

doi: 10.12029/gc20210201

马冰, 贾凌霄, 于洋, 王欢, 陈静, 钟帅, 朱吉昌. 2021. 地球科学与碳中和: 现状与发展方向[J]. 中国地质, 48(2): 347-358.

Ma Bing, Jia Lingxiao, Yu Yang, Wang Huan, Chen Jing, Zhong Shuai, Zhu Jichang. 2021. Geoscience and carbon Neutralization: current status and development direction[J]. Geology in China, 48(2):347-358(in Chinese with English abstract).

## 地球科学与碳中和: 现状与发展方向

马冰<sup>1</sup>, 贾凌霄<sup>1</sup>, 于洋<sup>1</sup>, 王欢<sup>1</sup>, 陈静<sup>2</sup>, 钟帅<sup>3</sup>, 朱吉昌<sup>4</sup>

(1. 中国地质调查局地质文献中心, 中国地质图书馆, 北京 100083; 2. 自然资源部信息中心, 北京 100036; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029)

**摘要:**碳中和是当前世界关注的热点, 地球科学可以在其中发挥很大的作用。在国际上, 政府间气候变化专门委员会、国际能源署、能源转型委员会, 以及在国家层面, 政策咨询小组已就 CO<sub>2</sub> 减排可能的实现方式提出了一系列模型和预测情景, 表明要实现碳中和, 电将代替化石燃料成为全球能源的主要载体。在全球迫切需要减排的背景下, 地球科学为实现《巴黎协定》气候目标提供地质解决方案至关重要, 主要科学问题涉及: 储热与地热; 干热岩; 水电储能; 压缩空气储能; 核能; 碳捕集与储存; 氢经济; 能源转型需要的矿产原材料。这就需要地球科学: 一是对岩石进行地球化学和地质体的岩石力学特征描述, 以便在可能开展脱碳的地区储存 CO<sub>2</sub> 和建立绿色能源系统; 二是进一步揭示电动汽车电池和风力涡轮机等所需矿产资源的起源和成因; 三是从小型实验室尺度扩大到试点、工业化和商业化全尺度规模; 四是要了解公众对地下脱碳技术的态度, 保证项目安全性。碳中和目标为地球科学研究提供了新的机遇, 未来发展需要从多方面提供支持; 提高对地球科学在实现脱碳方面关键作用的认识, 并发展技术, 打造产业链, 实现可持续发展。

**关键词:**碳中和; 气候行动; 地球科学; 地质调查工程; 可再生能源; 碳捕集与储存; 矿产原材料; 可持续发展  
中图分类号: P754.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)02-0347-12

## Geoscience and carbon Neutralization: current status and development direction

MA Bing<sup>1</sup>, JIA Lingxiao<sup>1</sup>, YU Yang<sup>1</sup>, WANG Huan<sup>1</sup>, CHEN Jing<sup>2</sup>, ZHONG Shuai<sup>3</sup>, ZHU Jichang<sup>4</sup>

(1. Geoscience Documentation Center, CGS, National Geological Library of China Beijing 100083; 2. Information Center of Ministry of Natural Resources, Beijing 100036; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101; 4. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029)

**Abstract:** Carbon neutralization is a hot topic in the world, and geoscience can play an important role in this field. Internationally, the Intergovernmental Panel on Climate Change, the International Energy Agency, the Energy Transition Commission, and policy advisory groups at the national level have proposed a series of models and scenarios for possible ways to reduce CO<sub>2</sub> emissions, indicating that to achieve carbon neutrality, electricity will replace fossil fuels as the main carrier of global energy. In the context of global urgent need for CO<sub>2</sub> emission reduction, it is very important for geosciences to provide geological solutions to achieve the climate objectives of the Paris Agreement. Carbon dioxide emission reduction involves many scientific issues, including heat storage

收稿日期: 2021-02-03; 改回日期: 2021-03-01

基金项目: 中国地质调查局项目“国际地质调查动态跟踪与分析”(DD20190414)资助。

作者简介: 马冰, 女, 1967年生, 研究员, 从事矿产资源管理研究; E-mail: mabing@mail.cgs.gov.cn。

and geothermal, dry hot rock, hydropower energy storage, compressed air energy storage, nuclear energy, carbon capture and storage, hydrogen economy and mineral raw materials for energy transformation. Earth science can help reducing carbon dioxide emissions through the following ways: first, to describe the rock mechanics characteristics of geological body, so as to store CO<sub>2</sub> and establish green energy system in the decarbonization area; secondly, to further reveal the origin and genesis of the mineral resources needed for electric vehicle batteries and wind turbines; thirdly, to expand the scale from small laboratory to pilot, industrialization and commercialization; and fourthly, to understand the public's attitude towards underground decarbonization technology to ensure the safety of the project. The goal of carbon neutralization provides new opportunities for geoscience research, and the future development needs support from various aspects. Achieving carbon neutrality requires improving awareness of the key role of geoscience in achieving decarbonization, developing technologies, building industrial chains, and achieving sustainable development.

**Key Words:** Carbon neutralization, climate action, geoscience, geological survey engineering, renewable energy, carbon capture and storage, mineral raw materials, sustainable development

**About the first author:** Ma Bing, female, born in 1967, professor, engaged in mineral resources management research, E-mail: mabing@mail.cgs.gov.cn.

**Fund support:** Supported by China Geological Survey Project 'dynamic tracking and analysis of International Geological Survey' (DD20190414)

## 1 引 言

美国《科学进展》最近发表文章指出:地球即将达到气候变化的致命“临界点”,到2050年,地球吸收三分之一人为碳排放的能力可能会减少一半。研究结果揭示了一个关键的气温临界点,超过这个临界点,植物捕集和封存大气碳的能力(“陆地碳汇”)会随着气温的升高而下降。全球变暖最终将把世界上的一些碳汇变成碳源,从而加速气候变化(参考消息,2021)。碳中和,是指在规定时期内,二氧化碳的人为移除与人为排放相抵消,这对于实现《巴黎协定》气候目标至关重要,越来越多的国家政府正将其转化为国家战略(中国碳交易网,2020)。2020年9月,习近平总书记提出中国“2030年碳达峰、2060年碳中和”目标,欧盟、日本、加拿大、英国、法国、德国、丹麦、西班牙、韩国(均为2050年)、瑞典(2045年)、奥地利(2040年)、芬兰(2035年)等30多个国家以及美国加利福尼亚州(2045年)也都提出了碳中和目标。英国地质调查局的Michael H. Stephenson,挪威理工大学的Philip Ringrose,英国赫瑞瓦特大学的Sebastian Geiger,英国Kirk Lovegrove公司的Michael Bridden以及英国地质调查局莱伊尔中心的David Schofield近期撰文指出,地球科学对于脱碳至关重要,在碳中和进程中的作用是无与伦比的(Stephenson, 2018; Lindsay

Delevingne, et al. 2020)。

在2015年巴黎联合国气候变化大会(COP21)上,197个缔约国承诺全球气温在本世纪末的升幅控制在比工业革命前不超过2℃的水平,但目前的计划和进展仍远远不足以实现这一目标,制定气候战略并非易事(Lindsay Delevingne, et al. 2020)。本文分析了地球科学在为实现国际气候变化目标而在脱碳方面所可能发挥的作用。讨论的技术包括通过可再生能源发电来实现电力生产的脱碳、使用地热能替代家庭供暖、使用碳捕集与储存(CCS),以及更具雄心的技术,如生物能源和碳捕集与储存(BECCS)等针对负排放的技术。此外,可再生能源供应的增长将导致对地质原材料的需求增加,这样电动汽车和其他低碳技术才能维系下去。得出的总体结论是,地球科学对脱碳至关重要,但地球科学界必须影响决策者,以便充分认识地下对脱碳的价值。

## 2 背 景

长期以来,地球科学一直被认为是脱碳解决方案的一个重要部分。Pacala和Socolow(2004)在《科学》杂志发表一篇题为“稳定楔子:用当前技术解决未来50年的气候问题”的文章,此文确立了一个重要概念,即可以使用一些互补的技术修复和行为改变来实现减排,所实现减排的规模可以出现差异性

的气候变化。简言之,Pacala和Socolow(2004)认

为,气候问题可以通过现有的成熟技术来解决,并可以减少能源浪费。他们的概念将CO<sub>2</sub>减排视为一组“稳定三角形”,说明“当前路径”(碳排放量不断上升)和“平坦路径”(显示通过降低排放量可以实现的目标)。Pacala和Socolow(2004)认为,这两条路径之间的稳定三角由“楔子”组成,可能使脱碳任务更易于管理;每个楔子都是一项活动,如果从现在到2055年单独开展这项活动,则到2055年每年可阻止10亿t额外的碳进入大气。其中一些楔子是地球科学方面的措施,包括在核能日益增长的情景下对核废料处置进行地质控制,以及增加天然气供应,以便在火力发电站将发电从煤炭转换为天然气。Pacala和Socolow(2004)在楔子概念中提出的最纯粹的地质解法是碳捕集与储存(CCS)。他们认为,如果将CCS应用于总装机容量为800 GW的燃煤发电站(约200个大型煤电站),并将CO<sub>2</sub>储存在地下,那么这将可以实现一种减排楔子。

从Pacala等(2004)论文发表之后的15年里,脱碳解决方案的范围有所增加,各国对减排的承诺也更加坚定。在国际上,政府间气候变化专门委员会(IPCC,2018)、国际能源署(IEA,2018)、能源转型委员会(ETC,2017),以及在国家层面,政策咨询小组(如英国气候变化委员会,2019)已就这些减排可能的实现方式提出了一系列模型和预测情景。然而,实际进展缓慢。图1说明在过去十年间全球CO<sub>2</sub>排放量有所减缓(尤其是可再生能源的增长以及从煤电向天然气发电的转变),但如果世界要接近《巴黎协定》的目标,仍然需要进一步大幅度地减排。Ringrose(2017)回顾了如何实现这些减排,重点关注3个基本行动:可再生能源、天然气和CCS。在过去几十年间,可再生能源的部署显著增强。2016年,全球可再生能源产量约为5900 GWh,其中水力发电占70%,其余的是太阳能、风能和地热发电。这意味着自1960年代以来,可再生能源的使用量增长6倍。未来预测表明,到2050年,电将代替化石燃料成为全球能源的主要载体,其中可再生能源能够提供全球大部分电力需求(国际可再生能源署,2019)。

全球对化石燃料的需求(目前约占全球能源供应的80%),预计将在未来10年的某个时候达到峰值(Goldthau et al., 2019),尽管对于这些变化将以多快的速度发生以及未来的能源结构将是什么样

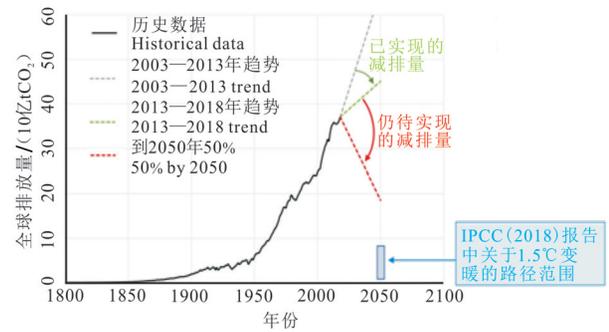


图1 全球CO<sub>2</sub>排放量历史记录与各种预测值的比较  
(数据来源:碳排放数据截至2013年,2014—2018年的估计值引自世界资源研究所(WRI,2015))

Fig.1 Historical record of global CO<sub>2</sub> emissions and its comparison with various projections  
(data sources: carbon emissions data up to 2013, 2014—2018 years estimates from WRI,2015)

子,有许多不同的看法。在未来几十年,能源供应系统可能会迅速发生变化,新概念将很可能成为主流,如天然气发电补充波动变化的可再生能源发电。基于化石燃料的能源,其减少向大气排放CO<sub>2</sub>(或净零)的利用方式也将成为重点。

IPCC(2018)描述了将全球变暖限制在巴黎COP21中1.5℃目标的4个“说明性模型路径”(图2)。所有路径都需要一定程度的CO<sub>2</sub>清除(CDR),但不同路径所需的CO<sub>2</sub>清除量各不相同,如生物能源和碳捕集与储存(BECCS)与农业、林业和其他土地利用部门碳清除量(AFOLU)的相对贡献不一样;模型路径也涉及储能。路径P1涉及社会、商业和技术创新,导致2050年前能源需求下降,生活水平提高,特别是在发展中国家。路径P2关注可持续性和国际合作,以及转向可持续和健康的消费模式、低碳技术创新以及BECCS社会可接受性有限的善治土地系统。在P3中,社会和技术发展遵循历史模式,减排主要通过改变能源和产品的生产方式来实现,而在较小程度上通过减少需求来实现。在P4中,对脱碳工作的响应较慢,因此需要在广泛部署BECCS的情况下更多地使用负排放技术(图2)。

IEA世界能源展望(2018)的可持续发展情景也将实现《巴黎协定》的长期目标,其假设前提是,风能和太阳能增加、电动汽车快速扩张、能源生产率提高以及碳捕集利用和储存(CCUS)技术的部署。能源转型委员会(ETC,2017)更广泛地审视了金融

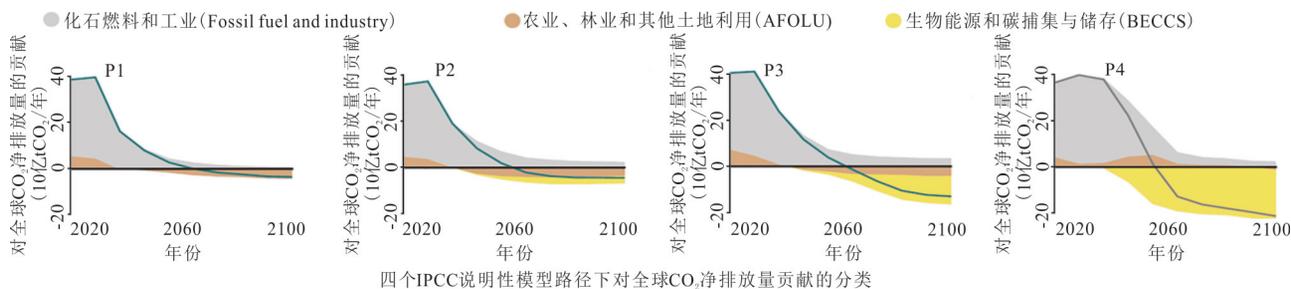


图2 IPCC提出的4个模型路径(据IPCC,2018)

Fig.2 The four IPCC illustrative model pathways (after IPCC 2018)

和政策领域,并将脱碳视为由金融和政策因素推动的1个同时运行的转型战略(图3)。这些转型战略是:(1)电力脱碳与电气化扩展相结合;(2)对不能经济有效地实现电气化的活动进行脱碳;(3)加快提高能源生产率的步伐;(4)在总碳预算约束下优化化石燃料的利用。

ETC指出,从现在到2040年,电力脱碳和电气化扩展可能在减排份额中所占比重最大,到2040年,零碳源(主要是可再生能源)将占全球电力结构的80%。

ETC的第二个战略,包括运输或水泥制造等工业活动的脱碳,这些活动不能以合理的成本实现电气化,是一个更大的技术挑战。第三个战略着眼于建筑隔热、家用电器、运输设备和工业工艺的效率提高;第四个战略着眼于在总碳预算约束下优化化石燃料的使用。

可持续发展目标“确保获得可负担得起、可靠、可持续和现代化的能源”,将试图实现这一目标。该目标旨在改善能源获取,增加能源结构中的可再生能源,提高能源效率,并通过国际合作实现低碳转型。其中,许多目标与地球科学密切相关:例如,需要对地热等地下可再生能源进行勘探和可行性研究,以及在严格碳预算范围内开发可持续使用化石燃料的技术(表1)。

### 3 科学问题

在全球迫切需要减排的背景下,地球科学为巴黎COP21会议上商定的“低于2℃”目标提供地质解决方案至关重要(Mike Stephenson, et al. 2020)。主要科学问题涉及:(1)储热与地热;(2)干热岩;(3)水电储能;(4)压缩空气储能;(5)核能;(6)碳捕集

与储存;(7)氢经济;(8)能源转型需要的矿产原材料。其他问题还包括:(a)科学政策;(b)关于能源转型的社会科学见解;(c)公众对地球科学服务于能源脱碳的看法;以及(d)地球科学脱碳未来的地质技能可用性。

#### 3.1 储热与地热

储热是地球科学中一项非常重要的技术,而脱碳对于家庭供暖和制冷所用能源的脱碳至关重要。伯明翰大学的Toby Peters指出,由于无法得到制冷,全球10亿多人无法获得营养食品和健康所必需的疫苗,以及无法从超出人类生存极限的温度中找到喘息的机会。确保有需要的人都能负担得起制冷,对于缓解世界许多地区的贫困和实现2030年可持续发展目标至关重要。到2050年,空调和制冷行业的能源消费量将是现在的5倍多。Peters创造性地探讨了地球科学解决方案,这些解决方案可以利用城市地区的地下空间,提供廉价的制冷(以及供热)。

基尔的克里斯蒂安-阿尔布雷希茨大学的Sebastian Bauer和Andreas Dahmke指出,在德国,约50%的能源需求来自供热和制冷系统,迄今为止,只有一小部分能源需求是用可再生能源来满足的。因此,作为能源转型的一部分,需要大量增加可再生能源的使用,以应对气候变化的影响。他们描述了从太阳能或工业中季节性储存大量热量的可能性。地下蓄热的技术选项包括含水层和井眼储热,这两种方法原则上可以在大多数地下地质构造中进行储热。使用高达90℃的温度可以提高存储速率和容量。然而,为了实现大规模的城市地下蓄热,需要根据可实现的热注入和抽热率以及储存容量来确定储存系统的规模。此外,预测诱导热以及水力、机械和化学效应的方法需要能够评估这些储

表1 联合国可持续发展目标到2030年的目标和指标

目标	指标	与地球科学的关系
到2030年,确保普及负担得起、可靠和现代化的能源服务	可用电人口比例	地球科学促进可再生能源和适当利用化石能源的勘探和可持续性
到2030年,大幅提高可再生能源在全球能源结构中的比重	主要依赖清洁燃料和技术的人口比例 可再生能源占最终能源消费总量的份额	地球科学支持可再生能源的扩张(如地热、风力涡轮机地面条件)
到2030年,全球能源效率增长率翻倍	以一次能源和国内生产总值衡量的能源强度	涉及地下空间的整体规划
到2030年,加强国际合作,促进获得清洁能源研究和技术,包括可再生能源、能效和先进清洁的化石燃料技术,促进对能源基础设施和清洁能源技术的投资	从2020年开始,每年动员共同投资,按照1000亿美元的承诺进行核算	改善地球科学家/地球科学机构和其他能源专家之间的联系
到2030年,根据发展中国家,特别是最不发达国家、小岛屿发展中国家和内陆发展中国家各自的资助方案,扩大基础设施和升级技术,为所有人提供现代和可持续的能源服务	能源效率投资占国内生产总值的百分比,以及将基础设施和技术转移到可持续发展服务的外国直接投资额	改善地球科学家/地球科学机构和其他能源专家之间的联系,包括能源输配专家和金融部门

存场所的环境影响。Bauer和Dahmke还证明,可能的储热场地对地下空间的需求,应作为地下空间规划的一部分加以考虑。

达姆施塔特技术大学的Ingo Sass将低焓地热系统视为散热器,可以用于排出多余的热。这类系统已用于冷却应用,这在全球变暖背景下变得越来越重要。此外,工业过程、热电联产发电厂或太阳能集热器产生的多余热量,可以在夏季通过钻孔热交换器阵列转移到地下,然后在冬季提取出来取暖。这种季节性的储热系统依靠原位地下热量来维持注入流体的温度,当应用于区域供热层面时特别有效。

EGS能源公司技术总监Roy Baria讨论了干热岩石的重要性以及工程地热系统在不需要自然对流热液资源情况下所能提供的进展。直到最近,地热发电系统只开采自然产生的热资源,而水和岩石渗透性足以进行能量提取。然而,EGS公司的技术通过水力刺激来增强干热岩中的地热资源。

同样寻找高焓热的还有Thomas Driesner(苏黎世ETH公司),他描述了冰岛岩浆体正上方2 km深处“超热”地热的潜力,在井口产生的过热蒸汽达到450℃和14000 kPa。意大利中央研究院的Adele Manzella称,在托斯卡纳的Larderello油田,两个欧洲项目正在研究该地区的深层化学-物理条件,这是世界上最富生产力的热液系统之一,其特点是极高热流。

达勒姆大学的Charlotte Adams介绍了200多年来一直大规模采煤遗留下来的矿井的一种地热机遇,这是一种被淹没的地下资产,估计含有约220万GWh的可用地热,其来自20亿m<sup>3</sup>的水,温度稳定在

12~16℃。使用热泵和换热器,温度可以提高到40~50℃,并且矿井水一直远离地表。

### 3.2 干热岩

干热岩能源是国际社会公认的高效低碳清洁能源。一是,干热岩地热资源是一种潜力巨大的新型能源资源,全球陆区干热岩资源量相当于4950万亿t标准煤;有专家保守估计,地壳中距地表3~10 km深处的干热岩所蕴含的能量,相当于全球石油、天然气和煤炭所蕴藏能量的30倍。二是,与传统化石能源相比,干热岩地热能是一种清洁可再生能源;与其他清洁能源相比,干热岩能够实现稳定、可靠且安全的能源供应。干热岩发电几乎是零排放,开发安全,持续性好,一旦技术成熟,成本也可以大幅度下降。据美国能源部EGS技术路线图,到2030年干热岩发电的预期商业化成本为每度电3.6~9.2美分。三是,干热岩可循环利用。冷水变热后可能最终会使岩石温度降低到20℃左右,因此一处干热岩发电站可能只能连续工作20年左右,但热储库关闭后,地心的炽热岩浆会重新加热这些岩石,几十年后,这些干热岩就能再次被用于发电。干热岩相对水热型地热资源等来说它的潜力会更大(矿业在线,2017)。

世界干热岩的开发始于20世纪70年代,为美国Fenton Hill项目,1973年开展了增强型地热系统(EGS)试验;80年代进入干热岩开发项目开展的一个高潮期,其中法国Soulz-tous-Forêts项目是目前为止全球最为成功并稳定商业发电的干热岩开发项目。21世纪初的十年,干热岩勘探开发迎来了第二个高潮期,欧洲、中北美洲合计启动了17个干

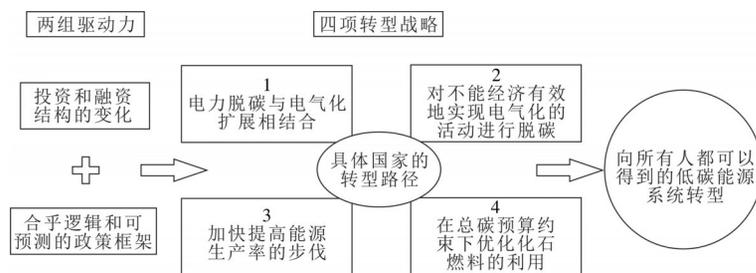


图3 能源转型委员会(2017年)4个转型战略(据 Lindsay Delevingne, et al. 2020)

Fig.3 Four transition strategies of the Energy Transitions Commission (2017) (after Lindsay Delevingne, et al. 2020)

热岩开发项目;2010年以来,全球启动了10个干热岩开发项目,其中美国Milford和中国青海共和项目为近年来关注度最高的两个(毛翔等,2019;杨建锋,2019)。尽管美、法、德、日、英等国在干热岩开发方面取得了一定进展,但总体上仍处于试验和示范阶段,还未实现商业化开发(中国石化报,2019)。

中国干热岩远景资源量折合标准煤856万亿t,是未来煤和石油等化石能源枯竭后最具潜力的战略接替能源。2017年,中国地质调查局宣布青海共和盆地3705 m深处钻获236℃的干热岩体,是中国在非现代火山活动区首次发现高温干热岩型地热资源,未来有望在干热岩型地热能开发技术方面取得突破。从2018年开始,中国地质调查局、青海省、中石化三方联合推进青海共和干热岩增强型地热系统(EGS)科技攻坚,有望最终突破干热岩勘查开发重大科技难题,实现干热岩勘查开发重大仪器国产化,建立中国可复制推广的经济型、规模化干热岩开发示范工程(王贵玲,2020)。

### 3.3 水电蓄能

如图4所示,抽水水电方案(PHSs)非常适合快速响应、电网规模储能。抽水蓄能电站利用电力负荷低谷时的电能抽水至上水库,在电力负荷高峰期再放水至下水库发电的水电站。它可将电网负荷低时的多余电能,转变为电网高峰时期的高价值电能。国外抽水蓄能电站的出现已有一百多年的历史,较大规模的为美国弗吉尼亚州巴斯康蒂抽水蓄能电站,于1985年运行,装机总容量为3.003 GW。中国抽水蓄能电站的建设起步较晚,起点却较高,近年建设的几座大型抽水蓄能电站技术已处于世界先进水平(北极星储能网,2016)。据美国储能协会(ESA)的数据,全球有270座抽水蓄能电站正在运行或在建,这代表了超过120000 MW的综合发电能力(ESA,2021)。抽水蓄能电站建造对地质环境有

特殊要求。英国地质调查局的Martin Smith指出,在英国,苏格兰和北威尔士有4个这样的计划,为英国电网提供2.8 GW的最大电力输出。PHS场地面临的主要挑战包括地形、水资源和地质条件。位于主要为古硬结晶基底或火山岩区域,地质条件通常被认为是稳定和可预测的,但情况并非总是如此,因此需要开展深入的地质工程适宜性和减灾措施研究。Smith描述了Glendoe水电站项目,由于断裂和断层作用,一个隧道发生故障,应力释放后需要进行断层研究。这就要求修建一条绕行隧道,并就费用的赔偿责任向法院提起了漫长的诉讼。

### 3.4 压缩空气储能

可再生能源面临间歇性问题:在有风和晴朗的日子里,当多余的能量被送入电网时,能够储存起来;当需求超过供应时,能够在以后使用。诺丁汉大学的Seamus Garvey指出,压缩空气储能(CAES)可能是一种解决办法。压缩空气储能系统主要利用电网负荷低谷时的剩余电力压缩空气,并将其储藏在高压密封设施内,在用电高峰释放出来驱动燃气轮机发电。CAES单位能量的储存成本较低(0.42~4.71美元/kWh),且自放电可忽略不计,因此适合大规模长时间储存,这可能大大优于铅酸电池或锂电池等电化学储存,以最大限度地提高大规模储存集成可再生发电的价值。与电化学储存(如锂离子电池)相比,CAES具有较低的能量密度(3~6 kWh/m<sup>3</sup>),因此经常使用地质资源进行大规模空气储存。分析表明,如果使用小于5%的全球CAES地质潜力,则可获得约6574 TWh的储存容量,这一能源容量约占当前全球总用电量的30%(He Wei, et al. 2021)。

压缩空气储能(CAES)是目前商业上唯一成熟的大容量储能技术。例如,压缩空气罐被用来启动柴油发电机和推进地下矿山铁路。CAES将大量压缩空气储存在地下洞穴中(主要是盐层中),以便以

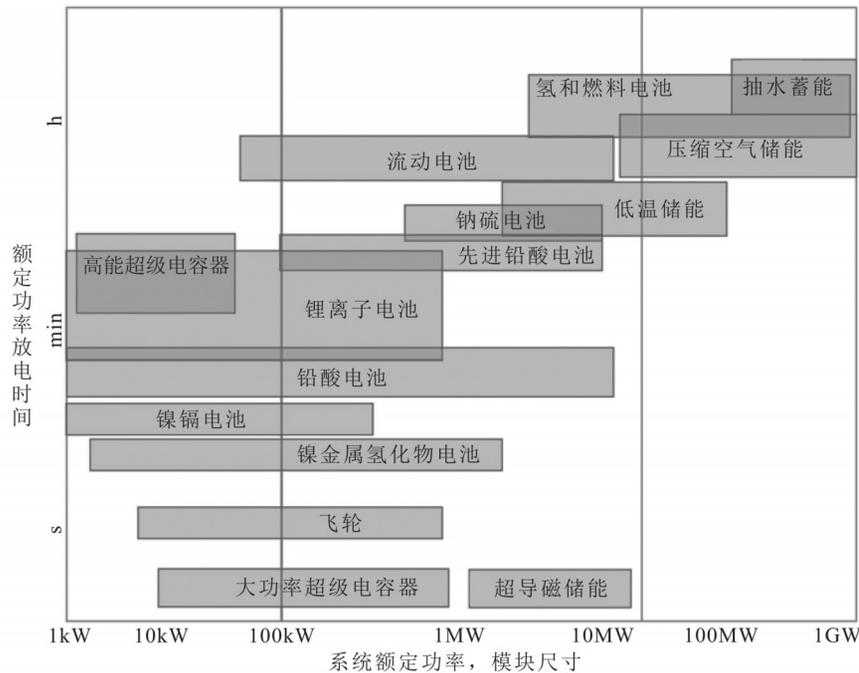


图4 不同储能技术在电网规模应用中的适用性  
(据低碳未来中心资料修改)

Fig.4 The suitability of different energy storage technologies for grid-scale applications  
(modified from the Centre for Low Carbon Futures website)

后通过涡轮机提取。

这一挑战可以归结为两个变量:存储容量和储能可用于电网的速度。图4是一个概念化的表述。一些技术提供电网规模的容量(或“大容量电力管理”),包括抽水蓄能和CAES,尽管接入电力的速度比大型电池慢。

CAES面临的工程挑战之一是空气从大气压力压缩时会升温,在工业CAES情景下,预计储存压力约为7000 kPa。必须控制热,以避免损坏压缩机和洞穴。盐穴最具有适宜性,因为它不透水,没有压力损失,而且空气中的氧和盐之间没有反应。英国陆地盐层相对丰富,其中一些已经被用于储存天然气。CAES在天然含水层中也是可行的,尽管氧气可能与围岩中的矿物发生反应,而含水层中的微生物可以消耗氧气并改变储存空气的性质;同样,细菌也可以起到阻塞储层孔隙空间的作用。枯竭天然气田也可用于CAES,尽管必须考虑残余碳氢化合物与压缩空气的任何混合。

与电网级电池相比,CAES的优点包括压力容器的寿命更长,材料毒性更低。然而,洞室的设计和施工费用昂贵。

### 3.5 核能

核能被广泛认为是低碳电力生产的贡献者,核电站在全球电力供应方面具有重大贡献,目前全球有667座核电站。据国际能源署(IEA),2019年,全球核电总装机容量为443 GW(Michel Berthélemy, et al. 2020)。IEA发表报告称,根据2°C升温情景,到2050年,核电容量将需要增加一倍以上,达到930 GW(CarbonBrief, 2015)。核能与地球科学有着密切(尽管是间接的)的联系。这主要是因为产生的废物必须在安全、深部地质储存库中处理。核能被广泛认为是低碳电力生产的贡献者,核电站在全球电力供应方面具有重大贡献,但也会产生放射性废物。放射性废物有限公司的Jonathan Turner解释说,英国自20世纪40年代以来已经积累了大量放射性废物,未来若干年还只能继续这样下去。到2100年,英国可能需要安全管理260万t高放废物,可能是在专门为此建造的深部洞穴内。本质上讲,地质处置设施(GDF)利用工程材料和结构(包括混凝土、金属和黏土)以及周围的地质环境作为安全屏障。地球科学专业知识将在GDF的设计和选址(例如,预测冰川期地下水系统的行为)以及模拟地图对

GDF的近场响应(如开挖破坏区、热通量影响以及GDF运行期间岩石去饱和程度)中发挥关键作用。

安全屏障的很大一部分是工程屏障周围岩石的自然排列。这在某些方面类似于地下处置或控制CO<sub>2</sub>;然而,时间框架非常不同,因为放射性核素可能在未来数十万年内仍然具有危险性。因此,地质环境的一个基本要求是,其行为应足够可预测,可建立非常长期的辐射安全。需要评估的因素包括目前和未来的地震活动水平,冰川作用、隆起和侵蚀的影响,以及包括海平面上升在内的气候变化的未来影响,因为所有这些过程都可能会损害GDF。风险评估包括对现在和最近发生的地质作用进行相当详细的研究,以便了解未来1 Ma间的变化。

新的核电站已经作为一种相对低碳的基本负荷电力解决方案得到推广。达勒姆大学的Bob Holdsworth说,地震灾害是建设新核电站时需要考虑的最“地质”的外部危害之一。地震的主要危险性和对建筑物和设备造成破坏的主要原因是震源辐射的地震波通过引起的地面强烈震动。这可能会因局部存在松散沉积物而加剧,也可能引发次生灾害,如液化或滑坡。强地面震动的描述通常通过概率地震危险性分析来进行。这项分析已经在英国两座新核电站进行,另外两个正在进行中。

### 3.6 碳捕集与储存

关于二氧化碳减排和气候恢复,一个核心论点是:从地圈提取出的二氧化碳必须通过返回地圈来平衡(S. Julio Friedmann et al., 2020)。碳捕集与储存(CCS)以及相关的生物能源和碳捕集与储存(BECCS)可以实现负排放。政府间气候变化专门委员会全球升温1.5℃特别报告(IPCC SR15)以及一系列近期分析和研究都强调了碳捕集与存储在缓解气候变化中的作用。IEA的可持续发展情景估计9%的减排量将来自CCS,9%的数字代表约40亿t的CO<sub>2</sub>,每年需要建造70~100个CCS设施,同时还具备必要的运输和存储基础设施。全球CCS的发展和部署继续加快步伐,截至2019年,全球大型CCS设施增加到514个,每年捕获并永久储存约4000万t二氧化碳(Brad Page et al., 2019)。

开发和评估全球范围内具有战略意义的、可用的CO<sub>2</sub>地质存储场地,对于实现CCS的净零排放规划和开发至关重要。Blunt和Gibbins(2008)认为,通过仔

细的场地特征描述、注入设计和监测,在地下安全、长期储存CO<sub>2</sub>是可能的。他们还指出,大规模实施CCS的障碍不是技术上的困难,而是目前的商业安排。无论财务框架如何,石油和天然气公司的专业知识和经验都可能是CCS商业尺度推广的核心。

廷德尔中心的Clair Gough描述了BECCS如何成为实现将全球平均气温上升限制在1.5℃目标的核心。BECCS是CCS的一个变体,其使用生物燃料而不是化石燃料作为燃烧材料。BECCS可能导致“负排放”:换句话说,这个工艺将导致从大气中净抽取CO<sub>2</sub>。Gough的结论是,将现代生物质能系统与CCS结合在一起,其规模足以在全球范围内产生负排放,远远超越技术和科学挑战。作为一种年轻且未经验证的技术群体,与BECCS相关的不确定因素很多,因此迫切需要了解利用这些技术的条件和后果。尽管如此,BECCS仍被IPCC(2018)报告视为是将全球变暖控制至1.5℃路径的关键部分(图1)。

国际能源署(IEA)(2020)在《清洁能源转型的碳捕集、利用和储存》报告中指出,实现“碳中和”的关键支柱是碳捕集、利用和储存(CCUS),它是在CCS关键技术之上的扩充,更强有力的投资激励和更具雄心的气候目标正是背后推动CCUS的新动力,在经济复苏计划中支持CCUS,可以确保Covid-19危机不会阻碍近期进展(IEA, 2020)。世界资源研究所(WRI)(2020)撰文强调,疫情后经济复苏的重要驱动力将是低碳投资(Helen Mountford, 2020)。

### 3.7 氢经济

氢,作为一种燃料和原料,可以在排放难以减少部门的脱碳中发挥重要作用,前提是生产清洁和足迹低碳。近几年,氢技术保持强劲势头,引发了决策者的浓厚兴趣。但要实现氢能与可持续发展情景(SDS)接轨,仍要做出更多的努力:扩大规模以降低成本;在目前的应用中用低碳氢取代高碳;将氢的使用扩大到新的应用(Jose M Bermudez et al., 2020)。根据IEA(2019)的数据,目前只有不到0.7%的氢生产来自配备了CCS(蓝氢)或电解可再生能源(绿氢)的化石燃料厂。目前,有5座配备CCS的大型“蓝”氢设施生产低碳氢,还有3座正在建设中,氢总年产量为150万t。为了到2030年取得净零进展和实现净零目标,迅速扩大清洁氢生产将是至关重要

的。能源转型委员会(2018)“可能的任务”报告指出,到2050年,全球氢产量需要每年增长80%~95%,才能达到净零排放。

“氢经济”一词最早由物理学家 John Bockris 提出,作为目前碳氢化合物经济的替代品。氢经济包括用于运输的燃料(公路车辆和航运)、固定发电(用于建筑物的供暖和供电)以及从非高峰时段多余电力供应的储能介质。从碳氢化合物到氢作为“主要能源载体”的大规模转型,需要对基础设施和储能进行彻底的反思:例如,氢的地质储存和管道与目前的天然气基础设施和正在讨论的CO<sub>2</sub>和CCS基础设施没有什么不同。

James Dawson(挪威科技大学)讨论了燃烧氢和富氢燃料的主要技术挑战,其中包括氢和天然气燃烧特性之间的显著差异,如火焰速度和点火延迟时间。Dawson强调了规模的重要性,目的是证明,除了可再生能源的增长外,氢燃气轮机在全球CO<sub>2</sub>减排方面可以发挥关键作用,并有助于提供稳定的能源供应基础设施。

Equinor公司的Henrik Solgaard Andersen描述了通过H21计划实施区域氢经济的可能途径。H21计划(Northern Gas Networks, 2018)介绍了2028至2035年期间将英格兰北部天然气管网转化为氢的详细工程解决方案。这将提供英国14%供热的深度脱碳,并成为全球最大的CO<sub>2</sub>减排项目,每年可减少1250万t CO<sub>2</sub>排放。此外,该计划将包括8万亿Wh的季节间地下储氢设施,该储氢设施位于56个30万m<sup>3</sup>的地下洞穴中,以及一个CO<sub>2</sub>运输和储存基础设施,该设施能够在2035年前在北海南部的深层盐层中封存高达2000万t CO<sub>2</sub>。

### 3.8 能源转型需要的矿产原材料

世界银行2020年的报告《气候变化行动所需要的矿产资源——清洁能源转型的矿产耗用强度》指出,低碳未来将是矿产“非常”密集型的,因为清洁能源技术比基于化石燃料的发电技术需要更多的物质资源。太阳能电池、风力涡轮机、电动汽车、锂电池、燃料电池和核电站都是复杂的技术,对原材料的需求也同样复杂。世界银行2020年的报告确定了17种上述技术需要的矿产原材料,包括铝、铬、钴、铜、石墨、钢、铁、铅、锂、锰、钼、钕、镍、银、钛、钒、锌。要达到《巴黎协定》规定的气候变化目标

(1.5~2℃,或更低),需更多采用清洁能源技术,因此将导致更大的矿产原材料耗用量(Kirsten Hund, et al. 2020)。Mark P. Mills(2020)指出,与碳氢化合物相比,绿色机器平均所开采和加工的原材料数量需要增加10倍,才能生产出同等数量的能量。2020年Benjamin K. Sovacool在《Science》上发表的文章指出,减缓气候变化将为自然资源和供应链带来新的机遇和困境,因为建设新的低碳能源设备和基础设施将需要大量的原材料。如果矿业可持续发展,那么即将到来的矿业繁荣将有助于帮助社区摆脱贫困,加速脱碳技术创新,并进一步实现能源和气候目标(Benjamin K. Sovacool et al., 2020)。EIT原材料小组的Karen Hanghøj解释了如何更好地理解“循环经济”的关键:以可持续的方式将原材料引入循环,尽可能长时间地将原材料保持在循环中,并在各个阶段尽量减少浪费。Frances Wall(坎博恩矿业学院)、Lluís Fontboté(日内瓦大学)和Tracy Shimmield(英国地质调查局)指出,无论各国再怎么努力地回收利用,全球仍然将需要开采更多的原材料和利用更广泛的元素,才有可能建立和维持低碳技术。其中大部分新的原材料将来自常规矿山,但有些也可能来自海底。尽管这些元素非常必要,但清洁技术原材料的需求量和市场规模通常很小,而且购买起来也相当便宜。在全世界只有几座矿山可能就足够了,但其很容易受到供应中断的影响。17种稀土元素可能是这些关键原材料的缩影,这些稀土元素被用于风力涡轮机、太阳能光伏电池板、电动汽车的直接驱动电机、低能耗照明、所有计算机和我们周围的许多其他应用。稀土的潜在供应多种多样,从高品位的火成岩到低浓度的黏土、海底淤泥,以及化肥和铝生产的副产品。

## 4 展望

### 4.1 面临的问题与挑战

前文主要阐述了地质脱碳技术共同面临的一些地质和科学问题。例如,当深层岩盐被用作大规模区域氢燃料和加热系统的一部分来储存氢时,需要了解其成分和性质(“氢经济”)。盐层在储存期间会被反复加压和减压,必须保持其安全容纳氢的能力。如果没有这一认识,氢在低碳经济中的重要作用可能无法实现。同样,从松散沉积物到沉积

岩、变质岩和火成岩等其他岩石建造的地球化学和地质体的岩石力学特征也需要了解,以便预测这些材料在容纳能量相关系统时的性能,这些系统如低焓地热储层或“干热岩”储层,CO<sub>2</sub>和其他气体的储存,以及抽水蓄能建设的隧道。

岩石特征描述将意味着系统地收集诸如盐岩或砂岩等岩石特性数据,以便在可能开展脱碳的地区储存CO<sub>2</sub>。永久储存CO<sub>2</sub>或季节性储存气体的地质场地需要详细的岩石特征描述(图5)。岩心数据、测井数据和地震图像数据的组合通常用于描述地下储层的特征,并构成如何使用这些地下存储空间经济决策的基础。

这将需要战略投资,并要承认,脱碳将发生在地质和基础设施条件最适合的地理集群区和发展走廊中。氢经济就是一个例子,即氢可以为电池提供燃料来驱动汽车、使房间升温和驱动工业发展。从长期看,氢生产可通过使用多余的(可再生)电力将水电解来实现,但在短期内,更可能是通过天然气中蒸汽甲烷的重整生产H<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>。虽然电解产生的氢气提供了一种有吸引力的低碳燃料,但天然气重整产生的氢具有显著的提升规模潜力,但需要对CO<sub>2</sub>副产品进行地质处置。这里的关键点是,CO<sub>2</sub>的地质处置不可能是在任何地方都能够进行的,因为只有特定的地质条件才适合储存碳。这意味着,氢-能系统最可能在地质条件适合盐穴季节性储氢和含盐-砂岩含水层CO<sub>2</sub>储存的地区发挥最佳作用。

地质科学还必须进一步了解电动汽车电池和风力涡轮机所需地质材料的起源和成因。科学家们认识到的第二个共同挑战是,有必要更好地了解地下深处的流体流动,无论是温水还是热水、蒸汽、CO<sub>2</sub>、天然气还是氢。考虑到地下存在多种流体相、反应性岩石、裂缝和岩石非均质性,这并不是一个简单的任务。流动很重要,因为在地热等技术中,我们希望刺激有用流体(热水)的流动,而在其他技术中,我们希望遏制流体流动,如CCS。此外,还需要具备通过复杂成像和探测进行监测和验证的能力。

第三个挑战是从小型实验室尺度扩大到全尺寸规模。许多技术在小规模试验时已被充分理解,但需要在接近其最终工业部署的规模上进行验证。这意味着需要进行示范和试点,从而提高政府的资金和承诺水平,以及创新性的公-私伙伴关



图5 储存场地的地质特征(据 Phil Ringrose, 2019)  
(左图阿尔及利亚克雷奇巴石炭纪储集单元潮汐三角洲岩相典型岩心样品;右图格陵兰中侏罗纪尼尔-克林特组潮汐三角洲沉积结构的露头代表)

Fig. 5 Geological characteristics of storage-site(after Phil Ringrose, 2019)

(left) example core samples from a tidal delta lithofacies from the Carboniferous storage unit at Krechba, Algeria; and (right) outcrop analogue of tidal deltaic sedimentary architecture from the Middle Jurassic Neill Klintner Formation, Greenland. (Photographs courtesy of Phil Ringrose)

系。政府的正确干预可以解决市场失灵问题,并迅速推进一些地下脱碳技术,如区域低焓地热供暖。

最后一个挑战,也许也是最紧迫的一个挑战是,要了解公众对地下脱碳技术的态度。公众对CCS的看法已进行过研究,但对压缩空气储能或储氢等技术的研究较少。在欧洲和其他人口稠密的国家,显然需要非常高水平的环境保证才能获得经营的社会许可证。

#### 4.2 地球科学的机遇

碳中和目标为地球科学研究提供了新的机遇。在碳中和目标下地质工作能在以下四个方面发挥核心作用:一是促进能源结构根本性变革,在碳的源头减排,调查发现低碳能源、无碳能源、金属能源、海洋能源、生物能源等;二是碳消除,让释放到大气圈的碳重新进入地圈,在岩石圈(地质碳汇,碳捕集与储存技术至关重要)、生物圈(绿碳)、土壤圈(土壤碳汇)、海洋碳汇(蓝碳)固化、稳定下来;三是地下空间利用,提供储能(储氢、储热等)、能源利用的稳定性生态系统;四是地质应对,缓解和适应气候变化的不良后果,如地质灾害。

全球范围内,欧洲态度积极,绿色新政实施得

力,在发展地下脱碳技术方面处于非常有利的地位。英国拥有世界一流大学、研究机构和石油天然气公司的研究基地,拥有出色的地下研发能力,并正在开发实验和中试规模的基础设施:例如,耗资3100万英镑建设了新的英国地质调查局UKGEOS试验场。德国大幅提升了可再生能源方面的努力,地球科学越来越重视季节性储存(氢、空气),而挪威则在开发CCS技术方面处于世界领先地位,运营着世界上最大的CCS测试中心(TCM Mongstad)。欧盟在清洁能源领域的研究资助承诺非常可观,由地平线欧洲计划牵头。这些地球科学研究和技术发展,必将使我们能够与太阳能和风能等可再生能源一起,对当前世界能源系统进行脱碳。事实上,“隐藏的地下空间”可能是通过CCS技术来解决包括钢铁、水泥和炼油厂等重工业在内的系统中难以脱碳部分的唯一解决方案。此外,生物能源和碳捕集与储存(BECCS)是目前实现大规模负排放的唯一可行途径,如果我们在其他领域的努力不足,这一点则可能更加至关重要。

## 5 结 论

为了使地球科学在实现碳中和方面取得进展,未来发展需要重点关注以下方面:

(1)碳中和是全社会的问题,要从多方面提供支持。一是加大资助力度,以实施从成功的实验或实验室项目升级规模的试点计划;二是鼓励制定管理和许可证框架,以提供地热能供热等技术,并建立一套监管体系,按照化石燃料许可证的发放办法,支持地下空间的价值评估和利用,同时纳入利益冲突管理;三是重视社区的作用,让社区参与各种地下技术的实地规模项目,包括CCS和地热供暖方案。还要认真对待公众和社会可接受性的重要性,重视社区安全,例如放射性废物储存。

(2)解决碳中和地质工作大有可为。要提高对地球科学在实现脱碳方面关键作用的认识,地球科学在以下8个脱碳科学问题中可以发挥重要作用:储热与地热、干热岩、水电储能、压缩空气储能、核能、碳捕集与储存、氢经济、能源转型需要的矿产原材料。地球科学需要表征地下(资源/空间)的物理和机械性质、化学和结构,以确定各种地下储存和基础设施项目的可行性;还要提高对地下潜在反应

性流体如何流动的科学理解,因为它们与地下热能储存和地热资源特征描述等脱碳技术有关;此外,开采关键地下资源对于利用风力涡轮机(如钆、铀)和用于电气化的电池(如锂和钴)等技术实现脱碳方面至关重要。

(3)发展技术,打造产业链,可持续发展。全球脱碳倡议成功的关键是,跨地理边界、跨行业边界以及地下(资源/空间)所有利益相关者之间的知识和数据共享,以确保彼此竞争的利益可以得到妥善管理。发展一套成功和创新性的地下脱碳技术,将在未来几年内成为一项可出口资产,带来就业、投资和经济增长,地球科学将在其中发挥更重要作用。还要重视环境影响,进行高质量、独立的环境监测,确保对项目安全的信心;为地下的各种用途,开发和设计有效和符合成本-效益的监测技术,以实现可持续发展。

## References

- Benjamin K, Sovacool, Saleem H, Ali Morgan Bazilian, Ben Radley, Benoit Nemery, Julia Okatz, Dustin Mulvaney. 2020. Sustainable minerals and metals for a low-carbon future[J]. *Science*, 367 (6473): 30-33.
- Brad Page, Guloren Turan, Alex Zapantis. 2019. Global Status of CCS 2019[R]. Melbourne: Global Carbon Capture and Storage Institute Ltd.
- Carbon Brief. 2015. Nuclear power additions 'need to quadruple' to hit climate goals, IEA says[EB/OL].[2015-01-31]. <https://www.carbonbrief.org/nuclear-power-additions-need-to-quadruple-to-hit-climate-goals-iea-says>.
- China Petrochemical News. 2019. Definition and resources of dry hot rock[EB/OL].[2019-12-23]. [http://202.149.227.159/zgshb/html/2019-12/23/content\\_841175.htm?div=-1](http://202.149.227.159/zgshb/html/2019-12/23/content_841175.htm?div=-1).
- CHUNENG. BJX. COM. CN. 2016. How many of the world's top ten pumped storage power stations do you know? [EB/OL].[2016-01-22]. <http://chuneng.bjx.com.cn/news/20160122/703734.shtml>.
- Committee on Climate Change. 2019. Net Zero: The UK's Contribution to Stopping Global Warming[R]. London: Committee on Climate Change.
- Energy Transitions Commission. 2017. Better Energy, Greater Prosperity Achievable Pathways to Low-carbon Energy Systems[R]. Energy Transitions Commission.
- ESA. 2021 Variable Speed Pumped Hydroelectric Storage [EB/OL]. [2021-02-01]. <http://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/variable-speed-pumped-hydroelectric-storage/>.
- Gibbins J, Chalmers H. 2008. Carbon capture and storage[J]. *Energy Policy*, 36: 4317-4322.
- Goldthau A, Westphal K, Bazilian M, Bradshaw M. 2019. Model and manage the changing geopolitics of energy[J]. *Nature*, 569: 29-31.

- Helen Mountford. 2020. Responding to Coronavirus: Low-carbon Investments Can Help Economies Recover. [EB/OL].[2020-03-12]. <https://www.wri.org/blog/2020/03/coronavirus-economy-low-carbon-investments>.
- He Wei, Dooner Mark, King Marcus, Li Dacheng, Guo Songshan, Wang Jihong. 2021. Techno-economic analysis of bulk-scale compressed air energy storage in power system decarbonisation[J]. *Applied Energy*, 282(PA):1-15.
- IEA. 2020. CCUS in Clean Energy Transitions[EB/OL].[2020-09-01]. <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions/a-new-era-for-ccus#abstract>.
- IEA. 2018. World Energy Outlook 2018[R]. 2018. Paris: International Energy Agency.
- IPCC. 2018. Summary for policymakers//Masson-Delmotte V, Zhai P et al. (eds.) .Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C Above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty[R]. Geneva :World Meteorological Organization.
- IRENA. 2019. Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050[R]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- Johannes Friedrich, Thomas Damassa, Mengpin Ge. 2015. What Will Future Emissions Look Like? [EB/OL].[2015-03-09]. <https://www.wri.org/blog/2015/03/what-will-future-emissions-look>.
- Jose M Bermudez, Taku Hasegawa. 2020. Hydrogen: More efforts needed[EB/OL]. [2020-06]. <https://www.iea.org/reports/hydrogen>.
- Kirsten Hund, Daniele La Porta, Thao P. Fabregas. 2020. Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition[R]. Washington, DC: The World Bank.
- Lindsay Delevingne, Will Glazener, Liesbet Grégoir. 2020. Climate risk and decarbonization: What every mining CEO needs to know[R]. New York City: Mckinsey&Company.
- Mao Xiang, Guo Dianbin, Luo Lu, Wang Tinghao. 2019. The global development process of hot dry rock (enhanced geothermal system) and its geological background[J]. *Geological Review*, 65(6):1462-1472(in Chinese with English abstract).
- Mark P Mills. 2020. Mines, Minerals, And “Green” Energy: A Reality Check [R]. New York: Manhattan Institute.
- Michael H. Stephenson, Philip Ringrose, Sebastian Geiger, Michael Bridden, David Schofield. 2019. Geoscience and decarbonization: current status and future directions[J]. *Petroleum Geoscience*, 25: 501-508.
- Michel Berthélemy, Sama Bilbao Y Leon. 2020. Nuclear Power[EB/OL]. [2020-06]. <https://www.iea.org/reports/nuclear-power>.
- Mike Stephenson, Florence Bullough. 2020. Geological skills and knowledge crucial in delivering net-zero[J]. *Science in Parliament*, 75(4): 11-13.
- Mining Online. 2017. Major breakthrough in emerging clean energy exploration may rewrite the traditional energy map[EB/OL].[2017-09-07]. [https://www.sohu.com/a/190453433\\_740265](https://www.sohu.com/a/190453433_740265).
- Northern Gas Networks. 2018. H21 North of England - national launch[EB/OL]. [2018-11-26]. <https://www.northerngasnetworks.co.uk/event/h21-launches-national/>.
- Pacala S, Socolow R. 2004. Stabilization wedges: Solving the climate problem for the next 50 years with current technologies[J]. *Science*. 305, 968-972.
- Ringrose P S. 2017. Principles of sustainability and physics as a basis for the low-carbon energy transition[J]. *Petroleum Geoscience*, 23: 287-297.
- Ryan Morrison. 2021. The earth will reach a critical point in 30 years[N]. *Reference News*, 1.27(9).
- S Julio Friedmann, Alex Zapantis, Brad Pag. 2020. Net-Zero And Geospheric Return: Actions Today For 2030 And Beyond [R]. Amsterdam: Columbia University CGEP.
- Stephenson M. 2018. Energy and climate change: Geological controls, interventions, and mitigations[J]. *Energy & Climate Change*, 2018: 175-178.
- Wang Guiling. 2020. Develop new geothermal energy and build a clean, low-carbon, safe and efficient energy system[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7):1921-1922(in Chinese with English abstract).
- www.tanjiaoyi.com. 2020. Which countries and regions in the world have set the goal of carbon neutrality (net zero emission)? [EB/OL].[2020-09-01]. <http://www.tanjiaoyi.com/article-32125-1.html>.
- Yang Jianfeng, Wang Yao, Ma Teng, Zhang Cuiguang. 2019. Current Status and Strategies of Exploration and Development of Hot Dry Rock Geothermal Energy in the United States and Implications for China[J]. *Land and Resources Information*, (6):8-14,56(in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 北极星储能网. 2016. 世界十大抽水蓄能电站你知道几个? [EB/OL].[2016-01-22]. <http://chuneng.bjx.com.cn/news/20160122/703734.shtml>.
- 瑞安·莫里森. 2021. 地球三十年内将达致命临界点[N]. 参考消息, 1.27(9).
- 矿业在线. 2017. 新兴清洁能源勘查获重大突破, 或将改写传统能源版图[EB/OL].[2017-09-07]. [https://www.sohu.com/a/190453433\\_740265](https://www.sohu.com/a/190453433_740265).
- 毛翔, 国殿斌, 罗璐, 王婷灏. 2019. 世界干热岩地热资源开发进展与地质背景分析[J]. *地质论评*, 65(6):1462-1472.
- 王贵玲. 2020. 开发地热新能源, 构建清洁低碳、安全高效的能源体系[J]. *地质学报*, 94(7):1921-1922.
- 杨建锋, 王尧, 马腾, 张翠光. 2019. 美国干热岩地热资源勘查开发现状、战略与启示[J]. *国土资源情报*, (6):8-14,56.
- 中国碳交易网. 2020. 全球哪些国家和地区设立了碳中和(净零排放)目标? [EB/OL].[2020-09-01]. <http://www.tanjiaoyi.com/article-32125-1.html>.
- 中国石化报. 2019. 干热岩定义与资源量[EB/OL].[2019-12-23]. [http://202.149.227.159/zgshb/html/2019-12/23/content\\_841175.htm?div=-1](http://202.149.227.159/zgshb/html/2019-12/23/content_841175.htm?div=-1).