



珠江口盆地二氧化碳地质封存条件及源汇匹配性分析

可行, 陈建文, 龚建明, 谢明英, 涂志勇, 孙晓娜, 杨传胜, 梁杰, 廖晶, 吴飘

Assessment on geological condition for carbon dioxide sequestration and source-sink matching in the Pearl River Mouth Basin

KE Xing, CHEN Jianwen, GONG Jianming, XIE Mingying, TU Zhiyong, SUN Xiaona, YANG Chuansheng, LIANG Jie, LIAO Jing, and WU Piao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022112301>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

珠江口盆地阳江东凹始新统的源汇过程：碎屑锆石定年及物源示踪

Tracing source-to-sink process of the Eocene in the Eastern Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin: Evidence from detrital zircon spectrum

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 124

珠江口内伶仃洋晚第四纪黏土矿物组成特征及对源区气候变化的指示

Late Quaternary clay minerals in the inner Lingdingyang of the Pearl River Estuary, southern China: Implications for paleoclimate changes at the provenance

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 202

渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境演化及碳埋藏评价

Environmental evolution and carbon burial assessment of the west coast of Bohai Bay since Late Pleistocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 194

澳大利亚波拿巴盆地N区块岩性圈闭识别探讨

Identification of lithologic traps in block N of Bonaparte Basin, Australia

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 183

南薇西含油气盆地地层层序及生储盖组合特征

Characteristics of stratigraphic sequence and the source-reservoir-cap assemblages in the Nanweixi petroliferous basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 163

中国海域基岩油气藏特征及未来勘探方向

Characteristics of the recently bedrock hydrocarbon reservoir in China Seas and future exploration directions

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 151



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

可行, 陈建文, 龚建明, 等. 珠江口盆地二氧化碳地质封存条件及源汇匹配性分析 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(2): 55-65.

KE Xing, CHEN Jianwen, GONG Jianming, et al. Assessment on geological condition for carbon dioxide sequestration and source-sink matching in the Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(2): 55-65.

珠江口盆地二氧化碳地质封存条件及源汇匹配性分析

可行^{1,2}, 陈建文^{2,3,4}, 龚建明^{2,3}, 谢明英⁵, 涂志勇⁵, 孙晓娜⁵, 杨传胜^{2,3}, 梁杰^{2,3}, 廖晶^{2,3}, 吴飘^{2,3}

1. 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266590

2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

3. 崂山实验室, 青岛 266237

4. 河海大学, 南京 213002

5. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518000

摘要: 当今全球气候突变, 极端天气频发, 温室气体过量排放造成的温室效应是其形成原因之一。我国正值经济转型, 又受限于能源结构, 继续大量使用化石能源是不可避免的。通过收集有关珠江口盆地的公开地质资料, 与前人所提出的 E 级和 D 级碳封存适宜性评价指标对比, 得知珠江口盆地具有巨大的碳封存潜力和较高的适宜性。分析了粤港澳琼四地区碳排放情况及变化趋势, 认为四地区碳排放源与珠江口盆地碳封存区构成良好的源汇匹配关系, 在珠江口盆地实施碳封存, 不仅可以使四地区达成碳中和, 而且可以使盆地内油气田开发最大效益化。因此, 对珠江口盆地碳封存地质条件及源汇匹配性的研究具有重要意义。

关键词: 碳赤字; 碳中和; 地质条件; 碳封存适宜性; 珠江口盆地

中图分类号: P744.4; X141

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022112301

Assessment on geological condition for carbon dioxide sequestration and source-sink matching in the Pearl River Mouth Basin

KE Xing^{1,2}, CHEN Jianwen^{2,3,4}, GONG Jianming^{2,3}, XIE Mingying⁵, TU Zhiyong⁵, SUN Xiaona⁵, YANG Chuansheng^{2,3}, LIANG Jie^{2,3}, LIAO Jing^{2,3}, WU Piao^{2,3}

1. School of Earth Sciences and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China

3. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China

4. Hohai University, Nanjing 213002, China

5. Shenzhen Branch CNOOC China Ltd., Shenzhen 51800, China

Abstract: Abrupt global climate change and extreme weather occur frequently in recent decades, for which the greenhouse effect caused by excessive greenhouse gas emission shall be one of the responsible reasons. China is in the midst of economic transformation but is constrained by the energy structure, thus continuous use of fossil energy in large quantities is inevitable in the foreseeable future. Available geological data about the Pearl River Mouth Basin were collected and the evaluation indicators of carbon sequestration suitability in the E and D levels proposed by previous researchers were compared. Results show that the Pearl River Mouth Basin has a huge carbon

资助项目: 崂山实验室课题“海域强屏层下与崎岖海底深层地震采集技术”(LSKJ202203404); 崂山实验室科技创新项目“中国海域重点盆地发育时空差异及其深部过程”(LSKJ202203401); 渤海等海域新生界油气地质条件与碳封存选区(DD20230401); 国家自然科学基金青年基金项目“二连盆地地下白垩统富火山组分的咸水湖相烃源岩地质地球化学特征及其有机质富集机制”(42102188), “南黄海 CSDP-2 井二叠系砂岩储层致密化过程及其对油气充注事件的响应”(42206234); 山东省自然科学基金资助项目“南黄海盆地崂山隆起上二叠统特低渗砂岩致密层储层表征研究”(ZR2020QD038); 中国地质调查局项目“我国东部海域及北印度洋等重点海域油气资源调查评价”(DD20221723), “南黄海油气资源调查”(DD20160152), “崂山隆起构造沉积条件地质调查”(DD20190818)

作者简介: 可行(1995—), 男, 硕士, 主要从事地球化学研究, E-mail: 1132720355@qq.com

通讯作者: 陈建文(1965—), 男, 博士, 研究员, 从事海洋油气资源调查评价及碳封存相关研究, E-mail: jwchen2012@126.com

龚建明(1964—), 男, 博士, 研究员, 从事石油地质专业相关研究, E-mail: gongjm@aliyun.com

收稿日期: 2022-11-23; 改回日期: 2023-03-06. 张现荣编辑

sequestration potential and high suitability. Moreover, the carbon emission *status quo* and variation trend in Guangdong, Hong Kong, Macao, and Hainan were analyzed, by which we believed that the carbon emission sources in the four regions formed a good source-sink matching relationship with the carbon sequestration area in the Pearl River Mouth Basin. The implementation of carbon sequestration in the Pearl River Mouth Basin can not only achieve carbon neutrality in the four regions, but also maximize the benefits of oil and gas field development of the basin. Therefore, it is of great significance to study the geological conditions and source-sink matching of carbon sequestration in the Pearl River Mouth Basin.

Key words: carbon deficit; carbon neutralization; geological condition; suitability of carbon sequestration; Pearl River Mouth Basin

中国是世界第一大碳排放国,也是《联合国气候变化框架公约》缔约国之一,为了履行CO₂减排的国际义务,中国承诺“力争于2030年前碳达峰”和“努力争取2060前实现碳中和”。广东省是中国第一经济大省,也是5个低碳试点省份之一。目前绿色能源尚不能满足经济社会发展的需求,大量消耗化石能源是不可避免的,2019年广东省二氧化碳总排放量为585.81 Mt^[4],其中45%为植物固碳所吸收^[5-6],预测到2030年广东省电力装机中煤电仍占42%,火电仍占54%,温室气体仍有较大规模的碳赤字。一方面经济发展需要继续使用化石能源,另一方面为应对气候变化又要实现大规模CO₂减排,这就决定了广东省实现低碳发展需要采用碳捕集、封存和利用(CCUS)技术。

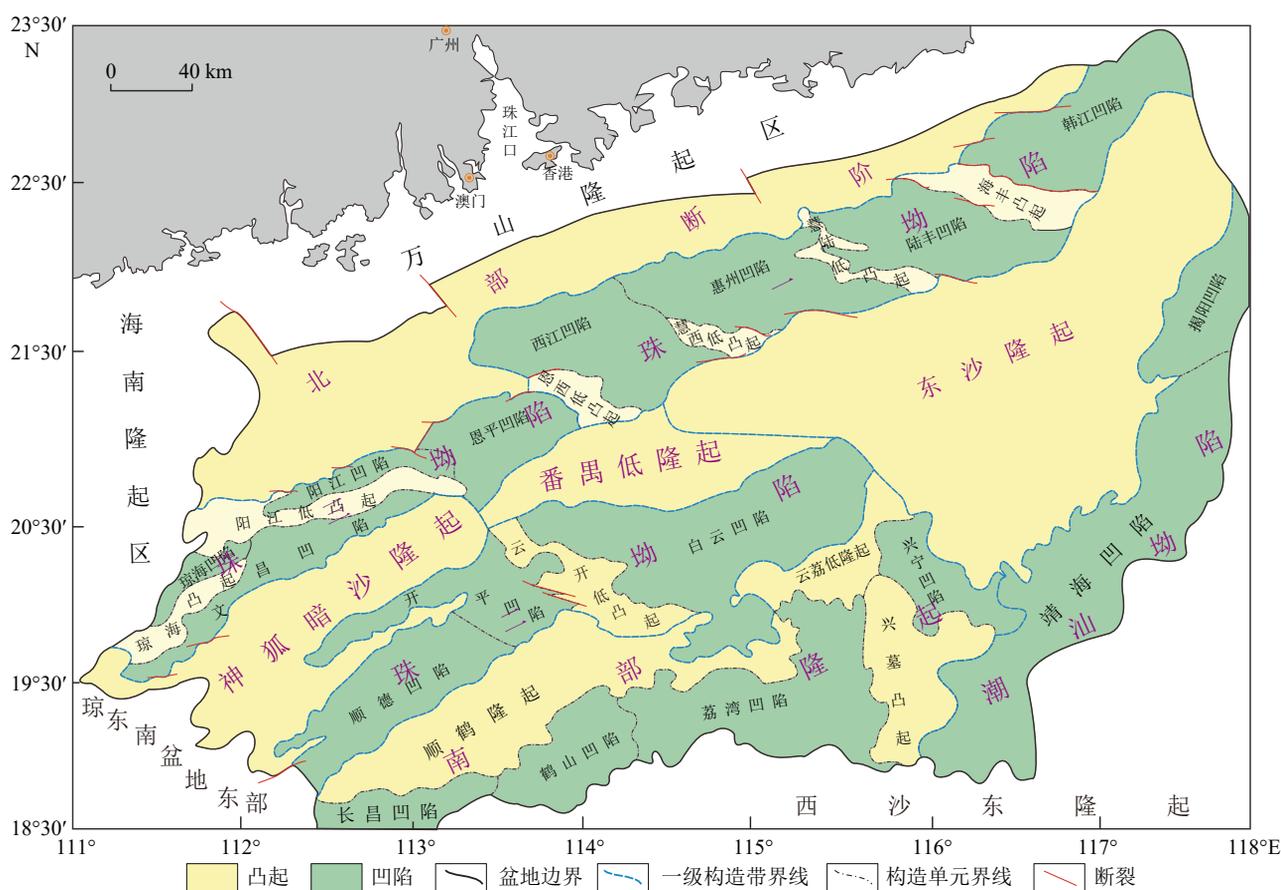
广东省陆上沉积盆地面积狭小,工业和农业占地广阔,人口众多且分布密集,CO₂地质封存条件有限,而近海的珠江口盆地面积大、沉积地层厚、有效地质碳封存容量巨大且封存适宜性较高^[7-8]。据研究,广东省的大规模CO₂排放点源集中分布在沿海地区,尤其是围绕珠江口的粤港澳大湾区^[9]。以广东为主,香港、澳门、海南为次,四地的大型碳排放点源与珠江口盆地碳封存区构成良好的源汇匹配关系^[5,10],由于这些大型点源排放的CO₂可被捕集起来,除少部分作为资源利用之外,大部分可通过海底管道或船舶运输到珠江口盆地海底之下的深部砂岩层中进行永久封存。因此,对珠江口盆地的碳封存地质条件展开详细的研究具有重要意义。

1 区域地质概况

珠江口盆地邻近粤港澳大湾区,北东-南西向长900 km,北西-南东向宽115~280 km,面积约20万m²,北部水深0~200 m,平均93 m,东南部水深300~2 919 m,平均832 m,是南海北部一个以新生界为主的大型沉积盆地,北接万山隆起区,西邻海南隆起区及琼东南盆地东部,东南与西沙东隆起相接^[11]。新生代之前古太平洋板块向欧亚板块俯

冲,位于活动大陆边缘的珠江口盆地形成了古生界次生变质岩和中生界花岗岩混合基底以及北东向和北西向两组主要基岩断裂。早始新世太平洋板块的俯冲后撤,使盆地内的应力由NE-SW向的挤压状态转换成NW-SE的拉张状态,发生珠琼一幕运动;至中始新世末期,欧亚板块和印度板块碰撞,古南海板块向南俯冲,在南海北部引起南北向伸展,珠琼二幕运动开始;此后由于南海海盆打开,盆地进入裂后期,沉积相由陆相转变为海相^[12-17]。根据现存构造特征,盆地大致呈“南北分带、东西分块”的构造格局,自北向南依次为北部隆起带(北部断阶)、北部坳陷带(包括珠一凹陷和珠三凹陷)、中部隆起带(神狐隆起、番禺低隆起和东沙隆起)、中部坳陷带(珠二坳陷)、南部隆起带(南部隆起)和南部坳陷带(潮汕坳陷)等6个近北东向构造带和9个一级构造单元,其中大部分一级构造单元又可以进一步划分为东西走向上呈块状分布的凹陷、低隆起和凸起等二级构造单元^[18-20](图1)。

珠江口盆地坳陷区的新生界厚度为7 000~14 000 m,隆起区则为2 500~4 000 m,地层自下而上为古新世神狐组,始新世恩平组和文昌组,渐新世珠海组,中新世粤海组、韩江组和珠江组,上新世万山组及第四系^[14-15](图2)。不同构造单元可能存在局部地层缺失,其中神狐组仅在局部断陷内有沉积。新生代盆地经历了3个主要构造演化阶段,在珠江口盆地分别形成了河湖盆、半封闭海及开阔海3个连续的沉积体系^[14],河湖盆和半封闭海沉积贡献了盆地主要的烃源岩和储层,开阔海沉积时期则发育了盆地广阔的区域性盖层。此外,相变也形成了各类局部盖层和地层岩性圈闭^[18-19,21],这为地质碳封存创造了条件。咸水层是一种矿化度较高且无法抽取利用的地下含水层,其渗透率和孔隙度较高,在陆相和海相沉积盆地深部有分布广泛的咸水层,上下被低渗透或不渗透的隔水层夹在中间。除局部油气藏外,珠江口盆地面积大,800~3 500 m深度范围内咸水层广泛发育,具有巨大的地质碳封存潜力。

图 1 珠江口盆地构造单元简图^[13-15]Fig.1 Structural of the Pearl River Mouth Basin^[13-15]

2 盆地碳封存条件

2.1 碳封存地质安全性

晚中生代至新生代, 珠江口盆地受伸展作用, 构造形迹为张扭体系, 只有局部伴随升降而产生挤压形迹^[22]。盆内断裂主要为基岩断裂, 多以地堑、半地堑和地垒形式存在。由地震资料解释出的 20 多条较大断裂, 多数切穿下第三系及中新统, 少数断开中新统及第四系, 基本为 NEE-EW 走向, NEE 向断裂控制着坳陷的走向, 而 NWW-EW 向断裂控制着坳陷和圈闭的分布, 现今盆地内断裂活动较弱^[23], 因此, 断裂对碳储存影响不大。

根据中国地震局编纂的《中国地震动参数区划图 GB18306-2015》(2016)^[24], 珠江口盆地所在区域, 除北部隆起带的基本地震动峰值加速度为 0.2 g, 其他构造单元均低于 0.05 g, 盆地内大部分地区地震活动稀疏且微弱, 仅在北部隆起带发生过一次 6 级以上地震 ($M=6.75$, 1931 年 9 月), 由此可见盆地内地震作用强度非常弱, 地壳稳定性好。

珠江口盆地作为碳封存的盖层主要为韩江组上部 and 珠海组上部两套区域性泥岩盖层, 顶面平均埋深分别为 1 179 和 2 648 m, 厚度分别为 400~800、200~450 m, 泥地比分别为 70%~90% 和 57%~90%, 均为海相泥岩, 其中韩江组上部泥岩为主力盖层, 可见盖层封闭性良好。袁玉松^[25]研究表明, 南海北部深水区现今地温场具“热盆”特征, 且深水比浅水区更“热”, 主要包括珠江口盆地南部坳陷带, 地温梯度为 29.4~52.2 °C/km, 平均为 39.1±0.74 °C/km; 大地热流值为 24.2~121 mW/m², 平均为 77.5±14.8 mW/m²。南部坳陷带以北的地区, 海底温度为 2.5~15 °C, 平均为 8.2 °C^[26], 地温梯度为 29~113 °C/km, 平均为 42 °C/km, 大地热流值为 59.0~81.0 mW/m², 平均为 69.9 mW/m², 为次冷—次热盆地^[27-30]。盆地内新生代火山活动从早始新世到第四纪间歇性发生, 多为酸性和中性火山碎屑岩, 古近纪发育镁铁质和中性熔岩, 新近纪和第四纪发育玄武质熔岩, 这些火山活动通常规模较小且位于大型 NW 向断层附近^[31], 对碳储存影响不大。盆地内的油气田储层渗透率高、水量足、一次采收率高, 因此一直未开展二次、三次采油。近年来如惠

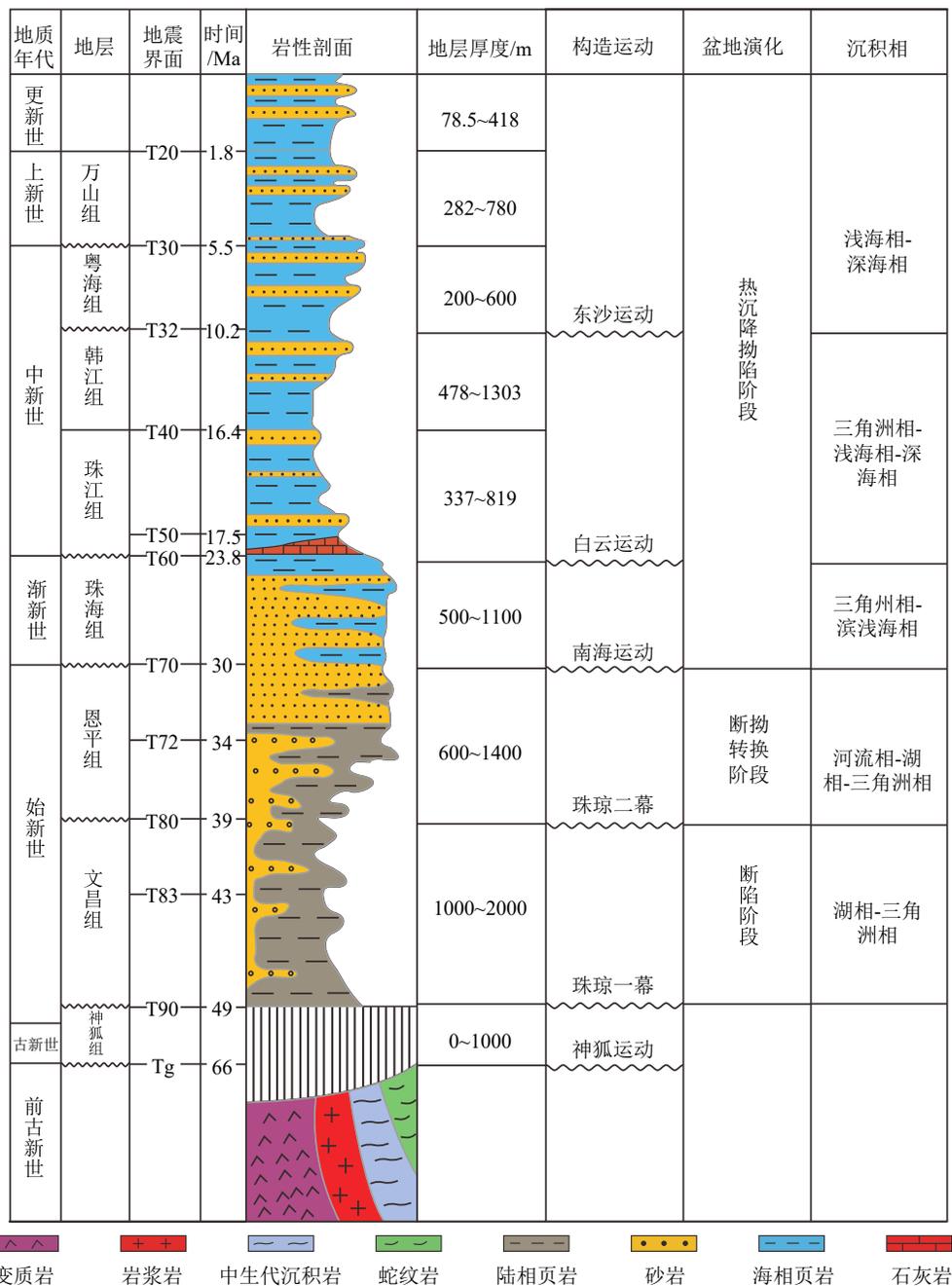


图2 珠江口盆地沉积地层柱状图^[7,15,18-19,21]

Fig.2 Sedimento-stratigraphic histogram of the Pearl River Mouth Basin^[7,15,18-19,21]

州 21-1 等许多老油田开发已到枯竭期,面临着含水率高的问题^[32-33]。由此可见,盆地内的水动力充足但由于断层不发育而无处排放,因此流动性差,油气不容易随水流逸散,且可以与储盖层配合形成水动力圈闭^[34]。刘雪雁等^[8]和彭佳龙等^[10]通过对珠江口盆地惠州 21-1 油田油气藏储层条件分析以及二氧化碳驱油(EOR)数值模拟认为,仅有少数局部盖层被气体突破,但未影响到储盖层的整体安全性。因此,盆地内类似于惠州 21-1 的油田构造具有较大 EOR 和碳封存潜力,将碳封存和 EOR 相结合

对晚期油气藏开发及沿岸城市 CO₂ 减排都具有重要意义。

2.2 勘探开发程度和社会环境风险

自 1990 年以来,珠江口盆地共有 50 多个油气田投入生产,自 1996 年以来连续保持年油产量超过 1000 万 m³,盆地 500 m 水深以浅区域,油气勘探开发程度高,总体处于油气藏开发中后期,部分油气田已临近枯竭。截止 2019 年,盆地内共有钻井 499 口,油气输送管网发达,开发工程数据详实,具

有离周边工业区较近(具中等以上适宜性的碳封存区带距离粤港澳大湾区碳排放源 150~250 km)、有效储集空间大、工程条件成熟等特点。另外,离岸碳封存相对于陆域碳封存,具有不干扰人口、农业和工业、对地下水没有损害等优点,上覆厚层海水不仅对碳埋藏具有保护作用,而且海底地质封存的压力管理过程比陆地地质封存相对容易,缺点在于基础设施和工程运营的成本相对较高。从整体出发,将 CO₂ 储存在海底地质构造中技术更容易、安全性更高、环境风险更低^[35]。

2.3 储盖层及封存潜力

受南海区域构造运动的影响,海平面的周期性变化在珠江口盆地不同地层形成了多套区域性盖层和大量局部盖层,沉积相的演变形成了包括三角洲、河道、低位扇砂岩及台地相、生物礁碳酸盐岩等碳储存空间。珠江口盆地储盖层较为丰富,主要有三套储盖组合^[7,36]。第一套储盖组合位于中新统中上部,韩江组砂岩为有利储层,厚度 308~370 m,孔隙度 15%~31%,渗透率 $1.732 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,砂地比 49.9%~54.2%,韩江组上部和粤海组泥岩都可作为良好的盖层,其中韩江组上部泥岩为区域性盖层^[37],渗透率为 $(0.002 \sim 0.2) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值小于 $0.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,珠一坳陷韩江组泥岩厚 400~600 m,泥厚比为 70%~80%,而珠二坳陷韩江组泥岩盖层则更佳,厚度增至 700~800 m,泥地比增至 80%~90%。第二套储盖组合由上渐新统珠海组浅海三角洲砂岩和上覆下中新统珠江组泥岩组成,珠海组海相地层中的厚层砂岩和深水扇砂岩的孔隙度为 10%~16%,渗透率为 $(4 \sim 85) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,已发现 8 m 和 4 m 厚的油藏,是很好的储层。上部沉积了巨厚的海侵泥岩,突破压力值在 2~10 MPa 之间,封闭能力强,为区域性盖层,在盆地各单元的泥厚比为 57%~90%。第三套储盖组合为始新统陆相砂岩储层、泥岩盖层以及始新统以上的所有盖层,其中文昌组泥岩为局部盖层,主要分布于珠三坳陷,泥厚比为 42%~75%,厚度为 191~655 m,但由于该套储盖组合理藏深度远超经济埋藏深度上限 3500 m,因此一般不作考虑。珠江口盆地还存在部分中新统碳酸盐岩储层,主要分布在东沙隆起,平均孔隙度为 9%~28%,平均渗透率为 $(7 \sim 1365) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

前人对珠江口盆地不同级别碳封存潜力做过详细的计算和评价。其中碳封存预测潜力(E级)评价以单个沉积盆地为评价单元,包括深部咸水层、油气田和煤田等储存介质的预测潜力,所需数据量

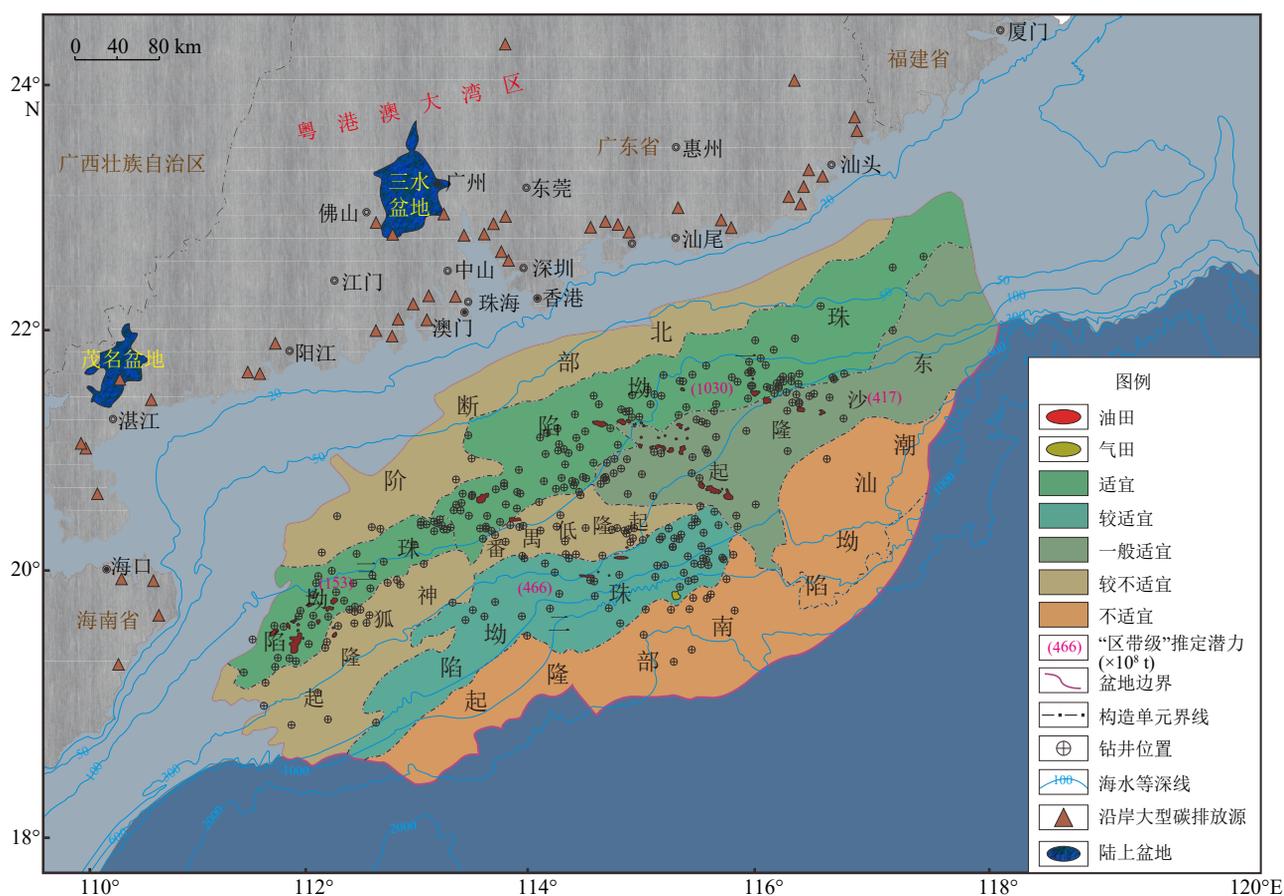
和精度相对较低,主要工作包括对各沉积盆地内 800~3500 m 深度地层内各主要储层和盖层进行高度概化,对区域盖层以下的咸水层赋予恰当的比例,使用盆地内不同位置的一些代表性勘探井或孔获得的潜力评价参数取平均值,如储层渗透率、孔隙度、盐度、地层压力、温度等,对主要油气田和煤田等的潜力评价参数则分别取相应资源范围内的平均值。郭建强等^[36]主要利用来自《中国含油气盆地图集(第二版)》、《中国海域含油气盆地图集》以及国土资源部油气资源战略研究中心编著的新一轮全国油气资源评价系列丛书之一《全国石油天然气评价》的数据,对我国陆域和海域主要盆地进行了区域级和盆地级碳封存潜力评价^[38]。评价结果显示,珠江口盆地的碳封存预测潜力(E级)为 308 Gt,单位面积储存潜力为 $152 \times 10^4 \text{ t/km}^2$,储存条件较好^[23]。据 Di 等^[7]的研究,珠江口盆地深部咸水层有效储存容量估计约为 308 Gt(1Gt= $1 \times 10^9 \text{ t}$),其中包括 0.06 Gt 的油气田有效储存容量,同时认为油气田碳封存容量虽然相比盆地总容量十分微小,但研究程度非常高,且已有较多学者对部分油气藏储层进行过详细的数值模拟,可作为碳封存示范工程选址。根据中国地质调查局水文地质环境地质调查中心做出的全国二氧化碳地质储存潜力评价与示范工程总成果报告^[38],珠江口盆地内具有中等以上碳封存适宜性的单元珠一坳陷、珠三坳陷、珠二坳陷和东沙隆起的推定潜力(D级)分别为 1.030×10^8 、 153×10^8 、 466×10^8 、 $417 \times 10^8 \text{ t}$ (表 1),共计 $2066 \times 10^8 \text{ t}$,面积分别为 4×10^4 、 3.6×10^4 、 3×10^4 、 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[39-42],单位面积 D 级推定潜力分别为 257.5×10^4 、 42.5×10^4 、 155.3×10^4 、 $139.0 \times 10^4 \text{ t}$ 。

2.4 碳封存适宜性

根据郭建强^[36,38]、霍传林^[43]碳封存适宜性评价采用的参数和方法,结合珠江口盆地的地质条件和工程条件,本文建立了珠江口盆地碳封存适宜性评价的指标体系(表 1),主要分为地质安全性、储层规模、经济适宜性和社会环境风险 3 个一级指标。其中,地质安全性分为区域地壳稳定性、区域性盖层特征、地热地质条件 3 个二级指标以及 14 个三级指标;储层规模分为储层属性和储存潜力 2 个二级指标以及 13 个三级指标,经济适宜性和社会环境风险分为 8 个二级指标。分析结果显示(表 1、图 3),珠一坳陷、珠三坳陷、珠二坳陷、东沙隆起的多数地质指标被评价为适宜或较适宜,少数指标评价为一般适宜,极少数指标被评价为较不适宜或不

表1 珠江口盆地碳封存地质条件对比^[38]Table 1 Comparison of geological conditions for carbon sequestration in the Pearl River Mouth Basin^[38]

碳封存地质条件		研究区	适宜	较适宜	一般适宜	较不适宜	不适宜	
区域 地壳 稳定性	地震动峰值加速度	<0.05g	<0.05g	0.05g	(0.05~0.10) g	(0.10~0.15) g	≥0.20g	
	历史地震震级(M)	北部隆起带1次 M6.75级	历史地震围空区	M<5 (1/2)	5(1/2)<M<6.0	6.0<M<7.0	M>7 (1/2)	
	活动断裂发育情况	远离活动断裂带	远离活动断裂带	距活动断裂近但未通过	有新近纪断裂通过但在全新世活动不明显	有规模较小、活动较弱断裂通过	位于强烈的活动断裂带	
地质 安全 性	主力盖层埋深(d)/m	珠江组平均埋深 1179	800~1200	1200~1700	1700~3500	3500以上	800以下	
	盖层岩性	海相泥岩	膏岩、泥岩、 钙质泥岩	含砂泥岩、 含粉砂泥岩	粉砂质泥岩、 砂质泥岩	泥质粉砂岩、 泥质砂岩	裂缝发育灰岩、 粗碎屑砂岩	
	主力盖层的单层厚度/m	400~800	>100	100~50	50~30	30~10	<10	
	盖层分布的连续性	连续, 稳定	连续, 稳定	较连续, 较稳定	连续性中等, 较稳定	连续性较差, 较不稳定	连续性差, 不稳定	
	盖层渗透率/10 ⁻³ μm ²	0.002~0.2, 平均 <0.02	<0.0001	0.0001~0.001	0.001~0.01	0.01~0.1	>0.1	
	地热 地质 条件	地热流值(mW·m ⁻²)	平均值69.9	30~50	50~70	70~90	90~150	>150
	地温梯度(°C/100 m)	2.9~11.3/4.2	<2.0冷盆地	2.0~3.0次冷盆地	3.0~4.0中等	4.0~5.0次热盆地	>5.0热盆	
	海底温度/°C	2.5~15, 平均8.2	≤2	2~3	3~10	10~25	>25	
	沉积盆地性质	张扭性	压性	压扭性	扭性	张扭性	张性	
	水动力作用	水力封闭和封堵作用	水力封闭作用	水力封堵作用	水力封堵作用	水力运移逸散作用		
火山活动	较弱	弱	较弱	中等	强	较强		
储 存 规 模	沉积盆地面积/km ²	200000	>10000	10000~5000	5000~1000	1000~500	<500	
	沉积地层厚度/m	7000~14000	≥3500	3500~1600	1600~800			
	适宜区带构造单元面积/10 ⁴ km ²	珠一坳陷4 珠三坳陷3.6 珠二坳陷3 东沙隆起3	≥5000	5000~1000	1000~500			
	储层属性	储层厚度/m	韩江组308~370 珠海组450~800	>80	50~80	20~50	10~20	<10
	储集层岩性	砂岩	碎屑岩	碎屑岩、碳酸盐岩 混合	碳酸盐岩	岩浆岩、变质岩、岩 丘等特殊储层	无	
	储层砂厚比/%	49.9~54.2	>60	60~40	40~20	20~10	<10	
	储层孔隙度/%	15~31	≥25	25~20	20~10	10~5	<5	
	储层渗透率/10 ⁻³ μm ²	珠江组1.71 珠海组4~85	≥50	50~10	10~1	1~0.1	<0.1	
	资源潜力(油气规模)	大, D级29.1×10 ⁴ t	大	较大	一般	较小	小	
	E级预测潜力/10 ⁴ t	3080	>1000	1000~100	100~5	5~0.5	<0.5	
单位面积E级预测潜力/(10 ⁴ t·km ⁻²)	152	>500	500~100	100~50	50~5	<5		
储 存 潜 力	D级推定潜力/10 ⁴ t	珠一坳陷1030 珠三坳陷153 珠二坳陷466 东沙坳陷417	>50	50~25	25~0.5	0.5~0.02	<0.02	
	单位面积D级预测潜力/(10 ⁴ t·km ⁻²)	珠一坳陷257.5 珠三坳陷42.5 珠二坳陷155.3 东沙坳陷139.0	>20	20~10	10~5	5~0.1	<0.1	
	勘探开发程度	开发后期	开发中	勘探程度高	勘探程度一般	勘探程度低	未勘探过	
	数据支持情况	499口钻井、69个油藏, 勘探开发数据详实	数据充分可靠	数据较充分较可靠	数据一般充分一般可靠	数据不太充分	数据不充分	
	碳源密度	北部沿岸排放源很多	高	较高	中	低	零	
经济 适宜 性和 社会 环境 风险	离岸距离/km	150~300	0~50	50~100	100~200	200~500	>500	
	海水深度/m	0~200, 平均93	0~50	50~100	100~200	200~500	>500	
	土地利用现状	未利用土地	沙漠等未利用土地	牧草地	林地	耕地、园地	居民点、工矿交通用地、水域	
人口密度/(人/km ²)	无人区	≤25 极端稀疏区	25~50 绝对稀疏区	50~100 相对稀疏区	100~200 一般过渡区	≥200 集聚区		
基础工程条件	油气工程条件成熟	大规模	较多	一般	较少	无		

图 3 珠江口盆地碳源、碳封存潜力及适宜性综合评价图^[7,9,23,25]Fig.3 Comprehensive assessment of carbon source, and carbon sequestration potential and suitability of the Pearl River Mouth Basin ^[7,9,23,25]

适宜, 总体认为珠江口盆地中的珠一坳陷、珠三坳陷、珠二坳陷、东沙隆起具有良好的碳封存适宜性。

3 盆地碳源及源汇匹配性分析

3.1 碳源及碳排放量

珠江口盆地北部沿岸的广东省、海南省、香港和澳门等 4 大地区的 CO₂ 排放源与盆地碳封存区构成良好的源汇匹配关系。根据《IPCC 国家温室气体清单指南》, 中国碳核算数据库 (CEADs) 利用中国统计局最新能源消耗数据以及各行业产能, 结合研究所得的碳排放因子—各行业能源消耗量或产能与碳排放量的倍率, 计算得出了中国省级和地市级按行业分配的碳排放清单^[1-4]。利用该清单编制粤港澳琼四地区碳排放量柱状趋势图 (图 4), 从图中可以看出, 四地区的碳排放量逐年上升, 1997—2011 年碳排放量上升较快, 平均增长率为 8.07%, 2011—2019 年上升放缓, 平均增长率为 2.35%, 可能因为 2010 年 11 月正值“十一五规划”期末, 我国制定了“十二五”节能降碳目标——五年内实现单

位 GDP 能耗下降 18%、二氧化碳排放强度降低 19.5%。至 2019 年, 四地区的碳排放总量已达到 673.85 Mt (1 Mt=1×10⁶ t), 其中广东省为 585.81 Mt, 占比 87%, 是珠江口盆地面对的最大碳排放源, 香港澳门和海南分别占比 6% 和 7%, 其中最靠近珠江口盆地、最具有碳封存经济性和可操作性的粤港澳大湾区 (包括香港特别行政区、澳门特别行政区和广东省广州市、深圳市、珠海市、佛山市、惠州市、东莞市、中山市、江门市、肇庆市) 及海南两地区的碳排放量为 412.68 Mt, 占总量的 68%。一方面是由于广东省的人口和面积基数及产业规模都比其他三地区大, 需要更多的能源供应, 其中火电厂所产生的电能是最大的消耗能源, 另外广东省以电子信息产品制造业为主要产业, 虽然不是高碳排放产业, 但是与海南和澳门的旅游及酒店业、香港的金融业及房地产业相比, 其能源消耗量更大, 因此带来的碳排放量相对较高一些。WANG 等^[6]测量了 2009—2016 年中国 6 个地点大气中 CO₂ 的摩尔分数, 并估算出中国陆地生物圈的平均碳汇为 -1.11±0.38 pg/a, 相当于此期间陆地生物圈年固碳量占人为年碳排放量的 45%, 植被覆盖量不同的城市

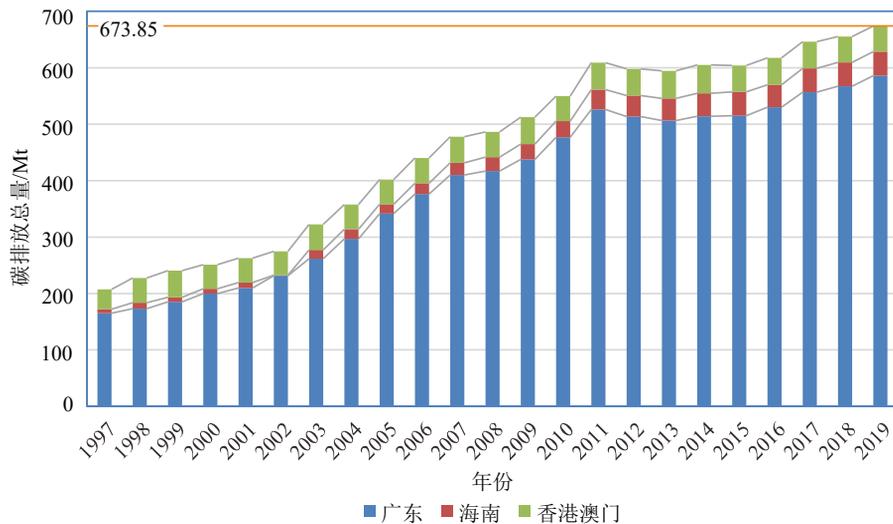


图4 粤港澳琼四地区年碳排放总量变化趋势图

Fig.4 The variation trend of total annual carbon emissions in Guangdong, Hong Kong, Macao, and Hainan

其固碳量在平均水平上下浮动。李晓江等^[5]研究得出粤港澳大湾区植被固碳量约占碳排放量的47%，而海南旅游业较为发达，植被覆盖率较高而且碳排放量较低，因此可用47%的平均固碳量来大致估算珠江口盆地碳源粤港澳大湾区及海南四地的碳赤字为53%(约218.72 Mt)。

据周泽兴^[44]研究，从技术和成本上分析，二氧化碳的捕集非常适用于规模较大且排放集中的碳排放源，如火力发电厂、水泥厂、钢铁企业等。白冰等^[9]收集了中国30个省(香港、澳门、台湾和西藏除外)1998至2004年火电、水泥、钢铁、炼油、乙烯、合成氨、环氧乙烷、氢等八类主要碳排放工业源的排放数据，结果显示火电、水泥和钢铁三类企业是最大的碳排放源，在八类工业源的年碳排放构

成中占比较为稳定，平均为91%，三类企业的碳排放总量年平均增长率为9.7%，贡献了我国碳排放总量增长的绝大部分，三类企业中的大多数是大规模(CO_2 年排放量 >0.1 Mt)、高浓度(烟道气中 CO_2 浓度 $>95\%$)排放源，主要密集分布在东南沿海地区(图3)。

3.2 源汇匹配性分析

根据2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”目标要求，即至2030年我国碳排放总量到达峰值不再增长，至2060年我国向大气中排放的二氧化碳量，除去植物固碳量，其余部分可以完全封存于地质体中。根据白冰等^[9]的碳排放量企业中分布情况，结合CEADs的数据，计算得出2019年粤港澳琼四地

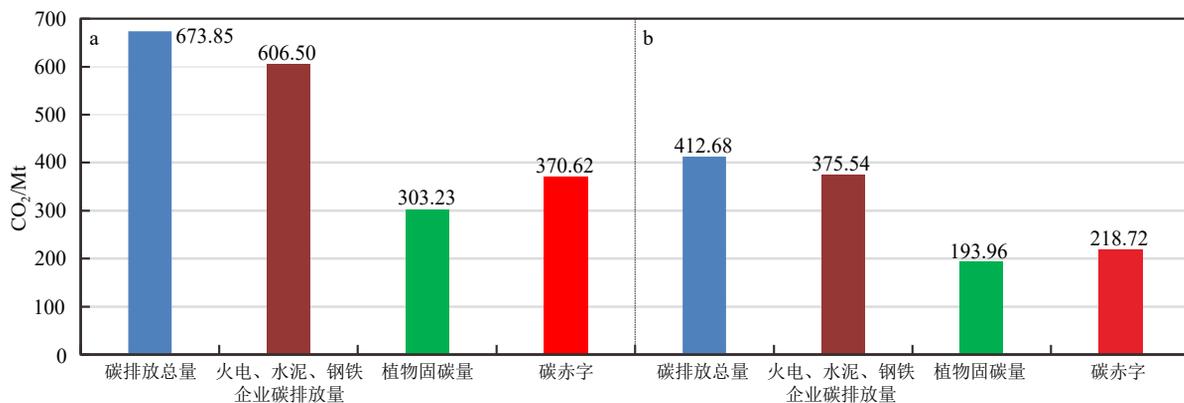


图5 粤港澳琼四省碳排放和碳赤字柱状图

a. 粤港澳琼四省碳源总体碳排放情况; b. 大湾区和琼碳排放情况, 其靠近珠江口盆地, 且大规模碳源较集中, 适合捕集和封存。

Fig.5 Histogram of carbon emissions and carbon deficit in Guangdong, Hong Kong, Macao, and Hainan

a: Overall carbon emissions; b: carbon emissions in the Greater Bay and Hainan Province to which the Pearl River Mouth Basin is attached and large-scale carbon sources are concentrated, which is suitable for capture and sequestration.

区的火电、水泥和钢铁企业的年碳排放量约为606.5 Mt,且广东省的大规模碳排放点源主要分布在粤港澳大湾区(图3)。初步估计,只需将来自粤港澳大湾区和海南的火力发电厂、水泥厂及钢铁厂中58.24%的CO₂(218.70 Mt)封存于珠江口盆地,则粤港澳大湾区和海南的总碳赤字降为零,从而达到碳中和,而当其封存量达到98.69%(370.62 Mt)时,则粤港澳琼4个省级行政区均达到碳中和(图5)。

4 结论

(1)从地质安全性、盆地碳封存潜力、经济适宜性及社会环境风险4个方面综合评估认为,珠一坳陷和珠三坳陷为碳封存适宜区带,珠二坳陷为较适宜区带,东沙隆起为一般适宜区带,其他区域为较不适宜和不适宜区带。

(2)珠江口盆地沿岸碳源主要为粤港澳琼4个省级行政区的碳排放,主要分布在围绕珠江口的粤港澳大湾区,以火电厂、水泥厂和钢铁厂三类企业碳排放占比最高,达92%。从可操作性和经济成本上考虑,此三类企业是高浓度、大规模排放源,非常适合进行碳捕集、封存或利用,因此可作为珠江口盆地的主要碳封存目标。

(3)粤港澳琼4个省级行政区的碳排放与珠江口盆地碳封存区构成良好的源汇匹配关系。粤港澳琼四地区碳源2019年的总碳排放量为673.85 Mt,总碳赤字为370.62 Mt。只需将大湾区及海南的大规模碳排放点源碳排放量的98.69%封存到珠江口盆地,即可使粤港澳琼四地区达到碳中和。

参考文献 (References)

- [1] Shan Y L, Liu J H, Liu Z, et al. New provincial CO₂ emission inventories in China based on apparent energy consumption data and updated emission factors [J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 742-750.
- [2] Shan Y L, Guan D B, Zheng H R, et al. China CO₂ emission accounts 1997-2015 [J]. *Scientific Data*, 2018, 5: 170201.
- [3] Shan Y L, Huang Q, Guan D B, et al. China CO₂ emission accounts 2016-2017 [J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 54.
- [4] Guan Y R, Shan Y L, Huang Q, et al. Assessment to China's recent emission pattern shifts [J]. *Earth's Future*, 2021, 9(11): e2021EF002241.
- [5] 李晓江, 何舸, 罗彦, 等. 粤港澳大湾区碳排放空间特征与碳中和策略[J]. *城市规划学刊*, 2022(1): 27-34. [LI Xiaojiang, HE Ge, LUO Yan, et al. Spatial characteristics of carbon emissions and carbon neutralization strategies for Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area [J]. *Urban Planning Forum*, 2022(1): 27-34.]
- [6] Wang J, Feng L, Palmer P I, et al. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data [J]. *Nature*, 2020, 586(7831): 720-723.
- [7] Zhou D, Zhao Z X, Liao J, et al. A preliminary assessment on CO₂ storage capacity in the Pearl River Mouth Basin offshore Guangdong, China [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, 5(2): 308-317.
- [8] 刘雪雁. 南海北部珠江口盆地惠州21-1油田CO₂-EOR与碳封存潜力评价研究[D]. 中国科学院大学. [LIU Xueyan. Research on CO₂-EOR and carbon sequestration potential evaluation of Huizhou 21-1 Oilfield in the the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[D]. University of the Chinese Academy of Sciences.]
- [9] 白冰, 李小春, 刘延锋, 等. 中国CO₂集中排放源调查及其分布特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(S1): 2918-2923. [BAI Bing, LI Xiaochun, LIU Yanfeng, et al. Preliminary study on CO₂ industrial point sources and their distribution in China [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(S1): 2918-2923.]
- [10] 彭佳龙, 陈广浩, 周蒂, 等. 珠江口盆地惠州21-1构造二氧化碳地质封存数值模拟[J]. *海洋地质前沿*, 2013, 29(9): 59-70. [PENG Jialong, CHEN Guanghao, ZHOU Di, et al. Numerical simulation for offshore storage of carbon dioxide in Huizhou 21-1 trap, Pearl River Mouth Basin, China [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2013, 29(9): 59-70.]
- [11] 姚伯初. 南海新生代的构造演化与沉积盆地[J]. *南海地质研究*(十), 1998: 1-17. [YAO Bochu. The tectonic evolution and sedimentary basins of South China Sea in Cenozoic [J]. *Geological Research of the South China Sea (Memoir 10)*, 1998: 1-17.]
- [12] 冯志强, 缪宛岑. 南海珠江口盆地地质构造特征和含油气远景[J]. *石油实验地质*, 1982, 4(1): 19-25. [FENG Zhiqiang, MIAO Wancen. The geological structures and the oil and gas potential of the Zhujiangkou Basin, the South China Sea [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1982, 4(1): 19-25.]
- [13] 杜家元, 施和生, 丁琳, 等. 珠江口盆地(东部)地层岩性油气藏勘探有利区域分析[J]. *中国海上油气*, 2014, 26(3): 30-36,55. [DU Jiayuan, SHI Hesheng, DING Lin, et al. An analysis of favorable exploration areas for stratigraphic-lithologic hydrocarbon accumulation in the eastern Pearl River Mouth basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2014, 26(3): 30-36,55.]
- [14] 王善书. 珠江口盆地地质构造的基本特征[J]. *石油学报*, 1982(S1): 1-13. [WANG Shanshu. Basic geological structural features of the basin at the mouth of Pearl River [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1982(S1): 1-13.]
- [15] 钟建强. 珠江口盆地的构造特征与盆地演化[J]. *海洋湖沼通报*, 1994, 94(1): 1-8. [ZHONG Jianqiang. Characteristics of geologic structure and basin evolution in Pearl River Mouth Basin [J]. *Transaction of Oceanology and Limnology*, 1994, 94(1): 1-8.]
- [16] 崔莎莎, 何家雄, 陈胜红, 等. 珠江口盆地发育演化特征及其油气成藏地质条件[J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(3): 384-391. [CUI Shasha, HE Jiaxiong, CHEN Shenghong, et al. Development characteristics of pearl river mouth basin and its geological conditions for oil and gas accumulation [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(3): 384-391.]

- [17] 陈建文, 梁杰, 张银国, 等. 中国海域油气资源潜力分析与黄东海海域油气资源调查进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(6): 1-29. [CHEN Jianwen, LIANG Jie, ZHANG Yinguo, et al. Regional evaluation of oil and gas resources in offshore China and exploration of marine Paleo-Mesozoic oil and gas in the Yellow Sea and East China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(6): 1-29.]
- [18] 詹诚, 卢绍平, 方鹏高. 汇聚背景下的多幕裂陷作用及其迁移机制: 以南海北部珠江口盆地为例[J]. *地学前缘*, 2022, 29(4): 307-318. [ZHAN Cheng, LU Shaoping, FANG Penggao. Multiphase rift and migration mechanism in the Pearl River Mouth Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(4): 307-318.]
- [19] 王宁, 张铜耀, 明承栋, 等. 珠江口盆地东部珠一坳陷古近系不同类型烃源岩和原油热裂解生气特征[J]. *海洋地质前沿*, 2022, 38(8): 67-76. [WANG Ning, ZHANG Tongyao, MING Chengdong, et al. Different types of Paleogene source rocks and characteristics of pyrolysis gas generation of crude oil in Zhuyi Depression, Pearl River Mouth Basin [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(8): 67-76.]
- [20] 刘富强. 利用卫星重力资料研究珠江口盆地北部边界及构造区划[D]. 长安大学硕士学位论文, 2014. [LIU Fuqiang. Study on the northern border and tectonic division of Pearl River Mouth Basin By using satellite gravity data[D]. Master Dissertation of Chang'an University, 2014.]
- [21] 贺勇, 邱欣卫, 雷永昌, 等. 珠江口盆地陆丰13东洼新生代构造演化与油气成藏特征[J]. *岩性油气藏*, 2023, 35(1): 74-82. [HE Yong, QIU Xinwei, LEI Yongchang, et al. Tectonic evolution and hydrocarbon accumulation characteristics of Cenozoic in eastern Lufeng 13 sub-sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(1): 74-82.]
- [22] 吕炳全, 李平鲁, 简馨秀. 珠江口盆地构造应力场与油气聚集[J]. *中国海上油气(地质)*, 1991, 5(1): 25-37. [LÜ Bingquan, LI Pinglu, JIAN Xinxu. Tectonic stress field & oil & gas accumulation of pearl river Mouth Basin [J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 1991, 5(1): 25-37.]
- [23] 陈长民. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社, 2003. [CHEN Changmin. Formation Conditions of Tertiary Oil and Gas Reservoirs in the Pearl River Mouth Basin (East)[M]. Beijing: Science Press, 2003.]
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 18306-2015 中国地震动参数区划图[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 18306-2015 Seismic ground motion parameters zonation map of China[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [25] 米立军, 袁玉松, 张功成, 等. 南海北部深水区地热特征及其成因[J]. *石油学报*, 2009, 30(1): 27-32. [MI Lijun, YUAN Yusong, ZHANG Gongcheng, et al. Characteristics and genesis of geothermal field in deep-water area of the northern South China Sea [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(1): 27-32.]
- [26] 胡圣标, 龙祖烈, 朱俊章, 等. 珠江口盆地地温场特征及构造-热演化[J]. *石油学报*, 2019, 40(S1): 178-187. [HU Shengbiao, LONG Zulie, ZHU Junzhang, et al. Characteristics of geothermal field and the tectonic-thermal evolution in Pearl River Mouth Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(S1): 178-187.]
- [27] 唐晓音, 黄少鹏, 张功成, 等. 南海北部陆缘珠江口盆地岩石圈热结构[J]. *地球物理学报*, 2018, 61(9): 3749-3759. [TANG Xiaoyin, HUANG Shaopeng, ZHANG Gongcheng, et al. Lithospheric thermal structure of the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(9): 3749-3759.]
- [28] 唐晓音, 黄少鹏, 杨树春, 等. 南海珠江口盆地钻井BHT温度校正及现今地温场特征[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(8): 2911-2921. [TANG Xiaoyin, HUANG Shaopeng, YANG Shuchun, et al. Correcting on logging-derived temperatures of the Pearl River Mouth Basin and characteristics of its present temperature field [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(8): 2911-2921.]
- [29] 唐晓音, 胡圣标, 张功成, 等. 珠江口盆地大地热流特征及其与热岩石圈厚度的关系[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(6): 1857-1867. [TANG Xiaoyin, HU Shengbiao, ZHANG Gongcheng, et al. Characteristic of surface heat flow in the Pearl River Mouth Basin and its relationship with thermal lithosphere thickness [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(6): 1857-1867.]
- [30] 饶春涛, 李平鲁. 珠江口盆地热流研究[J]. *中国海上油气(地质)*, 1991, 5(6): 7-18. [RAO Chuntao, LI Pinglu. Study of heat flow in pearl river Mouth Basin [J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 1991, 5(6): 7-18.]
- [31] 李平鲁, 梁慧娴. 珠江口盆地新生代岩浆活动与盆地演化, 油气聚集的关系[J]. *广东地质*, 1994, 9(2): 23-24. [LI Pinglu, LIANG Huixian. The relationship between Cenozoic magmatic activity and basin evolution, oil and gas accumulation in the Pearl River Mouth Basin [J]. *Guangdong Geology*, 1994, 9(2): 23-24.]
- [32] 《中国油气田开发志》总编纂委员会. 中国油气田开发志(卷二十七): 南海东部油气区卷[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011. [China Oil and Gas Field Development Journal, General Compilation Committee. China Oil and Gas Field Development Journal, Volume 27, East South China Sea Oil and Gas Region Volume[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.]
- [33] 《中国油气田开发志》总编纂委员会. 中国油气田开发志: 南海东部油气区油气田卷[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011. [Editorial Committee of China's Oil and Gas Field Development Journal. China's Oil and Gas Field Development Journal: Oil and Gas Fields in the Eastern South China Sea Oil and Gas Region Volume[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.]
- [34] 叶建平, 武强, 王子和. 水文地质条件对煤层气赋存的控制作用[J]. *煤炭学报*, 2001, 26(5): 459-462. [YE Jianping, WU Qiang, WANG Zhihe. Controlled characteristics of hydrogeological conditions on the coalbed methane migration and accumulation [J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(5): 459-462.]
- [35] Schrag D P. Storage of carbon dioxide in offshore sediments [J]. *Science*, 2009, 325(5948): 1658-1659.
- [36] 郭建强, 文冬光, 张森琦, 等. 中国二氧化碳地质储存适宜性评价与示范工程[M]. 北京: 地质出版社, 2014. [GUO Jianqiang, WEN Dongguang, ZHANG Senqi, et al. China's Carbon Dioxide Geological Storage Suitability Evaluation and Demonstration Project[M]. Beijing: Geology Press, 2014.]

- [37] 陈建亮, 施和生, 舒誉, 等. 测井盖层评价方法在珠一坳陷的应用[J]. *中国海上油气*, 2007, 19(3): 157-161. [CHEN Jianliang, SHI Hesheng, SHU Yu, et al. The application of seal evaluation method with log data in Zhu I depression, Pearl River Mouth basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2007, 19(3): 157-161.]
- [38] 郭建强. 全国二氧化碳地质储存潜力评价与示范工程总成果报告[R]. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 2013. [GUO Jianqiang. Report on the overall results of the national carbon dioxide geological storage potential evaluation and demonstration project[R]. Hydrogeological Environmental Geological Survey Center of the China Geological Survey, 2013.]
- [39] 朱俊章, 朱明, 史玉玲, 等. 珠一坳陷油气成藏组合划分及有利成藏组合预测[J]. *海洋地质前沿*, 2022, 38(5): 67-75. [ZHU Junzhang, ZHU Ming, SHI Yuling, et al. Division of hydrocarbon accumulation assemblage and prediction of favorable accumulation assemblage in Zhu I Depression [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(5): 67-75.]
- [40] 廖成基, 廖明光. 珠江口盆地珠三坳陷地层及沉积演化特征分析[J]. *化工设计通讯*, 2020, 46(2): 232,242. [LIAO Chengji, LIAO Mingguang. Analysis on the strata and sedimentary evolution characteristics of Zhusan depression in the Pearl River Mouth Basin [J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2020, 46(2): 232,242.]
- [41] 吕彩丽, 张功成, 杨东升. 珠江口盆地珠二坳陷文昌组构造差异性与动力学成因机制[J]. *地学前缘*, 2017, 24(6): 333-341. [LÜ Caili, ZHANG Gongcheng, YANG Dongsheng. Differential structure and dynamic mechanism of Wenchang Formation in the Zhu II depression of the Pearl River Mouth Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(6): 333-341.]
- [42] 曾清波, 张功成, 廖宗宝, 等. 珠江口盆地东沙隆起早中新世台缘带特征及勘探方向[J]. *海相油气地质*, 2015, 20(1): 17-24. [ZENG Qingbo, ZHANG Gongcheng, LIAO Zongbao, et al. Geological feature and prospecting potential of early Miocene platform margin belt in Dongsha Uplift, Zhujiangkou Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2015, 20(1): 17-24.]
- [43] 霍传林. 我国近海二氧化碳海底封存潜力评估和封存区域研究[D]. 海事大学博士学位论文, 2014. [HUO Chuanlin. Study on the potential evaluation and the storage areas of the carbon dioxide seabed storage in offshore China[D]. Doctor Dissertation of Maritime University, 2014.]
- [44] 周泽兴. 火电厂排放CO₂的分离回收和固定技术的研究开发现状[J]. *环境科学进展*, 1993, 1(1): 56-73. [ZHOU Zexing. Present R&D status of technological development for CO₂ capture and fixation from thermal power plant flue gas [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 1993, 1(1): 56-73.]