

DOI: 10.5846/stxb201507291586

田金平, 刘巍, 臧娜, 陈吕军. 中国生态工业园区发展现状与展望. 生态学报, 2016, 36(22): - .

Tian J P, Liu W, Zang N, Chen L J. Review of eco-industrial park development in China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): - .

中国生态工业园区发展现状与展望

田金平¹, 刘 巍¹, 臧 娜¹, 陈吕军^{1, 2}

1 清华大学环境学院, 北京 100084

2 浙江清华长三角研究院生态环境研究所, 嘉兴 314006

摘要: 本文综述了中国生态工业园区的发展, 主要包括: (1) 中国工业园区的发展历程和面临的挑战; (2) 中国生态工业园区的发展历程与发展模式; (3) 三个角度分析中国生态工业园区建设取得的环境绩效, 即基于生态工业示范园区验收及规划基准年绩效变化, 基于数据包络分析法的生态工业示范园区环境绩效和基于环境绩效指数方法的生态工业园区环境绩效评价; (4) 国内外关于生态工业园区的研究现状和热点; (5) 中国生态工业园区发展和研究面临的难点及未来发展展望。本文面向中国工业园区绿色低碳循环发展需求, 以期通过对生态工业园区发展的回顾和评述, 为园区实践者和决策者及后续研究提供参考。

关键词: 工业园区; 生态工业园区; 生态化发展; 产业生态学

Review of eco-industrial park development in China

TIAN Jinping¹, LIU Wei¹, ZANG Na¹, CHEN Lujun^{1, 2, *}

1 School of the Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2 Zhejiang Provincial Key Laboratory of Water Science and Technology, Department of the Environment, Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing 314006, China

Abstract: In this study, we reviewed the development of a Chinese eco-industrial park. First, the history of Chinese industrial park development after the institution of the Reform and Opening Policy in 1979 and the main challenges were analyzed. Second, a management and development model of a Chinese eco-industrial park was presented, followed by a review of the performance of national eco-industrial park development from three aspects: (1) comparing the difference of metrics between reference years of eco-industrial park planning and accreditation, (2) environmental performance analysis based on a data envelopment analysis approach, and (3) environmental performance index of eco-industrial park. Third, based on Web of Science and CNKI databases, a snapshot of scientific research on eco-industrial park development was shown by reviewing the topics of scientific publications and ranking the popularity of keywords. Fourth, challenges facing Chinese eco-industrial park development were identified. Last, the future prospect of Chinese eco-industrial park development was proposed based on four aspects, (1) aspiring absolute decoupling of resource consumption and waste generation, (2) rethinking future roadmap of eco-industrial park development, (3) refining management of the park, and (4) understanding the mechanism that impacts the sustainable development of eco-industrial park based on long-term material/energy metabolism analysis of the park.

Key Words: Industrial park; Eco-industrial park; Eco-industrial development; Industrial ecology

基金项目: 自然科学基金 化工园区物质能量代谢动态演化过程及其优化调控研究(41471468); 能源基金会项目 中国工业园区生态化发展研究(G-1408-21802)

收稿日期: 2015-07-29; 修订日期: 2016-03-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenlj@tsinghua.edu.cn

中国是“世界工厂”，现有的遍布全国的 1500 余家省级以上工业园区是“工厂”中最重要的“车间”。在政府主导下，中国的工业园区发展已逾 30 年。园区已经成为我国经济发展的重要形式和主要力量。但“工厂”和“车间”巨大的资源能源消耗，以及常规污染物、温室气体大量排放带来的诸多环境问题使其转型发展更为迫切。因此，研究中国工业园区的生态化发展尤为重要。随着产业生态学、生态工业园区、产业共生等理念和方法引入中国，许多工业园区积极探索和实践生态化发展，中国生态工业园区建设始于 2000 年，已成为解决发展中造成的沉重环境代价的试验田。因此，总结中国工业园区及生态工业园区的发展历程、发展过程中形成的可推广可借鉴的模式、取得的成效、面临的挑战，对于国内众多仍处在发展初级阶段的工业园区“引他山之石以攻玉”，在经济新常态下以生态化发展引领，实现跨越式发展，具有积极的借鉴作用。本研究首先回顾了中国工业园区的发展历程和面临的挑战；其次综述了中国生态工业园区的发展，包括发展历程、现阶段生态工业园区发展模式、从 3 个角度回顾了中国生态工业园区建设整体的绩效；接下来基于 Web of Science 和 CNKI 数据库，分析了国内外关于生态工业园区的研究现状和动态，探讨了中国生态工业园区发展和研究存在的问题和难点，以期面向国内工业园区绿色低碳发展需求，更加针对性地开展相关研究，为园区实践者和决策者提供更多支撑。

1 中国工业园区发展

1.1 为什么会出现工业园区

工业革命以来，寻求高效、可持续的发展模式一直是工业发展的主旨之一。19 世纪中叶，工业活动逐步在特定区域集中，与居住区和农业区隔离开。工业活动集中区域逐渐被称为工业区、工业园等。19 世纪末，英国经济学家马歇尔提出“产业集聚”的概念^[1]，波特进一步提出了产业集聚“钻石模型”理论，深入论述了产业集聚对竞争力的提升作用^[2]，产业集聚是推动区域经济增长的重要方式，是工业化过程中的普遍现象和工业高效发展的重要模式^[2]。产业集聚是推动工业园区发展的重要理论基础之一，工业园区为产业集聚提供了有利空间。

发达国家在发展过程中形成了许多著名的工业园区，如德国鲁尔工业区^[3]、荷兰鹿特丹工业区^[3]、比利时安特卫普化工区^[4]等。根据联合国环境规划署 1997 年数据显示^[5]，全球工业园区的数量在 12,000—20,000 之间，其时美国有 8,800 个，加拿大 1,200 个，英国 200 个，德国 300 个，荷兰 130 个，日本 600 余个，那时中国的工业园区正在蓬勃发展。发达国家工业发展历程表明，工业园区是发展工业、促进区域经济发展的重要载体。工业园区通过产业集聚而增强了竞争优势，推动了生产要素集聚和产业升级、发挥了规模效益、降低了管理成本；同其他区域相比，通常工业园区内单位面积投资强度较高，土地集约利用程度较大，可最大限度地提高发展效益，同时可产生环境保护协同效应，对推动当地经济、社会和环境发展起到了重要作用^[2]。工业园区内以大型企业为核心，带动上下游中小企业集聚发展，逐步形成产业链和产业集群，进而发展形成园区的主导产业。

1.2 中国工业园区的发展历程

中国工业园区的发展与改革开放后经济技术开发区的建设发展密切相关。1979 年中共中央、国务院决定在深圳、珠海、汕头、厦门兴办“经济特区”，深圳特区南头半岛的蛇口工业区，面积 2 km²，是中国第一个对外开放的工业园区^[6]。1984 年中共中央和国务院决定进一步开放 14 个沿海港口城市，规定这些城市可以划定一个有明确地域界限的区域，兴办经济技术开发区^[6-7]。1988 年国家批准建立第一个高新技术产业开发区——北京新技术产业开发试验区，同年又在上海建设漕河泾新技术开发区。1992 年，国务院先后开放了一大批沿长江、沿内陆边境城市和内陆省会城市，并开始建设国家高新技术产业开发区，此后中国出现一股“开发区热”^[6, 8-9]。到 2004 年 8 月，各类开发区达到 6866 个，规划面积达 3.86 万 km²^[10]。然而，随着开发区在全国范围内的泛滥，暴露出了一系列问题，包括部分地方和部门擅自批准设立名目繁多的各类开发区、随意

圈占大量耕地、越权出台优惠政策、很大一部分开发区功能并不完善等^[10]。2003 年开始,中国政府开始对开发区进行撤并整顿。经过四年清理整顿,撤并开发区 4813 余家,收回土地 2.5 万 km²^[10-11]。根据中国国土资源部公布的《中国开发区四至范围公告目录(2006 年版)》,截止 2006 年,国务院共批准设立了 222 家国家级开发区和 1346 家省级开发区^[12](图 1)。

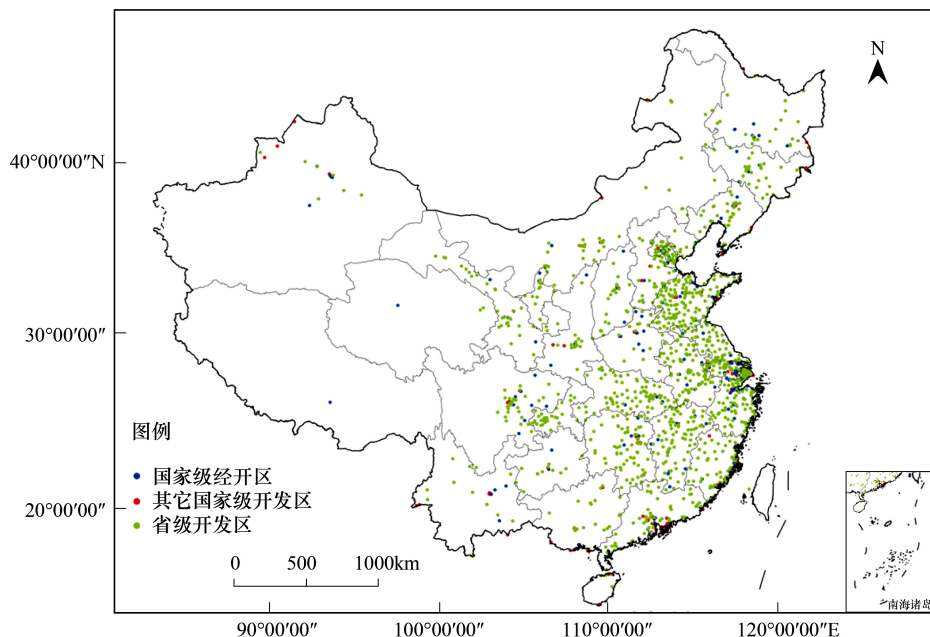


图 1 中国工业园区(开发区)空间分布

Fig.1 Geographic location of Chinese industrial park

不作为地图使用,仅表示园区空间分布位置示意

此后,一批园区陆续升级为国家级开发区,表 1 为当前中国工业园区(开发区)的主要类型。中国工业园区(开发区)经 30 余年的建设发展,在社会经济发展中占据了重要地位,是工业发展的先行者和中坚力量,在推动城市化进程中扮演着重要角色。根据工信部统计,“十一五”期间东部沿海地区工业产值的 50% 来自园区,西部地区新增产值的 50% 来自园区^[13]。以国家级经济技术开发区为例,2014 年,215 家国家级经开区地区生产总值、第二产业增加值、财政收入、税收收入和进出口总额分别占全国的 11.9%、20.5%、10.3%、10.3% 和 19.3%^[14],开发区已经成为地方经济发展的“火车头”和“聚宝盆”^[14]。

表 1 中国工业园区的类型

Table 1 Classification of Chinese industrial park

类型 Category	级别 Level	管理机构 Administrative organization	数量(截止 2015.6) Number (by June 2015)
国家级经济技术开发区 National economic-technology development area	国家级	商务部	218
国家级高新技术产业开发区 National High-Tech Industrial Development Zone	国家级	科技部	115
出口加工区 Export processing zone	国家级	海关总署	63
保税区 Bonded area	国家级	海关总署	15
边境经济合作区 Border economic cooperation zone	国家级	商务部	15
旅游度假区 traveling resort area	国家级	国家旅游局	10
工业园区/开发区 Industrial park/area	省级	发改委/经贸委	~1100

1.3 中国工业园区发展过程中面临的挑战

中国工业园区发展过程中面临的挑战随发展阶段不同而逐步变化。以工业园区为载体的工业化是推动城镇化发展的有效途径,但这个过程也付出了很大的环境代价。工业园区因工业项目集聚、资源能源消耗及污染物排放量大,对区域生态环境的影响显著。园区在发展过程中,由于污染防治手段及环境管理能力未跟上园区经济发展的步伐,工业园区一度成为了高污染、高能耗区域的代名词,因工业园区环境问题引发的新闻曝光和社会矛盾时有发生。近年来,中国雾霾天气范围扩大,环境污染矛盾突出,资源约束日趋紧张,生态系统加速退化,气候变化的威胁日益凸显。工业园区的发展也相应地面临资源、能源及环境等诸多挑战。工业园区如何处理好经济发展与节约资源、保护环境的关系,推进绿色发展、低碳发展和循环发展,是园区建设中始终要紧绷的一根弦^[14]。

2 中国生态工业园区发展

2.1 中国生态工业园区发展历程

生态工业园区(Eco-industrial park, EIP)建设成为解决工业园区环境问题,实现转型和区域经济可持续发展的主要途径之一^[15]。生态工业园区的核心概念是在产业集聚区内企业间通过相互合作以及与周边区域的合作,通过有效共享基础设施、能源、物质、水、信息及自然栖息地等资源,构建产业共生体系,实现经济收益、环境质量收益,以及社会发展的均衡提升^[16]。

生态工业理念被引入中国后^[17],原国家环保总局于2000年开始推动生态工业园区建设,发展过程中逐步形成了“有标准可依,依标准建设,据标准考核,示范试点带动,建立长效机制”的发展路线图^[18-19]。鉴于开发区面临的严峻环境保护形势,国家税收政策调整、资源和能源紧缺、环保标准提高等伴随的发展压力,以及节能减排科技需求,2007年环保部、商务部、科技部联合,加强对国家生态工业示范园区建设的推进。

中国生态工业示范园区发展过程中曾将其分为三类,综合类、行业类和静脉类生态工业园区,出台了相应国家标准,并在发展实践中进行了多次完善^[15, 20]。截止2015年10月,共命名37个国家生态工业示范园区,71个园区通过规划论证正在创建国家生态工业示范园区(图2),目前大陆地区仅有4省尚无园区列入国家生态工业示范园区创建名录。

“十八大”将建设生态文明提到前所未有的高度,生态工业园区是生态文明在工业领域的重要实践形式。中国政府多个部门从多角度积极推进园区的绿色、低碳和循环发展(图3)。2013年以来中央政府出台的《关于加快推进生态文明建设的意见》、《大气污染防治行动计划》、《水污染防治行动计划》、《循环经济发展战略及近期行动计划》、《中国制造2025》、《国务院办公厅关于促进国家级经济技术开发区转型升级创新发展的若干意见》等一系列重要文件中,均明确指出与园区绿色、低碳、循环发展相关的内容,凸显了园区绿色、低碳、循环发展对中国加快经济发展方式转变,建设资源节约型环境友好型社会的重要性。

2.2 中国生态工业园区发展模式

图4为作者总结提出的国家生态工业示范园区的发展模式^[12]。

中国生态工业园区建设既是园区环境管理发展的一个重要阶段,也是环境管理的一个重要工具,是各种环境管理要素的集合体。现阶段园区在开展生态工业园区建设中,充分利用、发掘有利于节能减排、环境保护,有利于提高资源能源利用效率、实现绿色发展的实践和做法,以切实推进国家生态工业示范园区发展^[12]。中国国家生态工业示范园区发展由政府、市场和企业3个方面共同推进,实践层面可分为企业、产业集群、园区和社会4个层面。企业层面,以企业为主体,通过技术创新和加强环境管理,提高生产效率和资源能源利用效率,减少废弃物产生量。产业集群层面,主要特征是以龙头企业为核心,带动上下游配套企业入驻园区,形成产业链网,以此为依托构建园中园发展模式,提高产业链生产效率。园区层面的重点在于完善基础设施,实现集中供热和热电冷多联供,实施清洁能源和可再生能源替代煤炭,建立集中治污和再生水回用等基础设施,构建产业共生,扩展基础设施在解决区域环境问题中的功能;同时加强源头控制,制定产业准入机制,实施产

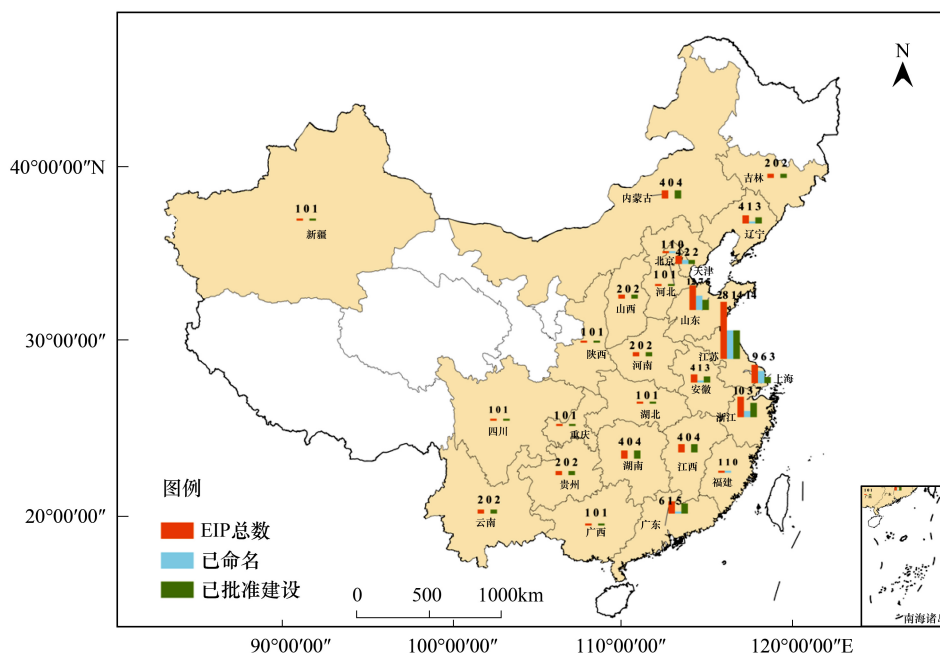


图2 中国国家生态工业示范园区分布

Fig.2 Geographic location of Chinese eco-industrial park

不作为地图使用,仅表示园区空间分布位置示意。来源:作者整理

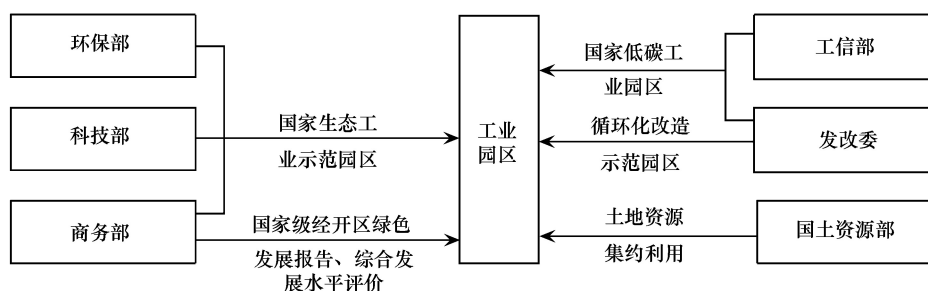


图3 中央政府多个部门推进工业园区绿色低碳循环发展的举措

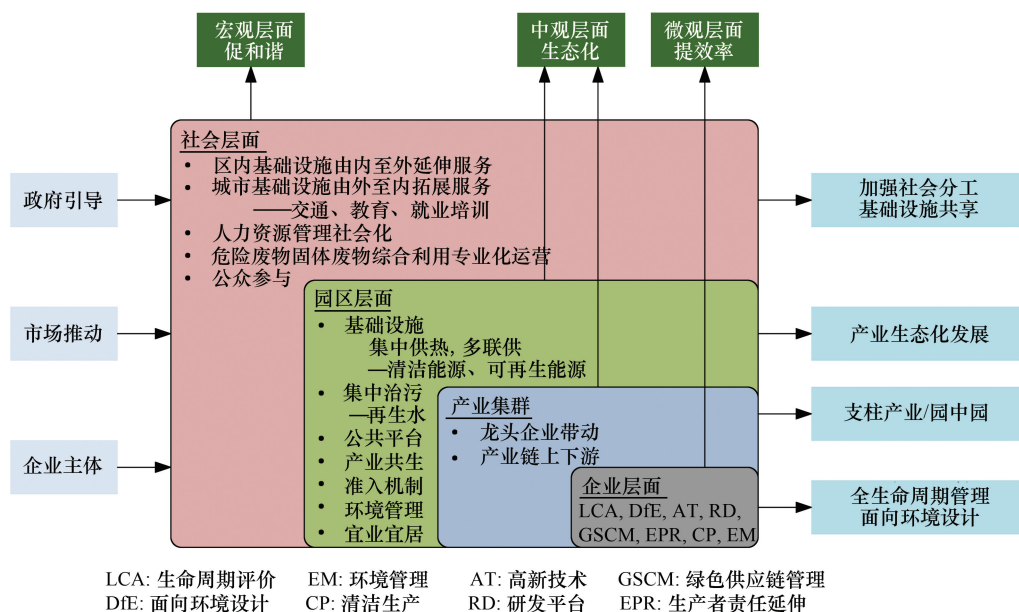
Fig.3 Major programs supported by central government on facilitating green development of Chinese industrial park

业链招商,提高企业入区门槛;此外完善科技孵化、海关、金融等公共服务平台,开展开发区整体的环境管理认证及环境影响评价等。宏观层面,开发区与母城产城融合发展、宜业宜居已成为国内众多园区发展的必然目标^[12]。此外,园区建设发展过程中涌现出一大批具有生态化发展的坚强理念和为之奋斗的不屈精神的园区建设者,这也是推动中国生态工业园区发展的重要特点。

2014年环保部组织出版了《中国生态工业园区建设模式与创新》,集中展现了2000—2012年以来国家生态工业示范园区的建设模式、特色与成效,总结梳理了一系列典型案例,并从6个方面凝练出现阶段国家生态工业示范园区的主要建设模式^[21],包括:(1)企业层面以生态设计、绿色技术、节能降耗、环境管理为抓手推动生态化发展;(2)基于物质代谢、水资源高效利用、能量梯级利用及基础设施共享推进产业共生发展;(3)老工业基地向高新技术转型、二三产业协调融合发展,及传统制造业向战略性新兴产业转型促进产业转型升级;(4)基于废物循环利用的静脉产业发展模式;(5)以流程工业为支柱且行业特征突出的园区集成创新实现资源能源高效利用;(6)在省会城市等大城市布局的园区深化科技创新驱动生态产业发展。

2.3 中国生态工业园区建设取得的绩效

客观评价中国生态工业示范园区建设以来取得的环境、经济和社会绩效,是管理者、实践者和公众共同关

图4 中国生态工业园区发展模式^[12]Fig.4 Model of eco-industrial park development in China^[12]

心的问题,量化生态工业园区建设关键要素的效益,对指导生态工业园区建设工作具有重要意义,对于识别中国生态生态工业园区建设过程中积累的好的做法,在更大范围内推广普及具有积极的作用。以下结合作者已开展的研究从3个方面重点分析中国生态工业园区建设整体取得的环境经济绩效。当前对生态工业园区建设的社会效益的研究仍很少。

2.3.1 基于生态工业园区验收及规划基准年绩效变化分析

中国生态工业园区建设是一个持续推进的过程^[22],结合现阶段国家生态工业园区建设管理办法,一个较直接的途径是比较国家生态工业园区在规划基准年和验收基准年之间的绩效变化。以2013年5月前通过考核验收的17个综合类国家生态工业园区为例,比较验收基准年与规划基准年经济发展、综合能耗、新鲜水消耗、废水产生量、COD、SO₂排放和固废产生量,以及单位工业增加值综合能耗、新鲜水消耗、废水产生量、COD排放量、SO₂排放量及固废产生量的变化^[23]。研究表明,17家国家生态工业园区其COD和SO₂排放总量分别下降25%和51%,排放强度下降52%和69%;能耗、新鲜水耗、废水排放量、固废产生量分别增加了20%、18%、12%和6%,但其强度下降22%、25%、28%和32%。从业人数和工业用地面积分别增加了23%和30%,人均工业增加值和单位土地面积工业增加值产出分别增加27%和20%^[23]。能耗强度降幅高于国家“十一五”期间19.1%的能耗强度降幅,COD排放量和SO₂排放量降幅远高于国家“十一五”期间COD、SO₂减排12.49%和14.29%的实际水平。国家生态工业园区以较小的土地占有和人力投入,对所在地区的经济发展产生了很大的贡献,COD和SO₂排放量在所在地区排放总量中的占比较小,以较小的环境负荷产生了显著的经济贡献^[24]。开展生态工业园区建设,有利于提高资源能源利用效率和产出率,推动经济发展方式由粗放型向集约型转变,可有效缓解区域经济发展面临的资源环境压力。

2.3.2 基于数据包络分析法的生态工业园区环境绩效

应用数学模型建立生态效率指数方法也是评价国家生态工业园区发展绩效的重要途径。刘巍等^[25]运用非参数Malmquist-Luenberger指数法分析了34家综合类国家生态工业园区2007—2010年间环境绩效的变化及分布(图5),以及不同类型、不同建设进程的生态工业园区的发展差距,通过该指数分解,考察了生态工业园区环境绩效变化的具体原因。结果表明:(1)2007—2010年,34个园区的环境绩效提升了89%,效率提高(56%)对环境绩效提升的贡献率较大,技术进步(22%)贡献相对较小;(2)通过验收的国家生态工

业示范园区的环境绩效改善明显优于在建的国家生态工业示范园区,两者改善幅度分别为 129% 和 60%,充分说明了国家生态工业示范园区建设的成效;(3)高新技术产业园区类的生态工业示范园区的环境绩效改善低于经济技术开发区类的国家生态工业示范园区,高新区因为产业发展起点及特点决定其生态效率通常已较高,进一步改善幅度低于经济技术开发区(分别为 31% 和 67%),但高新区在技术进步方面较经开区有明显优势(分别为 35% 和 17%),技术进步在园区生态化发展中起到了重要作用;(4)大多数园区的环境绩效均有不同程度提升,但是仍有 3 个园区显示环境绩效恶化,其主要原因是在此期间有较大规模的高能耗高排放项目投产。

2.3.4 基于环境绩效指数方法的生态工业园区环境绩效评价

赖玢洁等^[26]研究运用多目标排序方法构建了中国生态工业示范园区发展环境绩效指数,以量化比较国家生态工业示范园区间及年际间的环境绩效变化。首先基于《综合类生态工业园区标准》筛选构建环境绩效评价指标体系;其次应用标准化方法和正态分布的累积分布函数 NORMDIST 依次对各项指标原始数据进行 2 次数据处理;然后采用准则层、指标层均等权重进行归一化得到环境绩效指数。该研究基于原《综合类生态工业园区标准(HJ274—2009)》中相关指标的达标要求提出了虚拟的“标准园区”,以其为参照(将其绩效指数设置为 60),分析了 30 家综合类国家生态工业示范园区 2009 年和 2010 年的绩效。研究结果显示,所评价的在建或已验收的 30 个生态工业示范园区 2010 年绩效指数绝大部分超过“标准园区”。分析现阶段开展国家生态工业示范园区建设的对象,绝大多数是在东部地区 1992 年之前建设且发展较好的国家级经济技术开发区和国家高新技术产业开发区,原《综合类生态工业园区标准(HJ274—2009)》对其而言容易达到(国家生态工业示范园区标准 2015 年已更新^[20]),许多园区在生态工业园区建设规划基准年绝大部分指标已经超过国家标准。这在反映国家级开发区整体发展水平较好的同时,也说明国家标准中设定的指标要求对国家级经济技术开发区、国家级高新技术产业开发区而言普遍偏低,国家生态工业示范园区建设很容易成为一种“帽子”工程。对国家级经济技术开发区和国家高新技术产业开发区,其生态工业示范园区建设不能仅仅满足于达到国家标准。园区管理者可在国家标准基础上制定适应性动态发展指标,持续提高园区生态化发展水平。另一方面,一些园区主导产业虽以传统的涉水高排放行业为主,但其清洁生产水平在行业内已属于先进水平,这些园区不宜与国家级经开区或高新技术产业开发区按相同的标准比较和考核。因此在实际管理工作中,应加强对园区生态化发展实施分类指导和管理,向更高的环境目标发展,真正起到对中国众多园区生态化发展的示范作用。新修订的《国家生态工业示范园区管理办法》和《国家生态工业示范园区标准》^[15, 20]即在此方面展开积极的实践。

3 国内外生态工业园区研究现状及动态分析

3.1 生态工业园区国际发展概况

1989 年,随着产业生态系统概念^[27]的提出以及丹麦卡伦堡产业共生案例的发现^[28],诞生了产业生态学这一新兴领域。产业生态学的主旨思想是推动人类社会在经济、文化和技术不断发展的前提下,有意识并理性地去探索和维护可持续发展的方法。产业生态学要求不是孤立而是协调地看待产业系统与其周围环境的关系,试图对整个物质循环过程——从天然材料、加工材料、零部件、产品、废旧物品到产品最终处置——加以

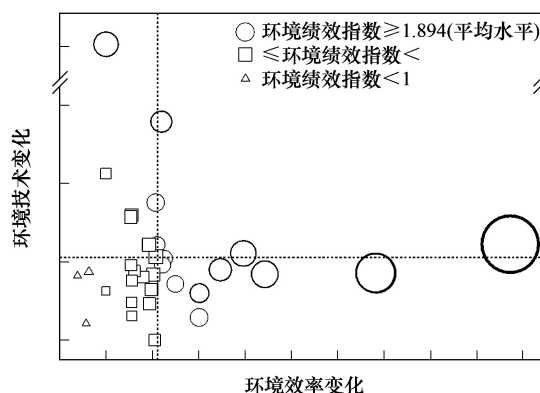


图 5 生态工业园区环境绩效变化指数^[25]

Fig.5 The eco-efficiency change and environmental technical change of 37 EIPs by the environmental performance index from 2007 to 2010

用文献^[25]数据做图

优化,需要优化的要素包括物质、能量和资本^[29]。

生态工业园区是产业生态学研究 and 实践的重要载体之一^[16]。工业园区这一人工经济系统在发展中有意识地模仿自然生态系统^[30],应用系统工程的理论和方法,对现有园区进行重新规划、设计和建设,以提高资源、能源利用效率,减少污染物产生和排放,改善环境质量,促进经济持续发展。2000 年以来,欧美国家^[31-33]、澳大利亚^[34]、日本^[35]、韩国^[36]、新加坡^[37]、印度^[38]、巴西^[39]等国家都出现了一系列关于生态工业园区案例的实证分析。工业发达国家生态工业园区发展的代表性例子包括丹麦^[28, 40]、美国^[41]、英国^[42]、日本^[35]和韩国^[36],图 6 为几个主要国家及中国推进生态工业园区发展的演变概览。发达国家现阶段关于生态工业园区发展的重点问题主要集中在以下方面^[43]:(1)生态化发

展的驱动力,包括园区建立物质、能量、信息、废弃物等集成系统过程中潜在干系方之间建立合作联系的驱动力;(2)生态化发展准则,目的是定义并识别推动生态化发展的创新行动;(3)生态化发展成功要素,目的是从政治、经济、社会和环境识别各园区生态创新的成功要素;(4)定义针对推动园区生态创新有效发展和管理的关键问题。在国家生态工业示范园区建设经历十余年的实践后,思考中国生态工业园区未来的发展路线图尤为重要。

3.2 基于 Web of Science 分析生态工业园区国际研究热点

在 Web of Science 以检索式“(TI=(eco-industr * park) OR TI=(industr * symbiosis) OR TI=(industr * ecosystem) OR TI=(eco-industr * development) OR TI=(industr * park) OR TI=(industr * complex) OR TI=(industr * estate) OR TI=(industry * area) OR TI=(industr * zone)) AND 语种=(English) 精炼;文献类型=(article or review)”进行标题检索,得到 2000—2014 年期间全球关于工业园区发展研究相关的 850 余篇文献,将其导入 Endnote,从关键词分析该领域研究热点。导出关键词 3000 余个,庞大的关键词数量可反映与工业园区相关的研究内容涉及面很广。将关键词排序并结合检索关键字段进行归类,分析研究热点(图 7)。

从图 7 所示的前 20 位高频关键字涵盖的要素分析,除共性的关键词如 Industrial Ecology, industrial park, eco-industrial park, industrial symbiosis 外,在园区生态化发展领域国内外研究热点包括几个方面:一是针对园区内能源、物质、水、污染物、碳/CO₂等要素的研究;二是将单个工业园区做为研究载体,从系统集成、模型构建、管理、经济、政策、网络、设计等方面开展研究;三是针对中国工业园区的研究,中国的生态工业发展受到国内外积极关注,China 作为关键词出现频率很高。从摘要分析 WOS 发文中关于中国(生态)工业园区的研究主题,主要集中在以下方面:(1)中国生态工业园区建设情况介绍,如文献^[22];(2)中国生态工业园区案例介绍^[44-45];(3)基于典型园区,开展物质代谢^[46-47]、水资源管理^[48-49]、能量代谢^[50-52]、固废管理^[53]、能值分析^[54]、生态效率分析^[55]、温室气体核算^[56-57]、生态网络分析^[58]等方面的研究,进而提出优化管理的政策建议;(4)典型园区产业共生或生态转型演变分析^[59-60];(5)中国生态工业园区建设绩效评价^[23]。生态工业园区和产业共生研究近期的综述可参见 Boons^[61]、Yu^[62]及 Zhang^[63]等人的工作。

3.2 基于 CNKI 数据库分析生态工业园区国内研究热点

在中国知网学位论文数据库及《中国学术期刊(网络版)》数据库,以“生态工业园”进行标题检索,2000—2015 年期间,共有 215 篇生态工业园相关的学位论文,期刊论文 860 余篇。对检索结果按被引频次排序,对被引 4 次以上的近 420 余篇文献进行标题及关键词分析,研究主题包括生态工业园理论探讨、物质能量集成、低碳发展、产业共生、绩效评价、准入条件、发展模式、土地利用、园区管理等多个方面。理论探讨主要包括概

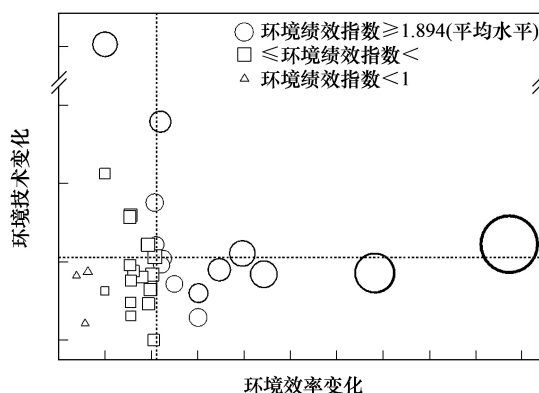


图 6 主要国家生态工业园区发展演变

Fig. 6 Evolution of EIP development in China and some key countries

(蓝色点代表中国的发展历程)来源:作者整理

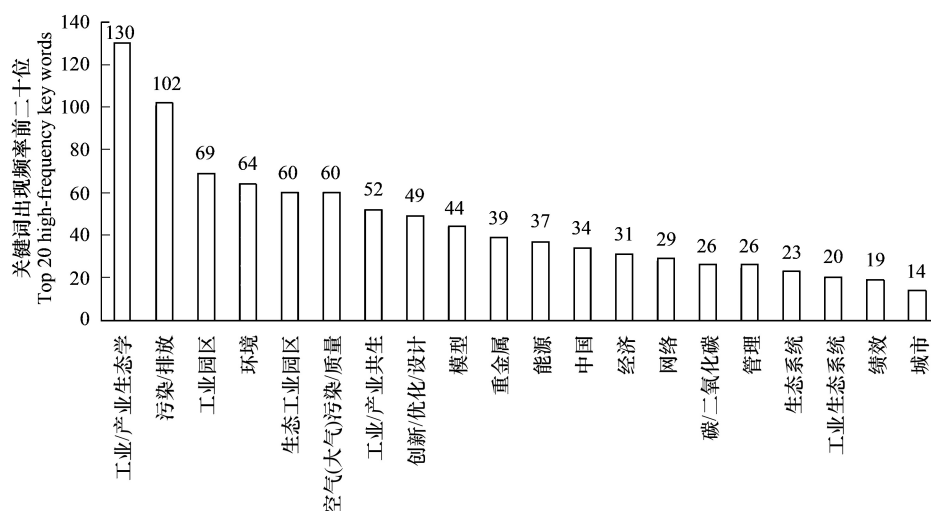


图7 园区生态化发展领域主要研究热点

Fig.7 Hi-frequency keywords on EIP studies in the articles cited in WOS from 2000—2014

关键词保持英文以便于读者对照检索 来源:作者检索整理;工业/产业生态学 Industrial ecology;污染/排放 Pollution/emissions;工业园区 Industrial park;环境 Environment/tal;生态工业园区 Eco-industrial park;空气(大气)污染/质量 Air pollution/quality/atmosphere;工业/产业共生 Industrial symbiosis;创新/优化/设计 Innovation/optimization/design;模型 Model;重金属 Heavy metals;能源 Energy;中国 China;经济 Economic;网络 Network;碳/二氧化碳 Carbon/CO₂;管理 Management;生态系统 Ecosystems;工业生态系统 Industrial ecosystem;绩效 Performance;城市 City

念辨析、动力机制、调控机制、稳定性、柔性等方面,以及相关学科的理论如外部性理论、系统理论、关键种理论、供应链理论、复杂网络等在生态工业园区发展中的应用等。基于典型案例的物质能量代谢研究、节能减排、低碳发展、发展模式、综合评价、发展规划等方面也是中国生态工业园区发展研究的热点,研究内容主要致力于提高和优化工业园区产业集聚度和循环链接效应,实现物质、能源、水和土地等资源的集约高效利用,在基础设施、污染防治、环境保护、生态建设等方面提高绩效。政策建议则多为结合发展中面临的资源环境约束,鼓励园区建设生态工业园区。

4 中国生态工业园区发展研究的难点

中国已经有一定数量的园区在开展生态工业园区建设,这些园区在污染减排、基础设施建设、产业结构优化、建筑节能、能源效率提升、固废管理、以及水资源管理等领域开展了广泛的实践和探索,并取得了积极的成效,但进一步发展及研究仍存在一些共性问题 and 难点:

(1)现阶段中国的生态工业示范园区发展整体仍处于实践探索阶段,园区在强度下降方面(相对脱钩)取得了成效^[23],但在减少水资源、能源消耗,减少固体废弃物产生和排放等方面仍需努力,特别是固体废弃物的减量化及资源化方面。如何量化地分析中国生态工业园区未来发展的潜力及途径,使得中国生态工业园区实现绝对脱钩发展,是园区发展和研究难点之一。

(2)中国宏观经济发展所处的新时期新形势对工业园区的可持续发展提出了新的要求,需要深入剖析中国工业园区和生态工业园区发展实践形成的模式和最佳实践措施,如何识别中国工业园区在不同发展阶段生态化发展的关键要素、形成的最佳技术清单和政策措施、园区建设生态工业园区的源动力,进而制定生态工业园区下一阶段的发展路线图,是园区生态化发展和研究的难点之二。

(3)发展生态工业园区已成为共识,加强园区的精细化管理是推进园区生态化发展的有效手段,但现阶段仍缺少有效的技术支撑园区的精细化管理,特别是基于产业生态学3个主要工具——物质流分析、生命周期评价和投入产出分析的生态工业园区发展绩效评价。此外,现阶段统计体系中园区并非独立的统计单元,园区统一的基础数据统计体系仍未建立,加之园区发展迅速且持续扩区,统计口径多变、按需统计的情况普

遍,数据的透明度及一致性仍亟待提升。如何建立统一、透明的统计体系和评价方法,为园区精细化管理奠定扎实的基础,是园区发展和研究的难点之三。

(4) 中国的工业园区因其产生、发展的大环境独特,其生态化发展的内涵在全球范围内也有鲜明特点,指导中国工业园区生态化发展的基础理论和方法仍未形成。针对多种类型的工业园区开展基于长时间跨度的物质能量代谢动态演化机理研究,深刻理解影响园区可持续发展的关键要素的作用机制、作用结果及环境影响,是关键性的基础工作。这些基础性工作目前仍很不足并缺乏足够的样本积累,制约了面向中国工业园区生态化发展的基础理论和方法的建立,是园区发展和研究的难点之四。

5 展望

中国作为新兴经济体,其发展阶段、在全球价值链中的分工及产业结构与发达国家差别很大。中国经济发展现阶段重点仍在工业,工业发展重在园区。工业园区是实体经济发展的前沿,经过 30 余年快速发展,在经济发展新常态下,工业园区现在正站在十字路口,今后往哪里去、走什么路,直接关系到园区的前途和命运^[14]。党的“十八大”报告提出了“五位一体”的中国特色社会主义事业总体布局,和城镇化、工业化、农业现代化和信息化“四化同步”的发展要求,作为工业化和城镇化快速发展不可或缺的载体,工业园区可持续发展是中国经济发展和生态文明建设的重要组成。工业园区实施绿色发展、生态化发展,是破解资源环境压力、实现可持续发展的必然选择,建设生态工业园区在工业领域践行生态文明方面应当发挥更关键的作用。

中国目前开展国家生态工业示范园区建设的园区比例仍很低,研究显示尚未开展生态工业园区建设的园区其资源能源效率方面与国家生态工业示范园区相比仍存在较明显的差距^[26]。中国工业园区规模、产业技术水平、生态化发展水平各异,尤其是中小规模的园区的生态化发展水平距国家生态工业示范园区仍有较大差距。因此,总结国家生态工业示范园区在生态化发展中行之有效的主要做法和经验,搭建园区生态化发展公共交流平台;建立客观的中国工业园区发展效率评价指标方法,系统评价中国工业园区生态化发展现状;研究其生态化发展的路径和潜力,提出未来中国工业园区生态化发展路线图,对实践者和管理决策者提供科学依据和政策建议,具有重要的意义和价值。基础研究方面,从全生命周期角度,识别和追踪园区物质、能量输入输出、污染物数量和性质、污染物迁移路径及其环境影响,研究园区经济活动与物质流动、资源消耗、环境效应之间的关系,揭示园区物质、能量代谢动态演化规律,研究多层次调控园区物质、能量代谢的方法,对于实施全流程污染预防和污染减排,改善区域环境质量具有重要应用价值,是园区精细化管理和生态化发展决策的重要支撑,也是建立中国工业园区生态化发展的基础理论和方法的关键性基础工作。

致谢:本研究得到国家自然科学基金 41471468 的经费支持,及能源基金会的经费支持。感谢环境保护部科技标准司给予的支持。

参考文献 (References):

- [1] Marshall A. Principles of Economics. 8th ed. Book IV, Chapter X Industrial organization: The concentration of specialized industries in particular localities. London: Macmillan and Co., Ltd. 1920. [2016-03-20]. <http://www.econlib.org/library/Marshall/marP24.html#Bk.IV,Ch.X>.
- [2] Porter M E. Clusters and the new economics of competition. Harvard Business Review, 1998, 76(6): 77-90.
- [3] Dieleman F M, Faludi A. Randstad, Rhine-Ruhr and Flemish diamond as one polynucleated macro-region?. Tijdschrift Voor Economische en Sociale Geografie, 1998, 89(3): 320-327.
- [4] van Wassenhove L N, Lebreton B, Letizia P. A paradigm shift: supply chain collaboration and competition in and between Europe's chemical clusters. Erasmus School of Economics, 2007.
- [5] UNEP. Environmental Management of Industrial Estates. United Nations Publication, ISBN: 92-807-1652-2 1997.
- [6] 李志群, 刘亚军, 刘培强. 开发区大有希望-上册-概论. 北京: 中国财政经济出版社, 2011: 3-36.
- [7] 国务院. 中共中央、国务院关于批转《沿海部分城市座谈会纪要》的通知. (1984-05-04) [2015-07-01]. http://news.xinhuanet.com/ziliao/2005-02/07/content_2558239.htm%3E%5B.
- [8] Yang D Y R, Wang H K. Dilemmas of local governance under the development zone fever in China: a case study of the Suzhou region. Urban

- Studies, 2008, 45(5/6): 1037-1054.
- [9] 皮黔生, 王恺. 走出孤岛-中国经济技术开发区概论. 北京: 三联书店, 2004: 1-17.
- [10] IUD 中国政务景气监测中心. 历经四年整顿 4813 家开发区撤并. 领导决策信息, 2006, (47): 30-31.
- [11] 何思. 2004: 重要宏观调控政策及其对经济的影响. (2005-03-03) [2015-07-28]. http://www.stats.gov.cn/ztlc/ztlx/gbjd/200503/t20050303_52605.html.
- [12] 田金平, 刘巍, 李星, 赖玢洁, 陈吕军. 中国生态工业园区发展模式研究. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(7): 60-66.
- [13] 工信部. 工业转型升级规划系列解读材料(一~二十八). [2015-07-25]. <http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11293832/n11294072/n11302465/14457365.html>
- [14] 国务院办公厅. 国务院关于促进国家级经济技术开发区转型升级创新发展的若干意见(国办发[2014]54号). 2014.
- [15] 环保部, 商务部, 科技部. 《关于印发《国家生态工业示范园区管理办法》的通知》(环发[2015]167号). 2015. [2016-03-15]. http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201512/t20151224_320098.htm
- [16] Chertow M R. Industrial symbiosis: literature and taxonomy. Annual Review of Energy and the Environment, 2000, 25(1): 313-337.
- [17] Shi H. Industrial ecology in China, part I. Journal of Industrial Ecology, 2002, 6(3/4): 7-11.
- [18] Shi H, Tian J P, Chen L J. China's quest for eco-industrial parks, Part I: history and distinctiveness. Journal of Industrial Ecology, 2012, 16(1): 8-10.
- [19] Shi H, Tian J P, Chen L J. China's quest for eco-industrial parks, part II: reflections on a decade of exploration. Journal of Industrial Ecology, 2012, 16(3): 290-292.
- [20] 中华人民共和国环境保护部. HJ274-2015 国家生态工业示范园区标准 (2015-12-01). [2016-03-20]. <http://bz.mep.gov.cn/bzwb/other/qt/201512/W020151229415317224209.pdf>
- [21] 《中国生态工业园区建设模式与创新》编委会. 中国生态工业园区建设模式与创新. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [22] Bai L, Qiao Q, Yao Y, Guo J, Xie M H. Insights on the development progress of National Demonstration eco-industrial parks in China. Journal of Cleaner Production, 2014, 70: 4-14.
- [23] Tian J P, Liu W, Lai B J, Li X, Chen L J. Study of the performance of eco-industrial park development in China. Journal of Cleaner Production, 2014, 64: 486-494.
- [24] 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(S2): 119-122.
- [25] Liu W, Tian J P, Chen L J, Lu W Y, Gao Y. Environmental performance analysis of eco-industrial parks in China: a data envelopment analysis approach. Journal of Industrial Ecology, 2015, 19(6): 1070-1081.
- [26] 赖玢洁, 田金平, 刘巍, 刘婷, 陈吕军. 中国生态工业园区发展的环境绩效指数构建方法. 生态学报, 2014, 34(22): 6745-6755.
- [27] Frosch R A, Gallopoulos N E. Strategies for manufacturing. Scientific American, 1989, 261(3): 144-152.
- [28] Ehrenfeld J, Gertler N. Industrial ecology in practice: the evolution of interdependence at Kalundborg. Journal of Industrial Ecology, 1997, 1(1): 67-79.
- [29] Graedel T E. On the concept of industrial ecology. Annual Review of Energy and the Environment, 1996, 21(1): 69-98.
- [30] Hardy C, Graedel T E. Industrial ecosystems as food webs. Journal of Industrial Ecology, 2002, 6(1): 29-38.
- [31] Heeres R R, Vermeulen W J V, de Walle F B. Eco-industrial park initiatives in the USA and the Netherlands: first lessons. Journal of Cleaner Production, 2004, 12(8/10): 985-995.
- [32] Costa I, Massard G, Agarwal A. Waste management policies for industrial symbiosis development: case studies in European countries. Journal of Cleaner Production, 2010, 18(8): 815-822.
- [33] Tessitore S, Daddi T, Iraldo F. Eco-industrial parks development and integrated management challenges: findings from Italy. Sustainability, 2015, 7(8): 10036-10051.
- [34] van Beers D, Bossilkov A, Corder G, van Berkel R. Industrial symbiosis in the Australian minerals industry: the cases of Kwinana and Gladstone. Journal of Industrial Ecology, 2007, 11(1): 55-72.
- [35] Van Berkel R, Fujita T, Hashimoto S, Geng Y. Industrial and urban symbiosis in Japan: analysis of the Eco-Town program 1997-2006. Journal of Environmental Management, 2009, 90(3): 1544-1556.
- [36] Park H S, Rene E R, Choi S M, Chiu A S F. Strategies for sustainable development of industrial park in Ulsan, South Korea-from spontaneous evolution to systematic expansion of industrial symbiosis. Journal of Environmental Management, 2008, 87(1): 1-13.
- [37] Yang P P J, Lay O B. Applying ecosystem concepts to the planning of industrial areas: a case study of Singapore's Jurong Island. Journal of Cleaner Production, 2004, 12(8/10): 1011-1023.
- [38] Bain A, Shenoy M, Ashton W, Chertow M. Industrial symbiosis and waste recovery in an Indian industrial area. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54(12): 1278-1287.
- [39] Veiga L B E, Magrini A. Eco-industrial park development in Rio de Janeiro, Brazil: a tool for sustainable development. Journal of Cleaner Production, 2009, 17(7): 653-661.

- [40] Jacobsen N B. Industrial symbiosis in Kalundborg, Denmark; a quantitative assessment of economic and environmental aspects. *Journal of Industrial Ecology*, 2006, 10(1/2): 239-255.
- [41] Gibbs D, Deutz P. Implementing industrial ecology? Planning for eco-industrial parks in the USA. *Geoforum*, 2005, 36(4): 452-464.
- [42] Jensen P D, Basson L, Hellowell E E, Bailey M R, Leach M. Quantifying 'geographic proximity': experiences from the United Kingdom's national industrial symbiosis programme. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, 55(7): 703-712.
- [43] Massard G, Jacquat O, Zürcher D. International survey on eco-innovation parks: learning from experiences on the spatial dimension of eco-innovation. Federal Office for the Environment FOEN, 2014.
- [44] Shi H, Chertow M, Song Y Y. Developing country experience with eco-industrial parks: a case study of the Tianjin economic-technological development area in China. *Journal of Cleaner Production*, 2010, 18(3): 191-199.
- [45] Zhu Q H, Lowe E A, Wei Y A, Barnes D. Industrial symbiosis in China: a case study of the Guitang Group. *Journal of Industrial Ecology*, 2007, 11(1): 31-42.
- [46] Tian J P, Guo Q P, Chen Y, Li X, Shi H, Chen L J. Study on industrial metabolism of carbon in a Chinese fine chemical industrial park. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(2): 1048-1056.
- [47] Tian J P, Shi H, Chen Y, Chen L J. Assessment of industrial metabolisms of sulfur in a Chinese fine chemical industrial park. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 32: 262-272.
- [48] Geng Y. The role of pricing on integrated water management at the industrial park level: a case of TEDA. *Water and Environment Journal*, 2005, 19(3): 256-263.
- [49] Yuan Z W, Jiang W L, Bi J. Cost-effectiveness of two operational models at industrial wastewater treatment plants in China: a case study in Shengze town, Suzhou City. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(10): 2038-2044.
- [50] Tian J P, Shi H, Li X, Chen L J. Measures and potentials of energy-saving in a Chinese fine chemical industrial park. *Energy*, 2012, 46(1): 459-470.
- [51] Starfelt F, Yan J Y. Case study of energy systems with gas turbine cogeneration technology for an eco-industrial park. *International Journal of Energy Research*, 2008, 32(12): 1128-1135.
- [52] Li W F, Cui Z J, Han F. Methods for assessing the energy-saving efficiency of industrial symbiosis in industrial parks. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(1): 275-285.
- [53] Geng Y, Zhu Q H, Haight M. Planning for integrated solid waste management at the industrial park level: a case of Tianjin, China. *Waste Management*, 2007, 27(1): 141-150.
- [54] Wang L M, Ni W D, Li Z. Emergy evaluation of combined heat and power plant eco-industrial park (CHP plant EIP). *Resources, Conservation and Recycling*, 2006, 48(1): 56-70.
- [55] Shang H, Li J B. Eco-efficiency assessment for the eco-industrial park based on the emergy analysis//Wu D D, ed. *Modeling Risk Management in Sustainable Construction*. Berlin Heidelberg: Springer, 2011: 229-235.
- [56] Liu W, Tian J P, Chen L J. Greenhouse gas emissions in China's eco-industrial parks: a case study of the Beijing economic technological development area. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 66, 384-391.
- [57] Liu L X, Zhang B, Bi J, Wei Q, Pan H. The greenhouse gas mitigation of industrial parks in China: a case study of Suzhou Industrial Park. *Energy Policy*, 2012, 46: 301-307.
- [58] Lu Y, Chen B, Feng K S, Hubacek K. Ecological network analysis for carbon metabolism of eco-industrial parks: a case study of a typical eco-industrial park in Beijing. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(12): 7254-7264.
- [59] Yu C, de Jong M, Dijkema G P J. Process analysis of eco-industrial park development-the case of Tianjin, China. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 64: 464-477.
- [60] Yu F, Han F, Cui Z J. Evolution of industrial symbiosis in an eco-industrial park in China. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 87: 339-347.
- [61] Boons F, Spekkink W, Mouzakitis Y. The dynamics of industrial symbiosis: a proposal for a conceptual framework based upon a comprehensive literature review. *Journal of Cleaner Production*, 2011, 19(9/10): 905-911.
- [62] Yu C, Davis C, Dijkema G P J. Understanding the evolution of industrial symbiosis research: a bibliometric and network analysis (1997—2012). *Journal of Industrial Ecology*, 2014, 18(2): 280-293.
- [63] Zhang Y, Zheng H M, Chen B, Su M R, Liu G Y. A review of industrial symbiosis research: theory and methodology. *Frontiers of Earth Science*, 2015, 9(1): 91-104.