碳捕集利用与封存的管网布局最优成本路径
——以准噶尔盆地为例

鞠小玉[1,2] 张盼盼[1] 刘辅民[1] 赵晓东[3]

1. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区工商管理学院, 新疆 克拉玛依 834000;
2. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区碳中和与能源经济咨询研究平台, 新疆 克拉玛依 834000;
3. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区石油学院, 新疆 克拉玛依 834000

摘 要:为实现“双碳”目标,亟需规模化部署碳捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)技术以解决管网布局的高成本问题。以准噶尔盆地为例,系统梳理了其碳源分布规模、碳汇封存潜力,构建全生命周期成本最小化模型,在充分考虑捕集—运输—封存成本的基础上,融入区域地理条件、土地利用类型、人口密度等因素,应用节约里程算法与地理信息系统的最低成本路径优化法,结合优化求解软件和 ArcGIS 平台,得到了准噶尔盆地区域的 CCUS 管网布局最优成本路径。结果表明,准噶尔盆地具备规模化部署 CCUS 的优势,源汇空间匹配性、地质封存潜力及优化后的管网布局为西北地区低碳转型提供了可行路径,应积极推动准噶尔盆地的产业集群化布局、完善碳排放核算体系、设立专项财政支持机制及强化跨区域协同合作。研究成果可为准噶尔区域 CCUS 工程落地实施、高碳产业低碳升级提供科学依据。

关键词:源汇匹配;管网优化;CCUS;准噶尔盆地;成本路径分析

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2026.03.017

Optimal cost path for pipeline network layout for Carbon Capture, Utilization and Storage
—A case study of the Junggar Basin

Ju Xiaoyu[1,2], Zhang Panpan[1], Liu Fumin[1], Zhao Xiaodong[3]

1. College of Business Administration, China University of Petroleum(Beijing) at Karamay, Karamay, Xinjiang, 834000, China;
2. Carbon Neutrality and Energy Economics Advisory and Research Platform, China University of Petroleum(Beijing) at Karamay, Karamay, Xinjiang, 834000, China;
3. College of Petroleum, China University of Petroleum(Beijing) at Karamay, Karamay, Xinjiang, 834000, China

Abstract: To achieve the dual-carbon goals, large-scale deployment of Carbon Capture, Utilization and Storage(CCUS) technology is urgently needed to address the high-cost challenges of pipeline network layout. Taking the Junggar Basin as a case study, this paper systematically reviews the distribution and

收稿日期:2025-11-16

基金项目:新疆维吾尔自治区“一事一议”(CCUS)引进战略人才项目(XQZX20240054);新疆维吾尔自治区重点研发任务专项项目“新疆二氧化碳咸水层封存体地质特征及封存量评价”(2024B01012-1);中国石油大学(北京)克拉玛依校区引进人才项目“双碳约束下新疆油气产业集群高质量发展路径研究”(XQZX20240014)

作者简介:鞠小玉(1986-),女,副教授,博士,主要从事能源会计与低碳管理专业方向的研究工作。E-mail:juxiaoyu@cupk.edu.cn

scale of carbon sources and the geological sequestration potential of carbon sinks in the region. A full life-cycle cost minimization model is developed, incorporating the costs of carbon capture, transportation, and sequestration, while integrating regional geographical conditions, land use types, and population density as influencing factors. By applying the savings algorithm and the least-cost path optimization method based on Geographic Information Systems (GIS), combined with optimization software and the ArcGIS platform, the optimal cost path for CCUS pipeline network layout in the Junggar Basin is determined. The results indicate that the Junggar Basin has distinct advantages for large-scale CCUS deployment. The favorable spatial source-sink matching, substantial geological sequestration potential, and optimized pipeline network layout provide a viable pathway for the low-carbon transition of Northwest China. It is therefore recommended to actively promote industrial clustering of CCUS in the Junggar Basin, improve the carbon emission accounting system, establish dedicated fiscal support mechanisms, and strengthen cross-regional coordination. The findings provide a scientific basis for the implementation of regional CCUS projects and the low-carbon upgrading of high-carbon industries.

Keywords: Source-sink matching; Pipeline network optimization; CCUS; Junggar Basin; Cost path analysis

0　前言

碳捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)技术作为实现“双碳”目标下不可或缺的技术组成部分,在当前不可能完全放弃化石能源的背景下,是实现温控的关键技术手段和托底技术保障[1]。中国当前的二氧化碳排放量约 100×10^8 t /a,其中工业排放约占总排放量的 68% ,主要集中在建材、钢铁、化工和有色金属领域,当前在技术上实现能源供应和消费端的零碳排放难度较大,因此 CCUS 技术在碳密集行业可以发挥巨大的“固碳”作用。从成本效益角度分析,中国、俄罗斯、美国、欧盟等国家或组织在大规模实施 CCUS 技术方面存在巨大的碳储存潜力[2]。二氧化碳的运输则是将 CCUS 各环节连接起来的关键,其中管道运输是实现二氧化碳长距离、低成本、大批量运输的理想选择。受管道运输基础设施建设前期资金投入大的影响,中国当前主要采用罐车运输二氧化碳,管道运输的布设低于国际水平。

新疆在二氧化碳捕集、封存(Carbon Capture and Storage, CCS)以及运输管道布局方面具有优势。准噶尔盆地在综合储存潜力和运输距离方面是 CCUS 大规模部署的优先区域[3]。据《中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2023)》[1]显示,当前中国石油天然气集团有限公司携手国际油气行业倡议组织(Oil and Gas Climate Initiative, OGCI)正在准噶尔盆地积极推进 CCUS 产业集群建设,该计划预计在 2030 年前实现千万吨的二氧化碳驱油利用和封存规模。大规模的 CCUS 技术涉及高昂的前期投入成本,具体 CCUS 技术的布设需要详细而全面的规划,以确保得到稳健且经济高效的源汇地点及运输管道。因此,本文选取准噶尔盆地进行案例研究,通过深入分析准噶尔盆地周边碳源的排放规模及捕集成本,筛选确定潜在储存地点、可储存量以及储存成本,并在考虑社会、经济、地理和地质等制约因素的前提下,选用合适的源汇匹配模型,确定更可靠和更具有成本效益的管网布局,助力在准噶尔盆地打造 CCUS 产业示范区,进一步推广 CCUS 技术的实施与广泛落地。

CCUS 技术的大规模部署及精准实施均需开展细致的源汇匹配研究,确定排放源、储存地或利用地等关键信息,进一步输出源汇路径间的管网布局。国际上许多研究机构和学者已开发了一些源汇匹配模型,并对 CCUS 的管网布局进行了相应研究。Morbee J 等人[4]开发了 JRC InfraCCS 模型,基于确定的排放源及储存地得到了欧洲区域二氧化碳管道网络的最佳布局方案。荷兰乌得勒支大学开发了 Markal-NL-UU 模型[5],集成了具有空间与路径功能的地理信息系统和基于线性选择模拟的自下而上的模型。Middleton R S 等人[6]2009 年开发了 SimCCS 模型,在考虑地形和社会影响等因素的基础上,构建连接将分支流量聚合到主干管道中,生成了一个完全集成且成本最小化的 CCS 系统,在此模型基础上,Middleton R S 等人[7]于 2020 年进一步开发了 SimCCS(2.0)模型,并向公众开源,其最新版本集成了多种新功能,如新开发的候选网络生成技术、优化模型与地理信息系统相结合以及可选择的高性能计算平台。目前中国也在进一步推进针对 CCUS 管网设计的模型研究。清华大学开发的 ChinaCCUS DSS 2.0 模型[8],本质上是一种总成本最小的混合整数线性优化,基于 Python 和 ArcGIS,利用最新的源汇匹配数据库探索与碳中和目标相称的管道布局。

在源汇匹配模型的实际应用方面，全世界专家学者在不同地区及不同行业间均进行了诸多研究。Stauffer P 等人[9]运用 SimCCS 模型对鄂尔多斯盆地 CCS 基础设施进行了优化组合。Wang Pengtao 等人[10]讨论了控制全球气温上升在 2 ℃的目标下，中国电力行业的碳捕集与储存规划，构建了源汇匹配优化模型，通过成本最小化的方法识别出 4 个适宜的电力集群作为二氧化碳集散中心。Sun Liang[11]基于改进后的 ChinaCCUS DSS 模型研究了碳税影响下的源汇匹配结果。Lin Yuancheng 等人[12]运用 SimCCS(2.0)模型为中国钢铁行业提供了高分辨率的二氧化碳捕集、运输和封存的定量评估研究，确定了比简单线性连接更贴近现实的二氧化碳最优成本路径。Gunawan T A 等人[13]基于美国路易斯安那州的工业设施探讨了工业二氧化碳捕集、运输与封存系统的设计方案和成本评估，采用 SimCCS(2.0)模型在管道成本计算方面考虑多种因素，且引入社会环境正义因素，使管道设计能避开弱势群体所在社区，以实现公平的成本分配及提升社会接受度。刘世奇等人[14]运用最小支撑树的方法建立了源汇匹配模型，并在采用改进的节约里程算法的基础上运用 ArcGIS 对最低成本路径进行优化，得到了宁夏地区 CCUS 源汇匹配的应用方案。

在以往的研究中，中国 CCUS 源汇匹配主要集中在行业范围内国家层面的整体规划，未能精准考虑 CCUS 项目布局所具备的详细源汇情况，且未能全面考虑影响管道建设的各种地理、地质等因素。因此，有必要针对性地构建全面、可靠、经济的 CCUS 项目运输网络布局，为 CCUS 项目的投资与开展提供参考。

1 碳源与碳汇特征

1.1 碳源

准噶尔盆地四周被山系环绕，西北为扎伊尔山，东北为青格里底山、克拉美丽山，南面为北天山山脉，面积约 13.5×10^4 km^2[15]。

根据分行业的统计信息，火电行业将是 CCUS 技术的应用重点，预计 2060 年中国可通过 CCUS 技术实现约 10×10^8 t /a 的二氧化碳减排量，钢铁和水泥行业同样也需要 CCUS 技术帮助实现减排，因此本文考虑的主要排放源包括发电厂、钢铁厂和水泥厂。Tang Haotian 等人[8]考虑装机容量、热效率和排放因子因素，对中国 531 座发电厂的二氧化碳排放量分别进行了估算，并开发了 CCUS SSM 数据库，本文利用该数据库获取准噶尔盆地区域周边发电厂的排放信息。Tang Ling 等人[16]使用水泥厂排放的实时监测数据构建水泥厂排放核算数据库，本文利用该数据库获取准噶尔盆地区域周边水泥厂的排放信息。Lin Yuancheng[12]等人评估了 2020 年 227 家高炉 /转炉钢厂的二氧化碳排放量并建立了数据库，本文利用此数据库获取准噶尔盆地区域周边钢铁厂的排放信息。基于以上数据，本文共筛选获得了 35 个位于准噶尔盆地的碳排放源，见表 1。由于排放源分布具有空间聚集特征，整合排放源进行集群设施建设，可缩减管道建设及运营的整体成本，进一步降低部署 CCUS 的准入门槛，使得少量排放源得以纳入 CCUS 系统，并能最大限度减少基础设施建设对周围环境的影响，在综合考虑技术经济性、数据可用性以及地理情况的基础上，对以上 35 个碳排放源按行业进行半径为 15 km 的聚类分析，聚类后共得到 24 个碳排放源数据。

表 1 准噶尔盆地周边主要碳排放源表

Tab. 1 Major sources of carbon emissions around the Junggar Basin

行业类型	碳排放源数量 /个	聚类后碳排放源数量 /个	碳排放量 /(Mt·a^{-1})	占比
火电	24	14	280.30	94.86%
钢铁	2	2	10.25	3.47%
水泥	9	8	4.95	1.67%
合计	35	24	295.50	100%

1.2 碳汇

适合二氧化碳的地质储存主要包括深层咸水层、枯竭的油气田以及深层不可开采煤层[17]。选择合适的二氧化碳储存位置对提高二氧化碳储存容量和降低泄漏风险具有重要意义。准噶尔盆地位于降水稀缺的干旱地区，根据以往研究[18]，在中国 390 个陆相沉积盆地中，准噶尔盆地的二氧化碳封存潜力排名第七，且在碳源—碳汇方面具有较好的空间匹配性。自晚古生代以来，准噶尔盆地历经多次构造运动，将准噶尔盆地的构造单元划分为中部坳陷、东部隆起、西部隆起、陆梁隆起、北天山逆冲带和乌伦古坳陷 6 个一级构造单元，以及 44 个次级构造单元[19]，准噶尔盆地构造单元分区见图 1。

图 1 准噶尔盆地构造单元分区图

Fig. 1 Zoning map of tectonic units in the Junggar Basin

根据准噶尔盆地主要碳封存地质特征，准噶尔盆地主要二氧化碳地质封存类型包括油藏、气藏、深层咸水层和煤层。在综合考虑地质安全、构造单元储存能力及社会经济环境因素的前提下，Mi Zhaoxu 等人[18]结合层

次分析法和模糊综合评价法构建了由 3 个指标层和 27 个指标组成的指标体系，得到准噶尔盆地总理论封存潜力约为 21 200 × 10^6 t，参考 Diao Yujie 等人[20]的研究，准噶尔盆地地质封存以深层咸水层封存为主，因此本文确定深层咸水层作为准噶尔盆地的封存地质。其中，储存潜力最大的一级构造单元位于中部坳陷，占总封存潜力的 46.29%，特别是西北地区具有较大的储集潜力；其次是陆梁隆起和乌伦古坳陷，分别占总封存潜力的 30.62% 和 11.75%；西部隆起占总封存潜力的 8.91%；东部隆起和北天山逆冲带的封存潜力较小，占总储量潜力的 1.52% 和 0.91%。准噶尔盆地二氧化碳地质封存潜力见表 2。

表 2　准噶尔盆地二氧化碳地质封存潜力表

Tab. 2　Carbon dioxide geological storage potential in the Junggar Basin

封存汇	理论封存潜力 /10^8 t
中部坳陷	98.13
陆梁隆起	64.91
乌伦古坳陷	24.91
西部隆起	18.89
东部隆起西部	1.72
合计	208.56

同时，根据 Mi Zhaoxu 等人[18]有关准噶尔盆地地质储层适宜性评价的结果，准噶尔盆地北天山逆冲带和东部隆起东部不适宜二氧化碳封存，西部隆起和东部隆起西部以及乌伦古坳陷适宜性中等，而中部坳陷以及陆梁隆起适宜性最好。因此，本文主要将除北天山逆冲带以及东部隆起东部的其他区域作为封存汇，最后将碳源和碳汇在 ArcGIS 平台中进行直观表示，准噶尔盆地碳源及碳汇分布见图 2。

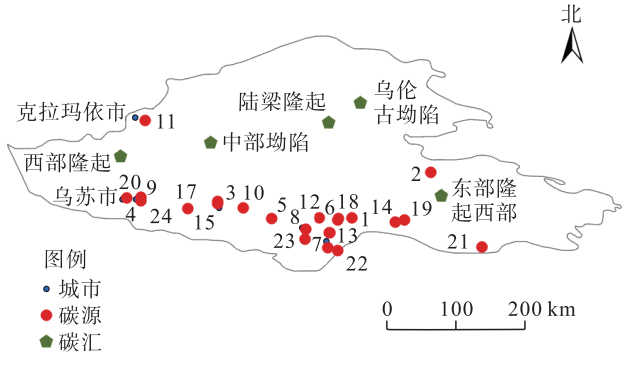


图 2　准噶尔盆地碳源及碳汇分布图

Fig. 2　Distribution of carbon sources and sinks in the Junggar Basin

2　CCUS 源汇匹配模型

准噶尔盆地区域二氧化碳的主要运输方式可考虑卡车、铁路以及管道运输，其中管道运输在大规模、长距离以及促进减排方面具备显著优势，因此选择研究二氧化碳的管道运输。从构建 CCUS 最优成本路径出发，以全生命周期的成本最小化为目标，参考捕集、运输以及封存成本的相关研究认识，最终得到准噶尔盆地 CCUS 源汇匹配模型。

2.1　模型构建

2.1.1　前提假设

CCUS 源汇匹配模型的建立需满足以下假设：以成本最低原则进行源汇匹配；可一源多汇和多源单汇，不允许源与源、汇与汇的直接连接；参照我国在 2060 年实现碳中和的目标，设定 CCUS 项目的规划运行期为 30 年，碳汇的可封存量需满足规划期内的封存需求。

2.1.2　目标函数

以全生命周期的成本最小化为目标，考虑捕集成本、管道运输成本及封存成本，并确定捕集、运输和封存成本的约束条件，建立 CCUS 理论成本目标函数[21]，见式(1)。

$$V_{\min} = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left(V_{\text{capture}} + V_{\text{transport}} + V_{\text{storage}}\right) \quad (1)$$

式中：$V_{\min}$ 为系统最小总成本，元；m 为碳排放源数量，个；i 为碳排放源，$i = 1,2,3,\cdots,m$；n 为封存地数量，个；j 为封存点，$j = 1,2,3,\cdots,n$；V_{capture} 为捕集成本，元；$V_{\text{transport}}$ 为运输成本，元；V_{storage} 为封存成本，元。

其中，二氧化碳的捕集成本约占总成本的 60% ~ 85%，不同碳排放源对应的捕集成本不同，成本也相应不同。针对所选的碳排放源类型，参考相关研究设定捕集成本[14]，见表 3。

表 3　不同类型排放源的捕集成本表

Tab. 3　Capture costs for different types of emission sources

类别	捕集成本 /(元 · t^{-1})
发电厂	351.86
钢铁	707.85
水泥	715.00

二氧化碳的运输成本参考美国电力协会(Electric Power Research Institute，EPRI)的研究认识[22]，在其关于 CCUS 技术经济性评估的多项研究中，考虑规模经济效应及距离成本非线性增长，提出了二氧化碳管道运输成本的经验公式，主要用于估算长距离输运管道的建设与运营成本，其核心形式见式(2)。

$$V_{\text{transport}} = 557.53 \times 7.12 \times L^{1.13} \times Q^{0.35} \quad (2)$$

式中：557.53 和 7.12 为 EPRI 经验公式系数；L 为管道建设长度，km；Q 为管道运输量，t。

本文中所有美元(USD)数据均按 2024 年中国人民银行公布的年度平均汇率(1 USD = 7.12 CNY)换算为人民币(CNY)。汇率数据来源为中国人民银行。

二氧化碳封存成本的确定主要受封存量和封存地质的影响,根据前文研究,准噶尔盆地具备多样化的地质封存潜力,主要包括深部咸水层、枯竭油气藏及不可采煤层,设置封存成本[14],见表 4。

表 4 不同封存地质的封存成本表

Tab. 4 Sequestration costs for different sequestration geologies

类别	封存成本 /(元·t^{-1})
驱油封存	70.79
咸水层封存	109.18
煤层封存	39.36

2.1.3 约束条件

为确保目标函数的有效性,设定以下约束条件。

1)从碳排放源捕集的二氧化碳量的总和等于该点的二氧化碳排放量,见式(3)。

$$\sum_{j}^{n} Q_{ij} = Q_i (i = 1,2,\cdots m) \tag{3}$$

式中:Q_i 为排放源 i 的碳排放量,t;Q_{ij} 为第 i 个碳排放源运输到第 j 个封存点的二氧化碳量,t。

2)各封存点实际存储的二氧化碳量不得超过封存点封存潜力,见式(4)。

$$\sum_{i}^{m} Q_{ij} - S_j \leqslant 0 (j = 1,2,\cdots n) \tag{4}$$

式中:S_j 为第 j 个封存点的二氧化碳封存量,t。

3)目标函数所涉及的二氧化碳捕集量、运输量及封存量均为非负数,见式(5)。

$$Q_i \geqslant 0, Q_{ij} \geqslant 0, S_j \geqslant 0 \tag{5}$$

4)针对管输能力的约束,为提升管网规划方案的鲁棒性与商业可操作性,借鉴天然气领域入口 /出口模式下的能力核定思想,对碳源和封存地施加节点级能力约束,只要确保所有节点的实际流量被限定在各自的能力边界之内,就应存在技术可行的物理方案满足该流量组合。管输节点能力约束见式(6)~(7)。

$$\sum_{j} Q_{ij} \leqslant I_i \quad \forall i \in m \tag{6}$$

$$\sum_{i} Q_{ij} \leqslant O_j \quad \forall j \in n \tag{7}$$

式中:I_i 为排放源 i 的最大允许年注入量,10^6 t /a,O_j 为封存点 j 的最大允许年输出量,10^6 t /a。

2.2 模型求解

本文基于规划视角,针对管输能力引入了基于节点的系统性能力约束作为先进的规划框架与假设,源节点能力可通过聚类后各碳排放源的年碳排放量确定,汇节点能力可通过封存潜力占比分配源节点的总排放需求确定,后续可通过详细水力模拟、可靠性分析等进行迭代优化,在本文规划模型中,该约束主要为形式上的完整性验证,而不改变成本最优的分配格局,未来进行详细工程设计时,可通过严格的工程分析确定可靠的工程核定容量。根据以上模型及参数设定,运用运筹学中常用的 Lingo 软件实施源汇匹配的数值迭代计算,其中模型求解的输入数据包括:24 个聚类碳排放源的地理坐标(经度、纬度)及二氧化碳排放量 Q_i,5 个封存地的地理坐标及封存潜力 S_j,以及表 3、表 4 定义的行业捕集成本和地质封存成本。管道运输成本采用式(2)计算,其中管道长度 L 通过坐标计算得出。将上述参数代入由目标函数[式(1)]及约束条件[式(3)~(7)]构成的优化模型中,利用 Lingo 18.0 平台调用其全局求解器进行迭代计算,以获得使总成本 V 最小的 Q_{ij} 分配方案。利用 ArcGIS 软件进行多维地理信息融合,将源汇匹配结果直观展示在准噶尔区域地图上,从而获得准噶尔区域 CCUS 源汇匹配成本及管网布局理论方案,分别见表 5、图 3。

表 5 准噶尔盆地 CCUS 源汇匹配成本表

Tab. 5 Costs of CCUS source-sink matching in the Junggar Basin

匹配输运路线(序号)		管道距离 / km	封存量 / 10^6 t	CCUS 成本 /亿元
碳排放源	封存地			
1	东部隆起西部	144.90	250.79	116.58
2	乌伦古坳陷和东部隆起西部	196.18	3 307.61	1 527.56
3	中部坳陷	94.98	1 661.31	767.08
4	西部隆起	68.02	153.04	70.90
5	中部坳陷	153.96	153.04	71.42
6	陆梁隆起	155.57	172.37	80.38
7	陆梁隆起	199.08	173.25	81.08
8	中部坳陷	204.00	165.72	77.62
9	中部坳陷	140.23	55.03	25.91
10	中部坳陷	115.48	702.17	324.79
11	中部坳陷	109.14	172.54	80.15
12	中部坳陷	209.31	864.58	400.84
13	陆梁隆起	175.28	164.35	76.79
14	东部隆起西部	84.18	413.20	192.12
15	中部坳陷	97.72	44.97	37.40
16	中部坳陷	236.81	37.33	31.62
17	中部坳陷	111.69	2.06	1.83
18	中部坳陷	236.30	29.87	25.41
19	中部坳陷	330.00	8.74	7.95
20	西部隆起	67.39	3.50	2.97
21	中部坳陷	459.98	8.04	7.68
22	中部坳陷	264.73	13.90	12.14
23	中部坳陷	214.24	252.70	207.95
24	中部坳陷	144.17	54.90	45.41
合计		4 213.34	8 864.98	4 273.59

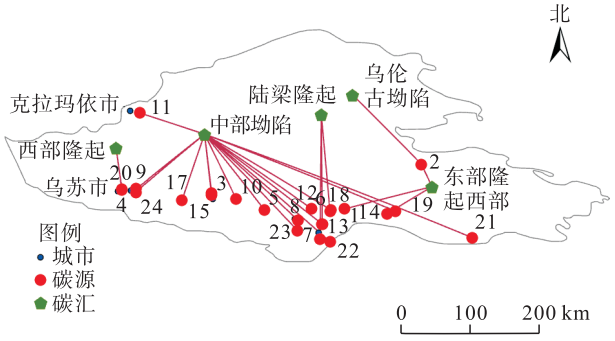


图 3　准噶尔盆地源汇匹配管网布局理论方案图

Fig. 3　Theoretical scheme of source-sink matching pipeline network layout in the Junggar Basin

3　管网路径优化

3.1　基于节约里程算法的管网拓扑路径优化

节约里程算法起源于物流车辆路径优化，其核心思想是通过合并相邻运输路径减少总里程。近年来，该算法被拓展至能源管网领域，在管网路径优化方面具有较好的适用性。上文运用 Lingo 软件求解得到的源汇匹配结果是源汇之间的单独直接连接，因未考虑源源连接可能带来的运输成本节约，所以在实际工程建设上会增大管网投资成本。本文引入节约里程算法的基本思路是：假设当前有 2 个排放源 a、b 和一个封存地 c，其共对应 3 种运输方案：$L_{ac}+L_{bc}$、$L_{ab}+L_{bc}$、$L_{ba}+L_{ac}$。比对 3 种运输方案，同时考虑到管网流量的变动会造成管道设计的改变，可能导致管道建设成本的增加，所以对于任意 2 个排放源 a、b 和 1 个封存地 c（定义节约里程值 $S_{ab}=L_{ac}+L_{bc}-L_{ab}$，其中 L 表示两点间管道距离）。S_{ab} 越大，表明将源 a 和源 b 的运输线路合并至一个中转点再通往汇点 c 所节约的里程越多。在此基础上选择成本最低的方案为管网建设最优方案。

本文实施该算法的具体步骤为：1）基于 2.2 节 Lingo 求解得到的初始源汇直连方案，识别所有可能的源对（a，b）；2）计算所有 S_{ab} 并降序排列；3）从最大的 S_{ab} 开始，在满足封存地容量约束的条件下，尝试合并线路；4）重复步骤 3），直至无更优合并可能，得到优化后的管网拓扑结构。根据节约里程算法的实际优化情况，将其在 ArcGIS 平台中直观展示，准噶尔盆地源汇匹配管网布局优化方案见图 4。

由图 4 可知，位于乌鲁木齐、昌吉地区周边的碳排放源，可经五家渠市汇集中转，将二氧化碳运输至陆梁隆起封存；位于石河子地区周边的碳排放源，可在石河子市汇集中转至中部坳陷区封存；位于奎屯地区周边的碳排放源，可在乌苏市汇集中转至西部隆起封存。优化后的实际运输路线为 1 055.21 km，可节约里程 3 158.13 km，节约总成本 9.79 亿元，里程优化率为 74.96%。上述优化确定了管网的拓扑连接关系；然而，管道在地表的具体铺设路径还受到多种地理与社会经济因素影响，直接采用直线距离将脱离施工实际，因此，本文进一步开展了空间路径优化。

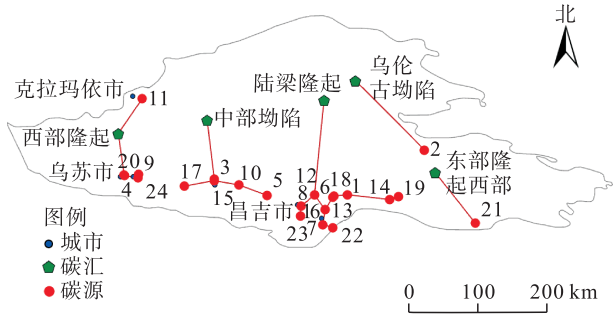


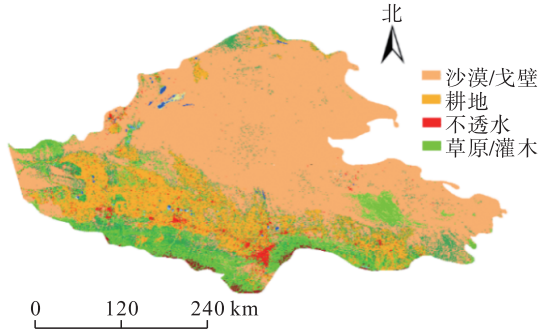
图 4　准噶尔盆地源汇匹配管网布局优化方案图

Fig. 4　Optimisation of the layout of the source-sink matching pipeline network in the Junggar Basin

3.2　基于 ArcGIS 多因子成本的最低空间路径优化

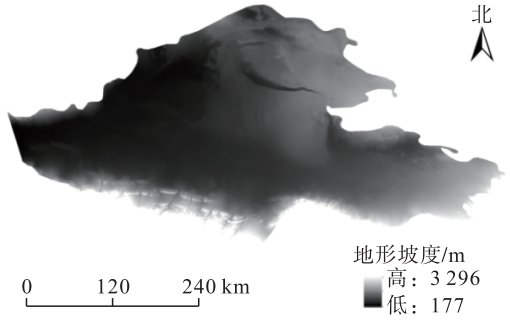
利用 ArcGIS 平台，为每条规划管道寻找在实际地理空间中综合建设成本最低的精确路径。针对管道运输成本的确定，除了受运输距离影响外，为得到更符合实际施工情况的源汇匹配管网布局，本文将综合考虑土地利用类型、坡度、管线、河流、公路、铁路及人口密度因素影响，以构建准噶尔盆地区域的管道建设成本图层。首先，在 ArcGIS 平台中导入准噶尔区域的土地利用类型、管线、河流等栅格数据，得到成本路径分析要素图层，根据准噶尔盆地各影响因素分别赋予管道运输成本相应的成本因子[12]；然后将各自的成本因子按等式求和得到综合成本数据：综合成本 = 标准管道建设成本（1 + A × 土地利用类型 + B × 坡度 + C × 管线 + D × 河流 + E × 公路 + F × 铁路 + G × 人口密度）（A ~ G 分别为土地利用类型、坡度、管线、河流、公路、铁路、人口密度的成本因子），并分别在 ArcGIS 平台上直观呈现，见图 5。

各成本因子见表 6。成本面的分辨率为 100 m × 100 m。将经节约里程算法优化后的源汇及管网数据导入 ArcGIS 平台中的运输网络成本图层，以获取更为贴合实际工程需要的最低成本路径，即得到准噶尔区域 CCUS 源汇匹配管网布局方案，见图 6。



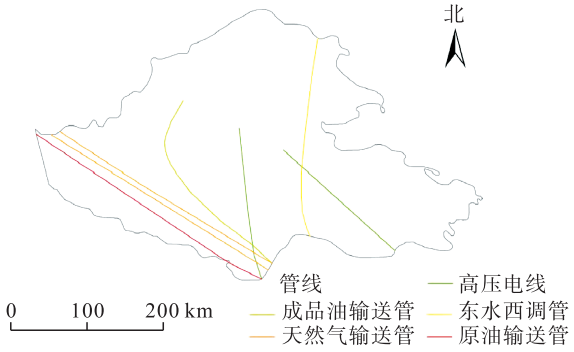
a) 土地利用类型

a) Land use types



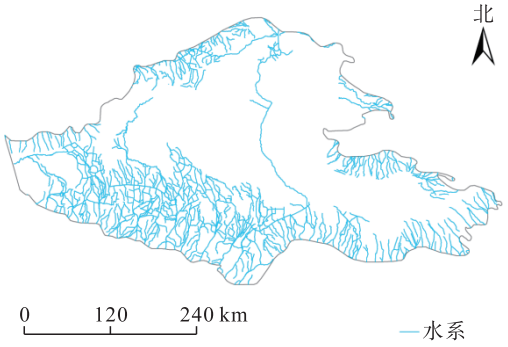
b) 坡度

b) Slope



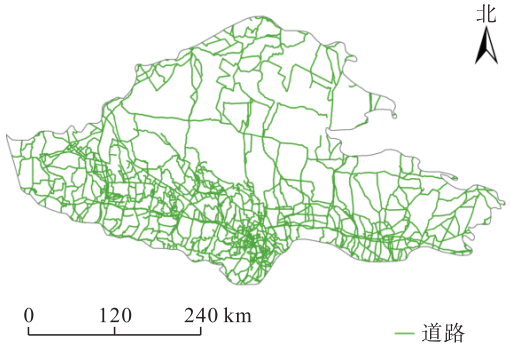
c) 管线

c) Pipelines



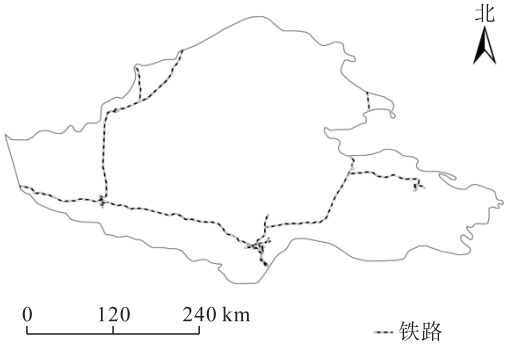
d) 水系

d) Water systems



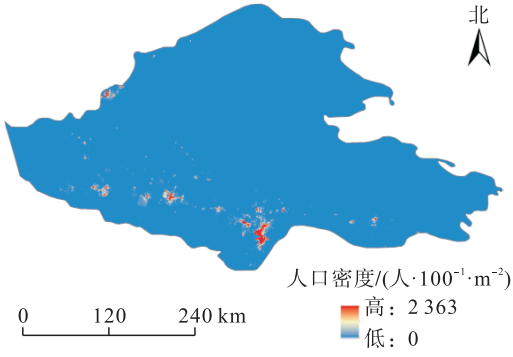
e) 公路

e) Roads



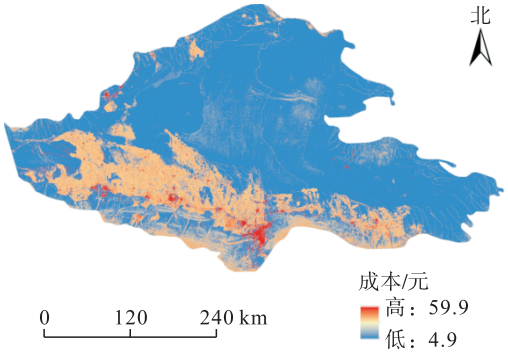
f) 铁路

f) Railways



g) 人口密度

g) Population density



h) 运输网络成本

h) Transport network costs

图 5　成本路径分析要素图层及运输网络成本图层图

Fig. 5　Cost path analysis element layer and transport network cost layer

表 6　成本因子表

Tab. 6　Cost factor table

成本因素	成本因子
土地利用类型	
耕地	9
水体	1.5
不透水	24
森林	1
沙漠 /戈壁	2
坡度	
(15% ,45%]	9
(45% ,inf]	24
管线	
电力线	0.9
输油管	0.75
输气管	0.75
河流	8
公路	
穿越公路	2
沿公路铺设	0.9
铁路	
穿越铁路	4
沿铁路铺设	0.9
人口密度 /(人 · km^{-2})	
(10,100]	5
(100,300]	10
(300,inf]	20

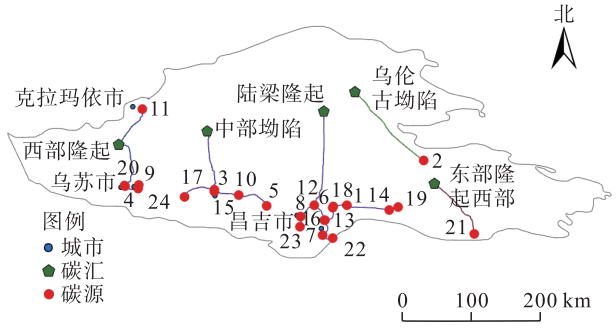


图 6　准噶尔盆地源汇匹配管网布局应用方案图

Fig. 6　Application scheme for regional source-sink matching pipeline network layout in the Junggar Basin

4　CCUS 源汇匹配结果及成本分析

4.1　CCUS 源汇匹配结果

由源汇匹配管网布局应用方案可以看出，准噶尔盆地区域 CCUS 源汇匹配结果整体表现较为理想，具体表现如下。

1)准噶尔盆地具备适宜的封存条件。准噶尔盆地地处西北降水稀少的干旱地区，人口密度小且城市基本处于盆地边缘地带，主要封存地远离人口稠密以及土地利用水平高的地区，可有效降低管网建设带来的潜在环境和人身健康风险；同时，准噶尔盆地较强的封存潜力为 CCUS 管网建设提供了资源支持。

2)准噶尔盆地主要碳源分布集中，且接近封存地。准噶尔盆地蕴藏着丰富的石油与天然气资源。盆地南部的天山山脉北坡区域是新疆现代化工业最发达的地区之一，已成为我国西北地区主要的二氧化碳排放区，区域内聚集大量燃煤电厂、钢铁厂、水泥厂，可形成最大半径 15 km 的聚类中心，进而能显著缩短管道建设里程与成本。

3)准噶尔盆地具备优越的源汇匹配条件与规模化封存潜力，通过优化管网布局并进行集群化部署，可打造中国西北地区的 CCUS 技术高地。根据准噶尔盆地的 CCUS 源汇匹配结果和各区域的能源布局，在管网与基础设施建设方面，应合理规划 CCUS 产业集群，例如分别构建乌鲁木齐、准东、石河子、奎屯集群中心，考虑加强运输管网建设，建立共享机制，确定主干管网规划 + 多式联运衔接的综合模式，在偏远地区，可采用罐车运输作为管道运输的补充，进而降低初期投资压力，降低减排成本。

4.2　CCUS 源汇匹配成本分析

根据准噶尔区域 CCUS 源汇匹配的理论方案，以 30 年的规划期内 CCUS 系统总成本最低为目标，在考虑 24 个聚类后碳排放源以及 5 个封存地的基础上，预期封存量 8.86×10^8 t，共需建设管道 4 213.34 km，CCUS 部署总成本为 4 273.59 亿元，单位减排成本 482.35 元 /t。在 CCUS 成本构成上，30 年的规划期内碳捕集成本共需投入 3 282.63 亿元，在总成本中占比 76.81% ，封存成本与管道运输成本分别为 967.88 亿元和 23.09 亿元，占比分别为 22.65% 和 0.54% 。在采用节约里程优化方法后，可显著降低管道建设里程，从 4 213.34 km 降至 1 055.21 km，节约里程优化率为 74.96% 。综合成本数据可知，一方面，捕集成本在总成本中的占比远高于封存成本和运输成本在总成本中的占比，捕集成本与碳排放源浓度密切相关，高浓度点源如煤化工、天然气加工的捕集成本可低至 10 ~ 25 美元 /t，而低浓度点源如钢铁、水泥及发电行业成本显著升高，约 40 ~ 124 美元 /t[23]，该成本结构特征与本文计算得到的捕集成本投入一致，验证了本研究成本参数设置的合理性，并凸显了在准噶尔盆地这类以低浓度点源为主的区域，降低捕集成本是推进 CCUS 的关键，因此碳捕集技术的创新发展将在很大程度上影

响准噶尔盆地区域的 CCUS 部署与实施进程;另一方面,通过优化节约里程方法,在准噶尔盆地区域进行 CCUS 管道基础设施建设与运营,较短的管道铺设距离,有利于推动准噶尔盆地区域的 CCUS 管网规划与建设。

5 结论与建议

5.1 结论

本研究以准噶尔盆地为例,系统分析了新疆区域基于成本效应的 CCUS 管道网络布局优化路径,通过源汇匹配优化模型与 ArcGIS 平台相结合,得出以下结论。

1)碳源与碳汇空间匹配性优越:准噶尔盆地碳源高度集中于乌鲁木齐、石河子等工业聚集区,通过聚类分析形成 24 个聚类排放源,聚类排放源与地质封存潜力最大的中部坳陷、陆梁隆起等区域距离适中,具备规模化部署 CCUS 的先天条件。

2)地质封存潜力支撑长期需求:准噶尔盆地理论封存潜力达 208.56×10^{8} t,以深层咸水层为主,封存地远离人口密集区,环境风险可控,可满足 2060 年碳中和目标下的长期封存需求。

3)成本路径优化效果显著:在运用最小支撑树法构建 CCUS 源汇匹配模型的基础上,通过节约里程算法,可节约里程 3 158.13 km,节约里程优化率达 74.96%,同时结合 ArcGIS 平台的路径优化,在综合考虑土地利用类型、坡度、管线、河流、公路、铁路及人口密度等现实因素影响的基础上,得到了准噶尔盆地区域的 CCUS 源汇匹配优化方案。

4)捕集成本主导总成本:30 年规划期内,捕集成本占比 76.81%,单位减排成本 482.35 元 /t,本文主要碳源来自于发电、钢铁以及水泥行业,为低浓度点源行业,捕集成本相对较高,因此碳捕集技术创新是降低 CCUS 成本的关键。

5.2 建议

本文是在构建准噶尔盆地区域管网布局最优成本路径的基础上进行的静态规划,碳源数据的来源具有一定局限,如有更全面细致的碳排放源数据可进一步丰富管网部署方案,同时当前全世界范围内持续开发的源汇匹配模型也可为管网布局提供新思路或更为切实的实施路径。此外,本文在模型层面引入了管道输送能力约束,提升了模型的工程完整性,然而规划阶段的优化侧重于源汇匹配与路径寻优,对管径、压力等详细设计参数进行了合理简化,未来研究可将管道输送能力作为与管径、压力相关的动态变量纳入优化,并考虑压缩机站布局与能耗成本,与系统可承诺容量的最大化进行协同优化,实现成本与能力的精确权衡,从而形成从规划到设计的一体化优化模型。具体提出以下建议。

1)推动 CCUS 产业集群化布局:以乌鲁木齐、准东、石河子、奎屯为核心节点,整合区域火电、钢铁、水泥等高排放企业,形成“主干管网 + 多式联运”的共享运输网络,降低初期投资压力。

2)完善碳排放统计核算体系:贯彻落实国家有关加快构建碳排放体系的要求,将准噶尔盆地区域的重点碳排放行业纳入碳足迹管理体系,提升碳排放相关计量、检测和分析能力,为 CCUS 产业布局提供详细准确的数据来源。

3)设立专项财政支持机制:针对新疆区域 CCUS 项目,提供管道建设补贴、碳税减免及封存技术研发专项资金,优先支持咸水层封存与提高石油采收率技术应用,提升经济可行性。

4)强化技术创新与标准制定:联合高校与企业攻关低浓度碳源捕集技术,制定准噶尔盆地管道建设与封存地质安全标准,建立动态监测系统以防范泄漏风险。

5)探索跨区域协同机制:联合中国石油、OGCI 等共建准噶尔盆地 CCUS 示范区,加快建设全流程、一体化、规模化的 CCUS 示范工程,并通过技术升级和应用示范,进一步降低各环节成本,打造西北地区低碳转型标杆。

参考文献:

[1] 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/OL]. 2023-07-10. https://www.cpnn.com.cn/news/baogao2023/202307/W020230724559204450978.pdf.
Zhang Xian, Yang Xiaoliang, Lu Xi, et al. China carbon dioxide capture, utilisation and storage(CCUS) annual report (2023) [R/OL]. 2023-07-10. https://www.cpnn.com.cn/news/baogao2023/202307/W020230724559204450978.pdf.

[2] Wei Yiming, Kang Jianing, Liu Lancui, et al. A proposed global layout of carbon capture and storage in line with a 2 ℃ climate target [J]. Nature Climate Change, 2021, 11(2): 112-118.

[3] Wei Yiming, Kang Jianing, Liu Lancui, et al. A cost-effective and reliable pipelines layout of carbon capture and storage for achieving China's carbon neutrality target [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 379: 134651.

[4] Morbee J, Serpa J, Tzimas E. Optimal planning of CO_2 transmission infrastructure: The JRC *InfraCCS* tool [J]. Energy Procedia, 2011, 4: 2772-2777.

[5] Van Den Broek M, Brederode E, Ramírez A, et al. An integrated GIS-MARKAL toolbox for designing a CO_2 infrastructure network in the Netherlands [J]. Energy Procedia, 2009, 1(1): 4071-4078.

[6] Middleton R S, Bielicki J M. A scalable infrastructure model

for carbon capture and storage: SimCCS [J]. Energy Policy, 2009, 37 (3): 1052-1060.

[7] Middleton R S, Yaw S P, Hoover B A, et al. SimCCS: An open-source tool for optimizing CO_2 capture, transport, and storage infrastructure [J]. Environmental Modelling & Software, 2020, 124: 104560.

[8] Tang Haotian, Zhang Shu, Chen Wenying. Assessing representative CCUS layouts for China's power sector toward carbon neutrality [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55 (16): 11225-11235.

[9] Stauffer P, Middleton R, Bai Bing, et al. System integration linking CO_2 sources, sinks, and infrastructure for the Ordos Basin, China [J]. Energy Procedia, 2014, 63: 2702-2709.

[10] Wang Pengtao, Wei Yiming, Yang Bo, et al. Carbon capture and storage in China's power sector: Optimal planning under the 2 ℃ constraint [J]. Applied Energy, 2020, 263: 114694.

[11] Sun Liang, Chen Wenying. Impact of carbon tax on CCUS source-sink matching: Finding from the improved ChinaCCS DSS [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 333: 130027.

[12] Lin Yuancheng, Gunawan T A, Isaac C, et al. A preliminary assessment of CO_2 capture, transport, and storage network for China's steel sector [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 454: 142280.

[13] Gunawan T A, Gittoes L, Isaac C, et al. Design insights for industrial CO_2 capture, transport, and storage systems [J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58 (33): 14608-14617.

[14] 刘世奇,莫　航,桑树勋,等. 宁夏回族自治区碳捕集、利用与封存源汇匹配与集群部署[J]. 煤炭学报,2024,49(3):1583-1596.
Liu Shiqi, Mo Hang, Sang Shuxun, et al. Source-sink matching and cluster deployment of carbon capture, utilization, andstorage in Ningxia Hui Autonomous Region [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49 (3): 1583-1596.

[15] 王金铎,张关龙,庄新明,等. 准噶尔盆地重点领域油气勘探研究进展及潜力方向[J]. 油气地质与采收率,2024(4):24-41.
Wang Jinduo, Zhang Guanlong, Zhuang Xinming, et al. Research progress and potential directions of oil and gas exploration in key fields of Junggar Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024 (4): 24-41.

[16] Tang Ling, Ruan Jianhui, Bo Xin, et al. Plant-level real-time monitoring data reveal substantial abatement potential of air pollution and CO_2 in China's cement sector [J]. One Earth, 2022, 5 (8): 892-906.

[17] Ajayi T, Gomes J S, Bera A. A review of CO_2 storage in geological formations emphasizing modeling, monitoring and capacity estimation approaches [J]. Petroleum Science, 2019, 16 (5): 1028-1063.

[18] Mi Zhaoxu, Wang Fugang, Yang Yongzhi, et al. Evaluation of the potentiality and suitability for CO_2 geological storage in the Junggar basin, northwestern China [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2018, 78: 62-72.

[19] Li Di, He Dengfa, Santosh M, et al. Tectonic framework of the northern Junggar Basin part I: The eastern Luliang Uplift and its link with the East Junggar terrane [J]. Gondwana Research, 2015, 27 (3): 1089-1109.

[20] Diao Yujie, Ma Xin, Zhang Chenglong, et al. CO_2 geological storage in sedimentary basins: An update on the potential and suitability evaluation and a field test [J]. Energy Geoscience, 2025, 6 (1): 100369.

[21] 方小宇,熊鹏飞,杨　浦. 沿海重化工聚集区 CCUS 源汇匹配模型及优化——以粤西地区为例[J]. 天然气工业,2025,45(1):207-216.
Fang Xiaoyu, Xiong Pengfei, Yang Pu. CCUS source-sink matching model of coastal heavy chemical industry gathering areas and its optimization: A case study of western Guangdong [J]. Natural Gas Industry, 2025, 45 (1): 207-216.

[22] 王建军. HB 地区燃煤电厂 CCUS 源汇匹配管网优化设计[D]. 成都:成都理工大学,2023.
Wang Jianjun. Optimal design of CCUS source sink matching pipe network forcoal fired power plants in North China [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2023.

[23] 梁　希,夏菖佑,余晓洁,等. CCUS 技术商业化应用面临的挑战和路径建议[J]. 可持续发展经济导刊,2023,(6):16-20.
Liang Xi, Xia Changyou, Yu Xiaojie, et al. Challenges and path suggestions for commercial application of CCUS technology [J]. China Sustainability Tribune, 2023 (6): 16-20.