

❖ 特约主编



韦恒叶,男,1980年12月生,西南石油大学教授,博士生导师,《沉积学报》青年编委。主要从事沉积学和地球化学教学与研究。目前研究主要集中在华南中二叠世古气候古海洋与生物灭绝事件、暗色沉积岩有机质富集机理以及层序岩相古地理等方面。



严德天,男,1977年12月生,中国地质大学(武汉)教授,博士生导师。主要从事沉积学、沉积地球化学和盆地分析等方面的教学和科研工作;目前主要研究方向为重大地质事件与有机质富集机制、细粒沉积岩沉积—成岩作用以及构造—层序—沉积耦合关系研究等。



陈代钊,男,1963年4月生,中国科学院地质与地球物理研究所研究员(兼中国科学院大学岗位教授),博士生导师。主要从事沉积学(特别是海相碳酸盐岩、细粒碎屑岩以及硅质岩沉积学)和沉积地球化学的基础理论和应用研究;对南方泥盆系碳酸盐岩沉积学、旋回—层序地层与台—盆演化,扬子、塔里木地块震旦系—下古生界碳酸盐沉积相与沉积演化,深层—超深层白云岩储层发育与保持机制,古生代重要地质时期(E-C, O-S, F-F, P)古海洋环境与生物协同演化以及有机质富集机理开展过系统研究。曾主持多项国家自然科学基金委员会项目(面上、重点)和大型企业委托项目,参加多项国家重大基础研究项目(973或重点研发项目)和国家(油气)重大专项的研究工作;现主持重点基金项目“晚泥盆世生态危机与跨圈层耦合作用”。中国矿物岩石地球化学学会沉积学专业委员会和中国地质学会沉积地质专业委员会委员, *Facies* 杂志副主编,《沉积学报》等期刊编委,在 *Science Advances*, *Nature Communications*, *Geology*, *Earth and Planetary Science Letters*, *Sedimentology* 等国内外学术刊物发表论文 130 余篇(其中第一或通信作者 SCI 期刊论文 50 余篇, H-index = 35, 被引 4 000 余次)。

“富碳”沉积岩发育机制及其碳循环意义

碳是地球上最重要的元素,也是生命的基础元素,它与地球演化、生命起源、气候变迁和资源利用等密切相关。碳酸盐岩与富有机质(泥状)岩均是重要的富“碳”沉积(岩),其规模化沉积(聚集)会造成碳的大规模封存及全球碳循环异常,进而造成地球气候、海洋环境、生态及生命过程的异常响应,影响地球的宜居性与可持续性;但二者的环境效应是不同的。

碳酸盐岩是自然界中重碳酸钙溶液过饱和引发沉淀而形成的,或者是通过玄武岩和橄榄岩的碳酸盐化作用而形成^[1]。沉积碳酸盐岩是地球表层碳酸盐矿物的主要存在形式。碳酸盐岩具有快速溶解反应动力学过程,通过消耗大气或土壤 CO₂,在地质时间尺度上调节大气 CO₂ 浓度,在地球表层形成碳酸盐岩—水—气(CO₂)—土—生的岩溶碳循环过程(岩溶动力系统)^[2]。全球碳酸盐岩广泛分布,出露面积约 2 200×10⁴ km²^[3]。在漫长的地质历史中,这些沉积碳酸盐岩和蚀变洋壳中的碳酸盐大部分可能随板块俯冲作用循环进入深部地幔^[4],并引起壳—幔组成物质的物理性质和化学组成变化^[5]。在地幔楔内,碳酸盐岩由于富水流体的注入而发生分解,使得流体富 CO₂ 注入上覆地层,CO₂ 被移除并以碳酸盐矿物沉积下来^[6-8]。目前研究推测碳酸盐化的弧前地幔是长期碳库,可能发生熔融,通过火山喷发输出大量 CO₂^[9-10]。这是一个缓慢却持续不断地影响大气二氧化碳浓度进而调控地球气候的过程。这一过程作为地球碳循环的“缓冲器”,协助调节了大气二氧化碳含量,揭示了地球内部与外部环境之间微妙而深刻的联系,为我们理解地球宜居条件的维持提供新视角^[11-12]。

富有机质页岩广泛沉积于地质历史的各个时期,作为地球演化过程中的重要碳汇,是碳循环研究关注的重要对象;同时,富有机质页岩较好地记录了地质历史时期的重大生物—环境—地质事件,也是认识地球气候、环境和生命曲折演化的重要载体^[13-14]。沉积有机质的堆积有赖于水体营养水平、含氧水平以及有机质接受分解的时间长短等条件变化^[15]。而这些条件的变化与沉积环境的变化密切相关,特别是沉积环境的剧变经常引起营养水平输入的突变以及古水体含氧水平的突然下降,例如海平面与体系域的变化^[16-17]、大型不整合界面、构造裂隙深水相记录的热液活动以及极热事件强陆地风化作用等^[18]。营养物质输入促进浮游生物繁荣形成的有机质是沉积物有机质堆积富集的基础。沉积有机质的超常富集(有机碳含量介于 5 wt.%~6 wt.%)一般形成于富营养化水体^[19-20]。超高的初级生产力在提高有机质分解耗氧过程中降低了水体总体氧的含量,即使水体存在源源不断的氧输入以保持水体暂时性氧输入,但是这些输入的氧最终被有机质分解而消耗完毕。水体中氧的动态平衡过程能维持底部生态系统较为健康的运行与发展,该过程常记录在富含底栖动物的油页岩等富碳沉积物中,特别是钙质泥岩或水平层理泥灰岩。即使在分层缺氧的环境中,维持较高的有机质通量也需要增强营养物质的重复利用与循环^[21]。沉积物在缺氧环境下硫酸盐还原分解有机质与氧化环境下喜氧分解有机质的数量是相等的^[22-23],说明缺氧环境下有机质的有利保存并不是通过降低细菌分解有机质的能力,而是通过其他的途径。低生产力水平背景下硫化或铁化缺氧环境有机质富集的实例分析表明,有机质的硫化是实现缺氧环境大量保存有机质的重要途径^[24],即通过提高有机质埋藏的比例而不是降低细菌分解能力进而富集有机质。在有机质埋藏比例通常低于 1% 初级生产力的条件下,该途径是实现有机质超常富集的有效方式。

碳酸盐岩可以作为重要的油气储集体或沉积—层控矿床的容矿层,而富有机质岩常作为油气烃源岩或自生自储的非常规油气储集体,具有优异的资源(或能源)效应。本专辑聚焦这些深时富“碳”沉积,介绍通过沉积学(包括沉积相分析)、沉积地球化学等方法的综合约束,恢复碳酸盐岩沉积和/或成岩(流体)环境、富有机质岩石形成的异常海洋—气候背景,揭示地质时间尺度内的岩石圈—生物圈—水圈—大气圈之间的碳循环过程,并为“富碳”类岩石的资源潜力评估提供理论依据。本专辑收集的 13 篇论文从上述几个方面对碳酸盐岩以及富有机质沉积岩进行了论述。张力钰等^[25]分析晚泥盆世弗拉—法门(F-F)转折期古海洋特征,发现快速气候波动引起大陆风化作用增强会造成浅海的富营养化,形成较高初级生产力进而导致海洋缺氧。李娟等^[26]和葛小瞳等^[27]均认为陆源的输入对有机质堆积有较为重要的影响,前者认为存在正反两方面的影响,而后者认为在上二叠统富碳页岩中是正面的影响。韦恒叶等^[28]通过层序地层学和元素地球化学的约束,发现上二叠统有机质超常富集主要形成于广旺—开江—梁平海槽快速发展和高潮稳定时期,裂隙槽形成过程中热液活动和陆地风化带来营养物质是有机质富集的主控因素。而热液活动也同样记录在中二叠统孤峰组黑色硅质岩中,很可能是该时期有机质富集的主控因素之一^[29]。刘牧等^[30]研究藏北羌塘盆地上侏罗统索瓦组红色灰岩成因时发现,该时期浅海存在较多的陆源物质输入,同时富含他形赤铁矿,这或许是羌塘盆地索瓦组发育油页岩的重要原因之一。魏小松等^[31]利用自然伽马曲线分析天文轨道旋回变化,并据此重构相对海平面变化,认为下寒武统牛蹄塘组有机质富集与相对海平面变化没有相关性,这可能与海平面的升与降均对营养物质的输入有较大影响有关。朱柏宇等^[32]将沉积微相与元素地球化学相结合,推测准噶尔盆地芦草沟组富有机质深湖相泥岩形成于较高初级生产力水平以及富氧的环境。王丹^[33]、唐攀等^[34]、丁一等^[35]以及郭川等^[36]从层序、白云岩沉积环境成因以及古地理格局方面论述了沉积环境对碳酸盐沉积非均质性的空间控制作用以及对上下富有机质页岩形成的启示。孙鹏等^[37]从沉积有机质烃源岩的油源对比出发,重建了富碳烃源岩的沉积环境。

参考文献 (References)

- [1] Kelemen P B, Matter J, Streit E E, et al. Rates and mechanisms of mineral carbonation in peridotite: Natural processes and recipes for enhanced, in situ CO₂ capture and storage[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2011, 39: 545-576.
- [2] 吴庆, 郭永丽, 肖琼, 等. 碳酸盐岩默默地献身于“双碳”目标[J]. *中国矿业*, 2022, 31(增刊1): 215-216, 243. [Wu Qing, Guo Yongli, Xiao Qiong, et al. Carbonates devote themselves to the target of “Double Carbon” silently[J]. *China Mining Magazine*, 2022, 31(Suppl. 1): 215-216, 243.]
- [3] 袁道先. 现代岩溶学和全球变化研究[J]. *地学前缘*, 1997, 4(1/2): 17-25. [Yuan Daoxian. Modern karstology and global change study[J]. *Earth Science Frontiers*, 1997, 4(1/2): 17-25.]
- [4] Thomsen T B, Schmidt M W. Melting of carbonated pelites at 2. 5-5. 0 GPa, silicate-carbonate liquid immiscibility, and potassium-carbon metasomatism of the mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 267(1/2): 17-31.
- [5] Tsuno K, Dasgupta R, Danielson L, et al. Flux of carbonate melt from deeply subducted pelitic sediments: Geophysical and geochemical implications for the source of Central American volcanic arc[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(16): L16307.
- [6] Piccoli F, Vitale Brovarone A, Beyssac O, et al. Carbonation by fluid-rock interactions at high-pressure conditions: Implications for carbon cycling in subduction zones[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 445: 146-159.
- [7] Okamoto A, Oyanagi R, Yoshida K, et al. Rupture of wet mantle wedge by self-promoting carbonation[J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2(1): 151.
- [8] 李曙光, 汪洋, 刘盛遨. 大地幔楔的两个深部碳循环圈: 差异及宜居效应[J]. *地学前缘*, 2024, 31(1): 15-27. [Li Shuguang, Wang Yang, Liu Sheng'ao. Two modes of deep carbon cycling in a big mantle wedge: Differences and effects on Earth's habitability[J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(1): 15-27.]
- [9] Gorman P J, Kerrick D M, Connolly J A D. Modeling open system metamorphic decarbonation of subducting slabs[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2006, 7(4): Q04007.
- [10] Mason E, Edmonds M, Turchyn A V. Remobilization of crustal carbon may dominate volcanic arc emissions[J]. *Science*, 2017, 357(6348): 290-294.
- [11] Li S G, Yang W, Ke S, et al. Deep carbon cycles constrained by a large-scale mantle Mg isotope anomaly in eastern China[J]. *National Science Review*, 2017, 4(1): 111-120.
- [12] Farsang S, Louvel M, Zhao C S, et al. Deep carbon cycle constrained by carbonate solubility[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 4311.
- [13] 张兴亮. 海洋惰性溶解有机碳库与海侵黑色页岩[J]. *科学通报*, 2022, 67(15): 1607-1613. [Zhang Xingliang. Marine refractory dissolved organic carbon and transgressive black shales[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(15): 1607-1613.]
- [14] 谢树成, 罗根明, 朱宗敏. 地球表层系统对深部圈层时空演变的影响[J]. *科学通报*, 2024, 69(2): 149-159. [Xie Shucheng, Luo Genming, Zhu Zongmin. Surface system impact on the spatiotemporal evolution of deep Earth[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2024, 69(2): 149-159.]
- [15] Sageman B B, Murphy A E, Werne J P, et al. A tale of shales: The relative roles of production, decomposition, and dilution in the accumulation of organic-rich strata, Middle-Upper Devonian, Appalachian Basin[J]. *Chemical Geology*, 2003, 195(1/2/3/4): 229-273.
- [16] Langrock U, Stein R, Lipinski M, et al. Paleoenvironment and sea-level change in the Early Cretaceous Barents Sea: Implications from near-shore marine sapropels[J]. *Geo-Marine Letters*, 2003, 23(1): 34-42.
- [17] Harris N B, McMillan J M, Knapp L J, et al. Organic matter accumulation in the Upper Devonian Duvernay Formation, western Canada sedimentary basin, from sequence stratigraphic analysis and geochemical proxies[J]. *Sedimentary Geology*, 2018, 376: 185-203.
- [18] Schulte P, Schwark L, Stassen P, et al. Black shale formation during the Latest Danian Event and the Paleocene-Eocene Thermal Maximum in central Egypt: Two of a kind?[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, 371: 9-25.
- [19] Curiale J A, Gibling M R. Productivity control on oil shale formation: Mae Sot Basin, Thailand[J]. *Organic Geochemistry*, 1994, 21(1): 67-89.
- [20] Brasier M D. Fossil indicators of nutrient levels. 1: Eutrophication and climate change[M]//Bosence D W, Allison P A. *Marine palaeoenvironmental analysis from fossils*. Geological Society Special Publication, 1995: 113-132.
- [21] van Cappellen P, Ingall E D. Redox stabilization of the atmosphere and oceans by phosphorus-limited marine productivity[J]. *Science*, 1996, 271(5248): 493-496.
- [22] Jørgensen B B. Mineralization of organic matter in the sea bed: The role of sulphate reduction[J]. *Nature*, 1982, 296(5858): 643-645.
- [23] Canfield D E. Sulfate reduction and oxic respiration in marine sediments: Implications for organic carbon preservation in euxinic environments[J]. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 1989, 36(1): 121-138.
- [24] Hodgskiss M S W, Sansjofre P, Kunzmann M, et al. A high-TOC shale in a low productivity world: The Late Mesoproterozoic Arctic Bay Formation, Nunavut[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 544: 116384.
- [25] 张力钰, 陈代钊, 刘康. 弗拉—法门转折期气候—海洋环境变化及生物危机成因探讨[J]. *沉积学报*, 2024, 42(3): 723-737. [Zhang Liyu, Chen Daizhao, Liu Kang. Paleoclimatic and paleo-oceanic environment evolution in the Frasnian-Famennian transition: Potential causes of the biotic crisis [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(3): 723-737.]
- [26] 李娟, 陈雷, 胡月, 等. 滇黔北昭通地区晚奥陶世—早志留世黑色页岩地球化学特征及其地质意义[J]. *沉积学报*, 2024, 42(3): 738-756. [Li Juan, Chen Lei, Hu Yue, et al. Element geochemical characteristics and their geological significance of Late Ordovician-Early Silurian black shale in Zhaotong area of northern Yunnan and Guizhou[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(3): 738-756.]

- [27] 葛小瞳,汪远征,陈代钊,等. 川东北地区二叠纪晚期古海洋环境与有机质富集[J]. 沉积学报,2024,42(3):757-773. [Ge Xiaotong, Wang Yuanzheng, Chen Daizhao, et al. Marine redox environment and organic accumulation in northeastern Sichuan Basin during the Late Permian[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(3):757-773.]
- [28] 韦恒叶,胡谍,邱振,等. 川北—鄂西上二叠统富有机岩沉积与地球化学特征[J]. 沉积学报,2024,42(3):774-798. [Wei Hengye, Hu Die, Qiu Zhen, et al. Sedimentological and geochemical characteristics of Late Permian organic-rich rocks in north Sichuan and West Hubei provinces[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(3):774-798.]
- [29] 邹怡,韦恒叶. 下扬子中二叠统孤峰组热液硅质岩地球化学约束及其意义[J]. 沉积学报,2024,42(3):799-811. [Zou Yi, Wei Hengye. Geochemical constraints on the hydrothermal chert of the Kuhfeng Formation in the Middle Permian in the Lower Yangtze and its significance[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(3):799-811.]
- [30] 刘牧,季长军,黄元耕,等. 羌塘盆地索瓦组碳酸盐岩红层成因和环境意义[J]. 沉积学报,2024,42(3):812-822. [Liu Mu, Ji Changjun, Huang Yuanheng, et al. Coloration and environmental significance of the marine red bed from the Sowa Formation carbonate in the Qiangtang Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(3):812-822.]
- [31] 魏小松,严德天,龚银,等. 鄂西—黔南地区下寒武统页岩旋回地层学研究[J]. 沉积学报,2024,42(3):823-838. [Wei Xiaosong, Yan Detian, Gong Yin, et al. Cyclostratigraphic analysis of the Lower Cambrian shales in western Hubei and southern Guizhou[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(3):823-838.]
- [32] 朱柏宇,印森林,郭海平,等. 陆相混合细粒岩沉积微相及其对甜点的控制作用:以吉木萨尔凹陷芦苇沟组为例[J]. 沉积学报,2024,42(3):839-856. [Zhu Baiyu, Yin Senlin, Guo Haiping, et al. Continental sedimentary microfacies distribution of mixed fine-grained rocks and its controlling effect on sweet spots[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*,2024, 42(3):839-856.]
- [33] 王丹. 塔北、塔中地区寒武系—奥陶系白云岩多成因模式[J]. 沉积学报,2024,42(3):857-876. [Wang Dan. Geochemical characteristics and origins of the Cambrian-Ordovician dolomites in northern and central Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(3):857-876.]
- [34] 唐攀,汪远征,李双建,等. 塔里木盆地西北部震旦系—寒武系不整合面成因:来自沉积学的证据[J]. 沉积学报,2024,42(3):877-891. [Tang Pan, Wang Yuanzheng, Li Shuangjian, et al. Genesis of the Sinian-Cambrian unconformity in the northwestern Tarim Basin: Evidence from sedimentology[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*,2024, 42(3):877-891.]
- [35] 丁一,刘树根,文龙,等. 中上扬子地区震旦纪灯影组沉积期碳酸盐岩台地古地理格局及有利触及相带分布规律[J]. 沉积学报,2024,42(3):928-943. [Ding Yi, Liu Shugen, Wen Long, et al. Paleogeographic pattern of the carbonate platform in the middle-upper Yangtze area during the deposition of the Ediacaran Dengying Formation and distribution pattern of the reservoir facies [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(3):928-943.]
- [36] 郭川,张维圆,付勇,等. 黔北地区下奥陶统沉积相与层序特征[J]. 沉积学报,2024,42(3):892-911. [Guo Chuan, Zhang Weiyuan, Fu Yong, et al. Depositional facies and sequence stratigraphy of the Lower Ordovician successions in northern Guizhou province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(3):892-911.]
- [37] 孙鹏,杨海风,王飞龙,等. 生物降解作用对原油稀土元素的响应:以渤海湾盆地渤中坳陷庙西凹陷为例[J]. 沉积学报,2024,42(3):912-927. [Sun Peng, Yang Haifeng, Wang Feilong, et al. Response of rare earth elements in crude oil to biodegradation: A case from the Miaoxi Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*,2024, 42(3):912-927.]