

DOI: 10.5846/stxb201510112055

彭新沙, 田大伦. 国内工业生态安全研究述评. 生态学报, 2016, 36(23): 7538-7550.

Peng X S, Tian D L. Review of domestic industrial ecological security research. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(23): 7538-7550.

国内工业生态安全研究述评

彭新沙^{1,2}, 田大伦^{1,3,*}

1 中南林业科技大学生命科学与技术学院 长沙 410004

2 湖南商学院旅游管理学院 长沙 410205

3 南方林业生态应用技术国家工程实验室 长沙 410004

摘要: 经过对国内工业生态安全研究文献的梳理与评价, 从一个侧面比较系统地反映了国内该领域研究的现状、重点内容及发展趋势, 指出了研究的若干重要进展及存在的不足。在此基础上, 对今后我国工业生态安全研究提出了展望与建议。调研发现, 国内学者在基础研究、应用研究方面都取得了明显进展; 借鉴、界定和运用了一些重要概念; 开拓了工业生态安全应用研究的两个重点领域。但是其不足也比较明显: 基础理论研究非常薄弱; 应用研究的尺度主要是中观层次(区域、行业、工业园区等), 企业及国家层面工业生态安全等微观和宏观层次的专题系统研究文献比较少; 研究方法上综合交叉研究、实证研究、定量分析比较薄弱。因此, 应该大力加强工业生态安全基础性理论问题研究, 重视实证研究与定量分析, 紧紧抓住工业生态安全研究综合性与交叉性强的特点, 在重点研究高耗能行业及工业自然生态环境安全的同时, 注意拓展对工业经济生态环境安全、社会生态环境安全以及工业自然-经济-社会复合生态系统综合生态安全的研究。为此, 应该建立各相关学科与部门有效沟通、产学研合作攻关的协调机制。

关键词: 工业生态安全; 工业生态风险; 国内; 研究现状; 述评

Review of domestic industrial ecological security research

PENG Xinsha^{1,2}, TIAN Dalun^{1,3,*}

1 School of Life Science and Technology, Central South University of Forestry Science and Technology, Changsha 410004, China

2 School of Tourism Management, Hunan University of Commerce, Changsha 410205, China

3 National Engineering Laboratory for Technology of Southern Forestry Ecological Applications, Changsha 410004, China

Abstract: After review of literature on domestic industrial ecological security, we reveal the status quo from a given perspective, key points, and trends in this research field. Furthermore, we point out the important development, as well as problems, and make projections and suggestions on the issues. We show that domestic scholars have achieved much in fundamental, applied research by absorbing, defining, using important concepts, theories, and methods, and extending two key fields of such studies. Conversely, their weaknesses were also clear: the study of fundamental theory is rather poor; applied study is confined to the meso-level, such as eco-industrial parks and certain industries and regions; professional and systematic studies both at the micro and macro levels of enterprises and at the national scale are insufficient; and methods are poor concerning comprehensive cross research, empirical research, and quantitative research. Therefore, it is imperative that studies be strengthened in terms of fundamental theories of industrial ecological security. Empirical and quantitative research should be given priority. It is also important to understand the features of integrated and interdisciplinary research in industrial ecological security, with priority on the high energy-consuming industry and the natural eco-environment

基金项目: 林业公益性行业科研重大专项(201104009); 湖南省教育厅高校创新平台建设项目(湘财教字[2010]70号); 长沙市科技局能源资源研发平台建设项目(K1003009-61)

收稿日期: 2015-10-11; 修订日期: 2016-05-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: csuftdl@126.com

security of industry, to develop research on economically eco-environment security, socially eco-environment security, and integrated natural-economical-social multiple ecological system security. Thus a coordination mechanism should be established for relevant disciplines and departments to make effective communication, and for governments, enterprises, universities and research institutes to make harmonious cooperation.

Key Words: industrial ecological security; industrial ecological risk; domestic; research statu quo; review

工业是目前对自然生态环境压力最大的经济部门^[1]。在全球生态危机日益严峻和我国新型工业化加速发展,国民经济进入转型升级“新常态”,我国政府向世界庄严承诺到 2030 年前后力争使碳排放达到峰值的背景下,工业生态安全研究具有十分重要的理论意义和极为迫切的实践意义。一方面,它开拓了生态安全科学研究的新领域,丰富了工业生态学的研究内容,提升了产业经济学的研究层次,为综合安全理论和可持续发展理论的发展提供了有利条件;另一方面,工业生态安全研究具有很强的实践性和广泛的应用性,因而对实际工作具有重要指导意义。

本文所指的“工业”是指包括采矿业、制造业和电力、燃气及水的生产供应业在内的广义工业,这主要是根据中国统计年鉴的分类体系从资料收集的便利性角度确定的研究口径。工业生态系统是一个自然-经济-社会复合生态系统,本文主要从自然生态环境安全角度展开述评,同时对经济生态环境、社会生态环境安全领域也有涉及,表明工业生态安全问题既是产业生态学的研究领域,又是生态安全科学的研究范畴,还与系统科学、地学、环境科学、伦理学、管理学、经济学、社会学等诸多学科有着密切关系,因而具有比较强的跨学科交叉特征。

20 世纪 80 年代末至 90 年代初,国内工业生态安全研究开始起步,至今短短 20 多年时间里,无论理论研究还是应用研究都取得了明显进展。由于工业生态安全研究内容十分广泛,本文选择对工业生态安全的概念体系、高耗能行业生态安全、工业园生态化转型与升级以及国内工业生态安全研究存在的不足等比较突出的理论与实际问题进行述评,以期对工业生态安全的深入研究提供参考。

1 工业生态安全的概念体系

国内工业生态安全研究取得的明显进展,从基础研究来看,首先表现在借鉴、界定和运用了一些重要概念,初步形成了一个互相关联的概念体系,包括基本概念群与相关概念群两大部分。基本概念群主要包括工业生态系统、工业生态安全、工业生态风险、工业生态健康、工业生态效率、工业生态脆弱性等。相关概念群主要包括可持续工业发展、生态工业、生态工业园、绿色工业、工业生态化等。

1.1 工业生态安全的基本概念

1.1.1 工业生态系统

“工业生态系统”概念由“产业生态系统”概念引申而来。产业生态系统概念最早出现在 Kennis Bardin, Cutler 和 Robert Kaufmann 1986 年共同发表的“Energy and Resource Quality: The Ecology of the Economic Process”一文中^[2]。1989 年 N.E.Gallopoulos 首次提出了工业生态系统概念^[3]。一些国内学者也在国外研究基础上进行了自己的探索,比较有代表性的是陆钟武^[4]的观点。他运用相似性原理和生态隐喻方法,在对工业系统与自然生态系统进行全面剖析类比基础上,指出工业生态系统主要由生产者、消费者、分解者和非生物环境四种基本成分组成;在工业生态系统中,物质循环和能量流动也是沿着食物链(网)进行的,并通过这种食物营养关系把工业生态系统中各企业有机地连接成一个整体^[4]。但是目前尚未见到国内学者对工业生态系统概念的完整定义。应该指出,工业生态系统概念与生态工业系统概念是一致的,它们没有本质区别,只是同一事物的两个不同名称而已。

1.1.2 工业生态安全

工业生态安全是整体生态安全的一部分,因此工业生态安全概念与一般意义上的生态安全概念在本质内

涵上是一致的,同时也具有自己的特点。国际应用系统分析研究所(International institute for applied systems analysis IIASA;1989)将生态安全定义为在人的生活、健康、安乐、基本权利、生活保障来源,必要资源、社会秩序和人类适应环境变化的能力等方面不受威胁的状态,包括自然生态安全、经济生态安全和社会生态安全^[5]。这是国内外比较认同的一个定义。国内学术界对工业生态安全概念及其特点研究的主要观点可以概括如下^[6]:工业生态安全是指在一定时间尺度内,工业生态系统保持其自身正常结构与功能和满足人类持续发展需要的状态,是工业赖以发展的自然资源、生态环境处于一种不受威胁、没有危险的健康、平衡状态,具有可靠性、完善性和发展性。工业对人的安全及对整个生态环境的安全是工业生态安全的主要内容和职责,生态安全是工业可持续发展的基石,工业生态安全的核心就是实现工业可持续发展。工业生态安全具有6个特点:整体全球性;综合复杂性;区域特色性;动态变化性;持续战略性;不可逆转性。

但是,目前国内学术界对工业生态安全概念的研究存在明显不足,不但研究成果数量很少、定义不统一,而且更主要表现在对于概念内涵的理解不够全面和深刻,对其本质缺乏正确认识,存在生态安全一般概念研究中同样的问题,即:这些生态安全的定义……,仅考虑了生态风险,忽略了脆弱性的一面……。针对这一局限,有学者认为,生态安全应是指人与自然这一整体免受不利因素危害的存在状态及其保障条件,并使得系统的脆弱性不断得到改善……^[7]。根据上述观点,笔者认为工业生态安全应是指工业生存发展所需生态环境的一种(良好)状态及其保障条件。其本质包含两个方面:一是工业生态风险,二是工业生态脆弱性,其中后者是工业生态安全的核心。也就是说,工业生态安全的本质,是通过分析工业生态脆弱性,利用各种手段不断改善脆弱性,降低工业生态风险。不过,尽管国内学术界对生态脆弱性概念的研究不少,然而除了李湘梅等人给生态工业园共生网络的脆弱性下了一个定义^[8]、肖忠东等人给工业食物链的脆弱性下了一个定义^[9]之外,目前尚未见到直接研究工业生态脆弱性概念的专题文献。因此,工业生态脆弱性概念研究是今后应该关注的一个重要问题^[10-11]。

工业生态安全不仅需要定性研究,而且必须定量分析,生态安全度就是定量分析的重要概念工具。“工业生态安全度”是反映工业生态安全程度或等级的重要概念。在运用综合指数评价方法和P-S-R模型的情况下,可以把工业生态安全度定义为工业生态安全综合值(IESV);并把工业生态安全分级标准规定为:0—0.40,很不安全;0.41—0.55,不安全;0.56—0.65,临界安全;0.66—0.80,较安全;0.81—1.00理想安全等5个等级^[6]。工业生态安全度也可以用产业土地环境评价价值、产业水环境评价价值、产业大气评价价值、产业生态控制力评价价值的综合值来表述。其公式为: $S=aX+bY+gZ+dW$ 。式中, a 、 b 、 g 、 d 分别为各一级指标的系数,为专家评估权重值; X 、 Y 、 Z 、 W 分别为产业土地环境评价价值、产业水环境评价价值、产业大气评价价值、产业生态控制力评价价值^[12]。还可以把工业生态安全度规定为生态服务功能增益与生态风险损失的比值^[13]。

1.1.3 工业生态风险

生态风险与生态安全具有密切的内在联系,是生态安全状况的负面表现。生态风险是指特定生态系统中所发生的非期望事件的概率和后果,如干扰或灾害对生态系统结构和功能造成的损害,其特点是具有不确定性、危害性和客观性^[14]。把生态风险概念应用到工业领域,可以引伸出工业生态风险的概念,所以从逻辑上讲,工业生态风险是生态风险属概念的种概念。从笔者收集的文献资料来看,目前尚未见到国内学术界有人对这个概念进行专门研究并且给出明确的定义。不过,有学者在工业生态风险评价的研究文献中给出了“企业环境风险”、“产品全生命周期的生态环境风险”、“水电工程生态风险”等几个相关概念的定义(谢琨^[15];邓俊^[16];徐天宝,等^[17]),从不同侧面间接地研究了工业生态风险概念的内涵与外延。结合以上内容,给工业生态风险概念下一个定义:工业生态风险是指工业复合生态系统受到各种自然与人为胁迫因素影响而发生的非期望事件的概率和后果,即各种自然、经济和社会因素干扰与灾害对工业复合生态系统的结构和功能造成损害的可能性及其后果。

1.1.4 工业生态健康

同工业生态风险概念一样,工业生态健康概念也是生态健康概念的种概念。生态健康概念与生态安全概

念的关系也非常密切,而且二者在学术上的渊源关系更深厚更直接,后者是在前者基础上才得以发展起来的。正是由于 20 世纪 40 年代美国著名生态学家阿尔多·利奥波德(Aldo Leopold)提出了“土地健康”的概念并将其应用于土地功能状况的评价,此后关于生态系统和环境安全问题的研究才逐渐开展起来^[18]。

虽然目前国内外对生态健康概念的认识存在分歧,但主流观点认为,生态健康是指一个生态系统通过自我调节能维持自身组织结构一功能的稳定并且对外界的胁迫具有一定的恢复能力,可以为人类发展提供生态服务支持,满足人类合理发展的生态需求。生态系统健康可以通过活力、组织结构和恢复力等 3 个特征进行表征^[19]。从目前收集到的文献来看,暂时没有见到直接专门对工业生态健康概念进行研究的报道。但是有一些文献间接研究了这个问题,分别探讨了产业生态系统健康^[20]、企业生态系统健康^[21]、矿区复合生态系统健康^[22]的内涵与外延。这些文献对于工业生态健康概念内涵的理解与国内外关于生态健康概念的主流观点基本一致,同时也反映了工业生态系统健康的特点,即在重视作为复合生态系统的工业生态系统中的自然子系统健康的前提下,更加强调经济子系统、社会子系统的生态健康。

1.1.5 工业生态效率

生态效率概念是 1990 年由德国学者 Schaltegger 和 Sturm 首先提出的,1992 年,世界可持续发展工商委员会(World Business Council of Sustainable Development, WBCSD)最先从企业的角度对生态效率的概念做了界定:生态效率是通过提供能满足人类需要和提高生活质量的有竞争力的商品与服务,同时使整个生命周期的生态影响和资源强度逐渐降低到与生态承载力一致的水平^[23]。生态效率是指生态资源满足人类需求的效率,是产出与投入的比值。其中产出是指企业、行业或经济体提供的产品和服务的价值,投入是指企业、行业或经济体资源和能源利用及所造成的环境压力。可见,生态效率包含资源效率、能源效率和环境效率等相关指标^[24]。

生态效率可以从工业的不同层面进行分析评价,包括产品、企业、行业、区域等。因此,这个概念的产生直接与工业密切相关,其最大的应用领域也是工业领域。国内学者研究工业生态效率的文献数量显著多于工业生态风险、工业生态健康的研究文献,其中一些文献从不同视角直接研究了工业生态效率概念的内涵与外延。王震,等^[25]、何炼成,等^[26]从工业整体角度把工业生态效率定义为某一区域内一定时期的工业产品和服务的经济价值与其造成的环境影响的比值,认为工业生态效率的核心理念是以最少的资源投入和最低的环境污染代价获取最大的工业产品和服务价值。还有一些学者根据生态效率概念的主流观点分别研究了钢铁工业、水泥工业、煤炭产业、生态工业园、工业企业的生态效率概念,界定了其内涵^[27-31]。他们都认为,工业生态效率的内涵是物质资源和能源减量化、环境污染减少与经济增长的同时实现,工业生态效率的实质是实现工业经济和生态环境保护的双赢。

1.1.6 工业生态脆弱性

生态脆弱性是一个描述系统状态的概念,国际政府间气候变化委员会(IPCC)第三次评估报告将生态脆弱性定义为系统容易受到气候变化造成的不良后果影响或者无法应对其不良影响的程度,是系统外在气候变化的特征、强度和速率、敏感性和适应性的函数。这是目前广为接受的脆弱性定义^[10]。虽然不同学者或机构对生态脆弱性的理解不同,但脆弱的生态系统一般都表现为:生态系统敏感性高,系统稳定性差;生态弹性力小,抵御外界干扰的能力差;自身的恢复能力和再生能力较差;生态承载力能力低,环境容量小等特点。研究者普遍认为暴露度、敏感性和适应能力是系统脆弱性的 3 个构成要素^[32]。

国外生态脆弱性研究起源于 20 世纪初,20 世纪 80 年代以来成为学术热点。国内生态脆弱性研究最早始于 20 世纪 80 年代对生态脆弱区域的识别,目前已经涉及到农、林、牧、渔等生产部门,横跨资源和灾害两大领域,同时关注自然要素与人类要素^[10]。但是工业生态脆弱性的研究却比较薄弱,相对于工业生态风险和工业生态效率研究,该领域能够见到的研究文献数量不多。尤其是工业生态脆弱性概念的研究,目前笔者暂未发现直接专门研究的文献,只有很少的文献间接涉及这个问题。例如,李湘梅等人把生态工业园共生网络的脆弱性定义为:在生态工业园运行过程中,网络受到各种外界干扰所导致整个工业共生网络所表现出来的损

失程度^[8]。肖忠东等人把工业“食物链”的脆弱性定义为:在相对改变各种技术指标或面临某种外来冲击(由于某种加工环节的临时中断或退出)时,工业“食物链”所表现出来的稳定性能^[9]。从这两个定义中可以看到,其对工业生态脆弱性的内涵揭示得不够全面,涉及到“敏感性”、“适应能力”两个要素,没有反映出“暴露度”这个要素。

1.2 工业生态安全的相关概念

1.2.1 生态可持续性工业发展

生态可持续性工业发展概念是 1991 年 10 月由联合国工业发展组织提出的,目的是指明一种对环境无害或生态系统可以长期承受的工业发展模式,该组织把它作为实现全球持续发展在工业方面的具体体现。这个概念的定义是:它是在不损害基本生态进程的前提下,促进工业在长期内给社会和经济利益作出贡献的工业化模式。这个定义与世界环境与发展委员会在《我们共同的未来》报告中对持续发展所作定义的本质涵义完全一致。从这个定义可以看到,生态可持续性工业发展作为一种模式,核心在于兼顾工业发展与环境保护两个方面,并且把环境保护作为工业发展模式的一项内在要求,融入工业发展全过程之中,这是它与传统工业发展模式的显著区别^[33]。因此这个概念对于工业生态安全和全球可持续发展都具有十分重要的意义。不过,国内学术界对这个概念的研究文献极少。

1.2.2 生态工业

生态工业也是与工业生态安全密切相关的一个概念,国内学术界早在 20 世纪 80 年代后期即已开始使用这个名词^[34],并不断加深对这个概念内涵和外延的认识,先后出现了发展模式论、链网结构论、生产体系论、运行系统论等几种观点^[35-38],其中发展模式论(即把生态工业理解为一种生态化的可持续工业发展模式)占主导地位,不过目前仍未形成普遍接受的生态工业定义。尽管上述几种观点各有特点,但都大同小异,内涵上并没有本质区别,因为它们都运用了相似性原理和生态隐喻方法,都认为生态化是生态工业区别于传统工业的本质特征,都是追求人与自然和谐统一、发展与环保互利双赢的可持续发展形式,与联合国工业发展组织提出的“生态可持续性工业发展”概念是一致的。

1.2.3 生态工业园

生态工业园与生态工业概念密切相关,是工业生态安全实现的重要形式之一。1992 年,美国 Indigo 发展研究所首先提出了生态工业园的概念。1998 年,美国环境保护署(EPA)把生态工业园定义为一种由制造业和服务业所组成的产业共同体,他们通过联合来共同管理环境与物质流动(包括能量、水和资源)从而致力于提高环境与经济绩效。通过联合运作,产业共同体可以取得比单个企业通过个体的最优化所取得的效益之和更大的效益^[39]。这个定义得到国内外较多工业生态学者认同,国内学者对此也开展了学习和探讨。其中,段宁、王兆华、钟书华等是较早关注这个概念的学者。他们认为生态工业园是实现生态工业和工业生态学的重要途径,是一个环境友好型、资源节约型与可持续发展的工业共生群落,其本质就是“和谐发展”;它模拟自然生态系统,使一个企业的废物成为另一个企业的原材料,企业间能量及水等资源实现梯级利用;如果一个工业共生群落位于特定的地理空间,就被称为生态工业园区;生态工业园区具有网络化、复杂化、生态化 3 个特征^[39-41]。

1.2.4 绿色工业

“绿色工业”也是与工业生态安全相关的一个概念。国内不少学者对此进行了研究论述,但是目前并没有形成统一的定义。李斌^[42]认为,绿色工业就是实现生产环境友好型产品的工业,实质是减少生产中能源和资源的消耗,同时减少工业生产有害废弃物的排放。唐元^[43]指出,绿色工业是指资源节约型、环境友好型工业,包含两个方面的含义:一是企业在生产过程中做到节能节材和环境友好;二是生产出节能环保型的产品。王建敏^[44]的表述更加全面:所谓绿色工业就是以可持续发展为宗旨,在环境与经济协调发展思想的指导下,尊重客观经济规律,利用生态学与生态经济学原理和现代科学技术,发展生态工业,推动工业绿色化,实现投入少、消耗低、质量高、无污染而又生产出符合生产环境标准的产品为目的,达到生态和经济两个系统的良

性循环和经济效益、生态效益、社会效益统一的工业模式或工业综合体系。综合上述 3 个有代表性的表述,可以把绿色工业定义为以资源节约型、环境友好型为特征,以经济效益、生态效益和社会效益相统一为实质和核心的一种新型可持续工业发展模式和工业综合体系。

1.2.5 工业生态化

工业生态化概念最早于 1977 年出现在美国地球化学家 Preston Cloud 在德国地球学年会的一篇文章中^[45]。目前理论界对工业生态化还没有一个明确的定义,一些学者从不同的角度对它进行了诠释(何劲^[45];周世祥,等^[46];王跃伟^[47];蔡婉莹^[48]等)。综合这些学者的论述,笔者尝试给出工业生态化概念的定义:它是指在生态学理论和自然-经济-社会复合生态系统视角基础上,通过综合运用各种方法和手段,以实现工业经济发展与自然生态环境协调平衡为目标,以工业可持续发展为目的的一种工业发展模式及其运行过程。这个概念有两个方面的内涵:首先,作为一种结果和目标,它指的是生态型的工业化;其次,作为一种过程,它指的是工业化的进程同时也是生态理念的贯彻、生态工程技术的广泛应用和推广以及生态环境的保护和建设过程^[49]。

1.3 上述概念之间的相互关系

根据上述概念的涵义与作用,可以发现它们之间存在各种不同联系,具有一定的逻辑关系,6 个基本概念之间的关系十分密切,相关概念与基本概念之间的关系也比较紧密。

1.3.1 基本概念之间的相互关系

首先,从定性分析角度看,基本概念中的工业生态系统概念是基础,工业生态安全概念是核心(它是指工业生态系统的生态安全),工业生态风险、工业生态健康、工业生态效率、工业生态脆弱性是影响、反映、测度工业生态系统安全的 4 个要素、维度和工具。其中工业生态健康和工业生态效率是工业生态系统安全的正面指标,工业生态风险和工业生态脆弱性是负面指标^[50]。其次,从定量分析角度看,几个概念之间存在以下几种数量组合关系:工业生态风险与工业生态健康、工业生态效率成反比,与工业生态脆弱性成正比;工业生态健康与工业生态风险和工业生态脆弱性成反比,与工业生态效率成正比;工业生态效率与工业生态风险和工业生态脆弱性成反比,与工业生态健康成正比;工业生态脆弱性与工业生态健康、工业生态效率成反比,与工业生态风险成正比;工业生态风险和工业生态脆弱性与工业生态安全成反比;工业生态健康和工业生态效率与工业生态安全成正比。再次,从地位和作用来看,提高工业生态效率是降低工业生态风险和工业生态脆弱性、提高工业生态健康水平的基础和实现途径,因而工业生态效率指标也是测度、评价和管理工业生态安全的有效工具。

1.3.2 相关概念与基本概念之间的关系

在工业生态安全理论框架内,二者之间是一种互相联系、互相服务但是地位有别的关系,“相关概念”地位低于“基本概念”,主要为“基本概念”服务。“相关概念”都是工业生态安全的实现形式和途径,例如生态工业园就是工业生态安全实现的一种空间形式和具体途径。“相关概念”的研究运用过程中,可以利用“基本概念”从不同角度对自身进行分析、评价和预测,从而更好地反映客观现实及其规律。

工业生态安全概念体系内部的相互关系可参见图 1。

2 工业生态安全应用研究的重点领域

国内工业生态安全研究的领域比较广泛,主要包括国外相关研究情况的介绍与评价、概念体系及基础理论、研究方法手段、高耗能产业的生态安全、工业园的生态化转型与升级、工业生态安全评价等。其中高耗能产业的生态安全、工业园的生态化转型与升级是近年来国内工业生态安全实践中比较突出的现实问题,因而成为应用研究的重点领域。

2.1 高耗能产业的生态安全研究

矿山、能源及冶金工业是典型的高耗能产业,我国这些产业的规模在世界上又都高居前列,因此成为国内

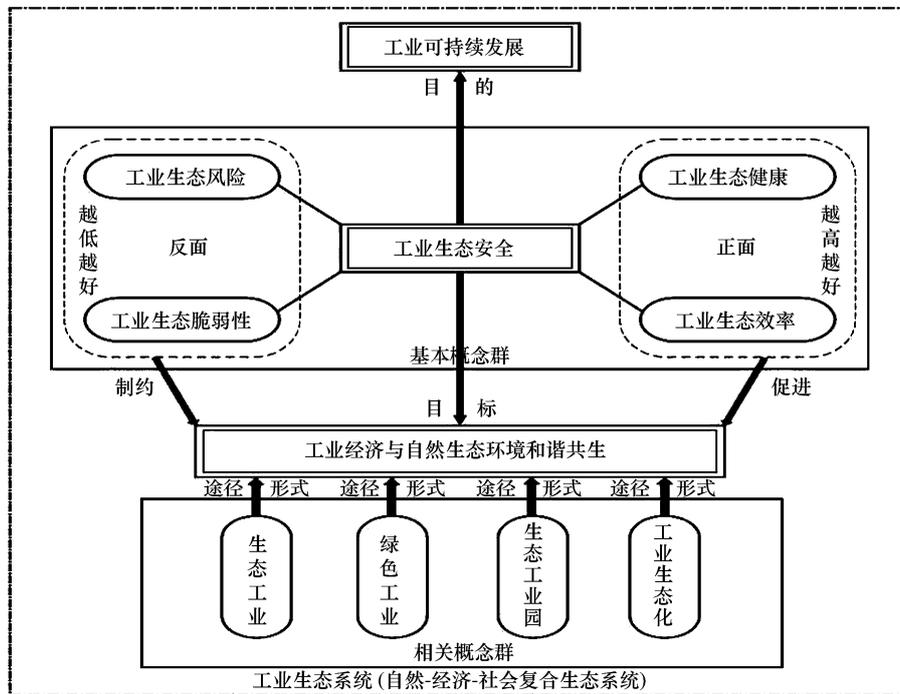


图1 工业生态安全概念体系的内部关系

Fig.1 Internal relations of industrial ecological security concept system

学者特别关注的领域。在收集的 303 篇工业生态安全研究文献中,高耗能产业研究文献达 105 篇,占 35%。而在这个领域中,煤炭工业、冶金工业、电力工业又是研究文献最集中的 3 个行业。

煤炭工业文献主要研究了煤矿开采利用造成的生态环境问题、煤炭产业战略环境评价指标体系、煤炭产业生态化、煤炭产业生态竞争力及其影响因素、煤炭企业生态效率评价、煤矿区生态修复与重建、矿山生态安全综合评价等几个方面的问题^[29,51-57]。冶金工业文献主要研究了中国钢铁工业生态效率评价、钢铁冶金业的环保与节能、中国有色金属工业的生态占用、金属矿山周围水域和土壤中的重金属污染及其防治、有色金属资源的绿色开发利用、钢铁工业区周边土壤重金属生态环境风险评价等方面的问题^[24,58-61]。而电力工业文献则分别研究了大型电力企业低碳竞争力评价与培育、水电风景区资源综合利用与保护、电力工业生态效率评价、核电工业生态风险评价与防范等问题^[62-65]。其他文献研究的领域涉及矿山生态成本计量分析、区域清洁能源开发、能源开发区生态风险与生态安全时空分析、低碳高效能源体系的构建、推进从黑色高碳能源向绿色低碳能源转换的能源革命等问题^[66-70]。

上述研究发现:①我国能源、矿山及冶金业带来的生态环境问题极其严重,主要表现在地形地貌和植被严重破坏、水土流失与盐渍化、“三废”污染点多面广,温室气体和其他有害气体大量排放,重金属污染十分严重,生物多样性降低等等。②我国能源、矿山及冶金业的生态安全状况除煤炭产业有整体性评价结果外,能源、矿山行业只有一些分散和局部的研究结果。③我国能源、矿山及冶金业生态安全的实现必须采取“三观结合、多措并举”的对策。三观结合是指宏观、中观、微观三个层次互相结合、协调一致。多措并举是指要综合系统地运用科技、政策、法律、经济、管理、文化及国际合作等多方面措施实现生态安全。

2.2 工业园的生态化转型与升级

这里包括两方面内容,一是传统工业园区的生态化转型,二是生态工业园区的优化升级。

2.2.1 传统园区的生态化转型

传统工业园区的生态化转型是指运用工业生态学和循环经济理论与方法,把园区传统的开环式直线经济运行模式改造成为闭环式循环经济运行模式。国内学术界对传统工业园区的生态化转型问题非常重视,开展了比较深入的研究。研究的主要内容包括:国内工业园发展现状及其存在的问题是什么?为什么传统工业园

区必须进行生态化转型?如何促进生态化转型?

调查发现,自 1984 年提出建设经济开发区以来,我国在 2000 年前后就已经建立起了以工业园区为主要载体的工业发展体系。园区内工业产值占国内工业总产值的 60% 以上^[71]。商务部数据显示,2013 年国家级开发区在所在城市的地区生产总值占比已超过 13%。目前已经发展形成不同种类、级别的高新技术开发区、经济技术开发区、出口加工区、保税区、边境经济合作区、生态经济区等工业园区。工业园区已经成为我国区域经济发展的龙头,其对于促进我国产业结构调整和产业聚集升级的承载作用不断凸显。然而,传统工业园区由于历史原因,大多缺乏科学的生态规划,企业集中、产业活动强度大、资源通量高和污染密集,成为资源环境问题的高发地。在发展过程中,普遍出现了土地滥用、经营粗放和环境污染等问题,有些工业园区环境管理职能薄弱、环保规划不健全、环境违法现象频发,为此,传统工业园区生态化转型就成为我国工业可持续发展和走新型工业化道路的必然选择^[71]。但是传统工业园生态化转型目前在实践中却遇到诸多障碍,例如工业园生态化改造的内动力明显不强,处于生态化雏形阶段的工业园内产品链和废物交换链的培育严重不足,园内各参与主体或要素间关系的协调较为困难等等,严重制约着园区经济未来发展和生态环境的保护。因此,必须以生态园区建设为导向加快传统工业园区生态化转型步伐^[72]。

如何促进传统工业园区的生态化转型,是学者们研究的重点。结果表明,促进工业园区生态化转型,必须做好以下工作^[71-77]:1) 观念转型。即从过去的唯 GDP 发展观念向经济-社会-环境协调发展理念转型。要大力引导园区企业更新观念,强化生态工业意识。2) 规划转型。从过去没有或者不重视生态规划,转变为主动搞好园区生态规划,对已有工业园进行优化重构。3) 产业链转型。从过去仅重视产品链、轻视工业生态链,转变为把生态产业链视为生态工业园区的血脉,自觉地因地制宜搞好生态产业链构建。4) 规范转型。加快完善相关政策、法规、标准等规范体系,使园区生态化转型有章可循。5) 技术转型。加强创新能力培养,解决生态技术难题。6) 管理转型。构建基于生态效率测算的工业园生态化评价指标体系及模型,对工业园生态化水平进行综合评价,科学准确地推进生态化转型。同时,从企业、产业、园区 3 个层面着手,分别采取推广应用清洁生产技术、构建完善工业共生网络体系、搞好管理与信息集成平台的建设从而优化园区管理系统的措施。

2.2.2 生态工业园的优化升级

改革开放以来,中国的工业化进程虽然很快,但生态效率不高,单位 GDP 的环境成本长期大大高于发达国家。随着工业生态学的发展,生态工业园区建设已成为解决结构性污染和区域性污染,调整产业结构和工业布局,实现可持续发展的新型经济发展模式^[73]。我国从 1999 年开始启动了生态工业园示范区建设试点工作,至 2014 年 4 月 18 日,已经批准建设的国家级生态工业园示范区达 59 家,通过验收批准命名的国家生态工业示范园区为 26 家,地方各级生态工业园区数量就更多。

但是,我国的生态工业园建设起点低,生态化水平不高。主要表现在产业共生形态发育不良、生态化功能发挥不尽完善、核心竞争力缺乏^[71]。还有一个突出表现就是几乎所有生态产业园建设都仅强调物质的闭路循环,突出废物的再利用,但却忽视了生态产业园区建设的首要原则:减量化。目前的生态产业园充其量只能算是形式上的废物循环,远远难以适应可持续发展要求,迫切需要实现优化升级^[78]。

生态工业园优化升级,是指园区复合生态系统结构的优化、功能的完善和生态效率的显著提高。学者们对此进行了许多研究,提出了针对性比较强的对策建议。他们的研究主要集中于园区生态安全评价、园区生态规划、园区工业共生关系构建与优化等 3 个方面。

(1) 园区生态安全评价方面。

主要运用了生态效率评价、生态风险评价、生态脆弱性评价以及综合评价法等多种方法和手段,在详细调查基础上弄清园区生态安全的现状与问题,并提出对策建议^[8,73,79-81];要提高生态工业园生态效率,关键是要提高工业园的有效能值产出率,降低环境负荷指标。生态工业园区在环境风险预防和监管过程中,重点应该强化对招商引资行业和建设项目贯彻环境风险准入原则,并对现有行业企业进行风险源等级分类管理。累积

性环境风险源指标权重排序优先于突发性环境风险源,应将累积性风险源的监管作为工业园区环境风险监管的重要内容之一。但是,生态工业园区发展绩效的量化评价目前尚缺乏统一的方法,与此相关的研究应集中在以下主要方面取得突破:生态工业园区效率/绩效评价体系研究;生态工业园区典型要素的环境绩效评价,如基于基础设施共享、基于废弃物资源化利用的环境绩效评价;工业园区的能值分析、基于数据包络分析的工业园区生态效率评价等^[82]。

(2) 园区生态规划方面。

按照其视角或侧重点的不同,园区生态规划可以划分为行业类、区域(城市)类、基础类和应用类等类型。根据不同园区的特点和需要,园区生态规划的内容主要包括工业生态系统规划、景观生态规划、生态管理规划、土地利用规划、人文社会规划等内容。其中的工业生态系统规划由工业生态系统结构规划和工业生态链(网)规划构成^[83]。而景观生态规划一般应该包括绿地系统、特色化自然景观、特色工业景观风貌及组团化的土地利用规划等内容^[84]。也可以从园区物质、能量和水资源的循环角度划分为物质流规划、能量流规划和水循环规划^[85]。但现有研究大多没有注意说明园区生态规划、建设规划、整体规划之间的关系,严格区分三者的内涵与外延,因此导致学术研究和实际应用中容易出现概念模糊和认识困惑。园区生态规划应遵循生态和谐化、经济增值化、发展综合化3条原则^[84-88]。园区生态规划一般应该遵循以下步骤:了解规划要求—建立规划机构—进行规划调查—明确规划目标—制订规划方案—组织规划论证^[84]。

(3) 园区工业共生关系构建与优化方面。

学者们在对园区工业共生关系的形式与结构模式、形成机理及管理模式等理论问题进行深入研究的基础上,结合我国生态工业园发展中存在的实际问题提出了相应对策建议:①规划升级。即创新规划理念,改进规划方法,既重视园区整体框架顶层设计,又因地制宜、突出重点,着力解决生态园区内的主要矛盾^[89]。②结构优化。这是指园区生态链(网)的健全和完善,共生关系的优化与发展,包括内部结构与外部结构两方面。内部结构优化主要包括健全完善园区内生态链(网),优化企业共生关系,建立闭环生产体系。外部结构优化主要涉及以下几个方面:一是加强园区企业与区外企业、社会组织、政府之间的沟通与合作,扩大园区共生关系网络,实现产城融合发展;二是促进单一型园区向群落型园区乃至区域性、全国性园区生态系统发展;三是把实体型园区与虚拟型园区发展结合起来,适度推动虚拟型园区发展;四是由行业类园区、综合类园区占绝对优势向行业类园区、综合类园区、静脉类园区协调发展转变^[75,90]。③技术升级。即从过去的落后技术向先进技术、从单一技术向“生态技术”体系转变。主要包括替代技术、减量化技术、再利用技术、资源化技术、生态恢复技术等^[89]。④管理升级。主要包括在充分发挥市场机制功能的基础上,合理发挥政府作用,建立、健全和完善相关法律法规、体制机制、制度、政策及标准体系;努力推动园区设施、技术、人才、信息等资源共享,设立公共服务平台,建立园区协调管理中心,搞好园区成员之间的利益分配与互利合作;强化精细化管理,通过完善资源再生加工、建成集废弃物全方位收集运输、再生加工利用、无害化处置、科技研发于一体的综合管理服务体系等^[90-91]。

3 国内工业生态安全研究的主要不足

虽然国内工业生态安全研究取得的进展值得肯定,但其不足也比较明显,主要表现在3个方面。

(1) 基础理论研究非常薄弱 主要表现在对工业生态安全概念、特征及理论体系等基础性理论问题研究很少。工业生态安全的基本概念很少有人研究,缺乏统一的定义,概念之间的相互关系不明确;研究工业生态安全特征的文献很少;尚未见到有人提出比较系统的工业生态安全理论框架。例如“工业生态安全”概念目前仅见到一篇文献给出了定义,“工业生态脆弱性”概念还没有见到明确、统一的定义,这些概念的内涵和外延、概念之间的关系比较模糊,亟待阐明。虽然许多学者分别研究了工业生态系统理论、工业共生关系理论、工业生态链(网)理论,但是这些理论与工业生态安全有什么内在关系?这些理论之间有哪些内在联系?还缺乏深入系统的研究。

(2)应用研究领域比较狭窄 主要是生态工业园、行业、区域等中观领域,对工业企业及国家工业整体生态安全等微观和宏观领域比较系统的专题研究文献不多。此外,十分重视对工业复合生态系统中自然生态子系统的研究,而对经济生态子系统、社会生态子系统的研究却比较少。同时,对国内工业生态安全实践中相关典型案例的实证研究也比较薄弱,力度不大,理论剖析提炼不深入。

(3)研究方法运用不够丰富多样 采用综合评价法、生态风险评价、生态效率评价、生态足迹/生态承载力模型、情景分析等方法比较多,运用生命周期分析、物质流分析、能值理论与方法、投入产出法、景观生态法等方法进行工业生态安全研究的文献相对不是很多;运用生态脆弱性评价、生态健康评价方法很少;过于偏重自然、经济、科技等单方面因素的研究,综合性交叉性不够强;实证研究、定量研究和动态研究比较薄弱。例如,对国内工业园生态化转型成功与失败的典型案例的实证研究不多,其经验与教训、特点与条件等等问题未能得到及时科学的系统总结和提炼;长期定点监测追踪研究和预测预警研究很少等等。

4 展望与建议

对已有文献和工业发展实践的考察表明,国内工业生态安全研究的未来整体趋势和方向将是:基础理论研究、应用研究、方法与手段研究以及政策支持体系研究全面发展、不断深入;理论研究从分散走向集成,研究尺度从中观层次为主向宏观、微观拓展,研究领域从自然生态环境为主向社会生态环境、经济生态环境延伸,研究方法从单一、专业性向综合与交叉性变迁。根据上述趋势和以往研究存在的不足,为促进今后研究工作的顺利发展,提出如下建议:

(1)基础理论研究方面

作为此项研究的后来者,我国具有后发优势、大国优势,应该大力加强工业生态安全整体性、基础性理论问题研究,为局部性、应用性研究奠定坚实基础,力争在这方面走在国外同行的前列。首先,要深入揭示和明确界定工业生态安全概念的内涵与外延,开展工业生态脆弱性概念研究,辨析相关概念之间的相互关系,统一概念使用规范,科学构建工业生态安全概念体系。其次,要深入研究工业生态安全的本质与特征,重点探讨发展中大国工业生态安全的特点、影响因子与实现条件;同时关注我国工业生态安全的区域性、阶段性差异与特征。再次,要重视工业生态安全学科建设,深入开展相关基础理论研究,科学界定学科研究对象与范围,构建学科理论体系。初步考虑可以在分别深入研究工业生态系统理论、工业共生关系理论、工业生态链(网)理论,工业生态安全评价理论基础,进行综合集成研究,构造工业生态安全基础理论框架。复次,要改变静态研究为主,动态研究薄弱的现状,加强工业生态安全动态演变过程及其规律的研究,加大动态评价、预测预警研究力度。例如,将3S技术与评价模型相结合,用模型将研究对象的环境因素系统化,构成一套完整的分析体系,形成不同尺度上兼评价、预测与预警功能于一体的工业生态安全模型。

(2)应用研究方面

应把重点放在高耗能工业行业、工业园生态化转型与升级以及工业生态安全评价等领域,以促进我国工业加速绿色低碳转型进程。第一,针对高耗能工业行业生态安全研究的现实需要和薄弱环节,要把各个行业的宏观、中观、微观3个尺度的生态安全评价结合起来,重点加强宏观层次的综合评价,以弄清楚区域和全国层次上各行业的生态安全状况。第二,深入研究工业园生态化转型与升级的特点、条件、障碍、经验教训及对策。例如,深入研究剖析典型案例,总结提炼出带普遍性的经验教训和内在规律,更好地指导面上工作。第三,要重视加强工业生态安全管理体系研究,它包括资源资产管理、生态服务功能管理、生态代谢过程管理、生态健康状态管理以及工业复合生态系统的综合管理等内容。要引入绩效评估程序,以及时了解环境管理行为的后续效应,提高管理成效;要研究如何利用生态学、经济学、管理学、社会学、伦理学等多学科知识从自然、经济、社会等各个层面对现有工业安全保障系统进行全面整合,如何减少工业生态风险和改善工业生态脆弱性,这是工业生态安全研究要解决的一个重大问题^[7]。

(3)研究方法与手段方面

应该重点开展以下研究:第一,工业生态安全评价方法与手段的研究与应用,尤其是评价模型构建、指标体系设计和评价标准的确定等要力争尽快取得突破,即针对相同尺度、相似特征的评价主体时,要建立统一的评价模型、指标体系、评价等级标准及评价方法,并配以其他方法评价的结果进行校正。第二,要深入研究建立工业生态安全研究的专有方法体系问题,在全面借鉴吸收其他学科研究方法基础上,探索依据工业生态安全研究视角和研究系统的特殊性,建立自己独特的方法体系,这不仅是学科成熟的标志,也是现实研究的客观需要^[78]。第三,要紧紧抓住工业生态安全研究综合性与交叉性强的特点,在重点研究工业自然生态环境安全的同时,十分注意运用多学科理论和方法拓展工业的经济生态环境安全、社会生态环境安全以及工业自然-经济-社会复合生态系统综合生态安全的研究。例如,如何建立和发展跨园区生态联盟、区际生态工业网络等。第四,要在继续完善现有成熟的研究方法和手段的基础上,重视创新、吸收、集成运用新的先进技术手段开展研究,例如大数据技术、智能技术、数据挖掘与分析技术、无人机监测技术以及各种应用软件等。

(4)政策支持体系研究方面

首先,应该在借鉴国外经验、总结本国实践基础上,探索如何建立具有中国特色的工业生态安全研究政策支持体系,为有关决策部门提供科学依据和参考方案。其次,应该建立各相关学科与部门有效沟通、官产学研合作攻关的协调机制。它具体应该包括四方面内容:一是建立由政府有关部门牵头,官产学研各界参加的工业生态安全研究跨界联席会议制度;二是成立一个专门性的学术团体,名称可暂定为“中国工业生态安全研究会”,既可以独立申请登记注册,也可以作为现有生态学学会的下属分会;三是创造条件尽快创办一份中国的工业生态学学术刊物,为学术交流搭建一个高层次常年性平台;四是建立定期性学术会议(高层论坛)制度,由中国工业生态安全研究会主办,会员单位轮流承办。

参考文献(References):

- [1] 崔维军,周飞雪,徐常萍.中国重化工业生态足迹估算方法研究.中国人口·资源与环境,2010,20(8):137-141.
- [2] 余平.基于产业生态视角的产业竞争力分析—以纺织服装产业为例[D].上海:东华大学,2010.
- [3] 赵琼,齐振宏.工业企业生态系统理论综述.中国水运:学术版,2006,6(9):212-213.
- [4] 陆钟武.工业生态学基础.北京:科学出版社,2010:3-8.
- [5] 李辉,魏德洲,张影,周玲珊.城市生态安全评价的理论与实践.北京:化学工业出版社,2011:8-9.
- [6] 李炎女.工业生态安全评价与实证研究[D].大连:大连理工大学,2008.
- [7] 崔胜辉,洪华生,黄云凤,薛雄志.生态安全研究进展.生态学报,2005,25(4):861-868.
- [8] 李湘梅,肖人彬,曾宇,姚智爽.生态工业园共生网络的脆弱性.生态学报,2014,34(16):4746-4755.
- [9] 肖忠东,刘永清,孙林岩.工业产业共生体系中的“食物链”研究.科技进步与对策,2008,25(3):72-75.
- [10] 徐广才,康慕滨,贺丽娜,李亚飞,陈雅如.生态脆弱性及其研究进展.生态学报,2009,29(5):2578-2588.
- [11] 吴琼,张华.生态脆弱性研究述评.首都师范大学学报:自然科学版,2014,35(3):61-66.
- [12] 张意翔.中国煤炭产业生态安全评价及政策建议.企业改革与发展:理论月刊,2011,(2):163-165.
- [13] 刘焱序.陕北能源开发区生态风险与生态安全时空分析[D].西安:陕西师范大学,2013.
- [14] 马克明,傅伯杰,黎晓亚,关文彬.区域生态安全格局:概念与理论基础.生态学报,2004,24(4):761-768.
- [15] 谢琨.企业环境风险和价值管理理论与方法研究[D].南京:南京航空航天大学,2014:31-31.
- [16] 邓俊.工业产品设计与产品全生命周期的生态环境风险研究.艺术教育,2015,(1):226-227.
- [17] 徐天宝,顾洪宾,王伟营,吴程,郝红升.水电工程建设生态风险评价概念模型研究.水力发电,2016,42(2):1-3.
- [18] 袁兴中,刘红,陆健健.生态系统健康评价——概念构架与指标选择.应用生态学报,2001,12(4):627-629.
- [19] 马克明,孔红梅,关文彬,傅伯杰.生态系统健康评价:方法与方向.生态学报,2001,21(12):2106-2116.
- [20] 董经纬,蒋菊生,阚丽艳.产业生态系统健康评价初探.现代农业科技,2007,(23):218-219.
- [21] 胡斌,章仁俊,邵汝军.企业生态系统健康的基本内涵及评价指标体系研究.科技管理研究,2006,26(1):59-61.
- [22] 闫旭骞,张顺堂,袁怀雨.矿区生态系统健康评价的理论和方法.北京科技大学学报,2005,27(3):351-355.
- [23] 孙源远,武春友.工业生态效率及评价研究综述.科学与科学技术管理,2008,29(11):192-194.
- [24] 岳强,王鹤鸣,陆钟武.基于总物流分析的我国钢铁工业生态效率分析.环境科学研究,2014,27(8):915-921.
- [25] 王震,石磊,刘晶茹,孙念.区域工业生态效率的测算方法及应用.中国人口·资源与环境,2008,18(6):121-126.

- [26] 何炼成, 庄静怡. 环境政策对中国工业生态效率影响的实证分析. 兰州商学院学报, 2011, 27(2): 62-68.
- [27] 杜春丽. 基于循环经济的中国钢铁产业生态效率评价研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2009.
- [28] 王旭. 中国水泥工业生态效率评价指标体系的建立与应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [29] 牛苗苗. 中国煤炭产业的生态效率研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
- [30] 张培. 基于物质流分析的工业园生态效率研究[D]. 广州: 暨南大学, 2011.
- [31] 孙源远. 石化企业生态效率评价研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [32] 田亚平, 常昊. 中国生态脆弱性研究进展的文献计量分析. 地理学报, 2012, 67(11): 1515-1525.
- [33] 夏光. 生态可持续性工业发展述评. 管理世界, 1993, (2): 177-179.
- [34] 张祖新, 江家骅. 生态工业初探. 生态经济, 1986, (4): 14-17.
- [35] 马传栋. 论生态工业. 经济研究, 1991, (3): 70-74, 18-18.
- [36] 肖焰恒, 陈艳. 生态工业理论及其模式实现途径探讨. 中国人口·资源与环境, 2001, 11(3): 100-103.
- [37] 周劲松, 吴舜泽, 王金南. 有序·网络·开放——生态工业系统解析. 环境保护与循环经济, 2009, 29(2): 7-9.
- [38] 罗公利, 张敏, 石松, 蔡苏文, 边伟军. 生态工业与工业生态效率研究进展. 青岛科技大学学报: 社会科学版, 2014, 30(2): 43-47.
- [39] 钟书华. 生态工业园区建设与管理. 北京: 人民出版社, 2007: 12-17.
- [40] 段宁. 清洁生产、生态工业和循环经济. 环境科学研究, 2001, 14(6): 1-4, 8-8.
- [41] 王兆华. 生态工业园工业共生网络研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
- [42] 李斌. 绿色新政下中国绿色经济发展的相关问题研究[D]. 大连: 东北财经大学, 2013.
- [43] 唐元. 中国工业的绿色发展之路. 中国制造业信息化, 2009, (12): 65-65.
- [44] 王建敏. 绿色工业发展现状及政策建议. 山东经济, 2005, 21(4): 18-21.
- [45] 何劲. 论可持续发展与我国工业生态化建设. 湖南商学院学报, 1998, (5): 19-22.
- [46] 周世祥, 韩勇. 我国工业生态化问题研究及对策思考. 能源与环境, 2009, (4): 7-9.
- [47] 王跃伟. 中国省域工业生态化水平的测定及演变分析. 经济问题探索, 2013, (12): 52-57.
- [48] 蔡婉莹. 基于主成分分析的陕西省工业生态化评价研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [49] 韩勇. 生态文明视野下我国工业生态化问题研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.
- [50] 和春兰, 饶辉, 赵筱青. 中国生态安全评价研究进展. 云南地理环境研究, 2010, 22(3): 104-110.
- [51] 范英宏, 陆兆华, 程建龙, 周忠轩, 吴钢. 中国煤矿区主要生态环境问题及生态重建技术. 生态学报, 2003, 23(10): 2144-2152.
- [52] 程建龙, 陆兆华, 范英宏. 露天煤矿区生态风险评价方法. 生态学报, 2004, 24(12): 2945-2950.
- [53] 薛希龙, 王新民, 胡勇, 杨力. 基于 FAHP 与可变模糊集的矿山生态安全效应评估. 东北大学学报: 自然科学版, 2016, 37(1): 94-99.
- [54] 王小天. 山西省煤炭矿区战略环评指标体系的研究[D]. 太原: 山西大学, 2009.
- [55] 文芳. 贵州省煤炭产业生态化研究[D]. 贵阳: 贵州财经学院, 2010.
- [56] 王文良. 煤炭企业生态竞争力评价及实证研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
- [57] 田超. 耒阳煤矿区生态修复与景观规划[D]. 衡阳: 南华大学, 2013.
- [58] 李光强, 朱诚意. 钢铁冶金的环境与节能. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [59] 刘建兴, 王青, 孙鹏, 顾晓薇, 李广军. 中国有色金属行业的生态占用研究. 资源科学, 2007, 29(1): 155-159.
- [60] 李晓燕. 云南大红山铜矿周围河流和土壤中 Cu 等重金属元素分布特征研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2009.
- [61] 陈冬梅. 秀山锰资源绿色开发利用及保障度研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [62] 廉艳萍, 傅华, 李贵宝. 水利风景区资源综合利用与保护. 中国农村水利水电, 2007, (1): 75-77.
- [63] 朱利明. 大型发电企业低碳竞争力评价体系与培育路径研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
- [64] 王艳红, 叶文明. 计及碳排放的电力工业与火电行业生态效率实证分析(2001—2011). 科技管理研究, 2015, (3): 215-219.
- [65] 商照荣, 唐森铭, 陈晓秋. 保障生态安全 促进核能工业发展. 核安全, 2008, (4): 1-8, 12-12.
- [66] 王一宸. 低碳经济视角下新疆清洁能源的开发研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆财经大学, 2013.
- [67] 刘焱序. 陕北能源开发区生态风险与生态安全时空分析[D]. 西安: 陕西师范大学, 2013.
- [68] 顾晓薇, 胥孝川, 王青, 王润. 矿山开采的生态成本. 东北大学学报: 自然科学版, 2013, 34(4): 594-597.
- [69] 王保忠. 中国能源富集区低碳转型发展研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2014.
- [70] 杜祥瑞. 能源革命: 为了可持续发展的未来. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(7): 1-4.
- [71] 石磊, 王震. 中国生态工业园区的发展(2000—2010年). 中国地质大学学报: 社会科学版, 2010, 10(4): 60-66.
- [72] 付丽娜. 工业园的生态化转型与生态效率研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [73] 商华, 武春友. 基于生态效率的生态工业园评价方法研究. 大连理工大学学报: 社会科学版, 2007, 28(2): 25-29.
- [74] 许文来. 基于循环经济的工业园区生态产业链构建研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.

- [75] 林云莲.工业代谢分析在工业园区生态化转型中的应用//Proceedings of International Conference on Engineering and Business Management (EBM2010),中国四川成都:武汉大学、美国 James Madison 大学、美国科研出版社,2010-03-25.
- [76] 张梅.景德镇陶瓷工业园生态化转型的障碍分析及对策建议.江苏陶瓷,2011,44(5):5-7.
- [77] 刘峰,阚媛珂,李国明,卢海滨.工业园生态化推进的西部典型资源型城市可持续发展研究——以攀枝花为例.资源与产业,2012,14(1):8-11.
- [78] 袁增伟,毕军.产业生态学最新研究进展及趋势展望.生态学报,2006,26(8):2709-2715.
- [79] 李忠立.生态工业园建设与区域生态环境系统安全性问题研究[D].天津:天津理工大学,2007.
- [80] 田龙.基于能值分析的工业园生态效率研究[D].大连:大连理工大学,2005.
- [81] 李艳萍,乔琦,柴发合,姚扬,白璐,扈学文.基于层次分析法的工业园区环境风险评价指标权重分析[J].环境科学研究,2014,27(3):334-340.
- [82] 田金平,刘巍,赖玢洁,李星,刘婷,陈吕军.中国生态工业园区发展的经济和环境绩效研究.中国人口·资源与环境,2012,22(专刊):119-122.
- [83] 薛东峰,罗宏,周哲.南海生态工业园区的生态规划.环境科学学报,2003,23(2):285-288.
- [84] 钟书华.生态工业园区建设与管理.北京:人民出版社,2007:50-130.
- [85] 吴峰,徐栋,邓南圣.生态工业园规划设计与实施.环境科学学报,2002,22(6):802-803.
- [86] 王灵梅,张金屯.火电厂生态工业园生态规划研究——以朔州火电厂生态工业园为实例.环境保护,2003,(12):25-29.
- [87] 吴一平,段宁,乔琦,刘景洋.全新型生态工业园区的工业共生链网结构研究——新疆石河子国家生态工业(造纸)园区的设计分析.中国人口·资源与环境,2004,14(2):125-130.
- [88] 吴文鑫,严云祥,吕道锋.保障生态安全的工业园区规划实践——以江阴高新区青阳园区总体规划为例//2014中国城市规划年会论文集.海口:中国城市规划学会,2014-09-13.
- [89] 冯之浚.制定我国循环经济生态园规划的若干思考.科学与科学技术管理,2008,29(6):114-119.
- [90] 钟琴道,姚扬,乔琦,白卫南,方琳.中国生态工业园区建设历程及区域特点.环境工程技术学报,2014,4(5):429-435.
- [91] 熊艳.生态工业园发展研究综述.中国地质大学学报:社会科学版,2009,9(1):63-67.