,也间接地反映了生态环境水平,当整体社会出现了如图 2 所示的现象时,生态系统将难以维持平衡;当整体社会出现了如图 3 所示的现象,整体社会相对平等,将有利于减少生态恶化;当整体社会出现了如图 4 所示的现象,多数的富人将会通过集体行动使生态系统维持平衡。

5 结论

ABM 模型是模拟资本交换模型熵指数体系的理想工具,通过资本交换熵指数,不但能反映系统纵向的混乱程度的变化,而且对系统还能进行横向对比,系统中的混乱程度在经济方面体现为贫富之间的差距,所以资本交换熵指数也是衡量社会财富分布的重要工具。同时贫富差距与生态公平也有着一定关系,因此可以资本交换熵指数对生态公平程度进行评价。

通过熵指数观测的 ABM 中,可以解释一些经济现象与生态问题。社会系统会在平衡与效率间权衡,而不平衡的现象伴随着经济的发展和效率的提升愈演愈烈。本文模拟的仅是封闭的社会系统,且社会主体之间没有任何差距,在这样的理想的社会系统中,通过资本交换熵指数也可以看出,随着时间的演变,资本交换熵

指数不断增加,社会混乱度不断增大,不平衡现象越发突出。Yakovenko 对此现象也做了相应的解释,但是 Yakovenko 并未用到熵指数的概念,难以做到不同经济系统之间的对比。并且 Yakovenko 的方法过于复杂,本文的简化模型不但解决了相应问题,还通过限制最大代理商财富来削弱不平等程度。除此以外,本文将模型与生态系统相结合,通过经济的平等程度反映生态公平程度,可以说,本文的模型优于 Yakovenko 的模型。

由本文构造的资本交换熵模型也可以证明最大熵原理:在任何基于随机代理的模型(ABM)中,代理商的数量(对应于本文中的 A)是守恒的,并且代理的财富总量(对应于本文中的 W)也是守恒的,资本交换熵指数值呈现出不断上升的趋势,最终逼近于某个最大熵指数的渐近线上进行微小波动。

生态公平是实现可持续发展的重要条件,而维护社会公平是保障生态公平的重要手段。由最大熵原理可知,在过度依赖能源的较为贫困的经济系统中,单纯的资本交换带来的贫富差距将使该系统难以持续,因此在系统中要加以一定的控制使其正常运行。对于资本积累较为薄弱的国家,不宜过度放任自由市场,无节制的交换带来的收益远不如不平等带来的损失大;对于资本积累较为丰富的国家,应当要合理限制富裕人群持有的最大财富,防止垄断造成的权力集中的现象,权力集中的现象将会使生态环境的选择权完全交予富人群体,这将会使生态公平发生扭曲,进而影响可持续发展。因此,通过一定的政府的控制,可以相应地解决市场失灵的问题,有效地促进可持续发展。

参考文献(References):

- [1] Murray Bookchin. The modern crisis. Philadelphia: New Society Publisher, 1987.
- [2] Clausius R. "Über die Wärmeleitung gasförmiger Körper", *Annalen der Physik*, 1865: 353-400.
- [3] 王恒君.经济熵论——经济学边界的超越.西安:西安交通大学出版社,2018:123-125.
- [4] Dragulescu A A, Yakovenko V M. Statistical mechanics of money. *The European Physical Journal B*, 2000,17:723-729.
- [5] Stretesky P, Hogan MJ. Environmental justice: An analysis of super fund sites in Florida. *Social Problems*, 1998, 45(2):268-287.
- [6] Dobson A. Justice and the Environment: Conceptions of Environmental Sustainability and Theories of Distributive Justice. Oxford: Oxford University Press,1998:63-84.
- [7] Low N, Gleeson B. Situating Justice in the Environment: The Case of BHP at the Ok Tedi Copper Mine. *Antipode*, 1998, 30: 201-226.
- [8] Cullinan C. Wild Law: A Manifesto for Earth Justice. London: Green Books in association with The Gaia Foundation, 2003.
- [9] Boyce J K. Inequality as a cause of environmental degradation. *Ecological Economics*,1994, 11(3): 169-178.
- [10] Magnani E. The Environmental Kuznets Curve, environmental protection policy and income distribution. *Ecological Economics*,2000,32(3): 431-443.
- [11] Scruggs L A. Political and economic inequality and the environment. *Ecological Economics*, 1998,26(3):259-275.
- [12] Berthe A, Elie L. Mechanisms explaining the impact of economic inequality on environmental deterioration. *Ecological Economics*, 2015,116: 191-200.
- [13] Cowell F. Measuring Inequality. 2nd ed. Hemel Hempstead: Prentice Hall/Harvester Wheatsheaf, 1995.
- [14] 林毅夫,蔡昉,李周.中国经济转型时期的地区差距分析. *经济研究*,1998(06):5-12.
- [15] 李实,赵人伟.中国居民收入分配再研究. *经济研究*,1999(04):5-19.
- [16] 朱明宣,李建中.居民收入差异的衡量方法. *统计与决策*,2005(16):142-144.
- [17] 吴璟.浅谈基尼系数在衡量收入差距问题中的缺陷. *市场周刊(理论研究)*,2008(06):94-95+9.
- [18] Smerlak M. Thermodynamics of inequalities: From precariousness to economic stratification. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2016, 441: 40-50.
- [19] 乔占军.基于熵指数测算的我国服务业总量与结构互动研究. *统计与决策*,2012(24):148-150.
- [20] 赵玉林,魏芳.基于熵指数和行业集中度的我国高技术产业集聚度研究. *科学学与科学技术管理*,2008(11):122-126+180.
- [21] 蔡圣杨.基于熵指数的我国商业银行收入结构绩效研究. *时代金融*,2018(08):126-127+129.
- [22] 宁亚东,张世翔,孙佳.基于泰尔熵指数的中国区域能源效率的差异性分析. *中国人口·资源与环境*,2014,24(S2):69-72.
- [23] 唐建荣,王清慧.基于泰尔熵指数的区域碳排放差异研究. *北京理工大学学报(社会科学版)*,2013,15(04):21-27.
- [24] 杨远,李林.中国能源效率的地区差距——基于泰尔熵指数的综合评价. *统计与决策*,2009(17):127-128.
- [25] 蓝相洁.公共卫生财政支出收敛性广义熵指数测度研究——以广西为例. *经济经纬*,2015,32(01):156-160.
- [26] 李欢,彭燕,汪甜甜,杨爱佳,李翔宇.近十年中国特殊教育均衡发展实证分析——基于广义熵指数的测度与分解. *教育学报*,2017,13(04):89-97.
- [27] Baumgärtner S, Dyckhoff H, Faber M, Proops J, Schiller J. The concept of joint production and ecological economics. *Ecological Economics*, 2001,36(3):365-372.
- [28] 杨继瑞,康文峰.中国经济不平衡不充分发展的表现、原因及对策. *贵州师范大学学报(社会科学版)*,2018(03):71-84.
- [29] Dalton, Russell J. The green rainbow: Environmental groups in Western Europe. Yale University Press, 1994.
- [30] Milbrath L W, Barbara V F. Environmentalists: Vanguard for a new society. SUNY Press, 1984.