

绿色低碳新兴产业成熟度评价方法研究

孙旭东^{1,2}, 李雪松¹, 张博^{1,2}, 彭苏萍²

(1. 中国矿业大学(北京)管理学院, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 今后 10~15 年是我国加快培育和发展新兴产业的关键时期, 作为我国生态文明建设重要任务的绿色低碳产业发展也将面临重要机遇期。绿色低碳新兴产业以能源新技术、节能环保和新能源汽车为代表, 其细分产业的技术特征、规模和发展程度存在明显的差异性, 亟待开展与之对应的成熟度评价方法研究。本文在归纳产业成熟度评价的基本理论与通用方法的基础上, 明确绿色低碳产业的范畴与定义, 辨识相关产业的高质量发展特征; 提出了绿色低碳产业成熟度评价模型与指标体系, 具体阐述产业成熟度等级合成方法。以生物质热电联产产业为例完成了绿色低碳产业成熟度评价应用研究, 分析认为案例产业发展整体达到了较成熟等级, 但市场成熟度的进展滞后于工程科技进步。研究建议: 建立绿色低碳产业成熟度年度评价机制, 组建绿色低碳产业发展信息的权威发布机构, 加强我国新兴产业数据库建设及客观评价。

关键词: 绿色低碳; 新兴产业; 产业成熟度; 能源新技术; 节能环保; 新能源汽车

中图分类号: T-9; TD-05; F426 **文献标识码:** A

Evaluation Method for the Maturity Levels of Green and Low-Carbon Emerging Industries

Sun Xudong^{1,2}, Li Xuesong¹, Zhang Bo^{1,2}, Peng Suping²

(1. School of Management, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The next 10 to 15 years will be a key period for China to accelerate the cultivation and development of emerging industries. The development of green and low-carbon industries, an important task of China's ecological civilization construction, will face an important period of opportunity. The green and low-carbon emerging industry is represented by emerging energy technologies, energy conservation and environment protection, and new energy vehicles; and there are significant differences in the technical characteristics, scale, and development degree of each subsector. Therefore, research on the corresponding maturity evaluation method is urgently needed. This study first summarizes the basic theory and general method for industry maturity evaluation, then defines the category and definition of green and low-carbon industries, and identifies the characteristics of high-quality development of related industries. Meanwhile, the maturity evaluation model and index system of the green and low-carbon industries are proposed and the calculation method of the industry maturity levels is presented. Moreover, application of the maturity evaluation method of the green and low-carbon industries is studied, using the biomass cogeneration industry as an example. The analysis shows that this industry is relatively mature, but the development of market maturity level is slower than the progress of engineering science and technology. Furthermore,

收稿日期: 2019-12-30; 修回日期: 2020-02-26

通讯作者: 张博, 中国矿业大学(北京)管理学院教授, 研究方向为资源管理与政策、环境与生态管理; E-mail: zhangbo@cumtb.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“新兴产业发展战略研究(2035)”(2018-ZD-12); 中国工程院咨询项目“中国氢能源与燃料电池发展战略研究”(2019-ZD-3); 国家重点研发计划项目“CO₂近零排放的煤气化发电技术”(2017YFB0601900)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

we suggest that an annual evaluation mechanism for the maturity level of the green and low-carbon industries should be formed, an authoritative institution for publishing the development information of these industries should be established, and the database construction and objective evaluation of China's emerging industries should be strengthened.

Keywords: green and low-carbon; emerging industry; industry maturity level; emerging energy technology; energy conservation and environment protection; new energy vehicle

一、前言

加快建立绿色生产和消费的法律制度和政策导向, 建立健全绿色低碳循环发展的经济体系, 促进绿色低碳成为经济增长新动能, 成为新时期绿色低碳产业的发展方向, 也是生态文明建设的重要任务 [1]。“十三五”时期, 以能源新技术、节能环保、新能源汽车为代表的绿色低碳新兴产业快速发展 [2]。我国绿色低碳新兴产业具有鲜明的行业特色, 同时核心技术水平、制造能力与市场、产业规模等方面的发展成熟程度也存在明显的差异 [3,4]。科学辨识绿色低碳产业成熟度水平有利于科学判断产业共性与差异性特征, 进而为指导行业发展提供决策依据。

产业成熟度概念在 2015 年首先由中国工程院新兴产业战略研究课题组提出, 是指通过构建评价指标体系来度量或评估新兴产业的发展阶段或所处的生命周期。2016 年, 王礼恒等 [5] 在技术成熟度 [6]、制造成熟度 [7] 的基础上, 通过引入市场成熟度建立了新兴产业成熟度评价方法, 建立了新兴产业成熟度评价研究的理论基础。

2017 年孙旭东等 [4] 将成熟度方法扩展到能源产业, 通过区分能源利用及转化与传统工业制造的差异性来重新阐述了产业产品的定义, 并基于多技术和多产品视角建立了能源领域产业成熟度评价指标体系。在整体上, 产业成熟度理论研究框架已形成, 评价要素涵盖了技术、产品 (制造) 和市场 3 个基本方面, 适用于各领域新兴产业发展的战略分析与评价研究 [8]。然而, 由于不同领域或产业间存在差异性, 该基础研究框架缺乏关于领域特征和产业属性的分析以及对新时期国家战略需求、国际形势等方面的考虑。因此, 建立通用的绿色低碳产业成熟度评价方法已成为亟待解决的问题。

鉴于当前绿色低碳产业成熟度评价理论方法较为缺乏, 本文基于产业成熟度评价的基本理论与通用方法, 在识别绿色低碳产业特征的基础上, 结合

产业发展趋势和国际新环境, 建立绿色低碳产业成熟度评价方法, 并选取代表性案例开展应用研究。

二、产业成熟度评价基本理论与方法

(一) 基本理论

产业成熟度评价体系的理论框架如图 1 所示, 由产品成熟度 (技术成熟度、制造成熟度合成) 和市场成熟度 (可建立多维评价指标体系) 两个子系统组成, 评价指标主要采用定性分级评价 [2,4,5], 即基于指标打分实现的产业成熟度定量化研究。该评价体系框架对于新兴产业具有通用性, 可以广泛应用于不同领域、不同范畴的产业成熟度评价研究。

研究产业范畴选择具有随机性, 使得在不同细分产业研究情形下产业的核心技术、产品和市场划分等具有不确定性, 显著增加了研究复杂度; 用单一的技术、产品和市场难以描述不同领域产业的特征, 如能源领域需要多技术和多产品的评价体系 [9]。因此, 为适应产业发展环境变化和满足不同产业的评价需求, 在推广应用时一般需要在此理论框架基础上适当进行调整或扩展。

(二) 常规应用方法

为保证研究的规范性, 文中给出了成熟度评价方法应用的一般操作流程 (见图 2)。其中, 评价准备工作的重点内容是明确评价对象和产业核心要素, 具体包括定义产业对象、识别核心技术与关键产品以及划分市场三方面。首先, 根据研究需要,

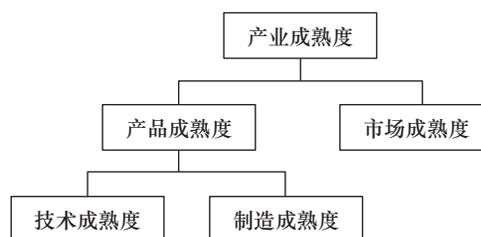


图 1 产业成熟度评价体系基本理论框架

确定待评估产业对象，明确产业的范畴及研究时间；其次，根据产业特点和发展现状来确定产业的核心技术和产品（设备、装备或终端产品及零部件）；最后，明确市场划分，默认将每种产品划分成一个市场，再根据产品的竞争关系来判断相关产品是否需要合并为同一市场。

完成准备工作后进入评价组织过程，为体现方法应用的灵活性，文中仅给出必要环节，包括修正完善成熟度评价指标体系（针对细分产业特点可建立有差异性的子层指标）、组织业内专家对评价指标与权重打分（可以开展多轮次的网上、电话、现场等形式的咨询或问卷调查）、形成评价报告（数据检验与统计分析及其合理性论证）等关键环节。

三、绿色低碳新兴产业的范畴与特征

（一）产业定义

2016年，国务院印发《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》，首次将绿色低碳产业划分为新能源汽车、新能源和节能环保产业。2019年，国家发展和改革委员会等联合印发了《绿色产业指导目录（2019年版）》，重点界定了节能环保、清洁生产、清洁能源等绿色产业的范畴，进一步厘清了绿色低碳产业的边界。

绿色低碳新兴产业是指以绿色低碳技术创新和应用为重点内容的新兴产业，产业范畴主要包括能源新技术、节能环保产业和新能源汽车领域的新兴产业 [1]。绿色低碳产业的分类和范畴见表 1。

（二）产业高质量发展特征

根据全球能源变革的发展趋势和我国产业绿色转型的发展要求，着眼生态文明建设和应对气候变化，发展绿色低碳新兴产业契合新时代能源新技术、节能环保和汽车产业的高质量发展需求。

绿色低碳技术中的绿色是指资源的开采 / 生产、利用转化、消费使用全过程清洁化。利用清洁的能

源、实现资源的清洁开发利用是解决环境污染问题、发展绿色低碳新兴产业的核心目标之一。高效体现了新兴产业高质量发展的要求，提升能源和矿产资源开发利用效率并减少资源浪费，进一步缓解可再生能源弃风弃光问题仍然是绿色低碳产业的重点发展任务。低碳是绿色低碳产业的另一个核心特征。新兴产业各领域高度重视低碳、零碳技术发展，例如，在供应端重点发展核能、可再生能源、氢能与燃料电池等零碳新能源产业，在使用或消费端重点推进碳捕获、利用与封存（CCUS）技术、节能减排技术和电驱动汽车技术等。

我国已建成世界上规模最大的绿色煤电体系，新能源发电规模和年装机量全球领先，清洁能源消

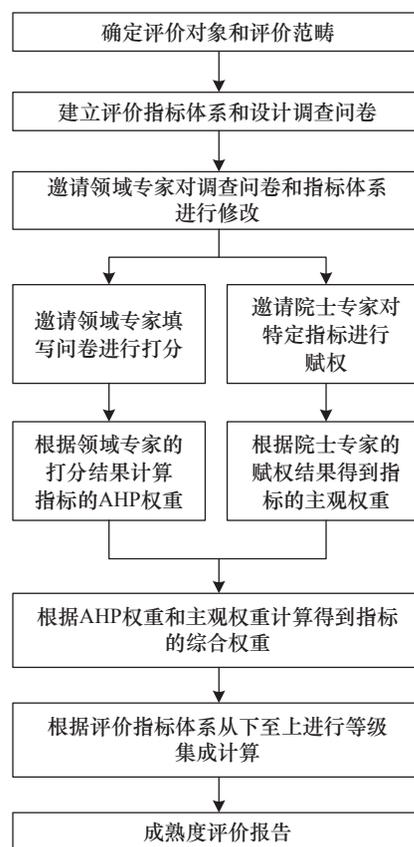


图 2 产业成熟度评价流程
注：AHP 为层次分析法。

表 1 绿色低碳产业的分类与范畴

子领域	细分产业
能源新技术	煤炭清洁高效利用产业、非常规油气产业、能源互联网与综合能源服务产业、核能产业、可再生能源产业等
节能环保	节能产业、环保产业、资源循环利用产业等
新能源汽车	纯电动汽车产业、插电式混合动力汽车产业、燃料电池汽车产业等

费比例不断提升。2018 年, 80% 的煤电机组实现超低排放, 6000 kW 及以上功率的火电机组供电煤耗下降到 308 g/(kW·h); 天然气、水电、核电、风电等清洁能源消费量占到能源消费总量的 22% [10]。“十三五”时期, 节能环保产业进入了高速发展期, 产业规模、产业结构、技术水平和市场化程度都得到大幅提升, 发展成为产业门类基本齐全、具有一定经济规模的产业体系 [1]。节能环保在产业发展模式创新、体制机制创新、技术研发培育等方面取得了一些成功的经验。2018 年, 中国新能源汽车产量和销量分别达到了 127 万辆和 125.6 万辆, 保有量近 300 万辆, 我国已成为新能源汽车发展最快、产量最高、保有量最多的国家 [3]。

国际合作环境不断发生变化, 核心技术自主可控、产业链安全已成为我国各领域新兴产业发展追求的共性需求。能源新技术、节能环保和新能源汽车等新兴产业不仅要面对生产安全问题, 还要应对新时期核心装备、关键材料与零部件的供应安全以及产业科技体系安全等广义安全问题的挑战。

四、绿色低碳产业成熟度评价模型与指标体系

(一) 评价指标构建原则

1. 统一性与继承性

为保证产业成熟度评价的统一规范, 文中重点

开展扩展性研究, 即技术成熟度和制造成熟度等指标参照了文献 [4] 的等级划分与评价标准。

2. 突出绿色低碳特征

准确识别绿色低碳产业高质量发展的共性特征, 根据绿色低碳产业特点和新时期产业发展需求, 结合绿色低碳产业发展目标和重点任务, 扩展和完善了成熟度指标体系。

3. 全产业链过程分析

为进一步完善产业评价在非制造类产业的适用性, 文中指标构建从全产业链过程视角展开, 例如产品的定义不限于产业终端产品或核心零部件, 全产业链中用于制造或生产的设备/装备、核心零部件也纳入产业的核心产品范围。

(二) 评价指标体系

1. 指标体系结构与成熟度等级划分

图 3 给出了绿色低碳产业成熟度评价指标体系层次结构, 分为产品、市场和高质量发展 3 个评价子系统, 由此体现对基本理论框架(见图 1)的扩展。其中, 产品和市场评价体系采用了多技术、多产品和多市场的划分方法 [9]; 高质量发展成熟度是根据绿色低碳产业发展特征新增的指标, 由产业清洁、高效、低碳和安全的多层评价指标体系构成。

文中成熟度等级划分不同于文献 [5] 中的生命发展周期等级描述(萌芽、培育、发展和成熟), 而采用了表述成熟程度更为通用的语言描述, 设

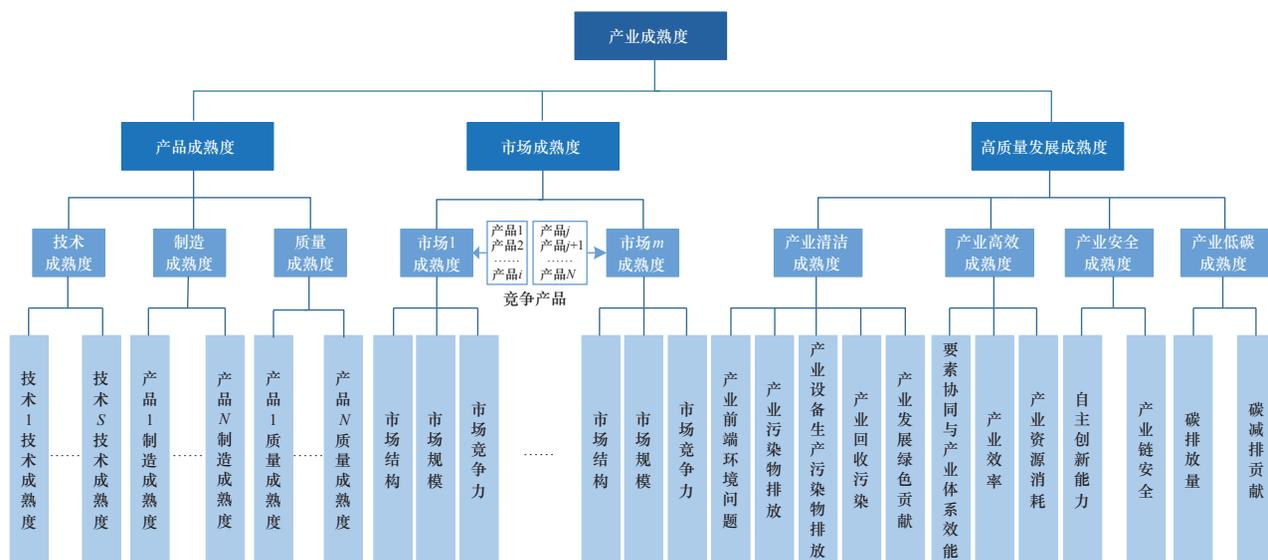


图 3 绿色低碳产业成熟度评价指标体系

计为成熟、较成熟、较不成熟和不成熟 4 个等级，更适宜于子层评价指标的等级划分与专家实际打分操作。

2. 产品成熟度指标与评价准则

产品成熟度 (PRL) 是对技术、制造和产品质量三方面成熟度评价结果的合成，不仅展现具体产品的成熟表现，还要考虑产业整体的技术和制造情况。技术成熟度 (TRL) 是对技术研发成熟程度的度量。制造成熟度 (MRL) 是衡量产业终端或中间环节的产品、设备或装备 (含零部件) 的制造能力。根据美国国防部 9 级技术成熟度和 10 级制造成熟度设定，具体等级评价标准参考文献 [4]，技术和制造成熟度等级与成熟度语言描述等级对应关系见表 2。

质量成熟度 (QML) 是从品质功能、使用及售后服务等方面开展产品综合质量的评估，具体评价

表 2 技术成熟度和制造成熟度等级集成规则

成熟度等级	技术成熟度	制造成熟度
不成熟	TRL1	MRL1
	TRL2	MRL2
	TRL3	MRL3
	TRL4	MRL4
	TRL5	MRL5
	TRL6	MRL6
较不成熟	TRL7	MRL7
	—	MRL8
较成熟	TRL8	MRL9
成熟	TRL9	MRL10

见表 3。

3. 市场成熟度

市场成熟度 (MML) 根据具有竞争关系的产品来划分子市场，以细分市场作为评价对象，综合衡量各个细分市场在规模、结构和竞争力方面的发展水平，具体指标体系见表 4。

4. 高质量发展成熟度评价

高质量发展成熟度评价包括清洁、高效、低碳和安全 4 个维度，具体评价指标体系见表 5。产业清洁成熟度 (CML) 是从全产业链角度衡量产业绿色生产的发展情况，包括了产业链前端装备清洁制造和后端装备废弃的全产业过程评估。产业高效成熟度 (EML) 是对产业生产、资源消耗等资源利用转化效率以及产业要素协同、产业体系效能的评价。产业安全成熟度 (SML) 是对产业核心技术自主可控和产业链安全程度的综合度量，不仅包括了产业生产、供应安全和出口安全，而且涵盖了科技创新与产业体系的广义安全概念。产业低碳成熟度 (LML) 是基于产业链的全过程视角，对 CO₂ 排放增量和减排贡献 (减量) 的综合评估。

(三) 产业成熟度等级合成

本文构建的等级合成模型主要使用了综合权重与模糊综合评价方法。权重计算采用了 AHP 与主观赋权相结合的综合权重方法。首先，产业内的技术专家和企业专家组成领域专家组对问卷进行打分，同时各位专家从专业角度出发，通过比较两两指标之间的重要程度，并利用 AHP 方法计算出各

表 3 质量成熟度指标体系

指标名称	指标描述
产品品质	评估产品达到功能参数情况和产品合格率
产品使用可靠性	评价产品故障率、使用年限、使用稳定性等产品使用的综合表现
售后服务	维修、技术更新等售后服务质量

表 4 细分市场成熟度指标体系

指标名称	子类指标	指标描述
市场结构	技术壁垒	产业核心产品市场技术壁垒的发展程度
	市场占有率	在同类竞争产品中的市场占有率及其增长情况
市场规模	收益规模	核心产品项目投资的发展阶段、收益规模大小及其稳定性
	从业人员规模	核心产品企业人员规模大小和稳定性
市场竞争力	国内市场竞争力	在国内同类市场上的竞争能力和稳定发展程度
	国际竞争力	国内市场与国外市场竞争能力和稳定发展程度

表 5 产业高质量发展成熟度评价指标体系

二级指标	子层指标	指标描述 (可适度调整子层指标)	
产业清洁成熟度	产业前端资源开采环节的清洁程度	产业前端资源开采过程产生的环境污染物处置问题	
	核心装备制造环节的清洁程度	产业前端设备(装备)制造过程污染物排放和环境影响情况	
	产业生产运营环节的清洁程度	产业生产运营过程(含建设期)污染物排放和环境影响情况	
	设备报废环节的清洁程度	产业相关建筑、设备(装备)在报废环节对环境的影响情况	
	产业发展绿色贡献	综合衡量产业发展对新能源的使用、生态环境的改善和区域绿色经济的贡献作用	
产业高效成熟度	要素协同与产业体系效能	评估产业内金融、人才、科技等要素之间的协同机制以及产业体系协同创新的整体效能情况	
	生产效率	根据产业情况,评估主要产品的生产、利用或转化效率	
	产业资源消耗	根据产业情况,分析主要资源消耗效率	
产业安全成熟度	科技创新安全	核心自主创新能力	综合评价产业中核心技术的自主研发能力、自主可控程度、技术国际先进水平等自主创新能力与受制于人的程度
		自主科技创新生态环境	科技创新体制、人才激励和产权保护等创新生态环境建设情况
		创新成果转化能力	产业内创新性研究成果向现实成果转化的能力
	产业链安全	生产运营安全	生产制造过程的安全性
		生产投入安全	生产原材料(基础材料、原料)、技术、专利、软件使用等的安全性和稳定性
		产业链核心控制力与进口依存度	产业链中核心设备(装备、软件等)进口依存度和对产业中制定生产与产品标准等的控制力与话语权
产业低碳成熟度	碳排放量	生产运营碳排放量	描述能源生产利用或转换过程中的 CO ₂ 排放量
		产业链非运营碳增量	整个产业前端装备生产或建设过程中的 CO ₂ 产生量
	碳减排贡献	产业碳减排量	研究期内产业对 CO ₂ 减排效果或替代化石能源的碳减排贡献(测算减排量)

指标的权重。其次,由产业专家团队从战略、宏观的角度对指标进行主观赋权。最后,基于 AHP 权重和主观权重加权计算综合权重。

为了最大程度地利用每位权威专家的指标打分信息,文中引入模糊综合评价方法,即根据专家打分结果统计分布来确定评价指标的分级隶属程度。利用隶属矩阵与权重向量由下至上的多级合成来实现产业成熟度的综合评价。图 4 给出了产业成熟度等级合成过程。

1. AHP 指标权重的确定

(1) 专家打分,构造判断矩阵 $A_{n \times n}$

由 k 位 ($k \geq 10$) 领域专家组成的专家组采用 1~9 标度方法,通过对技术之间、产品之间或各层指标之间重要程度的比较打分,可得到判断矩阵 $A_{n \times n}$,其中 n 为判断矩阵中的指标数量。

(2) 层次单排序和权重计算

对任意判断矩阵 A ,计算满足 $AW = \lambda_{\max} W$ 的特征根和特征向量,则最大特征值对应的特征向量

$W_i = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 即为 AHP 权重。

2. 主观权重打分

由 p 位 ($p \geq 5$) 企业、研究机构、政府等业内专家组成产业综合专家组,从战略、宏观的角度对产品、市场和高质量发展成熟度指标(3 个一级指标)进行主观赋值。

3. 计算综合权重

将 AHP 权重和专家主观权重进行修正合成,综合权重计算公式:

$$\bar{w}_i = \frac{w_i \cdot w_i^{\lambda}}{\sum_{i=1}^n w_i \cdot w_i^{\lambda}} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

式(1)中, w_i 为 AHP 方法计算的权重, w_i^{λ} 为指标的主观权重。

4. 确定隶属度矩阵

评价指标成熟度语言等级的隶属程度是根据专

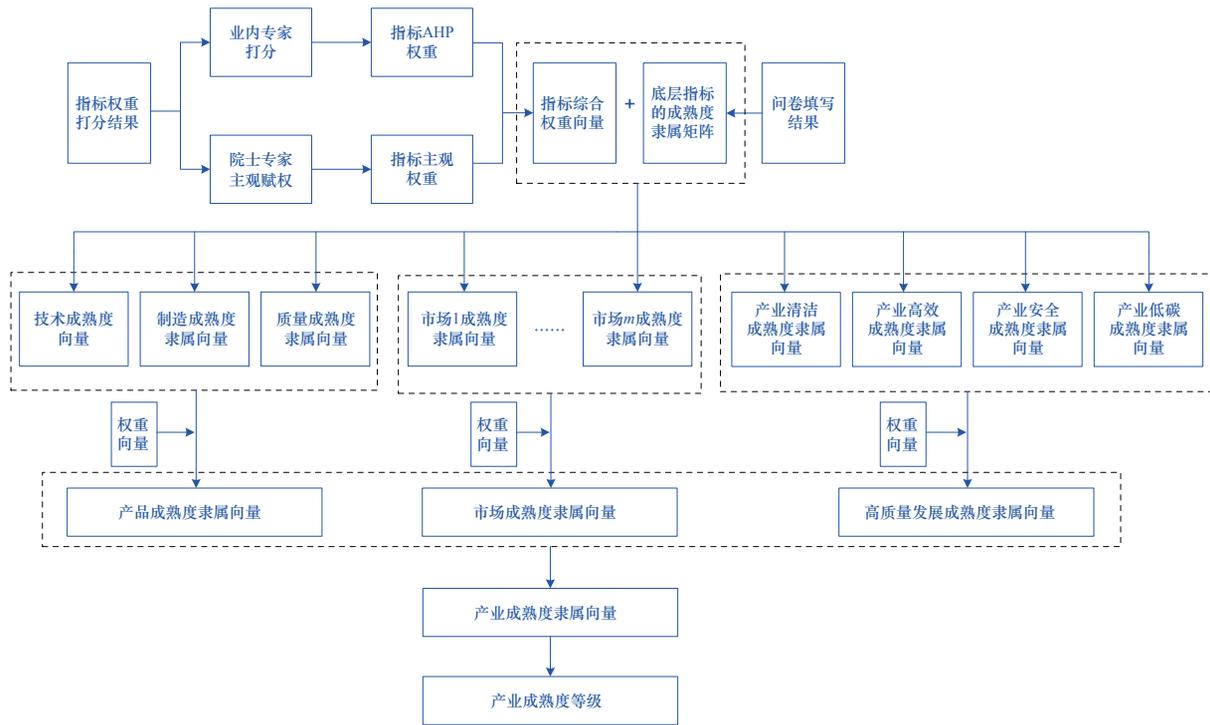


图4 产业成熟度等级合成过程简图

家打分等级分布来确定的，以制造成熟度指标为例，其等级 j 的隶属程度为：

$$RMRL_j = MRL_j / k \quad (2)$$

式 (2) 中， k ($k \geq 10$) 表示领域专家组的专家总数量， MRL_j 为选择 j 等级的专家人数。

为简化描述，将各单层指标成熟度隶属打分为矩阵形式。例如：设有 N 种产品，其 10 级制造成熟度隶属矩阵可记为：

$$RMRL_{N \times 10}^* = \begin{pmatrix} RMRL_{1,1}^* & RMRL_{1,2}^* & \cdots & RMRL_{1,10}^* \\ RMRL_{2,1}^* & RMRL_{2,2}^* & \cdots & RMRL_{2,10}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ RMRL_{N,1}^* & RMRL_{N,2}^* & \cdots & RMRL_{N,10}^* \end{pmatrix} \quad (3)$$

式 (3) 中， $RMRL_{ij}^*$ 表示第 i 种产品的第 j 级制造成熟度的隶属程度。

类似地，可以得到技术成熟度隶属矩阵 $RTRL_{s \times 9}^*$ 和质量成熟度隶属矩阵 $RQML_{N \times 4}^*$ 。

5. 产品成熟度合成

根据文献 [4]，对子层指标进行模糊合成运算，可得到 10 级制造成熟度隶属向量：

$$RMRL = W^{MRL} \otimes RTRL_{N \times 10}^* \quad (4)$$

式 (4) 中， $W^{MRL} = (w_1^{MRL}, w_2^{MRL}, \dots, w_N^{MRL})$ 为 N 项产品的权重向量 (AHP 确定)， \otimes 为模糊综合评价合成算子 (\wedge, \vee)。

类似地，可以得到 9 级技术成熟度隶属向量 $RTRL$ ，再根据表 2 中等级集成关系，将技术和制造成熟度分别由 9 级和 10 级都集成为 4 级，分别记为矩阵 $RTRL^4$ 和 $RMRL^4$ 。

对技术、制造和质量成熟度指标进行合成，得到产品成熟度隶属向量：

$$RPRL = W^{PRL} \otimes \begin{pmatrix} RTRL^4 \\ RMRL^4 \\ RQML \end{pmatrix} \quad (5)$$

式 (5) 中， $W^{PRL} = (W_1^{PRL}, W_2^{PRL}, W_3^{PRL})$ 是技术、制造和质量成熟度指标综合权重向量。

6. 市场成熟度合成

由以上过程可以实现多个细分市场成熟度的合成，将市场成熟度隶属向量计为 $RMML$ (每个细分市场成熟度可根据表 4 自行合成计算得到)。

7. 高质量发展成熟度合成

由于高质量发展成熟度的 4 个二级指标都具有子层评价指标体系 (见表 5)，故通过对各子层指标评价体系自下而上地进行合成运算，可以得到产

业清洁、产业高效、产业安全和产业低碳成熟度指标的隶属向量，分别记为 **RCML**、**REML**、**RSML** 和 **RLML**。将上述矩阵进一步合成得到高质量发展成熟度隶属向量：

$$\mathbf{RQDML} = \mathbf{W}^{\text{QDML}} \otimes \begin{pmatrix} \mathbf{RCML} \\ \mathbf{REML} \\ \mathbf{RSML} \\ \mathbf{RLML} \end{pmatrix} \quad (6)$$

式 (6) 中， $\mathbf{W}^{\text{QDML}} = (W_1^{\text{QDML}}, W_2^{\text{QDML}}, W_3^{\text{QDML}}, W_4^{\text{QDML}})$ 为产业清洁、高效、安全和低碳成熟度指标综合权重向量。

8. 产业成熟度合成

根据上述集成结果，最终合成得到产业成熟度隶属向量：

$$\mathbf{RIML} = \mathbf{W}^{\text{IML}} \otimes \begin{pmatrix} \mathbf{RPRL} \\ \mathbf{RMML} \\ \mathbf{RQDML} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式 (7) 中， $\mathbf{W}^{\text{IML}} = (W_1^{\text{IML}}, W_2^{\text{IML}}, W_3^{\text{IML}})$ 为产品、市场和高质量发展成熟度指标综合权重向量。

根据最大隶属度原则，产业成熟度等级表示为：

$$\text{IML} = \left\{ i \mid \max_i (\mathbf{RIML}) \right\} \quad (8)$$

式 (8) 中， i 为产业成熟度隶属等级， $1 \leq i \leq 4$ 。

五、绿色低碳产业成熟度评价案例——生物质热电联产产业

生物质热电联产是以生物质为燃料，通过直接燃烧、与煤混合燃烧和气化燃烧的方式同时产生电力和有用的热量的过程。案例评价共邀请了 13 名生物质领域专家组成领域专家组，通过专家组现场咨询确定了产业中的 4 项关键技术和 3 种核心

产品（见表 6），建立了适用于生物质热电联产产业的高质量发展指标体系（见表 7）。

根据最大隶属等级原则，生物质气化技术和热电联产技术确定为 TRL9，生物质燃气净化技术和生物质气化气与煤混燃技术确定为 TRL7。在制造成熟度方面，生物质气化气与煤混燃集成设备、低热值生物质燃气发电机组的制造成熟度均达到 MRL9，生物质气化集成设备制造成熟度等级确定为 MRL7。3 种产品的质量成熟度均为较不成熟等级。

表 8 给出了基于 AHP 权重和主观赋权部分指标的综合权重，此处不展开讨论权重计算、成熟度集成过程，最终结果见图 5。整体来看，生物质热电联产产业的产业成熟度结果为较成熟，其技术、制造和产业高质量发展成熟程度与产业总体同步，但生物质热电联产市场成熟度还处于较不成熟等级，其发展滞后于工程科技进步速度。

六、结语

在新形势下，我国绿色低碳战略性新兴产业发展面临着新的机遇与挑战。加快推进绿色低碳产业体系建设，将孕育出新的朝阳产业集群和新的经济增长点。本文总结了产业成熟度评价方法的基本理论框架并提出了推广应用的一般流程，在辨识绿色低碳产业发展特点的基础上扩展了高质量发展成熟度指标体系，利用综合权重和模糊综合评价方法建立了绿色低碳产业成熟度评价模型，最后基于案例演示了评价过程。

相关研究适用于绿色低碳领域各细分产业或其他领域新兴产业，为了推进绿色低碳产业成熟度评价方法在战略研究中的应用，需要进一步完善评价制度，开展评价机构和产业的数据库建设。

(1) 建立绿色低碳产业成熟度年度评价机制。推动产业成熟度方法在咨询项目和产业报告中的实

表 6 待评估产业主要技术和产品

序号	技术	产品
1	生物质气化技术	生物质气化集成设备
2	生物质燃气净化技术	生物质气化气与煤混燃集成设备
3	生物质气化气与煤混燃技术	低热值生物质燃气发电机组
4	热电联产技术	—

表 7 生物质热电联产产业高质量发展成熟度评价指标体系

二级指标	子层指标	评估指标	
产业清洁成熟度	产业前端清洁程度	生物质收集对空气质量的影响	
		废水排放量	
	核心装备制造环节清洁程度	废气排放量	
		固体废弃物排放量	
		生物质热电联产运营对空气质量的影响	
产业生产运营环节清洁程度	设备报废环节清洁程度	报废回收利用率	
	产业发展绿色贡献	新能源发展贡献	
		生态环境改善	
		区域绿色经济	
		产业体系效能	
产业高效成熟度	要素协同与产业体系效能	产业要素协同性	
		发电率	
	生产效率	余热利用率	
		产业资源消耗	综合能源消耗量
			水资源消耗量
产业安全成熟度	科技创新安全	土地资源占用	
		核心自主创新能力	
	产业链安全	自主科技创新生态环境	
		创新成果转化能力	
		生产运营安全	
产业低碳成熟度	碳排放量	生产投入安全	
		产业链核心控制力与进口依存度	
	碳减排贡献	产业链销售出口依存度	
		生产运营碳排放量	
		产业链非运营碳增量	
		产业碳减排量	

表 8 主要指标权重

指标名称	权重向量
W^{IML}	(0.04, 0.25, 0.71)
W^{PRL}	(0.43, 0.14, 0.43)
W^{TRL}	(0.47, 0.28, 0.12, 0.12)
W^{MRL}	(0.43, 0.14, 0.43)
W^{QDML}	(0.12, 0.34, 0.35, 0.37)

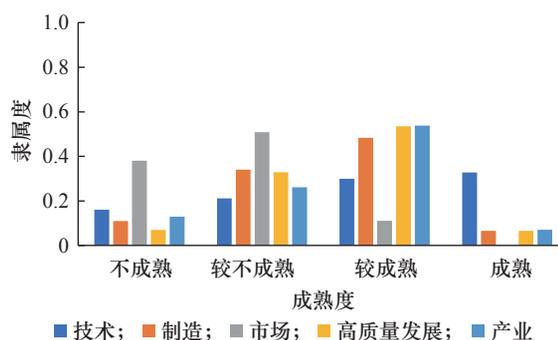


图 5 产业成熟度综合评价结果

践应用，通过成熟度方法识别我国绿色低碳产业年度发展的数据化特征。

(2) 组建绿色低碳产业发展信息的权威发布机构。在能源、节能环保和新能源汽车等领域加速培育一批战略咨询研究专家，形成具有国际影响力和产业评估权威性的研究团队或机构，实现我国绿色低碳产业的科学自主评价。

(3) 加强我国新兴产业数据库建设和产业客观评价。根据产业发展需求和外部环境的变化，对我国新兴产业成熟度评价指标体系与产业数据库进行动态管理。应建立智能化的数据采集机制，将我国绿色低碳领域相关企业全部纳入到产业范畴，通过

大数据信息化技术来实现企业信息的自动采集和统计,减少产业主观评价信息,推进以企业实际数据为基础的客观评价体系建设。

致谢

感谢王闻、苏罡、孔凡太、冯煜、赵培荣、刘红光、周捷、何雨江、张剑寒、程健、王文伟、张婷婷、陈晓慧等课题组成员对本文撰写的大力协助。

参考文献

- [1] 中国工程科技发展战略研究院. 2019中国新兴产业发展报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
Chinese Academy of Science and Technology for Development. China's emerging industries development report in 2019 [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2018.
- [2] 彭苏萍. 能源新技术战略性新兴产业重大行动计划研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
Peng S P. Study on major action plans for strategic emerging industries of new energy technologies [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2018.
- [3] 中国工程科技发展战略研究院. 2020中国新兴产业发展报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.
Chinese Academy of Science and Technology for Development. China's emerging industries development report in 2020 [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2019.
- [4] 孙旭东, 张博, 葛宏志. 能源产业成熟度评价方法理论研究 [J]. 中国矿业, 2017, 26(10): 65-69.
- [5] 王礼恒, 屠海令, 王崑声, 等. 产业成熟度评价方法研究与实践 [J]. 中国工程科学, 2016, 18(4): 9-17.
Wang L H, Tu H L, Wang K S, et al. Assessment of industry maturity levels: Research and practice [J]. Strategic Study of CAE, 2016, 18(4): 9-17.
- [6] 李达, 王崑声, 马宽. 技术成熟度评价方法综述 [J]. 科学决策, 2012 (11): 85-94.
Li D, Wang K S, Ma K. Review of evaluation methods for technology maturity [J]. Scientific Decision Making, 2012 (11): 85-94.
- [7] 马宽, 王崑声, 刘瑜, 等. 制造成熟度及其在我国航天的应用研究 [J]. 航天器工程, 2014, 23(2): 132-137.
Ma K, Wang K S, Liu Y, et al. Manufacturing maturity and its application in China's aerospace research [J]. Spacecraft Engineering, 2014, 23(2): 132-137.
- [8] 王礼恒, 钟志华, 郭贺铨, 等. 战略性新兴产业发展重大行动计划综合研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
Wang L H, Zhong Z H, Wu H Q, et al. Study on major action plans for the development of strategic emerging industries [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2018.
- [9] Sun X D, Jia X F, Rong Y F. Maturity evaluation in China's low carbon energy industry [J]. Energy Procedia, 2018 (152): 709-714.
- [10] 电力规划设计总院. 中国能源发展报告2018 [R]. 北京: 电力规划设计总院, 2018.
Electrical Planning and Design Institute. China energy development report 2018 [R]. Beijing: Electrical Planning and Design Institute, 2018.