

# 基于人地关系的中国工业园区绿色发展思考

吕一铮<sup>1</sup>, 田金平<sup>1,2\*</sup>, 陈吕军<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 清华大学生态文明研究中心, 北京 100084)

**【摘要】** 工业园区是中国乃至全球工业经济发展的重要空间载体。工业园区是我国产业发展的主阵地, 但对区域环境也形成了较大压力。科学调控工业园区人地关系, 推动园区绿色发展, 对于工业领域生态文明建设意义重大, 亟待深入研究。当前, 从人地关系视角入手, 多要素耦合的工业园区绿色发展研究仍较匮乏。本文提出了工业园区人地关系内涵及基本分析框架, 阐述了国内外关于工业园区人地关系相关研究的概况, 重点对工业园区能源、水、土地、环境等方面可持续调控典型研究进行了分析。本文对工业园区人地关系研究的主要难点进行探讨, 并提出进一步研究需重点关注的三个基本问题, 以期为推进园区绿色发展提供新视角。最后, 建议从系统工程角度综合分析园区经济、能源、水、土地、环境等关键子系统的分异特征及相互作用, 建立多目标、多属性、多要素协同的园区绿色发展路径优化调控方法, 支撑管理决策。

**【关键词】** 工业园区; 绿色发展; 人地关系; 中国

**【中图分类号】** X24

**【文献标识码】** A

**【文章编号】** 1674-6252 (2021) 02-0055-08

**【DOI】** 10.16868/j.cnki.1674-6252.2021.02.055

## 引言

工业园区是中国乃至全球工业经济发展重要的空间载体, 是一种既独特又普遍的经济社会空间格局, 其数量规模庞大, 对区域经济社会发展起着重要的作用; 园区也是一类独特的地理综合体, 是一类典型的微区域人地系统。从整体上认识工业园区人地系统的内涵, 以及其过去、现状和未来的趋势, 才能把握新时代园区发展变化的脉搏。中国的工业园区在空间意义上具有一定的地理空间独立性, 在经济意义上也是一个相对独立的经济体, 研究工业园区人地关系, 对于丰富不同区域尺度的人地关系研究具有重要科学意义。

在党的十九大报告提出的 2035 年美丽中国基本建成的战略目标指引下, 以中国工业园区为研究对象, 从能源、水、土地、环境等园区发展最核心的资源要素入手, 研究园区绿色发展的战略取向, 符合国民经济和社会发展的迫切需求, 具有重大现实意义和应用前景。“绿色发展, 就其要义来讲, 是要解决好人与自然和谐共生问题”<sup>[1]</sup>, 人与自然和谐共生是人地关系研究的根本内涵。中国杰出的地理学家吴传钧先生很早就指出“要正确认识人地关系”<sup>[2]</sup>, “着重研究人地系统人与自然的相互影响与反馈作用”<sup>[3]</sup>。“土

地利用是人与自然相关的核心”<sup>[4,5]</sup>, 土地是园区发展重要的载体。人地系统理论是实践中用于解决不同时空尺度的区域可持续发展问题的重要理论方法<sup>[6]</sup>。“充分认知‘不充分、不平衡’发展的人地系统表现与成因机理, 系统研究符合五大发展理念的人地关系调控原理”, 是新时代生态文明建设的重要科学支撑<sup>[7]</sup>。

本研究对园区绿色发展的研究现状与动态进行了文献综述, 在 Web of Science 和中国知网等学术平台进行关键词检索, 主题选择聚焦于工业园区的人地关系, 即园区经济活动和环境要素的相互作用及动态关系, 具体从园区土地、能源和水资源等方面对工业园区人地关系关键内容的研究现状进行分析。在文献分析的基础上, 识别出工业园区绿色发展领域研究的难点, 并提出待解决的关键科学问题和研究难点。

## 1 工业园区绿色发展的重要意义

工业园区建设是中国改革开放的成功实践, 对推动中国工业化进程、发展开放型经济发挥了重要作用。2018 年, 国家发展改革委等六部委公布 2018 年版《中国开发区审核公告目录》<sup>[8]</sup>, 全国共有 2543 家

**资助项目:** 国家自然科学基金项目 (41971267); 国家社会科学基金重大项目 (18ZDA046)。

**作者简介:** 吕一铮 (1996—), 男, 博士研究生, 研究方向为产业生态学、工业园区绿色发展, E-mail: lvyz19@mails.tsinghua.edu.cn。

**\* 责任作者:** 田金平 (1974—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为产业生态学、生态工业园区等, E-mail: tianjp@tsinghua.edu.cn。

开发区，其中包括 552 家国家级开发区和 1991 家省级开发区。东部沿海省份工业产值 50% 以上来自工业园区<sup>[9]</sup>。2017 年，219 家国家级经济技术开发区、156 家国家高新技术产业开发区这两类最主要的园区国内生产总值（GDP）分别占全国的 11% 和 11.5%<sup>[10,11]</sup>。2018 年，全国生态环境保护大会指出“要推动工业企业向园区聚集”，我国经济发展的重点仍在工业，而园区绿色发展则对工业的高质量发展起着举足轻重的作用。

园区在相对较小的地理空间聚集了大量工业企业，对周边乃至区域环境造成了巨大的压力，园区既是资源环境问题的制造者，也是解决这些问题的重要突破口<sup>[12,13]</sup>。因此，园区绿色发展已成为工业领域推进生态文明建设的重要抓手，是国民经济和社会发展的重大战略需求。近年来，中央政府出台的《关于全面加强生态环境保护坚决打好污染防治攻坚战实施意见》《打赢蓝天保卫战三年行动计划》《水污染防治行动计划》《工业绿色发展规划（2016—2020 年）》《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》《关于推进国家级经济技术开发区创新提升打造改革开放新高地的意见》等重要文件，均明确提出了关于园区绿色发展的指导意见。中央政府多个部门大力推进园区的绿色低碳循环发展<sup>[14]</sup>，各级地方政府积极响应落实，从政策、技术、资金等多方面加以支持与配合，工业园区绿色发展取得了显著成效。

## 2 工业园区人地关系内涵及分析框架

工业园区的人地关系调控是园区绿色发展的重要科学问题。园区尺度上，“人”主要体现为经济活动，“地”即园区的资源环境基础，主要表现为能源、水资源、土地资源、环境影响等。经济、能源、水、土地、环境构成了工业园区人地系统中最重要的子系统，各子系统之间存在着许多联系与作用（图 1）。能源、水、土地资源开发利用既对园区经济发展及其生态环境有直接作用，又对更大尺度的生态环境问题产生影响。工业园区人地关系的内涵就是系统认识园区“人”“地”各子系统的发展演变及相互作用的机制规律，实践中需要深入理解工业园区人地关系，进而科学设

计园区“人”“地”各子系统的协同关系，实现融合发展。工业园区人地关系是园区绿色发展的关键科学问题，是园区绿色发展的核心，工业园区人地关系研究的重点是识别各子系统之间的相互作用关系及人地关系协调发展的优化调控。针对工业园区这一类特殊的微区域人地系统开展综合研究，科学揭示能源—水—土地—环境等多要素协同的工业园区绿色发展战略取向，对于进入“不惑之年”的中国工业园区创新绿色发展、实现高质量跨越提供决策支撑，具有重要的意义。

## 3 国内外研究现状

### 3.1 工业园区人地关系研究现状文献分析

在 2018 年版《中国开发区审核公告目录》中，以“园区”或“开发区”进行检索，覆盖的园区数量占名录总数的 81%，因此可认为以这两个关键词进行检索可覆盖绝大部分该领域的中文研究文献；此外，“集聚区”在工业园区的相关文献中也有着较为广泛的使用。英文中，“industrial park/zone/area/cluster”是工业园区最常见的表达方式，因此用上述词组进行关键词检索能较好地覆盖该领域的英文研究文献。

首先，本文直接针对工业园区人地关系进行文献检索。在 CNKI 以“园区 or 开发区 or 集聚区 + 人地”进行标题和主题检索，同时在 Web of Science

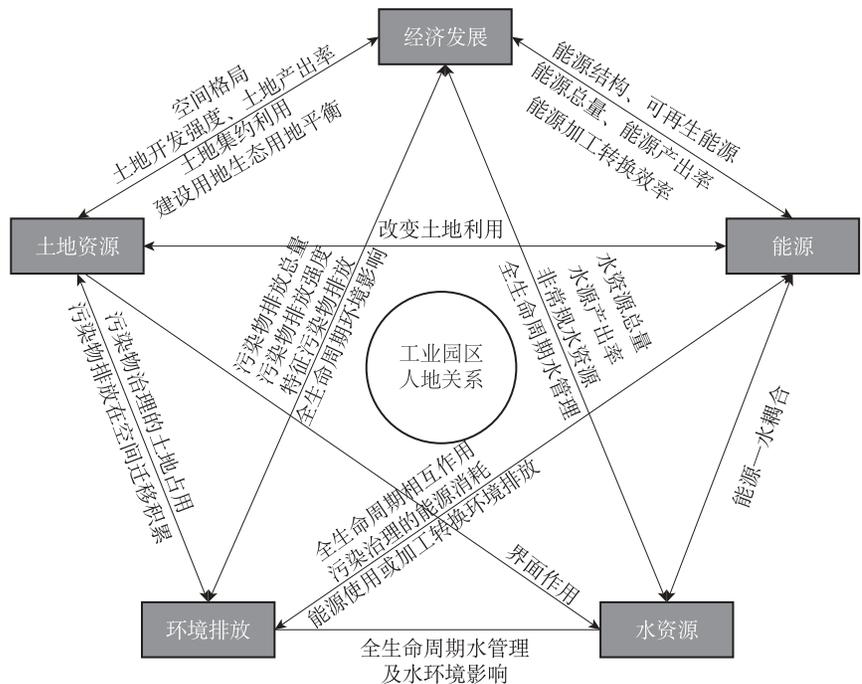


图1 园区经济、能源、水、土地、环境间相互作用关系示意

(WOS)以“industr\* + human environmental interaction or industr\*+man land”进行检索,均未检出相关论文。其次,从园区土地、能源和水资源等方面对工业园区人地关系关键内容的研究现状进行具体分析。

### 3.1.1 工业园区土地相关的研究概况

以“industr\*+land”在WOS进行标题检索,截至2019年12月(下同)共检出5篇文献,均为针对具体园区的案例研究,涉及土地利用规划、土地利用效率、园区选址等方面,其中Hu等<sup>[15]</sup>对某化工园区2014年和2017年土地利用规划的风险评价进行了研究;Huang等<sup>[16]</sup>基于2003—2008年上海电子企业布局及土地利用效率评价,对中国经济开发区建设对土地利用效率的提升效应进行了研究;Arabsheibani等<sup>[17]</sup>应用GIS和多准则排序评价了工业园区选址土地的适宜性;Wang等<sup>[18]</sup>研究了1993—2000年我国台湾地区北部两个毗邻工业园区因当地地下水开采活动出现的地势沉降情况;Potts Carr<sup>[19]</sup>以Choctaw工业园区为例,研究了应用工业生态学原理和方法构建生态工业园区以提高园区土地规划和利用水平。

在CNKI上,以“园区/开发区/集聚区+土地”为标题且来源于“SCI来源期刊、EI来源期刊、核心期刊、CSSCI、CSCD”进行2000—2019年的文献检索,检出265篇文献。这些文献主要发表于2008—2013年,被引高峰在2015年之后,关键词主要涉及土地集约利用、工业用地和资源利用等。分析关键词和摘要发现,绝大多数研究围绕“园区/开发区的土地(集约)利用(或土地利用效率)的评价(方法)”开展。

进一步分析引用频次高的论文及近5年来的论文,一些代表性的研究有:吴旭芬等<sup>[20]</sup>关于开发区土地集约利用问题及途径的探讨;龙花楼<sup>[21]</sup>关于开发区土地可持续利用系统的结构研究;张晓平等<sup>[22]</sup>关于开发区土地开发的区域效应及协同机制分析;张晓平等<sup>[23]</sup>关于中国开发区与城市空间结构演进及其动力机制的研究;张占录等<sup>[24]</sup>以国家级经济技术开发区为例进行了关于开发区土地扩张与经济增长关系的研究;彭浩等<sup>[25]</sup>关于上海市开发区土地集约利用的评价及主要影响因素研究;杨俊等<sup>[26]</sup>基于元胞自动机模型的土地利用变化模拟研究;范胜龙等<sup>[27]</sup>以福建省为例对不同经济发展水平地区开发区土地集约利用的影响因素的探讨等。相关文献分析发现,将产业发展、区域空间等要素结合,采用综合评价方法能更全面、科学地认识园区土地开发利用的区域差异、影响

土地集约利用的主要因素及相关政策建议,是园区土地相关研究的热点,但同时也发现这方面的研究视角仍较多针对土地单要素进行评价。

园区空间格局演变是工业园区人地关系的重要内容。曹姝君等<sup>[28]</sup>从制度空间的理论视角,对我国开发区的空间转型进行了研究。吴佳敏等<sup>[29]</sup>运用地理集中指数、标准差椭圆、核密度分析等方法,从地理空间、发展空间、产业空间三个方面分析了2009—2015年湖南省开发区空间格局的演变特征。杨锐等<sup>[30]</sup>以上海市开发区为例,研究了开发区与最近距离开发区之间的邻近性对开发区发展的影响。高超等<sup>[31]</sup>构建了覆盖98家国家级经济技术开发区和621家省级经济技术开发区基于地址信息的空间数据库,研究了1996—2013年东部沿海地区经济技术开发区的空间格局演变规律及产业集聚类型特征。丁悦等<sup>[32]</sup>运用变异系数和地理探测器方法,研究了2010年73个国家级经济技术开发区经济增长率空间分异,并识别出开发区内在因子主导向城市和区域性外在因子主导的转变趋势是经济增长率空间分异的核心影响因素。马丽等<sup>[33]</sup>分析了中国350个地级单元的经济环境耦合度和协调度,对中国经济与环境污染耦合度格局及与工业结构的关联进行了解析,指出“中国区域经济格局逐步走向以大都市群和人口产业集聚区为核心的多元化格局,经济与环境的耦合协调关系也逐步呈现复杂、多样的格局”,认为园区在此过程中起着重要的作用,但这种空间格局特征尚未被深入识别和充分体现。

### 3.1.2 工业园区能源相关的研究概况

在CNKI上,以“园区/开发区/集聚区+能源/能量”为标题进行与前述相似的文献检索,同时在WOS以“industr\*+energy”进行标题检索,分别检出87篇和21篇文献。分析CNKI文献的关键词及摘要发现,研究工作主要集中在两大类,一类是与碳排放相关的研究,另一类是与智慧能源或能源互联网相关的研究,这两个方面无疑是园区能源相关研究的重要方向和热点。WOS检出的文献研究重点也与此类似,分别为园区能源系统集成、优化节能,以及园区温室气体排放相关的研究。例如,朱旭等<sup>[34]</sup>通过统筹经济、环境等因素,提出了园区的综合能源系统规划方法和模型;周灿煌等<sup>[35]</sup>则根据园区能源和能源转换设备的多样性,提出了园区综合能源系统多目标优化设计方法。

清华大学环境学院在园区温室气体排放研究方面开展了大量的研究,从1~2家园区的能量流分析<sup>[36]</sup>、

碳代谢<sup>[37]</sup>、温室气体核算<sup>[38]</sup>入手,扩展到106家园区、213家园区乃至1600家园区基于能源基础设施的温室气体减排研究<sup>[39,40]</sup>,通过能源—水—材料耦合,刻画了中国工业园区温室气体的排放特征、主要减排途径及减排成本效益,阐明了中国工业园区基础设施存量特征及其资源环境影响。

### 3.1.3 工业园区水相关的研究概况

在CNKI上,以“园区/开发区/集聚区+水”为标题进行文献检索,同时在WOS以“industr\*+water”进行标题检索,分别检出65篇和37篇文章。经过分析CNKI检出文献的关键词及摘要发现,现有相关研究主题相对较分散,涉及的内容包括园区污水处理厂、污水深度处理技术、再生水、水资源管理(优化配置)、水资源承载力等方面,基本涵盖了从取水到用水、水处理、排水等主要环节。WOS检出文献从关键词及摘要分析显示,研究内容主要涉及园区可持续(或最优化)水管理、水污染控制、废水处理技术、(企业间)废水再循环(利用)、废水余热回收、新兴水污染物监测等方面。

针对园区环境问题或污染防治的研究非常丰富,几乎涵盖了环境污染的各个方面。园区环境污染防治的总体发展趋势是强调系统优化和从全生命周期角度解决问题。在2018年5月的全国生态环境保护大会上,习近平总书记为污染治理指出方向:“要从系统工程和全局角度寻求新的治理之道”“治理好水污染、保护好水环境,就需要全面统筹左右岸、上下游、陆上水下、地表地下、河流海洋、水生态水资源、污染防治与生态保护,达到系统治理的最佳效果”<sup>[41]</sup>。近年来,一些学者即从系统治理角度开展了工业园区的水系统研究。陈瑶等<sup>[42]</sup>在管理层面对化工园区水污染问题的成因进行了系统分析,并结合法律法规针对化工园区水污染防治政策提出政策建议。张龙等<sup>[43]</sup>采用系统优化理念,指出化工园区水污染控制技术 & 整治模式的核心在于特征有机污染物的控制,明确了企业和园区两个层面在水污染控制过程中的整治重点。Lyu等<sup>[44]</sup>以典型精细化工园区为对象,建立了污水处理全过程的成本核算模型,系统分析并揭示了园区水污染治理的成本及进一步实施总氮控制的成本,并提出了污水处理系统的优化模式。

清华大学环境学院与世界自然基金会合作推出了《工业园区水管理创新实施指南》<sup>[45,46]</sup>,遵循系统思考原理,应用生命周期理念,构建了由供(取)水、用水、废水处理、排放、污水再生回用、污泥处理处置

及资源化等与水管理相关的关键环节组成的全生命周期园区水管理创新格局。Hu等<sup>[47,48]</sup>构建了覆盖200余家国家级经济技术开发区的环境基础设施数据库,对园区集中式污水处理厂的发展演变、技术特征、污染物去除效率、温室气体排放,以及基于能源基础设施与环境基础设施之间的能源—水耦合的节能减排潜力进行了研究,丰富了园区可持续水管理研究;进而运用多准则决策模型优化工业园区水管理结构,揭示了从高速模式向高质量模式转变的路线图<sup>[49]</sup>。

能—水统筹,是工业园区推进绿色发展、打好污染防治攻坚战的重要抓手。Guo等<sup>[50]</sup>研究构建了209家国家级工业园区分品种用水和能耗清单,并基于生命周期方法揭示了园区直接和间接用水量与能耗,从而识别园区的水能耦合关系。

### 3.1.4 工业园区人地关系其他相关研究概况

以“园区/开发区/集聚区+系统”和“园区/开发区/集聚区+绩效评价”的组合进行标题和主题检索,进一步扩展可能与工业园区人地关系相关的研究检索,研读检出文献摘要发现仅有个别案例研究与之相关。例如,王月<sup>[51]</sup>以乌兰布和生态沙产业高新技术产业开发区为对象,应用系统动力学方法构建模型,分析园区资源、经济、环境和社会子系统,仿真模拟两类不同情景模式下园区的资源环境承载力变化,以揭示提升资源环境承载力的策略。王金永<sup>[52]</sup>以吉林丰满经济开发区为例,将园区分为社会经济、资源和环境三个子系统,运用VENSIM-PLE软件进行社会经济与生态环境系统动态仿真与情景分析,以评价规划实施对区域的环境影响。金钰<sup>[53]</sup>以天津经济技术开发区为例,将其划分为社会、经济、环境三大子模块,运用系统动力学方法构建了开发区循环经济系统的因果结构框架,提出了开发区构建循环经济系统的导向、战略规划和优化策略。以上文献为基于工业园区的多因素耦合研究,但是耦合研究的文献数量较少,更多的文献仍然聚焦于工业园区人地关系中单个因素的分析。

综合来看,目前针对工业园区人地关系的研究仍需要进一步深化。一是多针对个案或单一要素开展研究,基于大样本、高分辨、长时序及空间分析,中国工业园区能源、水、土地资源使用等的时空分异特征及园区独特的人地关系内涵及演变机制尚有待深入揭示。例如,当前针对长江经济带工业园区的污染防治研究主要关注点聚集在水污染防治,鲜有涉及其他要素<sup>[54]</sup>。二是工业园区人地关系中经济—能源—水—

土地—环境各子系统的相互作用的定量评价及调控在方法上尚待突破。前文综述表明,现有研究大多侧重双因素之间的影响,而针对多因素相互作用的影响评价尚未获得学界的充分关注。三是数据制约,园区在当前国民经济统计体系中不是单独的统计单元,高分辨、大样本数据或获取困难或样本间数据口径不统一,是研究中开展大样本分析面临的实际难点。

### 3.2 中国工业园区绿色发展主要任务与绩效评价

目前关于工业园区绿色发展尚无统一的定义,本文分析了近年来国家发布的《水污染防治行动计划》《工业绿色发展规划(2016—2020年)》《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》《关于推进国家级经济技术开发区创新提升打造改革开放新高地的意见》等关于园区绿色低碳发展的指导意见,并结合目前正在开展的生态工业园区建设、园区循环化改造、低碳工业园区、绿色园区等一系列园区绿色发展的具体实践,梳理出园区绿色发展的总体要求和重点任务或行动,主要包括以下方面:①完善能源利用环境基础设施,持续提高排放标准,实现废水废气超低排放,加强污染源头控制;②产业结构转型升级,打造绿色制造体系;③调整和优化能源结构,合理控制区域内能源消费总量,实施精细化能源管理;④实施资源环境要素总量和强度控制,推进能源资源全面节约,强化能源和水资源消耗、建设用地等总量和强度双控行动;⑤积极推动绿色建筑和绿色生态社区建设,促进产业发展与人居环境相和谐;⑥积极促进低碳转型发展,部分园区温室气体排放率先达峰;⑦完善风险防控和应急响应体系,提高区域环境应急管理能力和应急响应体系,提高区域环境应急管理能力和应急响应体系;⑧创新管理机制,设定环境准入要求,积极推行环境污染第三方治理。上述重点任务或行动基本涵盖了现阶段园区推进绿色发展内涵的应有之意和努力的方面<sup>[55]</sup>。

绿色发展绩效评价是园区绿色发展的重要内容之一。田金平等<sup>[14,55]</sup>在前期研究中对园区绿色发展评价进行了详细的文献综述,分析了不同研究者关于园区评价构建的指标体系和绿色发展指数方法,对指标进行分类,筛选出经济发展、资源能源、污染物排放、生态环境、环境管理五个方面应用频次较高的指标,可作为评价绿色发展的重要参考。

## 4 工业园区人地关系研究的关键问题与难点

当前,中国经济发展的重点仍在工业,工业发展重在园区。作为工业化和城镇化快速发展不可或缺的

载体,工业园区的绿色发展是中国经济发展和生态文明建设的重要组成部分。揭示工业园区人地关系的内涵,协同优化工业园区人地关系,是化解园区与环境的矛盾、推进园区绿色发展的必然选择。

本文认为,工业园区人地关系研究可为揭示园区绿色发展路径提供新的视角,提出进一步研究过程中需要解决的三个关键问题,具体阐述如下。

(1) 工业园区人地关系演变机制。工业园区是经济发展中生产布局的一类重要载体,也是一类独特的地理综合体。充分认识工业园区小尺度人地系统构成、人地系统物质、能量传递与转换的机理及相互作用的演变机制,对于深入理解园区经济活动与资源环境的相互作用,进而对工业园区人地系统的协调发展进行优化调控,对支撑园区绿色和可持续发展具有关键作用。为此,首先需要深刻认识中国工业园区的由来、从无到有的发展历程、现阶段园区的区域特征、开发强度及对地区经济社会发展的作用。其次剖析工业园区人地关系的内涵,综合认识园区小尺度人地系统的经济、资源环境多要素结构组成。进而使用精细的观测数据测度园区经济、资源环境多要素的时空演变特征及规律,基于GIS解析园区经济、能源、水、土地、环境系统的分异特征。最终运用格局—过程—服务—可持续性的研究框架,分析园区空间地理格局与经济发展过程、资源环境的相互作用,以全面揭示工业园区人地系统的形成过程、结构特点和发展趋向。

(2) 工业园区经济发展与能源、水、土地、环境子系统的互作机制。工业园区人地关系中,“人”的主导作用主要体现为经济活动,“地”主要表现为土地资源、能源、水资源和环境等要素系统,经济、能源、水、土地、环境是工业园区人地系统中最关键的子系统。工业园区人地关系的协调抑或矛盾,取决于园区经济的发展导向,园区经济发展与能源、水、土地、环境通过各种相互作用而彼此影响,呈非线性特征。定量掌握园区经济发展与能源、水、土地、环境子系统的互作机制,对于准确识别园区绿色发展的核心问题,对工业园区人地关系进行科学调控与优化尤为重要。

(3) 工业园区绿色发展多要素协同综合决策模型。通过调控工业园区人地关系,解决园区经济发展与资源能源、环境系统的矛盾,是支撑园区绿色发展的根本目的。园区的人地关系内涵、子系统相互作用定量关系及绿色发展目标建立后,如何实现基于经济、资源、能源、环境等多要素协同的工业园区人地关系调控综合决策亟待开展研究。

基于上述关键问题的思考, 作者认为, 从经济、能源、水、土地、环境等要素协同的视角, 深刻认识中国工业园区这一独特的、数量庞大的微区域人地系统, 从人地关系角度揭示园区的绿色发展路径, 需要重点开展以下方面研究:

①工业园区在不同发展阶段人地关系的内涵是什么? ②中国工业园区资源能源利用时空分异特征及影响因素是什么? ③如何定量揭示工业园区经济发展中能源、水、土地资源等子系统的相互作用? ④2035年, 中国工业园区绿色发展的战略取向和目标指标是什么? ⑤如何实施多要素协同的工业园区人地关系优化调控并提出园区绿色发展战略取向?

为回答好以上问题, 首先需深刻认识中国工业园区, 剖析工业园区人地关系的内涵, 进而解析园区经济、能源、水、土地、环境子系统的分异特征。在此基础上, 再识别园区五类子系统关键表征指标, 建立耦合模型, 定量化揭示工业园区人地关系子系统间的相互作用。最后, 构建工业园区人地协同多目标优化模型, 以经济发展作为因变量, 以能源、土地、水、环境等影响因素作为自变量。在预测面向2035年工业园区绿色发展战略目标的基础上, 设定工业园区人地系统稳定健康及资源环境要素总量和强度约束, 最小化园区发展不平衡、资源能源消耗总量、资源能源消耗强度、污染物排放总量、污染物排放强度、全生命周期环境影响、温室气体排放总量等约束条件<sup>[56]</sup>, 并通过模型的最优化求解来识别园区绿色发展关键措施需达到的要求。

## 5 结论与建议

综合上文内容, 本研究提出以下结论与建议:

(1) 工业园区的人地关系调控是园区绿色发展的重要科学问题。针对园区能源、水、土地资源、环境等子系统已有大量研究, 但从人地关系视角入手, 多要素耦合的综合研究仍很匮乏。本文分析了基于人地关系角度开展园区绿色发展研究的难点, 并提出了工业园区人地关系演变机制, 工业园区经济发展与能源、水、土地、环境子系统的互作机制和园区绿色发展多要素协同综合决策模型三个关键科学问题。

(2) 工业园区人地关系的研究需要从系统论角度着眼, 综合分析园区经济、能源、水、土地、环境等核心子系统的时空分异特征及其相互作用, 并建立多目标、多属性、多要素协同, 推进园区绿色发展的优化调控方法。

(3) 具体研究中, 可针对工业园区的物质能量代

谢、温室气体减排、水管理、土地资源利用、生态效率评价、生态化发展模式、规划设计等开展长期深入的研究。以发展历史最悠久、对国内众多园区发展模式有深远影响, 且数据积累较好的国家级经济技术开发区为主要对象, 构建基于GIS的园区经济能源—水—土地—环境等基础数据库, 以工业园区人地关系演变机制为核心, 综合解析园区经济发展中能源、水、土地资源利用等的时空特征、相互作用、生态效率等, 面向园区2035年绿色发展提出战略取向。

2019年, 国务院《关于推进国家级经济技术开发区创新提升打造改革开放新高地的意见》<sup>[57]</sup>提出“加强要素保障和资源集约利用, 加快推进园区绿色升级”。要素保障和资源集约利用涉及土地、能源、水、环境等多个因素, 这要求工业园区人地关系领域进一步对基于生产要素相互作用规律的体制机制开展研究。以工业园区人地关系为核心, 研究其绿色发展, 具有重大现实意义和应用前景, 并可进一步丰富不同区域尺度的人地关系研究, 丰富以人地关系为主线的区域可持续发展的理论体系和研究范式。特别地, 对工业园区土地、能源、水、环境这几个关键发展要素及其相互关系科学认识, 是进一步支撑绿色发展体制机制创新的重要基础。

## 参考文献

- [1] 习近平. 习近平在省部级主要领导干部学习贯彻党的十八届五中全会精神专题研讨班上的讲话 [EB/OL]. 2016. 人民网. [http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2021-01/11/c\\_1126970918.htm](http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2021-01/11/c_1126970918.htm).
- [2] 吴传钧. 人地关系地域系统的理论研究及调控 [J]. 云南师范大学学报(哲学社会科学版), 2008, 40(2): 1-3.
- [3] 樊杰. “人地关系地域系统”学术思想与经济地理学 [J]. 经济地理, 2008, 28(2): 177-183.
- [4] 陆大道, 郭来喜. 地理学的研究核心——人地关系地域系统——论吴传钧院士的地理学思想与学术贡献 [J]. 地理学报, 1998, 53(2): 97-105.
- [5] 傅伯杰. 新时代自然地理学发展的思考 [J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 1-7.
- [6] 方创琳. 中国人地关系研究的新进展与展望 [J]. 地理学报, 2004, 59(S1): 21-32.
- [7] 樊杰. 新时代“人地关系地域系统”研究刍议——兼议吴传钧先生的小事、大业 [J]. 经济地理, 2018, 38(4): 2-8.
- [8] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 中华人民共和国科学技术部, 中华人民共和国国土资源部, 等. 中国开发区审核公告目录(2018年版) [Z]. 2018.
- [9] 中华人民共和国工业和信息化部. 工业转型升级规划系列解读材料(十六) [R/OL]. (2012-02-14). <http://roll.sohu.com/20120214/n334693077.shtml> [10] 中华人民共和国商务

- 部. 2017年国家级经开区综合发展水平考核评价结果发布 [R/OL]. (2018-05-11). <http://www.mofcom.gov.cn/article/shangwubangzhu/201805/20180502742487.shtml>.
- [11] 中华人民共和国科学技术部. 2018.《国家高新区创新能力评价报告 2018》发布 [R/OL]. (2018-12-29). [http://www.most.gov.cn/kjbgz/201812/t20181229\\_144409.htm](http://www.most.gov.cn/kjbgz/201812/t20181229_144409.htm).
- [12] 田金平, 刘巍, 李星, 等. 中国生态工业园区发展模式研究 [J]. 中国人·资源与环境, 2012, 22(7): 60-66.
- [13] TIAN J P, LIU W, LAI B J, et al. Study of the performance of Eco-industrial Park development in China[J]. Journal of cleaner production, 2014, 64: 486-494.
- [14] 田金平, 刘巍, 臧娜, 等. 中国生态工业园区发展现状与展望 [J]. 生态学报, 2016, 32(22): 7323-7334.
- [15] HU X S, WU Z Z, HEDLUND F H, et al. Land-use planning risk estimates for a chemical industrial park in china-a longitudinal study[J]. Process safety progress, 2018, 37(2): 124-133.
- [16] HUANG Z J, HE C F, ZHU S J, et al. Do China's economic development zones improve land use efficiency? The effects of selection, factor accumulation and agglomeration[J]. Landscape and urban planning, 2017, 162: 145-156.
- [17] ARABSHEIBANI R, SADAT Y K, ABEDINI A. Land suitability assessment for locating industrial parks: a hybrid multi criteria decision-making approach using Geographical Information System[J]. Geographical research, 2016, 54(4): 446-460.
- [18] WAND C T, CHEN K S, HU J C, et al. Mapping land uplift and subsidence in the industrial parks in northern Taiwan by radar interferometry[J]. International journal of remote sensing, 2011, 32(21): 6527-6538.
- [19] CARR A J P. Choctaw Eco-Industrial Park: an ecological approach to industrial land-use planning and design[J]. Landscape and urban planning, 1998, 42(2-4): 239-257.
- [20] 吴旭芬, 孙军. 开发区土地集约利用的问题探讨 [J]. 中国土地科学, 2000, 14(2): 17-21.
- [21] 龙花楼. 开发区土地可持续利用系统的结构研究 [J]. 干旱区地理, 2001, 24(2): 172-176.
- [22] 张晓平, 陆大道. 开发区土地开发的区域效应及协同机制分析 [J]. 资源科学, 2002, 24(5): 32-38.
- [23] 张晓平, 刘卫东. 开发区与我国城市空间结构演进及其动力机制 [J]. 地理科学, 2003, 23(2): 142-149.
- [24] 张占录, 李永梁. 开发区土地扩张与经济增长关系研究——以国家级经济技术开发区为例 [J]. 中国土地科学, 2007, 21(6): 4-9.
- [25] 彭浩, 曾刚. 上海市开发区土地集约利用评价 [J]. 经济地理, 2009, 29(7): 1177-1181.
- [26] 杨俊, 解鹏, 席建超, 等. 基于元胞自动机模型的土地利用变化模拟——以大连经济技术开发区为例 [J]. 地理学报, 2015, 70(3): 461-475.
- [27] 范胜龙, 张莉, 曾在森, 等. 不同经济发展水平地区开发区土地集约利用的影响因素研究——以福建省为例 [J]. 中国土地科学, 2017, 31(6): 51-58.
- [28] 曹妹君, 罗小龙, 王春程. 开发区空间演进的制度解释 [J]. 城市问题, 2018(5): 79-84.
- [29] 吴佳敏, 唐承丽, 陈伟杨, 等. 湖南省开发区空间格局演变分析 [J]. 资源开发与市场, 2018, 34(12): 1637-1642.
- [30] 杨锐, 刘志彪. 邻近性促进开发区增长了吗? ——基于上海市级以上开发区的实证研究 [J]. 上海经济研究, 2015(8): 99-108.
- [31] 高超, 金凤君. 沿海地区经济技术开发区空间格局演化及产业特征 [J]. 地理学报, 2015, 70(2): 202-213.
- [32] 丁悦, 蔡建明, 任周鹏, 等. 基于地理探测器的国家级经济技术开发区经济增长率空间分异及影响因素 [J]. 地理科学进展, 2014, 33(5): 657-666.
- [33] 马丽, 金凤君, 刘毅. 中国经济与环境污染耦合度格局及工业结构解析 [J]. 地理学报, 2012, 67(10): 1299-1307.
- [34] 朱旭, 杨军, 刘源, 等. 新型园区综合能源系统规划方法 [J]. 可再生能源, 2018, 36(10): 1479-1485.
- [35] 周灿煌, 郑杰辉, 荆朝霞, 等. 面向园区微网的综合能源系统多目标优化设计 [J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1687-1696.
- [36] TIAN J P, SHI H, LI X, et al. Measures and potentials of energy-saving in a Chinese fine chemical industrial park[J]. Energy, 2012, 46(1): 459-470.
- [37] TIAN J P, GUO Q P, CHEN Y, et al. Study on industrial metabolism of carbon in a Chinese fine chemical industrial park[J]. Environmental science & technology, 2013, 47(2): 1048-1056.
- [38] LIU W, SANG J, CHEN L J, et al. Life cycle assessment of lead-acid batteries used in electric bicycles in China[J]. Journal of cleaner production, 2015, 108: 1149-1156.
- [39] GUO Y, TIAN J P, CHERTOW M, et al. Greenhouse gas mitigation in Chinese eco-industrial parks by targeting energy infrastructure: a vintage stock model[J]. Environmental science & technology, 2016, 50(20): 11403-11413.
- [40] GUO Y, TIAN J P, ZANG N, et al. The role of industrial parks in mitigating greenhouse gas emissions from China[J]. Environmental science & technology, 2018, 52(14): 7754-7762.
- [41] 习近平. 推动我国生态文明建设迈上新台阶 [EB/OL]. [2019-01-31]. 人民网. <http://politics.people.com.cn/n1/2019/0131/c1024-30603879.html>
- [42] 陈瑶, 辛志伟, 付军, 等. 基于新环境保护法要求下的化工园区水环境管理政策 [J]. 化工环保, 2017, 37(1): 110-115.
- [43] 张龙, 涂勇, 吴海锁, 等. 化工园区水污染控制技术集成及典型示范 [J]. 工业水处理, 2016, 36(4): 10-16.
- [44] LYU Y Z, YE H Y, ZHAO Z N, et al. Exploring the cost of wastewater treatment in a chemical industrial park: model development and application[J]. Resources, conservation and recycling, 2020, 155: 104663.
- [45] 世界自然基金会(WWF). 工业园区水管理创新实施指南 [EB/OL]. [2019-02-20]. <http://www.wwfchina.org/publication.php?page=4>. [46] 马晔, 田金平, 陈吕军. 工业园区水管理创新研究 [J]. 中国环境管理, 2019, 11(4): 59-66.
- [47] HU W Q, TIAN J P, ZANG N, et al. Study of the development and performance of centralized wastewater treatment plants in Chinese industrial parks[J]. Journal of cleaner production,

- 2019, 214: 939-951.
- [48] HU W Q, GUO Y, TIAN J P, et al. Eco-efficiency of centralized wastewater treatment plants in industrial parks: a slack-based data envelopment analysis[J]. Resources, conservation and recycling, 2019, 141: 176-186.
- [49] HU W Q, TIAN J P, CHEN L J. An industrial structure adjustment model to facilitate high-quality development of an eco-industrial park[J]. Science of the total environment, 2020, 766: 142502.
- [50] GUO Y, TIAN J P, CHEN L J. Water-energy nexus in China's industrial parks[J]. Resources, conservation and recycling, 2020, 153: 104551.
- [51] 王月. 基于系统动力学模型的乌兰布和沙产业园区资源环境承载力评价[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
- [52] 王金永. 基于系统动力学的区域规划环境影响评价方法研究——以吉林市丰满经济开发区为例[D]. 长春: 东北师范大学, 2008.
- [53] 金钰. 泰达开发区循环经济系统动力学分析[D]. 天津: 天津理工大学, 2006.
- [54] 王树堂, 陈坤, 田金平, 等. 长江经济带工业园区水污染防治问题与对策研究[J]. 环境保护, 2019, 47(12): 45-46.
- [55] 田金平, 臧娜, 许杨, 等. 国家级经济技术开发区绿色发展指数研究[J]. 生态学报, 2018, 38(19): 7082-7092.
- [56] 张玥, 乔琦, 姚扬, 等. 国家级经济技术开发区绿色发展绩效评估[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(6): 12-16.
- [57] 中华人民共和国国务院. 国务院关于推进国家级经济技术开发区创新提升打造改革开放新高地的意见[Z]. 2019.

## Facilitating Green Development of China's Industrial Parks from the Perspective of Human-Environment Interaction

LV Yizheng<sup>1</sup>, TIAN Jinping<sup>1,2\*</sup>, CHEN Lvjun<sup>1,2</sup>

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Center for Ecological Civilization, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Industrial park is a common landscape of economic development nationally and globally. Industrial parks are the main position of China's industrial development, but they have also created greater pressure on the regional environment. Thus, to scientifically regulate the human-environment interaction and to promote the green development of industrial parks are of great significance to the construction of ecological civilization in the industrial field, which urgently require in-depth research. At present, multi-element coupling research on the green development of industrial parks from the perspective of the human-environment interaction is still limited. In light of the background, this research puts forward the connotation and basic analysis framework of the human-environment interaction of industrial parks, and expounds the general situation of domestic and foreign research on the human-environment interaction of industrial parks, focusing on the analysis of the typical research on the sustainable regulation of land, energy, water and environment of the parks. The research discusses the main difficulties in the research on the human-environment interaction of industrial parks, and proposes three basic issues that need to be focused on for further study, in order to provide a new perspective for promoting the green development of industrial parks. Finally, it is recommended to comprehensively analyze the differentiation characteristics and interactions of the key subsystems including economy, energy, water, land and environment of industrial parks from the perspective of system engineering, and to establish an optimization and control method for the green development of the industrial parks by multi-objective, multi-attribute, multi-factor coordination, which could support management and decision-making.

**Keywords:** industrial park; green development; human-environment interaction; China