

直接空气捕集选址条件专家问卷调查

肖姝璇¹, 王钰璇¹, 李向前², 项小娟¹, 李 凯¹

(1. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院可持续发展与能源政策研究中心, 北京 100083; 2. 首都经济贸易大学统计学院, 北京 100070)

摘要: 直接空气捕集技术 (DAC) 作为一种从空气中捕集 CO₂ 的新兴负排放技术, 对实现全球气候目标越来越重要。然而, 如何优化 DAC 选址以支撑其大规模部署亟待解决。基于现有文献资料, 构建了一个广泛适用的 DAC 项目选址指标体系, 其中, 一级指标可归纳为 CO₂ 封存与运输、能源供应、环境特征、社会影响 4 方面, 并覆盖 21 项二级指标。基于该指标体系, 对从事相关领域的政府管理人员、科研人员和产业专家开展问卷调查, 评估了各项指标影响 DAC 选址的重要性。结果表明, DAC 选址是一个多因素决策过程, 不同因素对不同技术类型的影响程度存在显著差异。针对高温吸收技术, 一级指标的重要性依次为环境特征、能源供应、社会影响以及封存与运输; 针对低温吸附技术, 一级指标的重要性依次为环境特征、社会影响、能源供应以及封存与运输。特别地, 温度对高温吸收技术选址至关重要, 而土地利用和相对湿度对低温吸附技术尤为关键。此外, 专家意见针对一些指标 (如空气质量、核能供应) 存在显著分歧, 表明实际外界条件如何具体影响 DAC 性能研究尚不充分。未来应进一步加强多因素影响下 DAC 选址研究, 对于实现负碳技术大规模推广具有重要意义。

关键词: 直接空气捕集 (DAC); 能源供应; 环境特征; 选址条件

中图分类号: X701 文献标志码: A 文章编号: 1006-4772(2024)10-0176-10

Expert questionnaire study on direct air capture siting conditions

XIAO Shuxuan¹, WANG Yuxuan¹, LI Xiangqian², XIANG Xiaojuan¹, LI Kai¹

(1. Center for Sustainable Development and Energy Policy Research (SDEP), School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining & Technology—Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Statistics, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China)

Abstract: Direct Air Capture (DAC), as an emerging negative emission technology for removing CO₂ directly from the atmosphere, plays a vital role in achieving global climate goals. However, optimizing DAC siting to support its large-scale deployment remains a challenge. Based on existing literatures, a set of DAC project siting index system was developed, categorized into 4 primary indicators including CO₂ sequestration and transportation, energy supply, environmental characteristics, and social impacts, covering 21 secondary indicators. Using this index system, a questionnaire survey was conducted targeting government officials, researchers, and industry experts to assess the significance of these indicators in influencing DAC siting decisions. The findings underscore DAC site selection as a multi-factor decision-making process, with significant variations in the importance of different factors for different technology types. For high-temperature absorption technologies, 4 primary indicators, ranked by importance, are environmental characteristics, energy supply, social impacts, sequestration and transportation. For low-temperature adsorption technologies, 4 primary indicators, ranked by importance, are environmental characteristics, social impacts, energy supply, sequestration and transportation. Notably, temperature is crucial for siting high-temperature absorption technologies, while land use and relative humidity are critical for low-temperature adsorption technologies. Furthermore, significant divergences were observed among experts regarding certain indicators (such as air quality, nuclear energy supply), indicating insufficient research on how these factors specifically affect DAC performance. Future research should further enhance DAC siting under multi-factor impacts, which is crucial for the large-scale deployment of negative carbon technologies.

Key words: direct air capture (DAC); energy supply; environmental characteristics; siting conditions

收稿日期: 2024-04-30; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CCUS24050101

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (12301427); 中国矿业大学(北京) 博士研究生拔尖创新人才培养基金资助项目 (BBJ2024005)

作者简介: 肖姝璇 (1999—), 女, 湖南娄底人, 博士研究生。E-mail: xiaoshuxuan1999@163.com

通讯作者: 李 凯 (1990—), 男, 山东聊城人, 博士研究生。E-mail: haishanglai527@163.com

引用格式: 肖姝璇, 王钰璇, 李向前, 等. 直接空气捕集选址条件专家问卷调查 [J]. 洁净煤技术, 2024, 30(10): 176-185.

XIAO Shuxuan, WANG Yuxuan, LI Xiangqian, et al. Expert questionnaire study on direct air capture siting conditions [J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(10): 176-185.



0 引言

气候变化是当前全球面临的重大挑战之一。在21世纪中叶实现净零排放,并将全球温升控制在不超过2℃已成为国际社会共同努力的目标。联合国政府间气候变化委员会(IPCC)最新评估显示:在1.5℃路径下,从净零年到2100年,全球需要从大气中累计去除200亿~6600亿t CO₂,以抵消剩余难减排温室气体排放^[1-2]。在此背景下,碳捕集利用与封存(CCUS)技术和新兴碳移除(CDR)技术部署已成关注热点^[3-8]。其中,直接空气捕集(direct air capture, DAC)并结合碳封存(DACCS)技术通过直接从空气中捕集CO₂并将其永久封存或矿化,被视为可实现规模化减排的CDR技术^[9-11]。IPCC最新评估指出,在1.5℃/2℃路径下,DACCS技术在2020~2100年累计减排潜力高达2500亿t和3100亿t CO₂^[1];根据中国CCUS年度报告(2023),DACCS技术预计在碳中和前夕每年可移除约1亿t CO₂,以抵消剩余温室气体排放^[12]。因此,未来发展DACCS技术对全球实现《巴黎协定》气候目标,以及中国达成碳中和目标具有重要意义。

DAC技术种类繁多。KUNGL等^[13]将DAC分为氢氧化物高温吸收、胺基低温吸附、变湿吸附、电化学、深冷分离等11种技术;LEONZIO G等^[14]概述了吸收、吸附、离子交换树脂、矿物碳化、膜分离、光催化、低温分离、电化学和电渗析等9种技术;SANZ-PEREZ等^[15]综述了包括氢氧化物水溶液吸收、有机-无机杂化吸附、固体碱碳酸盐、电化学、矿物碳化、膜分离和光催化等7种技术。在这些技术中,液体吸收剂方法已在烟气捕集领域得到广泛应用,其技术成熟度较高;固体吸附剂方法可有效解决胺挥发、水损失等关键问题,近年来成为研究焦点。其他技术如电化学、矿物碳化、膜分离、光催化、深冷分离仍处于实验阶段,商业化进程较为缓慢。

理论上,DAC技术可以部署在全球任何地区,但目前确定其最优选址方案存在多方面信息缺失。例如,CO₂供应链(运输和封存)、能源资源配置、设施周边环境条件以及社会接受程度,共同导致DAC项目选址不确定性,已成为该技术发展的主要制约因素^[9,12,16-19]。可见,DAC选址是一个涉及环境、能源、经济和社会等多层面、多因素决策过程,系统识别并分析DAC选址影响因素对提升其技术可行性尤为关键^[20]。

目前,一些研究对DAC选址问题开展了初步探索。例如,ABRAMSON E等^[21]研究了影响DAC选址的17个关键因素,并对美国部署DAC的潜力进行加权评估;IEA报告指出,DAC性能需要在极端干燥、潮湿气候或空气污染等环境中进一步测试^[4];SATTERFIELD T等^[22]通过问卷调研了美国和加拿大公众对DAC技术的接受度。综上,现有DAC选址研究大多只针对部分影响因素,全面考虑各影响因素并客观评估其重要程度的研究相对较少。该研究通过对影响DAC选址的诸多潜在因素开展问卷调查,系统分析领域内专家学者的客观评判结果,识别各影响因素对DAC选址的实际重要性,为DAC技术大规模部署提供科学合理的决策参考。

1 指标选取

为便于专家区分、理解并给出差异性结论,保证结果的准确性,本研究将着眼于2种主要的DAC技术:高温吸收技术和低温吸附技术^[23]。全球主要的DAC公司如Carbon Engineering和Climeworks分别使用高温吸收技术和低温吸附技术^[15]。高温吸收技术通常使用碱性氢氧化物溶液吸收CO₂并通过高温再生,而低温吸附技术一般通过将吸附剂负载在多孔材料上来吸附CO₂,主要通过真空或变温方式再生。不同DAC技术的主要特征见表1^[9]。

表1 直接空气捕集技术的主要特征
Table 1 Key features of DAC technologies

捕获机制	吸附剂/材料	解吸温度/℃	能耗
高温吸收技术	碱性氢氧化物溶液	300~900	5.5~8.8 GJ/t的CO ₂
低温吸附技术	固态胺	80~120	7.2~9.5 GJ/t的CO ₂

参照《IPCC: AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023》《IEA: Direct Air Capture-A key technology for net zero》等DAC相关报告以及一些DAC运行原理、技术、成本分析等相关文献,构建了一套DAC项目选址指标体系,指标内容及指标说明详见表2。其中一级指标可归纳分为封存与运输、能源供应、环境特征、社会影响4个方面,并覆盖21项二级指标。

具体而言:①碳封存与运输是消纳捕集的CO₂的关键步骤^[24-28]。靠近封存地是DAC重要的选址因素之一^[21];CO₂利用带来的成本效益可以缓解DAC工厂运营初期成本高昂的问题^[29];ROSA等^[30]指出矿化与DAC相结合是实现净零排放的最快途径;BOBICKI等^[31]认为各种碱性废料提供了消纳

表2 直接空气捕集项目选址指标体系

Table 2 DAC project siting index system

一级指标	二级指标	指标说明
封存与运输	盐水地封层	咸水层盆地
	石油及天然气储层	拟建及在建的驱油及驱气点
	镁铁质(玄武岩)和超镁铁质(橄榄岩和蛇纹岩)	岩石分布地点
	碳矿化岩	
	采矿、建筑和拆迁行业的各种碱性废料通过矿化或增强风化捕集CO ₂	废碱源选定地点
能源供应	CO ₂ 运输	现有及拟建CO ₂ 管道和公路
	太阳能	现有及拟建聚光太阳能发电厂及光伏
	风能	现有及拟建的陆上风电站
	水电	现有及拟建的大坝
	地热	现有及拟建的地热厂
	生物质	现有及拟建的生物质发电站
	化石能源处理厂耦合CCS	现有及潜在的加装CCS的燃煤电厂及天然气电厂
	核能	现有及在建核电站
	废热	现有及潜在的热电联产设施
	环境特征	温度
相对湿度		日平均相对湿度
空气流速		日平均风速
空气质量		PM _{2.5} 浓度
水资源可用性		水资源总量,包括地表水和地下水
社会影响	土地利用面积	一个地区或国家范围内可供DAC使用的总面积
	土地利用类型	土地利用方式相同的土地资源单元,根据土地利用的地域差异划分
社会影响	公众接受度	公众对技术的了解程度、认可程度及接受程度

CO₂的途径。② DAC作为能源密集型项目,选址时需考虑能源供应。为提高负碳技术效率,低碳能源将成为DAC选址的重要因素之一。IEA报告考虑了将DAC与低碳热源(如废热、地热或热泵)及

太阳能、风能等可再生电力结合^[9]; HABIB等^[32]模拟了一种天然气联合循环发电厂的混合碳捕集系统,该系统使用金属有机框架吸附CO₂; MCQUEEN等^[33]计算了以核能与地热为能源的DACCS捕集成本; OKONKWO等^[34]探讨了利用生物能源满足DAC能源需求的可行性。③ DAC的技术特性使其性能对设施周围的环境条件十分敏感^[21]。KEJU等^[18]表明温度和相对湿度对碳捕集率和能耗有很大影响,风速等因素也会影响DAC的性能; IEA报告提出DAC性能需要在极端干燥、极度潮湿或空气污染的地区进一步测试,同时,部署DAC时还需考虑土地和水资源可用性^[9]。④除了技术本身的发展,部署DAC还需考虑公众接受度。COX等^[35]发现公众缺乏对DACCS技术的理解,这将影响部署DAC进程^[36]。

2 研究方法

2.1 问卷设计

本研究旨在优化DAC选址以支撑其大规模部署,但目前缺少全面考虑选址影响因素并客观评估其重要程度的研究,无法通过现有研究做出科学的判断。因此本研究构建了一套DAC选址指标体系,并采用向专家发放问卷调查的方法,收集定量的数据,以此评估各项指标对DAC选址的重要程度。

问卷调查包括3个部分内容:第1部分基于表2,调查专家对各指标对DAC选址的影响程度的判断,影响程度排序均采用李克特量表进行测量,得分越高表明该因素对选址影响越大。第2部分征询专家对风速过大是否影响DAC运行问题的看法。第3部分征询专家对其他影响DAC选址因素的建议。问卷设计的主要目的是:①通过调查问卷征询专家对DAC选址影响因素的看法,排序并初步选取重点因素及类别,为DAC在全球范围内部署提供科学依据;②确保调查问卷的全面性,提升评估结果的科学性和可信度。

2.2 调查样本

本问卷调查对象包括政府、科研院所、学校和DAC相关的企业单位的相关人员。被调查对象为DAC技术、CCUS技术、能源政策和社会经济学的管理人员、科研人员和DAC项目一线工作人员,均获得大学以上学历,其中拥有博士以上学历的人数占总调查人数的75%。此次共发放问卷30份,其中有效回收问卷24份,回收率约80%^[37]。总体来说,被调查对象涉及到各个领域和不同的工作单位类型,研究结果具有专业性和代表性。调查样本的基本情况见表3。

表3 调查样本基本情况

Table 3 Basic information of the survey sample

基本情况	人员情况	频数	占比/%
性别	男	16	67
	女	8	33
年龄	<35岁	13	54
	35~45岁	8	33
	>45岁	3	13
受教育程度	硕士	6	25
	博士	18	75
单位性质	政府及事业单位	3	13
	科研院所及高校	16	67
	企业	5	21

2.3 调查问卷分析方法

2.3.1 不同一级指标中单个指标的定位

在专家问卷中,对4项一级指标,共设计了21项二级指标,每个指标包含0~9个等级供专家选择。专家根据个人经验选择他们认为适合的等级,因此对同一问题的看法各异,导致答案分散且无序。为了综合这些意见,确定每个指标的总体等级,即专家群体整体认为的适当等级,本研究采用物理学上计算物质分布重心的方法,通过计算专家意见的“重心”作为所有专家对于该问题的综合意见^[38]。计算方法如下

$$l = \frac{\sum_{i=1}^n iX_i}{\sum_{i=1}^n X_i}$$

对不同的等级按顺序赋值*i*,例如“咸水地层封存”有10个等级,分别赋予0、1、2、3、4、5、6、7、8、9。记等级*i*中投票的专家数目为*X_i*,*n*为专家总数目,*l*为该二级指标对应的总体位置。

2.3.2 不同指标综合比较排名

在同一级指标中,问卷提供了若干个单项指标,为在这些方向之间进行比较,以判断出某一级指标对DAC选址的重要程度,研究采用stata计算熵得到某一级指标的综合性指数。该方法基于指标变异性的确定其客观权重:指标的信息熵越小,表明其变异程度越大,在综合评价中所提供的信息量也就愈多,相应的权重也愈高;反之则权重更低^[39-40]。熵权法根据实际数据计算,确保了计算结果的客观性和决策结果的高可信度,广泛运用于解决多目标决策问题^[41]。

3 结果与分析

3.1 信效度检验

对于2种DAC技术,确定了21个影响因素。为了确保这些因素具有可比性,所有因素都采用李克特十级量表(0~9)评价其重要性。然而,各因素的概念和考量维度存在差异。计算Cronbach's α 系数以检验问卷的信效度^[42]。由于技术特性存在差异,分别计算高温吸收技术和低温吸附技术的Cronbach's α 系数。高温吸收技术量表的Cronbach's α 系数为0.721,低温吸附技术量表的Cronbach's α 系数为0.761。当Cronbach's α 系数大于0.6时,认为问卷的信效度可接受^[43]。

3.2 封存与运输对DAC选址的重要程度分析

从大气中捕集的CO₂可以永久封存,也可以直接或间接利用。尽管CO₂利用可以带来显著的成本效益,但大多数大规模CO₂利用的方法会导致CO₂再释放^[44]。因此,为实现气候目标,应优先考虑封存从大气中捕集的CO₂^[9]。

如图1所示,各封存与运输技术对高温吸收技术和低温吸附技术的影响程度与标准差表现相似。具体而言,5项指标的重要程度排序依次为咸水地层封存(在考虑高温吸收技术时,专家对某二级指标的综合意见*l*₁=6.26,在考虑低温吸附技术时,专家对某二级指标的综合意见*l*₂=6.22)、石油及天然气储层封存(*l*₁=5.48, *l*₂=5.35)、镁铁质和超镁铁质碳矿化岩(*l*₁=5.09, *l*₂=4.96)、各种碱性废料(*l*₁=4.22, *l*₂=3.91)、运输(*l*₁=3.78, *l*₂=3.57)。5项指标的标准差接近,分布于2.19~2.78,分别为咸水地层封存(在考虑高温吸收技术时,专家对某二级指标的综合意见的统一程度SD₁=2.43,在考虑低温吸附技术时,专家对某二级指标的综合意见的统一程度SD₂=2.28)、石油及天然气储层封存(SD₁=2.37, SD₂=2.19)、镁铁质和超镁铁质碳矿化岩(SD₁=2.39, SD₂=2.29)、各种碱性废料(SD₁=2.68, SD₂=2.35)、运输(SD₁=2.78, SD₂=2.73)。

运输与封存中5项指标的得分均高于0分,表明专家认可封存与运输对DAC选址的必要性。专家认为咸水地层封存是对DAC选址最重要的封存技术,这是因为它具备地理分布广泛、封存潜力巨大以及技术成熟度高等优势^[26,45-46];尽管以硅酸盐矿化来封存CO₂的方法具备极大的潜力且在近期内可行^[47],但高成本、材料毒性和可扩展性影响了其重要程度^[48];油气储层封存因其经济激励和已知的地质结构而受到重视^[49],但有限的封存容量影响了其

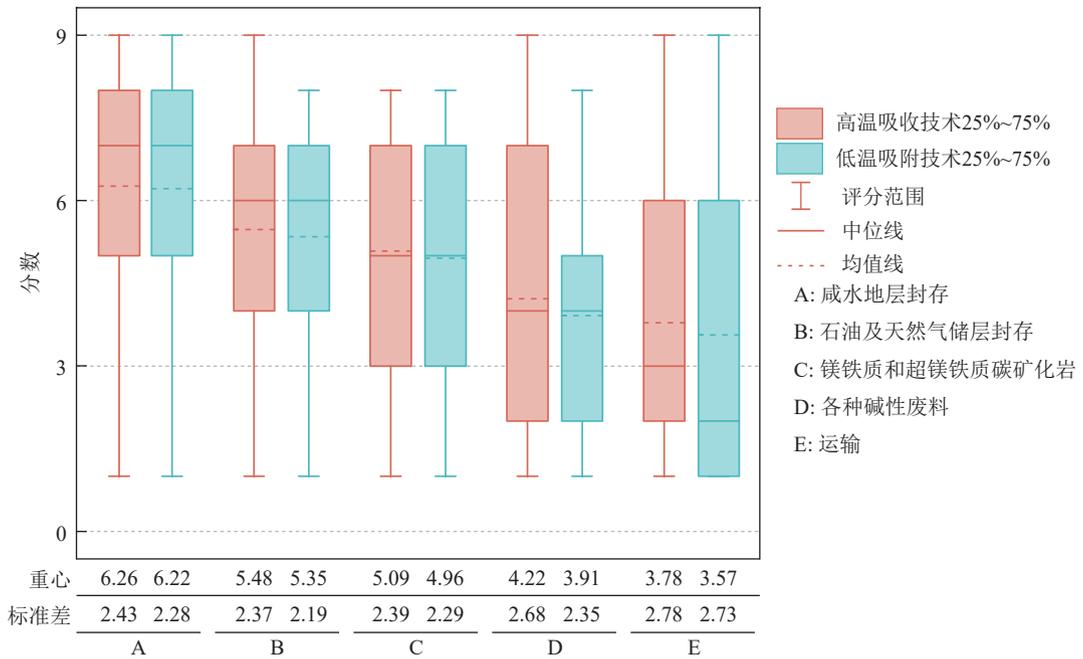


图1 封存与运输专家评分结果

Fig. 1 Expert scoring results on CO₂ storage and transportation

优先级；最后，各种碱性废料被专家视为较不重要的选择，尽管其具备就地利用 CO₂ 和处理工业固废等优势^[31,50]，但规模化应用有限导致专家对其缺乏深入了解^[51]。5项指标的标准差离散程度不高，说明专家对封存与运输在 DAC 选址决策中的影响程度总体上看一致。其中运输的标准差最大，反映出专家对运输重要性的评估存在分歧。部分专家认为，相对于 CCUS 而言，DAC 选址更灵活，在选址时不需重点考虑 CO₂ 运输，比如优先选择靠近封存地直接进行原位封存，可以大幅降低运输需求。部分专家则指出，在实际部署中难以实现就地封存时，仍需考虑单独建设或与 CCUS 技术共享运输管道等运输方式。各种碱性废料的标准差排在第2位，这可能是由于专家对尚不成熟的碱性废料封存 CO₂ 的认知和经验差异较大。咸水地层封存、石油及天然气储层封存以及镁铁质和超镁铁质碳矿化岩封存 CO₂ 标准差较小，这可能是因为这3种技术已被广泛研究，并在 CCUS 发展过程中得到了大规模应用和示范，专家对其了解更加深入和广泛。

3.3 能源供应对 DAC 选址的重要程度分析

从空气中捕集 CO₂ 需要消耗电能和热能^[13]，其具体的能耗需求受所采用技术的显著影响。低温吸附技术的能源需求总量通常高于高温吸收技术，而高温吸收技术则需要更高温度的热能。

如图2所示，不同能源在高温吸收技术和低温吸附技术中表现有所不同。具体而言，对于高温吸收技术，各指标的重要程度排序依次为：太阳能

($I_1=6.33$)，地热 ($I_1=6.26$)，风能 ($I_1=5.92$)，化石能源耦合 CCS ($I_1=5.71$)，水电 ($I_1=5.61$)，生物质能 ($I_1=5.25$)，废热 ($I_1=5.22$) 和核能 ($I_1=5.04$)。对于低温吸附技术，各指标的重要程度排序依次为：太阳能 ($I_2=6.17$)、风能 ($I_2=6.08$)、废热 ($I_2=5.91$)、地热 ($I_2=5.57$)、水电 ($I_2=4.87$)、化石能源耦合 CCS ($I_2=4.83$)、核能 ($I_2=4.39$)、生物质能 ($I_2=4.25$)。8项指标的标准差分布于 2.04~2.97，分别为太阳能 ($SD_1=2.16$, $SD_2=2.33$)、风能 ($SD_1=2.21$, $SD_2=2.04$)、水电 ($SD_1=2.19$, $SD_2=2.14$)、地热 ($SD_1=2.16$, $SD_2=2.35$)、生物质 ($SD_1=2.86$, $SD_2=2.77$)、化石能源耦合 CCS ($SD_1=2.97$, $SD_2=2.53$)、核能 ($SD_1=2.62$, $SD_2=2.43$) 与废热 ($SD_1=2.92$, $SD_2=2.43$)。

对2种技术而言，太阳能和风电被视为关键能源，因为这2种能源在过去成本显著降低，装机容量大幅增加，并在未来相比其他能源具备更大的发电潜力^[52]。专家认为可再生能源在高温吸收技术中的重要程度高于低温吸附技术。这是因为在当前技术水平下多种可再生能源能够产生低温热量 (<150℃) 供低温吸附技术使用，但无法满足高温吸收技术对更高温度的需求^[53]，问卷结果与事实相悖可能是因为部分专家不了解可再生能源供热的局限性，仅从温度需求高低进行判断。相比低温吸收技术，化石能源耦合 CCS 在高温吸收技术中更为重要，因为它能为高温 DAC 提供所需的高温热能。目前天然气耦合 CCS 已在试点项目中实施，并有望在短期内

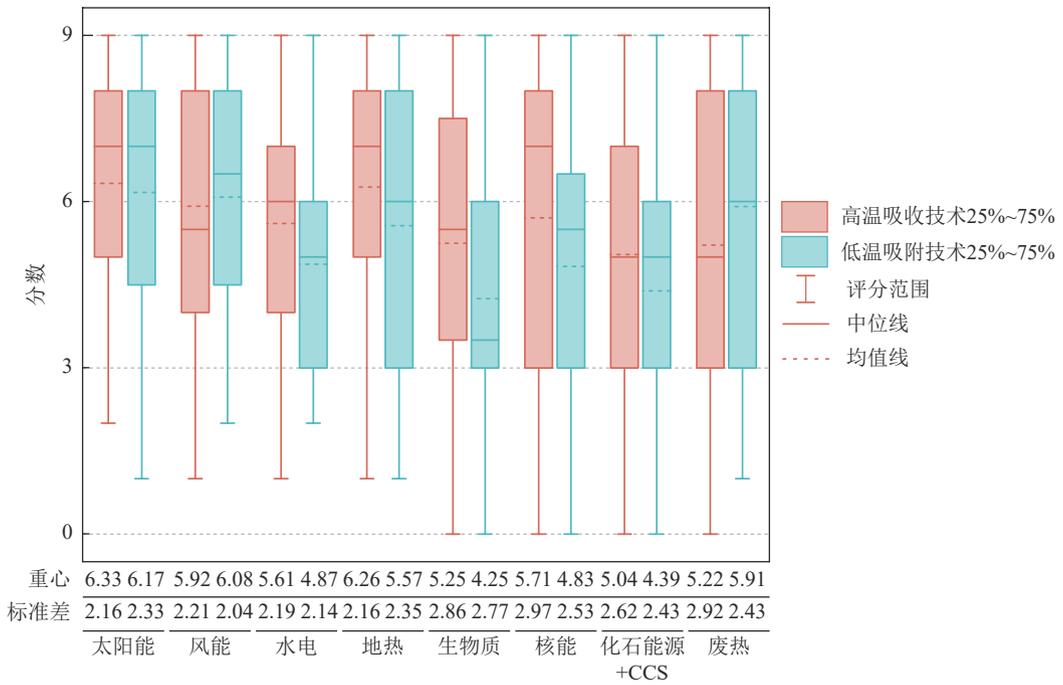


图2 能源供应专家评分结果

Fig. 2 Expert scoring results on energy supply

为DAC部署作出贡献^[9]。8项指标的标准差接近,其中化石能源耦合CCS、废热、生物质、核能标准差较大,得分差距达0~9分,这是因为这些能源都有其特定的优势和面临的挑战,导致专家对它们的影响程度意见不一。例如,尽管化石能源耦合CCS能提供电力和高温热能,但面临长期能源转型趋势和化石能源使用政策的限制^[54-56];核能可以提供大量的连续和稳定的高温热能及电能^[57],但涉及高风险性、地缘政治复杂性和透明度问题^[58-59]。此外,高温热能的工艺复杂性与可再生能源供热的局限性使高温吸收技术的标准差普遍高于低温吸附技术。

3.4 环境特征对DAC选址的重要程度分析

DAC从大气中直接捕集CO₂的技术特性决定了环境特征对其捕集性能和捕集成本有显著影响^[17-18,60],选择合适的环境特征有利于提高DAC的运行效率和经济性。

如图3所示,在环境特征评估中不同指标的重要程度排序存在差异。对于高温吸收技术,各指标分数由高到低依次为温度($l_1=7.17$)、土地利用面积($l_1=6.54$)、土地利用类型($l_1=6.42$)、水资源可用性($l_1=6.38$)、相对湿度($l_1=6.21$)、空气流速($l_1=5.71$)、空气质量($l_1=4.96$)。对于低温吸附技术,各指标分数由高到低依次为相对湿度($l_2=6.54$)、土地利用面积($l_2=6.25$)、空气流速($l_2=6.21$)、温度($l_2=6.04$)、土地利用类型($l_2=5.96$)、水资源可用性($l_2=5.58$)、空气质量($l_2=5.46$)。7项指标的标准差分布于1.61~2.56,

分别为温度($SD_1=2.08$, $SD_2=2.20$)、相对湿度($SD_1=2.02$, $SD_2=1.79$)、空气流速($SD_1=1.83$, $SD_2=1.89$)、空气质量($SD_1=2.58$, $SD_2=2.30$)、水资源可用性($SD_1=1.61$, $SD_2=1.86$)、土地利用面积($SD_1=2.04$, $SD_2=2.09$)、土地利用类型($SD_1=2.43$, $SD_2=2.56$)。

7项指标的重要程度得分均高于0分,表明专家认为这些因素都会影响DAC选址。温度在2种技术中得分都较高,表明专家认为无论高温还是低温DAC捕集性能对温度影响均较为敏感^[60-61]。相对湿度在低温吸附技术中得分最高,表明专家认为相对湿度对该类技术性能影响尤为关键,例如,变湿吸附技术能够利用水蒸发时的自由能作为CO₂再生的能量来源^[62]。相关研究发现,高温吸收技术通常适宜部署在中低纬湿热环境,低温吸附技术则在中高纬寒冷环境下性能更佳,相对来说,两者捕集性能均对温度更加敏感;对于低温吸附技术,由于CO₂和H₂O可以实现共同吸附解吸,相对湿度对捕集性能影响机制较为复杂,因此,研究湿度对其选址不确定影响更为重要^[17,60-61]。此外,水资源可用性和土地利用在高温吸收技术中得分较高,这与高温吸收技术的更高的耗水量与更广的占地面积一致^[13]。空气质量是对DAC选址相对不重要的环境特征,该指标的时空变化和区域差异导致其紧迫性或决定性不如其他因素。相对湿度、空气流速、水资源可用性的标准差较低,表明专家对这些因素的影响程度判断呈现出较高的一致性。相比之下,空气质量

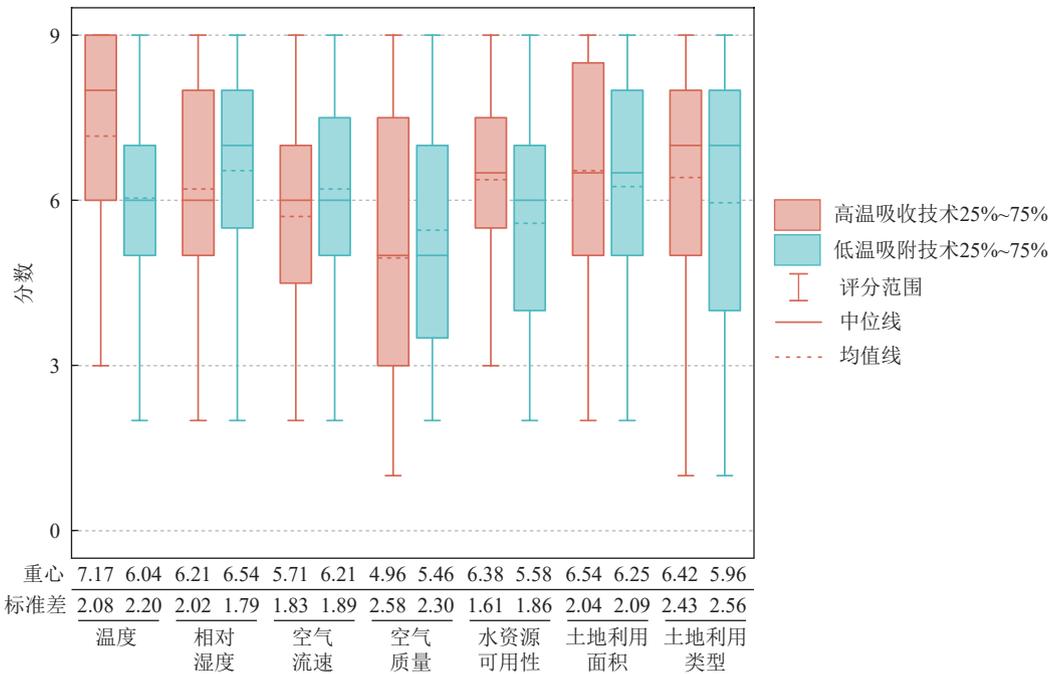


图3 环境特征专家评分结果

Fig. 3 Expert scoring results on environmental characteristics

和土地利用类型的标准差较大，可能是由于关于这2种因素对DAC影响的研究相对缺乏，导致专家根据个人经验和研究背景给出不同的评估。

3.5 社会影响对DAC选址的重要程度分析

公众的态度和风险认知对新技术的发展至关重要（如基因克隆、早期CCUS）^[63-64]。作为一种新兴的CDR技术，DAC的成功部署不仅依赖于技术进步，还取决于包括公众看法在内的社会因素^[11]。了解公众态度可以使DAC部署更合乎道德，并促进技术的发展^[65]。

专家认为，与高温吸收技术（ $l_1=5.58$ ）相比公众接受度对低温吸附技术（ $l_2=5.63$ ）更重要（图4），这可能是因为低温吸附技术的技术成熟度比高温吸收技术低，公众对其可靠性和安全性存在疑虑，而高温吸收技术已经过更多的实践和验证，公众可能更容易接受。此外，低温吸附技术的占地面积更广可能会引起土地使用冲突，进一步影响公众接受度。

社会影响的标准差较大（ $SD_1=2.28$ ， $SD_2=2.22$ ），反映出专家对该因素的影响程度判断存在分歧，这与现有研究结果相吻合。COX等^[35]收集了英国和美国的研讨会参与者对BECCS、DAC和增强岩石风化的看法的信息。结果表明，公众可能会反对DAC项目，原因包括公众参与不足、理解有限或认为其部署时间不明确。KERNER C等^[42]调查了172名专家对BECCS和DACCS的看法。结果显示专家对这2种技术的研究和部署给予了相当高的支持。

3.6 综合不同指标对DAC选址的重要程度分析

根据熵权法，发现影响2种DAC技术选址的一级指标的重要程度存在一致性：对高温吸收技术而言，各一级指标分数由高到低依次为环境特征（ $\omega_{1,3}=6.16$ ）>能源供应（ $\omega_{1,2}=5.62$ ）>社会影响（ $\omega_{1,4}=5.58$ ）>封存与运输（ $\omega_{1,1}=4.92$ ）；对低温吸附技术而言，各一级指标分数由高到低依次为环境特征（ $\omega_{2,3}=5.99$ ）>社会影响（ $\omega_{2,4}=5.63$ ）>能源供应（ $\omega_{2,2}=5.23$ ）>封存与运输（ $\omega_{2,1}=4.75$ ）。指标分数 $\omega(a,b)$ 中， $a=1, 2$ ，当 a 为1时表示高温吸收技术，当 a 为2时表示低温吸附技术； $b=1, 2, 3, 4$ ，当 b 为1时表示一级指标“封存与运输”，当 b 为2时表示一级指标“能源供应”，当 b 为3时表示一级指标“环境特征”，当 b 为4时表示一级指标“社会影响”。如 $\omega(1,1)$ 表示在考虑高温吸收技术时，专家对一级指标“封存与运输”的综合意见。

1) 环境特征：专家普遍认为环境特征对DAC捕集效率和捕集成本有显著影响，在DAC选址过程中应被重点考虑。此外，环境特征还决定技术对生态系统的影响，这是确保DAC可持续部署的关键因素。专家对高温吸收技术的理解更符合文献中的描述，可能是因为专家对高温吸收技术更加熟悉。

2) 能源供应：DAC是能源密集型技术，因此对能源的需求高，特别是稳定且可再生的能源供应。能源供应的可靠性直接影响到DAC项目的运营成本和减排效率，是确保项目经济可行性和环境

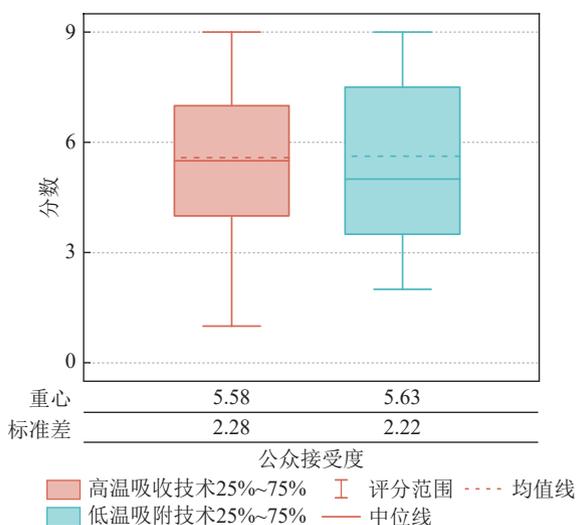


图4 社会影响专家评分结果

Fig. 4 Expert scoring results on social impacts

效益的重要因素。与低温吸附技术相比,高温吸收技术选址时需更优先考虑能源供应,这是因为在当前技术水平下可供高温吸收技术选择的能源更少。

3) 社会影响: 各类 DAC 技术部署时都应重视公众接受度, 以往的经验显示 DAC 技术可能引起公众的负面反应^[54]。适当的公众接受度有助于确保项目顺利进行和长期可持续性, 体现公正的社会责任。

4) 封存与运输: 优化封存与运输有助于进一步降低整体成本和提升项目效率, 但由于 DAC 选址方案相对更加灵活, 且可共享 CCUS 已有基础设施, 这一环节在 DAC 选址时的优先级较低。

4 结论及展望

研究基于文献分析全面识别了影响 DAC 选址的关键指标, 构建了一套 DAC 项目选址指标体系, 并通过问卷调查分析评估不同指标重要程度。结果表明: ① DAC 选址是一个多因素决策过程, 涉及 CO₂ 封存与运输、能源供应、环境特征和社会影响 4 个一级指标, 并覆盖 21 个二级指标。② 不同因素对不同技术类型的影响程度存在显著差异。在高温吸收技术选址中, 一级指标的重要程度排序为: 环境特征>能源供应>社会影响>封存与运输; 在低温吸附技术选址中, 一级指标的重要程度排序为: 环境特征>社会影响>能源供应>封存与运输。未来 DAC 选址应优先考虑环境特征。特别地, 温度对高温吸收技术选址至关重要, 而土地利用和相对湿度对低温吸附技术最为关键, 这与不同 DAC 性能所对应吸收/吸附原理较为一致。③ 目前, 诸多因素如何具体影响 DAC 性能的研究尚不充分, 一定程度影响了专家对选址因素重要性的判断。

调查问卷结果为 DAC 性能研究和优化选址提供了方向, 需特别关注专家意见存在显著分歧的指标, 这反映了实际外界条件对 DAC 性能仍存在较大不确定性影响。未来在推进 DAC 技术的研发和部署时, 应进一步探索如何有效利用可再生能源, 尤其是满足高温吸收技术的热需求; 同时, 应更多地考虑环境与社会双重因素, 确保技术既能适应特定环境条件, 又能获得社会的广泛认同; 增强公众对 DAC 技术的理解和接受度是提高其实际部署成功率的关键, 应通过教育和宣传增加公众对此项技术的充分了解和信任。

本研究构建的指标体系应随着 DAC 技术的不断发展成熟而进一步完善。目前, 暂未考虑 CO₂ 利用对 DAC 选址影响, 主要原因是 CO₂ 利用存在不同程度泄漏风险, 难以实现 DAC 技术永久去除 CO₂ 的高效负排放目标。此外, 现有研究缺少风速、海拔、CO₂ 体积分数对 DAC 性能影响的详细分析, 无法为指标选取提供科学支撑。在未来大规模部署 DAC 进程中, 除了本研究所关注的关键指标之外, 需进一步探讨如何平衡 CO₂ 利用的经济效益与泄漏风险, 以及考虑更多环境条件等对 DAC 选址的实际影响。

参考文献 (References):

- [1] IPCC. Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change [R]. Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022.
- [2] 彭雪婷, 吕吴东, 张贤. IPCC AR6 报告解读: 全球碳捕集利用与封存(CCUS)技术发展评估 [J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(5): 580-590.
PENG Xueting, LÜ Haodong, ZHANG Xian. Interpretation of IPCC AR6 report on carbon capture, utilization and storage(CCUS)technology development[J]. Climate Change Research, 2022, 18(5): 580-590.
- [3] IEA. Net Zero by 2050: A Roadmap for the global energy sector [R]. Paris: International Energy Agency, 2021.
- [4] FAN J L, FU J Y, ZHANG X, et al. Co-firing plants with retrofitted carbon capture and storage for power-sector emissions mitigation[J]. Nature Climate Change, 2023, 13: 807-815.
- [5] 张贤, 李阳, 马乔, 等. 我国碳捕集利用与封存技术发展研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 70-80.
ZHANG Xian, LI Yang, MA Qiao, et al. development of carbon capture, utilization and storage technology in China[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 70-80.
- [6] 张贤, 李凯, 马乔, 等. 碳中和目标下 CCUS 技术发展定位与展望 [J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(9): 29-33.
ZHANG Xian, LI Kai, MA Qiao, et al. Orientation and prospect of CCUS development under carbon neutrality target[J]. China Population, Resources and Environment, 2021, 31(9): 29-33.
- [7] Unep. The Emissions Gap Report 2014 [R]. Kenya: United Nations Environment Programme, 2014.

- [8] FAN J L, LI Z Z, HUANG X, et al. A net-zero emissions strategy for China's power sector using carbon-capture utilization and storage[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 5972.
- [9] Chemical Weekly Group. Direct air capture: A key technology for net zero[J]. *Chemical Weekly*, 2022, 67(39): 170–171.
- [10] MATTER J M, STUTE M, SNÆBJÖRNSDÓTTIR S Ó, et al. Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions[J]. *Science*, 2016, 352(6291): 1312–1314.
- [11] DOWLING A, RAMAKRISHNAN V. Greenhouse gas removal [R]. London: The Royal Society and Royal Academy Of Engineering, 2018.
- [12] 张贤, 杨晓亮, 鲁玺, 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2023) [R]. 北京: 中国 21 世纪议程管理中心, 全球碳捕集与封存研究院, 2023.
- [13] KÜNG L, AESCHLIMANN S, CHARALAMBOUS C, et al. A roadmap for achieving scalable, safe, and low-cost direct air carbon capture and storage[J]. *Energy & Environmental Science*, 2023, 16(10): 4280–4304.
- [14] LEONZIO G, FENNELL P S, SHAH N. Analysis of technologies for carbon dioxide capture from the air[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(16): 8321.
- [15] SANZ-PÉREZ E S, MURDOCK C R, DIDAS S A, et al. Direct capture of CO₂ from ambient air[J]. *Chemical Reviews*, 2016, 116(19): 11840–11876.
- [16] TERLOUW T, TREYER K, BAUER C, et al. Life cycle assessment of direct air carbon capture and storage with low-carbon energy sources[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(16): 11397–11411.
- [17] JAN F Wiegner, ALEXA Grimm, LUKAS Weimann, et al. Optimal design and operation of solid sorbent direct air capture processes at varying ambient conditions[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2022, 61(34): 12649–12667.
- [18] AN K, FAROOQUI A, MCCOY S T. The impact of climate on solvent-based direct air capture systems[J]. *Applied Energy*, 2022, 325: 119895.
- [19] LISA Alexander, SIMON Allen, NATHANIEL Bindoff, et al. Climate change 2013: the physical science basis-summary for policy makers [R]. Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013.
- [20] IEA. Global Assessment of Direct Air Capture Costs [R]. Paris: International Energy Agency, 2021.
- [21] ABRAMSON, MCFARLANE. An atlas of direct air capture: Opportunities for negative emissions in the United States [R]: American: Carbon Solutions LLC & Great Plains Institute, 2023.
- [22] SATTERFIELD T, NAWAZ S, ST-LAURENT G P. Exploring public acceptability of direct air carbon capture with storage: climate urgency, moral hazards and perceptions of the 'whole versus the parts'[J]. *Climatic Change*, 2023, 176(2): 14.
- [23] GRAZIA Leonzio, PAUL S Fennell, NILAY Shah. Modelling and Analysis of Direct Air Capture Systems in Different Locations[J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2022, 96: 1–6.
- [24] ZHANG Xian, LI Kai, WEI Ning, et al. Advances, challenges, and perspectives for CCUS source-sink matching models under carbon neutrality target[J]. *Carbon Neutrality*, 2022, 1(1): 12.
- [25] LI K, SHEN S, FAN J L, et al. The role of carbon capture, utilization and storage in realizing China's carbon neutrality: a source-sink matching analysis for existing coal-fired power plants[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 178: 106070.
- [26] FAN J L, XU M, WEI S J, et al. Carbon reduction potential of China's coal-fired power plants based on a CCUS source-sink matching model[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 168: 105320.
- [27] XIANG X J, LI K, LI X Q, et al. Investment feasibilities of CCUS technology retrofitting China's coal chemical enterprises with different CO₂ geological sequestration and utilization approaches[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2023, 128: 103960.
- [28] FAN J L, LI Z Z, DING Z X, et al. Investment decisions on carbon capture utilization and storage retrofit of Chinese coal-fired power plants based on real option and source-sink matching models[J]. *Energy Economics*, 2023, 126: 106972.
- [29] MERTENS J, BREYER C, ARNING K, et al. Carbon capture and utilization: More than hiding CO₂ for some time[J]. *Joule*, 2023, 7(3): 442–449.
- [30] ROSA L, BECATTINI V, GABRIELLI P, et al. Carbon dioxide mineralization in recycled concrete aggregates can contribute immediately to carbon-neutrality[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 184: 106436.
- [31] BOBICKI E R, LIU Q X, XU Z H, et al. Carbon capture and storage using alkaline industrial wastes[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2012, 38(2): 302–320.
- [32] HABIB M, ESQUINO A M, HUGHES R, et al. Flexible carbon capture using MOF fixed bed adsorbers at an NGCC plant[J]. *Carbon Capture Science & Technology*, 2024, 10: 100170.
- [33] MCQUEEN N, PSARRAS P, PILORGÉ H, et al. Cost analysis of direct air capture and sequestration coupled to low-carbon thermal energy in the United States[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(12): 7542–7551.
- [34] OKONKWO E C, ALNOUSS A, SHAHBAZ M, et al. Developing integrated direct air capture and bioenergy with carbon capture and storage systems: progress towards 2 °C and 1.5 °C climate goals[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 296: 117687.
- [35] COX E, SPENCE E, PIDGEON N. Public perceptions of carbon dioxide removal in the United States and the United Kingdom[J]. *Nature Climate Change*, 2020, 10: 744–749.
- [36] BISOTTI F, HOFF K A, MATHISEN A, et al. Direct air capture (DAC) deployment: national context cannot be neglected. A case study applied to Norway[J]. *Chemical Engineering Science*, 2023, 282: 119313.
- [37] 风笑天. 现代社会调查方法 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2022.
- [38] 张玲玲, 刘作仪, 李若筠, 等. 我国管理科学与工程学科的发展现状与趋势——基于专家调查问卷的分析 [J]. *公共管理学报*, 2006, 3(1): 99–106, 112.
- ZHANG Lingling, LIU Zuoyi, LI Ruoyun, et al. The state-of-arts and trend of the development of China's management science and engineering-an analysis based on expert questionnaire[J]. *Journal*

- of Public Management, 2006, 3(1): 99–106, 112.
- [39] 范立民, 马雄德, 蒋辉, 等. 西部生态脆弱矿区矿井突水溃沙危险性分区 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(3): 531–536.
FAN Limin, MA Xiongde, JIANG Hui, et al. Risk evaluation on water and sand inrush in ecologically fragile coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 531–536.
- [40] 张青山, 乔芳丽, 马军, 等. 制造业绿色产品评价研究 [J]. 沈阳工业大学学报(社会科学版), 2008(1): 64–70, 82.
ZHANG Qingshan, QIAO Fangli, MA Jun, et al. Study on evaluation of green products in manufacturing industry[J]. Journal of Shenyang University of Technology(Social Science Edition), 2008(1): 64–70, 82.
- [41] 郭金维, 蒲绪强, 高祥, 等. 一种改进的多目标决策指标权重计算方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2014, 41(6): 118–125.
GUO Jinwei, PU Xuqiang, GAO Xiang, et al. Improved method on weights determination of indexes in multi-objective decision[J]. Journal of Xidian University, 2014, 41(6): 118–125.
- [42] KERNER C, THALLER A, BRUDERMANN T. Carbon dioxide removal to combat climate change? An expert survey on perception and support[J]. Environmental Research Communications, 2023, 5(4): 041003.
- [43] STREINER D L. Starting at the beginning: an introduction to coefficient alpha and internal consistency[J]. Journal of personality assessment, 2003, 80(1): 99–103.
- [44] DEUTZ S, BARDOW A. Life-cycle assessment of an industrial direct air capture process based on temperature–vacuum swing adsorption[J]. Nature Energy, 2021, 6(2): 203–213.
- [45] BENSON S M, ORR F M Jr. Carbon dioxide capture and storage[J]. MRS Bulletin, 2008, 33(4): 303–305.
- [46] Global Ccs Institute. Global storage portfolio: A global assessment of the geological CO₂ storage resource potential [R]. 2016.
- [47] BEERLING D J, KANTZAS E P, LOMAS M R, et al. Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands[J]. Nature, 2020, 583(7815): 242–248.
- [48] STREFLER J, AMANN T, BAUER N, et al. Potential and costs of carbon dioxide removal by enhanced weathering of rocks[J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(3): 034010.
- [49] CONSOLI C P, WILDGUST N. Current status of global storage resources[J]. Energy Procedia, 2017, 114: 4623–4628.
- [50] OLAJIRE A A . A review of mineral carbonation technology in sequestration of CO₂ [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2013, 109: 364–392.
- [51] 王秋华, 吴嘉帅, 张卫凤. 碱性工业固废矿化封存二氧化碳研究进展 [J]. 化工进展, 2023, 42(3): 1572–1582.
WANG Qiuhua, WU Jiashuai, ZHANG Weifeng, et al. Research progress of alkaline industrial solid wastes mineralization for carbon dioxide sequestration[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(3): 1572–1582.
- [52] IRENA. Renewable power generation costs in 2022, International Renewable Energy Agency [R], 2022.
- [53] PEDRO Horta, FHG Ise. Process heat collectors: State of the art and available medium temperature collectors [J]. International Energy Agency Task 49, 2015, 1.
- [54] LI J B, ZHANG C, WANG Z H, et al. Salinity gradient energy harvested from thermal desalination for power production by reverse electrodialysis[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 252: 115043.
- [55] 李洪言, 张景谦, 陈健斌, 等. 2021年全球能源转型面临挑战——基于《bp世界能源统计年鉴(2022)》[J]. 天然气与石油, 2022, 40(6): 129–138.
LI Hongyan, ZHANG Jingqian, CHEN Jianbin, et al. Global energy transition faces challenges in 2021—based on the bp statistical review of world energy(2022)[J]. Natural Gas and Oil, 2022, 40(6): 129–138.
- [56] FAN J L, HUANG X, SHI J, et al. Complementary potential of wind-solar-hydro power in Chinese Provinces: based on a high temporal resolution multi-objective optimization model[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 184: 113566.
- [57] 荣健, 刘展. 先进核能技术与展望 [J]. 原子能科学技术, 2020, 54(9): 1638–1643.
RONG Jian, LIU Zhan. Development and prospect of advanced nuclear energy technology[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, 54(9): 1638–1643.
- [58] 胡帮达. 安全和发展之间: 核能法律规制的美国经验及其启示 [J]. 中外法学, 2018, 30(1): 208–230.
HU Bangda. Between safety and development U. S. experience of legal regulation on nuclear energy and its implications[J]. Peking University Law Journal, 2018, 30(1): 208–230.
- [59] 吴爱萍, 张晓平, 宋现锋, 等. 2000—2019年全球核电设备贸易网络结构及其影响因素 [J]. 经济地理, 2022, 42(7): 126–134, 194.
WU Aiping, ZHANG Xiaoping, SONG Xianfeng, et al. Network structure of global nuclear power equipment trade and its influencing factors from 2000 to 2019[J]. Economic Geography, 2022, 42(7): 126–134, 194.
- [60] WILSON S M W. The potential of direct air capture using adsorbents in cold climates[J]. iScience, 2022, 25(12): 105564.
- [61] PINSENT B R W, PEARSON L, ROUGHTON F J W. The kinetics of combination of carbon dioxide with hydroxide ions[J]. Transactions of the Faraday Society, 1956, 52: 1512–1520.
- [62] 王涛, 董昊, 侯成龙, 等. 直接空气捕集 CO₂ 吸附剂综述 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(3): 462–475.
WANG Tao, DONG Hao, HOU Chenglong, et al. Review of CO₂ direct air capture adsorbents[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2022, 56(3): 462–475.
- [63] PHIL. Macnaghten, ROBIN Grove-White, BRIAN Wynne. Wising up: The public and new technologies [R]. UK: Centre for the Study of Environmental Change, 2000.
- [64] TERWEL B W, TER MORS E, DAAMEN D D L. It's not only about safety: beliefs and attitudes of 811 local residents regarding a CCS project in barendrecht[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012, 9: 41–51.
- [65] FIORINO D J. Citizen participation and environmental risk: a survey of institutional mechanisms[J]. Science, Technology, & Human Values, 1990, 15(2): 226–243.