

# 化学工业绿色制造产业链接技术和发展方向探析

李瑾, 胡山鹰, 陈定江, 宋晓旭, 张群, 樊炯明, 李光耀, 马淑杰, 金涌

(清华大学化学工程系生态工业研究中心, 北京 100084)

**摘要:** “十三五”以来, 我国化学工业的绿色发展取得了显著进步, 在产品产量提高的同时, 资源消耗、能源消耗、污染排放均实现了大幅减少。绿色制造是当前我国实现可持续发展的必要途径。要实现化学工业的绿色发展, 除了关注化工行业自身的绿色制造, 还要关注化工产业与其他行业、与社会进行产业链接时的绿色协调发展。本文在对我国化学工业绿色发展现状进行分析的基础上, 给出我国化工行业绿色发展的方向, 提出化学工业绿色制造产业链接的关键技术, 并通过五个企业案例进行典型模式分析。

**关键词:** 绿色制造; 产业链接技术; 战略; 化学工业

**中图分类号:** TQ02 **文献标识码:** A

## An Analysis of Industrial Linking Technologies and the Development Direction for the Green Chemical Industry

Li Jin, Hu Shanying, Chen Dingjiang, Song Xiaoxu, Zhang Qun, Fan Jiongming,  
Li Guangyao, Ma Shujie, Jin Yong

(Center for Industrial Ecology, Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** During the 13th Five-Year Plan, significant progress has been made in the green development of China's chemical industry, not only by increasing product yields, but also by significantly reducing resource consumption, energy consumption, and pollution emission. Green manufacturing is necessary in order to achieve sustainable development in China. In order to realize the green development of the chemical industry, it is necessary to pay attention not only to green manufacturing in the chemical industry, but also to green coordinated development when the chemical industry links with other industries and society. Based on the current situation and development directions of the green chemical industry in China, these authors put forward key technologies in the linkage between the chemical industry and the green manufacturing industry, and demonstrate a typical pattern analysis using five business cases.

**Keywords:** green manufacturing; industrial linking technology; strategy; chemical industry

### 一、前言

当今社会发展已经进入了资源、能源、环境多重制约的时代, 实现资源循环利用、能源梯级利用

的绿色循环低碳经济发展模式成为化学工业(简称“化工”)在未来发展中的迫切需要。2015年5月, 国务院发布了《中国制造2025》战略, 指出要全面推进化工等传统制造业的绿色改造。绿色制造要求

收稿日期: 2017-04-25; 修回日期: 2017-05-26

通讯作者: 胡山鹰, 清华大学化学工程系生态工业研究中心, 教授, 主要研究方向为生态工业系统设计、分析、集成方法, 循环经济理论与实践; E-mail: hxr-dce@tsinghua.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“制造强国战略研究(二期)”(2015-ZD-15); 中国工程院咨询项目“流程制造业本质性研究及创新发展战略”(2015-ZCQ-009); 国家自然科学基金项目(L1522024)

本刊网址: www.engsci.cn

在生产、制造过程中，将生态环境影响以及自然资源利用率作为第一考虑因素，以此来保证化工产品在全生命周期中的资源利用率达到最高，对环境的不利影响降到最小 [1]。

自“绿色制造”“绿色化工”的概念被提出以来，我国的绿色化工发展在相关技术领域已经取得了初步的成效。我国于1995年确定了“绿色化学与技术”院士咨询课题，积极推动了绿色化工的相关研究和产业的发展 [2,3]。目前，我国在相关技术方面的研究涉及资源-过程-产品-应用-集成的全生命周期维度 [4]，包括化工产品的创新、化工生产技术的创新、化工生产零排放等 [5]，重点关注于清洁生产技术和无毒害催化剂开发技术、新型反应技术等 [6]。此外，信息技术和智能技术的发展也在绿色产品设计、危害预警等方面有效促进了传统化工向绿色化工的发展 [7]。

世界发达国家绿色化工发展先行一步。美国加州要求按照绿色化学行动法促进绿色化工发展；英国创建绿色化学网，将学院、工厂、零售商联合在一起共同促进绿色化工发展；日本在建立新的高能效设施、现有设施升级等节能减排行动上进行了高额投资；欧盟颁布的《化学品的注册、评估、授权和限制》对所有化学物质在其整个生命周期中的负面影响进行管理和控制。与世界发达国家相比，我国在绿色化工方面的发展和应用

还远远不足。

由于化工产品广泛使用于工业、农业、人民生活等各个领域，所以化工产业与各行业均可以实现一定程度的产业链接。化学工业绿色制造不仅涉及化工行业自身的绿色制造，还要关注化工产业与其他行业、与社会进行产业链接时的绿色协调发展，因此，其产业链接包含“产业内产业链的构建”“产业间绿色制造协调发展”和“产业与社会的生态链接”三方面的内涵。实现化学工业绿色制造的产业链接，对于促使我国化学工业加快新一轮技术升级和模式调整具有重要意义。

本文总体思路如图1所示。

## 二、我国化学工业绿色制造现状

随着我国化工科技的迅速发展，化工产品产量现已位居世界前列。进入21世纪以后，我国化学工业保持了良好的增长态势，化工产品的产量现已位居世界前列，化学工业总产值占工业总产值的比例一直维持在10%左右。2015年化工行业产值占全国工业总产值的11.9%，位于全国36个工业部门之首。近十年来以年均18%的速度增长，对国民经济发展做出了重要贡献。随着近几年我国清洁生产、节能减排与化工反应过程强化技术的发展与推广，我国化学工业的绿色发展已经取得初步成效。

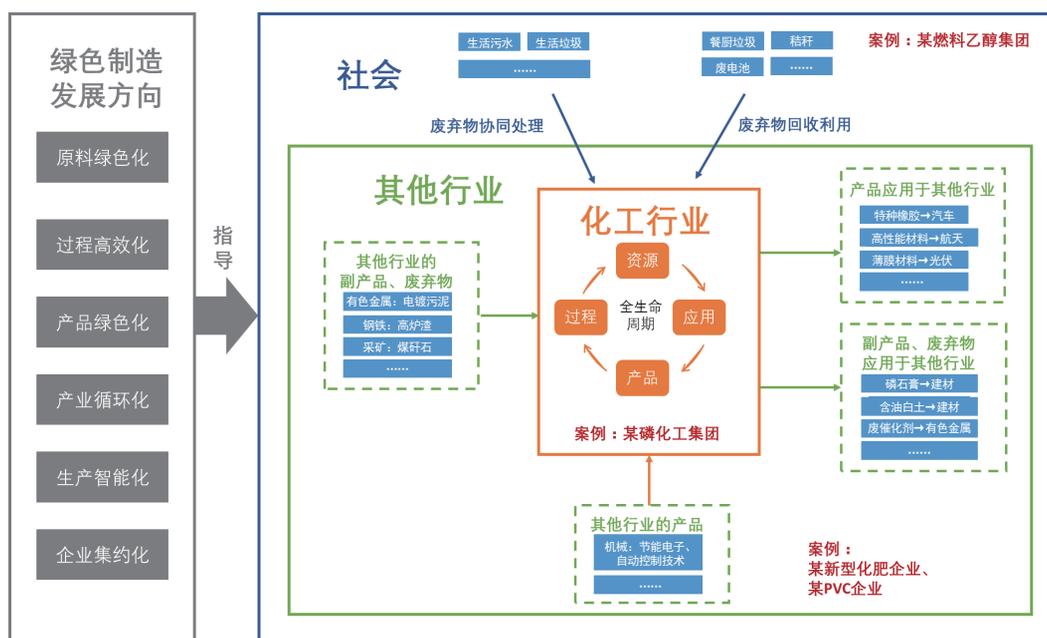


图1 化学工业绿色制造发展思路  
注：PVC：聚氯乙烯。

近几年来,化学工业在主要产品产量、节能、降耗、减排等多个方面均取得了显著的进步。

(1) 主要产品产量。2015年甲醇产量为 $3.93 \times 10^7$  t,较2010年增长149.7%;乙烯产量为 $1.714 \times 10^7$  t,较2010年增长20.8%;纯碱产量达 $2.592 \times 10^7$  t,较2010年增长27.8%;烧碱产量为 $3.028 \times 10^7$  t,较2010年增长45.1%;磷矿石产量共计 $1.42 \times 10^8$  t,较2010年增长108.9%;氮磷钾化肥产量为 $7.432 \times 10^7$  t,较2010年增长17.3%(见表1)[8]。

(2) 资源消耗。磷矿消耗强度“十二五”期间呈现平稳趋势,从2011年的 $0.128 \times 10^4$  t/亿元到2015年 $0.129 \times 10^4$  t/亿元。硫铁矿消耗强度从2011年的 $0.016 \times 10^4$  t/亿元下降到2015年的 $0.0123 \times 10^4$  t/亿元,下降幅度高达23.13%(见表2)。

(3) 能源消耗。到2014年化工行业能源消费总量达到 $5.28 \times 10^8$  tce,相比2011年增长了约 $1.64 \times 10^8$  tce;能源消费强度从2011年的 $0.6 \times 10^4$  t/亿元下降到2014年的 $0.56 \times 10^4$  t/亿元,下降幅度达到6.67%。乙烯能源消耗量由2010年的880.7 kg标准煤/t下降到2014年的816.3 kg标准煤/t,下降幅度达到7.31%;电石能源消耗量由2010年的1 100 kg标准煤/t下降到2014年的1 010.2 kg标准煤/t,下降幅度达到8.2%;合成材料能源消耗量由2010年的471.5 kg标准煤/t下降到2014年的367.7 kg标准煤/t,下降幅度达到22.6%(见表3)。

(4) 污染物排放。我国化学工业固废排放总

量呈迅速下降的趋势,“十二五”期间,从2010年的 $1.396 \times 10^5$  t减少到2015年的 $6.07 \times 10^4$  t,降幅达到56.5%(见表4)。随着近几年化工装置废水回用技术发展和废水回收利用率的提高,废水排放强度呈明显下降趋势,废水的排放强度从2010年的 $5.2 \times 10^9$  t下降到2015年 $3.46 \times 10^9$  t,降幅达33.5%。随着化学需氧量(COD)减排及治理技术的改进与发展,从2011年到2015年COD排放强度继续呈明显下降趋势,“十二五”期间COD排放总量从2010年的 $3.28 \times 10^5$  t下降到2015年的 $2.43 \times 10^5$  t,下降幅度高达17.7%。氮化物的排放总量从2010年的 $9.27 \times 10^4$  t下降到2015年 $6.87 \times 10^4$  t,下降幅度达到25.9%(见表4)[9]。

### 三、化学工业绿色制造发展方向

通过对我国化学工业绿色制造产业链技术和模式的分析与探讨,本文提出我国化工产业的绿色制造发展方向,包括原料绿色化、过程高效化、产品服务化、产业循环化、生产智能化和企业集约化六个方面。

#### (一) 原料绿色化

原料绿色化的内涵包括两方面,一是在绿色化工产品的设计过程中,采用绿色清洁的原料,包括绿色矿石、绿色溶剂、绿色催化剂等,取代传统原料中有毒、有害、有刺激的原料,例如,研发可回收并能反复使用的固体催化剂、酶催化剂、仿生催化剂等,利用无毒无害的溶剂来代替挥发性的有机

表1 化学工业主要产品产量

产品	2010年产量 / $\times 10^4$ t	2015年产量 / $\times 10^4$ t	增长率 /%
甲醇	1 574	3 930	149.7
乙烯	1 419	1 714	20.8
纯碱	2 029	2 592	27.7
烧碱	2 087	3 028	45.1
磷矿石	6 600	14 200	108.8
氮磷钾化肥	6 337.86	7 432	17.3

表2 化学工业主要资源消耗强度

产品	2011年资源消耗强 度/ $(\times 10^4$ t/亿元)	2015年资源消耗强 度/ $(\times 10^4$ t/亿元)	增幅/%
磷矿石	0.128	0.129	0.8
硫铁矿	0.016	0.0123	-23.13

表3 化学工业主要产品能源消耗量

产品	2010年能源消耗 量/(kg标准煤/t)	2014年能源消耗 量/(kg标准煤/t)	下降幅度 /%
乙烯	880.7	816.3	7.31
电石	1 100	1 010.2	8.2
合成材料	471.5	367.7	22.6

表4 化学工业污染物排放量

污染物	2010年污染物 排放量/t	2015年污染物 排放量/t	下降幅度 /%
固体废弃物	$1.396 \times 10^5$	$6.07 \times 10^4$	56.5
废水	$5.2 \times 10^9$	$3.46 \times 10^9$	33.5
COD	$3.28 \times 10^5$	$2.43 \times 10^5$	17.7
氮化物	$9.27 \times 10^4$	$6.87 \times 10^4$	25.9

化合物溶剂,在石油化学工业中采用低碳烷烃、合成气、废旧塑料、生物质等为原料[10];另一方面,通过原料均化对原材料进行预处理,在化工产品生产全过程的设计中,充分考虑产品的功能、质量、开发周期和成本,同时优化原料有关参数,使得原料在进入转化流程之前完成粗分、筛选等预处理工序,达到降低物料的化学成分波动振幅,从而提高化工流程的整体稳定性,降低后续生产工序的能源消耗,保证终端产品的质量。

## (二) 过程高效化

化工过程的高效化既可以提高生产效率,又可以解决“高能耗、高污染和高物耗”的问题。例如,将超重力脱硫技术用于硫铁矿制酸装置尾气处理,从而提升脱硫效率;采用膜耦合工艺提高炼油厂氢气及轻烃回收率;运用微化工技术提高硫酸催化环己酮肟生成己内酰胺过程的选择性;运用等离子体技术实现煤制乙炔过程等。除上述实例以外,磁稳定床技术、离子液体技术、超临界流体技术、微波辐射技术等,在提高过程效率上均有较多应用价值。未来应对相关技术进行进一步研究、应用,实现化工过程高效化。

## (三) 产品绿色化

绿色化工产品应具有两个特征:①产品本身不会引起健康或环境污染的问题;②产品被使用后能够再循环,或降解为无害物质。在绿色化工产品的设计过程中,要求产品功能与环境影响并重,不仅最终供公众使用的产品要绿色化,在产品生产过程中所涉及的催化剂、萃取剂、增塑剂等也要实现无害、可循环、可降解。此外,通过将化工产品生产与信息技术相结合实现提供定制化服务的功能,以提高产品的利用效率,降低产品的废气率,从而减少对环境的危害,例如,根据土壤数据生产定制化肥,并提供有针对性的农化服务;根据消费者需求生产个人定制化化妆品等。

## (四) 产业循环化

我国经济社会的持续发展愈来愈面临资源瓶颈和环境容量的严重制约。国内资源难以支撑经济的持续增长,环境更难以支撑当前化工行业高污染、高消耗、低效益生产方式的持续扩张。我国的发展

需要通过循环经济、科技创新等相关手段将化工行业内部、化工行业与其他行业、化工行业与社会之间的物质、原料进行循环利用,建设跨行业的关键项目,构建以化工行业为核心的跨行业循环经济产业链,加强化工生产过程产生的副产物和废物的综合利用,提高资源利用效率[11]。

## (五) 生产智能化

以计算机和互联网为主的信息技术革命对制造业产生了深刻的影响,石油和化工行业信息化正面临着新一轮的发展机遇。在物联网、云计算、大数据等为代表的新一代信息技术影响下,我国化工行业正从自动化、网络化迈入数模化、智能化阶段。信息化与工业化的深度融合是实现智能制造的关键。石油和化工行业是典型的流程工业,工艺过程复杂,控制点多,特别是大型炼化项目,更是一个庞大的系统工程。化工智能制造面向生产的全产业链环节,将新一代信息技术与现有化工生产过程的工艺和设备运行技术以及管理和操作人员进行深度融合,可以实现工厂横向、纵向和端对端的高度集成,以更加精细和动态的方式提升工厂运营管理水平,并推动形成新的制造和商业模式创新。

## (六) 企业集约化

我国的化工行业存在着企业数量多、规模小、技术分散、技术整合强度较小等问题,造成行业整体竞争力不强。生态工业园区建设是新型工业化发展的有效模式,有利于工程科技的有效整合,形成循环经济产业链接,对于解决结构性污染和区域性污染,调整产业结构和工业布局,实现节能减排,建设资源节约型、环境友好型社会具有十分重要的意义。为提高我国化工行业的整体竞争力,加强化工与各行业间的链接,化工行业的产业布局应进一步提高,实现产业的集约化发展。

## 四、 化学工业绿色制造产业链接技术

随着化工行业的快速增长,资源和能源的大量消耗构成了经济和社会可持续发展的最大障碍。为此,强调节能减排,将化工行业内部、化工行业与其他行业、化工行业与社会之间的废弃物资源化,

再利用、再循环，创建资源节约型企业和建设循环型社会是绿色制造和可持续发展的必经之路。

### （一）产业内全生命周期产业链的构建

化工行业是能耗高、污染重的产业之一，为实现化工行业的绿色制造，绿色发展理念应贯穿“资源—过程—产品—应用”等全生命周期的生产流程。

#### 1. 资源

提高资源利用效率。例如，在磷化工行业，采用中低品位磷矿选矿富集及利用技术、不可溶钾资源开发技术等，加强中低品位矿产的利用；提高非金属矿产的伴生资源的利用效率，如磷矿中的氟、碘，硫铁矿中的铁。在石油化工行业，应用二氧化碳驱油技术来提高油气的采收率等。

#### 2. 过程

采用节能降耗的新工艺，加强化工工艺水循环，减少水、电、能的消耗。例如，在电石行业，采用氧热法合成电石工艺，可减少对电力的消耗；电石渣浆水的循环利用等。在炼焦行业，干熄焦新技术可以高效回收利用炼焦过程中的余热资源 [12]。

开展化工工业废弃物综合利用，例如，开展废气资源化利用，利用火炬气发电、黄磷炉尾气回收生产 CO、CH<sub>4</sub> 等碳一化学品、电石炉尾气综合利用等；开展废水资源化利用，如高含盐有机废水提取工业副产盐，含酸废水处理回收硫酸铵、氯化铵等；集中治理废水并循环利用，提高水循环利用率，如含酚废水治理回用，高浓度盐水处理回用等。

#### 3. 产品

改进产品性能，推进产品的升级换代。例如，在化肥行业，加强缓释肥、控释肥、散装掺混肥料（BB 肥）、复合肥、花卉草坪专用肥等产品的研发与升级，提高产品的使用性能；在电石行业，采用湿法洗气技术、干法净化技术等，对电石炉气进行净化，提高电石炉气的利用率。

#### 4. 应用

根据使用需求，开展相应的配套服务。例如，在化肥行业，发展测土配方施肥技术、精准施肥技术、变量施肥技术等。

### （二）产业间绿色制造协同发展

调整产业结构，增强协同发展与产业链接。通

过化工行业与其他行业的废弃物、副产物、产品的相互利用，实现企业间、产业间的有机衔接、物料闭路循环，提高化工生产过程中的技术含量与附加值，促进原料投入和废物排放的减量化、再利用和资源化，以及危险废物的资源化和无害化处理 [13]。

（1）将化工行业废弃物、副产物用作其他行业生产原料。例如，在磷化工行业，磷肥生产过程中产生的磷石膏，可用于生产水泥缓释剂、轻质隔热材料等，构建磷矿—磷肥—磷石膏—建材产业链。在石化行业，将精炼石油产品制造、废矿物油再生利用产生的含油（油脂）白土使用蒸汽提取或焙烧分馏处理后，可用作建筑材料。除上述跨行业协同链接外，还可以构建合成氨—造气炉渣—建材，焦化—废渣—水泥，炼化—废气—供热、发电等多种跨行业的协同产业链。

（2）将其他行业废弃物、副产物用作化工行业生产原料。例如，在钢铁行业中，将高炉炼铁过程中产生的高炉渣用于生产硅肥、微晶玻璃等。在采矿行业中，采煤、洗煤过程中产生的煤矸石，可用于生产结晶三氯化铝、硫酸铵、水玻璃等化工产品。在有色行业中，电镀污泥中由于含有大量的铜、镍、铬、铁、锌等贵金属，可用于回收利用生产催化剂、蹂革剂等。

（3）将化工行业的产品用于其他行业。例如，将聚氯乙烯产业链延伸生产农用滴灌器材，带动现代高效农业的发展，形成电石—聚氯乙烯—节水器材—高效农业—食品加工—农业产业化产业链；生产智能化肥，满足现代农业对于精细、高效、氮磷钾等多种营养均衡和固液不同形态化肥的需求；为纺织工业提供化学纤维单体、优质化工原料、染料和印染助剂等化工产品；为光伏产业提供耐用性、柔韧度、弯曲度合适的薄膜材料，以实现薄膜电池片的规模制造。

（4）将其他行业的产品用于化工行业。例如，在采矿行业中提高硫矿、磷矿选矿技术，以提高化工生产过程中的资源利用率等；在化工生产过程中引入大量节能电机、高效节能压缩机等，以降低过程中的能量损耗；采用先进的控制技术，减少过程变量的波动，提高装置运行与产品的稳定性；引入余压余热利用设备与技术，以达到节能减排、降低生产成本的目的。

### （三）产业与社会间的生态链接

在化工产业发展的过程中，将产业发展与城市建设、生态建设有机结合，开展城市废弃物回收与利用项目，将城市废物资源化利用，提高资源的配置效率和城市的整体竞争力。例如，将食品垃圾和草地垃圾在分类后通过微生物技术制造堆肥；将餐厨垃圾通过高温灭菌与发酵，生产饲料添加剂或有机肥料；将秸秆用于生产有机肥料、饲料、生物燃料；利用城市生活有机废弃物生产车用沼气；开展废电池回收利用等。

此外，将化工行业废弃物与城市废弃物统一处理，完善环保设施的布局，做好生产配套和生活服务配套。例如，依托化工生产中的污水、垃圾处理设施解决生活污水、生活垃圾的处理问题；利用水煤浆协同处理高浓度有机废水，将生活污水处理与化工过程相结合；减少小型“三废”处理设施的建设，尽可能依靠、利用和建设大型的“三废”处理系统，提高废物处理的效率，推动城市绿色发展。

## 五、化学工业绿色制造产业链典型案例

本节采用案例的方式，以磷化工为重点，对三类产业链模式的具体应用进行说明。

### （一）产业内绿色制造

某磷化工集团是集磷矿采选、磷复肥、磷硫煤化工、氟碘化工生产、科学研究、国际国内贸易、行业技术与营运服务、国际工程总承包于一体的大型企业。根据减量化、再利用、资源化的 3R 原则，该公司采用先进实用技术改进传统产业，不断调整产业及产品结构，延伸产业链，在提高经济效益的同时，提高了资源生产率，并减少了污染物排放。

该集团产业链涉及磷矿采选与加工—湿法磷酸生产与净化—磷酸盐及精细化学品加工、磷复肥加工—伴生资源综合利用—废弃物资源化利用等多个环节（见图 2）。在产业链改造过程中，采用了低品位硫铁矿制硫酸联产铁精矿技术、中低品位磷矿选矿技术、湿法磷酸高效萃取净化技术、磷酸二铵（DAP）尾气净化联产磷酸一铵（MAP）的清洁工艺、晶体磷酸一铵新技术、高品质白炭黑和氟化铵

技术、磷矿石伴生碘资源回收技术、酸性废水选矿技术、磷石膏综合利用项目等多种新技术。

通过各种技术与项目的开展实施，使得该磷化工集团的产业链有效延长，实现了单一磷资源产品结构向磷、氟、碘等多资源产品结构方向发展；资源利用率实现大幅度提高，磷矿石产值、磷资源回收率、氟资源回收率、碘资源回收率等指标均大幅提高，万元产值综合能耗、产品综合能耗降低，在同行业处于国际领先水平；工业“三废”得到有效治理，率先在磷肥行业实现废水“零排放”。

### （二）产业间协同发展

某新型化肥企业主导产品为复合肥、缓控释肥、水溶肥及其他新型肥料，是全球最大的缓控释肥生产基地。通过推广种肥同播、测土配方、科学施肥等技术，并建立农化服务中心，该集团形成了典型的产业间链接模式，即化肥产业与新型农业的链接模式。除了新型化肥、精准施肥、滴灌设施外，该集团还可提供智能化绿色农药产品、养殖业所需的饲料，并为秸秆、废弃农膜和滴灌设施、禽畜粪便、农产品加工废物等农林废弃物的资源化和循环利用提供技术和服 务，将化肥工业绿色化发展与现代农业循环经济进行有效结合。

某 PVC 企业将产业和产品进一步向上、下游延伸，将化工行业与其他行业紧密地链接在一起，构建两条完善的循环经济产业链 [14]：矿产资源开发—电力—电石—聚氯乙烯—节水器材—高效农业—食品加工—农业产业化产业链；工业废渣—水泥建材和废旧滴灌带回收与再利用产业链。这两条产业链将 PVC 行业与现代农业相结合，针对区域农业发展现状以及水资源短缺的瓶颈，将化工行业各类资源的转换效率大幅度提高。

### （三）产业与社会生态链接

某燃料乙醇集团是目前国内历史最长、最具代表性的乙醇生产企业。该集团在燃料乙醇工业中，通过物流（原料小麦、面粉、淀粉浆、酒精糟液等）交换建立了生态联系，形成了典型的行业与社会的链接模式，即生物化学产业与社会的链接模式。以麦田为始端，形成了麦田→麸皮生产企业→谷朊粉厂→燃料乙醇厂→DDG 厂→沼气厂→有机肥厂→污水综合处理厂；燃料乙醇厂→CO<sub>2</sub>→可降解塑料



厂等多条生态工业链,各链条均以环境综合治理系统为终端。各条生态工业链之间通过物质、能量、信息流动和共享,彼此交错、横向耦合,形成了燃料乙醇生态工业系统。

## 六、结语

本文从我国化学工业绿色制造的现状出发,提出我国化学工业绿色制造的发展方向,并在此基础上深入探讨了构建化工绿色制造产业链的模式与技术,并通过典型案例对产业链接模式进行了阐述。除了化工行业内的产业链的构建,化工行业还应与其他行业,与社会通过产品、副产物、废弃物等进行有机链接和协同发展,参考典型企业的发展模式,在原料、过程、产品、产业、生产、企业等多方面实现绿色发展。

### 参考文献

- [1] 王枫,孙代秋.谈在化工机械行业中实施绿色制造的策略[J].中国石油和化工标准与质量,2013(22):39.  
Wang F, Sun D Q. Strategy of green manufacturing in chemical machinery industry [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2013 (22): 39.
- [2] 冯飞.推动工业绿色化 促进产业转型发展[J].中国信息化,2016(2):7-9.  
Feng F. Promote industrial greening, promote industrial restructuring and development [J]. Chinese Informatization, 2016 (2): 7-9.
- [3] 陈晓隆.绿色化学化工的现状与发展研究[J].黑龙江科学,2014,5(3):282.  
Chen X L. Present situation and development of green chemistry and chemical engineering [J]. Heilongjiang Science, 2014, 5(3): 282.
- [4] 胡山鹰,陈定江,金涌,等.化学工业绿色发展战略研究:基于化肥和煤化工行业的分析[J].化工学报,2014(7):2704-2709.  
Hu S Y, Chen D J, Jin Y, et al. Research on green development strategy of chemical industry: Based on the analysis of chemical fertilizer and coal chemical industry [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2014 (7): 2704-2709.
- [5] 刘雷.面向绿色制造的中国化工现代化[J].科学与现代化,2015(4):9.  
Liu L. Modernization of China's chemical industry facing green manufacturing [J]. Science and Modernization, 2015 (4): 9.
- [6] 井博勋,苕菲.浅议绿色化工技术在化学工程工艺中的应用[J].天津化工,2015(3):10-11.  
Jing B X, Ju F. Application of green chemical technology in chemical engineering process [J]. Tianjin Chemical Industry, 2015 (3): 10-11.
- [7] 姚建华,徐雯丽,蒋舒仰,等.智能技术在绿色化工中的应用[J].上海化工,2016(10):19-26.  
Yao J H, Xu W L, Jiang S Y, et al. Application of intelligent technology in green chemical industry [J]. Shanghai Chemical Industry, 2016 (10): 19-26.
- [8] 国家统计局.2016中国工业统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2016.  
National Bureau of Statistics. 2016 China industry statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.
- [9] 国家统计局.2011中国环境统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2011.  
National Bureau of Statistics. 2011 China statistical yearbook on environment [M]. Beijing: China Statistics Press, 2011.
- [10] Govindan K. Green sourcing: Taking steps to achieve sustainability management and conservation of resources [J]. Resources Conservation & Recycling, 2015 (104): 329-333.
- [11] 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.
- [12] 上官方钦.炼焦化学工业绿色发展工程科技战略[J].钢铁,2015,50(12):11-18.  
Shangguan F Q. Scientific strategy of coking industry green development [J]. Iron & Steel, 2015, 50(12): 11-18.
- [13] Tian J, Guo Q, Chen Y, et al. Study on industrial metabolism of carbon in a Chinese fine chemical industrial park [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 47(2): 1048.
- [14] 曹潭洲.化工行业绿色制造、绿色再造之路[J].通用机械,2013(9):26-28.  
Cao T Z. Green manufacturing and green rebuilding in chemical industry [J]. General Machinery, 2013 (9): 26-28.