

Development trend and prospect of green separation technology

Huizhou LIU^{1,2,3,4*}, Xiaoping LIU^{1,3*}, Xin CHEN¹, Chao ZHANG^{1,3}, Liangrong YANG^{2,4}

1. National Science Library, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
3. Department of Library, Information and Archives Management, School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
4. Department of Chemistry and Chemical Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Since the beginning of the 21st century, green separation technology has been continuously innovated, new green separation technologies have emerged, and application fields have gradually expanded. This paper uses bibliometric method to research the development trends of seven green separation technologies, and it analyzes the aspects of the paper's output scale, quality of research, disciplinary layout and international cooperation. Besides, the paper compares and analyzes various green separation technologies. The paper aims to compare the strength of China with the developed countries, and provides useful reference for the development of green separation technology, development strategy and discipline policy, scientific research workers to choose scientific research direction, and enterprise investment decision-making.

Key learning points:

- (1) Analyzed the development trends of seven green separation technologies, the paper's output scale and international cooperation.
- (2) Compared and analyzed various green separation technologies, analyzed the gap of research strength between China and other countries in the world.
- (3) Prospected the development of separation technology in China from the aspects of discipline development and industrial strategic demand.

Key words: green separation technology; paper's output scale; quality of research; disciplinary layout; international cooperation

收稿: 2019-03-01, 修回: 2019-04-30, 网络发表: 2019-05-15, Received: 2019-03-01, Revised: 2019-04-30, Published online: 2019-05-15
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: U1507203); 国家重点基础研究发展规划(973)资助项目(编号: 2015CB251402)

作者简介: 刘会洲(1962-), 男, 福建省福州市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为萃取分离, E-mail: liuhz@mail.las.ac.cn; 刘小平, 通讯联系人, E-mail: liuxp@mail.las.ac.cn.

引用格式: 刘会洲, 刘小平, 陈欣, 等. 绿色分离技术发展态势与展望. 过程工程学报, 2019, 19(增刊 1): 25-34.
Liu H Z, Liu X P, Chen X, et al. Development trend and prospect of green separation technology (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2019, 19(S1): 25-34, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219145.

绿色分离技术发展态势与展望

刘会洲^{1,2,3,4*}, 刘小平^{1,3*}, 陈欣¹, 张超^{1,3}, 杨良嵘^{2,4}

1. 中国科学院文献情报中心, 北京 100190

2. 中国科学院过程工程研究所, 北京 100190

3. 中国科学院大学经济与管理学院图书情报与档案管理系, 北京 100190

4. 中国科学院大学化学与化工学院, 北京 100049

摘要: 进入 21 世纪以来, 绿色分离技术不断创新, 新型绿色分离技术不断涌现, 应用领域逐步拓展。本工作对绿色分离技术领域论文的产出规模、学术影响力、学科布局、国际合作等相关指标进行了文献计量分析, 并对各项绿色分离技术进行比较分析, 同时比较了中国与世界相关国家的研究实力, 旨在了解中国与世界绿色分离技术的发展态势, 为制定绿色分离技术发展战略和学科政策、科研工作者选择科研方向、企业投资决策等提供有益的参考。

要点:

(1) 对绿色分离技术领域论文的产出规模、国际合作等相关指标进行了文献计量分析。

(2) 对各国绿色分离技术的特点进行比较分析, 分析了中国与世界相关国家研究实力的差距。

(3) 从学科发展和产业战略需求两个方面展望了中国绿色分离技术的发展。

关键词: 绿色分离技术; 论文产出规模; 学术影响力; 学科布局; 国际合作

中图分类号: TQ028 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2019)S1-0025-10

1 前言

绿色化工是当今国际化工领域的前沿, 是 21 世纪化工科学发展的重要方向之一^[1]。绿色化工利用当代物理、生物、材料、信息等学科的最新技术和成果, 从根本上减少或消除化学产品在设计、生产和应用中有害物质的使用与产生, 使研究开发的化学产品和工艺过程更加环境友好。由于各种分离过程耗费大量能源, 排放废物对环境产生严重污染, 因此开发高效率、低能耗、低成本、高质量产品的绿色分离技术, 将是化工分离发展的新趋势。

精馏技术、萃取技术、结晶分离技术、吸附分离技术、色谱分离技术、膜分离技术及电化学分离技术等新型分离技术由于更注重节能减排、避免有毒有害物质的使用和排放及更注重高效简便, 因而被认为是新型绿色分离技术的代表。进入 21 世纪以来, 新型绿色分离技术不断创新和涌现, 应用领域逐步拓展^[2]。为了准确了解我国绿色分离技术的发展现状与潜力, 绘制绿色分离技术发展态势的“地形图”, 本工作从科研产出的角度, 以 2008~2017 年科睿唯安(Clarivate Analytics) Web of Science (WoS) 的 SCI-EXPANDED 数据作为样本, 采用文献计量学方法^[3,4], 对中国与世界的精馏技术、新型萃取技术、结晶分离技术、新型吸附分离技术、色谱分离技术、膜分离技术和电化学分离技术等七种绿色分离技术的发展态势^[5-10]进行较全面的梳理和分析, 并对各项绿色分离技术进行比较, 将为我国科研管理者了解中国

与世界绿色分离技术领域发展态势和竞争力提供参考, 同时为制定符合本国利益和需求的绿色分离技术领域的发展战略与政策、合理配置科技资源提供依据。

2 绿色分离技术发展态势

2.1 世界绿色分离技术发展态势

目前主要有 7 种绿色分离技术: 新型精馏技术、新型萃取技术、结晶分离技术、新型吸附分离技术、色谱分离技术、膜分离技术及电化学分离技术。各种绿色分离技术的发展水平既体现了国家社会经济的发展需求, 也折射出相关研究工作的基础和水平。

近 10 年(2008~2017 年), 各种绿色分离技术世界论文数量及增长速度差距较大。从各分支领域论文数占世界绿色分离技术论文总数的份额来看, 新型萃取技术的产出规模(28.0%)最大, 新型吸附分离技术的产出规模(24.7%)位居第 2 位, 膜分离技术(19.4%)和电化学分离技术(18.2%)的产出规模相当, 分别位居第 3 位和第 4 位, 色谱分离技术(13.8%)位居第 5 位, 新型精馏技术(2.8%)和结晶分离技术(2.3%)的产出规模远远低于其它绿色分离技术, 结晶分离技术的产出规模最小。

2008~2017 年, 世界绿色分离技术总论文数年均增长率为 5.6%, 其中新型精馏技术的论文增长速度最快, 年均增长率为 15.2%, 呈现蓬勃发展的态势; 膜分离技术的论文增长速度紧随其后, 为 10.6%; 新型吸附分离技术与结晶分离技术的论文增长速度相当, 分别为 6.9% 和 6.7%; 新型萃取技术的论文增长速度为 4.8%; 色谱

分离技术和电化学分离技术的论文增长速度较低, 分别为 1.8% 和 0.6%。7 种技术中有 4 种技术高于绿色分离技术总体论文数的年均增长率, 按增速由高到低排序为

新型精馏技术、膜分离技术、新型吸附分离技术和结晶分离技术。

表 1 2008~2017 年绿色分离技术分支领域的论文数量、世界份额及年均增长率

Table 1 Number of papers, world share and average annual growth rate of green separation technology in 2008~2017

Area	Number of paper	World share/%	World rank	Average annual/%
New extraction and separation technology	41298	28.0	1	4.8
New adsorption and separation technology	36473	24.7	2	6.9
Membrane separation technology	28659	19.4	3	10.6
Electrochemical separation technology	26825	18.2	4	0.6
Chromatographic separation technology	20378	13.8	5	1.8
New distillation technology	4092	2.8	6	15.2
Crystal separation	3442	2.3	7	6.7
Green separation technology	147597	-	-	5.6

2.1.1 新型精馏技术

新型精馏技术可划分为 5 个分支领域: 恒沸精馏、萃取精馏、反应精馏、膜蒸馏和分子蒸馏。新型精馏技术共发表 SCI 论文 4092 篇, 5 个分支领域世界论文数量及增长速度差距较大。膜蒸馏的产出规模(42.0%)最大, 反应精馏的产出规模(29.0%)次之, 萃取精馏的产出规模(17.0%)居第 3 位、恒沸精馏的产出规模(12.0%)居第 4 位, 分子蒸馏的产出规模(6.9%)最小。

新型精馏技术 SCI 论文数的年均增长率为 15.2%, 5 个分支领域中只有膜蒸馏的论文增长速度(24.8%)高于新型精馏技术, 萃取精馏(14.4%)、分子蒸馏(12.4%)、恒沸精馏(10.4%)和反应精馏(6.2%)的论文的增长速度均低于新型精馏技术。

2.1.2 新型萃取技术

新型萃取技术划分为 4 个分支领域: 双水相萃取、超临界流体萃取、固相萃取和微波萃取技术。新型萃取技术共发表 SCI 论文 41298 篇, 固相萃取的产出规模(84.1%)最大, 比其它 3 个分支领域高一个数量级; 超临界流体萃取、微波萃取和双水相萃取的产出规模相差不大, 所占世界份额分别为 7.6%、6.4%和 4.7%。

新型萃取技术 SCI 论文数的年均增长率为 4.8%, 微波萃取(7.2%)和双水相萃取(7.0%)高于新型萃取技术总体的增长速度, 而固相萃取(4.4%)和超临界流体萃取(4.3%)的增长率略低于该技术总体增长速度。

2.1.3 新型结晶分离技术

新型结晶分离技术划分为两个分支领域: 溶液结晶和熔融结晶。结晶分离技术领域共发表 SCI 论文 3442 篇, 其中溶液结晶的产出规模(67.3%)最大, 是熔融结晶产出规模(36.2%)的 1.8 倍。

结晶分离论文数的年均增长率为 6.7%, 溶液结晶的年均增长率(10.3%)远高于结晶分离, 而熔融结晶的年均增长率(1.4%)远低于结晶分离。

2.1.4 新型吸附分离技术

新型吸附分离技术划分为 4 个分支领域: 生物吸附、离子交换、分子印迹和泡沫吸附分离技术。新型吸附分离技术共发表 SCI 论文 36473 篇, 其中生物吸附技术的产出规模(57.2%)最大, 离子交换分离技术(33.1%)次之, 分子印迹分离技术(6.9%)和泡沫吸附分离技术(3.8%)的产出规模相对较小。

新型吸附分离技术 SCI 论文数的年均增长率为 6.9%, 生物吸附技术和分子印迹的年均增长率(10.5%)相当, 泡沫吸附的增长速度(9.3%)次之, 均远远高于新型吸附分离技术, 离子交换分离技术年均增长率仅为 0.1%, 该技术发展逐渐趋于成熟。

2.1.5 色谱分离技术

色谱分离技术划分为 3 个分支领域: 高效液相色谱法、气相色谱法和超临界流体色谱法。色谱分离技术共发表 SCI 论文 20378 篇, 其中高效液相色谱法的产出规模(60.9%)最大, 气相色谱法次之(40.1%), 超临界流体色谱法的产出规模(6.0%)最小。

色谱分离技术 SCI 论文数的年均增长率为 1.8%, 超临界流体色谱法的年均增长率(6.3%)最高, 高效液相色谱法(2.7%)次之, 二者都高于色谱分离技术总体年均增长率。气相色谱法的年均增长率仅有 0.6%, 该领域逐渐趋于成熟。

2.1.6 膜分离技术

膜分离技术划分为 9 个分支领域: 微滤膜、超滤膜、纳滤膜、反渗透膜、正渗透膜、离子交换膜、渗透汽化膜、气体膜和液膜分离技术。膜分离技术共发表 SCI 论文 28659 篇, 其中反渗透膜的产出规模(29.9%)最大, 世界份额在 10.0%~20.0%的分支领域有 5 个: 超滤膜(19.1%)、离子交换膜(17.1%)、气体膜(15.6%)、渗透汽化膜(15.0%)和纳滤膜(13.3%), 其它几个分支领域的世界份额均低于 10.0%, 微滤膜为 8.1%, 液膜为 6.4%,

正渗透膜为4.3%。

膜分离技术 SCI 论文数的年均增长率为 10.6%，正渗透膜的年均增长率(46.8%)最高。9 个分支领域中有 6 个分支领域的年均增长率超过膜分离技术总体增长速度，正渗透膜为 46.8%，气体膜为 13.1%，纳滤膜为 12.7%，离子交换膜为 12.5%，超滤膜为 12.2%，反渗透膜为 11.2%。其余 3 个分支领域的年均增长率低于膜分离技术总体增长速度：微滤膜(6.6%)、液膜(3.8%)和渗透汽化膜(0.4%)。渗透汽化膜的发展趋于成熟。

2.1.7 电化学分离技术

电化学分离技术划分为 5 个分支领域：自发电沉积、电解分离法、电泳分离法、电渗析分离法和溶出伏安法。2008~2017 年，电化学分离技术共发表 SCI 论文 26825 篇，其中电泳分离法的产出规模(55.7%)最大，溶出伏安法次之(20.4%)，电解分离法(10.1%)和电渗析分离法(9.9%)的产出规模相当，自发电沉积分离技术所占份额(5.2%)最少。

电化学分离技术 SCI 论文数的年均增长率为 0.6%，

其中电解分离法(13.3%)、电渗析分离法(11.1%)和自发电沉积分离技术(10.7%)的论文数均呈现快速增长的态势，其近 10 年的年均增长率均超过 10.0%。溶出伏安法的近 10 年论文数年均增长率为 2.4%，也超过了电化学分离技术的总体年均增长率。电泳分离法的论文数呈负增长，年均增长率为-5.0%，该领域的发展可能已经趋于成熟。

2.2 中国绿色分离技术发展态势

图 1 为 2008~2017 年 7 个主要国家各项绿色分离技术的论文数所占世界相应技术论文的份额(学科贡献率)及各项绿色分离技术的增长趋势。2008~2017 年，中国七项绿色分离技术论文数的学科贡献率都居世界第 1 位，结晶分离技术的学科贡献率高达 31.8%，对世界结晶分离技术论文产出的贡献超过 1/3。其余 6 项技术的学科贡献均超过 1/5。膜分离技术是中国产出规模(23.7%)最小的领域。中国的 7 项绿色分离技术的增长率最快，以结晶分离技术最为突出。

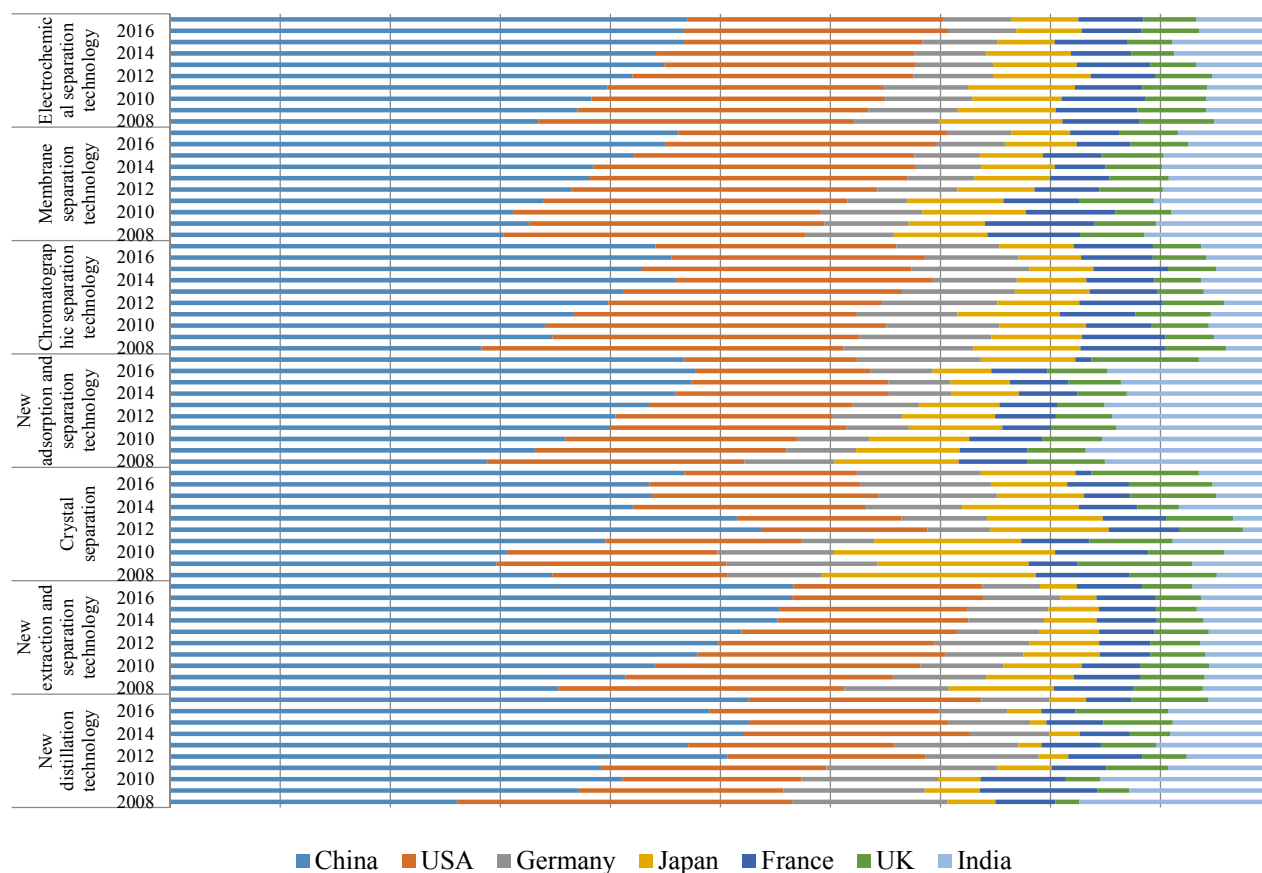


图 1 2008~2017 年 7 个主要国家 7 种绿色分离技术 SCI 论文数的世界份额

Fig.1 World share of SCI papers for 7 green separation technologies of 7 countries in year 2008-2017

美国 7 项绿色分离技术的论文数的学科贡献率仅次于中国，居世界第 2 位，虽然论文学科贡献均超过 10%，但均未超过 20.0%，其中学科贡献率最高的是色谱分离技术(16.5%)和膜分离技术(16.2%)，学科贡献率最低的是新型精馏技术(10.8%)和新型萃取技术(10.6%)。德国、日本、法国、英国和印度 7 项绿色分离技术的学科贡献率均在 10.0%以下，且大部分在 5.0%以下。印度的新型吸附分离技术(8.9%)、日本的结晶分离技术(8.4%)和德国的结晶分离技术(7.1%)的学科贡献率相对突出。

2.2.1 新型精馏技术

中国 5 个新型精馏技术的论文数占世界份额均居世界第 1 位，新型精馏技术研究规模领先优势突出，论文数高速增长，2008~2017 年，恒沸精馏(30.5%)、萃取精馏(29.5%)、反应精馏(23.5%)、膜蒸馏(28.9%)和分子蒸馏(31.2%)五个新型精馏技术的 SCI 论文数的年均增长率均超过世界年均增长率。

近 10 年，中国精馏分离技术发文机构中，天津大学的发文量最多，占世界精馏分离技术总发文量的 3.4%，中国科学院和北京化工大学分别排名第二、三位，占世界份额分别为 3.0%和 2.1%。排名前十位的机构还有浙江大学、天津工业大学、华东理工大学、青岛科技大学、华南理工大学、福州大学、清华大学。图 2 为新型精馏技术发文量排名前 20 位的国家的合作关系，图中线条的粗细代表了国家之间的合作强度(图 3~8 相同)，可以看出，中国在恒沸精馏、萃取精馏、反应精馏、膜蒸馏、分子蒸馏技术领域分别与 12, 14, 13 和 27 个国家/地区开展合作，合作最多的国家是美国、德国和英国。

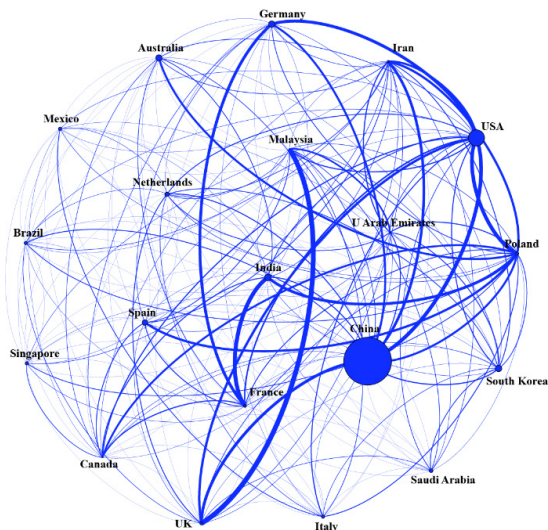


图 2 新型精馏技术发文量排名前 20 位的国家的合作关系
Fig.2 International cooperation diagram of top 20 countries with new distillation technology

2.2.2 新型萃取技术

中国在 4 个新型萃取技术论文数的世界份额均居世界第 1 位，增长幅度均显现出很强的竞争优势。有 3 个新型萃取技术，即双水相萃取(13.1%)、固相萃取(11.8%)和微波萃取(10.0%)的 SCI 论文数的年均增长率都超过世界年均增长率。只有超临界萃取(2.6%)的年均增长率低于世界年均增长率。

近 10 年，中国萃取分离技术发文机构中，中国科学院的发文量最多，占世界总发文量的 3.0%，远远超过排名第二位的武汉大学。排名前 10 位的机构还有中国农业大学、吉林大学、中山大学、中国农业科学院、浙江大学、江苏大学、清华大学、四川大学。除中国科学院外，其它机构的世界份额均在 1.0%以下。

从图 3 可看出，中国在固相萃取、超临界萃取、微波萃取和双水相萃取技术领域分别与 60, 35, 33 和 14 个国家/地区开展合作，合作最多的国家是美国、英国、加拿大、韩国和德国。

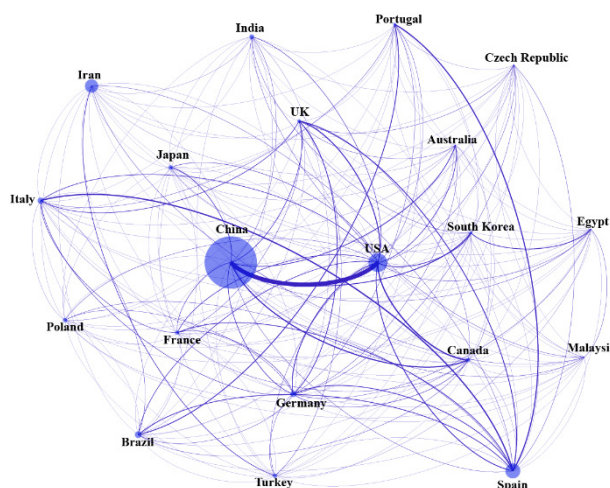


图 3 新型萃取技术发文量排名前 20 位的国家的合作关系
Fig.3 International cooperation diagram of top 20 countries with new extraction and separation technology

2.2.3 结晶分离技术

中国 2 个结晶分离技术领域论文数占世界份额都位居第 1 位。结晶分离技术论文数高速增长，其中溶液结晶和熔融结晶的 SCI 论文数的年均增长率 (18.1%和 5.2%)均超过世界的年均增长率。

近 10 年，中国结晶分离技术发文机构中，中国科学院的发文量最多，占世界总发文量的 4.8%，北京化工大学和四川大学分别排名第二、三位，发文量所占世界份额分别为 2.4%和 2.1%。排名前 10 位的机构还有天津大学、华东理工大学、潍坊大学、浙江大学、大连理工大学、哈尔滨工业大学和郑州大学。

从图 4 可看出，中国在溶液结晶和熔融结晶分离技

术领域分别与 27 和 24 个国家/地区开展合作，合作最多的国家是美国、日本、新加坡、比利时和英国。

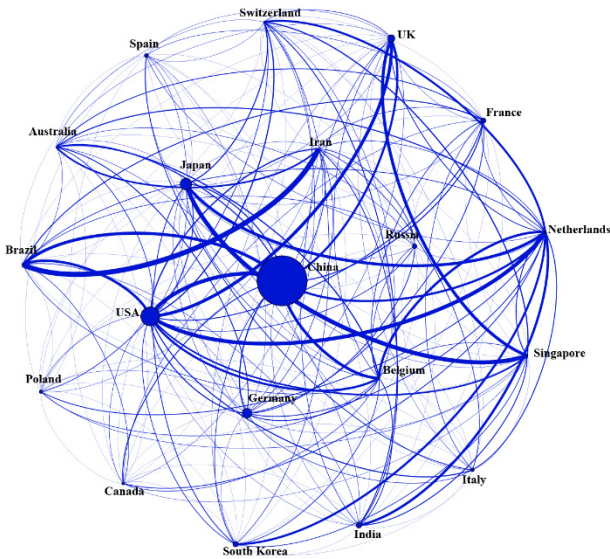


图 4 结晶分离技术发文量排名前 20 位的国家的合作关系
Fig.4 International cooperation diagram of top 20 countries with crystal separation technology

2.2.4 新型吸附分离技术

中国 4 个新型吸附分离技术领域发文数占世界份额均居世界第 1 位，处于全面领先地位，以分子印迹分离技术最为突出。其中新型吸附分离技术论文数量高速增长，离子交换(4.7%)、生物吸附(21.1%)、分子印迹(13.2%)和泡沫吸附(18.7%)的 SCI 论文数年均增长率均超过世界年均增长率。

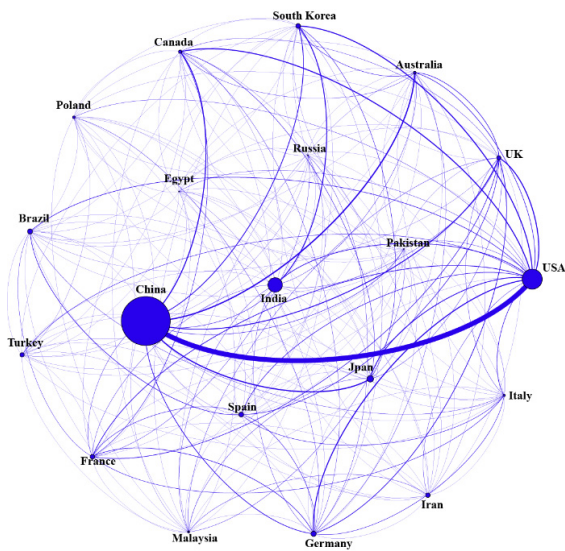


图 5 新型吸附分离技术发文量排名前 20 位的国家的合作关系
Fig.5 International cooperation diagram of top 20 countries with new adsorption and separation technology

近 10 年，中国吸附分离技术发文机构中，中国科学院的发文量最多，占世界总发文量的 3.3%，远超过其它机构。排名前 10 位的机构还有浙江大学、中南大学、南京大学、江苏大学、天津大学、清华大学、南开大学、湖南大学、山东大学、四川大学，但所占世界份额均在 1.0% 以下。

从图 5 可看出，中国在生物吸附、离子交换、分子印迹和泡沫吸附领域分别与 63, 48, 23 和 17 个国家/地区开展合作，合作最多的国家是美国、日本、加拿大、澳大利亚、英国和韩国。

2.2.5 色谱分离技术

在 3 个色谱分离技术中，中国有 2 个领域论文数的世界份额都居第 1 位，即高效液相色谱和气相色谱技术，有 1 个领域的论文数占世界份额居世界第二位，即超临界流体色谱分离技术。其中色谱分离技术论文数高速增长，高效液相色谱法(7.7%)、气相色谱法(6.6%)和超临界流体色谱分离技术(22.6%)论文的年均增长率都高于世界年均增长率。

近 10 年，中国色谱分离技术发文机构中，中国科学院的发文量最多，占世界总发文量的 3.3%，是排名第二位的浙江大学发文量占世界份额的三倍以上。排名前十位的机构还有中国药科大学、武汉大学、吉林大学、中国农业大学、沈阳药科大学、四川大学、河北大学、浙江工业大学、北京化工大学。

色谱分离技术的 3 个分支领域中，中国和印度侧重于高效液相色谱，而美国和法国侧重于超临界流体色谱法的研究，德国侧重于气相色谱法的研究，日本和英国在 3 个分支领域布局较均衡。

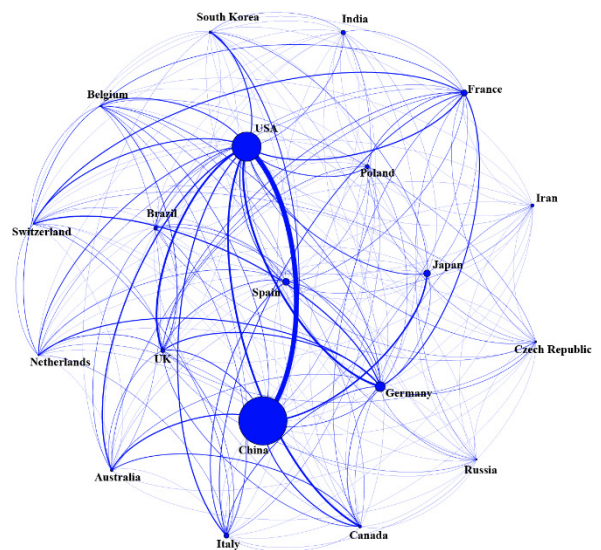


图 6 色谱分离技术发文量排名前 20 位的国家的合作关系图
Fig.6 International cooperation diagram of top 20 countries with chromatographic separation technology

从图 6 可看出，中国在高效液相色谱、气相色谱和超临界流体色谱领域分别与 43, 37 和 16 个国家/地区开展合作，合作最多的国家是美国、日本、加拿大和澳大利亚。

2.2.6 膜分离技术

中国的膜分离技术发展均衡，大部分均显现出很强的竞争优势，进入与发达国家并跑的阶段。在 9 个膜分离技术领域，7 个领域的论文数占世界份额都居世界第 1 位，即微滤膜、超滤膜、纳滤膜、离子交换膜、渗透汽化膜、气体膜和液膜；反渗透膜和正渗透膜 2 个分支领域的论文数占世界份额居世界第 2 位，仅次于美国，总体来看，中国的膜分离技术研究规模领先优势突出。其中膜分离技术论文数量高速增长，2008~2017 年，在 9 个膜分离技术，即微滤膜(11.7%)、超滤膜(14.9%)、纳滤膜(24.7%)、离子交换膜(18.3%)、气体膜(20.1%)、液膜(15.2%)、反渗透膜(25.6%)、正渗透膜(55.8%)和渗透汽化膜(2.6%)的 SCI 论文数的年均增长率均超过世界的年均增长率。

近 10 年，中国膜分离技术发文机构中，中国科学院的发文量最多，占世界膜分离技术总发文量的 3.1%，是排名第二位的浙江大学发文世界份额的两倍以上。排名前十位的机构还有天津大学、清华大学、哈尔滨工业大学、南京工业大学、天津工业大学、大连理工大学、中国科技大学、同济大学。

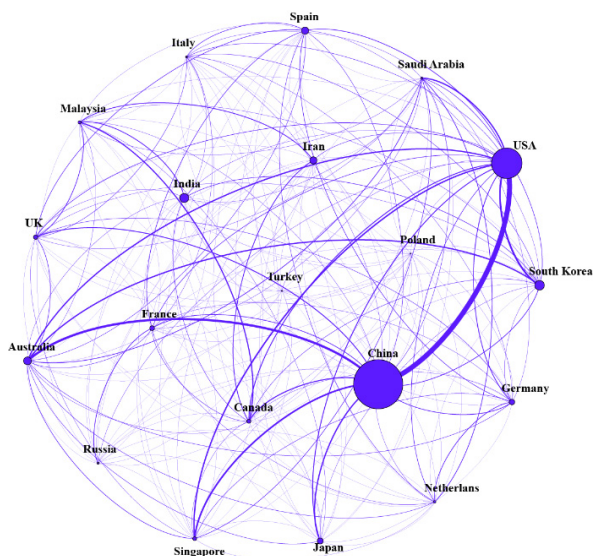


图 7 膜分离技术发文量排名前 20 位的国家的合作关系
Fig.7 International cooperation diagram of top 20 countries with membrane separation technology

中国在 9 个膜分离技术领域都积极推动国际合作研究。从图 7 可看出，在微滤膜、超滤膜、反渗透膜、正渗透膜、气体膜、纳滤膜、离子交换膜、渗透汽化膜、

液膜分离技术领域，中国分别与 30, 34, 41, 21, 28, 33, 32, 24, 25 个国家/地区开展合作，合作最多的国家是美国、澳大利亚、新加坡和日本。

2.2.7 电化学分离技术

中国 5 个电化学分离技术的 SCI 论文数量占世界份额均居世界第 1 位，增长迅速，2008~2017 年自发电沉积(23.7%)、电解分离技术(20.5%)、电泳分离技术(-2.0%)、电渗析分离技术(13.3%)、溶出伏安分离技术(6.4%)的 SCI 论文年均增长率均超过世界年均增长率。

近 10 年，中国电化学分离技术发文机构中，中国科学院(中国科技大学的论文单独统计)的发文量最多，占世界总发文量的 3.4%，远超过排名第二位的浙江大学。排名前 10 位的机构还有哈尔滨工业大学、中国科技大学、武汉大学、清华大学、上海交通大学、南京大学、北京大学、福州大学。除中国科学院外，其它机构发文占世界份额均在 1.0%以下。

从图 8 可以看出，中国在自发电沉积、电解分离技术、电泳分离技术、电渗析分离技术、溶出伏安技术领域分别与 22, 31, 46, 27 和 30 个国家/地区开展合作，合作最多的国家是美国、日本、澳大利亚、德国和加拿大。

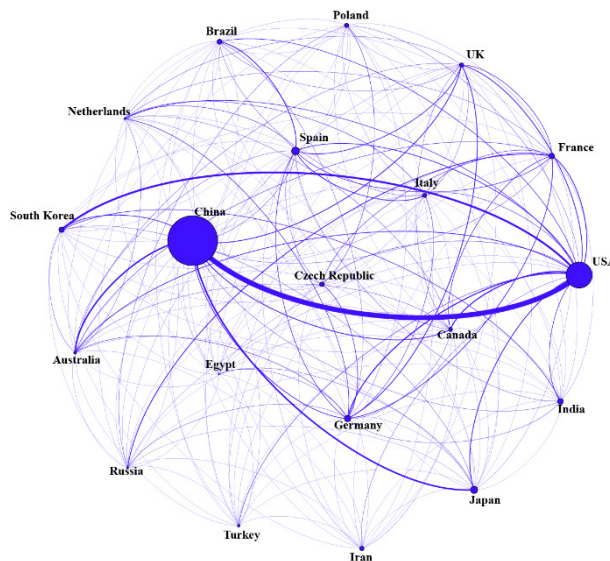


图 8 电化学分离技术发文量排名前 20 位的国家的合作关系
Fig.8 International cooperation diagram of top 20 countries with electrochemical separation technology

2.3 各国绿色分离技术特点分析

尽管中国在七项分离技术领域的 SCI 论文量所占世界份额优势明显，但论文的篇均被引频次并不突出。从图 9 可看出，中国的新型精馏技术、新型萃取技术、结晶分离技术、新型吸附分离技术、色谱分离技术、膜分离技术、电化学分离技术论文的篇均被引频次与美国、英国、德国和法国等科技发达国家相比存在较大差

距。总体来看,与其它分离技术相比,中国膜分离技术和新型吸附分离技术发文的影响力与世界科技强国的

差距较小。此外,中国电化学分离技术的 SCI 论文相对引文频次呈逐渐增长的趋势。

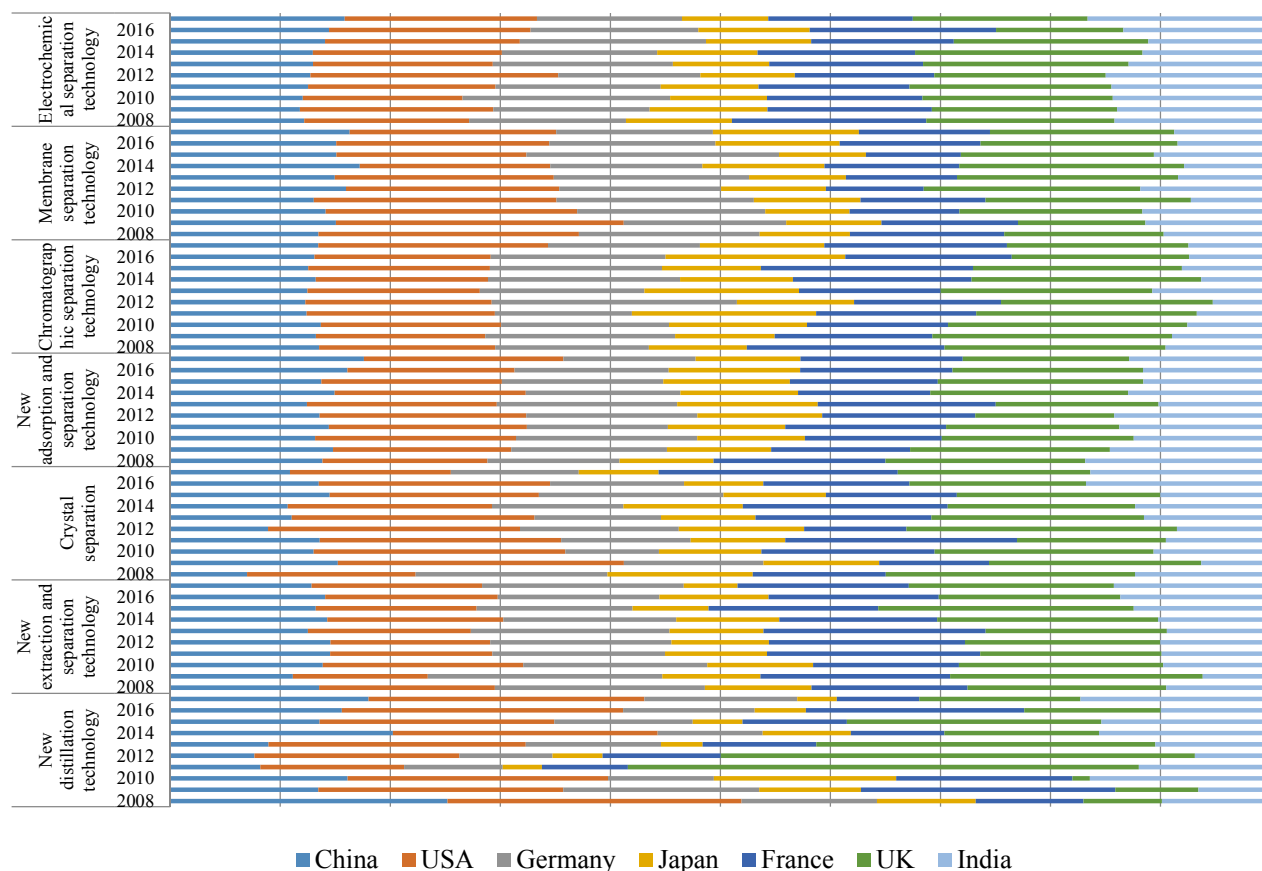


图 9 2008~2017 年 7 个主要国家 7 种绿色分离技术 SCI 论文相对引文频次

Fig.9 Relative citations of SCI papers for 7 green separation technologies of 7 countries in year 2008~2017

中国大部分新型精馏技术论文被引频次占世界份额上升至世界排名第一位或第二位,科研产出影响力突出。其中萃取精馏和分子蒸馏技术的学术影响力都居世界第一位;恒沸精馏和膜蒸馏技术论文被引频次居世界第二位,仅次于美国;反应精馏的论文被引频次居世界第四位,表明中国的反应精馏分离技术的学术影响力滞后于产出规模。同时 5 个新型精馏技术领域论文的篇均被引频次均低于世界的平均影响力,与美国、德国、英国等科技强国相比仍有一定差距。新型精馏技术 5 个分支领域中,中国侧重于分子蒸馏、萃取精馏和恒沸精馏,美国侧重于膜蒸馏的研究,德国和印度重视发展反应精馏,日本侧重于恒沸精馏和反应精馏的研究。法国偏重于恒沸精馏的研究。

中国双水相萃取和微波萃取分离技术论文被引频次上升至世界第一位,科研产出影响力突出。固相萃取分离技术论文被引频次占世界份额 14.1%,排名世界第二位,仅次于美国(17.4%)。超临界萃取分离技术论文被

引频次的世界份额为 7.9%,排名世界第 3 位,与美国(20.0%)相比还有比较大的差距。相比而言,中国在 4 个新型萃取技术的论文的篇均被引频次都低于世界的平均影响力,与美国、英国、德国和法国等科技强国仍有一定差距。中国侧重于双水相萃取、固相萃取和微波萃取,美国侧重于双水相萃取和固相萃取技术研究,德国和英国偏重于双水相萃取技术研究,法国侧重于微波萃取技术研究,印度侧重于双水相萃取技术和微波萃取技术研究。

中国在结晶分离技术领域发表论文被引频次占世界份额上升至世界排名第二,科研产出影响力突出,但与美国相比有较大差距。中国的溶液结晶和熔融结晶分离技术论文的篇均被引频次都低于世界平均影响力,与美国、英国、法国等科技发达国家相比有很大差距。中国和德国侧重于熔融结晶,而美国和英国则偏重于溶液结晶,日本、法国和印度在溶液结晶和熔融结晶的发展比较均衡。

中国在分子印迹分离技术领域的学术影响力居世界第一位，其中离子交换、生物吸附和泡沫吸附的论文被引频次占世界份额分别居世界第 2 位、第 2 位和第 3 位，与美国相比有很大差距。中国 4 个新型吸附分离技术论文的篇均被引频次都低于世界平均影响力，与美国、英国、加拿大、法国、德国、日本等仍有一定差距。中国侧重于分子印迹分离技术，美国、德国和日本偏重于离子交换研究，英国侧重于泡沫吸附研究，印度侧重于生物吸附技术和离子交换研究。

中国在高效液相色谱、气相色谱和超临界流体色谱领域论文被引频次占世界份额分别排名世界第 2 位、第 3 位和第 6 位，与美国相比有较大差距。中国的篇均被引频次都远低于世界平均影响力。色谱分离技术的 3 个分支领域中，中国和印度侧重于高效液相色谱，而美国和法国侧重于超临界流体色谱法研究，德国侧重于气相色谱法研究，日本和英国在 3 个分支领域表现出较为均衡的布局。

中国的大部分膜分离技术论文被引频次占世界份额上升至世界排名第一位或第二位，科研产出影响力突出。如渗透汽化膜论文被引频次排名世界第一位，微滤膜、超滤膜、纳滤膜、离子交换膜、气体膜分离技术和反渗透膜论文被引频次占世界份额居世界第二位，仅次于美国。液膜和正渗透膜论文被引频次占世界份额分别居世界第 3 位和第 4 位。除离子交换膜外，其余 8 个膜分离技术领域论文的篇均被引频次都低于世界平均影响力，与美国、日本、德国、法国、英国等科技强国的差距较大。离子交换膜论文的篇均被引频次与世界平均水平相当，但中国在该领域的平均影响力与美国、德国、加拿大等国的差距较大。在膜分离技术的 9 个分支领域中，中国侧重于超滤膜、纳滤膜、微滤膜和离子交换膜分离技术的研究，美国非常重视正渗透膜和反渗透膜的研究，比较重视离子交换膜和气体膜分离技术的研究。德国侧重于气体膜的研究，法国侧重于微滤膜研究，日本侧重于渗透汽化膜研究，印度侧重于液膜、渗透汽化膜和超滤膜分离技术研究。

中国电化学分离技术论文被引频次占世界份额上升至世界排名第一位或第二位，其中自发电沉积分离技术的学术影响力居世界第一位，中国的电解分离法、电泳分离法、电渗析分离法和溶出伏安法的论文被引频次占世界份额居世界第二位，仅次于美国。中国电泳分离技术论文被引频次的世界份额为 8.9%，远低于美国 (31.5%)，差距很大。中国 5 个电化学分离技术领域论文的篇均被引频次都低于世界的平均影响力，与美国、法国等科技发达国家相比还有较大差距。在电化学分离技

术的 5 个分支领域中，中国侧重于自发电沉积技术和电解分离法，美国和德国侧重于电泳分离法的研究，日本侧重于电泳分离法和电解分离法的研究，法国侧重于电渗析分离法的研究，英国和印度侧重于溶出伏安法的研究。

3 结语与展望

绿色分离技术具有多学科交叉和应用领域广的特征，无论是定性研判还是定量分析，均难以深入细致地揭示绿色分离技术发展态势的全貌。尽管如此，利用海量数据和科学计量等进行的客观分析，仍可在一定程度上勾画出各项绿色分离技术产出的宏观发展态势和中国在世界的相对位置。

回顾过去，展望未来，世界绿色分离技术的发展需要中国的贡献，中国绿色分离技术需要在与世界的合作交流中进一步前行。未来，我国将在环境、材料、生物、资源等方面开展大力研究，进一步促进绿色分离技术的发展。例如，用于电子级芯片和半导体生产的高纯试剂的需求将促进高效、高选择性新型精馏、结晶和吸附分离技术的发展，而精馏过程是化工分离单元操作中高能耗、高投资、占地大的分离技术，其新型绿色过程强化技术，例如反应精馏技术、微波场强化和超重力场强化精馏技术、热泵精馏、高效精馏技术将是未来的重要发展领域及方向^[11,12]；此外，由于实际体系十分复杂，对多目标产品的分离要求越来越高，多种技术和多单元操作耦合是未来绿色分离技术的一个重要发展方向^[13]；如对于海洋、盐湖资源中低浓度有价离子的高效分离回收，基于含无机纳米粒子和纳米复合材料的纳米复合膜和金属有机骨架膜材料分离技术将有很大发展前景^[14]；对于生物炼制中低浓度活性目标产物及反应抑制物的分离，有发展前途的分离技术包括萃取-发酵、膜渗透蒸发-生物反应器、真空膜蒸馏-生物反应器原位移除抑制物过程，这些分离技术可以消除代谢抑制物对反应的抑制，提高发酵产量和生产率，并减少因回收而产生的(新鲜)水消耗。此外，其它关键分离技术如萃取-超滤，稀酸预处理，液体热水提取，汽爆，稀酸-汽爆和碱提以及膜分离，尤其是纳滤等都是具有前途的分离方法^[15]。而对于功能性同分异构体及功能性元素同位素的分离，高分离系数的色谱填料及智能高效的全自动化色谱分离工艺设备将是未来发展方向。

参考文献

- [1] 李军. 化工分离前沿 [M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2011: 1-100.
Li J. Frontiers of chemical separation [M]. Xiamen: Xiamen University Press, 2011: 1-100.
- [2] 陈洪洪. 化工分离过程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2014: 3-50.

- Chen H F. Chemical separation process [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014: 3–50.
- [3] Zhai L H, Pan Y T, Guo Y, et al. International comparative study on nanofiltration membrane technology based on relevant publications and patents [J]. *Scientometrics*, 2014, 101: 1361–1374.
- [4] Carrazza S, Ferrara A, Salini S. Research infrastructures in the LHC era: a scientometric approach [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2016, 112: 121–133.
- [5] 唐强, 杜娜, 胡立新. 化工分离技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2016: 2–60.
- Tang Q, Du N, Hu L X. Chemical separation technology [M]. Beijing: Science Press, 2016: 2–60.
- [6] Jiang X B, Tuo L H, Lu D P, et al. Progress in membrane distillation crystallization: process models, crystallization control and innovative applications [J]. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 2017, 11(4): 647–662.
- [7] 陈翠仙. 膜分离 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2017: 2–120.
- Chen C X. Membrane separation [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017: 2–120.
- [8] Li C L, Zhou Y W, Su W Y, et al. Research progress of hybrid distillation/crystallization technology [J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2018, 41(10): 1894–1904.
- [9] Gong M J, Zhang N, Maddukuri N. Flow-gated capillary electrophoresis: a powerful technique for rapid and efficient chemical separation [J]. *Analytical Methods*, 2018, 10(26): 3131–3143.
- [10] Couto C F, Lange L C, Santos A M C. A critical review on membrane separation processes applied to remove pharmaceutically active compounds from water and wastewater [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2018, 26: 156–175.
- [11] Li H, Wu Y, Li X G, et al. State-of-the-art of advanced distillation technologies in China [J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2016, 39: 815–833.
- [12] 李洪, 孟莹, 李鑫钢, 等. 蒸馏过程强化技术研究进展 [J]. *化工进展*, 2018, 37(4): 1212–1228.
- Li H, Meng Y, Li X G, et al. State-of-the-arts review of the research process for distillation process intensification technology [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2018, 37(4): 1212–1228.
- [13] Zhang D J, Xu S J, Du S C, et al. Progress of pharmaceutical continuous crystallization [J]. *Engineering*, 2017, 39(3): 354–364.
- [14] Álvaro A, Santos R, Castel C, et al. A review of gas separation technologies within emission reduction programs in the iron and steel sector [J]. *Current Application and Development Perspectives*, 2018, 194: 425–442.
- [15] Huang H J, Ramaswamy S, Tschirner U W, et al. A review of separation technologies in current and future biorefineries [J]. *Separation and Purification Technology*, 2008, 62: 1–21.