精细化工园区绿色发展研究：以杭州湾上虞经济技术开发区为例

田金平[1]，李　星[1]，陈　虹[2]，程永伟[2]，陈吕军[1,3*]

（1. 清华大学环境学院，北京 100084；2. 浙江杭州湾上虞经济技术开发区生态环境科，浙江绍兴 312300；
3. 浙江清华长三角研究院生态环境研究所，浙江嘉兴 314006）

【摘　要】 近年来化工园区安全环保事故多发，园区生存发展面临极大挑战。深入推进绿色发展，是破解化工园区乃至整个行业发展瓶颈的唯一出路。本文以国内典型的精细化工园区——杭州湾上虞经济技术开发区为例，梳理该园区建设以来在产业发展、安全生产、污染整治方面的创新实践及成效，凝练出具有启示意义的管理与规划特点，以期为其他精细化工园区提供借鉴。实践显示，发展较成熟的化工园区向非化工园区转型难度大且代价高，而化工产业是国民经济的重要支柱，产业向园区集聚发展是趋势所在，科学地实施规划管理，是化工园区绿色发展的首要。化工园区推进绿色发展，宜在充分摸清园区“家底”基础上，强化顶层设计，即：以重点行业清洁生产、循环经济关键技术突破带动全产业链绿色发展；以大企业为核心，构建产品间、企业间协作的动—静脉耦合产业链接和共生网络；建设清洁化、多功能、集中与分散相结合的基础设施组团；构建全过程环境和安全管理体系，提高本质安全；资源环境要素约束倒逼产业结构调整及准入控制。2006—2015年，上虞园区整体实现了经济发展与资源能源消耗及污染物排放的相对脱钩，产生了积极的经济环境效益。其绿色发展实践对其他化工园区具有积极借鉴意义。

【关键词】 化工园区；精细化工；环境管理；绿色发展

【中图分类号】F205；X321　　【文章编号】1674-6252（2019）04-0121-07

【文献标识码】A　　【DOI】10.16868/j.cnki.1674-6252.2019.06.121

引言

工业园区建设是我国改革开放的成功实践，对推动我国工业化进程、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》[1]，全国共有 2543 家开发区，其中包括国家级开发区 552 家和省级开发区 1991 家。东部沿海省份工业产值 50% 以上来自工业园区 [2]；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的地区生产总值分别占全国的 11% 和 11.5%[3, 4]。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”，目前我国经济发展的重点仍在工业，而园区绿色发展则对工业高质量发展起着举足轻重的作用。

工业园区是国家重要的生产空间，但其在相对较小的地理空间内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，但同时也是解决这些问题的重要突破口 [5, 6]。近年来，中央政府出台的《中共中央国务院关于全面加强生态环境保护坚决打好污染防治攻坚战的意见》《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》《关于促进国家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，均明确提出了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 [7]，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。

本研究分析了近 5 年来国家层面经济环境政策中与园区相关的内容，发现当前国家层面针对园区绿色发展的要求有四个明显趋势和特征：一是强调系统优化，从全生命周期角度推进污染防治、环境保护和资源管理，达到系统治理的最佳效果；二是实施能源消耗、水资源消耗、土地资源开发总量和资源消耗强度双控制；三是实施更严格更透明的治污及环境监管，持续提高污染排放标准；四是风险控制，特别是特征污染物和新兴污染物引起的环境和健康风险的防控。

化学工业是国民经济的支柱，精细化工更是位于化学工业价值链的高端。化工企业进入园区已成必然趋势且速度进一步加快。化工园区布局多临江濒水，园区物质能量流动规模大，对区域安全环保风险高，面临着能源资源和生态环境的约束持续强化；加之近年来化工园区安全环保事故多发，化工园区创新环境管理，推动绿色转型发展、安全环保生产的需求尤为迫切。

实践中根据主导产业类型常将化工园区分为石油化工

资助项目：国家重点研发计划 (2018YFC0214105)，国家自然科学基金资助项目 (41471468)。

作者简介：田金平（1974—），男，博士，副研究员，研究方向为工业污染防治、产业生态学，E-mail: tianjp@tsinghua.edu.cn。

*** 责任作者：**陈吕军（1965—），男，博士，教授，研究方向为水处理与水回用技术、生态工业园区设计和规划、工业园区循环经济与清洁生产技术等，E-mail: chenlj@tsinghuaa.edu.cn。

园区、煤化工园区、精细化工园区等主要类型。石油化工园区主导产业以炼化一体化为核心，并向下游衍生生产大宗基础化学品，典型的园区有上海化学工业园区，其发展形成了“产品项目、公用辅助、物流传输、安全环保、管理服务”五个一体化的模式[8]。煤化工园区以煤为主要原料，构建“煤—煤电—C1～C4 衍生产品”为核心的煤、电、化产业体系，典型的例子有宁东能源化工基地，其发展形成了五大循环经济产业链[9]。以精细化工为主导产业的园区约占我国化工园区总数的 50%，精细化工产品附加值高、种类多、合成过程复杂、后处理流程长；精细化工生产单位产品污染物产生量高达 5～100 kg/kg[10]，生产过程中有机原料利用率通常较高，但酸、碱、盐等无机原料几乎全部进入废弃物，加之所含的复杂有机杂质，使得精细化工园区的污染呈现多源、多因子等特点；污染物的监测、溯源、治理及精细化管理等仍面临诸多难点和挑战。

本研究针对精细化工园区绿色发展面临的问题，以国内典型的精细化工园区——杭州湾上虞经济技术开发区（以下简称上虞园区）为例，梳理该园区建设以来，特别是 2005—2018 年，在产业发展、安全生产、污染整治方面的创新实践及成效，抽提出具有启示意义的管理与规划特点，以期为国内其他精细化工园区的绿色发展提供借鉴。

1 研究方法及案例园区概况

1.1 研究方法

化工园区绿色发展是一项顶层设计与实践优化相结合，具有综合性、持续性、适应性、动态性特点的系统工程。本研究基于作者对上虞园区开展的长期跟踪研究及管理实践，首先，凝练出精细化工园区绿色发展模式的一般性概念框架（图 1）。其次，针对化工园区产业发展、安全生产、污染防治三个关键主题，实证分析上虞园区近十余年来开展的环境管理实践探索与发展演变，及其经济环境绩效；最后，对化工园区的绿色发展内涵进行深入剖析，总结提炼出精细化工园区推进绿色发展的关键路径。

图 1 所示化工园区绿色发展模式概念框架的核心思想可概括为 5 个方面：①运用全生命周期思考，定量识别园区的物质能量代谢“家底”；②从产品、产业链、基础设施、环境管理等角度对园区绿色发展进行顶层设计；③引导支持园区支柱产业和龙头企业，开展清洁生产和循环经济关键技术的开发应用；④完善园区基础设施，构建绿色低碳能源环境基础设施，并运用现代信息技术建设智慧管理平台以支撑园区精细化管理；⑤制定园区绿色发展指标体系，实施存量产业绿色提升及增量产业高标准安全环境准入控制。以上 5 个方面侧重政府引导、企业主体的绿色发展模式。

1.2 案例园区概况

杭州湾上虞经济技术开发区是中国典型的精细化工园区，建立于 1998 年，化工建成区已开发面积 21km^2，入住企业以民营经济为主体。上虞园区是全球最大的分散染料生产和研发基地，形成了分散染料、活性染料、还原染料、染料中间体、染料助剂、基础原料等一体化的染料产业体系，分散染料产量占全国的 70% 以上。上虞园区还是全国最大的氟喹诺酮类抗生素原料药及中间体生产基地，产品产量占全国的 50% 左右。上虞园区合成维生素产量也占到全国的近 40%，此外园区过碳酸钠、紫外光引发剂、氨基丙醇等细分领域的专用精细化工产品在全球市场上也占据较大份额。染料、化学原料药等精细化学品的生产工艺复杂，物耗、能耗、水耗较高，废气、废液、废渣产生量较大，随着安全环保的标准持续升级、污染物排放标准持续趋严、污染治理难度及成本持续增加，对上虞园区的绿色发展提出了更高的要求。

以下基于图 1 所示的概念框架，结合上虞园区创新实践，重点对化工园区绿色发展顶层设计进行分析，以期对同类化工园区具有重要启示意义。

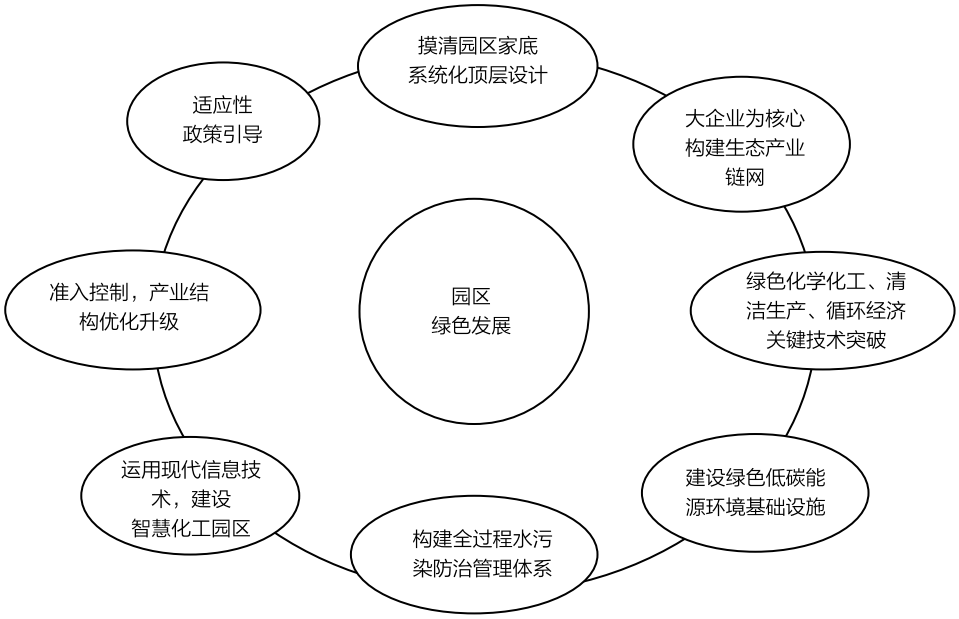

图 1　精细化工园区绿色发展模式概念框架

2 上虞园区绿色发展实践及其启示意义

本部分重点从上虞园区产业发展—安全生产—污染防治政策演变分析及园区绿色发展顶层设计分析两个方面，探讨上虞园区绿色发展实践对其他化工园区的启示

意义；同时对构建化工园区全过程多级水污染防治管理体系、资源环境要素约束倒逼产业结构调整这两个推进园区绿色发展的重要抓手进行分析。

2.1 园区产业发展—安全生产—污染防治政策演变分析

图 2 所示为上虞园区自 1998 年建设以来在产业发展、安全生产与风险防控、污染防治方面主要政策演变及实践探索。

产业发展方面，园区经历了 3 个主要的阶段：第一个阶段始于 2002 年，园区首个中长期发展总体规划，提出将园区建设成为以精细化工为特色的，上下游一体化的，研发、生产、贸易并重的，具有可持续发展能力的综合性化学工业区。第二个阶段始于 2007 年，因安全环保问题多发及总量减排压力，园区开始调整产业规划，大力发展非化工产业，严格限制化工产业发展，对存量化工产业持续开展污染整治。第三个阶段始于 2017 年，因经过十年的探索，非化工产业发展缓慢，而化工产业在污染整治推动下发展质量取得了显著提升，园区下定决心再次将产业重心放在精细化工，重点发展化工新材料产业和生物医药产业，并大力推进化工产业改造提升。

从上述三个阶段看，上虞园区有较长一段时间对是否坚持选择发展化工产业曾出现犹豫，但实践中又再次坚定信心大力发展高端精细化工产业。这一点对国内已建成的精细化工园区尤有启示意义：一方面发展成型的化工园区向非化工园区转型难度很大、代价很高；另一方面化工产业是国民经济的重要支柱，不可或缺，产业向园区集聚发展是趋势所在，科学地管理好化工园区，是化工园区绿色发展的首要，也是发展好化工产业的关键。

图 2 中关于安全环保的分析详见后续 2.2.4 节分析。

2.2 园区绿色发展顶层设计分析

科学的顶层设计对于化工园区绿色发展具有重要意义。上虞园区在管理中运用物质能量代谢分析支撑园区绿色发展顶层设计。物质能量代谢分析是摸清化工园区经济活动中资源能源利用与环境影响家底的重要方法。化工园区的物质代谢主要包括三部分：一是企业层面的代谢，即企业内产品生产过程的物质转化过程；二是供应链及产业共生层面的代谢，即企业产品、副产品或废弃物在园区内不同企业间的流动过程；三是园区基础设施层面的代谢。三个层面之间物质代谢联系密切、相互作用。

对精细化工产品而言，碳元素既是有机物分子骨架中的核心元素，又是环境效应（如 COD、CO_2 等）的关键元素，基于碳元素的代谢分析对于揭示化工园区的物质效率和环境影响更有针对性。硫、氯则是化工园区重要的辅助材料，如硫酸、盐酸等无机产品的关键元素，以及二氧化硫、氯化氢排放的主要来源，因绝大部分的辅助原料不进入有机产品，厘清无机元素的去向，对调控物质代谢、降低环境影响有重要的决策支撑作用。上虞园区对 130 余种产品及 400 多种原料的物质代谢进行分析，基于此，识别出清洁生产、循环经济发展的关键节点 [11,12]。

在物质能量代谢分析基础上，根据绿色化学化工“双十二原则”及产业生态学系统优化方法，上虞园区从产品生产、产业链接、基础设施、环境管理层面，对园区绿色

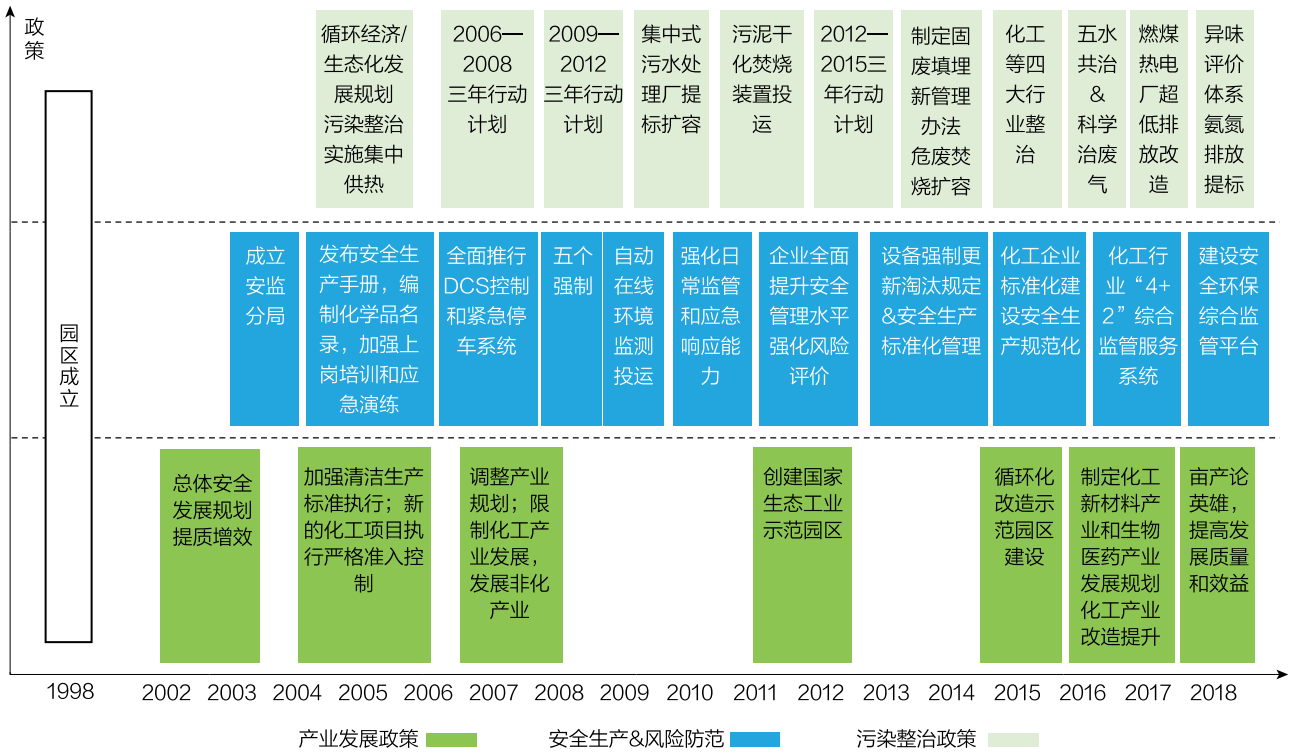

图 2　上虞园区产业发展—安全生产—污染防治政策发展演变

图 3　上虞园区绿色发展技术模式示意[13]

注：PROODUCTIVELY 和 IMPROVEMENT 分别为绿色化学十二原则和绿色化工十二原则的词头组合成的词

发展的技术模式进行顶层设计[13]（图 3）。

2.2.1 重点行业清洁生产、循环经济关键技术突破，带动全产业链绿色发展[13]

针对化工园区经济总量大或能耗物耗高的重点行业，从分子层面和工程技术领域入手，以产品绿色化学化工关键共性技术开发和产业化应用为核心，突破清洁生产和循环经济关键技术，提高生产过程的原子利用率，是化工园区推进绿色发展的根本所在。

染料行业是上虞园区的支柱产业之一，硝化反应和重氮化反应的本质安全、硝基绿色还原、稀硫酸的资源化、NO_x 的资源化、硫酸减量化、硫酸钙渣危废减量化、稀硫酸处理及废水资源化、能量网络优化是染料绿色合成的关键共性技术，也是长期制约染料行业清洁发展的瓶颈和难题。上虞园区立足企业自主创新，突破了连续硝化、连续催化加氢、高效精密分离、稀硫酸和废水资源化利用、工艺过程余热回收综合利用等清洁生产关键技术，提高了反应及工艺系统的本质安全性。通过全流程生态设计和系统优化，突破了大量关键技术，攻克了长期困扰染料行业的废硫酸资源化及硫酸钙渣危险废物的源头削减难题，突破了制约行业安全生产和绿色环保的技术瓶颈，带动了行业的绿色发展。

2.2.2 构建产品间、企业间协作的动—静脉耦合产业链接和共生网络

精细化工产品生产中溶剂、酸碱等辅助原料用量大，不进入产品并伴生大量盐类副产物，提高辅助原料及副产盐的利用率，是化工园区绿色发展的重要制约。为此，需要突破传统化工生产从单一产品层面技术改进、污染处理的模式，构建产品间、企业间协作的动—静脉耦合产业链接和工业共生网络，在园区尺度上通过产业链协作技术创新和系统优化，发挥资源能源效率提升和污染减排的协同增效作用。

上虞园区构建了染料和医药两大主导产业链网，染料产业链网以大型企业为核心，构建了由硫磺制酸及无机硫化工衍生产品、氯碱化工及衍生产品为龙头的上游基础原料群，以绿色化学化工技术为核心竞争力的芳香胺、氨基苯酚、还原物等中间体产品系列，以染料及配套表面活性剂为主的下游染料产品体系，以及以氯苯为原料的下游新材料系列产品，组成了国内最完整的染料产品链网及循环经济产业链。与此同时，建立了由硫磺制酸化学反应热回收、硝化反应热回收、催化加氢反应热回收、产品精馏余热回收、工艺过程能量回收及梯级利用等组成的染料合成能量共生网络；实现了精细化工产品链网式发展，提高了产业链的附加值和整体竞争力[13]。

2.2.3 建设清洁化、多功能、集中与分散相结合的基础设施组团

基础设施共享是园区绿色发展的重要特征，以园区基础设施为核心构建产业共生体系，是园区发展循环经济的重要途径。建设清洁化、多功能、集中与分散相结合、兼具能源供应和解决区域突出环境问题功能的基础设施组团，是园区绿色发展的重要支撑。

上虞园区依托多样化的能源基础设施，构建了燃煤背压机组热电联产、硫磺制酸化学能回收热电联产、垃圾发电、污泥发电、生物质发电、危险废物焚烧余热回收等多功能、多源能源基础设施循环经济体系[14, 15]。通过垃圾焚烧热电联产消纳了上虞区的生活垃圾，并利用热电厂的余热干化园区集中式污水处理厂污泥再焚烧产热，回收能源。

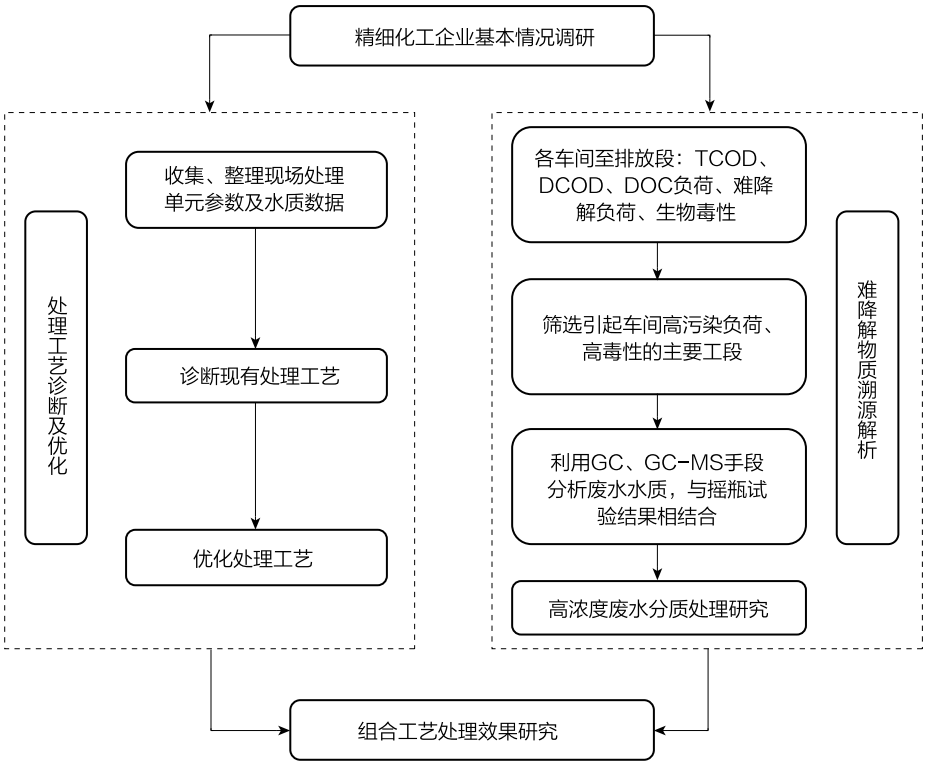

图4　化工园区废水可生物降解性和生物毒性评价方法示意

能源基础设施在提高能源转换效率、优化能源结构、为园区提供能源的同时，已成为消纳周边城市生活垃圾回收能源、解决园区危险固体废弃物和污水处理厂污泥问题以及有机废气恶臭控制的重要载体。

2.2.4 构建全过程环境和安全管理体系，提高本质安全

安全环保生产是化工园区的生命线。结合化工园区特点，因地制宜地制定绿色发展政策及安全环保管理措施，全过程持续加强环境和安全管理，提高化工生产本质安全。

上虞园区自 2005 年制定循环经济发展规划和生态化发展规划开始，大力推动存量化工产业的污染整治，安全环保管理的典型举措包括：强制清洁生产审核、污水排放强制削减、排污权有偿使用、五个强制、DCS 及紧急停车系统、重污染项目强制淘汰等。特别是近年来，上虞园区，在实践中形成的对其他园区有借鉴意义的安全环保创新实践体现在以下方面：①化工企业建设标准化，特别是对建成 10 年以上的存量项目的生产线实施“推倒重建”，着力推进以生产体系密闭化、物料输送管道化、危险工艺自动化、企业管理信息化建设为特征的标准化建设；②有毒有害原料准入控制和绿色工艺替代；③提高化工生产本质安全，对所有在园区使用的化学反应开展基于反应热测量的安全性评价，以掌握园区产品生产的化学反应本质安全性，指导日常管理；④建设智慧园区，提高管理的系统化、科学化、规范化、精细化和信息化水平。

水污染防治一直是化工园区绿色发展的重点和难点，需要遵循系统思考原理，全面考虑水资源、水环境、水生态多个方面。构建化工园区全过程多级水污染防治管理体系的内涵主要体现在 3 个方面：①统筹“供（取）水—用水—废水处理—排放—废水再生回用—污水处理产生的有机废气治理—污泥处理处置及资源化”等全过程；②构建产品—车间—企业多级总量控制及污染控制体系；③在常规污染物防控的基础上，加强对废水中特征污染物的控制，这将是园区水污染防治进一步的重点。

图 4 所示为基于物料衡算、物质流分析、结构解析的废水可生物降解性和生物毒性评价方法，可用于制药和染料生产等典型行业 AOX 等难降解和有毒有害污染物的溯源和防治 [16, 17]。

上虞园区多家大型企业开展了分产品、分工段、分车间的物料平衡核算及高浓度废水难降解组分溯源，将企业的废水总量、污染物排放总量、溶剂消耗等分解到各车间、各产品，并细化到单位产品的排放定额及单个车间的日均废水排放总量和排放浓度，制定年度目标并逐年提高目标，开展精细化动态考核。各车间排入企业污水处理站的出口安装在线监测，加强日常监督管理，一旦发现车间有超浓度、超量排放，即自动切断车间的排放口，通过倒逼，显著提高了车间生产负责人的环保意识，促进了将污染减排纳入车间、产品一级的精细化管理流程。企业的这一创新实践取得了良好的成效。

2.2.5 资源环境要素约束倒逼产业结构调整及准入控制

园区绿色发展是一个多要素、多系统、多目标集成与优化的综合决策问题，需要对“社会发展—经济活动—资源利用—环境影响”之间交互作用关系有科学系统认识，并建立涵盖“能源—水资源—环境—经济”等多要素的综合模型 [18]（图 5），统筹考虑能源、水资源消耗总量、能源和水资源产出率、污染物排放、环境影响控制等多重目标；既包含存量的提升改造，也包括新增量的准入控制。

基于图 5 的模型框架，上虞园区在生态工业示范园区建设规划中运用了绿色发展多目标优化模型，即：在最小化园区的能源消费总量、新鲜水用水总量、能源 / 水资源消耗强度（单位经济产出的能源、新鲜水用量）、环境影响等主要预期目标下，研究在不同经济发展情景下，园区化学需氧量、氨氮、二氧化硫、氮氧化物、废水、固废六种主要污染物的排放量，及新鲜水、综合能耗的消耗情况，并与《国家生态工业园区标准》相比较；在此基础上判断园区不同的子行业在不同的经济发展预期、技术改进程度（减少

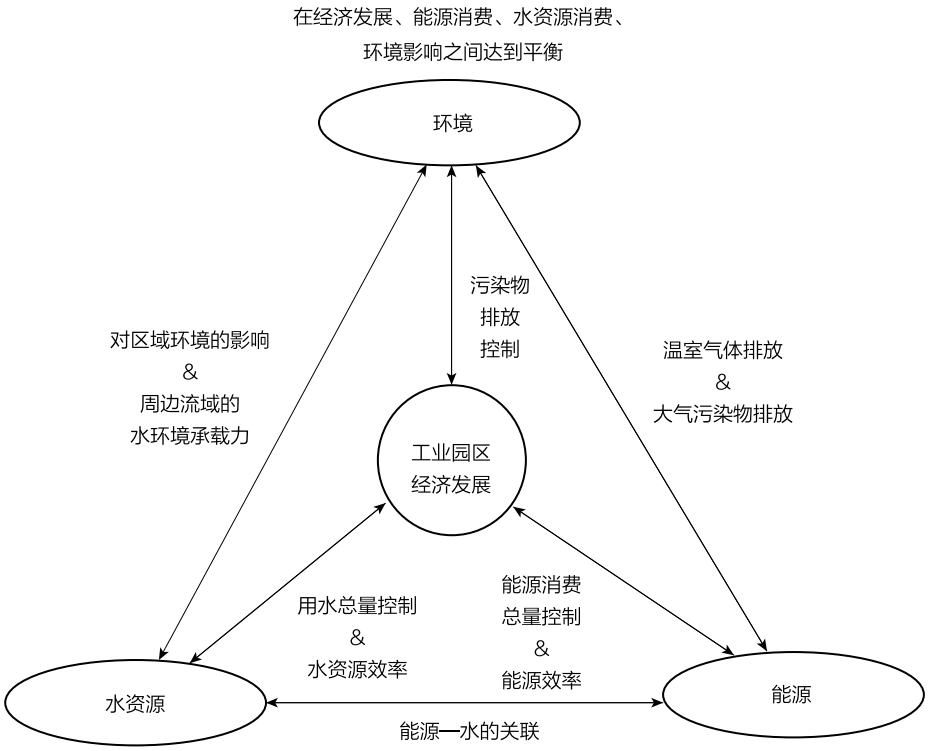

图 5　经济—能源资源—环境模型框架

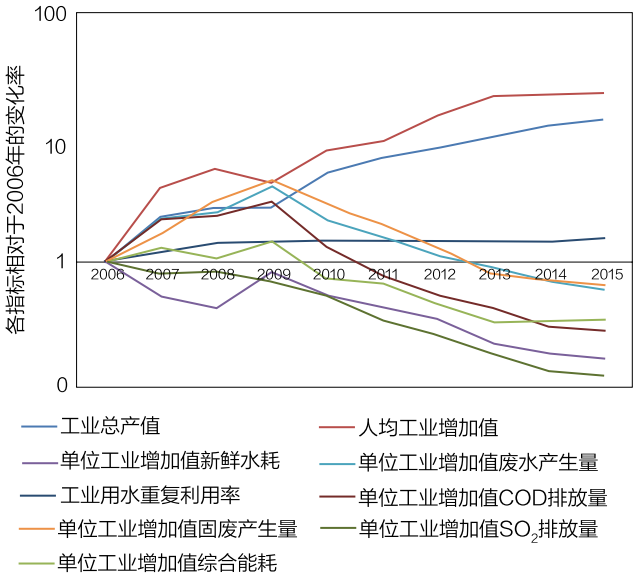

图 6　园区 2006—2015 年主要指标相对于 2006 年的变化情况

污染物的排放强度）、产业结构、产业共生和资源重新分配模式下，园区产生的环境、能源和水压力；进而针对产业已有存量和新增量分别提出生态效率的改造提升目标和准入门槛。

2.3 上虞园区绿色发展绩效

与图 2 政策演进相呼应，本研究分析了上虞园区 2006—2015 年 10 年来绿色发展的绩效。整体来看，上虞园区实现了经济发展与资源能源消耗及污染物排放的相对脱钩（图 6）。2006—2015 年，园区工业增加值增长 465%，新鲜水消耗强度下降 89%，废水排放强度下降 83%，COD 排放强度下降 96%，能耗强度下降 85%，SO_2 排放强度下降 97%，园区资源、能源利用效率显著提升，污染物排放大幅度减少，环境效益显著。

3 结论与展望

近年来化工园区安全环保事故多发以致“谈化色变”，化工园区面临监管整治的长期高压态势，乃至一些化工园区的生存发展也面临极大挑战。化工行业关乎国民经济和人民生活的方方面面，不可或缺。深入推进绿色发展，是破解化工园区乃至整个行业发展瓶颈的唯一出路。上虞园区的实践显示：通过摸清园区家底、强化系统优化和顶层设计、构建生态产业链网、开发清洁生产和循环经济关键共性技术、建设绿色低碳基础设施、构建全生命周期水管理体系、建设智慧化工园区、并制定适宜的产业结构升级及政策引导，可有效地推进化工园区的绿色发展。上虞园区的实践产生了积极的经济环境效益，对其他精细化工园区具有普遍性和积极借鉴意义。

参考文献

[1] 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)（〔2018〕第 4 号公告）[EB/OL]. (2018-02-26).http://www.ndrc.gov.cn/gzdt/201803/t20180302_878800.html.

[2] 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）[EB/OL]. http://www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057267/n3057272/c3861660/content.html.

[3] 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 [EB/OL]. (2018-02-26).http://www.mofcom.gov.cn/article/shangwubangzhu/201805/20180502742487.shtml.

[4] 中华人民共和国科学技术部．《国家高新区创新能力评价报告 2018》发布 [EB/OL]. (2018-02-26).http://www.most.gov.cn/kjbgz/201812/t20181229_144409.htm.

[5] 田金平，刘巍，李星，等．中国生态工业园区发展模式研究 [J]. 中国人口·资源与环境，2012, 22(7): 60-66.

[6] 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.

[7] 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.

[8] YUNE J H, TIAN J P, LIU W, et al. Greening Chinese chemical industrial

park by implementing industrial ecology strategies: a case study[J]. Resources, conservation and recycling, 2016, 112: 54-64.

[9] 梁永平 . 按照循环经济发展理念建设宁东能源化工基地 [J]. 再生资源与循环经济 , 2011, 4(3): 14-17.

[10] SHELDON R A. The E factor: fifteen years on[J]. Green chemistry,2007, 9(12): 1273-1283.

[11] TIAN J P, SHI H, CHEN Y,et al. Assessment of industrial metabolisms of sulfur in a Chinese fine chemical industrial park[J]. Journal of cleaner production, 2012, 32: 262-272.

[12] 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.

[13] HAO Q, TIAN J P, LI X, et al. Using a hybrid of green chemistry and industrial ecology to make chemical production greener[J]. Resources, conservation and recycling, 2017, 122: 106-113.

[14] 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.

[15] 刘笑 . 能源基础设施在推进生态工业园区建设中的作用研究——以浙江杭州湾上虞经济技术开发区为例 [J]. 再生资源与循环经济 , 2014, 7(9): 4-7.

[16] XIE Y W, CHEN L J, LIU R, et al. AOX contamination in Hangzhou Bay, China: levels, distribution and point sources[J]. Environmental pollution, 2018, 235: 462-469.

[17] 刘锐 , 范举红 , 穆春芳 , 等 . 制药废水的可生物降解性与生物毒性研究 [J]. 生态毒理学报 , 2011, 6(5): 485-490.

[18] XU F, XIANG N, TIAN J P, et al. 3Es-based optimization simulation approach to support the development of an eco-industrial park with planning towards sustainability: a case study in Wuhu, China[J]. Journal of cleaner production, 2017, 164: 476-484.

The Green Development of Fine Chemical Industrial Parks in China: a Case Study in Hangzhou Bay

TIAN Jinping[1], LI Xing[1], CHEN Hong[2], CHENG Yongwei[2], CHEN Lvjun[1,3*]

(1 School of the Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2 Bureau of Environment and Ecology, Hangzhou Bay Shangyu Economic and Technology Development Area, Shangyu 312300, China; 3 Zhejiang Provincial Key Laboratory of Water Science and Technology, Department of the Environment, Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing 314006, China)

Abstract: Chemical industrial parks (CIPs) in China has witnessed a crucial challenge of sustainable development, due to a series of environmental pollution and safety accidents in recent years. Green development has been hallmarked the only countermeasure to break through the bottleneck of sustainable development of both CIPs and chemical industry in China. This study uncovered the best practices of green development in a typical Chinese fine chemical industrial park, the Zhejiang Hangzhou Bay Shangyu Economic and Technology Development Area (HSEDA), aiming to propose insightful implications to other CIPs. The HSEDA once fluctuated between chemical industry and chemicals manufacturing free industries, but finally kept staying on the track of high-end fine chemical industries. The HSEDA has featured in making systematically grand plan on eco-industrial development of chemical industry, based on delibrated material and energy metabolism assessment. The grand plan is characterized in facilitating green development from five aspects, such as:① developing bottleneck-breaking green technologies to underpin cleaner production, circular economy development, and green supply chain in the park;② fostering pillar-industry tailored industrial ecosystem by facilitating collaboration among different products, stakeholders, and infrastructure;③ establishing multi-functional and diversified infrastructure systeme to tackle the site-specific environmental issues associated with energy recovery,④ facilitating safety-environment stewardship systematically from the perspective of life cycle thinking to improve the inherent safety of chemicals manufacturing; and⑤ detuning the industrial structure of the park by reallocating environmental and natural resources, and enhancing admittance standards of new chemical projects. By doing so, the HSEDA accomplished substantial improvement of environmental and economic performance, achieving a relative decoupling of economy development and environment-resource burden during 2006 to 2015. The best-practiced green development measures in the HSEDA will provide insightful policy implications to other fine chemical industrial parks in China.

Keywords: chemical industrial park; fine chemical industry; environmental management; green development