

Research
Sustainable Infrastructure—Article

工业生态系统与食物网——以一种基于生态学的质量流分析方法建立中国钢铁制造业模型

Stephen M. Malone^{a,*}, Marc J. Weissburg^b, Bert Bras^a

^a George W. Woodruff School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332-0405, USA

^b School of Biological Sciences, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, USA

ARTICLE INFO

Article history:

Received 2 November 2017

Revised 1 December 2017

Accepted 3 January 2018

Available online 6 April 2018

关键词

生态学网络分析

质量流分析

钢铁制造

摘要

物质与能量在自然系统和工业系统之间的转换，为推导这些系统之间的相互作用提供了一种标准。考察这些流动是谈论工业如何影响环境的基本内容。我们认为体现可持续性的生物系统提供的方法和原理能为组织工业活动带来更多有用的方法。把这些生物学方法运用到钢铁制造中，可有效利用材料、减少废料并可利用目前的技术减少能源需求。在本文中，我们采用基于系统的质量流分析，利用生态学原理来考察中国钢铁行业中的材料随着时间变化产生的结构与流动方面的变化。运用现有数据，我们的分析结果表明中国钢铁制造业已在单元过程层面提高了能源效率及可持续利用程度，但合理地组织钢铁制造生态系统仍有进步空间。我们的结果表明通过协同行业的智能化布局利用钢铁制造中产生的废料，中国未来的钢铁行业将在减少废料的同时更好地体现生态系统的成熟度与健康状况。

© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

早在38亿多年前，地球上就出现了生命的迹象。经过上千年的自然选择，有机物在自然环境中不断进化为现在的系统。把生态学原理改造并应用到人类工程体系中，有可能通过合理利用能量和资源提高效率并减少废料[1–4]。研究生物系统组织自身的自然结构，能为人们在全球范围内制定体系提供一种更合理、可持续的方法。一个可持续发展的全球社区可满足当代人的需求，且不牺牲后代人的需求[5]。

物质流与能量流是影响环境可持续性的根本属性，因为它们是工业系统与自然系统之间的主要客观联系

[6]。生态学家利用食物网(FW)能从生态系统的物质与能量的流动中推导出多种结构指标和流动指标。这些指标描述了自然生态系统结构、属性以及生态系统内捕食者与猎物的关系[7,8]。同样，从自然生态系统的角度，我们可以获取如何建立并增强可持续的、性能驱动的工业体系的方法。

对工业格局进行系统的分析可以系统地建立整体流程模型，并用该模型来设计、规划并控制生产机制，以便构建高效利用材料和能量的体系。此外，这项研究通过模拟系统揭示了资源开采中产生的压力因子、反应机制以及产生的环境影响。将该分析运用到工程中，能通过改变工业结构设计出一个更接近健康生态系统的工业

* Corresponding author.

E-mail address: smalone31@gatech.edu (S.M. Malone)

体系。过去使用系统行为的测量结果来影响系统内设计变化的案例已有报道[4,6,9]。人们利用分析的系统指标,已经发现了更加高效的工业网络架构,实现了传统工业网络降低成本、提高效率的设计目标 [2,3]。

一些科学家认为由于目前中国钢铁行业(CSI)对资源和能量的高需求以及过去多年来的环境恶化,CSI处于非可持续发展状态[10]。本文旨在利用基于系统的质量流分析(MFA)来建立CSI发展模型,以期提升工业体系性能并合理利用生态指标。中国在第六个五年计划(1981—1985年)和第七个五年计划(1986—1990年)期间,在工业领域节能项目中加大了投资力度,我们研究了这期间中国的总体钢铁制造情况[11]。接下来,我们调查了中国目前整体的钢铁制造过程。最后,我们展望了CSI未来的走向。

钢铁行业是中国经济的支柱产业,但经济高速增长是以环境为代价的[12]。中国粗钢制造发展迅猛,产量从1978年的 3.18×10^7 t增长到2013年的 8.2199×10^8 t[13]。图1[13]描述了2004—2013年粗钢产量的增长情况。

CSI的能源消耗占总能源消耗的18.3%,是中国温室气体排放三大来源之一[14]。2012年,中国CO₂排放量占全球的29%[15]。在这些排放物中,约有12%直接来源于钢铁制造[16]。因此,全球大约3.48%的CO₂排放源于中国钢铁制造。CSI在保护能源与环境方面取得巨大进步,但与国际水平相比仍需很大改善。2007年的数据显示,国际能源署(IEA)证实如果采用目前最好的技术,中国每吨粗钢能节约6.1 GJ的能耗[17]。

传统钢铁制造包括两种过程:高炉(BF)-碱性氧炉(BOF)过程,被称为“长流程”;另一种是电弧炉

(EAF),被称为“短流程”。长流程的步骤包括烧结、炼焦、BF的使用,它比短流程产生的污染物更多,而短流程更依赖废钢。中国钢铁制造业高能耗与重污染的特点主要是由于废钢供应不足,因此超过91%的钢铁制造都依赖长流程 [18]。本文研究系统层次上的钢铁产品生命周期,利用生态学中的指标来评估系统结构,从而为潜在领域的可持续发展提供定量分析。

2. 材料和方法

2.1. 基于结构的指标

生态学家采用大量指标来了解生态系统结构和生态系统行为之间的联系[19]。如今物质流最常见的表现形式是食物网(FW),它用图形描绘出某一生态系统中参与者之间的关系。计算这些结构的指标需要了解某一FW中捕食者、猎物以及它们所代表的关系。这种表征方法可以用矩阵的形式表现出来,用数字1代表有联系,数字0代表没有联系,列代表捕食者,行代表猎物[见图2[4], $f_{ij}=1$ 表示猎物(i)和捕食者(j)之间有联系]。我们把物种编号罗列在矩阵上方与左侧,相同编号在纵向和横向上表示同一物种。在本文中,我们把FW原理和随后的矩阵分析结果运用到CSI中,以期量化生态结构对钢铁制造体系的影响以及对潜在领域的改善。

本研究中运用到的结构指标的定义如下:

物种数量(N):FW中物种的总量。该术语也被称为“物种丰富度”,而且可以用FW矩阵中的行数或列数表示[20]。

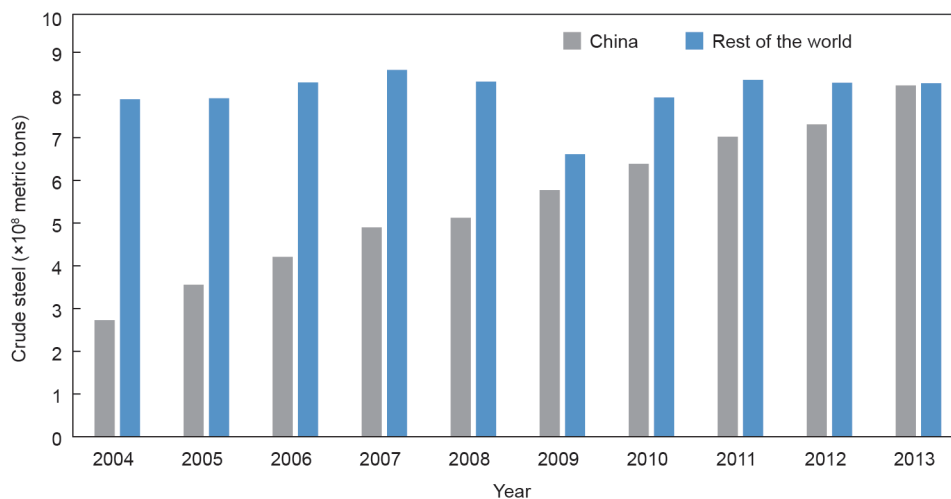


图1.中国及其他国家的粗钢产量 (10^8 t, 改编自参考文献[13])。

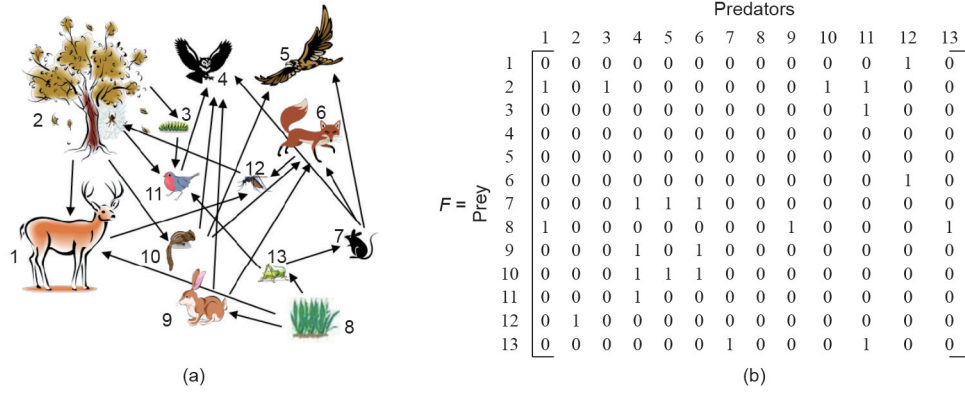


图2. (a) 包含编号物种的假定FW; (b) 假定FW矩阵 (改编自文献[4])。

关系数量 (L): FW中物种间有直接关系的数量。该术语用FW矩阵中非零的相互作用的数量表示[20]。

$$L = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij} \quad (1)$$

关系密度 (L_D): 关系总数与网络中物种总数的比例[21]。

$$L_D = L/N \quad (2)$$

猎物 (n_{prey}): 被一种或多种捕食者捕食的物种。该关系由FW矩阵中非零行数表示[21]。

$$f_{\text{row}}(i) = \begin{cases} 1 & \text{for } \sum_{j=1}^n f_{ij} > 0 \\ 0 & \text{for } \sum_{j=1}^n f_{ij} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$n_{\text{prey}} = \sum_{i=1}^m f_{\text{row}}(i) \quad (4)$$

捕食者 (n_{predator}): 捕食一种或多种猎物的物种。该关系由FW矩阵中非零列数表示[21]。

$$f_{\text{col}}(j) = \begin{cases} 1 & \text{for } \sum_{i=1}^m f_{ij} > 0 \\ 0 & \text{for } \sum_{i=1}^m f_{ij} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$n_{\text{predator}} = \sum_{j=1}^n f_{\text{col}}(j) \quad (6)$$

猎物与捕食者比例 (P_R): 猎物数量与捕食者数量比例。

$$P_R = n_{\text{prey}}/n_{\text{predator}} \quad (7)$$

捕食均值 (G): FW中每个捕食者捕食的猎物平均

数。该值的计算方式为把FW矩阵中的列数相加然后除以包含非零值的列数 (n_{predator})。

$$G = L/n_{\text{predator}} \quad (8)$$

脆弱性 (V): FW中每个猎物对应的捕食者平均数。计算方法为把FW中行数相加, 然后除以非零值的行数 (n_{prey})。

$$V = L/n_{\text{prey}} \quad (9)$$

周期性 (λ_{max}): 用于测量系统内强度以及循环路径。通过求FW矩阵的转置的最大实特征值可计算出周期性。 A 代表FW矩阵的转置矩阵; I 代表单位矩阵[19,22]。

$$\lambda_{\text{max}} = \max, \text{ 最大实特征值的计算: } 0 = \det(A - \lambda I) \quad (10)$$

连接度 (C): FW中的关系数量 (L) 除以相互作用总数 (N^2)。如果禁止同类相食, 相互作用数量会减少, 分母会变成FW中非零对角线外元素的一部分[8,20,23]。

$$C = L/N^2 \quad (11)$$

2.2. 基于流的指标

生态学家也采用基于流的分析法来认识生态系统。计算流动指标需要了解结构信息和流动信息。基于流动的分析法遵从下列4种分类:

- (1) 进入系统边界的输入量;
- (2) 系统边界内参与者之间的流动;
- (3) 离开系统边界的输出量;
- (4) 流失量 (大部分与水或能量有关)。

与基于结构的指标计算相比, 基于流的指标计算使用 $(N+3) \times (N+3)$ FW流量矩阵, 包含来自系统外的输入 (0行)、系统外的输出 ($N+1$ 列) 和系统的流失量

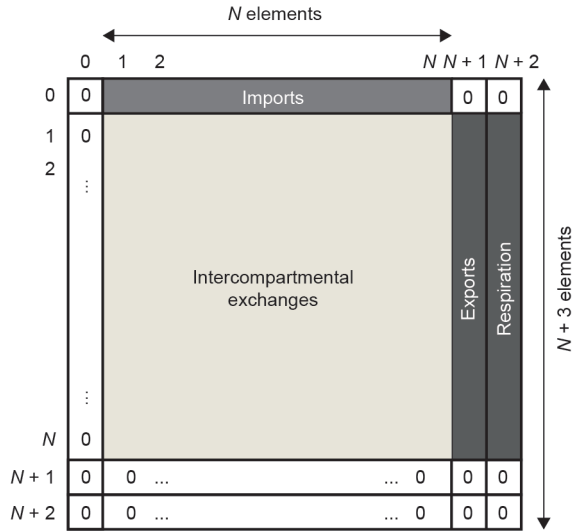


图3. 流动矩阵案例 (改编自文献[24])。

($N+2$ 列) (图3) [24]; 从参与者 i 到参与者 j 的流动由真值 t_{ij} 表示, 即矩阵中第 i 行、第 j 列; t_{ij} 的数值0表示从参与者 i 到参与者 j 没有发生物质或能量流动, 因此不存在联系。

本研究涉及的流动指标定义如下:

系统吞吐总量 (TST_p): 表示生态系统中所有流动量之和。 TST_p 用于测量流动规模或程度, 相当于评估一个国家总体经济水平的国民生产总值 (GNP) [9,25,26]。

$$TST_p = \sum_{i=0}^{N+2} \sum_{j=0}^{N+2} t_{ij} \quad (12)$$

平均相互信息 (AMI): 指系统的专业化程度或物质和 (或) 能量流动的限制数量。AMI用于表示生态系统发展状态或系统成熟程度[9]。

$$AMI = -k \sum_{i=0}^{N+2} \sum_{j=0}^{N+2} \frac{t_{ij}}{TST_p} \cdot \log_2 \left[\frac{t_{ij} \cdot TST_p}{\left(\sum_{j=0}^{N+2} t_{ij} \right) \left(\sum_{i=0}^{N+2} t_{ij} \right)} \right] \quad (13)$$

系统优势 (ASC): 测量生态系统有效分布的平均量。因此, 它可单独衡量系统的增长与发展[9,25,26]。

$$ASC = AMI \cdot TST_p \quad (14)$$

发展能力 (DC): 这是一个系统为获得改善所拥有的最大潜力, 它也是系统优势 (ASC) 的上限[9,25,26]。

$$DC = -1 \cdot \sum_{i=0}^{N+2} \left[\left(\sum_{j=0}^{N+2} t_{ij} \right) \cdot \log_2 \left(\sum_{j=0}^{N+2} t_{ij} \right) \right] \quad DC \geq ASC \geq 0 \quad (15)$$

系统总开销 (TSO): 这与网络中多余的迁移量有关, 是灵活性和效率之间的最优指标[9,25,26]。

$$TSO = DC - ASC \quad (16)$$

循环指数 (CI) 或Finn循环指数 (FCI): 这是个无量纲数, 是系统循环中产生的所有迁移量的百分比, 或循环的系统中全部活动的百分数[9,27]。

$$TST_c = \sum_{j=1}^n \left(\frac{t_{jj} - 1}{t_{jj}} \right) T_j \quad (17)$$

$$CI = TST_c / TST_p \quad (18)$$

式中, T_j 在输入矩阵中包含流动量之和; TST_c 是全部系统循环通流。

平均路径长度 (MPL或APL): 有物质或能量流动发生的参与者数量[27]。

$$MPL = TST_p / \left(\sum_{j=0}^{N+2} t_{0j} \right) \quad (19)$$

鲁棒性 (R): 计算ASC和DC之间的关系, 或系统中组织限制与冗余度的比值, 从而规范系统的“有序度” [25,28]。

$$R = -k \left(\frac{ASC}{DC} \right) \cdot \log_2 \left(\frac{ASC}{DC} \right) \quad (20)$$

2.3. 钢铁行业的应用

如前所述, 有些科学家认为CSI目前处于非可持续发展状态。当评论该观点时, 不能忽视整个产品生命周期的重要性, 因为钢铁是世界上回收最多的材料[13]。金属不会因为回收而退化, 因此材料流动离开钢铁制造过程, 随后以废料的形式在产品生命周期内被回收, 这在流动分析, 特别是物质流的反馈循环中非常重要。

图4介绍了能源、水、原料和废料进入钢铁制造的过程以及钢铁生命周期中的其他过程。了解钢铁制造过程之外的钢铁的影响和使用, 可以帮助我们更准确地分析网络结构内的系统。为准确建立钢铁制造过程中变化的模型, 有必要先定义系统边界。观察核心材料和能量的转移可帮助我们研究系统边界内嵌入式过程是如何随着时间的推移而发展的。

2.3.1. 传统钢铁集成制造过程

1980—1990年, 每吨钢铁能量消耗从1285 kgce减

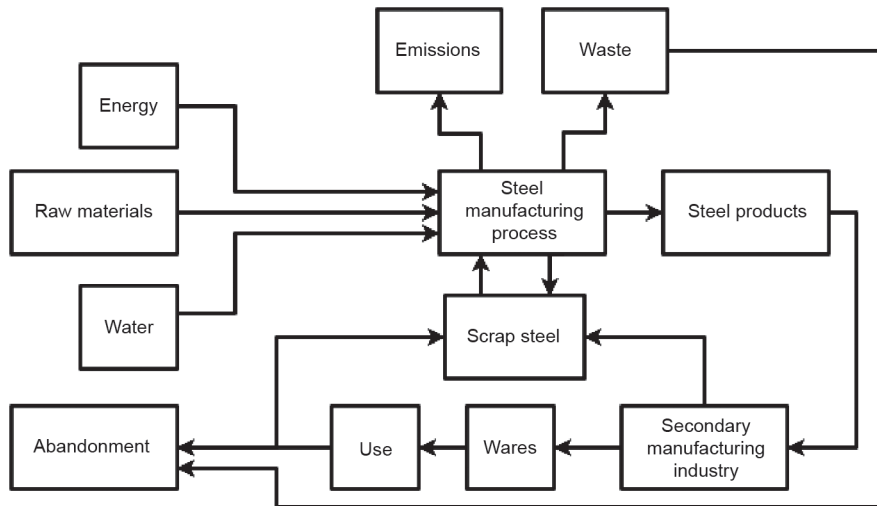


图4. 钢铁的生命周期流动。

少到1017 kgce ($1 \text{ kgce} = 29.727 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) [29]，下降了约20.9%。在此期间，中国制定了一些措施来改善能源效率和节能管理，提供经济激励措施，引导研发，启动信息技术服务，改善教育和培训[30]。许多措施注重优化钢铁制造过程，引进能量密集型机电设备，采用新技术，如连续浇筑，研究作为燃料的副产品气体的利用。为了进行历史分析，我们从中国冶金工业经济发展研究中心[31]采集的1988年鞍山钢铁集团公司的BOF数据中选取了主要阶段物质流。生产层次上的焦比、连续注铸产量、外部废料利用分数、各阶段物质流值以及所有模型结构等罗列在补充材料S1中。但一些数值还需要通过

文献来获取，因为无法定位单个资源。图5展示了1987年CSI的简化物质流。

原材料仓包括生水、石灰、煤炭和铁矿石。钢铁制造长流程中物质流的主要工序包括炼焦厂、烧结厂、石灰厂、氧气厂以及水处理厂。物质输入过后，钢铁制造过程中的核心功能包括炼焦、烧结、BF制铁、BOF制钢和轧钢。工厂之间各种次级流程包括铁水预处理、不同类型的次级冶金以及在进入轧钢厂或中厚板轧机之前重新加热法。传统模型的假设如下：

- 副产品气体如焦炉煤气(COG)、高炉煤气(BFG)以及氧气顶吹转炉气(BOFG)等在1988年未被

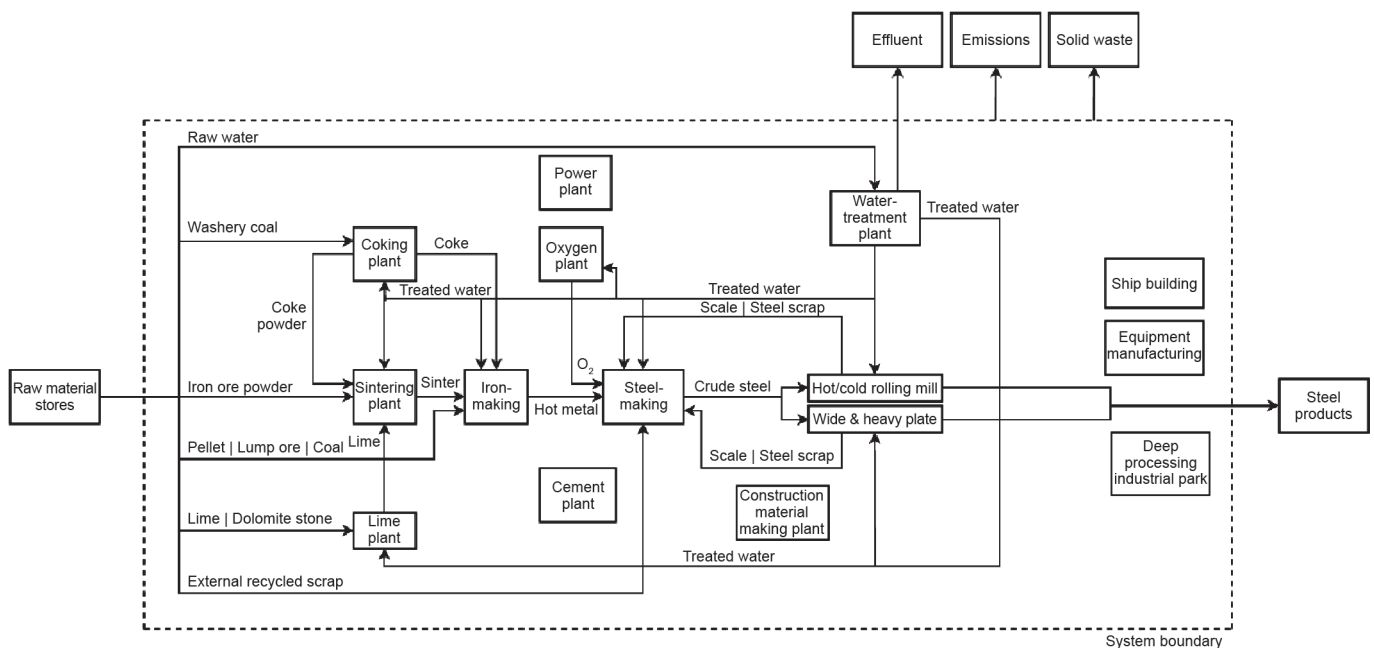


图5. 简化的传统钢铁集成制造过程。

用于发电，而是被排放到大气中[29]。

- 球团矿、无烟煤、氧气厂的氧气鼓风或石灰未在炼铁过程中使用[32]。
- 由于缺乏1988年的数据，估计1998年每吨生钢消耗210 m³水 [31]。
- 由于缺乏1988年的数据，估计1988年每吨生钢的BOF矿渣为0.0085 t [33]。
- 轧屑未被回收到烧结厂 [34]。
- 尽管使用率差别很大，厂内水流分布与现在的比例相同[35]。
- 从石灰厂、铁矿粉和原材料仓中的石灰流动到烧结厂的物质与现在的量保持不变。
- 能够利用该钢铁厂的产品或废料流的协同行业超出了传统钢铁制造系统的界限。
- 钢铁制造的燃料主要以煤炭为主，因此假设废气转化为煤当量。

做出上述假设主要由于20世纪80年代末CSI数据的缺乏。在假设数据（如石灰流动量、排放量）的情况下，需要做保守估计以避免模型的不准确。

2.3.2. 目前钢铁集成制造过程

自1990年以来，通过结构调整、能源和材料流动优化，CSI节能取得了重大进展。CSI注重废热回收利用技术、原料和燃料预处理技术、工厂布局优化、能量管理和控制利用自动化技术[29]。

目前钢铁制造过程的系统边界和跨边界物质流如图6所示。

在本研究中，模型假定类似于图6的结构中的副产品气体被运送到电厂锅炉中产生蒸汽，然后通过发电机转换为电能。副产品气体还可通过加热炉再次回收利用。该假设与2017年的观察结果一致，90%容量大于1000 m³的BF配备有高炉煤气余压回收透平装置（TRT）。截至2004年年底，大约25%的CSI安装并运行了干法熄焦装置（CDQ）[17,36]。此外，截至2006年年底，中国77%的重点钢铁企业安装了BFG回收设备，64%的工厂安装了COG和BOFG等气体回收设备[36]。目前的模型假设如下：

- 能够利用该钢铁厂的产品或废料流的协同行业超出了传统钢铁制造系统的界限。
- 钢铁制造所需的燃料主要以煤炭为主，因此假设废气转化为煤当量。
- 不规则产生的副产品气体可以忽略不计，但在现实中，设备维护等不确定因素会影响气体的稳定产生。

2.3.3. 钢铁集成制造过程的未来发展

Zhang和Wang[10]认为需要一个新发展模式来利用生态改革减少能源消耗。目前CSI一些正开展的工程项目证明了这一点。鲑鱼圈生态工业园就是一个例子，该生态园由鞍山钢铁集团公司等建造。鲑鱼圈生态工业园

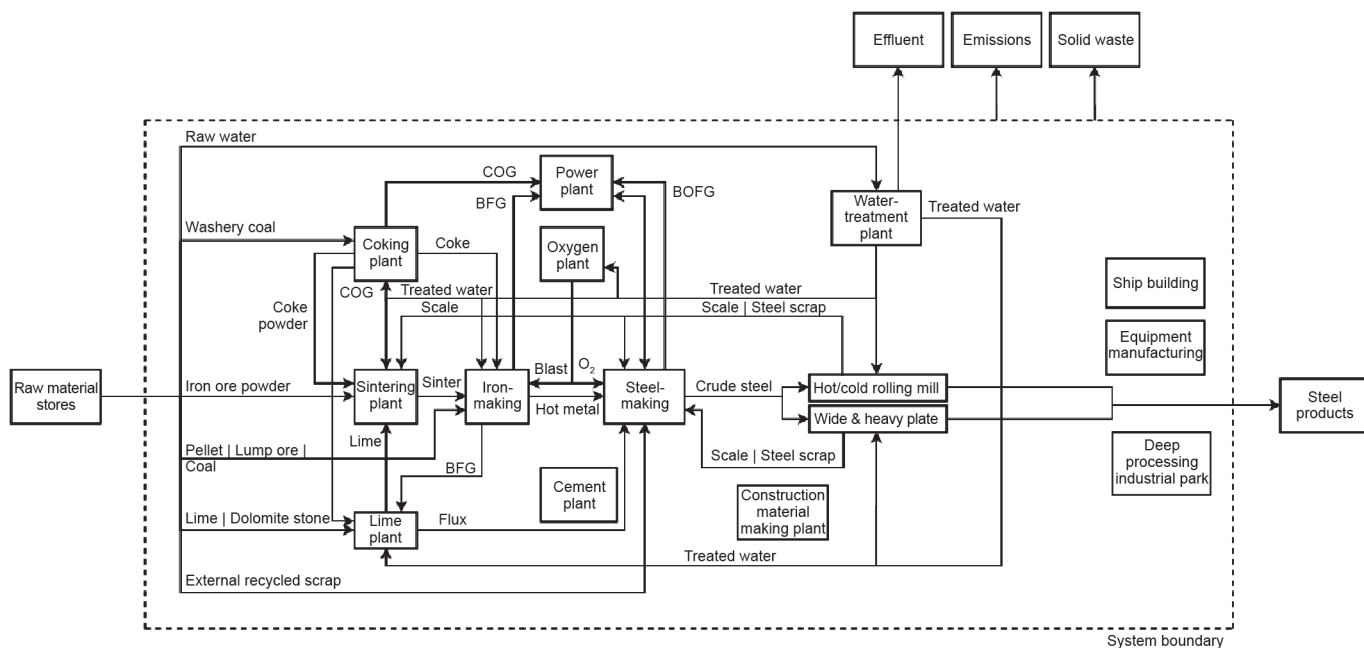


图6. 目前简化的钢铁集成制造过程。

目前还在建设当中，其目的是对废料和园内钢铁厂所生产的产品加以利用，该项措施首次从丹麦Kalundborg生态工业园引入[37]。该结构如图7所示。

为了更好地利用废料，新结构通过半封闭式循环减少工厂产生的废料量。此外，通过协调土地资源和共享资源，如现场电厂，其他行业也受益于该结构。值得注意的是该结构完全基于当前数据；还需要进一步研究来优化进出这些行业的废料，从而提高生产并减少废料。由于我们的研究仅集中在钢铁制造过程，因此选择了图7所示的结构。对未来模式的假设如下：

- 未来钢铁制造业将继续使用BOF过程。
- 钢铁制造所需的燃料主要以煤炭为主，因此假设废气转化为煤当量。
- 不规则产生的副产品气体可以忽略不计，但在实际中，设备维护等不确定因素会影响气体的稳定产生。

3. 结果与讨论

基于结构的生态模型统计数据如表1所示。

在对图5的传统结构与图6、图7的目前结构和未来结构进行对比时，我们可以观察到 λ_{\max} 的增加，它与总体结构内更高的循环潜力有关。在未来结构中，随着越来越多的输出量运送至相关行业，其周期性也会降低。如果材料流从这些相关行业返回钢铁制造过程中， λ_{\max} 预计会大于目前结构。

从传统和未来结构中可看出， G 值增加和 V 值下降说明途径扩散率更大。假设在目前和未来结构中周期性、连接性和途径扩散率增值潜力更大，显然钢铁制造的总体结构随着时间发展得到了优化，并更接近于一个自然系统。

表2总结了基于流动的统计结果。表2的结果说明该系统截至目前在FCI、MPL和AMI方面已经取得了很大进步。MPL的变化表明目前结构会使材料在输出前的系统内“接触”更多的参与者，也就是说其复杂程度会增加。在未来结构中，这种结构更加简单。因此，未来结构需要一个更长的周期，因为MPL指标表明未来网络使用的资源并没有得到充分利用。这并不意味着传统结构表现良好；相反，如表1所示，未来结构具有此前没有且尚未实现的再回收功能。FCI显示整个系统的

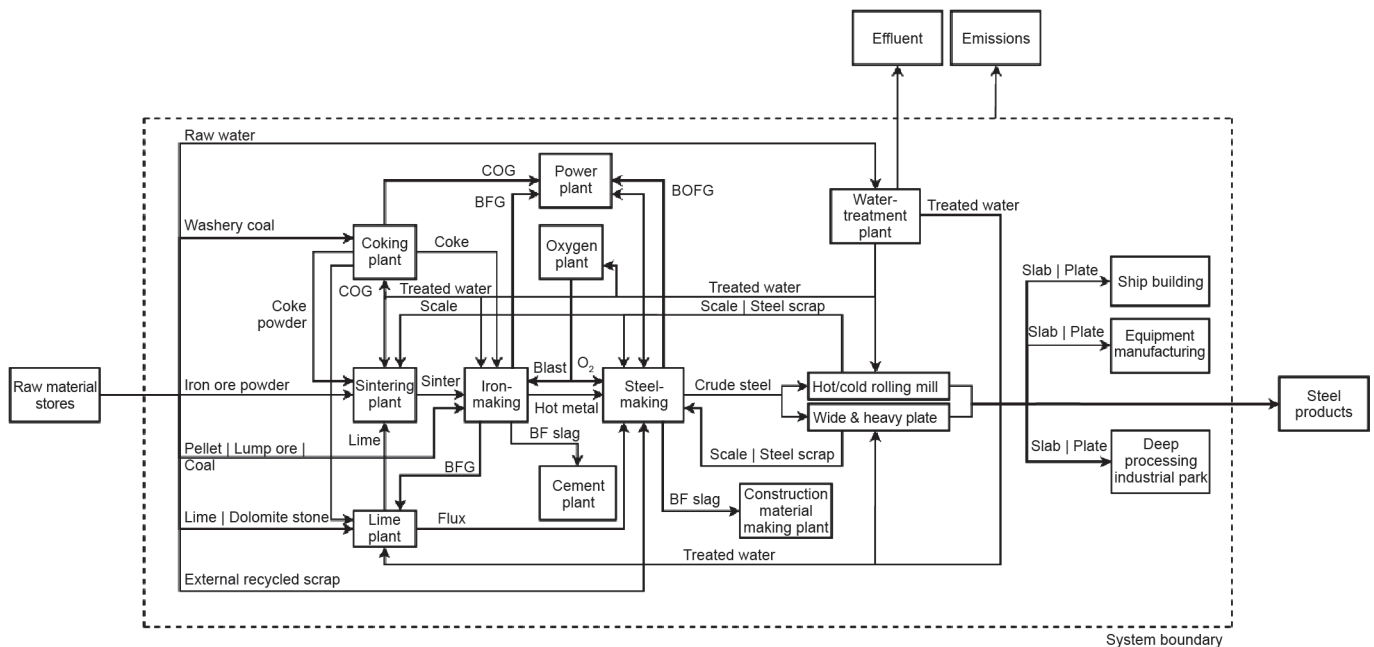


图7. 简化的未来钢铁集成制造过程。

表1 基于结构的传统、目前和未来BOF钢铁制造流程统计结果

Structure-based statistics	λ_{\max}	L_D	P_R	G	V	N	L	N_{predator}	N_{prey}	C
Historical	1.4423	0.95	0.800	1.900	2.375	20	19	10	8	0.048
Current	2.1551	1.70	1.000	2.615	2.615	20	34	13	13	0.085
Future	2.1112	1.90	1.385	2.923	2.111	20	38	13	18	0.095

表2 基于流动的传统、目前和未来BOF钢铁生产统计数据

Flow-based statistics	FCI	MPL	AMI	ASC	DC	TSO	TST _p	ASC/DC	R
Historical	0.716	7.212	1.922	425.561	782.050	356.488	194.375	0.5442	0.4777
Current	0.736	11.412	2.053	173.356	321.066	147.709	77.664	0.5399	0.4801
Future	0.277	3.773	2.122	53.941	115.319	61.378	18.596	0.4678	0.5127

活动有一定的周期性，这些结果显示系统内部活动量的减少也属于周期变化。FCI和MPL都是无量纲数，占周期性产生的变化的一部分，或占该系统全部活动的一小部分。此外，增加的AMI表明系统的成熟度和周期性的提高[1]。TST_p对这些数值做出补充，在数值减少过程中提高制造效率。TST_p值的不断下降很大程度上与钢铁行业整体排放量的降低有关。我们的研究结果也显示整个系统内R值增加，同时ASC/DC值相应降低。鲁棒性表明对流动限制降低，这使得系统在面临扰动时仍能正常运转。与此同时，ASC/DC值降低表明对流动限制低，导致效率低下。我们的分析表明，CSI的发展显示了整个体系冗余程度的增加，并且结构变化很有可能会有更大的周期性，但是这种周期性还没有得到利用，导致效率下降。人们发现大多数生态系统能够在效率与系统冗余或稳定之间达到平衡，尤其是那些人们根据独立标准认为是健康的生态系统。把ASC/DC值与R值制成图表，可发现峰值代表着两者实现了平衡。Layton等[4]将经济资源网络、从Bodini等[26]的数据得到的水网络、从Kharrazi等[38]的数据得到的经济网络和93个自然生态系统融合在一起，并将分析结果绘制在该曲线上，如图8所示。在图8中，高冗余系统如Kharrazi提到的经济网络显示出高冗余和低效率的特点，而高效能的产业如Bodini提到的意大利城市以及传统和目前钢铁行业结构鲁棒性低，但效率高。我们对钢铁制造行业发展的分析结果对Layton等[4]的看法做出了补充。

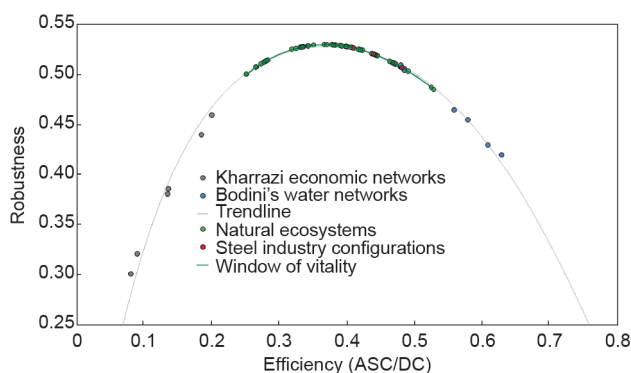


图8. 钢铁行业鲁棒性曲线图。

CSI未来的布局显示了冗余和效率达到平衡。Ulano-wicz等[39]把自然生态系统的峰值称为“活力之窗”。如表1、表2和图8中结果所示，钢铁行业正朝着自然生态系统所处的平衡方向发展。然而，我们的研究结果显示未来的钢铁制造业还有很大的改善空间。如图7所示，钢铁制造公司可以与相关行业结合。这些行业可以共享资源或废料，能进一步降低废料和资源消耗，同时还能在冗余和效率之间模拟自然生态系统具有的平衡。

这些结果表明了解工业生态系统的相互作用有助于未来可持续工业系统的设计、发展和运行。我们认为那些有效利用资源和降低废料排放的合作企业可在生态指标方面进一步提升CSI的可持续发展能力。然而，我们仍需证明这些工业流程中材料利用的变化如何转化为本研究中的生态系统统计结果。人们尚未充分理解工业性能及其与生态系统指标的关系，因此也就无法理解怎样将这些性能指标运用到自然界之外的体系中。

4. 结论

通过对过去以及未来钢铁制造行业进行物质流的生态学分析，我们发现利用BOF工艺的中国钢铁制造业正在转向可持续发展道路。我们的分析表明20世纪80年代中国钢铁制造存在材料资源浪费和周期性低的问题。在过去的30年间，为了挖掘新技术、政策和优化措施，整个行业做出了很大努力。目前钢铁制造发展结果表明未来的钢铁制造体系需要有更高的周期性和单项流程利用率，以及一个更成熟的“生态系统”。我们对未来行业计划的分析表明，通过与相关行业合作，我们可以在降低废料排放的同时进一步平衡该系统的效率和鲁棒性。此外，通过研究效率和鲁棒性之间平衡，我们的分析表明钢铁制造业能继续改善，并更加接近自然生态系统的运作方式。我们建议未来的研究深入地探讨工业中的物质流和能量流，为建立和重组工业系统提供有价值的决策支持，并提议开展进一步工作，将自然系统的生态学原理转化为更高的工业性能。

Acknowledgements

This material is based on work supported by the National Science Foundation (CBET-1510531 and EFMA-1441208). In addition, we would like to thank the Chinese Academy of Sciences and the Brook Byers Institute for Sustainable Systems for their unwavering support in advancing multiple fronts of sustainability research. Any opinions, findings, and conclusions or recommendations expressed in this material are those of the author(s) and do not necessarily reflect the views of the National Science Foundation or their respective host institutions.

Compliance with ethics guidelines

Stephen M. Malone, Marc J. Weissburg, and Bert Bras declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data associated with this article can be found in the online version at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.03.008>.

References

- [1] Odum EP. The strategy of ecosystem development. *Science* 1969;164(3877):262–70.
- [2] Reap JJ. Holistic biomimicry: a biologically inspired approach to environmentally benign engineering [dissertation]. Atlanta: Georgia Institute of Technology; 2009.
- [3] Layton A, Reap J, Bras B, Weissburg M. Correlation between thermodynamic efficiency and ecological cyclicality for thermodynamic power cycles. *PLoS One* 2012;7(12):e51841.
- [4] Layton A, Bras B, Weissburg M. Industrial ecosystems and food webs: an expansion and update of existing data for eco-industrial parks and understanding the ecological food webs they wish to mimic. *J Ind Ecol* 2016;20(1):85–98.
- [5] World Commission on Environment and Development. Report of the World Commission on Environment and Development: our common future. Report. New York: United Nations General Assembly; 1987 Aug.
- [6] Bailey R, Allen JK, Bras B. Applying ecological input-output flow analysis to material flows in industrial systems: Part I: tracing flows. *J Ind Ecol* 2004;8(1–2):45–68.
- [7] Roberts FS. Discrete mathematical models: with applications to social, biological, and environmental problems. London: Pearson; 1976.
- [8] Yodzis P. The connectance of real ecosystems. *Nature* 1980;284(5756):544–5.
- [9] Bodini A, Bondavalli C. Towards a sustainable use of water resources: a wholeecosystem approach using network analysis. *Int J Environ Pollut* 2002;18(5):463–85.
- [10] Zhang C, Wang H. Circular economy in the Chinese steel industry: case studies of two pilot enterprises. Report. Beijing: China Iron & Steel Research Institute; 2007.
- [11] Liu Z, Sinton JE, Yang F, Levine MD, Ting MK. Industrial sector energy conservation programs in the People's Republic of China during the Seventh Five-Year Plan (1986–1990). Report. Berkeley: University of California; 1994 Sep. Report No.: LBNL-36395. Contract No.: DE-AC03-76SF00098.
- [12] Yin X, Chen W. Trends and development of steel demand in China: a bottom-up analysis. *Resour Policy* 2013;38(4):407–15.
- [13] Bureau of International Recycling, Ferrous Division. World steel recycling in figures 2010–2014. Brussels: Bureau of International Recycling, Ferrous Division; 2015.
- [14] National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook 2012. Beijing: China Statistics Press; 2012.
- [15] Olivier JGJ, Janssens-Maenhout G, Muntean M, Peters JAHW. Trends in global CO₂ emissions: 2013 report. The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency; 2013.
- [16] Li L, Lei Y, Pan D. Study of CO₂ emissions in China's iron and steel industry based on economic input-output life cycle assessment. *Nat Hazards* 2016;81(2):957–70.
- [17] International Energy Agency. Tracking industrial energy efficiency and CO₂ emissions. *Energy Policy* 2007;30:849–63.
- [18] China Iron and Steel Industry Association. China steel yearbook 2005–2010. Beijing: Metallurgical Industry Press; 2005–2010. Chinese.
- [19] Fath BD, Haines G. Cyclic energy pathways in ecological food webs. *Ecol Model* 2007;208(1):17–24.
- [20] Briand F. Environmental control of food web structure. *Ecology* 1983;64(2):253–63.
- [21] Schoener TW. Food webs from the small to the large: the Robert H. MacArthur Award Lecture. *Ecology* 1989;70(6):1559–89.
- [22] Allesina S, Bondavalli C, Scharler UM. The consequences of the aggregation of detritus pools in ecological networks. *Ecol Model* 2005;189(1–2):221–32.
- [23] Warren PH. Variation in food-web structure: the determinants of connectance. *Am Nat* 1990;136(5):689–700.
- [24] Scotti M, Bondavalli C, Bodini A, Allesina S. Using trophic hierarchy to understand food web structure. *Oikos* 2009;118(11):1695–702.
- [25] Ulanowicz RE. Ascendancy: a measure of ecosystem performance. In: Jørgensen SE, Müller F, editors. *Handbook of ecosystem theories and management*. Boca Raton: Lewis Publishers; 2000. p. 303–15.
- [26] Bodini A, Bondavalli C, Allesina S. Cities as ecosystems: growth, development and implications for sustainability. *Ecol Model* 2012;245: 185–98.
- [27] Finn JT. Flow analysis: a method for tracing flows through ecosystem models [dissertation]. Athens: University of Georgia; 1977.
- [28] Fath BD. Quantifying economic and ecological sustainability. *Ocean Coast Manage* 2015;108:13–9.
- [29] Sun W, Cai J, Ye Z. Advances in energy conservation of the China steel industry. *Sci World J* 2013;2013:247035.
- [30] Sinton JE, Levine MD, Wang Q. Energy efficiency in China: accomplishments and challenges. *Energy Policy* 1998;26(11):813–29.
- [31] China Steel Development and Research Institute. The yearbook of iron and steel industry of China. Beijing: Editorial Department of the Yearbook of Iron and Steel Industry of China; 1988. Chinese.
- [32] Ross M, Feng L. The energy efficiency of the steel industry of China. *Energy* 1991;16(5):833–48.
- [33] Yin R. Metallurgical process engineering. Berlin: Springer-Verlag; 2013.
- [34] Umadevi M, Kumar MGS, Mahapatra PC, Babu TM, Ranjan M. Recycling of steel plant mill scale via iron ore pelletisation process. *Ironmak Steelmak* 2009;36(6):409–15.
- [35] Worrell E, Galitsky C, Masanet E, Graus W. Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the glass industry: an ENERGY STAR guide for energy and plant managers. Berkeley: University of California; 2008.
- [36] Song L, Liu H. The Chinese steel industry's transformation: structural change, performance and demand on resources. Cheltenham: Edward Elgar Publishing; 2013.
- [37] Hewes AK, Lyons DI. The humanistic side of eco-industrial parks: champions and the role of trust. *Reg Studies* 2008;42(10):1329–42.
- [38] Kharrazi A, Rovenskaya E, Fath BD, Yarime M, Kraines S. Quantifying the sustainability of economic resource networks: an ecological informationbased approach. *Ecol Econ* 2013;90:177–86.
- [39] Ulanowicz RE, Holt RD, Barfield M. Limits on ecosystem trophic complexity: insights from ecological network analysis. *Ecol Lett* 2014;17(2):127–36.