

现役住宅碳排放研究进展

李政依, 贾明, 张德洋, 杜海龙

云南大学建筑与规划学院, 云南 昆明

收稿日期: 2025年7月2日; 录用日期: 2025年8月2日; 发布日期: 2025年8月15日

摘要

本文针对住宅建筑在运行阶段的碳排放问题展开研究, 探讨了住宅运行阶段的碳排放来源、影响因素以及减碳策略。通过对主要能耗来源、围护结构节能改善、国内外碳排放因子差异以及住宅减碳优化策略的分析, 得出住宅运行阶段在现役住宅碳排放量中占比最大, 能耗主要来自供暖与制冷。围护结构对住宅碳排放影响显著。国内外碳排放差异表明我国可借鉴清洁能源利用和立法促进建筑减排。生态绿化和可再生能源利用是重要减碳策略。未来研究应考虑居民生活习惯、围护结构材料更新和维护材料选择等因素, 以实现住宅建筑的低碳发展目标。住宅减碳是重要课题, 需平衡环境效益和经济效益, 促进绿色建筑行业发展。

关键词

住宅, 运行阶段, 碳排放, 能耗

Research Progress on Carbon Emissions from Existing Residential Buildings

Zhengyi Li, Ming Jia, Deyang Zhang, Hailong Du

School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming Yunnan

Received: Jul. 2nd, 2025; accepted: Aug. 2nd, 2025; published: Aug. 15th, 2025

Abstract

This paper examines carbon emissions during the operational phase of residential buildings, exploring the sources, influencing factors, and carbon reduction strategies. By analyzing the main sources of energy consumption, energy-saving improvements to building envelopes, differences in carbon emission factors between China and abroad, and optimizing carbon reduction strategies for residential buildings, it is concluded that the operational phase accounts for the largest share of carbon emissions from existing residential buildings, with energy consumption primarily coming

from heating and cooling. Building envelopes have a significant impact on residential carbon emissions. The differences in carbon emissions between China and abroad suggest that my country can learn from clean energy utilization and legislation to promote building emission reduction. Ecological greening and renewable energy utilization are important carbon reduction strategies. Future research should consider factors such as residents' living habits, building envelope material upgrades, and maintenance material selection to achieve the goal of low-carbon development for residential buildings. Residential carbon reduction is a critical issue that requires balancing environmental and economic benefits to promote the development of the green building industry.

Keywords

Residential, Operational Phase, Carbon Emissions, Energy Consumption

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景、目的及意义

建筑碳排放是近年来国际关注的热点，也是我国在实现“碳达峰”“碳中和”过程中必须重视的一环。《2023 中国建筑与城市基础设施碳排放研究报告》指出：2021 年全国房屋建筑全过程碳排放总量为 40.7 亿吨，占全国能源相关碳排放的比重为 38.2%。其中建筑运行阶段占全过程碳排放的 56.6%。建筑运行阶段能源使用带来的碳排放，成为温室气体排放的重要组成部分[1] [2]。Al-Adhami M. [3]指出建筑业消耗了全球 35%的能源，其中住宅占 22%。人们为追求住宅建筑中更加健康的环境，使建筑运营的能源需求增加了约 80%。近年来，针对现役住宅碳排放量的研究逐渐受到广泛关注，取得了一系列重要进展。本文旨在通过探讨住宅运行阶段的碳排放来源、影响因素以及减排策略，为实现低碳、零碳建筑和可持续发展目标提供可行性思路。

1.2. 研究范围界定

住宅的碳排放核算范围可依据全生命周期评价体系划分为物化阶段、使用阶段及拆除阶段[4]。使用阶段包括了运行与维护两个部分。住宅运行阶段的碳排放是根据建筑使用过程中由外部输入的能源，包括供暖、制冷、通风、空调和照明等设备来维持建筑环境的用能和办公、家电、电梯、生活热水等活动用能[5] [6]。

2. 研究进展

2.1. 住宅运行阶段的主要能耗

住宅碳排放核算方法包括排放因子法、质量平衡法和实测法[7]。排放因子法计算结果直观准确，得到了政府间气候变化专门委员会 IPCC 的推荐，是目前应用最广泛的方法[8]。其基本原理是，碳排放量 = 活动数据 × 排放因子[9]。本文对采用此类方法的住宅碳排放案例进行了归纳汇总。

我国的住宅建筑在全生命周期中产生的碳排放量主要来源于以供暖为主的运行阶段。北京地区装配式草砖结构农宅在建筑使用阶段的碳排放量是当地普通农宅的 27.04%，且两种农宅供暖消耗的能源所产生的碳排放占比均为最大[10]。北京市住宅在使用阶段的碳足迹在生命周期各阶段中最高，主要来自于供

热用能[11]。南方地区的竹结构住宅运行阶段的碳排放量占其全生命周期碳排放总量 89.8%，其中暖通空调系统的碳排放量贡献最多，高达 69.24%，相比之下，照明系统与常用家电碳排放占比较低，分别占运行阶段碳排放量的 21.36%与 9.40% [12]。北京、天津、河北、山东和河南的农村住宅的碳排放主要取决于供暖所需的煤炭、电力等能源[13]。在沿海城市，住宅运营是建筑碳排放占比最大的阶段，其主要碳排放来源为电力消耗[14]。但华南地区的“空心村”的电力消耗以家电和制冷、照明为主，供暖仅占总用电量的 0.2% [15]。

英国住宅的供暖、制冷和照明间接占总排放量的 18% [16]。在波兰，普通家庭将大约 65%的购买能源用于空间供暖，16.6%用于加热日常用水，用于照明和烹饪的能源份额相对较小[17]。瑞士住宅，其空间供暖就消耗了 64%的能源[18]。澳大利亚住宅的能源消耗的主要来源是供暖和制冷，占总能耗的 40%以上[19]。欧盟 2018 年给出的数据表明整个欧洲住宅供暖和制冷能耗占整个建筑业能耗的 40% [20]。

气候区的差异从根本上决定了住宅供暖与制冷能耗在碳排放权重中的分配格局，这种决定性作用在不同区域的能耗特征中体现得尤为显著。在严寒与寒冷气候区，漫长而寒冷的冬季使得供暖成为能耗的核心需求，例如我国东北地区，住宅冬季采暖期长达 6~7 个月，供暖能耗占运行阶段总能耗的 70%以上，远超其他用能环节；北欧国家如瑞典，即便在能源结构清洁化的背景下，住宅供暖仍占据全年能耗的 60%左右，其权重受低温气候的硬性约束难以降低。而在热带与亚热带气候区，持续的高温天气让制冷能耗成为主导，像东南亚地区，住宅空调制冷能耗占比可达运行阶段总能耗的 65%，部分高温城市甚至超过 75%，冬季短暂且温和的气候使得供暖需求几乎可以忽略。处于温带过渡区的住宅，则呈现出供暖与制冷能耗权重相对均衡的特点，如我国长江流域，夏季需制冷降温、冬季需短暂供暖，二者能耗占比通常维持在 4:6 至 5:5 之间，随年度气候波动略有调整。可见，气候区的温度极值、持续时长等核心特征，直接划定了供暖与制冷在住宅能耗中的权重边界，是分析二者碳排放占比时必须优先考量的决定性因素。

总体而言，全球各地区的住宅建筑碳排放情况存在一定的差异如表 1 所示，但供暖、制冷等能源消耗始终是住宅运行阶段的主要碳排放来源。

Table 1. Summary of energy consumption and carbon emissions during residential operation

表 1. 住宅运行阶段能耗及碳排放案例数据汇总

地区/国家	建筑类型	运行阶段碳排放占比核心特征
中国南方地区	竹结构住宅	运行阶段碳排放占全生命周期 89.8%，暖通空调系统占比 69.24%
中国华北地区	农村住宅	碳排放主要取决于供暖能源
中国沿海城市	城市住宅	运营阶段碳排放以电力消耗为主
中国华南地区	“空心村”农宅	电力消耗以家电、制冷、照明为主
英国	住宅	供暖、制冷和照明合计占总排放量 18%
波兰	普通家庭	65%购能用于空间供暖
瑞士	住宅	空间供暖消耗能源占比 64%
澳大利亚	住宅	供暖和制冷合计占总能耗 40%以上

2.2. 改善住宅围护结构节能研究

围护结构的节能分析是评估建筑外围结构在保温、隔热、通风等方面的性能，以减少建筑能耗，提高能源利用效率的过程。住宅节能研究主要集中于建筑结构改造和建筑材料升级[21]。

在住宅运行阶段,其围护结构外墙的减碳潜力最大,屋面、外窗和地面也存在一定减碳潜力[22]。为了最大限度地减少能量需求,应优化与围护结构相关的各种设计变量[23]。青藏高原地区的住宅可以通过调整间距、朝向、长宽比、层高、窗墙比等层级指标以提高太阳能利用率进而减少能源消耗产生的碳排放[24]。北京市的住宅在相同节能标准下,预制外围护结构与现浇外围护结构碳排放量差值较少[25]。在川西高原甘孜州地区的住宅,随着外墙保温材料厚度的增加,其能耗逐渐降低[26]。湖南省的传统原土住宅更换外保温窗、设置外墙保温层、设置屋顶保温层和设置吊顶保温层后的减碳效果显著[27]。砖混结构建筑使用阶段碳排放相较于剪力墙结构少 19.8% [28]。但节能改造的最优方案并不是节能标准越高越好,而要综合考虑节能性和经济性后再确定[29]。建筑围护结构的节能性能也需要与建筑其他系统如采暖、通风等进行协调,以实现整体能源利用效率的最大化。

2.3. 国内外住宅运行阶段碳排放因子差异

中国住宅主要通过建筑体形系数、建筑窗墙面积比、建筑屋面天窗面积、建筑围护结构热工性能参数、建筑透光围护结构热工性能参数 5 个指标进行限定,且对供暖、通风与空调设备的选用、热效率以及制冷系数都做出了较为详细的限制规定,但煤炭化石燃料能耗比例仍然较大。日本主要给定外墙、外窗的传热系数指标限值,仅对暖通空调系统设备中的供暖设备和制冷设备进行区分及要求[30]。瑞典供应建筑的电力、热力、燃料供应都基本实现了脱碳瑞典家庭炊事活动由于基本实现了电气化也进一步提高了住宅用电量[31]。英国的地理位置具有风力发电的优势,并且极其重视风力的开发与利用进而减少了化石能源的使用[32]。

综合来看,各国在住宅能源利用方面的做法各有侧重,但共同的目标是推动可持续发展,提高能源利用效率,减少对化石能源的依赖,以应对日益严峻的能源和环境挑战。

2.4. 住宅减碳优化策略

2.4.1. 生态绿化建设

通过对建筑物及其周围环境进行绿化,可以降低周围微环境的温度、改善空气湿度、减少噪音、延长自然通风降温时间,提高室内空气质量,降低能耗和碳排放。不同的绿化种植方式将影响其净化碳排放的效果,节能碳汇随着绿地面积的增大而增大,但绿地率超过 35%后节能碳汇基本维持稳定[33]。生态绿化类更新措施的降碳效果可能并不显著,但往往是易于被大众所接受的[34]。例如,种植树木可以有效降低周围环境的温度,并提供阴凉和美观,但树木的生长周期较长,碳汇的效果可能需要一定时间才能显现。在实际绿化过程中应考虑到当地的气候条件、土壤类型、建筑结构等因素。例如,在干旱地区,选择耐旱植物进行绿化可能更为合适。

2.4.2. 可再生能源利用

住宅的可再生能源发电对于实现“零能耗建筑”至关重要[35]。通过增设太阳能光电设施、太阳能集热设施、建筑地源热泵、生物质能源利用设施,或增设微电网储能系统,使建筑可在运行约 7 年和 15 年后分别偿还碳排放和一次能源消耗,并最终实现生命周期负碳排放和正能源[36]。太阳能等可再生能源取代锅炉来实现供热脱碳[37]。设置太阳能集热器能够进行生活热水制备,从而减少碳排放[38]。太阳能光伏系统在减少建筑物碳排放方面具有巨大潜力,可为未来住宅的设计和材料选择提供依据,以推动绿色住宅的发展[39]。英国使用可再生能源产生的液氮,为家庭房屋提供冷却水和电力[40]。伊朗安装太阳能集热器,预热散热器回路中的水循环,以提供空间供暖,或预热生活热水[41]。华北地区在清洁供暖改造过程中,使用太阳能耦合空气源热泵技术高效降低了碳排放[42]。建筑行业通过采用可再生能源技术,实现建筑能源的绿色化和低碳化,不仅可以降低碳排放,还可以提高能源利用效率,为建筑行业的可持

续发展和环境保护作出重要贡献。

3. 总结与展望

本文研究了住宅在运行阶段的碳排放问题，重点探讨了主要能耗来源、围护结构节能改善、国内外碳排放因子差异以及住宅减碳优化策略。由于全球各地区气候环境及人们生活方式的不同，住宅在运行阶段的碳排放数值并不具有统一性，但可分析得到运行阶段是现役住宅碳排放量在整个生命周期中占比最大的一个阶段，且能耗主要产自于供暖与制冷。对于住宅围护结构的研究反映出其影响住宅的碳排放作用显著，但大都基于模型建立得出能耗数值，缺乏实测的准确性，且未能将人们的生活习惯或生活方式考虑在内，如日常的用水、用电。对比国内外碳排放因子的差异可知，我国目前化石能源的使用率仍高于部分发达国家，英国利用风能来减少住宅运行阶段所消耗电能，进而减少碳排的例子以及日本通过立法来督促建筑减排的措施均为我国带来了很好的启示，我国可利用清洁能源或可再生能源替代化石燃料的使用，并可通过法律来促使我国建筑行业健康低碳发展。关于住宅减碳的相关措施，目前国内外领域对生态绿化的研究不够广泛，但对可再生能源利用率的研究较为深入。

未来研究需在三方面深化：其一，强化气候分区的精细化分析，结合不同气候带温度特征、采暖制冷周期，建立分区域的能耗模型，精准量化供暖与制冷的碳排放权重，为针对性减碳提供数据支撑；其二，融入居民行为因素，通过实测调研补充生活习惯(如家电使用频率、温控偏好)对能耗的影响，避免仅依赖模型计算导致的偏差；其三，推动围护结构与能源系统的协同创新，在材料更新(如新型保温材料、低碳建材)与技术集成(如太阳能耦合热泵、微电网储能)中，兼顾环境效益与全生命周期经济性，探索适配不同气候区的最优减碳方案。此外，还需完善碳排放核算体系，统一跨区域、跨国家的统计标准，为全球住宅低碳转型提供可比照的参考框架。

现役住宅减碳是实现“双碳”目标的重要抓手，需政策引导、技术创新与公众参与协同发力，在满足居住舒适度的前提下，推动建筑行业向绿色化、低碳化深度转型，最终实现生态效益与社会经济可持续发展的共赢。

参考文献

- [1] 叶红, 严寒, 张芮铭, 等. 面向低碳城市建设的建筑运行能耗驱动机理研究进展[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2644-2652.
- [2] Niu, M., Ji, Y., Zhao, M., Gu, J. and Li, A. (2024) A Study on Carbon Emission Calculation in Operation Stage of Residential Buildings Based on Micro Electricity Usage Behavior: Three Case Studies in China. *Building Simulation*, 17, 147-164. <https://doi.org/10.1007/s12273-023-1070-9>
- [3] Al-Adhami, M. (2022) The Development of a Real-Time Energy Prediction Framework in Domestic Buildings. Nottingham Trent University.
- [4] 尚春静, 张智慧. 建筑生命周期碳排放核算[J]. 工程管理学报, 2010, 24(1): 7-12.
- [5] 胡姗, 张洋, 燕达, 等. 中国建筑领域能耗与碳排放的界定与核算[J]. 建筑科学, 2020, 36(S2): 288-297.
- [6] 黄志甲, 赵玲玲, 张婷, 等. 住宅建筑生命周期 CO₂ 排放的核算方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(S2): 103-105.
- [7] 李小冬, 朱辰. 我国建筑碳排放核算及影响因素研究综述[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(1): 317-327.
- [8] 刘明达, 蒙古军, 刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展[J]. 热带地理, 2014, 34(2): 248-258.
- [9] 阴世超. 建筑全生命周期碳排放核算分析[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [10] 魏广龙, 倪熙茁, 姚胜, 等. 装配式草砖结构农宅生命周期生态效益研究[J]. 西安理工大学学报, 2022, 38(3): 375-385.
- [11] 肖雅心, 杨建新. 北京市住宅建筑生命周期碳足迹[J]. 生态学报, 2016, 36(18): 5949-5955.
- [12] 祝飞飞, 余仁民, 郑维, 等. 竹结构住宅全生命周期碳排放分析[J]. 木材科学与技术, 2024, 38(2): 43-50.

- [13] 侯隆澍, 丁洪涛, 王珊珊. 清洁取暖对农村住宅领域碳排放影响评估[J]. 建筑科学, 2022, 38(12): 260-265.
- [14] 黄蓓佳, 崔航, 宋嘉玲, 等. 上海市建筑碳排放核算研究[J]. 上海理工大学学报, 2022, 44(4): 343-350.
- [15] Huang, Z., Tang, H., Wen, Y., Sun, W., Zhou, H. and Lin, B. (2024) Life-Cycle Carbon Emission Calculation and Reduction for Rural Dwellings of “Hollow Village”: A Case Study in South China. *Environmental Impact Assessment Review*, **106**, Article 107514. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107514>
- [16] Norouzi, M., Haddad, A.N., Jiménez, L., Hoseinzadeh, S. and Boer, D. (2023) Carbon Footprint of Low-Energy Buildings in the United Kingdom: Effects of Mitigating Technological Pathways and Decarbonization Strategies. *Science of the Total Environment*, **882**, Article 163490. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163490>
- [17] Seo, S. and Foliente, G. (2021) Carbon Footprint Reduction through Residential Building Stock Retrofit: A Metro Melbourne Suburb Case Study. *Energies*, **14**, Article 6550. <https://doi.org/10.3390/en14206550>
- [18] Linder, E., Weber, T., Suter, D. and Schuetz, P. (2024) Estimating the Type of Heating Systems in Swiss Residential Buildings. *SSRN*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4825341>
- [19] González-Caballín Sánchez, J.M., Meana-Fernández, A., Ríos-Fernández, J.C. and Gutiérrez Trashorras, A.J. (2023) Characterization of Housing Stock for Energy Retrofitting Purposes in Spain. *Building Simulation*, **16**, 947-962. <https://doi.org/10.1007/s12273-022-0964-2>
- [20] Siudek, A., Klepacka, A.M., Florkowski, W.J. and Gradziuk, P. (2020) Renewable Energy Utilization in Rural Residential Housing: Economic and Environmental Facets. *Energies*, **13**, Article 6637. <https://doi.org/10.3390/en13246637>
- [21] 秦力, 周末, 史巍, 等. 严寒地区村镇住宅综合节能研究——以长春市某住宅为例[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(1): 67-80.
- [22] 张瀚, 舒平, 孟霞. 既有居住建筑运行阶段碳排放影响因素显著性分析[J]. 工业建筑, 2023, 53(S2): 13-17+37.
- [23] Heidari, M., Rahdar, M.H., Dutta, A. and Nasiri, F. (2022) An Energy Retrofit Roadmap to Net-Zero Energy and Carbon Footprint for Single-Family Houses in Canada. *Journal of Building Engineering*, **60**, Article 105141. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105141>
- [24] 窦枚, 刘衍, 刘冬, 等. 太阳能富集区城镇居住建筑零碳化路径的研究框架[J]. 建筑科学, 2024, 40(8): 42-51.
- [25] 陈滕, 何凯, 于哲. 北京某住宅项目不同外围护结构节能与碳排放研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(S1): 165-169.
- [26] Zhang, Y. and Luo, M. (2023) Energy-Saving Analysis of Envelope Structure of Traditional Dwellings in Garze Prefecture, Tibetan Area of Western Sichuan Plateau. *Building Simulation Conference Proceedings*, Shanghai, 1-7 September 2023, 1-7. <https://doi.org/10.26868/25222708.2023.1136>
- [27] Xie, L., Li, Z., Li, J., Yang, G., Jiang, J., Liu, Z., et al. (2022) The Impact of Traditional Raw Earth Dwellings' Envelope Retrofitting on Energy Saving: A Case Study from Zhushan Village, in West of Hunan, China. *Atmosphere*, **13**, Article 1537. <https://doi.org/10.3390/atmos13101537>
- [28] 李飞, 崔胜辉, 高莉洁, 等. 砖混和剪力墙结构住宅建筑碳足迹对比研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(S1): 18-22+70.
- [29] 韩京彤, 王清勤, 李德英, 等. 住宅围护结构改造对供暖空调能耗的影响及效益分析[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(8): 116-120.
- [30] 檀姊静, 柳天祥, 赵敬源, 等. 碳中和背景下中日建筑节能标准对比研究[J]. 建筑科学, 2023, 39(2): 171-182+214.
- [31] 徐天昊, 胡姗, 杨子艺, 等. 中国瑞典建筑碳排放对比及对中国建筑碳中和路径的启示[J]. 气候变化研究进展, 2023, 19(3): 305-319.
- [32] 虞志淳. 英国低碳建筑: 法规体系与技术应用[J]. 西部人居环境学刊, 2021, 36(1): 51-56.
- [33] 苟文雅, 赵敬源, 马西娜. 基于碳污协同影响的西安市宅旁绿地优化设计研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2022, 54(3): 450-458.
- [34] 刘佳燕, 沈毓颖. 城市社区低碳更新研究与实践: 评述与策略建议[J]. 上海城市规划, 2023(4): 24-32.
- [35] Gil, G.O., Chowdhury, J.I., Balta-Ozkan, N., Hu, Y., Varga, L. and Hart, P. (2021) Optimising Renewable Energy Integration in New Housing Developments with Low Carbon Technologies. *Renewable Energy*, **169**, 527-540. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.059>
- [36] 毕雪皎, 杨崑, 李洁, 等. 零碳独栋住宅生命周期环境影响及成本分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2024, 57(5): 544-555.
- [37] Narula, K., De Oliveira Filho, F., Chambers, J., Romano, E., Hollmuller, P. and Patel, M.K. (2020) Assessment of Techno-Economic Feasibility of Centralised Seasonal Thermal Energy Storage for Decarbonising the Swiss Residential Heating Sector. *Renewable Energy*, **161**, 1209-1225. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.099>

-
- [38] Andric, S., Jovanovic-Popovic, M. and Macut, N. (2018) Development for CO₂ Emissions Reduction by the Use of Solar Thermal Collectors in the Process of Urban Planning. *Thermal Science*, **22**, 1249-1258.
<https://doi.org/10.2298/tsci170601222a>
- [39] Ahmad, A., Al-Dadah, R. and Mahmoud, S. (2016) Air Conditioning and Power Generation for Residential Applications Using Liquid Nitrogen. *Applied Energy*, **184**, 630-640. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.022>
- [40] Yuan, P., Huang, F., Zhu, C., Gao, S., Fu, P. and Gao, K. (2024) Review on Research Progress of Solar Coupled Air Source Heat Pump System for Domestic Space Heating. *Thermal Science and Engineering Progress*, **53**, Article 102709.
<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102709>
- [41] Shaddel, M. and Shokouhian, M. (2014) Feasibility of Solar Thermal Collectors Usage in Dwelling Apartments in Mashhad, the Second Megacity of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **39**, 1200-1207.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.123>
- [42] Luo, Z. and Lu, Y. (2020) Multi-Case Study on the Carbon Emissions of the Ecological Dwellings in Cold Regions of China over the Whole Life Cycle. *Energy Exploration & Exploitation*, **38**, 1998-2018.
<https://doi.org/10.1177/0144598720934054>