

推进绿色制造 建设生态文明 ——中国绿色制造战略研究

“中国工程院绿色制造发展战略研究”课题组

摘要: 我国正处于制造大国迈向制造强国的重要历史阶段, 在绿色发展理念的指导下, 如何推进制造业与生态环境的协调发展, 促进工业文明与生态文明和谐共生, 是当前亟待解决的现实问题。绿色制造是制造强国建设的必有之意, 是生产方式转变的重要着力点, 更是绿色发展的重要组成部分, 涵盖了低碳发展和循环发展的全部内容。本文在明晰绿色制造与生态文明建设关系的基础上, 深入阐述了绿色制造的科学内涵、目标和评价体系, 基于我国绿色制造已取得的成绩和现实发展困境, 提出了推进我国绿色制造的战略方向, 最后从顶层设计、队伍建设、创新体系、服务平台、体制机制及国际合作等方面给出了政策建议。

关键词: 生态文明; 绿色制造; 工程科技; 战略对策

中图分类号: T-01 **文献标识码:** A

Advancing Green Manufacturing for Ecological Civilization: Research on Green Manufacturing Strategies in China

The Research Group for Research on Green Manufacturing Strategy

Abstract: China is going through an important historical stage as it transforms from a large country with manufacturing industry into a global manufacturing power. With the guidance of green development concept, China must explore strategic issues on advancing the coordinated development between manufacturing industry and ecological environment, for the harmonious coexistence between industrial civilization and ecological civilization. Green manufacturing is a critical focus in the construction of manufacturing power and in the transformation of production modes. Moreover, green manufacturing is an important part of green development. Green manufacturing contains low carbon development and circulation development. This paper elaborates on the scientific implications, targets and evaluation system of green manufacturing, on the basis of clarifying the relationship between green manufacturing and ecological civilization. The authors then put forward the strategic direction and major projects for green manufacturing, based on the achievements and difficulties of the current development. Policy implications are provided from the aspects of top-level design, team construction, innovation system, service platform, system and mechanism, and international cooperation.

Keywords: ecological civilization; green manufacturing; engineering science and technology; strategic countermeasures

收稿日期: 2017-04-25; 修回日期: 2017-05-16

联系人: 杨艳, E-mail: yycasw13@163.com

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)

本刊网址: www.enginisci.cn

改革开放以来，高速增长的工业经济取得了举世瞩目的成就，但与此同时，高消耗、高排放、低效率的粗放式增长方式，也带来了一系列严重的资源、环境、生态及社会民生问题 [1]。如何破解经济增长与生态环境保护之间的矛盾，实现高效、清洁、低碳、循环和可持续发展，促进工业文明与生态文明的和谐共生，是当前亟待解决的现实问题。为了破解发展难题，建设美丽中国，党的第十八次全国代表大会提出“大力推进生态文明建设”，并将其纳入“五位一体”中国特色社会主义事业总体布局，其本质就是加快转变经济发展方式、提高发展质量和效益，实现绿色发展；之后，第十八届中央委员会第五次全体会议进一步提出“创新、协调、绿色、开放、共享”的五大发展理念，明确绿色发展的目标、原则、重点任务、实现路径和保障措施，为解决上述一系列不可持续发展的的问题指明了方向和道路 [2]。

一、生态文明建设与绿色制造

生态文明是继原始文明、农业文明和工业文明之后的一种新型文明形态 [3]，其核心是“天人合一”，强调人与自然和谐共生及人类社会的可持续发展 [1,2,4]。由此可以看出，生态文明建设并非仅指保护生态环境，而是转变传统发展模式，建立人与自然平衡的内生机制；在保护生态环境的同时，学习、效法自然生态规律，构建新的人类社会生态，从而实现人类社会的可持续发展。

绿色、低碳、循环发展是生态文明建设的主要原则和方向。其中以绿色发展为首要和根本，低碳、循环发展则是绿色发展的重点和途径。广义的绿色发展涵盖了低碳、循环发展的全部内容，以人与自然和谐共生为价值取向，强调通过转变生产、消费方式，实现人类可持续发展。

实体经济是财富之源，制造业为立国之本。中华民族的伟大复兴有赖于制造强国的建设，绿色制造则是强国建设的重要着力点，是我国绿色发展的重要组成部分 [2]。《中国制造 2025》明确提出，全面推行绿色制造，实施绿色制造工程，并将其列入九大战略任务、五个重大工程之中。首先，以制造业绿色改造升级为重点，实施生产过程清洁化、能源利用低碳化、水资源利用高效化和基础制造工艺

生态化，推广循环生产方式，培育增材制造产业，强化工业资源综合利用和产业绿色协同发展；其次，大力推动绿色制造关键技术的研发和产业化，重点突破节能关键技术装备，推进合同能源管理和环保服务，发展壮大节能环保产业；最后，全面推进绿色制造体系建设，以企业为主体，加快建立健全绿色标准，开发绿色产品，创建绿色工厂，建设绿色园区，强化绿色监管和示范引导，推动全面实现制造业高效清洁低碳循环和可持续发展，促进工业文明与生态文明的和谐共生。

二、绿色制造的内涵、目标和评价体系

（一）绿色制造的内涵

作为绿色发展重要组成部分的绿色制造，其本质是具有环境意识的制造，或称考虑环境的制造。它是一种综合考虑人们的需求、环境影响、资源效率和企业效益的现代化制造模式，是具有良心、社会责任感、处事底线的可持续发展制造模式。

（二）绿色制造的目标

绿色制造的目标是：使产品在从设计、制造、使用到报废的全生命周期中，对自然环境的影响降到最小，对自然生态无害或危害极小，使资源利用率最小，能源消耗最低。以流程制造为例，图 1 展示了绿色制造理念下钢铁制造流程功能的演进趋向。

绿色制造模式是一个闭环系统，也是一种低熵的产品生产制造和使用模式。必须在整体论和系统工程的视野下，综合考虑和解决产品的原料制备—加工制造—使用维修—产品的报废—二次资源回收利用等环节中一系列关于环境的问题，通过提升产品质量和性能、延长产品寿命、降低产品制造的物质和能量消耗，同时加强各行业间、行业与社会间的生态链接（见图 2），以此实现环境成本的最小化影响。

（三）绿色制造评价体系

上述目标可概括为产品绿色化、过程生态化、产业循环化和行业智慧化四个重点方面。围绕这四个重点方面，可分别用绿色度、低碳度、循环度和智慧度对制造业是否达到绿色发展进行定量评价 [5]。

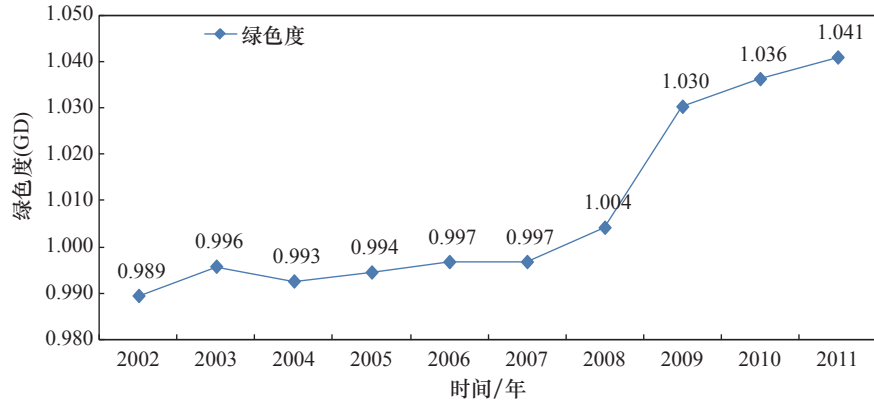


图3 2002—2011年我国水泥工业绿色度的变化趋势

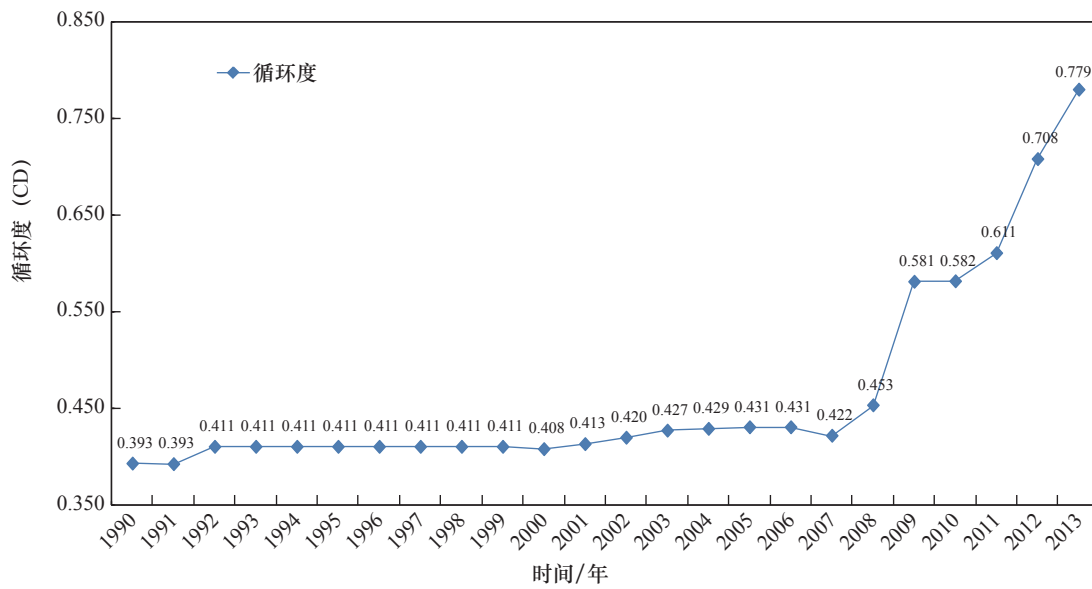


图4 1990—2013年我国水泥工业循环度的变化趋势

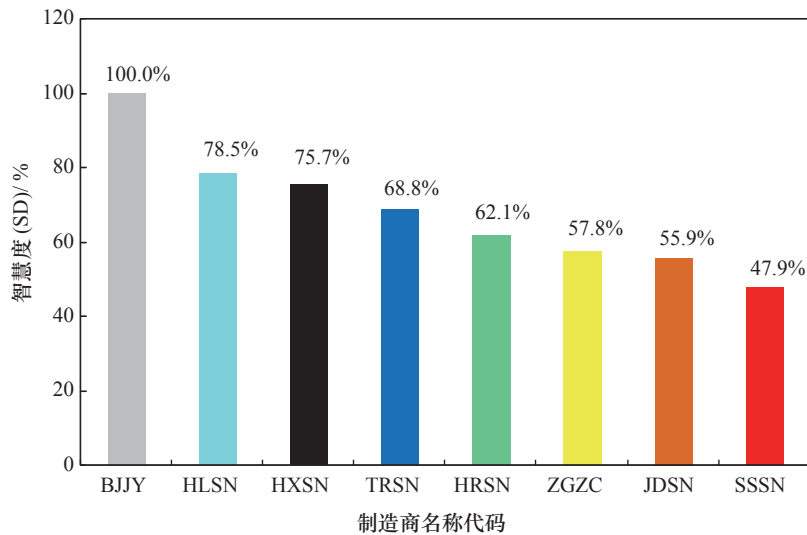


图5 2015年我国主要水泥制造企业的智慧度

注: BJJY: 北京金隅股份有限公司; HLSN: 海螺水泥有限公司; HXSN: 华新水泥股份有限公司; TRSN: 天瑞水泥集团有限公司; HRSN: 华润水泥控股有限公司; ZGZC: 中国中材集团有限公司; JDSN: 冀东水泥股份有限公司; SSSN: 山水水泥集团有限公司。

建材等传统制造业内部结构逐渐优化。

2. 资源能源综合利用水平持续提升, 绿色发展能力明显增强

“十二五”期间, 全国规模以上工业单位增加值能耗降幅超过 28%, 对全社会节能目标的贡献率达 80% 以上。化工、建材、钢铁和有色金属四大高载能行业能源消费量占全社会比重一直呈下降态势。工业节能、节水、资源综合利用、环保、废水循环回用等关键成套设备和装备产业化示范工程积极推进, 节能环保产业快速发展。2015 年我国大宗工业固废(不含废石)产生量为 3.78×10^9 t, 综合利用量达 1.74×10^9 t, 同比增长 6×10^8 t 以上, 综合利用率达 50%, 同比提高 10%。

3. 绿色清洁生产深入推进, 污染物排放总量持续下降

“十二五”前四年, 工业二氧化硫、氮氧化物、化学需氧量和氨氮排放量分别下降 6.66%、4.15%、28.40% 和 15.02%, 提前一年完成减排目标。清洁生产基础能力明显增强, 清洁生产咨询机构数量大幅增长。在中央财政清洁生产专项资金的支持下, 清洁生产标准体系逐步完善, 一批成熟的清洁生产先进技术、工艺得到有力普及和推广。

4. 全生命周期理念推广, 统一的绿色产品体系逐步构建

初步建立工业产品绿色设计推进机制。开展产品生态设计试点, 逐步完善产品生态设计标准体系。工业和信息化部、发展和改革委员会、环境保护部三部委首次发布《关于开展工业产品生态设计的指导意见》, 研究制定汽车、电子电气产品、建材、日化等典型产品的生态设计评价标准。大力推广无毒无害或低毒低害的绿色原料和产品, 减少含汞、六价铬、铅、镉、砷、氰化物及持久性有机污染物等有毒有害物质的使用。

5. 绿色制造政策体系全面推进

“十二五”期间, 先后发布实施《工业转型升级规划(2011—2015)》《工业节能“十二五”规划》《工业清洁生产推行“十二五”规划》《大宗工业固体废物综合利用“十二五”规划》和《环保装备“十二五”发展规划》等专项规划; 2015 年 5 月, 开始实施制造强国战略的第一个十年行动纲领《中国制造 2025》。

“十三五”开局之年, 工业和信息化部又先后

发布实施《工业绿色发展规划(2016—2020 年)》《绿色制造 2016 专项行动实施方案》和《绿色制造标准体系建设指南》等。

(二) 我国绿色制造存在的问题和挑战

我国绿色制造虽已取得重大进步和可喜成绩, 但依然大而不强, 制造工艺技术和装备高投入、高消耗、高污染、低水平、低效益等问题依然存在, 先进高效的绿色制造技术及装备发展滞后, 直接影响我国制造业的可持续发展。概括而言, 当前我国制造业绿色发展尚存在以下主要问题和挑战。

(1) 自主创新能力薄弱, 整体技术水平仍有待提高。我国制造业人员素质和工艺技术水平整体不够高, 产品质量相比发达国家尚有差距。

(2) 供给侧改革任务艰巨。当前我国制造业产能过剩, 供过于求的现象十分严重。结构调整、节能转型升级及落后产能的淘汰速度不快, 落后产品导致行业整体价格下降, 企业亏损严重, 无力实施升级改造。

(3) 资源能源消耗、污染物排放总量仍然较大。我国制造业整体呈现“两高一低”的特征, 资源消耗高, 环境污染严重, 产品却处于价值链的中低端。

(4) 智能制造的水平偏低。我国制造业整体信息化水平偏低, 数字化、自动化、信息化水平及资源利用率有待进一步提高。

(5) 体制、机制有待改进。现有的一些绿色考核机制、制度体系、激励机制尚不适应制造业绿色转型发展的需求。如标准规范执行不严, 核查机制尚未建立, 环保执法不公造成企业间不公平竞争等。

(三) 推进我国绿色制造的工程科技战略方向

基于新常态下我国制造业供给侧改革、转型升级、节能减排等方面的问题, 提出分阶段推进我国绿色制造的工程科技战略方向。

1. “十三五”时期

大力推进能效提升, 大幅减少污染排放, 加快实现节约发展; 加强资源综合利用, 持续推动循环发展; 削减温室气体排放, 积极促进低碳转型; 实施绿色制造 + 互联网, 提升制造业绿色智能水平。

2. “十四五”时期

以近零排放为目标, 推行集约、循环和耦合共生方式, 大力发展绿色园区; 以打造绿色工厂、产

品、园区、供应链为主要内容，强化绿色监管，全面构建绿色制造体系；基于信息物理系统、云计算、物联网等相关技术的成熟，全面建设智能化绿色制造工厂；推广、完善基于工业互联网的装备智能化、绿色化水平，大力发展绿色智能装备。推进我国绿色制造的代表性科技重大工程见表 1。

四、政策建议

当前，我国正处于制造大国迈向制造强国的重要历史阶段 [6]，在绿色发展理念的指导下，应全力推进制造业与生态环境的协调发展。因此，现阶段需要明确主要矛盾，突出重点，努力转变制造业高消耗、高排放、低效率的粗放增长方式，走资源节约、环境友好的绿色发展之路。

（一）做好绿色发展顶层设计、分级领导与实施

从顶层战略高度确立生态文明建设在制造业可持续发展过程中的战略地位。深化生态文明体制改革

革，加快编制自然资源负债表，实行资源有偿使用制度和生态补偿制度，推动制造业发展与资源、生态、环境之间平衡关系的建立。加快推进供给侧改革，促进制造业结构调整与绿色转型升级。

重点培育利于资源节约、循环利用、生态修复、环境保护的战略性新兴产业发展；大力推进传统制造业的结构性转型升级，加速淘汰落后产能，通过结构优化、技术创新和管理升级等手段，最大化提升能效和减少污染；建设生态工业园区和绿色产业链，实施产品全生命周期内各个环节的工艺技术改造和绿色管理。

研究、制定全面的绿色制造评价指标体系。在《中国制造 2025》已有的典型流程工业绿色制造评价指标体系研究成果的基础之上，加快进一步研究、制定从宏观（国家）至中微观（区域、企业）、从全行业到特定行业的全面绿色制造评价指标体系，并建立分级绿色制造实施效果评估制度。

加强绿色制造领导队伍建设。成立国家—区域—行业、企业层面的各级领导小组，分级实施绿色制

表 1 推进我国绿色制造的代表性科技重大工程

时间段	行业分类	重大工程内容
“十三五”时期	典型流程工业	过程工业窑炉尾气净化及高效一体化综合利用工程
		流程工业绿色制造短流程工程
		流程工业的能源综合利用系统工程
		与新型农业循环发展模式衔接的化肥产业创新工程
		沿海钢铁—石化—建材基地循环经济示范工程
		与城市共生的钢铁、建材企业示范工程
		数字化制造工程
	装备制造业	智能化制造试点示范工程
		石化机械在役再制造工程示范基地
		过程工业装备网络化健康能效监测诊断示范基地
		基础制造工艺及装备应用示范工程
		专业化基础制造工艺中心工程
		绿色化数字化车间 / 工厂工程
		基础制造工艺循环再利用处理中心工程
“十四五”时期	典型流程工业	工业绿色评估工程
		军工领域国产数控系统“换脑工程”
		绿色再制造领域推进先进技术应用工程
	装备制造业	流程工业资源高效利用重大工程
		流程工业物质流、能量流、信息流协同优化重大工程
		绿色基础制造工艺及装备工程
		绿色制造评估认证监督工程
		绿色再制造应用示范工程
		智能、高端装备再制造技术创新工程

造工程,将绿色制造成效与各级领导干部的政绩考核直接挂钩,并实行终身负责制,以此可借助区域辐射效应和行业“标杆”效应,带动相关区域、行业的绿色制造水平。

(二) 大力推进科技创新体系与服务平台建设

深化科技体制改革,加强创新体系建设,促进产学研用结合和跨领域的协同创新。促进“开放式创新”,全面提高企业的主体创新意识和自主创新能力;加强科研与工艺技术设计、工程化的结合,鼓励科技成果产业化和搭建多种形式的创新联盟(包括国内外交流合作平台,支持融合创新)。

加大对关键技术的攻关力度。针对行业内的关键技术和瓶颈问题,政府应支持、引导科研院所、行业协会和企业进行联合攻关,可鼓励协会中介组织,实行难题招标,组织力量攻关,由政府和企业落实购买服务;鼓励企业建立研发机构,开展成果工程化研究[7]。例如,流程工业机械装备机械故障诊断基础研究薄弱,缺乏智能连锁保护、重大事故预防和先进的优化综合控制系统,对稳定运行影响很大,此类技术瓶颈问题亟待解决。

加大科技服务平台的建设。强化政府在推动工程科技创新研究方面的作用,由政府与企业共同承担风险,构建和重组一批工程科技创新平台;推进绿色制造科技创新与信息、金融的深度融合,着力搭建好智能管理技术平台、绿色检测平台、绿色创新平台及绿色发展投融资平台,为核心技术自主创新、智能化绿色制造工厂和低碳、循环经济产业链的构建创造条件。

(三) 突破制造业与生态环境融合发展的体制障碍,创新体制机制建设

完善绿色制造重点领域的法律法规政策体系和标准。重点加快推进《能源法》的立法进程,尽快制定《低碳发展促进法》《排放权交易法》等法律法规,不断完善《循环经济促进法》等法律法规的配套措施、实施细则和实施机制;制定完善节能评估审查、应对气候变化、土壤环境保护、节水和排污许可、生态补偿、生态环境损害赔偿等方面的法律法规,为绿色发展提供有力的法治保障;不断完善制造业生产过程中的工艺规范、技术标准等方面的技术法规。

完善绿色制造相关的市场机制及配套机制。完善和优化财政扶持机制,强化重点绿色制造项目的专项财政扶持措施,进一步发挥好财政政策对智能化绿色制造工厂(大数据、云计算、信息物理系统和物联网等)、重点节能环保技术改造、再制造产品“以旧换新”等绿色发展工程科技项目的支持和引导作用;促进生态环境资本化和资源资本化,积极探索资源使用权交易等市场模式,分阶段逐步建立节能量、碳排放权、排污权、水权的市场交易体系[3,7];完善资源的定价机制,推进价格充分反映矿产资源、水资源、能源的稀缺程度及其使用的社会成本[7];健全有利于绿色制造的相关配套机制,如环保执法监督与社会监督机制,考评机制,问责机制,协调(联动)机制等。

(四) 参与广泛国际合作的同时,走出一条具有中国特色的绿色制造之路

本着“求同存异”的原则,积极参与、推进制造业可持续发展领域内多渠道、多层次、多样化的国际交流与合作,争取国际相关领域的项目支持,引进资金、先进技术和管理经验,为我国绿色制造谋求良好的国际发展空间[7]。

学习借鉴美国、德国、日本、欧盟等发达国家和地区在推行绿色制造(包括生态设计、产品环境足迹标准化等)方面的成功经验;在消化吸收国外经验、技术的基础上,因地制宜,逐步走出一条具有中国特色的绿色制造发展之路。例如,我国在原料均化、协同处理废弃物等方面具有很大的发展潜力。

五、结语

绿色制造是破解制造业与生态环境协调发展难题、促进工业文明与生态文明和谐共生的必由之路。本文以流程型制造、离散型制造为主要研究对象,明确了推进绿色制造对于我国制造强国建设与生态文明建设的重大意义,并就如何推进全面实现制造业高效、清洁、低碳、循环和可持续发展的问题,提出战略方向和对策建议。研究表明,全面推进绿色制造,需要重点做好顶层设计,加强领导队伍、科技创新体系、服务平台和体制机制的建设,还应在参与广泛国际合作的同时,走出一条具有中国特色的绿色制造之路。

参考文献

- [1] 金涌, Arons J. 资源·能源·环境·社会—循环经济科学与工程原理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
Jin Y, Arons J. Resource · energy · environment · society: Scientific and engineering principles for circular economy [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [2] 中国工程院. 制造强国战略研究·绿色制造专题卷 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
Chinese Academy of Engineering. Research on manufacturing power strategy · green manufacturing thematic volume [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.
- [3] 杜祥琬, 温宗国, 王宁, 等. 生态文明建设的时代背景与重大意义 [J]. 中国工程科学, 2015, 17(8): 8–15.
Du X W, Wen Z G, Wang N, et al. The backdrop and significance of ecological civilization construction [J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17(8): 8–15.
- [4] 钱易, 何建坤, 卢风. 生态文明十五讲 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
Qian Y, He J K, Lu F. Fifteen lectures on ecological civilization [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2015.
- [5] Xu D L, Cui Y S, Li H, et al. On the future of Chinese cement industry [J]. Cement and Concrete Research, 2015 (78): 2–13.
- [6] 中国工程院. 制造强国战略研究·综合卷 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
Chinese Academy of Engineering. Research on manufacturing power strategy · comprehensive volume [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.
- [7] 傅志寰, 宋忠奎, 陈小寰, 等. 我国工业绿色发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2015, 17(8): 16–22.
Fu Z H, Song Z K, Chen X H, et al. Study on green development strategies for the industry in China [J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17(8): 16–22.