

【学术前沿动态】碳中和专题：自然科学类论文分析

以二氧化碳为代表的温室气体排放量的持续增加，加速了全球平均地表与低层大气温度的升高，给人类赖以生存的地球自然生态环境造成了严重的影响。为应对全球气候变暖趋势，我国在 2020 年提出了力争在 2030 年前二氧化碳排放量达到峰值，2060 年前实现碳中和的战略目标。现阶段为降低大气中二氧化碳等温室气体的浓度，科学家们提出了一系列实现途径及解决方案，包括碳减排，二氧化碳捕获、利用、封存、化学还原，由化石能源向清洁能源转型等，并在自然科学领域展开广泛而深入的科学实验和探索活动。

本报告试图从科技文献视角，在 Web of Science 平台检索中国科学引文数据库（CSCD）和 SCIE 数据库中的相关文献，以近 10 年（2013—2022）自然科学领域发表的碳中和相关中外文核心论文为研究对象，采用文献计量分析方法，力图对全球和我国在该领域的研究现状进行客观反映，以期为致力于相关研究的科研人员提供有益的参考与启发。

一、国内外研究概况

2013—2022 年，全球和我国对该领域的研究均呈持续上升趋势。近 10 年全球 SCIE 总发文量和中国 SCIE 发文量一直持续递增，且近 3 年呈现加速增长态势；十年间全球增长了近 3 倍，而中国增长了近 10 倍。中国 SCIE 发文的全球占比从 2013 年的 18% 开始逐年攀升，直至 2022 年跃升至 50%。2020 年以前，该领域 CSCD 发文年增长率保持正负 10% 以内的小幅波动，近 3 年年发文量呈现持续增长、增速显著加快的特点；2022 年发文量已超 4000 篇，年增长率高达 67%，详见图 1。由此可见，近 10 年中国在该研究领域的科研能力和科技实力都在迅速提升，并为全球碳中和相关的科学研究贡献着越来越重要的力量。

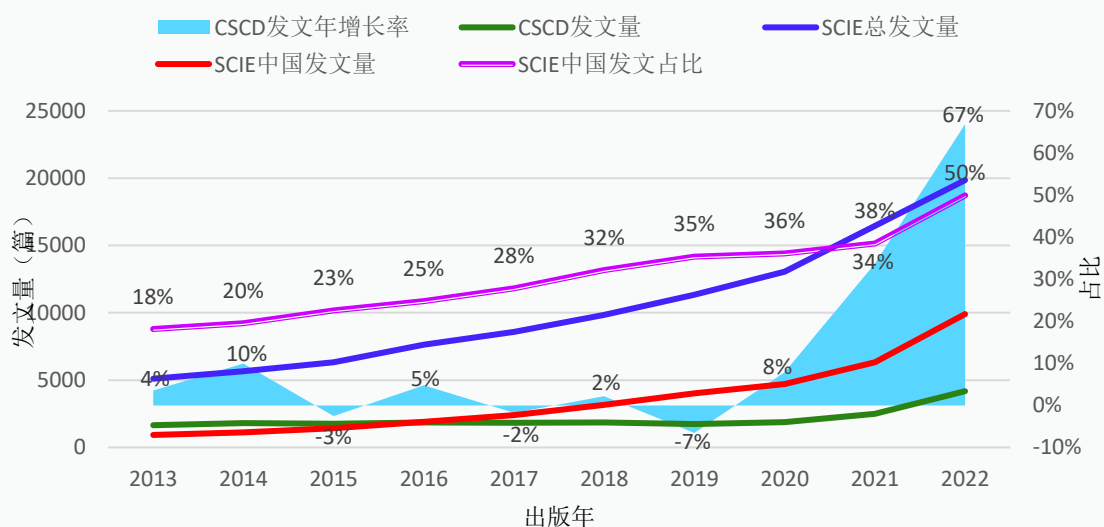


图 1 2013-2022 年国内外碳中和主题自然科学类论文发文趋势

二、主要发文国家/地区及研究机构

全球共有 166 个国家/地区参与了该领域研究。从近 10 年 SCIE 发文总量和占比来看，全球排名前 10 的发文国家依次为：中国（35866 篇，34.5%）、美国（21856 篇，21.0%）、英国（8036 篇，7.7%）、德国（7147 篇，6.9%）、澳大利亚（5991 篇，5.8%）、加拿大（5617 篇，5.4%）、印度（4540 篇，4.4%）、意大利（4225 篇，4.1%）、西班牙（4141 篇，4.0%）、法国（3941 篇，3.8%）。数据显示，发文最多的 10 个国家中，除中国和印度是发展中国家外，其他均为发达国家，且欧洲国家占据了一半席位；在全球该领域所有 SCIE 发文中，中国

大陆学者和美国学者参与发表的研究成果，分别约占成果总量的三分之一和五分之一。

为了更清晰、深入地了解各主要国家/地区 10 年间在该领域研究表现的变化过程，表 1 将最近 10 年发文区间进一步细分为前 5 年（2013—2017）和后 5 年（2018—2022）两个统计时段，并呈现各统计区间内的 TOP10 发文国家/地区。TOP10 发文国家/地区排位变化表明，中国和印度近 5 年 SCIE 发文量增长迅猛。

表 1 2013-2022 年碳中和主题自然科学类论文的主要发文国家

年份 国家 排名			
	2013—2017 年	2018—2022 年	2013—2022 年
1	美国	中国	中国
2	中国	美国	美国
3	英国	英国	英国
4	德国	德国	德国
5	澳大利亚	澳大利亚	澳大利亚
6	加拿大	加拿大	加拿大
7	意大利	印度	印度
8	法国	西班牙	意大利
9	西班牙	意大利	西班牙
10	日本	法国	法国

图 2 显示，美国是与我国在该领域研究合作最多的国家，英国次之。在亚洲，日本和巴基斯坦两国与我国科研合作较多。

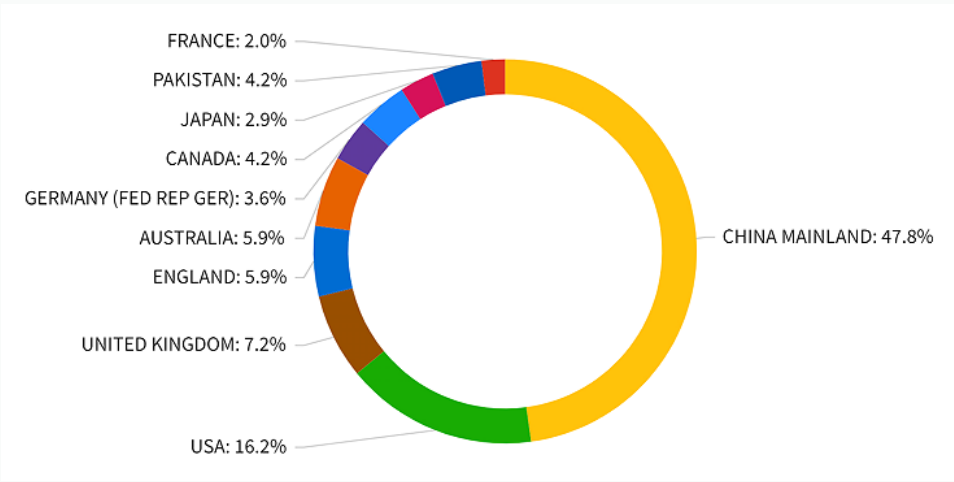


图 2 2013-2022 年中国在碳中和主题 SCIE 发文的主要合作国家

全球共有 3 万个机构参与了该主题研究，中英文发文排名前 10 的国内外研究机构见表 2。数据显示：该领域 TOP10 国外发文机构集中于发达国家：美国（3 个）、法国（3 个）、英国（2 个）、德国（1 个）和瑞士（1 个），国外政府职能部门（如美国能源部、美国农业部）、国家级科研机构（如法国国家科学研究中心、法国国家农业食品与环境研究院）、大学与大型科研团体（如德国亥姆霍兹联合会等）构成该领域研究的主体机构；国内和国外 TOP10 研究机构的 SCIE 发文量总和均达到 17000 多篇，两部分发文量之和占全球总发文量的三分之一。国内该领域以科研院所、高等院校为研究主体，我国政府职能部门（农业农村部等）也参与了外文研究成果的发表。放眼全国，中国科学院、中国科学院大学和清华大学是国内碳中和自然科学领域研究最活跃、成果最丰硕的研究机构；纵观全球，中国科学院、中国科学院大学和美国能源部是目前全世界在该领域研究贡献最多的 3 个机构。

结合之前发布的一期学术前沿动态《碳中和专题：人文社科类论文分析》可发现：美国能源部、美国加州大学系统、法国乌迪斯研究型大学和德国亥姆霍兹联合会这 4 个国外机构，以及中国科学院、中国科学院大学、清华大学、北京师范大学、华北电力大学、北京理工大学、南京大学等 7 个国内机构，均同时上榜碳中和主题人文社科和自然科学双领域的主要发文机构榜单，为碳中和领域综合研究实力强、跨学科研究成果颇丰的重要科研机构。

从近 10 年 SCIE 合作论文总量和占比来看，全球与中国合作发文的主要研究机构依次为：美国能源部(481 篇，1.34%)、美国加州大学系统(433 篇，1.21%)、英国 N8 大学联盟(374 篇，1.04%)、法国国家科学研究中心(367 篇，1.02%)、法国乌迪斯研究型大学(335 篇，0.93%)、新加坡国立大学(264 篇，0.74%)、德国亥姆霍兹联合会(249 篇，0.69%)、法国巴黎萨克雷大学(247 篇，0.69%)、美国马里兰大学系统(234 篇，0.65%)、英国伦敦大学(221 篇，0.62%)。

表 2 2013-2022 年全球碳中和主题自然科学类论文的主要发文机构

排 名	国外	国内	
	研究机构 (SCIE 发文量)	研究机构 (SCIE 发文 量)	研究机构 (CSCD 发文量)
1	美国能源部 (2,554)	中国科学院 (7,068)	中国科学院 (3,713)
2	美国加州大学系统 (2,505)	中国科学院大学 (2,618)	中国科学院大学 (956)
3	英国 N8 大学联盟 (1,992)	清华大学 (1,625)	清华大学 (573)
4	法国国家科学研究中心 (1,988)	北京师范大学 (962)	南京大学 (453)
5	法国乌迪斯研究型大学 (1,959)	北京大学 (927)	西北农林科技大学 (426)
6	美国农业部 (1,618)	华北电力大学 (924)	中国农业科学院 (416)
7	德国亥姆霍兹联合会 (1,606)	中国农业农村部 (878)	中国林业科学研究院 (392)
8	瑞士联邦理工学院及研究所联合体 (1,347)	西北大学 (861)	天津大学 (370)
9	法国国家农业食品与环境研究院 (1,071)	浙江大学 (841)	中国农业大学 (350)
10	英国白玫瑰大学联盟 (1,065)	北京理工大学 (821)	北京林业大学 (349)

注：由于该领域发文大量集中在中科院及其下属科研院所，为较为全面客观地呈现国内研究力量分布，上表将中科院及其下属科研院所发文，统一归属于中国科学院作累积计算。

三、主要研究领域及研究热点

基于 Web of Science 的分类模式，每篇论文可归属到一个或多个学科领域。从全球范围看，该主题大部分研究集中在环境科学、工程、能源燃料、农业、绿色可持续科技等自然科学领域，少部分研究分散在化学、地质、气象学和大气科学、生物技术和应用微生物学、材料科学等学科领域，其它零星分布于 120 个小众研究领域。

我们利用近 10 年碳中和自然科学领域发表的中外文高影响力论文（包括高被引论文和热

点论文)的所有关键词,经人工规范化处理、主题词合并与汇总后,生成该领域研究热点词云图(图3)。图3(a)、图3(b)分别由该领域具有高影响力的39篇CSCD论文、3088篇SCIE论文的高频关键词各自生成。其中,carbon neutrality(碳中和)、climate change(气候变化)、carbon cycle(碳循环)、carbon dioxide reduction(二氧化碳减排)、carbon capture(碳捕获)、carbon dioxide(二氧化碳)为该领域中外文高影响力论文的共同高频主题词。出现频次在100次以上的外文高影响力论文热点主题词由多到少依次为:CO₂ emissions(二氧化碳排放)、renewable energy(可再生能源)、economic growth(经济增长)、carbon emissions(碳排放)、energy consumption(能源消耗)、China(中国)、climate change(气候变化)。

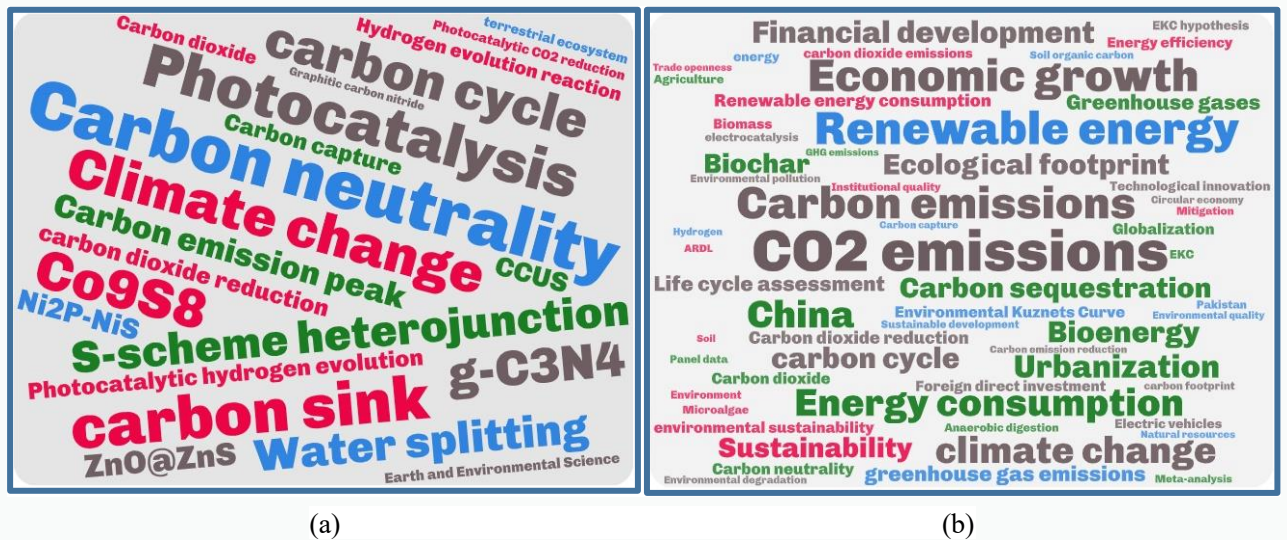


图3 2013-2022年碳中和主题自然科学类论文热点主题词云图

注:为便于对照查阅热点主题词,上图统一采用高影响力论文的英文关键词生成。

为了进一步挖掘碳中和主题自然科学领域的研究热点,我们利用Incites数据库基于引用关系的聚类功能,对103,867篇SCIE论文进行主题分类,最终得到基于强引用关系的相关论文103,358篇。将这10万多篇论文按照宏观(Macro Level)研究主题(Research Areas)归并为四大类后发现,75%SCIE论文研究成果聚焦于理科、工科和生物医学这三大类相关学科;发文量排名前10的中观(Meso Level)研究主题为:Sustainability Science(可持续性科学,19349篇)、Soil Science(土壤科学,17222篇)、Forestry(林业,5720篇)、Bioengineering(生物工程,4666篇)、Energy & Fuels(能源和燃料,3734篇)、Environmental Sciences(环境科学,3501篇)、Paper & Wood Materials Science(纸张与木材材料科学,3461篇)、Power Systems & Electric Vehicles(电力系统和电动汽车,3357篇)、Marine Biology(海洋生物学,2964篇)、Supply Chain & Logistics(供应链与物流,2625篇)。表3列出各大类宏观主题下总发文量TOP10的微观(Micro Level)主题,力求客观呈现该领域最热门的研究主题分布。统计发现,该领域分别有约60%SCIE论文及70%高影响力论文聚焦于表3列出的40个微观主题。

表3 2013-2022年碳中和主题自然科学类论文宏观、微观主题分布

大类 (发文量)	宏观主题 (发文量)	TOP10 微观主题 (中文主题, 发文量, 高影响力论文发文量)
理科 (57,071)	Agriculture, Environment & Ecology(38,890)	① Microbial Biomass(微生物量, 5845, 115) ② Nitrous Oxide(氧化亚氮, 5128, 41) ③ Dendrochronology(树木年代学, 2469, 48)
	Earth Sciences(9,205)	④ Permafrost(多年冻土, 2019, 28)
	Chemistry(7,983)	⑤ Bioenergy(生物能源, 1959, 11)
	Physics(909)	⑥ Activated Sludge(活性污泥, 1688, 26)

	Mathematics(84)	⑦ Biochar(生物炭, 1549, 88) ⑧ Fracking(水力压裂, 1525, 32) ⑨ CO ₂ Reduction(二氧化碳还原, 1504, 149) ⑩ Anaerobic Digestion(厌氧消化, 1438, 48)
工科 (19,269)	Engineering & Materials Science(10,081)	① CO ₂ Capture(二氧化碳捕获, 1799, 30) ② Gasification(气化, 1735, 47) ③ Supply Chain(供应链, 1351, 57) ④ Compressive Strength(抗压强度, 1220, 23) ⑤ Biodiesel(生物柴油, 1207, 22)
	Electrical Engineering, Electronics & Computer Science(9,188)	⑥ Organic Rankine Cycle(有机朗肯循环, 1203, 15) ⑦ Unit Commitment(机组组合, 1171, 32) ⑧ Electric Vehicles(电动汽车, 1130, 40) ⑨ Vehicle Routing Problem(车辆路径问题, 778, 15) ⑩ NDVI(归一化植被指数, 744, 28)
生物医学 (1,289)	Clinical & Life Sciences(1,289)	① Mechanical Ventilation(机械通气, 141, 3) ② Saccharomyces Cerevisiae(酿酒酵母, 93, 0) ③ Left Ventricular Assist Device(左心室辅助装置, 60, 3) ④ Obesity(肥胖症, 46, 1) ⑤ Synthetic Biology(合成生物学, 42, 1) ⑥ Lipid Droplets(脂滴, 37, 0) ⑦ Bacteriophage(噬菌体, 24, 0) ⑧ Inulinase(菊粉酶, 23, 0) ⑨ DEK Expression(DEK 表达, 23, 0) ⑩ Candida Albicans(白色念珠菌, 20, 0)
人文社科 (25,729)	Social Sciences(25,697)	① Environmental Kuznets Curve(环境库兹涅茨曲线, 13387, 1053) ② Edible Insects(可食用昆虫, 2301, 57) ③ Life Cycle Assessment(生命周期评估, 2249, 21)
	Arts & Humanities(32)	④ Data Envelopment Analysis(数据包络分析, 1055, 30) ⑤ Thermal Comfort(热舒适, 1015, 15) ⑥ Municipal Solid Waste(城市生活垃圾, 955, 24) ⑦ Renewable Energy(可再生能源, 941, 27) ⑧ E-Waste(电子垃圾, 477, 9) ⑨ Corporate Social Responsibility(企业社会责任, 466, 17) ⑩ Environmental Concern(环境问题, 286, 5)

四、基金资助主要来源

近 10 年全球在碳中和自然科学领域发表的 10 万多篇 SCIE 论文, 获得了多国政府及其基金资助机构的资助。对 WOS 数据库中“基金资助机构”字段的数据分析发现, 该领域 40%以上研究论文源自以下 25 个基金资助来源, 详见表 4。其中, 中国(8 个)、美国(4 个)、英国(3 个)、日本(3 个)、巴西(2 个)五个国家的基金资助机构占据了 20 个席位, 欧盟、加拿大、西班牙、德国、澳大利亚各占一席位。数据表明: 中国近 5 年在该领域研究成果迅猛增长, 与国家各类资助机构和资助计划的大力投入密不可分。

表 4 2013-2022 年碳中和主题自然科学类论文的主要基金资助来源

排名	基金资助来源	发文量	百分比 (%)
1	中国国家自然科学基金委员会	20,478	19.72
2	美国国家科学基金会 (NSF)	4,606	4.44
3	英国国家科研与创新署 (UKRI)	3,666	3.53
4	中国国家重点研发计划	3,442	3.31
5	欧盟委员会 (European Commission)	3,007	2.90
6	美国能源部 (DOE)	2,931	2.82
7	中国中央高校基本科研业务费专项资金	2,837	2.73
8	英国自然环境研究理事会 (NERC)	1,856	1.79
9	加拿大自然科学和工程研究委员会 (NSERC)	1,666	1.60
10	中国博士后科学基金会	1,583	1.52
11	中国科学院	1,529	1.47
12	巴西国家科学技术发展委员会 (CNPQ)	1,410	1.36
13	英国工程和自然科学研究委员会 (EPSRC)	1,358	1.31
14	美国农业部 (USDA)	1,263	1.22
15	日本文部科学省 (MEXT)	1,219	1.17
16	中国国家留学基金管理委员会	1,191	1.15
17	西班牙政府	1,187	1.14
18	中国国家重点基础研究发展计划	1,156	1.11
19	日本学术振兴会 (JSPS)	1,108	1.07
20	巴西高等教育人员促进会 (CAPES)	1,080	1.04
21	德国科学基金会 (DFG)	1,057	1.02
22	澳大利亚研究理事会 (ARC)	1,014	0.98
23	美国国家航空航天局 (NASA)	1,013	0.98
24	中国全国哲学社会科学工作办公室	993	0.96
25	日本科学研究费 (KAKENHI)	968	0.93

五、高影响力论文

根据被引情况和主题相关度，本节筛选出近两年碳中和自然科学领域同时入选 ESI 高被引和热点论文的高影响力成果，供研究参考。其中，第[2]、[3]、[7]、[15]、[20]、[22]、[23]、[25]篇都是围绕引文主题-Environmental Kuznets Curve（环境库兹涅茨曲线）展开；第[1]、[6]、[19]、[24]篇的引文主题为 Fracking（水力压裂）；第[13][16][17]篇的共同引文主题为 CO₂ Reduction（二氧化碳还原）。

[1] Friedlingstein P, Jones M W, O'Sullivan M, et al. Global carbon budget 2021[J]. Earth System Science Data, 2022, 14(4): 1917-2005.

【引文主题：宏观-Earth Sciences；中观-Environmental Sciences；微观-Fracking】

[2] Zhao X, Ma X W, Chen B Y, et al. Challenges toward carbon neutrality in China: Strategies and countermeasures[J]. Resources Conservation and Recycling, 2022, 176.

【引文主题：宏观-Social Sciences；中观-Sustainability Science；微观-Environmental Kuznets Curve】

[3] Liu Z, Deng Z, He G, et al. Challenges and opportunities for carbon neutrality in China[J]. Nature Reviews Earth &

Environment, 2022, 3(2): 141-155.

【引文主题：宏观-Social Sciences；中观-Sustainability Science；微观-Environmental Kuznets Curve】

[4] Rosenboom J G, Langer R, Traverso G. Bioplastics for a circular economy[J]. Nature Reviews Materials, 2022, 7(2): 117-137.

【引文主题：宏观-Chemistry；中观-Polymer Science；微观-Ring-Opening Polymerization】

[5] Olabi A G, Abdelkareem M A. Renewable energy and climate change[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2022, 158.

【引文主题：宏观-Social Sciences；中观-Sustainability Science；微观-Renewable Energy】

[6] Yang Y H, Shi Y, Sun W J, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality[J]. Science China-Life Sciences, 2022, 65(5): 861-895.

【引文主题：宏观-Sciences；中观-Environmental Sciences；微观-Fracking】

[7] Sun L L, Cui H J, Ge Q S. Will China achieve its 2060 carbon neutral commitment from the provincial perspective?[J]. Advances in Climate Change Research, 2022, 13(2): 169-178.

【引文主题：宏观-Social Sciences；中观-Sustainability Science；微观-Environmental Kuznets Curve】

[8] Haider F U, Coulter J A, Cai L Q, et al. An overview on biochar production, its implications, and mechanisms of biochar-induced amelioration of soil and plant characteristics[J]. Pedosphere, 2022, 32(1): 107-130.

【引文主题：宏观-Agriculture, Environment & Ecology；中观-Soil Science；微观-Biochar】

[9] Bai X, Guan J Q. MXenes for electrocatalysis applications: Modification and hybridization[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2022, 43(8): 2057-2090.

【引文主题：宏观-Chemistry；中观-Electrochemistry；微观-Oxygen Reduction Reaction】

[10] Crippa M, Solazzo E, Guizzardi D, et al. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions[J]. Nature Food, 2021, 2(3): 198-209.

【引文主题：宏观-Social Sciences；中观-Agricultural Policy；微观-Edible Insects】

[11] Yu Z Y, Duan Y, Feng X Y, et al. Clean and affordable hydrogen fuel from alkaline water splitting: Past, recent progress, and future prospects[J]. Advanced Materials, 2021, 33(31).

【引文主题：宏观-Chemistry；中观-Electrochemistry；微观-Oxygen Reduction Reaction】

[12] Nishiyama H, Yamada T, Nakabayashi M, et al. Photocatalytic solar hydrogen production from water on a 100-m² scale[J]. Nature, 2021, 598(7880): 304-318.

【引文主题：宏观-Chemistry；中观-Photocatalysts；微观-Photocatalysis】

[13] Wang G X, Chen J X, Ding Y C, et al. Electrocatalysis for CO₂ conversion: from fundamentals to value-added products[J]. Chemical Society Reviews, 2021, 50(8): 4993-5061.

【引文主题：宏观-Chemistry；中观-Electrochemistry；微观-CO₂ Reduction】

[14] Yue M L, Lambert H, Pahon E, et al. Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2021, 146.

【引文主题：宏观-Chemistry；中观-Catalysts；微观-Fischer-Tropsch Synthesis】

[15] Zhang D Y, Mohsin M, Rasheed A K, et al. Public spending and green economic growth in BRI region: Mediating role of green finance[J]. Energy Policy, 2021, 153.

【引文主题：宏观-Social Sciences；中观-Sustainability Science；微观-Environmental Kuznets Curve】

[16] Huang J E, Li F W, Ozden A, et al. CO₂ electrolysis to multicarbon products in strong acid[J]. Science, 2021, 372(6546): 1074-1078.

【引文主题：宏观-Chemistry；中观-Electrochemistry；微观-CO₂ Reduction】

[17] Jin S, Hao Z M, Zhang K, et al. Advances and challenges for the electrochemical reduction of CO₂ to CO: From fundamentals to industrialization[J]. Angewandte Chemie-International Edition, 2021, 60(38): 20627-20648.

【引文主题：宏观-Chemistry；中观-Electrochemistry；微观-CO₂ Reduction】

[18] Rosentreter J A, Borges A V, Deemer B R, et al. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources[J]. Nature Geoscience, 2021, 14(4): 225-230.

【引文主题：宏观-Agriculture, Environment & Ecology；中观-Soil Science；微观-Humic Substances】

[19] Gatti L V, Basso L S, Miller J B, et al. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change[J]. Nature, 2021, 595(7867): 388-393.

【引文主题：宏观-Earth Sciences；中观-Environmental Sciences；微观-Fracking】

[20] Welsby D, Price J, Pye S, et al. Unextractable fossil fuels in a 1.5 °C world[J]. Nature, 2021, 597(7875): 230-234.

【引文主题：宏观-Social Sciences；中观-Sustainability Science；微观-Environmental Kuznets Curve】

[21] Tang C, Zheng Y, Jaroniec M, et al. Electrocatalytic refinery for sustainable production of fuels and chemicals[J]. Angewandte Chemie-International Edition, 2021, 60(36): 19572-19590.

【引文主题：宏观-Chemistry；中观-Electrochemistry；微观-Oxygen Reduction Reaction】

[22] Li R R, Wang Q, Liu Y, et al. Per-capita carbon emissions in 147 countries: The effect of economic, energy, social, and trade structural changes[J]. Sustainable Production and Consumption, 2021, 27: 1149-1164.

【引文主题：宏观-Social Sciences；中观-Sustainability Science；微观-Environmental Kuznets Curve】

[23] Lamb W F, Wiedmann T, Pongratz J, et al. A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018[J]. Environmental Research Letters, 2021, 16(7).

【引文主题：宏观-Social Sciences；中观-Sustainability Science；微观-Environmental Kuznets Curve】

[24] Howarth R W, Jacobson M Z. How green is blue hydrogen?[J]. Energy Science & Engineering, 2021, 9(10): 1676-1687.

【引文主题：宏观-Earth Sciences；中观-Environmental Sciences；微观-Fracking】

[25] Zou C N, Xiong B, Xue H Q, et al. The role of new energy in carbon neutral[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(2): 480-491.

【引文主题：宏观-Social Sciences；中观-Sustainability Science；微观-Environmental Kuznets Curve】

因学科（专业）所限，错误在所难免，敬请批评指正！同时，我们面向全校师生征集关注的领域和专题，欢迎提出宝贵建议。联系方式：68754550，Email:jflai@lib.whu.edu.cn。

（编辑：赖剑菲 审核：刘颖）