

# 中国工业园区生态化发展决策优化方法研究

徐峰<sup>1</sup>, 汪雅婷<sup>1</sup>, 李宪赢<sup>1</sup>, 赵雨秋<sup>1</sup>, 相楠<sup>2\*</sup>

(1. 北京化工大学经济管理学院, 北京 100029; 2. 北京工业大学经济与管理学院, 北京 100124)

**【摘要】** 工业是当前中国经济绿色转型升级的关键行业, 而工业园区作为工业集聚化发展的主要载体, 工业园区生态化发展是解决资源环境问题、实现经济可持续发展的有效途径。本文关注工业园区生态化发展的中长期发展战略和具体方案, 致力于通过仿真模拟的方法提出工业园区生态化发展的方向和优化路径, 实现研究方法的创新。研究以3E系统(经济—环境—能源)为基础, 综合分析工业园区经济发展与能源环境之间的耦合关系, 并结合动态投入产出模型和系统动力学模型构建生态化发展决策模型, 通过最优化动态模拟方法开展趋势预测和路径研究。通过辛集工业园区的实证和案例研究, 对其生态化发展路径进行深入研究, 验证了研究方法的科学性和可靠性, 能够为工业园区生态化发展提供实践指导。本文为工业园区生态化发展规划提供新的研究方法, 为制定合理有效的工业园区综合战略和实施路径提供科学依据。

**【关键词】** 工业园区; 生态化发展决策模型; 多目标规划; 3E系统; 动态仿真模拟

**【中图分类号】** X24

**【文章编号】** 1674-6252(2019)04-0052-07

**【文献标识码】** A

**【DOI】** 10.16868/j.cnki.1674-6252.2019.04.052

## 引言

党的十八届三中全会首次提出了“生态文明”概念, 提出要坚持绿色发展, 必须坚持节约资源和保护环境的基本国策, 加快建设资源节约型、环境友好型社会, 形成人与自然和谐发展的现代化建设新格局。当前我国经济正处于转型升级的关键时期, 而工业园区作为我国经济发展重要的载体, 正发挥着重要的作用。2016年国家级的园区经济总量达到17万亿, 占当年全国国民生产总值(GDP)的23%, 各级各类工业园区经济总量占全国GDP的60%以上, 工业园区已成为我国经济发展的重要形式和主要力量<sup>[1]</sup>。但是, 随着工业经济持续高速发展和工业化进程不断深入, 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。资源环境等外部压力和自身发展内在制约的日益显现, 使得工业园区发展逐渐进入瓶颈期。推进工业园区生态化发展是经济高速发展过程中解决资源环境问题、促进园区可持续发展的有效途径。

河北辛集市是国家命名的“中国皮革皮衣之都”, 是全国最大的皮革服装、皮革生产基地之一。辛集工业园区在发展过程中逐渐形成了以皮革、化工、钢铁机械、农产品加工为主的工业格局, 且以皮革行业为主导。在高污染、高能耗行业发展的背景下, 辛集工业园区的经济发展与环境保护之间的矛盾日益突出。2014年辛集监控断面水质达标率仅为66.7%, 水体为劣V类且水质有恶化趋势。空气质量同样日趋恶化, 城市空气质量优良天数百分比由

2009年的87.9%降至2014年的13.4%, 2014年全年PM<sub>2.5</sub>日均超标率82%。面对如此严峻的环境问题, 辛集工业园区亟需开展生态化发展, 以污染物减排为抓手, 以治理水和大气污染为重点, 以产业结构优化为核心, 在积极推动经济发展的同时, 全力解决环境污染和资源消耗问题。以皮革行业为主导的辛集工业园区具有独特的园区特征, 因此本文选择该工业园区作为案例, 开展实证研究, 以期能对该工业园区的生态化建设和可持续发展提供方向和对策。

## 1 文献综述

工业园区评价作为推进可持续发展的重要政策工具, 具有导向、激励、鉴定、预测等功能, 有利于传播生态化发展思想, 引导工业园区生态化建设, 促进循环经济发展, 因此开展工业园区评价研究具有非常重要的意义。随着大力推进工业园区生态化建设与发展, 当前有许多学者开展了工业园区相关评价研究。目前, 针对工业园区发展现状分析<sup>[2]</sup>和绩效评价的研究较多, 绝大多数研究采用数据包络分析、层次分析法、模糊综合评价法等定量分析方法集中于分析发展现状以及存在的问题, 并借鉴国际先进工业园区的发展模式进行研究, 提出了促进中国工业园区生态化建设的模式<sup>[3, 4]</sup>。近几年, 部分研究开始关注工业园区的中长期发展战略取向, 开展趋势预测和路径研究。然而大多数研究基本上通过定性分析评价发展趋势以及发展路径<sup>[5]</sup>, 这些研究缺乏对工业园区具体特征的考虑, 提出的建

**资助项目:** 北京化工大学“青年英才百人计划”项目; 国家自然科学基金青年项目“华北工业城市经济转型与生态环境的耦合机理及优化路径研究”(41701635); 北京市优秀人才培养资助青年骨干个人项目“基于资源环境约束的北京现代制造业升级多目标优化研究”(2017000020124G187)。

**作者简介:** 徐峰(1979—), 男, 副教授, 博士, 主要从事的研究领域为环境经济学, E-mail: xufeng@mail.buct.edu.cn。

**\* 责任作者:** 相楠(1986—), 女, 副教授, 博士, 主要从事的研究领域为应用经济学, E-mail: xiangnan@bjut.edu.cn。

议不具有针对性。虽然有学者已经开始采用数理模型<sup>[6]</sup>、投入产出模型等定量分析方法,但是总体来讲相关研究仍然不足,尤其是采用动态仿真模拟方法系统规划工业园区发展目标和实施方案,探究工业园区生态化发展优化路径的研究方法最为缺乏。常用的工业园区发展趋势与路径分析的定量分析方法有系统动力学模型与投入产出模型。基于系统动力学理论与方法,以反馈控制理论为基础,建立系统动态模型,借助计算机进行仿真试验<sup>[7]</sup>。基于生态系统演化的动力学方法通过优化系统功能能较为真实的模拟各种资源循环利用状况、社会经济发展趋势、自然环境和和谐发展态势,以达到最终模拟园区生态发展能力变化趋势的目的<sup>[8,9]</sup>。

投入产出方法亦为资源环境与生态方面重要的研究工具,生态系统模型与经济系统模型的结合已成为当前环境研究的新领域<sup>[10]</sup>。投入产出模型相较于其他经济模型来说,在宏观政策和微观技术的模型链接上更具有灵活性,也能够更好地反映区域的经济特征和产业特征<sup>[11,12]</sup>。

综上所述,当前关于工业园区生态化发展的研究仍存在以下待解决问题:①缺乏探讨工业园区经济与资源环境之间的相互作用关系和耦合机理,尤其是对园区能源循环和物质循环过程与社会经济之间的相关性和系统关系的刻画不足,难以从根本上找出制约工业园区生态化发展的原因和作用机理;②对工业园区发展潜力和发展路径的研究仍不充分,尤其是利用多学科和多方法交叉的研究不足,难以从整体、系统的角度提出工业园区生态化发展的中长期目标和政策优化路径。

针对上述问题,本研究预期在工业园区生态化发展理论和方法上进行拓展和创新,对以下关键问题展开研究:①基于系统动力学方法刻画工业园区的能源循环和资源循环的物质流以及与社会经济相关的价值流,探寻工业园区生态化发展的经济—环境—能源耦合机理;②结合耦合机理和动态投入产出理论,构建工业园区生态化发展决策模型,探究工业园区系统内部作用机理及其资源环境效应,为制定工业园区生态化发展中长期发展目标、探寻园区绿色可持续发展的优化路径提供决策支撑。

基于本研究构建的工业园区生态化发展决策模型,选择河北省辛集工业园区作

为案例,开展实证分析研究,定量分析具体环境政策实施后产生的效果,从而综合评价辛集工业园区未来发展趋势与优化路径,为推进工业园区生态化发展管理与决策提供科学的研究方法。

## 2 工业园区经济—环境—能源的耦合机理研究

本研究采用系统动力学方法揭示工业园区经济发展与资源环境系统的相互作用关系和耦合机理,为构建工业园区生态化发展决策模型提供基础。

### 2.1 工业园区经济系统的作用机理

工业园区经济系统的作用机理,揭示经济系统内部各主体之间的关联和相互作用关系。工业园区经济系统包括经济生产行为和社会消费行为。针对园区生产行为,本文研究了园区经济系统内部各主体之间在生产创造收入、收入导致需求、需求导致生产的经济循环过程中的价值流动规律、相互关联和作用的关系。

### 2.2 工业园区环境—能源系统的作用机理

能源系统和环境系统的作用机理相似,均与社会经济活动有密切相关。经济系统中的生产与生活活动中涉及资源和能源的供给—消耗—循环利用过程,为工业园区能源系统的内部作用机理。经济生产行为和社会消费行为所产生的污染物质(包括水污染物质、大气污染物质、温室效应气体、废弃物等)的流动,包括环境污染物质的产生—

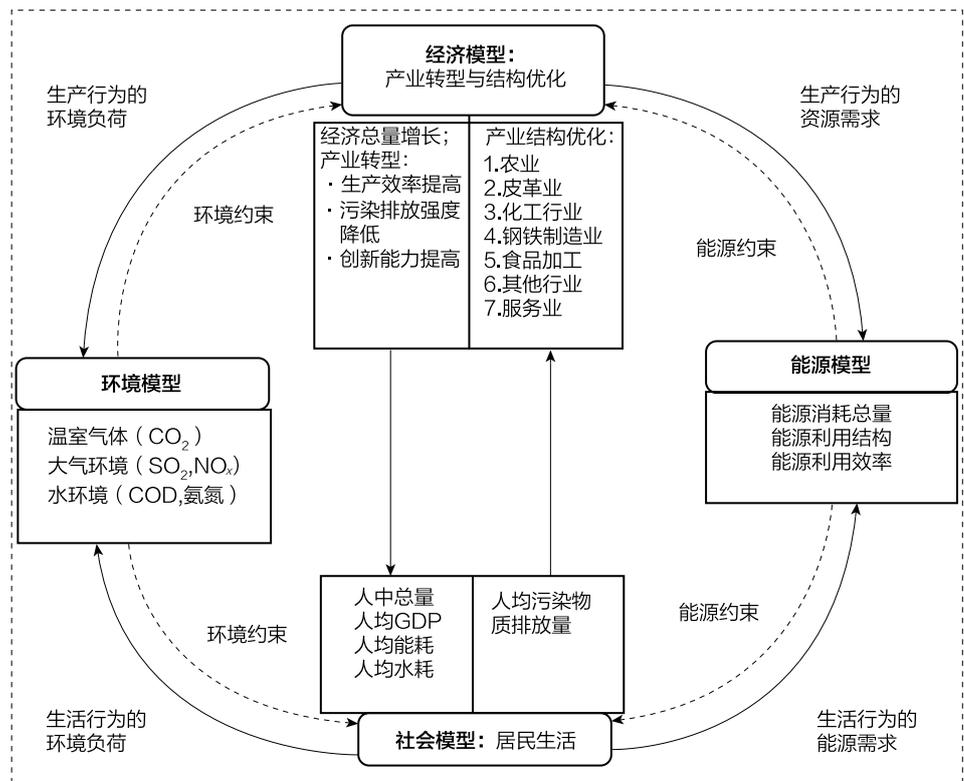


图1 工业园区经济—环境—能源系统的耦合机理框架

处理—排放过程，为环境系统的内部作用机理。

### 2.3 工业园区经济—环境—能源系统的交互作用机理

以工业园区的生产行为为核心，本文总结了园区经济—环境—能源系统的相互作用和协调发展的耦合机理。图1概念模型概括了工业园区经济—环境—能源系统中的物质、能源和价值流动机理。工业园区社会经济活动以工业生产行为为主，工业产业之间、以及工业产业与其他产业之间遵循投入产出价值流动平衡。社会经济活动需要资源、能源投入使用，随着资源能源低效利用导致污染物、废弃物的产生。能源与环境系统阐明资源供给、消费、废弃物处理和再利用为资源的物质流；能源供给、消费和大气污染物质的排放为能源流和物质流。

## 3 工业园区生态化发展决策模型构建

本文基于上述工业园区经济—环境—能源的耦合机理研究，以动态投入产出模型为经济模型基础，结合系统动力学模型在投入产出模型基础上拓展资源和环境模块，构建工业园区生态化发展决策模型，此模型包括三个子模型，即社会经济模型、环境模型和能源模型。生态化发展决策模型构建在综合把握经济活动中的价值流、物质流和能源流的基础上，利用多目标优化的规划方法，动态仿真模拟经济环境约束下工业园区生态化发展的可行性以及实施路径等。

### 3.1 目标函数

目标函数设为地区总产值（GRP）的最大化，模拟期为  $t$  期，2013年为基准年，预测至2020年。下文中的内生变量简称内生，外生变量简称外生。

$$\text{Max} \sum_t \frac{1}{(1+\rho)^{t-1}} \text{GRP}(t)$$

$$\text{GRP}(t) = \sum_{i=1}^7 v_i \cdot X_i(t)$$

式中， $\text{GRP}(t)$  为工业园区  $t$  年的地区生产总值（内生）； $X_i(t)$  为工业园区  $t$  年  $i$  行业的总产值（内生），其中， $i$  是本研究案例所采用的7个行业（ $i=1$ ：农业； $i=2$ ：皮革业； $i=3$ ：化工行业； $i=4$ ：钢铁制造业； $i=5$ ：农副产品加工业； $i=6$ ：其他工业； $i=7$ ：服务业）； $v_i$  为  $i$  行业的附加价值率（外生）； $\rho$  为社会折现率，本研究引用每年社会折现率为0.05的系数进行测算（外生）。

### 3.2 社会经济模型

本模型以投入产出模型中的产出平衡关系为基础，各行业发展受到其他行业的制约，因此通过投入产出模型表现各行业的发展趋势。

$$X_i(t) \geq A_{ii} \cdot X_i(t) + C_i(t) + I_i(t) + E_i(t) + T_i(t)$$

式中， $A_{ii}$  为直接消耗系数（外生）； $C_i(t)$  为  $t$  年最终

消费总额的列矩阵（内生）； $I_i(t)$  为  $t$  年资本形成总额的列矩阵（内生）； $E_i(t)$  为  $t$  年净出口总额的列矩阵（内生）； $T_i(t)$  为  $t$  年省域间调动总额的列矩阵（内生）。

### 3.3 环境模型

本研究基于辛集市“十三五”规划，以控制水污染物、大气污染物质和二氧化碳排放量为提升环境质量的主要指标。

$$\text{pollutantds}^p(t) \leq \text{target\_pollutant}^p(t)$$

式中，控制排放污染物质为  $p=1$ ：COD； $p=2$ ： $\text{NH}_3\text{-N}$ ； $p=3$ ： $\text{SO}_2$ ； $p=4$ ： $\text{NO}_x$ ； $p=5$ ： $\text{CO}_2$ 。

#### 3.3.1 水环境模型

辛集市水资源主要包括地下水、境外调水（南水北调）和再生水等3种，利用于产业生产和居民生活。

$$WDT(t) \leq WST(t)$$

$$WST(t) = GW(t) + TW(t) + RW(t)$$

$$WDT(t) = IWDT(t) + RWDT(t)$$

式中， $WDT(t)$  为  $t$  年水资源需求总量（内生）； $WST(t)$  为  $t$  年水资源供给总量（内生）； $GW(t)$  为  $t$  年地下水供给总量（内生）； $TW(t)$  为  $t$  年境外调水供给总量（内生）； $RW(t)$  为  $t$  年再生水供给总量（内生）； $IWDT(t)$  为  $t$  年产业用水总量（内生）； $RWDT(t)$  为  $t$  年居民用水总量（内生）。

产业用水总量等于各产业用水量之和。各产业用水量是由产业用水强度（单位产值工业用水量）和生产产值决定。

$$IWDT(t) = \sum_{i=1}^7 wdm_i \cdot X_i(t)$$

式中， $wdm_i$  为  $i$  产业工业用水强度（外生）。

产业生产活动（除第一产业）和城镇居民生活活动产生的污水通过市政管道输送到污水处理厂进行集中处理后向江河排放。第一产业生产活动和大部分农村居民生活活动过程中产生的污水未经处理直排。

$$IWP(t) = \sum_{i=1}^7 wpi_i^p \cdot X_i(t)$$

$$HWP(t) = \sum_{h=1}^2 wpi_h^p \cdot Z_h(t)$$

式中， $IWP(t)$  为  $t$  年各产业生产过程中产生的污染物质量（内生）； $HWP(t)$  为  $t$  年居民生活产生的污染物质量（内生）； $wpi_i^p$  为  $i$  产业  $p$  类水污染物排放强度（外生）； $wpi_h^p$  为  $h$  类人口  $p$  类水污染物排放强度（外生）； $Z_h(t)$  为人口（内生）， $h=1$  为城镇居民， $h=2$  为农村居民。

#### 3.3.2 大气环境模型

(1) 大气污染物质（ $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ ）排放：各产业生产过程以及热电厂运行过程中排放大气污染物质。

$$P^{ap}(t) = PI^{ap}(t) + PPS^{ap}(t)$$

$$PI^{ap}(t) = \sum_{i=1}^7 eapi_i^{ap} \cdot X_i(t)$$

$$PPS^{ap}(t) = eapps^{ap} \cdot QH(t)$$

式中,  $ap=1$  为  $SO_2$ ;  $ap=2$  为  $NO_x$ ;  $P^{ap}(t)$  为  $t$  年  $ap$  大气污染物排放总量 (内生);  $PI^{ap}(t)$  为  $t$  年各产业大气污染物排放量 (内生);  $PPS^{ap}(t)$  为  $t$  年热电厂大气污染物排放量 (内生);  $eapi_i^{ap}$  为  $i$  产业  $ap$  大气污染物排放强度 (外生);  $eapps^{ap}$  为热电厂单位发热量  $ap$  大气污染物排放强度 (外生);  $QH(t)$  为  $t$  年热电厂发热总量 (内生)。

(2) 二氧化碳排放: 各产业生产过程、居民生活活动和热电厂发热过程中使用电力、天然气、煤炭等能源将排放二氧化碳。

$$T_{CO_2}(t) = TI_{CO_2}(t) + TH_{CO_2}(t) + TThP_{CO_2}(t)$$

$$TI_{CO_2}(t) = \sum_{e=1}^5 e_{CO_2}^e \cdot ERI^e(t)$$

$$TH_{CO_2}(t) = \sum_{e=1}^5 e_{CO_2}^e \cdot ERH^e(t)$$

$$TThP_{CO_2}(t) = \sum_{e=1}^5 e_{CO_2}^e \cdot ERThP^e(t)$$

式中:  $e=1$  为煤炭;  $e=2$  为天然气;  $e=3$  为电力;  $e=4$  为热电发热;  $e=5$  为再生能源;  $T_{CO_2}(t)$  为  $t$  期二氧化碳排放总量 (内生);  $TI_{CO_2}(t)$  为  $t$  期产业生产活动中排放的二氧化碳排放总量 (内生);  $TH_{CO_2}(t)$  为  $t$  期居民生活活动中排放的二氧化碳排放总量 (内生);  $TThP_{CO_2}(t)$  为  $t$  期热电厂发热过程中排放的二氧化碳量 (内生);  $ERI^e(t)$  为  $t$  期各产业  $e$  能源使用量 (内生);  $ERH^e(t)$  为  $t$  期居民  $e$  能源使用量 (内生);  $ERThP^e(t)$  为  $t$  期热电厂  $e$  能源使用量 (内生);  $e_{CO_2}^e$  为  $e$  能源二氧化碳排放强度 (外生)。

### 3.4 能源模型

能源结构以煤炭、天然气、电力为主, 热电发热、再生能源 (生物质、太阳能等) 为补充。为实现综合能耗降低目标, 本研究提出提高能源效率、加强可再生资源的使用等措施。

$$TES(t) \geq TEC(t)$$

$$TES(t) = \sum_{e=1}^5 eer^e \cdot ER^e(t)$$

$$TECI(t) = \sum_{e=1}^5 eer^e \cdot ERI^e(t)$$

$$TECH(t) = \sum_{e=1}^5 eer^e \cdot ERH^e(t)$$

$$TECThP(t) = \sum_{e=1}^5 eer^e \cdot ERThP^e(t)$$

式中:  $TES(t)$  为  $t$  期综合能源供给量 (内生);

$TEC(t)$  为  $t$  期综合能源消耗量 (内生);  $TECI(t)$  为  $t$  期产业综合能源消耗量 (内生);  $TECH(t)$  为  $t$  期居民生活综合能源消耗量 (内生);  $TECThP(t)$  为  $t$  期发电厂综合能耗消耗量 (内生);  $ER^e(t)$  为  $t$  年  $e$  能源消耗量 (内生);  $eer^e$  为  $e$  能源标准煤转化系数 (外生)。

以上为本研究所构建的工业园区生态化发展决策模型的主要公式, 基于此模型采用交互式的线性和通用优化求解器 (Linear Interactive and General Optimizer, LINGO) 作为实验手段实现动态仿真模拟。LINGO 软件能够对本研究所构建的投入产出模型和经济—环境—能源系统模型进行编程, 建立动态的仿真模型, 通过计算机实验来获得对系统未来行为的模拟和预测, 结合多目标优化方法, 得到最优的发展路径和实施方案。

## 4 生态化发展情景分析

基于研究所构建的工业园区生态化发展决策模型, 本研究以辛集工业园区 2013 年数据为基准数据, 进行模型的实证分析。案例预测辛集工业园区 2014—2020 年的经济环境发展趋势。为了验证模型的有效性, 本研究首先对模型进行敏感度检验, 利用 2013—2014 年的实际数据与模型模拟实验结果进行比较, 经济、环境、能源各项指标数据误差范围在 5% 以内, 从而确定本研究模型的合理有效性。

生态化发展情景分析致力于确定辛集工业园区可持续发展潜力, 以及在此基础上的环境和社会经济影响, 提出具体的政策建议和实施方案。情景设计在掌握了当前实际发展状况后进行改进, 引入多种环境污染整治项目, 包括水处理设施升级改造、污水处理厂建设、老城区雨污分流改造、农村污水处理设施建设、热电厂升级改造、工业以及生活垃圾处理等; 并且依据辛集工业园区环境保护规划指标制定各种环境污染物 (COD、氨氮、二氧化硫、氮氧化物) 的减排目标。

### 4.1 辛集工业园区经济发展趋势

图 2 表示辛集工业园区 2013—2020 年经济发展变化趋势。通过模拟结果可知, 辛集工业园区 GRP 在 2016 年之后可保持 7% 以上的增长率, 由于 2014 年和 2015 年存在环境污染整治项目补贴和技术限制等原因, 经济发展受到了一定的限制, 其增长率均未达到 7%, 分别为 4.1% 和 5.0%。总体来说, 辛集工业园区 GRP 将会实现持续增长, 并保持较高的增长水平。

与辛集工业园区 GRP 总量的稳定增长率相比, 产值总量和产业结构发生较大变化。图 3 和图 4 分别表示 2013—2020 年各行业产值和产值比重的变化趋势。农林牧渔业、化工业、钢铁制造业和农副产品加工业从 2013—2020 年产值比重均出现了下降。农林牧渔业比重由 2013 年的 8% 下降到 6%, 钢铁制造业比重由 2013 年的 10% 下降到 7%, 化工业比重由 2013 年的 4% 下降到 2%, 农副产品加工业比重

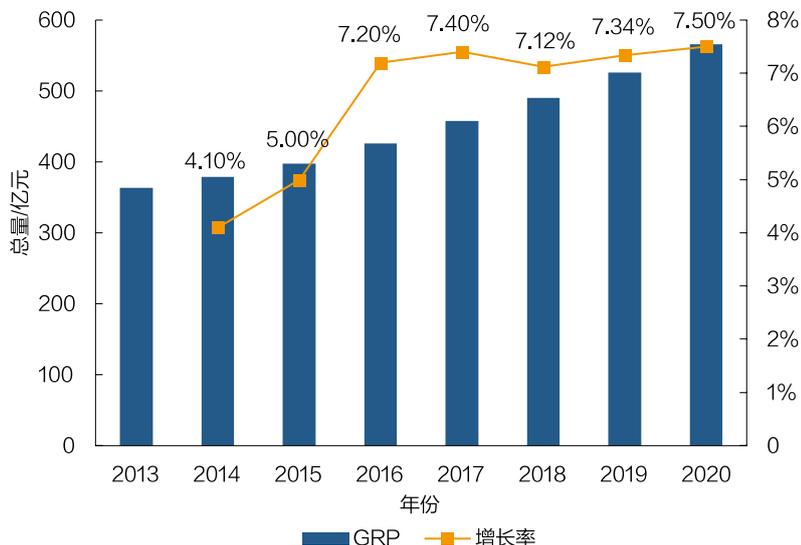


图2 2013—2020年GRP总量变化趋势预测

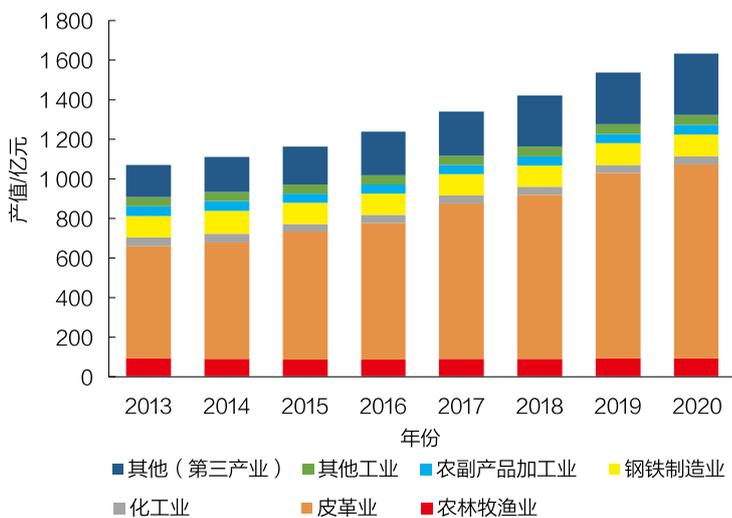


图3 2013—2020年产值变化趋势预测

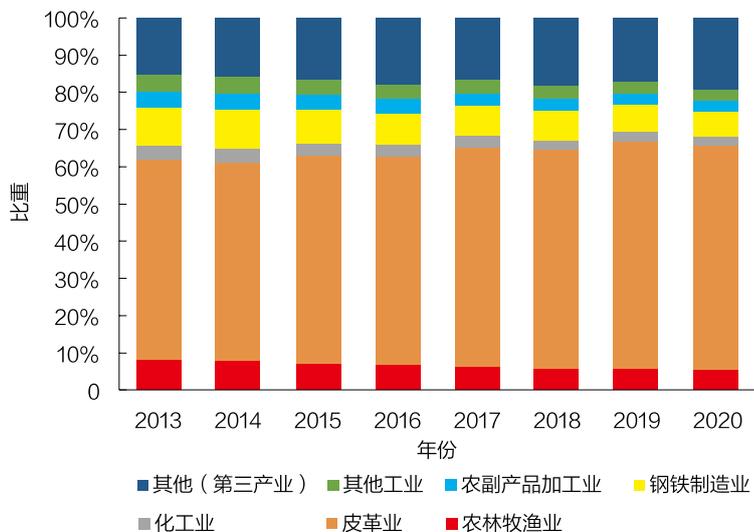


图4 2013—2020年产值比重变化趋势预测

由2013年的5%下降到3%，但总产值相对增加。皮革业、其他工业和第三产业产值比重呈现了增加趋势，其中皮革业和第三产业的增长幅度较大，无论是产值还是比重都发生了较大的提高，两个行业所占比重达到总产值的80%。这样的发展趋势符合辛集工业园区经济发展规划。

#### 4.2 辛集工业园区环境改善趋势

动态模拟实验得到辛集工业园区2013—2020年的各类环境污染物排放量和排放强度的变化趋势。污染物排放强度是污染物排放量与产值的比值，表示单位产值所排放的污染物。污染物排放强度在数据可取的情况下，可以由经济水平和环境水平计算得出，反映直接和间接污染物排放的效率。环境污染物排放强度的降低并不能完全反映环境改善的情况，因此本研究还考虑了对环境污染物排放总量的控制，共同反映环境的改善情况。

图5可以看出，四类环境污染物排放强度的变化程度和发展趋势均呈现逐年下降的趋势，并且2020年能达到各类环境污染物排放量与2013年排放量相比减少10%的环境污染物减排目标，说明了通过实施本研究提出的环境污染整治措施，能在实现经济总量持续增加的同时，有效提高各种环境污染物排放效率。

尽管2013—2020年四类环境污染物的排放强度逐年减低，然而图6显示四类环境污染物的排放总量在2015年后基本保持不变，在当前经济发展的目标之下，污染物排放总量难以下降。

基于案例中采用的促进环境—经济的激励措施，模拟实验表明产业结构优化和技术引进提升能够促进辛集工业园区经济发展，同时有效提升环境效率，促进生态化建设。辛集工业园区污染物排放分别达到并优于2015—2017年和2018—2020年的自身规划目标，并且依据提案政策发展，辛集工业园区GRP将实现年均6.4%的增速，并于2020年达到地区生产总值521亿元的目标。但需要注意的是，为保持经济发展，环境效率可有效提升，然而污染物排放总量较难得到控制。

#### 5 结论与建议

通过实证分析，本研究所构建的工业园

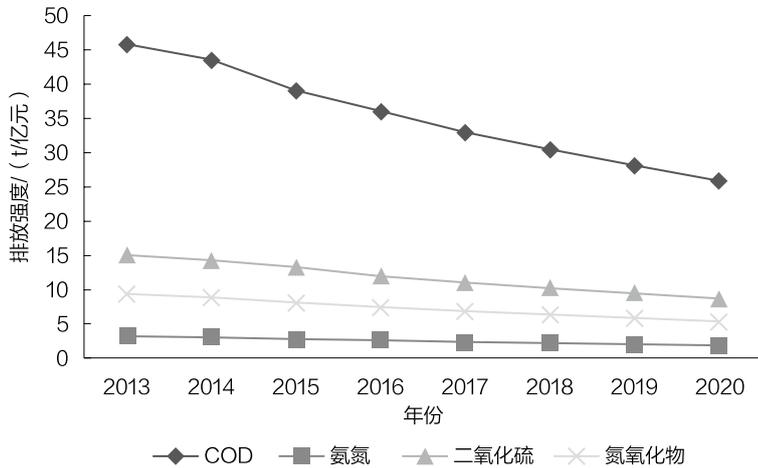


图5 2013—2020年各类污染物排放强度变化趋势预测

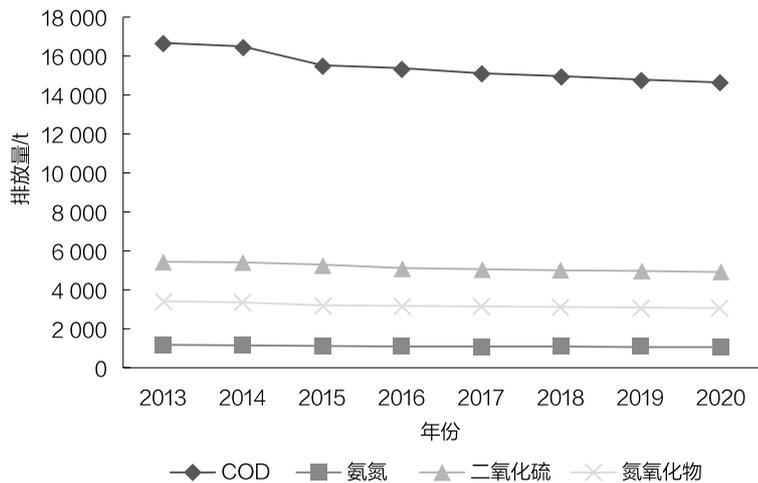


图6 2013—2020年各类污染物排放总量变化趋势预测

区生态化发展决策模型通过敏感性检验验证了其科学可靠性。通过2013—2020年辛集工业园区的经济发展和环境状况的仿真模拟结果可以看出：

首先，产业结构调整，尤其是从高耗能、高污染的行业进行总量控制和结构改善，对于促进经济增长和环境保护的双重发展目标均衡具有关键作用。从辛集工业园区产值趋势预测可知，除皮革业和其他工业之外的产业的比重会得到减缩，高耗水量和高污染的行业将会被污染排放强度相对小的产业所替代。农业由于水污染物排放强度远高于工业和第三产业，因此总体比重呈现下降趋势，且需要进一步控制农业生产过程中水污染物排放量。

其次，在经济保持稳定增长的情况下，辛集工业园区的环境污染物排放效率也日益提高，能够实现可持续发展目标。然而为保持经济发展，环境效率可有效提升，环境污染物排放总量较难得到控制。这对辛集工业园区的长期生态化建设提出了进一步改善的要求，在满足经济发展目标之下，还需要进一步进行环境污染物排放总量的控制，制定合理的总量控制目标，进而为推进生态文明建设奠定良好的环境基础。

当前中国工业园区生态化发展仍具有较大的提升空间，科学地评估工业园区的发展情况、合理制定生态化发展目标和实施路径，可有效促进园区的绿色可持续发展。本研究梳理工业园区环境能源与社会经济活动之间的交互作用关系，基于3E系统构建工业园区生态化发展决策模型，通过情景分析和仿真模拟为工业园区生态化发展提出合理的政策导向和优化路径，促进工业园区生态环境改善与经济发展的均衡。

本文对完善工业园区生态化发展的理论和方法具有较为重要的学术价值，易于推广到其他环境经济和区域可持续发展研究领域。此外，本研究在一定程度上能够促进生态经济学、产业经济学、一般均衡理论和系统工程理论的交叉融合，实现系统动力学模型、动态投入产出模型和计量经济学模型多种建模方法的有效耦合，促进多学科交叉的理论和方法创新研究。

本文所构建的创新性模型和研究方法，也能够为工业园区生态化发展提供实践指导。目前中国正在大力推进生态文明建设，工业园区作为国民经济的重要空间载体，绿色、安全、可持续发展面临着巨大挑战。本研究采用实证研究开发可推广的工业园区生态化发展决策方法和模型，对于推进工业园区绿色发展具有重要的现实意义，并可进一步推广到更多类型的工业园区的绿色发展中。由于篇幅有限，本研究仅针对工业园区经济发展最大化目标进行了实证分析，当前国家针对工业园区的管理强调资源、能源消耗总量和强度的双控，在今后研究中还需进一步依据资源环境目标，设计多目标优化模型，实现仿真模拟。

## 参考文献

- [1] 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, 36(22): 7323-7334.
- [2] 范育鹏, 乔琦. 基于工业生态化建设的工业园区环境管理研究 [J]. 中国环境管理, 2016, 8(05): 80-84.
- [3] LONG S, ZHAO L, LIU H B, et al. A Monte Carlo-Based integrated model to optimize the cost and pollution reduction in wastewater treatment processes in a typical comprehensive industrial park in China [J]. Science of the Total Environment. 2019, 647: 1-10.
- [4] 鲁圣鹏, 李雪芹, 刘光富. 生态工业园区产业共生网络形成影响因素实证研究 [J]. 科技管理研究, 2018, 38(08): 194-200.
- [5] 陈瑶, 付军, 邵晓龙, 等. 工业园区水污染防治的问题与对策探讨 [J]. 中国环境管理, 2016, 8(02): 99-101.
- [6] 杨挺, 任旭东, 赵畅, 等. 中国化工产业园区化的驱动机制: 基于社会—生态系统框架下的博弈论分析 [J]. 中国环境管理, 2019, 11(01): 38-46.
- [7] WANG S, XU L, YANG F L, et al. Assessment of water ecological carrying capacity under the two policies in Tieling City on the basis of the integrated system dynamics model [J]. Science of the Total Environment. 2014, 472: 1070-108.

- [8] COBULOGLU H I, Büyüktaktın I E. A stochastic multi-criteria decision analysis for sustainable biomass crop selection[J]. *Expert Systems with Applications*. 2015, 42(15-16):6065-6074.
- [9] JING S, LU H W, ZHANG Y, et al. Vulnerability assessment of urban ecosystems driven by water resources, human health and atmospheric environment[J]. *Journal of Hydrology*. 2016, 536:457-470.
- [10] XIANG N, XU F, SHI M J, et al. Assessing the potential of water reclamation and its impacts on water environment and economy: dynamic scenarios analysis of Tianjin, China[J]. *Water Policy*. 2015, 17:391-408.
- [11] 王如松, 李锋, 韩宝龙, 等. 城市复合生态及生态空间管理 [J]. *生态学报*, 2014, 4(1):1-11.
- [12] CHEN B, YANG Q, LI J S. Decoupling analysis on energy consumption, embodied GHG emissions and economic growth-The case study of Macao[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2017, 67: 662-672.

## The Method of Decision-making Optimization for Ecological Development of Chinese Industrial Park

XU Feng<sup>1</sup>, WANG Yating<sup>1</sup>, LI Xianying<sup>1</sup>, ZHAO Yuqiu<sup>1</sup>, XIANG Nan<sup>2\*</sup>

(1. School of Economics and Management, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. School of Economics and Management, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Secondary industry is a key industry for current Chinese economic green transformation and upgrading. As the main carrier of the agglomeration development of secondary industry, Chinese Industry Park's ecological development is an effective way to improve the trade-off between economic development and resource environmental constraints. This research aims to solve the problems of mid-long term ecological development of China's Industry Parks, establish research methodology innovation by simulation approach. This study reveals the coupling mechanism between economy and ecological environment based on 3E (Economy-Environment-Energy) system, develops the ecological optimization decision-making method and a simulation policy simulator, to explore the laws and trends of the coordinated development of the economy and environment in Industry Park. Using Xinji Industrial Park as case study to verify the scientificity and reliability of the method. This research can provide a scientific basis for formulating reasonable, effective strategies and implementing approach of China's Industry Park.

**Keywords:** industrial park; ecological development decision-making model; multi-objective programming; 3E system; dynamic simulation