

doi: 10.12029/gc20220507

张宇轩,唐金荣,牛亚卓,张静雅,赵禹,魏建设,姜光政,王利伟. 2022. 中国西北在碳中和进程中的资源优势 and 地质工作建议[J]. 中国地质, 49(5): 1458-1480.

Zhang Yuxuan, Tang Jinrong, Niu Yazhuo, Zhang Jingya, Zhao Yu, Wei Jianshe, Jiang Guangzheng, Wang Liwei. 2022. Resource advantage and geological work suggestions under carbon neutralization in Northwest China[J]. Geology in China, 49(5): 1458-1480(in Chinese with English abstract).

中国西北在碳中和进程中的资源优势 and 地质工作建议

张宇轩^{1,2}, 唐金荣^{1,2}, 牛亚卓^{1,2}, 张静雅^{1,2}, 赵禹^{1,2}, 魏建设^{1,2}, 姜光政³, 王利伟⁴

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710054; 2. 中国-上海合作组织地学合作研究中心, 陕西 西安 710054; 3. 成都理工大学, 四川 成都 610059; 4. 中国冶金地质总局西北地质勘查院, 陕西 西安 710119)

摘要:【研究目的】全球变暖是当今国际社会共同面临的严峻挑战,碳中和与绿色低碳转型作为应对这一挑战的必由之路,已在全球形成共识。地球系统科学为碳中和目标的实现提供了重要的地学解决方案,中国西北地质调查如何在碳中和战略中找到主攻方向和工作方法是亟需解决的问题。【研究方法】本文综述了地质工作在碳中和进程中的主要工作方法,统计分析了中国西北在碳中和减排和增汇两大基本途径上的资源优势,提出了碳中和背景下中国西北地质调查服务绿色低碳转型发展的建议。【研究结果】中国西北地区拥有丰富的天然气、地热能等清洁能源,以及与新能源相关的关键矿产等资源优势:天然气地质资源量约为 $313991 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全国的 34.78%;地热能分布广泛、类型丰富,其中青海共和盆地静态干热岩资源总量达 $8974.74 \times 10^{18} \text{ J}$;锂、钴、镍和铀矿等清洁能源相关的关键矿产资源均居全国前列,锂矿储量约占全国总储量的 60%,钴矿储量约占全国总储量的 40%,新疆是中国最大的铀矿生产基地。而且,西北地区生态类型和地表基质层类型丰富,碳库现存量 and 增汇潜力巨大,同时拥有大量适宜碳捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)选址和地质储能的优质空间,是中国通过增汇实现碳中和目标的重要节点。【结论】中国西北地区可为碳中和减排、碳增汇路径提供有效资源支撑,西北地质调查工作应立足实际,发挥专业优势,在推进天然气资源调查、攻关地热资源开发技术、加强关键矿产全生命周期研究、试点地表基质层与生态地质综合调查、开展 CCUS 相关的地下空间调查,以及建设碳中和相关的地球系统科学数据库六个方面持续发力,为实现碳中和目标提供重要的地质解决方案,做出应有的贡献。

关键词:碳中和;绿色低碳转型;地质调查;矿产勘查;油气勘查;自然资源综合调查工程;中国西北

创新点:(1)统计分析了中国西北在碳中和减排和增汇两大基本途径上的资源优势;(2)提出关于西北地区碳中和进程中地质调查服务绿色低碳转型的六个方向。

中图分类号:F426;TD98 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2022)05-1458-23

Resource advantage and geological work suggestions under carbon neutralization in Northwest China

ZHANG Yuxuan^{1,2}, TANG Jinrong^{1,2}, NIU Yazhuo^{1,2}, ZHANG Jingya^{1,2}, ZHAO Yu^{1,2},
WEI Jianshe^{1,2}, JIANG Guangzheng³, WANG Liwei⁴

收稿日期:2022-02-18;改回日期:2022-06-09

基金项目:陕西省创新人才推进计划(2021KJXX-74)和中国地质调查局地质调查项目(DD20221665)联合资助。

作者简介:张宇轩,男,1990年生,硕士,工程师,从事基础地质与关键矿产研究;E-mail:yxzhang90@163.com。

通讯作者:唐金荣,男,1978年生,博士,研究员,从事地质科技情报与资源战略研究;E-mail:jinrongt@163.com。

(1. Xi'an Center of Geological Survey/Northwest China Center for Geoscience Innovation, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. China-SCO Geosciences Cooperation Research Center, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 4. Northwest Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: The paper is the result of the natural resource comprehensive survey engineering.

[Objective] Global warming has challenged the international community in the modern world. Carbon neutralization and green and low-carbon transformation as an essential role in facing this challenge has been reaching a global consensus. Earth system science provides an important solution for the realization of the goal of carbon neutralization. How to find the main direction and working methods is an urgent problem to solve in geological survey related with the carbon neutralization strategy in Northwest China. **[Methods]** This paper summarizes the main geological methods in the process of carbon neutralization, and statistically analyses geological resources in Northwest China related with two main methods of carbon neutralization including emission decreasing and sink increasing, and provides suggestions for geological survey to serve green and low-carbon transformation. **[Results]** Northwest China is rich in clean energy such as natural gas and geothermal energy, as well as key minerals and other natural resources related to new energy. Among them, the geological natural gas resources are about $313991 \times 10^8 \text{ m}^3$, accounting for about 34.78% of the country. Geothermal energy is widely distributed and rich in types. Especially in Qinghai Province, the total amount of conservative and static dry hot rock resources in the depth range of 3–6 km in Gonghe basin is $8974.74 \times 10^{18} \text{ J}$. The key mineral resources related to clean energy such as lithium, cobalt, nickel and uranium in Northwest China rank among the top in China with lithium and cobalt reserves accounting for about 60% and 40% of the national reserves. Xinjiang is the largest uranium production base in China. Furthermore, there are abundant ecological types, surface matrix types, and a large number of high-quality spaces suitable for carbon capture, Utilization and storage site selection and geological energy storage to increase the carbon pool and sink in Northwest China. Northwest China is the important node to achieve the goal of carbon neutralization through the method of increasing carbon sink. **[Conclusions]** Northwest China can provide effective resource support for carbon emission reduction and carbon sink increase. Geological survey in Northwest China should be based on reality and give full play to its professional advantages in promoting survey of natural gas resources, exploring technology of geothermal resources development, strengthening research on the whole life cycle of key minerals, piloting comprehensive surface matrix ecological geology survey, conducting CCUS-related underground space survey, and build earth system science database for carbon neutral, we will continue to make efforts to provide important geological solutions and make due contributions to the realization of carbon neutral goals.

Key words: carbon neutralization; green and low-carbon transformation; geological survey; oil and gas exploration; mineral exploration; natural resources comprehensive survey engineering; Northwest China

Highlights: (1) Statistically analysing geological resources in Northwest China related with two main methods of carbon neutralization including emission decreasing and sink increasing; (2) Proposing six methods for geological survey to serve green and low-carbon transformation in Northwest China.

About the first author: ZHANG Yuxuan, male, born in 1990, master, engineer, engaged in basic geology and key mineral research; E-mail: yxzhang90@163.com.

About the corresponding Author: TANG Jinrong, male, born in 1978, doctor, professor, engaged in geological science and technology information and resource strategy research; E-mail: jinrongt@163.com.

Fund support: Supported by Youth Science and Technology Star Program of Shaanxi Province (No. 2021KJXX-074), and the project of China Geological Survey (No. DD20221665).

1 引言

人类命运共同体在本世纪面临前所未有的气候挑战,碳中和战略是应对这一挑战的重要手段。

目前已有136个国家宣布或提及碳中和目标,占全球温室气体排放量的88%、经济规模超过90%,加快绿色低碳转型、实现碳中和潮流已然势不可挡(中国科学院,2021a)。减排(减少CO₂排放)和增汇(增

加CO₂吸收)是碳中和的两大基本途径(焦念志等, 2021)。

减排势必深度调整能源结构、构建新型能源体系,而增汇则需要拓展生态系统固碳和碳捕集、利用与封存技术等绿色低碳技术方法(Wang et al., 2021c)。这对于新时代地质调查工作提出了新的挑战,也孕育了新的机遇。地质工作重心必将随着国家需求的变化而调整,新时代地质调查工作的内容也将随着国家经济结构、产业结构和技术水平发展而变化(施俊法, 2020)。未来如何在新能源产业结构中找到地质调查工作的重点方向,既能发挥地质资源优势,尤其是中国西北的资源优势,又能拿出“抓铁有痕、踏石留印”的碳中和工作方法,是亟需解决的问题。本文综述了地质工作在国家碳中和背景下的发展路径,分析了中国西北地区天然气、地热能以及关键矿产等自然资源优势,提出碳中和背景下中国西北地质调查服务绿色低碳转型发展的对策建议。

2 碳中和背景下地质调查发展路径研究现状

中共中央、国务院2021年公布《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》(中发【2021】36号)提出了构建绿色低碳循环经济体、提升能源利用效率、提高非化石能源消费比重、降低二氧化碳排放水平、提升生态系统碳汇能力等五个方面的主要目标。这都对研究碳中和背景下新时代地质调查发展路径(图1)具有重要的指导意义。对于碳中和的减排和增汇两大途径而言,减排是当前世界各国关注的焦点,而对于增汇重视略显不足。中国作为全球碳排放大国和发展中国家,应在减排的同时,不断通过增汇缓解减排压力(焦念志, 2021)。

2.1 减排

碳中和目标的实现需要快速减少CO₂等温室气体排放,经济和能源结构也将迎来转型发展。在碳

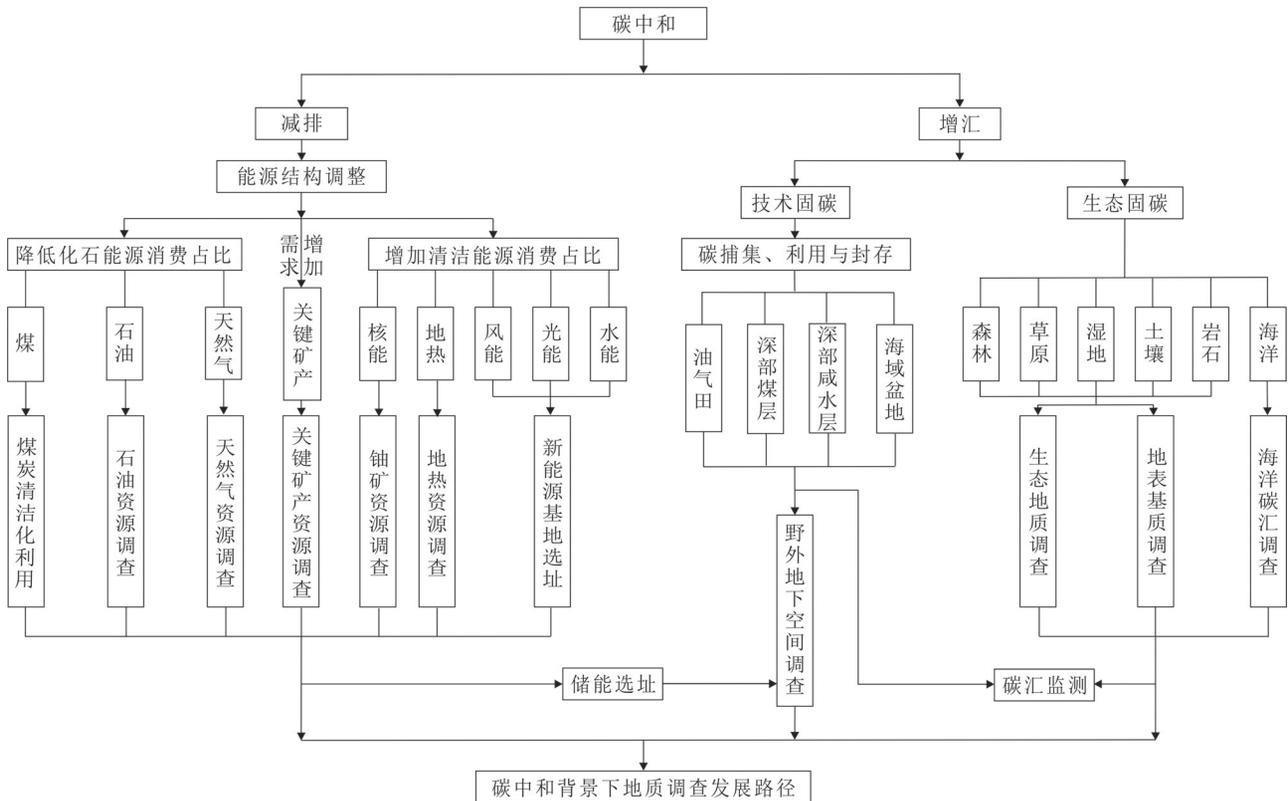


图1 碳中和背景下地质调查发展路径框架

Fig.1 Framework diagram showing the role of geological survey in the background of carbon neutrality

中和背景下,持续推进能源和关键矿产地质调查能力,实现资源调查新发现、新突破,支撑国家大型能源资源基地建设,构建能源资源勘查开发新格局,全生命周期支撑关键矿产资源基地建设工作体系,矿产资源调查转型升级“四体系一机制”,提升国内能源和关键矿产资源安全保障能力是新时期地质调查工作最核心的内容之一。据国家统计局数据显示,2020年中国一次能源消费总量为 49.8×10^8 t标准煤,其中化石能源消费占84.1%,煤、石油、天然气分别占比为56.8%、18.9%和8.4%,以光能、风能、水能和核能为代表的非化石能源共占15.9%,显示出中国能源结构仍很不合理,化石能源消费占比过高的特点(国家统计局,2021a)。

2.1.1 低碳清洁能源

地质调查需要努力实现低碳清洁安全高效的能源资源新发现、新突破,促进能源供给结构优化调整,而能源结构调整必然带来化石能源消费占比的降低。由于约90%的CO₂来自于煤炭、石油、天然气这三种化石能源的燃烧(Ritchie and Roser, 2020),各国石油公司在碳中和背景下已加速转型进入低碳和清洁能源领域,力争成为国际综合能源公司(司进等,2021;邹才能等,2021a;李淳,2021)。然而,由于中国资源禀赋、能源转型和能源安全等客观因素,油气资源在中国能源结构中的地位比较特殊,未来难以被完全替代,因此实现化石能源低碳清洁利用是中国需要面临的现实性重要问题(樊大磊,2021;杜祥琬,2021;丁仲礼,2021a)。一方面,中国油气对外依存度较高,2020年中国石油进口量 5.42×10^8 t、天然气进口量 1404×10^8 m³(图2),对外依存度分别约73%和43%,而风能和光能资源优势明显,且具有全产业链的技术优势,是实现碳中和最大的底气(国家能源局石油天然气司等,2021;丁仲礼,2021b)。如能在碳中和背景下顺利实现能源结构调整,中国就能在国际能源安全的赛道上实现“弯道超车”。另一方面,在碳达峰碳中和进程中,油气仍是中国能源结构中最不安全的一环,要持续加强能源安全底线思维。国内油气资源,特别是低碳的天然气资源增储上产仍是国家能源安全的“压舱石”和“稳定器”(邹才能等,2021a)。据国际能源署(IEA)预测,全球天然气需求至少在2040年前都将保持增长(IEA, 2021)。2020年,天然气在世界能

源消费结构中的占比达24.7%,而在中国能源消费结构中天然气占比仅8.4%,远低于世界平均水平(BP, 2021)。中国油气勘探正站在转型的十字路口,一方面是几十年内必然的能源结构调整,另一方面是相当长时间内仍需要以增储上产为目标。发展低碳清洁能源应是处理好增储上产和绿色转型之间的关键,也是新时代地质工作面临的重要问题。

另外,地热能也是一种清洁低碳、分布广泛、资源丰富、安全优质的可再生能源,对减少CO₂排放具有重要意义(廖忠礼等,2006;郑人瑞等,2017;荆铁亚等,2018;张薇等,2019)。地热能的能源利用系数高达73%,约为太阳能的5.4倍、风能的3.6倍(Zhao and Wan, 2014;胡达,2017)。据估算,全球地热资源直接利用,每年可减少 0.78×10^8 t碳和 2.526×10^8 t CO₂排放(马冰等,2021)。然而,地热能在大国家能源消费总量中占比较低,仍是一种“小众”能源。近年来,中国地热能勘探、开发利用技术持续创新,地热能装备水平不断提高,浅层地热能利用快速发展,水热型地热利用持续增长,干热岩资源也已经强劲起步,但目前全国地热资源利用量仅占中国能源消耗总量的0.6%(王贵玲等,2020)。这种开发利用现状既有地热能本身分布不均衡、投资成本较大等客观因素,也有地热能勘查评价不充分、初期扶持政策不到位等主观因素。由此可见,地热能将是地质调查和油气行业转型进军清洁能源的重要突破口,但仍需正视地热能在新能源结构中的现有“小众”地位,客观探讨如何改变地热能的这种局面。

2.1.2 新能源产业与关键矿产资源

能源结构调整要求非化石能源在未来几十年内占比由15.9%提升至80%以上,这意味着风电、光伏、水电、核电、地热等新能源行业要以每年1.5%的速度增长。新能源产业的兴起必将带来矿产分异态势,改变各类矿产品的供求关系和价格走向。2016年以来,全球矿业市场中铁、铝等传统大宗矿产市场关注度明显下降,而锂、钴、镍等与能源绿色低碳转型相关的关键矿产逐步兴起(唐金荣等,2014;王登红等,2016;杨宗喜等,2018;张泽南等,2020)。2020年世界银行发布的《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》报告显示,到2050年石墨、锂、钴等矿产品产量可能增加近500%,以满足清洁能源技术创新和推

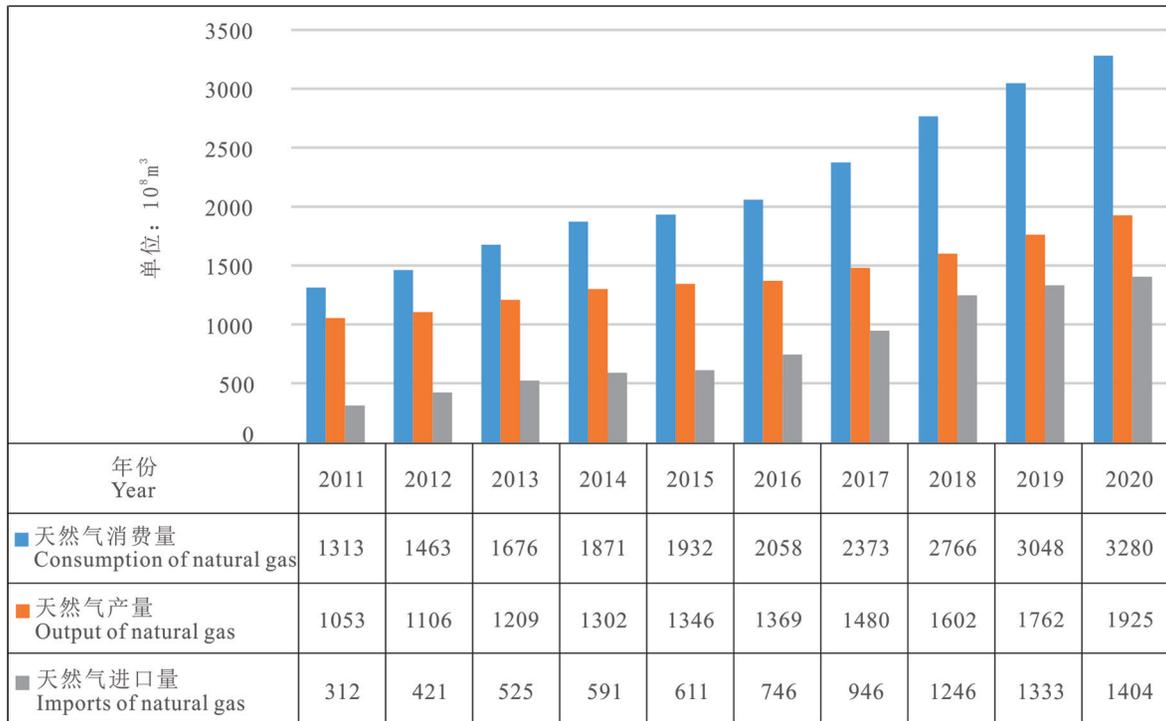


图2 2011—2020年中国天然气消费量、产量及进口量趋势图(据国家统计局,2021)

Fig.2 Trend chart of natural gas consumption, production and import in China from 2011 to 2020 (after National Bureau of Statistics, 2021)

广应用不断上升的需求(World Bank, 2020)。

与煤、石油、天然气这些传统大宗能源资源相比,关键矿产的供求关系在能源变革进程中的变化更加迅速,也更加考验各个国家矿产主管部门的统筹管理能力(施俊法,2020)。与能源绿色低碳转型相关的锂、钴、镍等一些关键矿产资源供求可能在碳达峰碳中和进程中严重失衡。这种矿产需求的快速变化对传统以地质普查和详查为基础的矿产地质工作提出挑战,更加需要信息化和智能化为基础的关键矿产调查。关键矿产调查更侧重于统计各种矿产资源的储量和消费量、分析预测其未来的需求量和国家矿业市场的变化规律、动态更新关键矿产信息。美国地质调查局在关键矿产调查上已取得瞩目的成果,他们关注矿产品的整个生命周期,从矿产资源的形成、分布、资源潜力、储藏、开采量、矿石量、废石量到矿产品产量、流向、二次回收利用等各方面,建成的“矿产资源数据系统(MRDS)”成为世界各国资源的产业分析的核心数据来源(施俊法等,2014)。

另外,2020年核电在中国一次能源消费中占比仅为2.2%,低于世界平均水平4.3%,与经合组织国

家(OECD)的7.6%仍有较大提升空间(BP, 2021)。核能作为安全、清洁、低碳、高能量密度的重要能源(IAEA, 2017),在碳中和目标下,将在发电、制氢、区域供热、海水淡化等领域扮演重要的角色(王海洋和荣健,2021)。其中最重要的领域是核能发电,同等发电量条件下,核能发电具有碳排放量少、土地资源耗费最少、耗水量少、工程耗费物资少等优势。核电可替代高碳排放电力品种承担基荷角色,主动与风、光、蓄等能源品种互为补充、相互支撑(郭天超等,2021)。然而,核电所需的铀矿资源在中国的供求关系更为复杂,是亟需进行针对性调查和勘探的关键矿产。

2.2 增汇

Hepburn et al.(2019)总结了10种主要的CO₂利用和移除方法,其中生物质能的科技、植树造林和土壤封存技术与生态地质调查密切相关;二氧化碳驱油技术(CO₂-EOR)源于油气田开发中的三次采油技术,已发展为碳捕集、利用与封存技术(CCUS)。开展地质碳汇调查评价与国土空间碳中和区划、攻克CO₂地质封存等关键技术,建立健全与生态文明建设相适应的现代化地质调查工作新体

系,深化自然生态系统演替规律和内在机理研究,是碳中和背景下赋予地质调查工作的新要求。

2.2.1 生态系统碳汇

2010—2019全球平均CO₂排放量为401×10⁸t/a,碳排放全部由各种生态系统所吸收,其中大气系统吸收186×10⁸t/a,陆地生态系统吸收125×10⁸t/a,海洋系统吸收92×10⁸t/a,分别占总排放量的46%、31%、23%(Friedlingstein et al., 2020)。目前,海洋生态系统碳汇主要包括海岸带(红树林、盐沼和海草床等)固碳和海洋微生物固碳等途径,其中,国际上对海岸带碳汇(蓝碳)研究最多(Ouyang et al., 2020;王法明等,2021;Wang et al., 2021a,b)。然而,基于中国海岸带蓝碳总量有限这一现状,开发陆海统筹减排增汇、海洋缺氧酸化环境减排增汇和滨海湿地减排增汇等其他负排放途径显得尤为重要(焦念志等,2021;焦念志,2021)。

由森林、草原和湿地等组成的陆地生态系统是自然界碳循环的重要组成部分,既是碳源,也是碳汇,收支相抵后,净吸收68×10⁸t/a(李采等,2021;王国胜等,2021)。陆地生态系统碳汇根据固碳物质的不同,可细分为森林碳汇、草地碳汇和湿地碳汇等(范振林,2021)。其中,泥炭沼泽湿地是陆地生态系统中碳积累速率最快的生态系统之一。全球森林约占陆地面积的31%,总碳储量为662 Pg C,主要包括活立木碳储量(295 Pg C)和森林土壤的碳储量(300 Pg C),分别占森林总碳储量的44.5%和45.2%(FAO, 2020)。全球草地约占陆地面积的20%,主要包括草地植被碳储量(27.9~231 Pg C)和草地土壤有机碳储量(250.49~579 Pg C),分别占草地总碳储量的4.1%和95.9%(Zhang et al., 2016)。全球湿地约占陆地面积的5%~8%,碳储量却达到300~600 Pg C,主要包括湿地植被碳储量和湿地土壤碳储量(350~535 Pg C),其中湿地土壤碳储量占湿地总储量的90%以上(刘子刚,2004;Mitsch et al., 2013;Xiao et al.,2019)。

中国陆地生态系统拥有巨大的碳汇能力,总碳储量为(99.15±8.71)Pg C,其中森林碳储量为(34.08±5.43)Pg C、灌木碳储量为(7.42±1.92)Pg C、草地碳储量为(25.69±4.71)Pg C、湿地碳储量为(3.62±0.80)Pg C和耕地(不包括植被)碳储量为(15.17±2.20)Pg C。总体来说,土壤有机碳(SOC)储量占绝对优势,为

(84.55±8.09)Pg C,而植被碳(Veg-C)储量为(14.60±3.24)Pg C(Xu et al., 2018)。中国实施的植树造林等一系列生态工程为全球增加碳汇做出了卓越贡献。现今虽已基本查清中国陆地生态系统碳储量及空间格局,但对于部分生态系统的碳库储量和固碳速率的评估仍存在较大的不确定性。综合不同评估方法的结果(Piao et al., 2009; Tian et al., 2011; Zhang et al., 2014; Wang et al., 2015; Jiang et al., 2016; He et al., 2019; Wang et al., 2020),中国陆地固碳速率约为10×10⁸~40×10⁸t CO₂/a(丁仲礼,2021b)。

2.2.2 CO₂地质封存与储能

CO₂地质封存作为碳捕集、利用与封存技术的主要形式,主要分为三类:一是将液态CO₂注入到石油与天然气储层中进行驱油,在提高采收率的同时封存CO₂;二是利用深部咸水层的构造封存CO₂,使CO₂与深部盐水发生化学反应生成碳酸盐矿物,进而达到封存的目的;三是利用煤层封存CO₂,继而提高煤层气的采收率(Leung et al., 2014;李采等,2021;邹才能等,2021b)。CCUS被认为是最具潜力的前沿负排放技术之一,联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告指出:若无CCUS技术,减排成本将会成倍增加(预计平均增幅高达138%),绝大多数气候模式都不能实现减排目标。国际能源署(IEA)2021年5月发布的《2050年净零排放:全球能源行业路线图》也指出:CCUS将为剩余一小部分化石能源装机提供净零排放解决方案,年均碳排放处理能力从2020年的不到0.01×10⁸t,快速增长到2050年的14×10⁸t(IEA, 2021)。适合CO₂地质封存的地下空间主要包括油气田、深部煤层、深部咸水层(李采等,2021)。现阶段废弃的油气田是目前认识最为充分、封存效果较好的CCUS地下空间。将CO₂注入废弃的油气藏同时意味着可以进一步开采这些油藏先前因技术手段遗留的资源量(约占总资源量的60%~70%),实现经济开发和环境保护的双赢。

CCUS技术面临着技术、环境、政策和金融等诸多领域挑战(张九天和张璐,2021),其中地质领域一个重大挑战是如何合理规划地下空间,以及动态监测CO₂地质封存的效果。中国地质条件复杂,现阶段针对适合CCUS的地下封存空间的调查与规划尚未得到重视。国土空间规划是国家空间发展的

指南,地下空间是重要的国土空间资源,城市地下空间规划已逐步提上日程,在CCUS技术发展驱动下,野外地下空间调查也势在必行。

野外地下空间的商业和战略价值不仅体现在CCUS地质封存需求,还包括地质储能、地下油气储库、核废料处置、地热能开发利用等方面的需要。其中,地质储能已经发展为世界众多国家采用的大规模能源(压缩空气、氢能、天然气等)存储技术,以美国、德国为代表的发达国家在盐穴储库建设运营和综合利用方面拥有丰富经验(袁光杰等,2017;中国科学院,2021b)。中国地质储能相关研究虽然起步较晚,与发达国家存在较大差距,但也取得了重大进展(王明育等,2004;胡贤贤等,2014;王志文等,2015;刘澧源等,2018;董家伟和李毅,2021;郭朝斌等,2021)。该技术对促进大规模发展新能源、提高能源效率等具有重要意义,应用前景广阔。综合调查、规划、利用、监测这些地下空间既需要深厚的区域地质资料积累,也需要先进的地球物理监测技术,这正是地质调查的优势和专长所在。

此外,岩溶碳汇和矿物碳汇也是重要的增汇方式。全球岩溶分布面积为 $0.22 \times 10^8 \text{ km}^2$,占陆地面积的15%,全球碳酸盐岩风化溶解产生的碳汇通量为 $5.5 \times 10^8 \text{ t/a}$,据初步估算中国岩溶碳汇通量以 CO_2 计约为 $1.832 \times 10^8 \text{ t/a}$ (曹建华,2021a,b)。中国地质调查局从2009年开始对岩溶碳汇进行探索性调查,取得了一系列成果,基本查明了岩溶碳汇的作用机理、影响因素和计量方法(黄芬等,2014;黄奇波等,2016;张春来等,2021)。而中国目前对矿物碳汇研究还相对较少(曾庆睿和刘再华,2017;Xi et al., 2021;邱添等,2021)。岩石中的矿物碳汇因其独特的化学俘获机理可确保 CO_2 被永久封存在地球内部,泄露风险很低,且随着技术的不断进步,成本会逐渐降低,是较为安全和理想的 CO_2 封存方法,碳汇潜力巨大(Kelemen and Matter, 2008;李万伦等,2021;邱添等,2021)。

3 中国西北在碳中和进程中的自然资源优势

3.1 天然气资源

天然气作为清洁能源,是能源结构从高碳到零

碳过渡的桥梁,将在全球能源绿色低碳转型中发挥重要作用(Burney, 2020;黄维和等,2021)。中国天然气2020年消耗总量达 $3280 \times 10^8 \text{ m}^3$,同比增长6.9%(图2)。在碳中和背景下,中国天然气需求增长强劲,“十三五”期间年均增量为 $255 \times 10^8 \text{ m}^3$,增速11%，“十四五”中国天然气产业仍处于快速发展期,年均增量将超过 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$,预计2025年天然气消费规模达到 $4500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右(张鹏程等,2021),2030年达到 $6000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右,预计到2035年,需求量将可能快速增长至 $6500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右,其后天然气消费稳步增长,2040年前后进入发展平台期(国家能源局石油天然气司等,2021)。

中国西北地区天然气资源丰富,待探明储量潜力巨大,天然气地质资源量约为 $313991 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全国天然气地质资源量的34.78%;天然气累计探明地质储量、剩余技术可采储量分别为 $48081 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $19742 \times 10^8 \text{ m}^3$,在全国的占比分别为36.94%和38.01%,主要分布在新疆、陕西和青海等省份。新疆天然气地质资源量为 $191800 \times 10^8 \text{ m}^3$;累计探明地质储量、剩余技术可采储量分别为 $23900 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $10200 \times 10^8 \text{ m}^3$,在全国的占比分别为18%和20%,均居全国第二位,主要分布在塔里木盆地、准噶尔盆地、吐哈盆地三大盆地,天然气地质资源量分别高达 $163100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $24700 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $2800 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。陕西天然气资源主要分布在鄂尔多斯盆地,天然气地质资源量 $75700 \times 10^8 \text{ m}^3$,累计探明地质储量、剩余技术可采储量分别为 $18100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $7600 \times 10^8 \text{ m}^3$,在全国的占比分别为13.79%和15.32%,均居全国第四位。青海天然气资源主要分布在柴达木盆地,天然气地质资源量为 $35849 \times 10^8 \text{ m}^3$,累计探明地质储量、剩余技术可采储量分别为 $3888 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $1397 \times 10^8 \text{ m}^3$,在全国的占比分别为2.96%、2.82%,均居全国第八位(中国地质调查局油气资源调查中心,2017;图3)。

根据国家能源局发布的《中国天然气发展报告(2021)》显示,中国天然气2020年总产量为 $1925 \times 10^8 \text{ m}^3$,同比增长9.8%(图2)。其中,页岩气产量超 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$,增长32.6%;煤层气产量和煤制天然气产量分别为 $67 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $47 \times 10^8 \text{ m}^3$,同比增长13.5%和8.8%(国家能源局石油天然气司等,2021)。2020年,陕西、新疆、青海天然气产量分别为 527.4×10^8

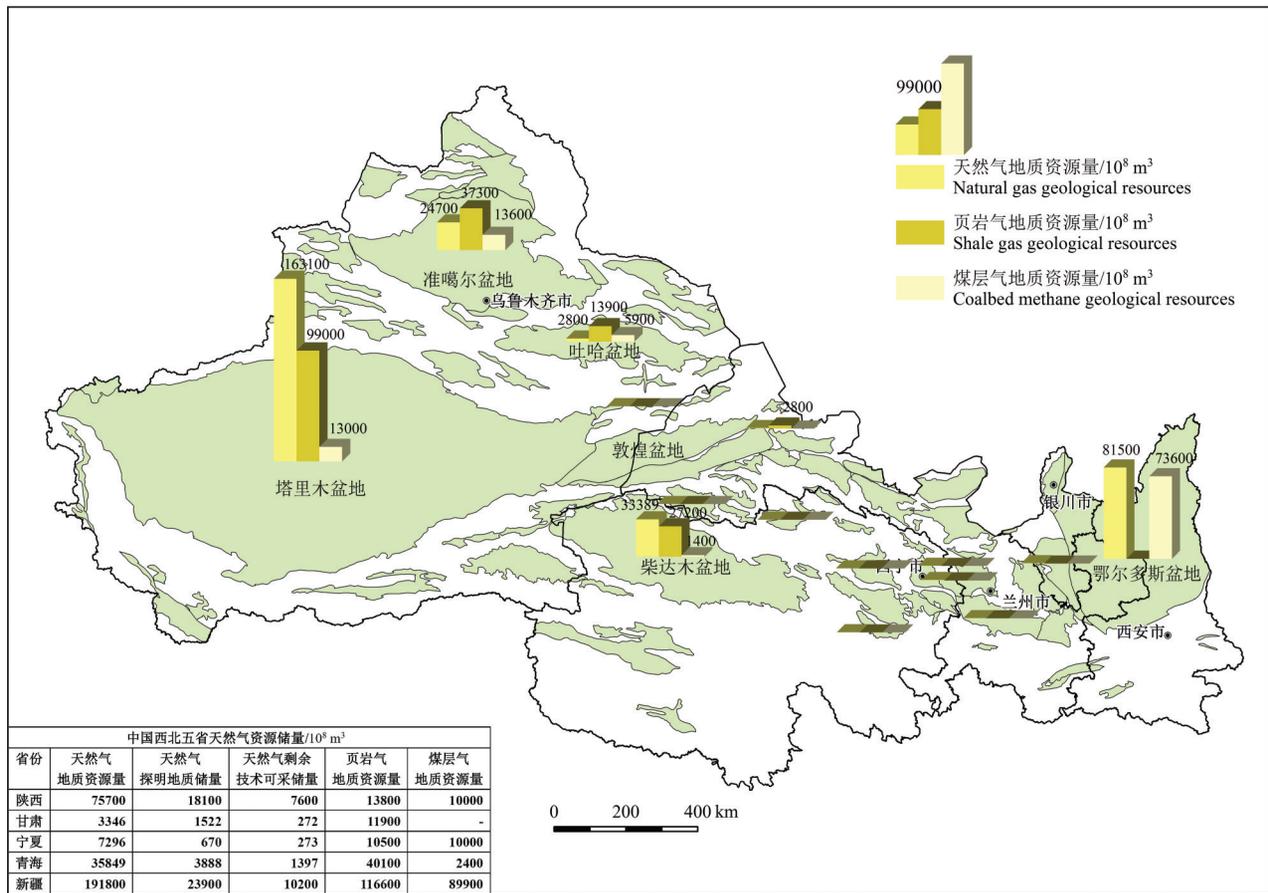


图3 中国西北天然气资源分布图
Fig.3 Distribution of natural gas resources in Northwest China

m³、370.6×10⁸ m³和64.0×10⁸ m³,占全国天然气总产量的27.4%、19.3%和3.3%,位居全国第一、第三和第六位,天然气产量分布相对集中,西北地区约占全国天然气总产量的50%(国家统计局,2021)。

中国西北地区也拥有丰富的非常规天然气资源,主要分布在新疆、青海、陕西和甘肃等地。其中页岩气地质资源量192900×10⁸ m³,占全国页岩气地质资源量的14.35%。煤层气地质资源量112300×10⁸ m³,占全国煤层气地质资源量的30.51%。新疆非常规天然气资源主要分布在塔里木、准噶尔、吐哈、三塘湖及等大型盆地坳陷带海相、陆相和海陆交互页岩中,页岩气地质资源量116600×10⁸ m³(占全国页岩气总地质资源量的9%),煤层气地质资源量为89900×10⁸ m³(占全国煤层气总地质资源量的19%,位居全国第二位),其中塔里木盆地、准噶尔盆地和吐哈盆地三大盆地页岩气地质资源量分别达99000×10⁸ m³、37300×10⁸ m³和13900×10⁸ m³。陕西非常规天

然气资源主要分布在渭河盆地以北、鄂尔多斯盆地南缘的二叠系本溪组、太原组和山西组,以及三叠系延长组富有机质页岩中,页岩气地质资源量为13800×10⁸ m³,煤层气地质资源量为10000×10⁸ m³,累计探明煤层气地质储量、剩余技术可采储量分别为472.21×10⁸ m³和225.11×10⁸ m³,均居全国第二位。青海非常规天然气资源主要分布在柴达木盆地,页岩气地质资源量为40100×10⁸ m³,煤层气地质资源量为2400×10⁸ m³。甘肃页岩气资源主要分布在民和、潮水、酒泉、花海等14个页岩气成藏潜力的沉积盆地,页岩气地质资源量为11900×10⁸ m³(中国地质调查局油气资源调查中心,2017;图3)。

3.2 地热与风、光能资源

地热能可分为浅层地热能、水热型地热(地下水热水)、干热岩,其中干热岩型地热能在中国开发利用潜力巨大,是未来地热能发展的重要领域(王贵玲等,2020)。干热岩发电技术不受季节、气候制

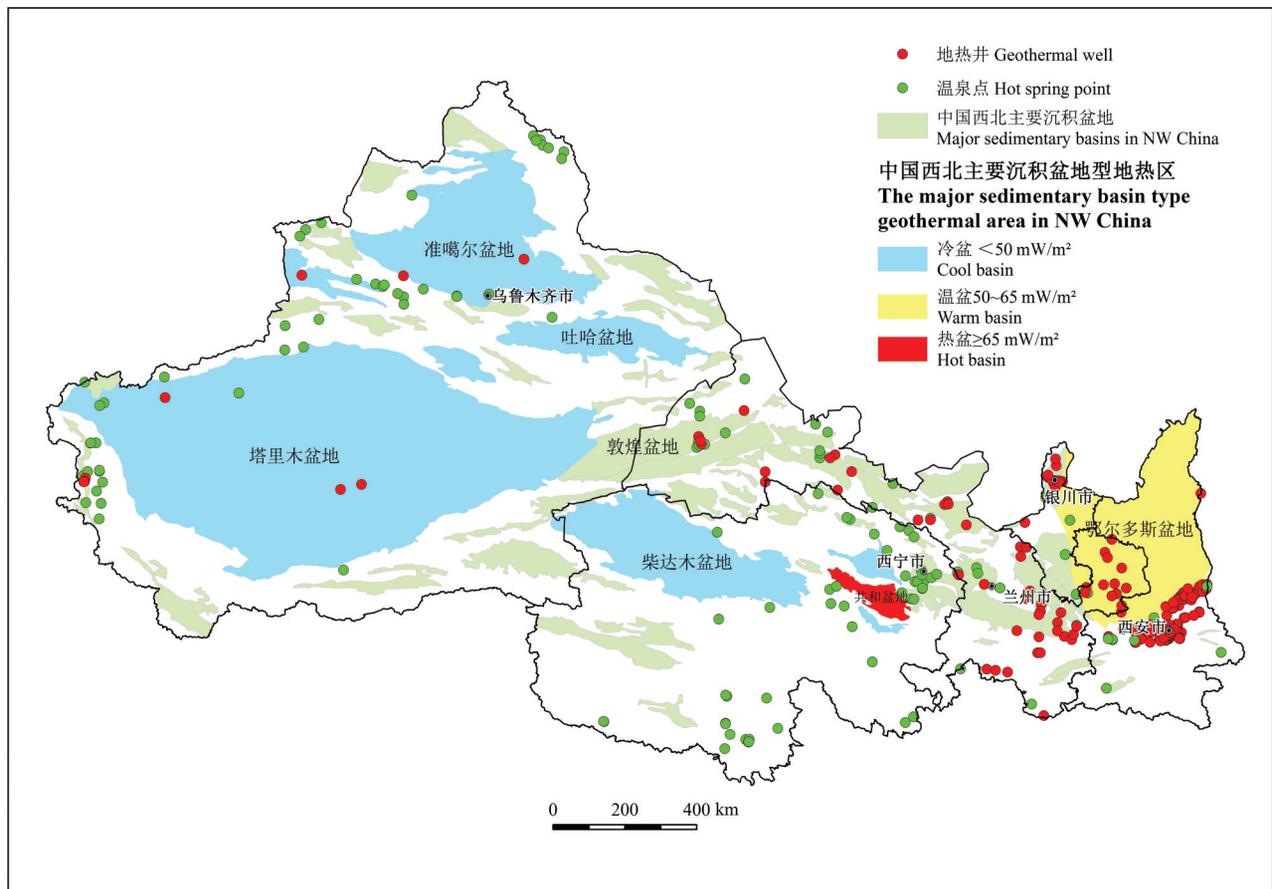


图4 中国西北地热资源分布图(据王贵玲等,2017,2020)

Fig.4 Distribution of geothermal resources in Northwest China(after Wang Guiling et al., 2017, 2020)

约,发电的成本仅为风力发电的一半,为太阳能发电的十分之一,可推动中国地热能发电及梯级高效利用产业集群较快发展。但目前受限于发电技术成熟度和经济性,并未大规模发展。中国陆域埋深3000~10000 m干热岩型地热能基础资源量约为 25×10^{24} J(相当于 856×10^{12} t标准煤);根据国际标准,以其2%作为可采资源,中国陆域干热岩可采资源量达 17×10^{12} t标准煤。结合开发难度和技术发展趋势,埋深5500 m以浅的干热岩型地热能将是未来15~30年中国地热勘查开发的重点领域,其资源量约为 3.1×10^{24} J(约为煤炭潜在资源量的27倍)(王贵玲等,2017;自然资源部中国地质调查局等,2018)。

中国西北地区地热资源分布广泛、类型丰富(图4)。青海地热资源主要分布在共和—贵德盆地、大柴旦、都兰和玉树巴塘盆地等地区,种类齐全,水热型地热、浅层地热能、干热岩三种类型均有发现,全省已发现水温 15°C 以上的水热或地热异常

点84处,其中 90°C 以上的水热点1处, $60\text{--}80^\circ\text{C}$ 的低温热水点10处, $40\text{--}60^\circ\text{C}$ 的低温热水点9处, $15\text{--}40^\circ\text{C}$ 的低温水点64处(韩生福和严维德,2013)。2017年,中国地质调查局在青海共和盆地3705 m深处钻获 236°C 的高温干热岩体,是中国在沉积盆地首次发现高温干热岩型地热能资源,且具有埋藏浅、温度高、规模大的特点(荆铁亚等,2018)。共和盆地获得的两个热流值分别为 136.6 mW/m^2 和 123.1 mW/m^2 ,为热盆地高热流区,干热岩远景区分布面积约为 $1.4 \times 10^4 \text{ km}^2$,其3~6 km深度范围内静态干热岩资源总量为 8974.74×10^{18} J(折合 3066.20×10^8 t标准煤)(姜光政等,2016;张盛生等,2019)。2018年起,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)科技攻关,有望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设备和技术国产化,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)。

陕西地热资源分布范围广,资源量大,但各地区资源分布、资源量相差较大。鄂尔多斯盆地热流值一般介于 $34.8\sim 84.2\text{ mW/m}^2$,而关中盆地热流值介于 $62.5\sim 80.2\text{ mW/m}^2$ (胡圣标等,2001;饶松等,2016;Jiang et al., 2019)。受热储条件和经济发展水平制约,目前地热井主要集中分布在关中地区的西安市及周边地区。浅层地热能在全省广泛分布,以关中盆地最为丰富,全省10个地级市和杨凌示范区中心城区规划区范围内的浅层地热能总能量为 $4.49\times 10^{18}\text{ J}$ (相当于 $0.256\times 10^8\text{ t}$ 标准煤),冬季可供暖面积为 $8.84\times 10^8\text{ m}^2$ 。中深层水热型地热资源主要分布在关中盆地,资源储量非常大,热储层内总热量为 $13500\times 10^{18}\text{ J}$ (相当于 $4610\times 10^8\text{ t}$ 标准煤)(彭冰等,2020)。干热岩主要分布在关中盆地和陕南秦巴山区,关中盆地主要为沉积盆地型干热岩,秦巴山区亦存在干热岩赋存条件(赵雪娇等,2019)。

新疆主要分布于阿尔泰山南坡、天山西部及西昆仑山地区,在全疆11个地州市的27个县市内,集中分布于阿勒泰地区的富蕴县、福海县、北疆沿天山一带,以及南疆塔什库尔干县、阿克陶县。新疆的盆地热流值一般小于 50 mW/m^2 ,为冷盆低热流区,目前已确定地热点67处(热水点53处,热气球点14处),地热水出露温度一般不高,除塔县曲曼地热井达到 146°C 外,其余均在 80°C 以下:其中 $20^\circ\text{C}\leq t < 25^\circ\text{C}$ 的温水占14%, $25^\circ\text{C}\leq t < 40^\circ\text{C}$ 的温水占46%, $40^\circ\text{C}\leq t < 60^\circ\text{C}$ 的温热水占29%, $60^\circ\text{C}\leq t < 90^\circ\text{C}$ 的热水占9%, $90^\circ\text{C}\leq t < 150^\circ\text{C}$ 中温热水占2%(顾新鲁等,2015;姜光政等,2016)。

地热能与地质调查工作密切相关,油气地质勘探大部分技术方法与地热能勘探方法相似,中国地质调查局在“十二五”时期,就已对全国地热能资源进行了资源调查评价,基本查明中国地热资源赋存条件、分布特征与开发利用现状,初步评价了全国地热资源量。中国地热资源地域分布不均衡,开发利用水平低,缺少全国系统的地热资源勘查和统一的资源评价体系。大地热流数据作为地热评价的基本参数,中国地热热流数据1230个,相比美国约为4300个,中国总体数据稀少,制约了地热资源评价(姜光政等,2016;Jiang et al., 2019)。全国地热资源勘查中,大部分地区尚未开展大比例尺的地热资源勘

查,特别是中国西部地区的中低温地热资源,尚未开展正规的地热资源勘探。尽快开展大范围的地热资源调查,进行全国地热资源的评价和区划,在此基础上制定科学的短、中、长期地热资源开发利用规划,根据地质条件差异为各地区地热资源利用提供不同的支撑依据,才能实现地热能的科学有效利用。

此外,西北地区风能和光能资源优势得天独厚,新疆九大风区、甘肃河西走廊、宁夏贺兰山区等均为重要风能富集区,青海、甘肃、新疆等地区为主要光能集中区,综合开发条件优越,潜力巨大。中国8个千万千瓦级风电基地有两个(甘肃酒泉、新疆哈密)在西北,近三成光伏发电也在西北。西北是中国新能源发展的发源地之一,在能源转型大局中具有重要战略地位,应充分发挥风、光资源优势,积极统筹发电、储能、输电和消纳等环节协调发展(周强和杨仕支,2018;黄少中,2018)。

3.3 关键矿产资源

碳中和进程中,清洁能源领域亟需大力发展储能等灵活性电源,使得储能技术相关的关键矿产需求不断增长,这将深刻影响全球能源金属矿产供需格局。中国一些关键矿产资源供需缺口持续增大,对外依存度较高,且受国际市场垄断程度较高,很可能会成为“一马挡道、万马难行”的重要资源。中国西北地区锂、钴、镍、稀土和石墨等矿产资源丰富,且具有成矿条件好、资源查明率低、找矿潜力大等特点,可为碳中和进程中的能源结构调整提供基础保障(图5)。此外,核电作为不可或缺的低碳电力,将推高全球对铀矿的需求。据世界核能协会(World Nuclear Association, 2021)年发布报告中预测,在全球多国推动电力领域低碳发展的情况下,2021年全球铀需求或将达到 $6.25\times 10^4\text{ t}$,到2030年铀需求将增至 $7.94\times 10^4\text{ t}$,到2040年需求将达到 $11.23\times 10^4\text{ t}$ 。根据中国现有核电站数量及核电总装机容量增长趋势,中国对铀矿资源的需求将进一步增大,而中国铀矿资源供应不足、对外依存度较大,将严重制约中国核电可持续发展。

中国西北地区锂矿储量约占全国储量的60%,共探获锂矿床20余处。其中以青海、新疆等地锂矿资源最为丰富,青海锂矿储量全国排名第一位,青海察尔汗盐湖氯化锂资源量 $1200\times 10^4\text{ t}$,已经是中国规模最大的锂资源产地(李建康等,2014;熊增华

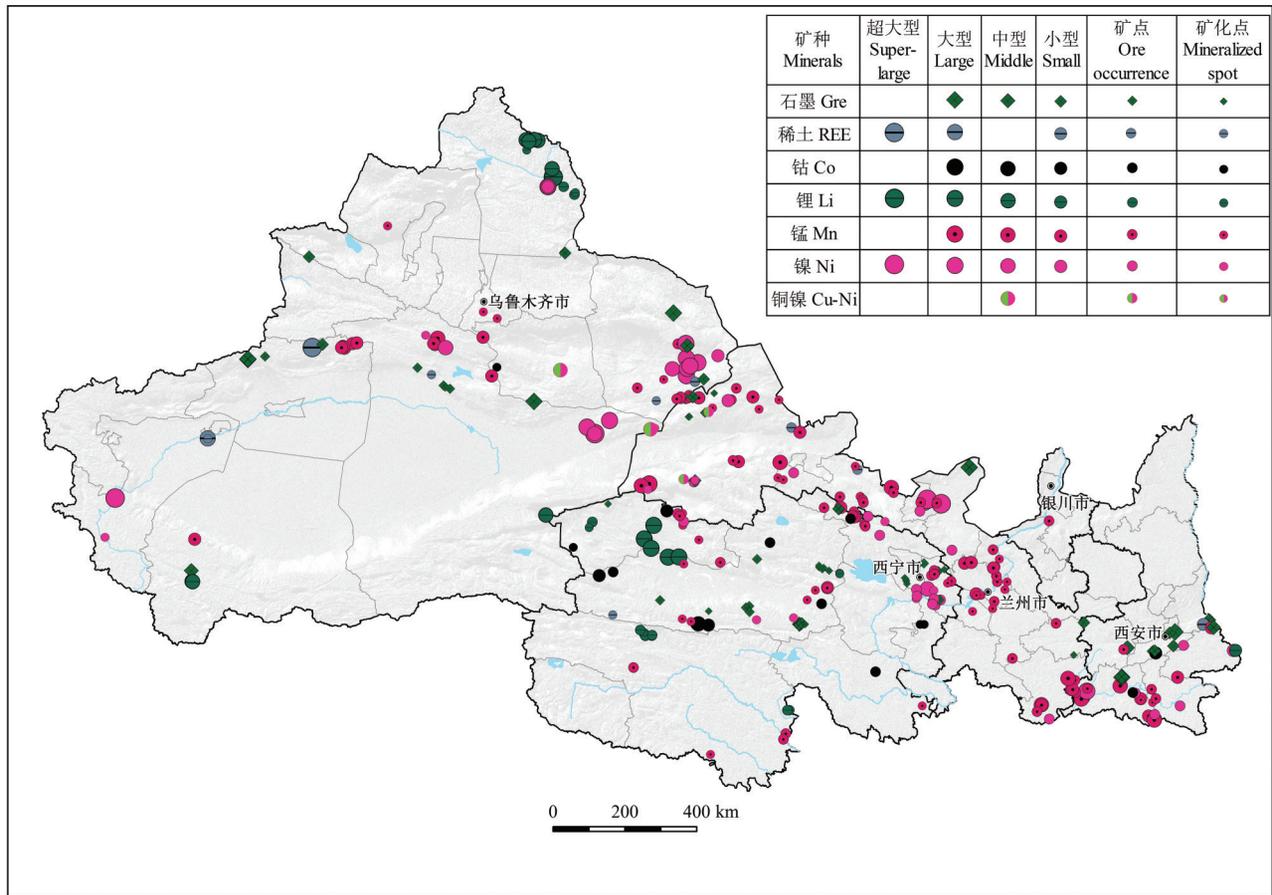


图5 中国西北清洁能源相关的关键矿产分布图
Fig.5 Distribution of key mineral resources related to clean energy in Northwest China

和王石等,2021)。西北地区锂矿床主要为卤水型(97.15%),且以地表卤水型为主,次为花岗伟晶岩型(2.85%),蚀变花岗岩型仅有极少分布(杨合群等,2017)。地表及地下卤水型锂矿主要分布在柴达木盆地成矿区,典型矿床为青海西台吉乃尔、东台吉乃尔及一里坪等现代盐湖锂矿。花岗伟晶岩型锂矿主要分布在新疆阿尔泰成矿带,典型矿床为新疆可可托海锂铍铷钽铀矿床,此类矿床具有品位高、易于开采等特点。此外,在新疆西昆仑大红柳滩一带发现了多处具有大型—超大型找矿前景的锂铍等稀有金属矿产地, Li₂O 平均品位 1.1%~4.0%, 初步估算 Li₂O 资源量已达超大型规模(李建康等, 2014; 涂其军等, 2019a, b; 冯京等, 2021)。

中国西北地区钴矿储量约占全国储量的40%, 可利用的钴资源主要伴生在铜镍矿床中, 如甘肃金川的白家嘴子和新疆的喀拉通克等铜镍矿床。甘肃钴矿储量最多, 约占全国总储量的30%, 甘肃金

川为中国主要钴产地, 其伴生钴储量 14.42×10⁴t(徐昱等, 2014)。

中国西北地区硫化物型镍矿资源约占全国总储量的70%, 共探获镍矿床近30处, 其中以甘肃镍矿储量最为丰富。甘肃金昌的镍提炼规模位居全球第二, 占比超过全国镍矿储量的三分之一; 新疆、青海、内蒙古也是中国主要的镍矿产地, 分别占全国储量的15.1%、10.9%和9.9%。西北地区镍矿几乎均与基性—超基性岩有关, 可进一步划分为基性—超基性岩同生型(95.02%)、后生型(3.27%)和风化壳型(1.71%)。新疆锰矿产地共计97处, 其中矿床8处, 查明总资源储量 1471.51×10⁴ t。甘肃锰矿产地共计26处, 保有资源储量为 2822×10⁴t, 主要分布在武威、酒泉等地(杨合群等, 2017; 邹愉, 2020)。

中国稀土资源储量位居世界第一, 其中95%的稀土资源分布在中国内蒙古地区。仅白云鄂博混合型稀土矿储量达 3500×10⁴t(以 REO 计), 占全国稀土资

源储量的80%左右,是世界罕有的铁、铌、稀土等多金属伴生超大型矿床(马莹等,2016;谢东岳等,2021)。另外,塔里木克拉通北缘也是中国重要的大型碱性岩型稀土矿成矿带,典型矿床为新疆拜城县波孜果尔铌钽矿床(伴生稀土)(孙政浩等,2021);华北陆块南缘成矿带分布有陕西黄龙铺钼矿床(伴生稀土)、陕西华阴川铀钼铅矿床(伴生稀土)等;南祁连山成矿带上分布有青海上庄磷矿床(伴生稀土)(王江波等,2013;杨合群,2020;段湘益等,2021)。

中国西北铀矿资源丰富,类型多样,以砂岩型为主。砂岩型铀矿主要分布在西北铀成矿省的一系列中生代山间断陷盆地和山前拗陷盆地中,相继发现、探明了512、十红滩和巴什布拉克等一批大型砂岩型铀矿床(权志高和徐高中,2012;张万良,2017)。新疆已成为中国最大的铀矿生产基地,主要分布在伊犁盆地、吐哈盆地、准噶尔盆地及西准噶尔雪米斯坦等地,主要有砂岩型、煤岩型和火山岩型三大类型:其中以地浸砂岩型为主,查明资源储量约占总资源储量的68%,集中分布在伊犁盆地南缘、吐哈盆地西南缘和准噶尔盆地东部;煤岩型约占19%,仅产于中下侏罗统;火山岩型约占3%,产于古生代火山岩中(陈江源等,2016)。陕西铀矿床多集中分布在地台边缘和相邻的褶皱带中,目前共发现铀矿床16个,以花岗岩型、混合岩型或变质岩型、碳硅泥岩型和砂岩型为主(李娟等,2018)。青海铀矿床集中分布在柴达木盆地北缘及北祁连山成矿带,目前共发现铀矿床4个、矿点115个,以花岗岩型、火山岩型和砂岩型为主(段建华和李彦强,2018)。甘肃铀矿床主要分布在鄂尔多斯西南缘、潮水盆地南北缘及明水盆地南缘等地,目前共发现铀矿床19个、矿点164个,预测铀远景资源量 4×10^4 t,以花岗岩型、碳硅泥岩型和砂岩型为主(黄惠芬,2018)。

3.4 生态与地表基质资源

中国西部地处黄土高原和青藏高原生态屏障区、秦岭生态保护和美丽中国中脊带建设的关键区段,是中国维持气候稳定的“生态源”和“气候源”,是对全球气候变化响应的敏感地带之一,也是生态环境脆弱地区,是推进碳中和战略的重要环节(张广裕,2016)。黄河上游多年冻土不仅是古气候、古环境变化的重要信息库,也是气候及环境变化的灵敏指示器与不稳定因素。针对西北地区的自然生态状

况和主要生态问题,开展生态系统保护和修复重大工程,对维护中国生态安全和实现碳中和具有重要战略意义。西北地区生态类型和地表基质层类型丰富,地域广阔,拥有巨大的碳库现存量 and 增汇潜力,以及较高的固碳速率(图6)。近些年,随着西北地区一系列重大治理保护措施的实施,森林、草原和湿地面积大幅提升,碳汇增量潜力巨大。丁仲礼(2021b)在中国科学院学部第七届学术年会全体院士学术报告会上多次提到碱性土壤在实现碳中和目标中的巨大潜力。中国土壤酸碱性在空间分布上,从南向北土壤pH值呈明显递增趋势:南方多酸性土壤,北方多碱性土壤。通常,长江以南的土壤呈酸性或强酸性,长江以北的土壤多呈中性或碱性,西北地区土壤碱性最强。西北地区碱性蒸发障形成的碳酸盐厚度在几米到几十米,远大于东北黑土地土壤有机碳总量(王学求等,2016;赵禹,2021)。

西北五省区各类林地总面积 36.73×10^4 km²,占全国林地总面积的15.30%,主要分布在陕西、甘肃和新疆等地区,总体以天然灌木林为主。陕西林地面积 9.13×10^4 km²,占全省土地总面积的54.62%,森林覆盖率为43.06%,主要分布在陕南及关中、陕北部分地区。甘肃林地面积为 11.4×10^4 km²,占全省土地总面积的26.85%,森林覆盖率为11.33%,主要集中在陇南、甘南和祁连山北坡。新疆林地面积 8.32×10^4 km²,占全疆土地总面积的5.04%,森林覆盖率为5.2%,主要分布在阿勒泰山南麓、沿天山带、昆仑山北麓及塔克拉玛干周边绿洲地带等区域,总体呈北多南少,西多东少的分布特征。青海林地面积约 3.50×10^4 km²,森林覆盖率为5.82%,主要分布在青海东部地区、东北部祁连山东段和南部澜沧江、黄河上游等地区。宁夏林地面积 0.83×10^4 km²,占全省总面积的15.83%,森林覆盖率17.13%,森林类型以灌木林为主,乔木林相对较少(国家林业和草原局,2019)。

西北五省区是全国草地资源最主要的分布区,各类草地总面积 112.75×10^4 km²,占全国草地总面积的28.55%,主要分布在新疆、青海和甘肃等地,总体以天然草地为主,人工草地较少(Zhang et al., 2016; 付义勋等,2018)。新疆草地面积 50.18×10^4 km²,占全疆土地总面积的30.21%,广泛分布于境内,北部分布面积远大于南部,主要在伊犁地区和阿勒泰地区。青海草地面积 43.17×10^4 km²,占全省土地总面

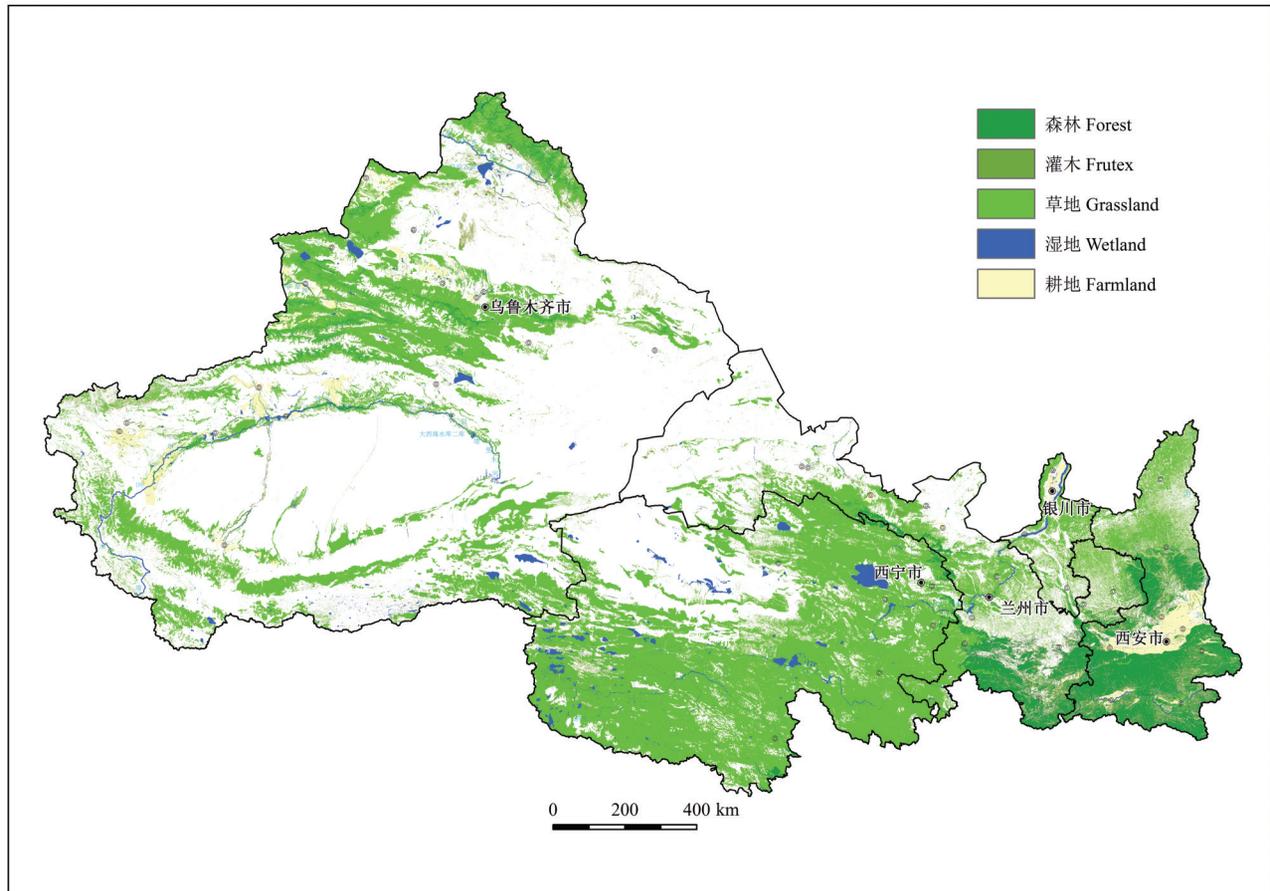


图6 中国西北生态系统碳汇潜力分区图

Fig.6 Zoning of carbon sink potential of Northwest China's ecosystem

积的59.77%，主要分布在青南高原、昆仑山南部山地、环青海湖地区、祁连山地和柴达木盆地东南部边缘山地。甘肃草地面积 $14.19 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全省土地总面积33.33%，其中低覆盖度草地占99.9%，中、高覆盖度草地占0.1%。陕西草地占全省总面积的14.05%，广泛分布于境内，北部分布面积远大于南部。宁夏草地面积 $2.07 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，约占自治区土地面积的47%，但草地覆盖度不高，沙化较严重。

西北五省区湿地资源丰富，各类湿地总面积 $12.45 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全国湿地总面积的53.03%，主要分布在青海、新疆和甘肃等地，除宁夏外，其他四省区均以天然湿地为主，人工湿地较少。青海各类湿地总面积 $8.98 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全省土地总面积的12.44%，以沼泽湿地为主，主要分布在其南部江河源及东北部祁连山河源等地区。新疆各类湿地总面积 $1.76 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全疆土地总面积的0.4%，以湖泊湿地为主，从海拔-154 m至4800 m垂直广泛分布在盆地、

天山南北、高山等区域，形成了复杂多样的特殊地形地貌，在中国湿地自然生态系统中具有独特性。甘肃有各类湿地约 $1.22 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，以河流湿地和沼泽湿地为主，河流湿地全省均有分布，沼泽湿地主要分布在甘南高原及河西等地区。陕西各类湿地总面积3085 km^2 ，占全省总面积的1.49%，以河流湿地占绝对优势，关中多于陕南、陕南多于陕北(熊萍和訾少龙, 2020)。宁夏有各类湿地约1805 km^2 ，占全区总面积的2.72%，以人工湿地为主，主要分布在卫宁平原和银川平原等主要引黄农灌区(表1)。

西北五省区土地总面积约 $310 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占全国国土面积的近1/3。自然资源部中国地质调查局自2004年以来，在西北重要农牧区累计开展土地质量地球化学调查 $29.59 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，获取了大量精细化土壤数据和系列成果：西北地区土壤pH均值为8.34，是全国土壤背景值(pH=6.7)的1.24倍；CaO含量均值为7.4%，是全国土壤背景值(CaO=1.54%)的4.81倍；

表1 中国西北湿地分布
Table 1 Distribution of wetlands in Northwest China

省区	湿地 总面积/km ²	河流湿地面积/km ² (占比/%)	湖泊湿地面积/km ² (占比/%)	沼泽湿地面积/km ² (占比/%)	内陆滩涂面积/km ² (占比/%)	人工湿地面积/km ² (占比/%)
青海	89833	13028(15.00)	25487(28.00)	48032(53.00)	-	3286(4.00)
新疆	17550	1296(7.40)	5 492(31.30)	3300(18.80)	3415(19.50)	4047(23.00)
甘肃	12180	5651(46.40)	444(3.70)	5015(41.20)	-	1070(8.80)
陕西	3085	2576(83.50)	76(2.46)	110(3.58)	-	323(10.46)
宁夏	1805		572(31.68)			1233(68.32)

MgO含量均值为2.37%,是全国土壤背景值(MgO=0.78%)的3.04倍(王学求等,2016;赵禹,2021)。而土壤的高盐度和高碱度与CO₂吸收强度呈正相关,碱性土壤中碳酸盐含量大大超过有机碳含量,土壤可以通过吸收CO₂的无机、非生物过程来固定碳,这一过程是西北干旱—半干旱地区碱性土壤碳转化及固持的重要机制(Xie et al.,2009;赵禹,2021)。综上所述,西北地区碱性土壤碳汇潜力大,对中国碳收支计算和碳固存具有重要意义。此外,西北地区分布着大量的玄武岩和橄榄岩,也拥有可观的碳汇潜力。

中国地质调查局目前正在开展的自然资源综合调查涵盖了森林、草地、湿地等主要生态碳汇类型,碳汇统计也是自然资源综合调查的主要任务。自然资源综合调查需要参照国际标准,夯实数据基础,提供令国际社会信服的碳汇数据,力求在国际舞台上做到碳汇数据准确、全面、公平,为应对全球气候变化作出中国的应有贡献。然而,受各部门分类标准、调查口径、调查方法等方面不统一的影响,自然资源调查范围重叠、数据差异较大、数据标准不一、权属不清晰、空间交叉重叠甚至相互冲突。这些因素都影响了中国碳汇数量的客观性和说服力,亟需建立从工作部署实施到成果表达的全过程自然资源专项调查监测技术标准体系。地表基质层与地表覆盖层之间关系紧密,联合开展以土壤、岩石等为主的地表基质调查与森林、草地、湿地等为主的地表覆盖层调查,两者互为支撑,有助于从空间格局演变和地质剖面结构两个层次厘清地表基质层与自然资源和生态环境的相互作用关系,对碳循环综合研究具有重要意义(葛良胜和杨贵才,2020)。

3.5 国土空间资源

总体而言,中国东部地区碳源较高,而西部地区碳汇较高,碳源碳汇错位是中国当前碳达峰、碳中和需要考虑的一个重要问题(鲁丰先等,2013)。

中国适宜CCUS选址的地区主要分布在西北的青海、新疆和内蒙古地区,包括塔里木盆地中部、柴达木北部、准噶尔北部、吐哈盆地中部、鄂尔多斯盆地等(图7)。这些盆地均为CO₂地质封存提供了较为理想的环境,其中塔里木盆地中部、柴达木盆地北部、准噶尔盆地北部的油气藏中具有良好的地质圈闭条件,可用于CCUS的面积较大(Cai et al.,2017)。同时,这些地区制约CCUS项目部署的环境因素相对较少,环境适应性强,碳源和碳汇匹配条件较好,未来可作为CCUS项目战略部署的首选之地。中国已投运或建设中的CCUS示范项目约为40个,捕集能力300×10⁴t/a,且多以石油、煤化工、电力行业小规模捕集驱油示范为主,缺乏大规模的多种技术组合的全流程工业化示范(蔡博峰等,2021),其中西北地区目前仅有5个CCUS项目,分别是新疆油田EOR项目、准东CO₂驱水封存野外先导性试验、国华锦界电厂燃烧后CO₂捕集与封存全流程示范项目、延长石油煤化工CO₂捕集与驱油示范项目以及长庆石油EOR项目(图7)。

4 思考与建议

碳中和再次吹响了全球能源变革的号角,加快了低碳能源替代化石能源的进程,也影响着经济和社会生活的各个方面。地质工作旨在服务于国家经济社会发展和生态文明建设,碳中和既可能会对传统地质学科造成一定挑战,也会给地质科学带来新生与繁荣发展的机遇。中国西北地区地域辽阔,自然资源优势明显,是中国实现碳中和目标的重要节点。在碳中和引领的新一轮经济发展中将发挥其资源优势,迎来新的发展机遇,并与东部地区形成良好的碳协同机制,为中国特色碳中和之路奠定良好的基础。中国西北地质调查工作应立足实际,发挥资源与专业优势,在碳中和目标推动下积极服务绿色低碳转型发展,具体

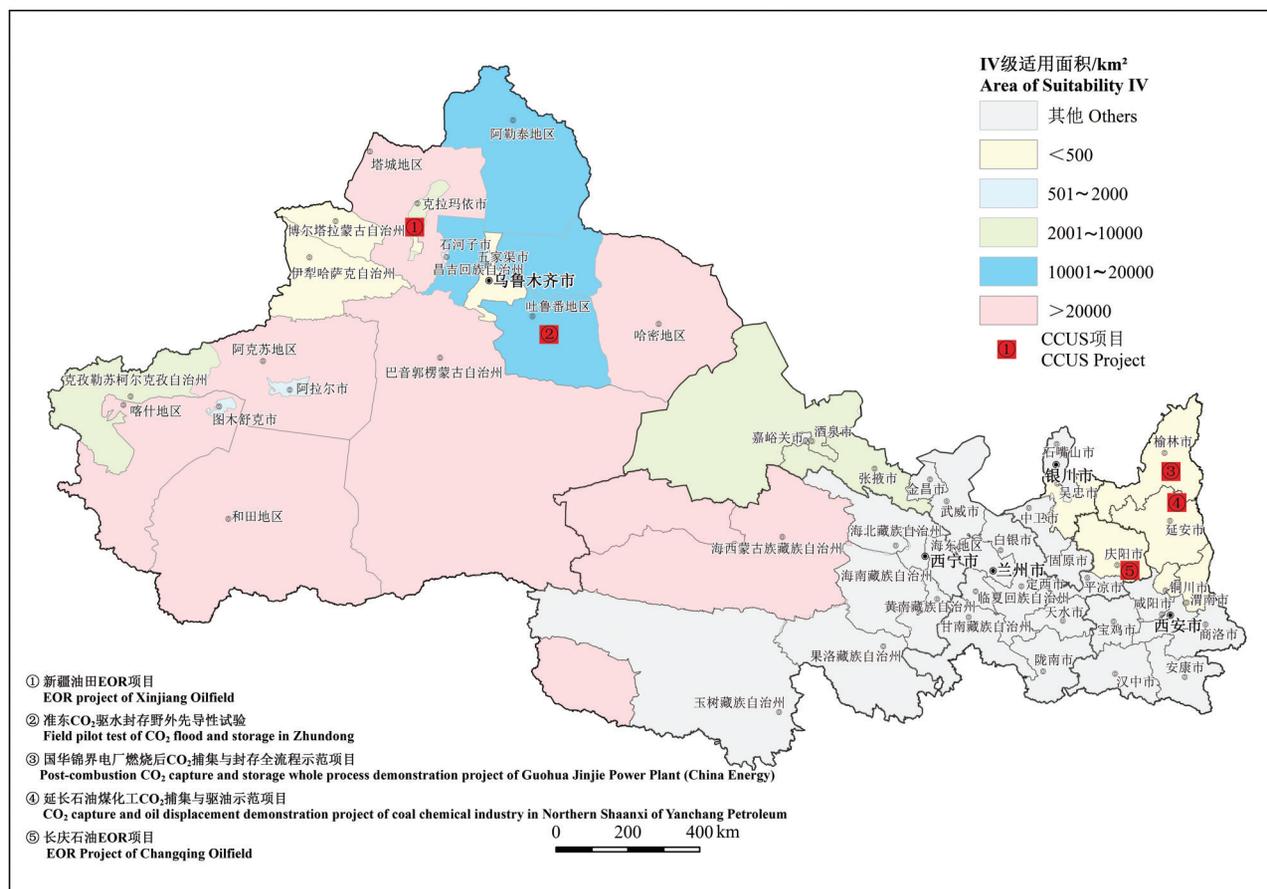


图7 中国西北碳储集评价分区及CCUS项目分布图(据 Cai et al., 2017; 蔡博峰等, 2021)

Fig.7 Mapping of areas classified for Carbon capture and storage and distribution of CCUS projects in Northwest China (after Cai et al., 2017; Cai Bofeng et al., 2021)

有以下六个方向的对策建议。

4.1 推进天然气调查力度, 建立天然气生产、储备基地

以中国西北的鄂尔多斯盆地、塔里木盆地和柴达木盆地为重点, 建成多个百亿立方米级天然气生产和储备基地, 促进常规天然气增储上产。建成鄂尔多斯盆地“致密气”生产基地, 通过加大致密气开发力度, 推进多种资源综合勘探开发, 提高资源开采水平。建成新疆地区“深层气”生产基地, 加大塔里木盆地等山前深层、超深层资源勘探开发, 推进天然气大发展。重点突破非常规天然气勘探开发, 完善产业政策体系, 加大页岩气、煤层气等调查与开发利用力度。积极谋划与中亚国家共建大型联合储气库中心。

4.2 开展地热资源潜力评价, 攻关干热岩勘查开发技术

开展中国西北地区地热资源时空分布规律及

成因机制调查研究, 划分地热资源类型, 估算地热资源储量。加强浅层型地热能、水热型地热资源、干热岩资源的调查评价和地热资源丰富的重要经济区低碳能源调查评价工作, 促进地热能资源优势转化和地方经济发展。分别以鄂尔多斯盆地南部、渭河盆地、青海共和盆地、新疆博乐市塔斯海地区和塔什库尔干一带为重点, 重点攻关取热不取水的地热开发模式, 开展不同深度地热储层开发利用动态监测与研究, 提出科学合理开发利用建议; 大力推进干热岩型等深部地热能勘查开发理论、技术攻关, 突破储层改造和高效换热关键技术; 推进重要城市浅层型地热能开发利用示范基地建设, 服务于当地经济社会发展。

4.3 加强关键矿产生命周期研究, 加大关键矿产勘查力度

围绕中国西北地区重要成矿带, 开展数字成矿

带建设,推动关键矿产资源动态潜力评价,集成已有调查研究成果,联合构建阿尔泰、天山—北山、西昆仑—阿尔金、东昆仑、祁连—秦岭五大数字成矿带,深化成矿规律认识,动态评价关键矿产资源潜力。重点围绕锂、钴、石墨、稀土、镍等多种关键矿产,开展大型矿产资源基地“三位一体”示范调查,提出矿产资源基地绿色矿业发展规划布局建议,支撑服务西北矿产资源绿色低碳高质量发展,不断增强保障国家关键矿产资源安全的能力和水平。

4.4 试点自然资源与地表基质层综合调查,系统评价碳汇潜力

坚持系统观念,重点开展青藏高原、黄河流域、祁连山、贺兰山、秦岭等重要生态功能区的自然资源综合调查监测与生态地质调查,利用以往基础地质调查资料,全面梳理西北地区地表基质层类型与面积,查清地表基质层组成、结构,以及对表层生态系统影响因素。系统评估地表基质层碳库现存量、固碳速率,研究地表基质层碳固持与碳汇功能的关键过程与调控机制,以及增汇潜力及风险评估。开展碱性土壤生态系统碳库容量、碳酸钙累积速率及开发利用生态响应研究。开展地表基质层—地表覆盖层—生态环境耦合关系研究。

4.5 开展野外地下空间调查,为CCUS和储能选址提供服务

CCUS需要的地下空间的地质条件有相同之处,也有各自的分异,需要系统的调查和规划。首先,CCUS技术中的CO₂地质封存需要枯竭油气田、煤层、盐水层等地下空间。其次,核电的大规模发展必然导致核废料的增多,核废料处置需要处于地壳稳定区、有完整花岗岩体、地下水位较低的地下空间。再次,风电和光伏都存在不稳定的问题,有较大的储能和调峰需求,地质储能需要枯竭油气藏、盐穴、硬岩洞穴、废弃矿洞、含水层等地下空间。通过系统调查中国西北地区野外地下空间,对其进行评价与规划,为CCUS和储能选址提供服务。

4.6 加强信息化及数据库建设,为碳中和提供大数据支撑

汇总和整合各学科数据,打造一站式的“大数据”共享和检索平台。通过“云计算”和“人工智能”分析“大数据”,探索地球关键带的生命演化、构造运动、气候变化等重大科学问题,跟踪石油、天然

气、非能源矿产、水等自然资源在全球经济体系中的运移情况,才真正为碳中和时代的社会发展和自然资源管理提供信息支撑和决策建议。

5 结 论

(1)中国西北地区拥有丰富的传统能源和风能、光能、地热能等清洁能源,以及锂、钴、镍和铀矿等清洁能源相关的关键矿产资源,可为碳减排路径提供有效资源支持。

(2)中国西北地区地域辽阔,生态类型和地表基质层类型丰富,碳库现存量和增汇潜力巨大,同时拥有大量适宜CCUS选址和地质储能的优质空间,可有效支撑碳增汇路径的实现。

(3)中国西北地质调查工作挑战与机遇并存,立足实际,发挥专业优势,在推进天然气资源调查、攻关地热资源开发技术、加强关键矿产全生命周期研究、试点地表基质层与生态地质综合调查、开展CCUS相关的地下空间调查、以及建设碳中和相关的地球系统科学数据库六个方面持续发力,可为实现碳中和目标提供重要的地质解决方案,做出应有的贡献。

致谢:责任编辑及匿名审稿专家为完善本文提出了宝贵修改意见,一并致谢。

References

- BP. 2021. Statistical Review of World Energy 2021, 70th edition[R]. London: BP, 1-69.
- Burney Jennifera. 2020. The downstream air pollution impacts of the transition from coal to natural gas in the United States[J]. *Nature Sustainability*, 3(2):152-160.
- Cai Bofeng, Li Qi, Liu Guizhen, Liu Lancui, Jin Taotao, Shi Hui. 2017. Environmental concern-based site screening of carbon dioxide geological storage in China[J]. *Scientific Reports*, 7(1):1-16.
- Cai Bofeng, Li Qi, Zhang Xian. 2021. China carbon dioxide capture, utilization and storage (CCUS) annual report (2021) [R]. Environmental Planning Institute of Ministry of ecology and environment; Wuhan Institute of geotechnical mechanics, Chinese Academy of Sciences; China Agenda 21 Management Center" (in Chinese with English abstract).
- Cao Jianhua. 2021a. Survey and monitoring technology of karst carbon cycle and carbon sink effect on watershed scale[R]. Beijing: China Geological Survey, 1-49 (in Chinese with English abstract).
- Cao Jianhua. 2021b. Karst carbon sink[N]. *China Mining News*[2021-

- 4–16](3)(in Chinese).
- Chen Jianguan, Jiang Mingzhong, Chang Shushuai, Duan Chenyu, Niu Jiaji, Huang Liang. 2016. Ore forming conditions of volcanic rock type uranium deposit and metallogenic prediction in Xuemisitan Area, Xinjiang[J]. Uranium Geology, 32(4): 206–215 (in Chinese with English abstract).
- China Geological Survey, Ministry of Natural Resources, Department of New and Renewable Energy, National Energy Administration, Institute of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, and Institute for Resource and Environment Policy, Development Research Center of the State Council. 2018. China geothermal energy development report (2018) [Z]. Beijing: China Petrochemical Press, 1–27(in Chinese).
- Chinese Academy of Sciences. 2021a. Data information: Overview of academic research and government planning of global carbon neutrality[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences,36(3): 367–370(in Chinese).
- Chinese Academy of Sciences. 2021b. Trend observation: Analysis of international salt cavern energy storage strategy and scientific and technological development trend[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,36(10):1248–1252(in Chinese).
- Ding Zhongli. 2021a. The key to achieving carbon neutrality is to build a "Three– Terminal Force" system[J].China Petroleum Enterprise, (6):10–11 (in Chinese with English abstract).
- Ding Zhongli. 2021b. Research on China's carbon neutralization framework Roadmap[J]. China Industry and Information Technology,(8):54–61(in Chinese).
- Dong Jiawei, Li Yi. 2021. Study of the site evaluation of compressed air energy storage in aquifers[J]. Safety and Environmental Engineering, 28(3):228–239 (in Chinese with English abstract).
- Du Xiangwan. 2021. How to achieve carbon peak and carbon neutralization [J]. China Petrochem,(1):26(in Chinese).
- Duan Jianhua, Li Yanqiang. 2018. Progress of uranium geological work and prospecting direction in Qinghai Province[J]. Management & Strategy of Qinghai Land & Resources,(5):29–30 (in Chinese).
- Duan Xiangyi, Dong Wangcang, Huang Fan, Wang Haiyuan, Wang Wenqing, Wang Jieming, Meng Li. 2021. Temporal– spatial distribution and prospecting direction of W– Mo polymetallic deposit in Shaanxi Province[J]. Metal Mine, (10): 121–142 (in Chinese with English abstract).
- Fan Dalei, Li Fubing, Wang Zongli, Miao Qi, Bai Yu, Liu Qingyun. 2021. Development status and prospects of China's energy minerals under the target of carbon peak and carbon neutral[J].China Mining Magazine, 30(6): 1–8(in Chinese with English abstract).
- Fan Zhenlin. 2021. Developing blue carbon sink to implement carbon neutralization[J]. Natural Resource Economics of China, 34(4): 12–18 (in Chinese with English abstract).
- FAO. 2020. Global forest resources assessment 2020[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1–12.
- Feng Jing, Jia Hongxu, Xu Shiqi, Chen Jianzhong, Tan Kebin, Wang Houfang, Zhang Peng. 2021. Prospecting model of pegmatite type lithium beryllium deposit in Dahongliutan ore concentration area of West Kunlun and its geological implications[J]. Xinjiang Geology, 39(3): 410–417 (in Chinese with English abstract).
- Friedlingstein Pierre, O'Sullivan Michael, Jones Matthew, Andrew Robbie, Hauck Judith, Olsen Are, Peters Glen, Peters Wouter, Pongratz Julia, Sitch Stephen, Le Quéré Corinne, Canadell Josep, Ciais Philippe, Jackson Robert, Alin Simone, Luiz E, Aragão Luiz, Arneeth Almut, Arora Vivek, Zaehle Sönke. 2020. Global carbon budget 2020[J]. Earth System Science Data, 12: 3269–3340.
- Fu Yixun, Zhao Zhifang, Chen Bailian. 2018. Study on spatial distribution law of grassland resources in China[J]. Science & Technology Information,16(8):68–69(in Chinese).
- Ge Liangsheng, Yang Guicai. 2020. New field of natural resources survey and monitoring: Ground substrate survey[J]. Natural Resource Economics of China, 33(9): 4– 11 (in Chinese with English abstract).
- Gu Xinlu, Liu Tao, Chen Feng, Ding Guangfa, Du Jiangyan. 2015. Analysis on genetic type and heat controlling pattern of Xinjiang geothermal resources[J]. Xinjiang Geology, 33(2): 275– 278 (in Chinese with English abstract).
- Guo Chaobin, Li Cai, Yang Lichao, Liu Kai, Ruan Yuejun, He Yang. 2021. Research review and engineering case analysis of geological compressed air energy storage[J].Geological Survey of China, 8(4): 109–119 (in Chinese with English abstract).
- Guo Tianchao, Sun Shanxing, Zhang Wenjuan. 2021. Research on the active and orderly development strategy of nuclear energy under the goal of carbon neutrality[J]. Energy of China, 43(5):44– 50 (in Chinese with English abstract).
- Han Shengfu, Yan Weide. 2013. Status, potential and work deployment of geothermal resources exploration, development and utilization in Qinghai[J]. Geothermal Energy, (5):14–15(in Chinese).
- He Honglin, Wang Shaoqiang, Zhang Li, Wang Junbang, Ren Xiaoli, Zhou Lei, Piao Shilong, Yan Hao, Ju Weimin, Gu Fengxue, Yu Shiyong, Yang Yuanhe, Wang Miaomiao, Niu Zhongen, Ge Rong, Yan Huimin, Huang Mei, Zhou Guoyi, Bai Yongfei, Xie Zongqiang, Tang Zhiyao, Wu Bingfang, Zhang Leiming, He Nianpeng, Wang Qiufeng, Yu Guirui. 2019. Altered trends in carbon uptake in China's terrestrial ecosystems under the enhanced summer monsoon and warming hiatus[J]. National Science Review, 6(3):505–514.
- Hepburn Cameron, Adlen Ella, Beddington John, Carter Emily, Fuss Sabine, Mac Dowell Niall, Minx Janc, Smith Pete, Williams Charlottek. 2019. The technological and economic prospects for CO₂ utilization and removal[J]. Nature, 575(7781): 87–97.
- Hu Da. 2017. Geothermal power generation contributes to the green development of the "Belt and Road Initiative"[J]. China Investment, (9):86–87(in Chinese).
- Hu Shengbiao, He Lijuan, Wang Jiyang. 2001. Compilation of heat flow

- data in the China continental area (3rd edition)[J]. Chinese Journal of Geophysics, 44(5): 611–626 (in Chinese with English abstract).
- Hu Xianxian, Zhang Keni, Guo Chaobin. 2014. Compressed air energy storage using saline aquifer as storage reservoir[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2(5): 390–396 (in Chinese with English abstract).
- Huang Fen, Zhang Chunlai, Yang Hui, Cao Jianhua, Li Wei, Zhou Yunchao. 2014. Achievements and prospects in the study of karst carbon sink processes and effects in China[J]. Geological Survey of China, 1(3):57–66 (in Chinese with English abstract).
- Huang Huifen. 2018. Present situation and prospect analysis of uranium geological survey in Gansu Province[J]. Gansu Science and Technology, 34(17):21–22(in Chinese).
- Huang Qibo, Qin Xiaoqun, Liu Pengyu, Zhang Liankai, Su Chuntian. 2016. Proportion of pedogenic carbonates and the impact on carbon sink calculation in karst area with semiarid environment[J]. Carsologica Sinica, 35(2): 164–172 (in Chinese with English abstract).
- Huang Shaozhong. 2018. Take multiple measures simultaneously and comprehensively implement policies to vigorously promote new energy consumption in Northwest China[J]. China Power Enterprise Management, (8): 48–50 (in Chinese).
- Huang Weihe, Wang Jun, Huang Yan, Liang Yan, Zheng Longye. 2021. "Carbon Neutrality" oriented transformation strategies for China's petroleum industry[J]. Petroleum and New Energy, 33(2): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- IAEA. 2017. Nuclear power for sustainable development[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1–8.
- IEA. 2021. Net zero by 2050 a roadmap for the global energy sector[R]. Paris: International Energy Agency, 1–223.
- Jiang Fei, Chen Jingm, Zhou Lingxi, Ju Weimin, Zhang Huifang, Machida Toshinobu, Ciais Philippe, Peters Wouter, Wang Hengmao, Chen Baozhang, Liu Lixin, Zhang Chunhua, Matsueda Hidekazu, Sawa Yousuke. 2016. A comprehensive estimate of recent carbon sinks in China using both top–down and bottom–up approaches[J]. Scientific Reports, 6(1): 1–9.
- Jiang Guangzheng, Gao Yao, Rao Song, Zhang Linyou, Tang Xiaoyin, Huang Fang, Zhao Ping, Pang Zhonghe, He Lijuan, Hu Shengbiao, Wang Jiyang. 2016. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition) [J]. Chinese Journal of Geophysics, 59(8):2892–2910 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Guangzheng, Hu Shengbiao, Shi Yizuo, Zhang Chao, Wang Zhuting, Hu Di. 2019. Terrestrial heat flow of continental China: Updated dataset and tectonic implications[J]. Tectonophysics, 753: 36–48.
- Jiao Nianzhi, Liu Jihua, Shi Tuo, Zhang Chuanlun, Zhang Yongyu, Zheng Qiang, Chen Quanrui, Tang Kai, Wang Yuze, Dong Hailiang, Tang Jianwu, Ye Siyuan, Dong Shuanglin, Gao Kunshan, Zhang Jihong, Xue Qiang, Li Qi, He Zhili, Tu Qichao, Wang Faming, Huang Xiaoping, Bai Yan, Pan Delu. 2021. Deploying ocean negative carbon emissions to implement the carbon neutrality strategy[J]. Scientia Sinica Terrae, 51(4): 632–643(in Chinese).
- Jiao Nianzhi. 2021. Developing ocean negative carbon emission technology to support national carbon neutralization[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 36(2): 179–187 (in Chinese with English abstract).
- Jing Tieya, Zhao Wentao, Gao Shiwang, Wang Jinyi, Zhang Jian. 2018. Practice and technical feasibility study of hot dry rock geothermal development[J]. Sino–Global Energy, 23(11):17–22 (in Chinese with English abstract).
- Kelemen P B, Matter J. 2008. In situ carbonation of peridotite for CO₂ Storage[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences–PNAS, 105(45):17295–17300.
- Leung Dennis Y C, Caramanna Giorgio, Maroto–Valer M Mercedes. 2014. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 39:426–443.
- Li Cai, Guo Chaobin, Li Xia, Yang Lichao, Ren Fang, He Qingcheng. 2021. Analysis of the role of geological survey on the roadmap design for realizing the goal of carbon emissions peak and carbon neutrality[J]. Geological Survey of China, 8(4): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Li Chun. 2021. CNOOC launches carbon neutrality plan[J]. China Plant Engineering, (4): 2 (in Chinese).
- Li Jiankang, Liu Xifang, Wang Denghong. 2014. The metallogenetic regularity of lithium deposit in China[J]. Acta Geologica Sinica, 88 (12): 2269–2283 (in Chinese with English abstract).
- Li Juan, Zhong Xing, Gao Yun. 2018. Mineralization styles and deposit types of uranium in Shaanxi Province[J]. Mineral Exploration, 9(6):1094–1098 (in Chinese with English abstract).
- Li Wanlun, Zhao Rui, Fang Daren. 2021. Mineral carbon sink: A new opportunity for carbon dioxide emission reduction[N]. China Mining News[2021–4–9] (in Chinese).
- Liao Zhongli, Zhang Yujie, Chen Wenbin, Pen Zhimin, Xiong Xingguo. 2006. Available persist exploitation and utilization of geothermal resources[J]. China Mining Magazine, 15(10):8–11 (in Chinese with English abstract).
- Liu Liyuan, Jiang Zhongming, Wang Jiangying, Hu Wei, Li Peng. 2018. Thermodynamic analyses of compressed air energy storage in a underground rock cavern[J]. Energy Storage Science and Technology, 7(2):232–239 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zigang. 2004. Carbon stock and GHG emission of wetland ecosystem[J]. Scientia Geographica Sinica, 24(5): 634–639 (in Chinese with English abstract).
- Lu Fengxian, Zhang Yan, Qin Yaochen, Chen Zhenling, Wang Guanghui. 2013. Spatial patterns of provincial carbon source and sink in China[J]. Progress in Geography, 32(12): 1751–1759 (in Chinese with English abstract).
- Ma Bing, Jia Lingxiao, Yu Yang, Wang Huan. 2021. The development and utilization of geothermal energy in the world[J]. Geology in China, 48(6): 1734–1747 (in Chinese with English abstract).
- Ma Ying, Li Na, Wang Qiwei, Yang Qishan. 2016. Characteristics and

- current research situation of rare earth resources in Bayan obo ore[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 34(6): 641–649 (in Chinese with English abstract).
- Mitsch William J, Bernal Blanca, Nahlik Amandam, Mander Ülo, Zhang Li, Anderson Christopher J, Jørgensen Sven E, Brix Hans. 2013. Wetlands, carbon, and climate change[J]. *Landscape Ecology*, 28(4): 583–597.
- National Bureau of Statistics of China. 2021. Statistical communique of the people's republic of China on the 2020 national economic and social development[EB/OL].[2021–02–28].http://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/zxfb2020/202102/t20210228_1814159.html (in Chinese).
- National Forestry and Grassland Administration. 2019. China Forest Resources Report (2014–2018) [M]. Beijing: China Forestry Publishing House: 1–451 (in Chinese).
- Oil and Gas Resources Survey Center of China Geological Survey. 2017. Atlas of Oil and Gas Exploration and Development in China and its Provinces and Regions[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1–460 (in Chinese).
- Oil and Natural Gas Department of National Energy Administration, Institute of Resources and Environmental Policy, Development Research Center of the State Council, Strategic Research Center of Oil And Gas Resources, Ministry of Natural Resources. 2021. China natural gas development report (2021) [R]. Beijing: China Petroleum Industry Press (in Chinese).
- Ouyang Xiaoguang, Lee Shingyip. 2020. Improved estimates on global carbon stock and carbon pools in tidal wetlands[J]. *Nature Communications*, 11(1): 317.
- Peng Bing, Guo Weilong, Hao Haoni, Xie Mei, Deng Lejuan. 2020. Suggestions on the development of geothermal resources in Shaanxi Province[J]. *Natural Resource Economics of China*, 33(7): 62–67 (in Chinese with English abstract).
- Piao Shilong, Fang Jingyun, Ciais Philippe, Peylin Philippe, Huang Yao, Sitch Stephen, Wang Tao. 2009. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. *Nature*, 458(7241): 1009–1013.
- Qiu Tian, Zeng Lingsen, Shen Tingting. 2021. Progresses on carbon sequestration through carbonation of mafic–ultramafic rocks[J]. *Geological Survey of China*, 8(4): 20–32 (in Chinese with English abstract).
- Quan Zhigao, Xu Gaozhong. 2012. Ore–bearing formation and exploration perspective of sandstone–type uranium deposits in northwestern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(2): 307–315 (in Chinese with English abstract).
- Rao Song, Jiang Guangzheng, Gao Yajie, Hu Shengbiao, Wang Jiyang. 2016. The thermal structure of the lithosphere and heat source mechanism of geothermal field in Weihe Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(6): 2176–2190 (in Chinese with English abstract).
- Ritchie Hannah, Roser Max. 2020. CO₂ and greenhouse gas emissions[EB/OL]. <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>.
- Shi Junfa, Tang Jinrong, Zhou Ping, Zheng Junwei. 2014. Development trend of international geological survey and its implications to China[J]. *Geological Bulletin of China*, 33(10): 1465–1472 (in Chinese with English abstract).
- Shi Junfa. 2020. The major accomplishments and geological events during the past two decades in the world and their implications for geological work in China in the next thirty years[J]. *Geological Bulletin of China*, 39(12): 2044–2057 (in Chinese with English abstract).
- Si Jin, Zhang Yundong, Liu Zhaohui, Liu Bing. 2021. Strategic path to carbon neutrality and action plan of large foreign oil companies[J]. *International Petroleum Economics*, 29(7): 28–35 (in Chinese with English abstract).
- Sun Zhenghao, Qin Kezhang, Mao Yajing, Tang Dongmei, Ma Decheng. 2021. Characteristics and significance of aegirine and arfvedsonite in Boziguoer Nb–Ta–Zr–Rb–REE deposit related to alkaline granite, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(12): 3687–3716 (in Chinese with English abstract).
- Tang Jinrong, Yang Zongxi, Zhou Ping, Shi Junfa. 2014. The progress in the strategic study of critical minerals and its implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 33(9): 1445–1453 (in Chinese with English abstract).
- Tian Hanqin, Xu Xiaofeng, Lu Chaoqun, Liu Mingliang, Ren Wei, Chen Guangsheng, Melillo Jerry, Liu Jiyuan. 2011. Net exchanges of CO₂, CH₄, and N₂O between China's terrestrial ecosystems and the atmosphere and their contributions to global climate warming[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(G2).
- Tu Qijun, Han Qiong, Li Ping, Wang Denghong, Li Jiankang. 2019. Basic characteristics and exploration progress of the spodumene ore deposit in the Dahongliutan area, West Kunlun[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(11): 2862–2873 (in Chinese with English abstract).
- Tu Qijun, Li Jiankang, Wang Gang, Ma Hongchao. 2019. Mineralization comparisons of the major pegmatite type spodumene deposits and their prospecting potential in west China[J]. *Geological Survey of China*, 6(6): 35–47 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Liu Lijun, Liu Xinxing, Zhao Zhi, He Hanhan. 2016. Main types and research trends of energy metallic resources in China[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 36(1): 21–28 (in Chinese with English abstract).
- Wang Faming, Sanders Christian J, Santos Isaac R, Tang Jianwu, Schuerch Mark, Kirwan Matthew L, Kopp Robert E, Zhu Kai, Li Xiuzhen, Yuan Jiacan, Liu Wenzhi, Li Zhian. 2021a. Global blue carbon accumulation in tidal wetlands increases with climate change[J]. *National Science Review*, 8(9): 1–11.
- Wang Faming, Tang Jianwu, Ye Siyuan, Liu Jihua. 2021b. Blue carbon sink function of Chinese coastal wetlands and carbon neutrality strategy[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 36(3): 241–251 (in Chinese with English abstract).

- Wang Guiling, Liu Yanguang, Zhu Xi, Zhang Wei. 2020. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 27(1):1-9 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Zhang Wei, Liang Jiyun, Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli. 2017. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(4): 449-450 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Wang Guocheng, Huang Yao, Zhang Wen, Yu Yongqiang, Sun Wenjuan. 2015. Quantifying carbon input for targeted soil organic carbon sequestration in China's croplands[J]. *Plant Soil*, 394(1-2): 57-71.
- Wang Guosheng, Sun Tao, Zan Guosheng, Wang Bang, Kong Xiangji. 2021. Roles and suggestions of terrestrial ecosystem carbon sink in achieving carbon emission peak and carbon neutrality in China[J]. *Geological Survey of China*, 8(4):13-19 (in Chinese with English abstract).
- Wang Haiyang, Rong Jian. 2021. Analysis on China's nuclear energy development path under the goal of peaking carbon emissions and achieving carbon neutrality[J]. *Electric Power*, 54(6): 86-94 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiangbo, Li Weihong, Hui Zhengbu, Zhao Ruyi, Gong Qifu, Zhu Huanqiao. 2013. Geological characteristics of Huayangchuan uranium niobium lead deposit in Shaanxi Province[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 33(S2): 248-249 (in Chinese).
- Wang Jing, Feng Liang, Palmer Pauli, Liu Yi, Fang Shuangxi, Bösch Hartmut, O Dell Christopherw, Tang Xiaoping, Yang Dongxu, Liu Lixin, Xia Chaozong. 2020. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data[J]. *Nature*, 586(7831): 720-723.
- Wang Mingyu, Ma Jie, Wan Manying. 2004. Research on a numerical model of twin-phase thermal transmission for aquifer thermal energy storage[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 34(4): 576-580 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xueqiu, Zhou Jian, Xu Shanfa, Chi Qinghua, Nie Lanshi, Zhang Bimin, Yao Wensheng, Wang Wei, Liu Hanliang, Liu Dongsheng, Han Zhixuan, Liu Qingqing. 2016. China soil geochemical baselines networks: Data characteristics[J]. *Geology in China*, 43(5): 1469-1480 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yao, Guo Chihui, Du Can, Chen Xijie, Jia Liqiong, Guo Xiaona, Chen Ruishan, Zhang Maosheng, Chen Zeyu, Wang Haodong. 2021c. Carbon peak and carbon neutrality in China: Goals, implementation path, and prospects[J]. 4: 720-746.
- Wang Zhiwen, Xiong Wei, Wang Haitao, Wang Zuwen. 2015. A review on underwater compressed air energy storage[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 4(6):585-598 (in Chinese with English abstract).
- World Bank. 2020. Minerals for climate action: The mineral intensity of the clean energy transition[R]. Washington, DC: World Bank.
- World Nuclear Association. 2021. The nuclear fuel report: Global scenarios for demand and supply availability 2021-2040[EB/OL]. [2021-9-8]. <https://world-nuclear.org/our-association/publications/publications-for-sale/nuclear-fuel-report.aspx>.
- Xi Huipeng, Wang Shijie, Bai Xiaoyong, Tang Hong, Luo Guangjie, Li Huiwen, Wu Luhua, Li Chaojun, Chen Huan, Ran Chen, Luo Xuling. 2021. The responses of weathering carbon sink to eco-hydrological processes in global rocks[J]. *Science of the Total Environment*, 1-13.
- Xiao Derong, Deng Lei, Kim Donggill, Huang Chunbo, Tian Kun. 2019. Carbon budgets of wetland ecosystems in China[J]. *Global Change Biology*, 25(6):2061-2076.
- Xie Dongyue, Fu Caiping, Tang Zhongyang, Liu Xuheng. 2021. Current status of rare earth resources in China and progress of extracting technology[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 41(1): 152-160 (in Chinese with English abstract).
- Xie Jingxia, Li Yan, Zhai Cuixia, Li Chenhua, Lan Zhongdong. 2009. CO₂ absorption by alkaline soils and its implication to the global carbon cycle[J]. *Environmental Geology*, 56(5): 953-961.
- Xiong Ping, Zi Shaolong. 2020. Types and distribution characteristics of main wetlands in Shaanxi Province[J]. *Forestry Science and Technology Information*, 52(2):14-16 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Zenghua, Wang Shijun. 2021. Status and progress on key technologies for development and utilization of resources in Qarhan salt lake[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 50(1):33-37 (in Chinese with English abstract).
- Xu Li, Yu Guirui, He Nianpeng, Wang Qiufeng, Gao Yang, Wen Ding, Li Shenggong, Niu Shuli, Ge Jianping. 2018. Carbon storage in China's terrestrial ecosystems: A synthesis[J]. *Scientific Reports*, 8(1).
- Xu Yu, Wang Jianping, W Jingrong. 2014. Analysis on status of cobalt resources with its import and export in China[J]. *Mining Research and Development*, 34(5): 112-115, 132 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hequn, Tan Wenjuan, Jiang Hanbing. 2017. Introduction to Important Minerals in Northwest China[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1-221 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hequn. 2020. Qinghai Shangzhuang magmatic phosphate rock[J]. *Northwestern Geology*, 53(3): 209 (in Chinese).
- Yang Zongxi, Zhou Ping, Li Pengyuan, Zheng Renrui, Chang Yong, Tang Jinrong. 2018. Analysis of global mining in 2017 and outlook[J]. *China Mining Magazine*, 27(2): 1-5 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Guangjie, Xia Yan, Jin Gentai, Ban Fansheng. 2017. Present state of underground storage and development trends in engineering technologies at home and abroad[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 45(4):8-14 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Qingrui, Liu Zaihua. 2017. Is basalt weathering a major mechanism for atmospheric CO₂ consumption? [J]. *Chinese*

- Science Bulletin, 62(10): 1041–1049 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chunlai, Huang Fen, Junbing Pu, Cao Jianhua. 2021. Estimation of karst carbon sink fluxes and manual intervention to increase carbon sinks in China[J]. Geological Survey of China, 8(4): 40–52 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guangyu. 2016. The realization path of environmental protection and ecological barrier construction in key ecological areas in western China[J]. Gansu Social Sciences, (1): 89–93 (in Chinese).
- Zhang H F, Chen B Z, Laan–Luijckx I T van der, Chen J, Xu G, Yan J W, Zhou L X, Fukuyama Y, Tans P P, Peters W. 2014. Net terrestrial CO₂ exchange over China during 2001–2010 estimated with an ensemble data assimilation system for atmospheric CO₂[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119(6): 3500–3515.
- Zhang Jiutian, Zhang Lu. 2021. Preliminary discussion on development of carbon capture, utilization and storage for carbon neutralization[J]. Thermal Power Generation, 50(1): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Li, Zhou Guangsheng, Ji Yuhe, Bai Yongfei. 2016. Spatiotemporal dynamic simulation of grassland carbon storage in China[J]. Science China Earth Sciences, 59(10): 1946–1958.
- Zhang Pengcheng, Chen Jiuru, Lan Mengtong, Shi Wei, Wu Mouyuan. 2021. Turning point of energy industry: Heading towards carbon neutrality—Reviews of International Energy Executive Summit 2021[J]. International Petroleum Economics, 29(1): 9–14 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shengsheng, Zhang Lei, Tian Chengcheng, Cai Jingshou, Tang Baochun. 2019. Occurrence geological characteristics and development potential of hot dry rocks in Qinghai Gonghe Basin[J]. Journal of Geomechanics, 25(4): 501–508 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wanliang. 2017. The main types and characteristics and spatial distribution of uranium deposits in China[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 32(4): 526–534 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Wang Guiling, Liu Feng, Xing Linxiao, Li Man. 2019. Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins[J]. Geology in China, 46(2): 255–268 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zenan, Zhang Zhaozhi, Wu Qing, Pan Zhaoshuai, Xu Hengyi. 2020. Chinese lithium mineral resource demand forecast[J]. China Mining Magazine, 29(7): 9–15 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xingang, Wan Guan. 2014. Current situation and prospect of China's geothermal resources[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 32: 651–661.
- Zhao Xuejiao, Sun Bo, Jia Zhixin. 2019. Prospects of hot dry rock resources in Guanzhong Basin, Shaanxi Province[J]. West–China Exploration Engineering, 31(7): 92–94 (in Chinese).
- Zhao Yu. 2021. Carbon sequestration and sink increasing potential of alkaline soil (in Chinese)[N]. China Mining News[2021–7–16].
- Zheng Renrui, Zhou Ping, Tang Jinrong. 2017. Current status and enlightenments of geothermal development in Europe[J]. China Mining Magazine, 26(5): 13–19 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Qiang, Yang Shiyu. 2018. Summary and prospect of new energy development in Northwest China[J]. Energy of China, 40(10): 25–32 (in Chinese).
- Zou Caineng, He Dongbo, Jia Chengye, Xiong Bo, Zhao Qun, Pan Songqi. 2021a. Connotation and pathway of world energy transition and its significance for carbon neutral[J]. Acta Petrolei Sinica, 42(2): 233–247 (in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Xiong Bo, Xue Huaqing, Zheng Dewen, Ge Zhixin, Wang Ying, Jiang Luyang, Pan Songqi, Wu Songtao. 2021b. The role of new energy in carbon neutral[J]. Petroleum Exploration and Development, 48(2): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Zou Yu. 2020. Analysis and suggestions on the current situation of nickel exploration and development in China[J]. World Nonferrous Metals, (15): 225–226 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡博峰, 李琦, 张贤. 2021. 中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)——中国CCUS路径研究[R]. 生态环境部环境规划院, 中国科学院武汉岩土力学研究所, 中国21世纪议程管理中心, 1–49.
- 曹建华. 2021a. 流域尺度岩溶碳循环及碳汇效应调查与监测技术[R]. 北京: 中国地质调查局, 578–582.
- 曹建华. 2021b. 岩溶碳汇[N]. 中国矿业报[2021–4–16](3).
- 陈江源, 江民忠, 常树帅, 段晨宇, 牛家骥, 黄亮. 2016. 新疆雪米斯坦火山岩型铀矿成矿条件及远景预测[J]. 铀矿地质, 32(4): 206–215.
- 丁仲礼. 2021a. 实现碳中和重在构建“三端发力”体系[J]. 中国石油企业, (6): 10–11.
- 丁仲礼. 2021b. 中国碳中和框架路线图研究[J]. 中国工业和信息化, (8): 54–61.
- 董家伟, 李毅. 2021. 含水层压缩空气储能选址评价方法研究[J]. 安全与环境工程, 28(3): 228–239.
- 杜祥琬. 2021. 如何实现碳达峰和碳中和[J]. 中国石油石化, (1): 26.
- 段建华, 李彦强. 2018. 青海省铀矿地质工作进展及找矿方向浅析[J]. 青海国土经略, (5): 29–30.
- 段湘益, 董王仓, 黄凡, 王海元, 王文青, 王洁明, 蒙利. 2021. 陕西省钨钼多金属矿床时空分布规律及找矿方向[J]. 金属矿山, (10): 121–142.
- 樊大磊, 李富兵, 王宗礼, 苗琦, 白羽, 刘青云. 2021. 碳达峰、碳中和目标下中国能源矿产发展现状及前景展望[J]. 中国矿业, 30(6): 1–8.
- 范振林. 2021. 开发蓝色碳汇助力实现碳中和[J]. 中国国土资源经济, 34(4): 12–18.
- 冯京, 贾红旭, 徐仕琪, 陈建中, 谭克彬, 王厚方, 张朋. 2021. 西昆仑大红柳滩矿集区伟晶岩型锂铍矿床找矿模型及意义[J]. 新疆地质, 39(3): 410–417.

- 付义勋, 赵志芳, 陈百炼. 2018. 全国草地资源空间分布规律研究[J]. 科技资讯, 16(8): 68-69.
- 葛良胜, 杨贵才. 2020. 自然资源调查监测工作新领域: 地表基岩调查[J]. 中国国土资源经济, 33(9): 4-11.
- 顾新鲁, 刘涛, 陈锋, 丁光发, 杜江岩. 2015. 新疆地热资源成因类型及控热模式分析[J]. 新疆地质, 33(2): 275-278.
- 郭朝斌, 李采, 杨利超, 刘凯, 阮岳军, 何阳. 2021. 压缩空气地质储能研究现状及工程案例[J]. 中国地质调查, 8(4): 109-119.
- 郭天超, 孙善星, 张文娟. 2021. “碳中和”目标下核能积极有序发展策略研究[J]. 中国能源, 43(5): 44-50.
- 国家林业和草原局. 2019. 中国森林资源报告(2014—2018) [M]. 北京: 中国林业出版社, 1-451.
- 国家能源局石油天然气司, 国务院发展研究中心资源与环境政策研究所, 自然资源部油气资源战略研究中心. 2021. 中国天然气发展报告(2021)[R]. 北京: 石油工业出版社, 1-23.
- 国家统计局. 2021b. 中华人民共和国2020年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. [2021-02-28]. http://www.stats.gov.cn/xgk/sjfb/zxfb2020/202102/t20210228_1814159.html.
- 韩生福, 严维德. 2013. 青海地热资源勘查开发利用现状、潜力及工作部署[J]. 青海国土经略, (5): 14-15.
- 胡达. 2017. 地热发电助力“一带一路”绿色发展[J]. 中国投资(9): 86-87.
- 胡圣标, 何丽娟, 汪集旻. 2001. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版)[J]. 地球物理学报, 44(5): 611-626.
- 胡贤贤, 张可霓, 郭朝斌. 2014. 压缩空气地下咸水含水层储能技术[J]. 新能源进展, 2(5): 390-396.
- 黄芬, 张春来, 杨慧, 曹建华, 李为, 周运超. 2014. 中国岩溶碳汇过程与效应研究成果及展望[J]. 中国地质调查, 1(3): 57-66.
- 黄惠芬. 2018. 甘肃省铀矿地质调查现状及远景分析[J]. 甘肃科技, 34(17): 21-22.
- 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田. 2016. 半干旱岩溶区土壤次生碳酸盐比例及对岩溶碳汇计算的影响[J]. 中国岩溶, 35(2): 164-172.
- 黄少中. 2018. 多措并举 综合施策 大力促进西北地区新能源消纳[J]. 中国电力企业管理, (8): 48-50.
- 黄维和, 王军, 黄龔, 梁严, 郑龙焯. 2021. “碳中和”下我国油气行业转型对策研究[J]. 油气与新能源, 33(2): 1-5.
- 姜光政, 高翔, 饶松, 张林友, 唐晓音, 黄方, 赵平, 庞忠和, 何丽娟, 胡圣标, 汪集旻. 2016. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. 地球物理学报, 59(8): 2892-2910.
- 焦念志, 刘纪化, 石拓, 张传伦, 张永雨, 郑强, 陈泉睿, 汤凯, 王誉泽, 董海良, 唐剑武, 叶思源, 董双林, 高坤山, 张继红, 薛强, 李琦, 贺志理, 屠奇超, 王法明, 黄小平, 白雁, 潘德炉. 2021. 实施海洋负排放践行碳中和战略[J]. 中国科学: 地球科学, 51(4): 632-643.
- 焦念志. 2021. 研发海洋“负排放”技术支撑国家“碳中和”需求[J]. 中国科学院院刊, 36(2): 179-187.
- 荆铁亚, 赵文韬, 邵时旺, 王金意, 张健. 2018. 干热岩地热开发实践及技术可行性研究[J]. 中外能源, 23(11): 17-22.
- 李采, 郭朝斌, 李霞, 杨利超, 任航, 何庆成. 2021. 地质调查助力碳达峰碳中和目标实现的路径浅析[J]. 中国地质调查, 8(4): 1-12.
- 李淳. 2021. 中国海油启动碳中和规划[J]. 中国设备工程, (4): 2.
- 李建康, 刘喜方, 王登红. 2014. 中国锂矿成矿规律概要[J]. 地质学报, 88(12): 2269-2283.
- 李娟, 仲星, 高云. 2018. 陕西省铀矿矿床类型及成矿模式研究[J]. 矿产勘查, 9(6): 1094-1098.
- 李万伦, 赵睿, 房大任. 2021. 矿物碳汇: 二氧化碳减排的新契机[N]. 中国矿业报[2021-4-9].
- 廖忠礼, 张予杰, 陈文彬, 彭智敏, 熊兴国. 2006. 地热资源的特点与可持续开发利用[J]. 中国矿业, 15(10): 8-11.
- 刘澧源, 蒋中明, 王江营, 胡炜, 李鹏. 2018. 压气储能电站地下储气库之压缩空气热力学过程分析[J]. 储能科学与技术, 7(2): 232-239.
- 刘子刚. 2004. 湿地生态系统碳储存和温室气体排放研究[J]. 地理科学, 24(5): 634-639.
- 鲁丰先, 张艳, 秦耀辰, 陈真玲, 王光辉. 2013. 中国省级区域碳源汇空间格局研究[J]. 地理科学进展, 32(12): 1751-1759.
- 马冰, 贾凌霄, 于洋, 王欢. 2021. 世界地热开发利用现状与展望[J]. 中国地质, 48(6): 1734-1747.
- 马莹, 李娜, 王其伟, 杨启山. 2016. 白云鄂博稀土资源的特点及研究开发现状[J]. 中国稀土学报, 34(6): 641-649.
- 彭冰, 郭伟龙, 郝皓旋, 谢梅, 邓乐娟. 2020. 对陕西省地热资源开发的几点建议[J]. 中国国土资源经济, 33(7): 62-67.
- 邱添, 曾令森, 申婷婷. 2021. 基性-超基性岩碳酸盐化固碳效应研究进展[J]. 中国地质调查, 8(4): 20-32.
- 权志高, 徐高中. 2012. 中国北西部地区砂岩型铀矿含矿建造及找矿前景[J]. 地质学报, 86(2): 307-315.
- 饶松, 姜光政, 高雅洁, 胡圣标, 汪集旻. 2016. 渭河盆地岩石圈热结构与地热田热源机理[J]. 地球物理学报, 59(6): 2176-2190.
- 施俊法, 唐金荣, 周平, 郑军卫. 2014. 世界地质调查工作发展趋势及其对中国的启示[J]. 地质通报, 33(10): 1465-1472.
- 施俊法. 2020. 21世纪前20年世界地质工作重大事件、重大成果与未来30年中国地质工作发展的思考[J]. 地质通报, 39(12): 2044-2057.
- 司进, 张运东, 刘朝辉, 刘冰. 2021. 国外大石油公司碳中和战略路径与行动方案[J]. 国际石油经济, 29(7): 28-35.
- 孙政浩, 秦克章, 毛亚晶, 唐冬梅, 马德成. 2021. 塔里木北缘波孜果尔碱性(花岗岩)岩铀-钼-钨-铍-稀土矿床钠铁闪石、霓石特征及意义[J]. 岩石学报, 37(12): 3687-3716.
- 唐金荣, 杨宗喜, 周平, 施俊法. 2014. 国外关键矿产战略研究进展及其启示[J]. 地质通报, 33(9): 1445-1453.
- 涂其军, 韩琼, 李平, 王登红, 李建康. 2019a. 西昆仑大红柳滩一带锂辉石矿基本特征和勘查新进展[J]. 地质学报, 93(11): 2862-2873.
- 涂其军, 李建康, 王刚, 马宏超. 2019b. 中国西部主要伟晶岩型锂辉石矿床成矿作用对比及找矿前景[J]. 中国地质调查, 6(6): 35-47.
- 王登红, 刘丽君, 刘新星, 赵芝, 何晗晗. 2016. 我国能源金属矿产的主要类型及发展趋势探讨[J]. 桂林理工大学学报, 36(1): 21-28.
- 王法明, 唐剑武, 叶思源, 刘纪化. 2021. 中国滨海湿地的蓝色碳汇功能及碳中和对策[J]. 中国科学院院刊, 36(3): 241-251.
- 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 张薇. 2020. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 27(1): 1-9.
- 王贵玲, 张薇, 梁继运, 蔺文静, 刘志明, 王婉丽. 2017. 中国地热资源

- 潜力评价[J]. 地球学报, 38(4): 449-450.
- 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.
- 王国胜, 孙涛, 咎国盛, 王棒, 孔祥吉. 2021. 陆地生态系统碳汇在实现“双碳”目标中的作用和建议[J]. 中国地质调查, 8(4): 13-19.
- 王海洋, 荣健. 2021. 碳达峰、碳中和目标下中国核能发展路径分析[J]. 中国电力, 54(6): 86-94.
- 王江波, 李卫红, 惠争卜, 赵如意, 龚奇福, 朱焕巧. 2013. 陕西华阳川铀钍矿床地质特征[J]. 矿物学报, 33(S2): 248-249.
- 王明育, 马捷, 万曼影. 2004. 地下含水层储能两阶段热量运移数值模型研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版) 34(4): 576-580.
- 王学求, 周建, 徐善法, 迟清华, 聂兰仕, 张必敏, 姚文生, 王伟, 刘汉粮, 刘东盛, 韩志轩, 柳青青. 2016. 全国地球化学基准网建立与土壤地球化学基准值特征[J]. 中国地质, 43(5): 1469-1480.
- 王志文, 熊伟, 王海涛, 王祖温. 2015. 水下压缩空气储能研究进展[J]. 储能科学与技术, 4(6): 585-598.
- 谢东岳, 伏彩萍, 唐忠阳, 刘旭恒. 2021. 我国稀土资源现状与冶炼技术进展[J]. 矿产保护与利用, 41(1): 152-160.
- 熊萍, 瞿少龙. 2020. 陕西省主要湿地类型及分布特点[J]. 林业科技情报, 52(2): 14-16.
- 熊增华, 王石军. 2021. 察尔汗盐湖资源开发利用现状及关键技术进展[J]. 化工矿物与加工, 50(1): 33-37.
- 徐昱, 王建平, 吴景荣. 2014. 我国钼矿资源现状及进出口分析[J]. 矿业研究与开发, 34(5): 112-115, 132.
- 杨合群, 谭文娟, 姜寒冰. 2017. 西北地区重要矿产概论[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1-221.
- 杨合群. 2020. 青海上庄岩浆型磷矿[J]. 西北地质, 53(3): 209.
- 杨宗喜, 周平, 李鹏远, 郑人瑞, 常勇, 唐金荣. 2018. 2017年全球矿业形势分析与未来展望[J]. 中国矿业, 27(2): 1-5.
- 袁光杰, 夏焱, 金根泰, 班凡生. 2017. 国内外地下储库现状及工程技术发展趋势[J]. 石油钻探技术, 45(4): 8-14.
- 曾庆睿, 刘再华. 2017. 玄武岩风化是重要的碳汇机制吗[J]. 科学通报, 62(10): 1041-1049.
- 张春来, 黄芬, 蒲俊兵, 曹建华. 2021. 中国岩溶碳汇通量估算与人工干预增汇途径[J]. 中国地质调查, 8(4): 40-52.
- 张广裕. 2016. 西部重点生态区环境保护与生态屏障建设实现路径[J]. 甘肃社会科学, (1): 89-93.
- 张九天, 张璐. 2021. 面向碳中和目标的碳捕集、利用与封存发展初步探讨[J]. 热力发电, 50(1): 1-6.
- 张鹏程, 陈嘉茹, 兰孟彤, 石卫, 吴谋远. 2021. 能源行业的转折点: 迈向碳中和——“2021国际能源发展高峰论坛”综述[J]. 国际石油经济, 29(1): 9-14.
- 张盛生, 张磊, 田成成, 蔡敬寿, 唐保春. 2019. 青海共和盆地干热岩赋存地质特征及开发潜力[J]. 地质力学学报, 25(4): 501-508.
- 张万良. 2017. 中国主要铀矿类型、特点及其空间分布[J]. 地质找矿论丛, 32(4): 526-534.
- 张薇, 王贵玲, 刘峰, 邢林啸, 李曼. 2019. 中国沉积盆地型地热资源特征[J]. 中国地质, 46(2): 255-268.
- 张泽南, 张照志, 吴晴, 潘昭帅, 徐恒逸. 2020. 中国锂矿资源需求预测[J]. 中国矿业, 29(7): 9-15.
- 赵雪娇, 孙勃, 贾志鑫. 2019. 陕西关中盆地干热岩资源远景展望[J]. 西部探矿工程, 31(7): 92-94.
- 赵禹. 2021. 碱性土壤的固碳增汇潜力[N]. 中国矿业报[2021-7-16].
- 郑人瑞, 周平, 唐金荣. 2017. 欧洲地热资源开发利用现状及启示[J]. 中国矿业, 26(5): 13-19.
- 中国地质调查局油气资源调查中心. 2017. 中国及分省区油气勘探开发图集[M]. 北京: 地质出版社, 1-460.
- 中国科学院. 2021a. 数据资讯: 全球碳中和的学界研究与政府规划概况[J]. 中国科学院院刊, 36(3): 367-370.
- 中国科学院. 2021b. 趋势观察: 国际盐穴储能战略与科技发展态势分析[J]. 中国科学院院刊, 36(10): 1248-1252.
- 周强, 杨仕友. 2018. 中国西北地区新能源发展总结与展望[J]. 中国能源, 40(10): 25-32.
- 自然资源部中国地质调查局, 国家能源局新能源和可再生能源司, 中国科学院科技战略咨询研究院, 国务院发展研究中心资源与环境政策研究所. 2018. 中国地热能发展报告[R]. 北京: 中国石化出版社, 1-27.
- 邹才能, 何东博, 贾成业, 熊波, 赵群, 潘松圻. 2021a. 世界能源转型内涵、路径及其对碳中和的意义[J]. 石油学报, 42(2): 233-247.
- 邹才能, 熊波, 薛华庆, 郑德温, 葛稚新, 王影, 蒋璐阳, 潘松圻, 吴松涛. 2021b. 新能源在碳中和中的地位与作用[J]. 石油勘探与开发, 48(2): 1-10.
- 邹愉. 2020. 我国镍矿资源勘查开发现状分析及建议[J]. 世界有色金属, (15): 225-226.