中国科学: 地球科学 2023 年 第 53 卷 第 6 期: 1273 ~ 1284
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文

寒武纪早期南华盆地盐度及水文动力学过程重建

程猛[1,2,3*], 张子虎[1,3], 金承胜[4], 魏巍[5], 王海洋[6], Thomas J. ALGEO[2,7,8], 李超[1,2,3†]

1. 成都理工大学沉积地质研究院, 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610059;
2. 中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉 430074;
3. 成都理工大学沉积与生物地球化学国际研究中心, 成都 610059;
4. 湖北文理学院资源环境与旅游学院, 襄阳 441053;
5. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074;
6. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023;
7. 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074;
8. Department of Geology, University of Cincinnati, Cincinnati 45221-0013, USA
* 通讯作者, E-mail: mengcheng@cdut.edu.cn
† 通讯作者, E-mail: chaoli@cdut.edu.cn

收稿日期: 2022-05-17; 收修改稿日期: 2022-11-14; 接受日期: 2022-12-09; 网络版发表日期: 2023-05-18
科技部重点研发项目(编号: 2022YFF0800100)、国家自然科学基金项目(批准号: 42072335、42002027、41825019、41821001、42130208)和中国科学研究院战略性先导科技专项项目(编号: XDB26000000)资助

摘要 尽管对寒武纪早期南华盆地已开展了大量古环境重建研究, 但南华盆地在寒武纪早期与广海之间的连通性仍不明确, 这阻碍了对该时期海洋氧化还原状态演化及其与寒武纪大爆发关系的深入认识. 针对上述问题, 本研究分析了来自南华盆地内不同水深的三个下寒武系剖面(陆架边缘相道沱、斜坡-盆地相袁家和渣拉沟)的全岩B/Ga组成——这一新近提出的、可用于地质历史时期水体盐度重建的理想指标, 以期对寒武纪第2~3期南华盆地的盐度及水文动力学过程进行重建. 结果显示, 在寒武纪早期南华盆地内的水体盐度存在一个由浅水向深水逐渐增加的梯度, 该梯度在九门冲组/牛蹄塘组/渣拉沟组的黑色页岩沉积阶段尤为显著. 我们认为该盐度梯度可能是在一个中等局限盆地内由临近陆块上输入大量淡水和广海输入海水相混合的结果. 在约9Myr的研究区间内, 三个剖面的水体盐度均显示出逐渐增加的趋势, 这可能反映了全球海平面升高或区域构造活动所引起的广海海水输入的增强. 推测南华盆地与广海之间连通性的增强可能减弱了盆地内水体的分层性, 同时缩小了缺氧环境在深水的发育, 这与其他全球因素(如大气氧含量增加)一起导致了南华盆地内氧化海水的扩张, 并进一步影响了寒武纪生命大爆发在华南地区的表达. 研究表明, 在利用边缘海沉积开展早期动物和海洋氧含量关系研究时需要综合考虑盆地内的水文动力学条件.

关键词 B/Ga, B, Ga, 水体局限性, 寒武纪大爆发, 协同演化

中文引用格式: 程猛, 张子虎, 金承胜, 魏巍, 王海洋, Algeo T J, 李超. 2023. 寒武纪早期南华盆地盐度及水文动力学过程重建. 中国科学: 地球科学, 53(6): 1273–1284, doi: 10.1360/N072022-0145
英文引用格式: Cheng M, Zhang Z, Jin C, Wei W, Wang H, Algeo T J, Li C. 2023. Salinity variation and hydrographic dynamics in the early Cambrian Nanhua Basin (South China). Science China Earth Sciences, 66(6): 1268–1278, https://doi.org/10.1007/s11430-022-1044-9

© 2023 《中国科学》杂志社 www.scichina.com

1 前言

位于华南的寒武纪早期南华盆地是开展寒武纪大爆发及其与地球表生环境氧化关系研究最为深入的地区(例如, Chen等, 2015; Wen等, 2015; Li等, 2017; Wei等, 2018; Cheng等, 2020). 然而, 目前对调控南华盆地内水体更新和氧化还原状态的古地理边界条件的认识还很不清晰. 在研究早期, 南华盆地被视为被动大陆边缘环境, 盆地足够深, 且与广海的连通不受限制(例如, Jiang等, 2003), 而近来的研究通常将南华盆地视为一个发育失败的克拉通内裂陷盆地, 其宽度有限, 与广海之间的连通也可能受到限制(Yao等, 2014). 基于对现代黑海和波罗的海等局限盆地的观察, 盆地局限可以导致盆地内水体更新的迟滞, 进而导致贫氧乃至缺氧环境在盆地内深水的发育. 类似地, 寒武纪早期南华盆地的水体氧化还原状态演化也可能受到盆地水文动力学条件的强烈影响.

在局限的陆架边缘盆地, 陆地上淡水的输入常导致盆地内水体盐度低于广海, 该特征表明可以通过古盐度的重建来研究盆地与广海的连通性(Wei和Algeo, 2020). 在现代海洋中, 硼(B)含量表现为保守特征, 通常与盐度具有很好的线性正相关关系; 不同于B, 镓(Ga)通常在进入海洋之前就已在淡水或半咸水环境中被大量移除, 导致碎屑Ga通常是海相沉积物中Ga的最主要赋存形式. 这些特点使得B/Ga成为一个强有力的古盐度分析指标, 开展B/Ga研究有可能对寒武纪早期南华盆地的局限程度给出约束. 在本研究中, 我们对南华盆地中不同水深的三个代表性剖面开展了基于B/Ga组成的古盐度重建研究, 并由此对南华盆地的水文动力学状态给出了新的约束. 我们的研究也对寒武纪早期这一关键地质时期生命与环境的协同演化关系给出了新的启示.

2 地质背景和研究剖面

古纬度重建表明, 华南克拉通在寒武纪早期位于赤道附近(图1a)(Yao等, 2014). 当时, 南华盆地在西北至东南方向上表现为水深从浅水地台逐渐向斜坡和盆地相过渡的特征, 盆地在东北和西南方向与广海相连通(注: 此处涉及的方向全部为现今方向; 图1b; Zhu等, 2003). 本文研究了下寒武系代表不同沉积相的三条剖面, 分别是陆架边缘相道沱剖面(钻孔; GPS: 27°29′25″N, 110°14′46″E)、斜坡-盆地相袁家剖面(露头; GPS: 27°29′25″N, 110°14′46″E)和下斜坡-盆地相渣拉沟剖面(露头; GPS: 25°59′6″N, 107°53′32″E)(图1b). 在寒武纪早期, 黑色岩系在扬子陆块上广泛沉积, 其底部在区域上被认为是基本等时的, 沉积时间约为523Ma(图1c; Wang等, 2012), 该年龄与黑色页岩底部的Ni-Mo层所获得的同位素年龄(521±5)Ma基本一致(Xu等, 2011). 黑色页岩上部有机碳和无机碳同位素组成常表现为正偏趋势, 该正偏的沉积时间被归为第三期(即图1c中的CARE; 朱茂炎等, 2019a). 在渣拉沟剖面, 基于三叶虫化石*Kunmingaspis*的出现, 上覆于渣拉沟组的都柳江组底部的沉积时间被归到第四期(袁金良和赵元龙, 1999). 因此, 本研究剖面的沉积时限为寒武纪早期的晚第2期至晚第3期(约523~514Ma), 时间跨度约为9Myr.

3 方法

本文所开展地球化学分析的样品分别采自道沱、袁家和渣拉沟剖面(数量分别为141、57和21). 在B含量分析中, 称取约100mg的样品粉末到15mL的坩埚中并与约100mg的缓冲剂混合, 之后使用发射光谱仪进行B含量分析(AES-8000, 北京北分瑞利分析仪器(集团)有限责任公司). 其中的缓冲剂为事先配置好的$K_2S_2O_7$、NaF、Al_2O_3、碳粉和GeO_2混合物, 混合比例为22:20:43:14:0.007. 基于对标准物质GBW 07304和GBW 07307的多次分析, B含量的分析精度优于±10%. 在分析过程中, 通过每20个样品分析插入一个标样分析的方式监测数据分析的质量和仪器的稳定性. 在每批次分析的最后, 随机选择部分检测样品进行重复检测以监控分析的重现性. 在Ga含量分析中, 称取约50mg的样品粉末进溶样弹, 使用HF和HNO_3在190℃下进行溶解. 所获得的溶液在蒸干后使用HNO_3在120℃下再次溶解. 溶解后的溶液稀释至100g并使用电感耦合等离子体质谱(即ICP-MS, 安捷伦, 750X)分析微量元素含量. 通过分析国际标准物质AGV-2、BHVO-2和BCR-2, Ga含量分析精度优于±5%. 总有机碳(TOC)、总无机碳(TIC)、Al含量和碳酸盐C-O同位素组成($\delta^{13}C_{carb}$和$\delta^{18}O_{carb}$)分析方法见Cheng等(2021).

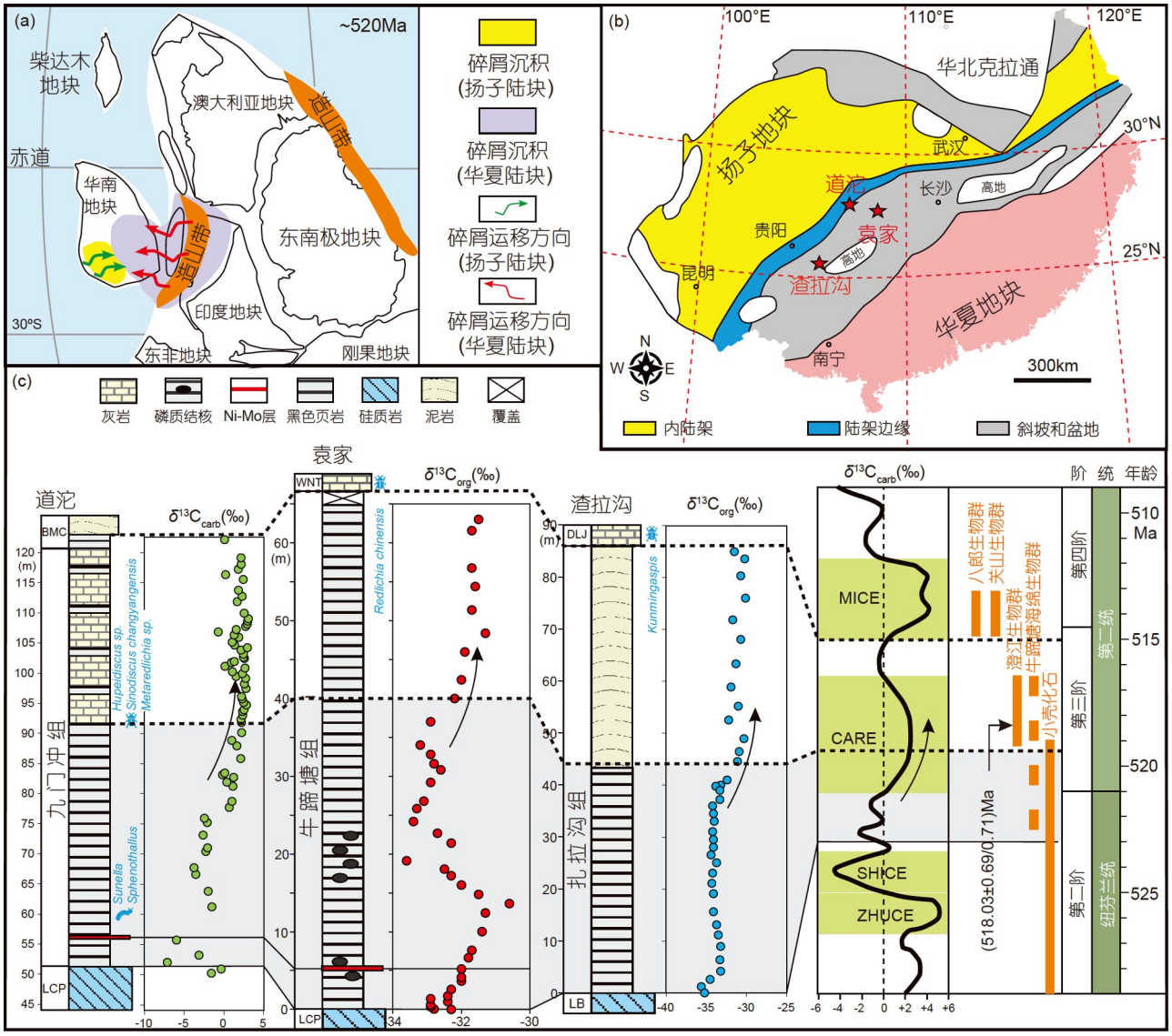

图 1　研究剖面地质背景

(a) 寒武纪早期(~520Ma)华南及其周边古大陆分布(修改自Yao等, 2014); (b) 华南克拉通寒武纪第2~3期古地理展布(修改自Zhu等, 2003); (c) 研究剖面碳同位素地层学. 数据来源: 道沱, 本研究; 袁家, Guo等(2013); 渣拉沟, Cai等(2015). 第2~4期的碳同位素曲线和演化事件修改自朱茂炎等(2019a). 澄江动物年龄引自Yang等(2018). 组名: BMC, 变马冲; LCP, 留茶坡; LB, 老堡; WNT, 污泥塘; DLJ, 都柳江. MICE, 明心寺碳同位素偏移; CARE, 寒武纪节肢动物辐射碳同位素偏移; SHICE, 石岩头碳同位素偏移; ZHUCE, 朱家箐碳同位素偏移(Zhu等, 2006)

4　结果

本文全部分析结果见网络版附表S1(http://earthcn.scichina.com), 其中关键的地球化学数据见图1c和图2. 在道沱剖面, TOC和TIC含量均显示出较宽的波动范围(0~12wt.%), 这与该剖面的岩性组成由下部以黑色页岩为主转变为上部以碳酸盐岩为主的特征是一致的. $\delta^{13}C_{carb}$组成与$\delta^{18}O_{carb}$组成之间无明显相关性(R^2=0.04; 未展示), 指示所分析样品受到流体改造的影响很有限. 此外, 在地层上, $\delta^{13}C_{carb}$自下而上显示出逐渐增加的趋势: 从约−5‰升高至约+2‰, 该趋势同样也在袁家和渣拉沟剖面观察到, 反映了区域上海水无机碳库同位素组成的演化, 因而该特征常被用于地层对比的标志(Guo等, 2013; 朱茂炎等, 2019a; 本研

究, 图1c). 道沱、袁家和渣拉沟剖面的B/Ga均值分别为3.9±3.4(1σ)、4.3±2.7(1σ)和6.1±1.1(1σ). 在地层上, 道沱剖面的B/Ga组成在留茶坡组的顶部和九门冲组的底部几米范围内突然由6.0降低至0.2. 该变化未在袁家和渣拉沟剖面观察到, 可能反映了深水盆地未发生类似降低或者是深水剖面的分析分辨率过低而未能记录到此次变化(图2). 自底而上在超过60m的范围内, 三个研究剖面的B/Ga组成均显示出逐渐增加的趋势(道沱: 从约0.2增加至约6; 袁家: 从约0.3增加至约10; 渣拉沟: 从约4增加至约8).

5 讨论

5.1 B和Ga含量的控制因素

尽管各自存在一些问题, B/Ga、Sr/Ba和S/TOC组成被认为可以用于泥页岩沉积的古盐度重建(Wei等, 2018; Wei和Algeo, 2020). 其中, Sr易于取代Ca进入碳酸盐矿物(尤其是文石)晶格, 因此沉积物中碳酸盐的出现可以显著提高Sr的含量并稀释Ba的含量, 导致异常高的Sr/Ba比值, 从而影响对古盐度的重建(Wei和Algeo, 2020). 在道沱剖面, 九门冲组的上部(94~122m)主要发育泥灰岩或者白云岩, 这导致该部分的Sr/Ba组成无法有效记录其沉积时的海水盐度. 此外, 在所研究的三个剖面上, Ba含量可以高达10000ppm以上(1ppm=1μg g^{-1}, 本人未发表数据), 表明沉积物中除碎屑Ba外还存在大量生物Ba或者热液Ba的贡献(Wei等, 2021), 这同样影响了Sr/Ba对海水盐度的反映. S/TOC被认为是区分淡水(低的硫酸盐含量导致低的S/TOC组成)与半咸水和海水(高的硫酸盐含量导致高的S/TOC组成)的有效指标(Wei和Algeo, 2020). 然而, 寒武纪海洋中的硫酸盐库(<10mmol)可能远小于现代海洋(28mmol)(Algeo等, 2015), 这使得基于现代体系建立的边界值无法有效地应用于本研究的研究时段. 另外, 泥页岩中的硫主要赋存于硫化环境下形成的黄铁矿中, 而渣拉沟剖面以铁化为主的氧化还原状态也使得S/TOC在重建古海水盐度时存在偏差(Li等, 2017). 基于上述原因, 我们在本研究中仅将B/Ga指标用于寒武纪早期南华盆地的古盐度重建.

在海洋中, 仅次于海盐形成, 黏土矿物的吸附是水溶性B的第二大汇(Park和Schlesinger, 2002). 在本研究

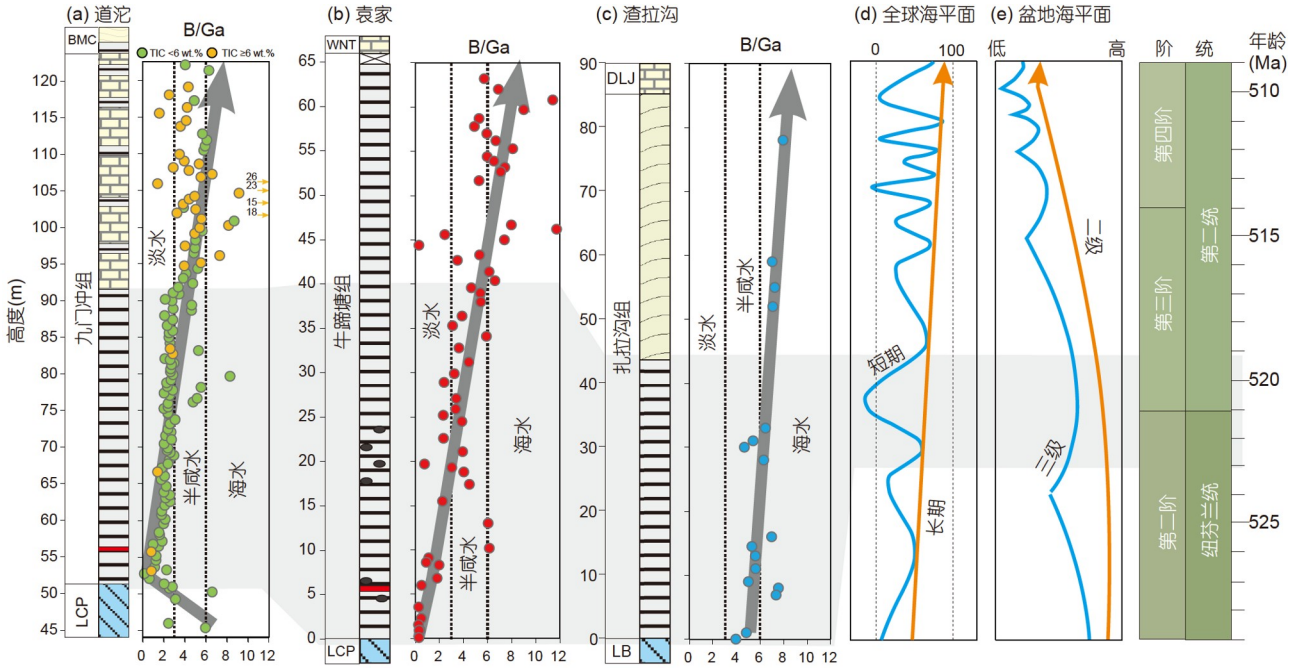

图 2　下寒武系研究剖面的B/Ga组成

(a) 陆架边缘相道沱剖面; (b) 斜坡-盆地相袁家剖面; (c) 下斜坡-盆地相渣拉沟剖面; (d) 寒武纪第2~4期全球海平面演化(修改自Haq和Schutter, 2008); (e) 南华盆地内海平面演化(修改自Peng等, 2020). B/Ga指示不同盐度相的边界值来自Wei和Algeo(2020). 岩性图例同图1

剖面上，大部分样品的B/Al组成显示出高于上地壳组成的特征(图3a)，表明沉积物中的B为来自海水的自生成因．所研究样品的B和Ga与Al含量均显示出强的线性正相关特征(图3a和3b; R^2>0.5, p<0.05)，这与黏土矿物/碎屑物质作为它们在沉积物中赋存的主要载体是一致的．黏土矿物对$B(OH)_4^-$的亲和性要比$B(OH)_3$更强，而海水中两者的比例受到pH的控制，因此黏土矿物吸附B的过程受到海水pH组成的影响(Keren和Mezuman, 1981)．在现代热带地区表层海水环境下(即25℃、35psu和1个大气压)，化学反应$B(OH)_3+H_2O=B(OH)_4^-+H^+$的平衡常数($K_B$)为$10^{-8.6}$，这表明pH对该反应的影响在pH=8.6前后最为显著．然而，研究表明寒武纪早期为温室气候时期，对应着高的大气CO_2浓度和低的海水pH组成(pH<8)(Hearing等, 2018, 2021; Krissansen-Totton等, 2018)．在这种情况下，pH的变化仅对B的组分产生有限的影响．例如，pH从7增加到8大约会导致$B(OH)_4^-$的比例增加4倍，而这远小于我们所分析数据的波动范围(图2)．此外，尽管海水相对淡水更偏碱性，海水的B含量和B/Ga比值分别是淡水的~110倍和~73000倍(Wei和Algeo, 2020)，这远远超过pH所能导致的差异．基于上述原因，B/Ga组成在我们的研究剖面所显示的空间或者时间演化上的差异均不能用pH的不同来解释．

在黏土矿物中，Ga常通过类质同象占据Al的位置，这使得Ga在成岩过程中常保持稳定、难以发生迁移(Panahi等, 2000)．但是，道沱剖面上更高的Ga/Al组成暗示Ga可能存在被黏土矿物所吸附的过程(详见5.2节)．一般认为，Ga在伊利石和蒙脱石吸附过程中的行为类似(Benedicto等, 2014)，且Ga/Al组成在Al-氧化物中和海洋黏土矿物中也类似(Yian等, 2021)．这些观察意味着黏土矿物类型的差异可能对本研究单元中Ga含量的影响很小．

黏土矿物的成岩过程可能会影响沉积物中初始的B和Ga含量．在埋藏过程中，高温和高压的环境可以使吸附在层间的B解吸附，进而导致其在沉积物中的丢失(Środoń和Paszkowski, 2011)．类晶质体反射率的数据表明牛蹄塘组的埋藏温度超过200℃(Chen等, 2016; Yan等, 2016)．然而，矿物组成分析表明伊利石是本研究组内黑色页岩中黏土矿物组合的主要组成成分(Ye等, 2017)，而在蒙脱石向伊利石转化过程中，B常被保留在矿物内从而避免了流失(Williams等, 2001)．此外，华南下寒武泥页岩沉积中有机质的高成熟度常被归结为区域深埋藏作用的结果(Yan等, 2016)，而这不可能导致我们所研究剖面中B含量在几十米范围内的显著变化．因此，我们认为本研究的样品在埋藏过程中B和Ga的再迁移作用可能很有限，不会影响我们对B/Ga指示盐度变化的解释．

在海洋中，B和Ga的行为可以受到碳循环过程的影响(Clarkson等, 2015)，这可能解释了在九门冲组上部碳酸盐岩层位中的4个样品所显示的高(>15)的B/Ga组成(图2a)．然而，本文所研究样品的B/Ga组成与TIC无明显关系(图3c)，也未在相邻的页岩(TIC<6wt.%)和泥质灰岩(TIC>6wt.%)层之间显示出明显的差别(图2a)．相反，在道沱剖面，B含量和TIC之间显示出很强的负相关关系(R^2=0.62, p<0.05; 未展示)；类似地，Ga含量和TIC同样显示出强的负相关关系(R^2=0.60, p<0.05; 未展示)．上述特征表明碳酸盐沉积对沉积物中B和Ga含量具有强烈的稀释作用．有研究表明，Ga在现代海洋高生产力和高有机质通量的海域中的移除作用明显(McAlister和Orians, 2015)，但道沱和袁家剖面的Ga含量和TOC之间未显示明显的相关性，仅在渣拉沟剖面观察到两者间的负相关关系(R^2=0.49，p<0.05；图3d)．这表明在所研究的剖面中，有机质摄取Ga进入沉积物对总Ga含量的贡献很少．热液输入也是海洋中B的来源之一，有证据表明在牛蹄塘组的下部沉积时期热液活动强烈(Chen等, 2009; Liu等, 2015)，但在我们的研究剖面中这一段却对应低的B/Ga组成(图2)，表明热液活动输入对研究样品中B含量的贡献有限．

基于上述分析，我们认为本研究剖面间B和Ga含量的不同可能反映了局部水体的盐度差异．河流输入是现代海洋中B和Ga的最主要来源．然而，类似于Al，Ga在大陆风化过程中仅能被有限地淋滤到河水中，在运输过程中，Ga在河流或河口区域会通过强烈的颗粒吸附作用被移除进入沉积物(Shiller, 1998)．因此，海水中Ga的含量通常会不同程度地低于河水(Wei和Algeo, 2020)．不同于Ga，溶解态的B在现代海洋中具有保守的行为，常与盐度显示出近乎稳定的比值，即0.133mg kg^{-1} ‰$^{-1}$(Lee等, 2010)，其在海洋居留时间远超过海水的混合时间(~20Myr; Lemarchand等, 2002)．本研究所涉及的时间跨度不超过9Myr，这要比B的居留时间短，因而在研究区间内海洋的B库大小不可能发生明显的改变，意味着研究剖面上所显示的B含量

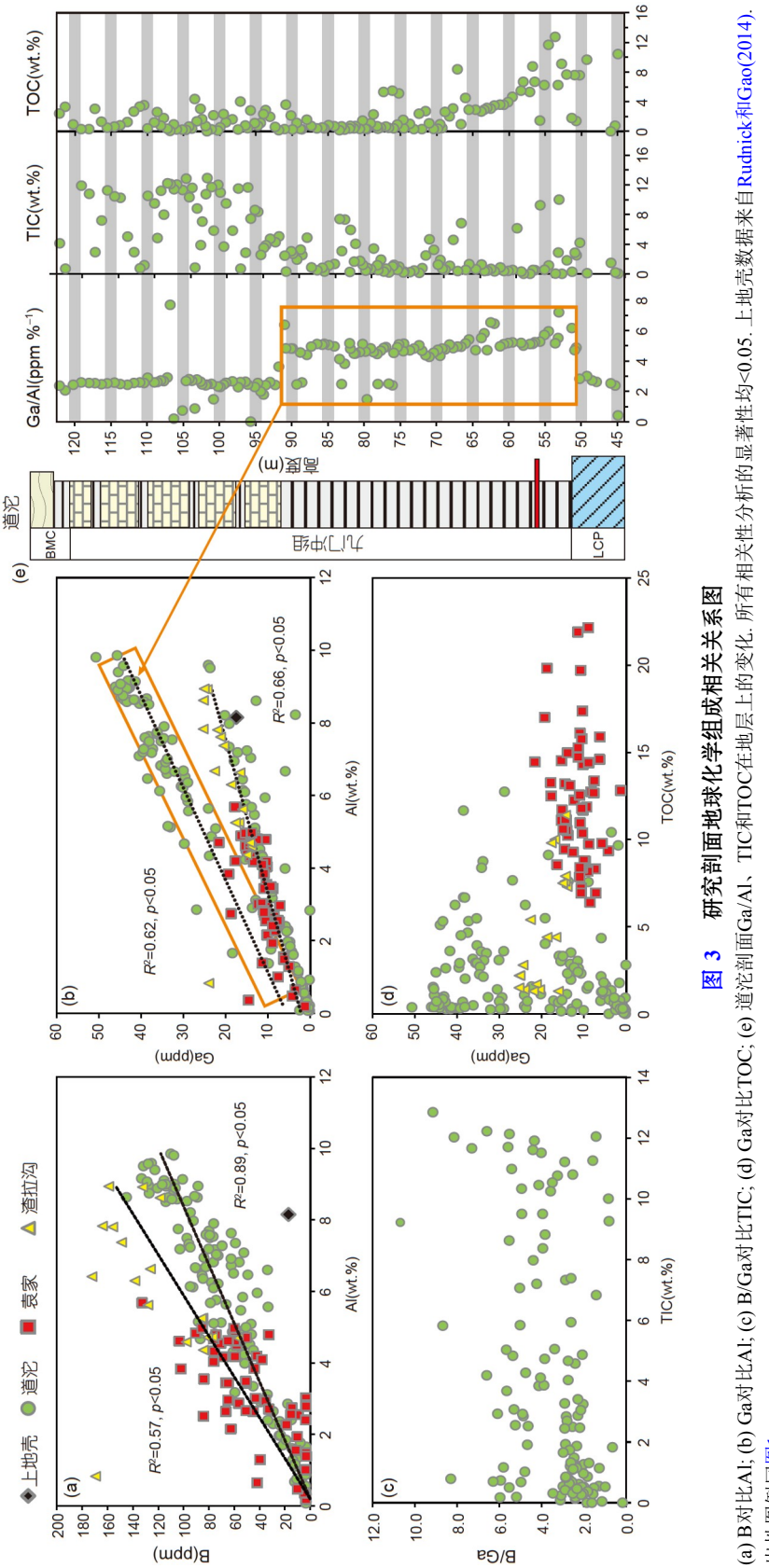

图 3　研究剖面地球化学组成相关关系图

(a) B对比Al; (b) Ga对比Al; (c) B/Ga对比TIC; (d) Ga对比TOC; (e) 道沱剖面Ga/Al、TIC和TOC在地层上的变化. 所有相关性分析的显著性均<0.05. 上地壳数据来自Rudnick和Gao(2014). 岩性图例同图1

的显著波动可能反映了局部水体的盐度变化. B/Ga比值为3和6被提出可以用来区分泥页岩沉积时的水体为淡水、半咸水或者海水环境(Wei和Algeo, 2020). 鉴于没有明确的证据否定该边界值的有效性, 在本研究中, 我们应用这些由现代沉积环境所获得的边界值进行寒武纪早期古盐度的重建. 但我们同时也承认还需要更多工作来验证这些边界值是否可以应用于像寒武纪这样的古老样品. 考虑到在海洋中B相对盐度的保守行为, 海洋B库大小的长期演化不会改变B含量和盐度之间的正相关关系. 因此, 不需要明确的边界值, 研究剖面上B/Ga组成的长期演化可以对盆地内水体的盐度变化给出有意义的指示. 综上, 我们认为研究剖面上B/Ga比值的长期升高有效地记录了寒武纪早期南华盆地盐度的增加.

5.2　寒武纪早期南华盆地内的盐度梯度

研究剖面的B、Ga含量差异指示在寒武纪早期的南华盆地内存在一个横向和/或垂向上的盐度梯度. 袁家和渣拉沟剖面的B/Al比值要高于道沱剖面(图3a), 两剖面的Ga/Al比值与上地壳类似, 均低于道沱剖面的黑色页岩层位(图3b~3e), 表明后者有更多的自生Ga的富集. 在道沱剖面的上部, 碳酸盐含量在6%和100%(对应TIC=0.7~12wt.%)间强烈波动, 但Ga/Al比值在该区间却十分稳定(图3e), 这表明Ga/Al在剖面上和剖面间的差异与岩性组成无关. 类似地, 在道沱剖面的黑色页岩层位, TOC含量从底部约10%向上在中-上部降低至<1%, 而Ga/Al比值则显示出稳定的高值(约5ppm %$^{-1}$; 图3e), 表明有机质对自生Ga的富集对研究剖面的Ga/Al变化影响有限. 由于强烈的移除作用, 河流输入到海洋的Ga通常会在河口附近大量埋藏, 这导致了河口沉积物中更高的Ga/Al比值以及海水中Ga含量和盐度的反向变化关系(Sirocko, 1994). 道沱剖面在三个研究剖面中是最浅的, 也是最有可能受到河流淡水输入过程的影响. 在这种情况下, 道沱剖面上更高的Ga/Al比值可能反映了除碎屑Ga以外的由黏土矿物吸附所导致的自生Ga的富集. 与道沱剖面不同, 袁家和渣拉沟剖面都沉积于远离海岸的深水区, 受到淡水输入的影响非常有限, 因而它们的Ga/Al比值与上地壳组成类似(图3b). 由于B和Ga被黏土矿物吸附主要发生在水-岩界面附近, 沉积物中B/Ga比值应主要反映了底水的盐度(Remírez和Algeo, 2020; Wei和Algeo, 2020). 因此, 研究剖面所显示的B/Ga组成的横向(离岸远近)差异实际上也记录了寒武纪早期南华盆地水体在垂向(水深大小)上盐度的不同.

南华盆地内水体盐度梯度的存在表明, 在寒武纪早期, 盆地与广海的连通性至少是中等受限的. 在现代海洋中, 温跃层以深(>1000m)的海水盐度十分稳定, 波动范围<1psu(practical salinity unit, 基于海水导电性的盐度单位, 等价于g kg^{-1}), 而在大河河口附近或者是河流输入的海湾区域, 表层海水盐度的波动范围要明显更大(Dávila等, 2002). 盐度低的淡水(<1psu)和盐度高的海水(35psu)的混合是河口、潟湖、沿岸湖以及很多边缘海盆地的典型特征. 由于本研究剖面均位于较深水区域(即陆架边缘到盆地), 因此B/Ga指标所反映的低盐度应该代表了整个南华盆地的特征, 即在大部分研究区间内(如晚第2期到早第3期)盆地应具有中等局限的特征. 寒武纪早期南华盆地的水体动力学特征可能与现代半局限盆地——波罗的海类似. 在波罗的海, 盆地深部水体的更新主要通过盆地边缘狭窄的水道与广海进行交换补充(Algeo等, 2008). 与波罗的海类似, 寒武纪早期南华盆地的盐度受到来自周边临近古陆(如康滇和华夏古陆)的淡水输入和来自盆地边缘海水输入相对强度的控制. 如上文所述, 在三个研究剖面中, 道沱是最浅也是离岸最近的(图1b), 因而也是受到淡水输入的影响最大的, 这解释了其在黑色页岩沉积阶段所显示的低盐度. 相反, 袁家和渣拉沟剖面代表了更深水(斜坡和盆地)环境, 因而离淡水输入的源头更远而与广海更近, 这解释了其更高的B/Ga比值所指示的更高盐度. 而研究剖面在上第3阶所显示的盐度梯度的减弱可能反映了南华盆地与广海连通性的增强(详见5.3节).

5.3　寒武纪早期南华盆地内盐度的长期演化

本研究的三条剖面的B/Ga组成自底到顶(对应下寒武系上第2阶至上第3阶)显示出一致的长期升高的趋势, 表明某个因素的共同作用, 即盆地内水体盐度的增加. 古地磁证据指示华南克拉通在约530Ma时位于约30°N, 之后在约514Ma转移至赤道附近(Zhang等, 2015), 即从干旱的副热带地区迁移至湿润的热带地区. 这意味着淡水向南华盆地的输入应该是逐渐增强的, 因此气候变迁应该不是导致B/Ga比值长期升高的原因.

寒武纪早期南华盆地盐度的长期升高可能反映了海平面升降(如全球海平面升高)或者区域构造活动(如水道的下沉)的控制. 已有证据表明在寒武纪的大部分时期海平面都是升高的(图2d; Haq和Schutter, 2008), 而南华盆地内区域的海平面则表现为在幸运阶至第2阶中期先升高后在第3阶和第4阶降低的特征(图2e; Peng等, 2020), 盆地内的海平面可能受到了华南克拉通在东冈瓦纳大陆向北印度聚合的影响(图1a; Yao等, 2014). 寒武纪早期广海海平面的长周期升高与研究剖面所显示的盐度的长期增加一致, 暗示海平面所控制的水道深度在调控盆地内盐度组成上发挥着最为重要的作用. 对于我们的盐度记录, 一个比较保守的模型是在晚第2期由于广海的海平面较低, 限制了海水在盆地边缘通过水道向盆地内的涌入, 这导致盆地发育为一个具有半咸水特征的边缘海沉积盆地, 这同时也导致了盆地横向和垂向上盐度梯度的强烈发育(图4a). 之后在约第3期晚期, 广海海平面的升高(Haq和Schutter, 2008)导致海水更容易从更深的水道涌入到南华盆地, 最终导致盆地内盐度升高至正常海水状态(图4b).

5.4 寒武纪早期南华盆地内水文动力条件控制的氧化还原状态

寒武纪早期南华盆地的水文动力学特征使得盆地易于发育稳定的盐度和密度跃层. 由于具有更高的密度, 海水通过盆地边缘浅的水道涌入到盆地内后迅速下沉至盆地的最深处, 而河流输入的淡水则漂浮在盆地的表面形成一个低密度层, 形成类似于现代波罗的海的盐度和密度跃层(图4)(Algeo等, 2008; Dellwig等, 2018). 强烈的密度跃层将抑制垂向上水体的交换, 促进深部水体缺氧和硫化的发育, 在南华盆地内形成氧化还原状态的分层结构, 这可能导致了第2阶和第3阶中富有机质黑色页岩的发育(例如, Cheng等, 2016; Jin等, 2016; Li等, 2017; Han等, 2018; Huang等, 2019; Liu等, 2021). 该解释得到了下寒武系黑色岩系沉积中H_2S浓度、营养盐元素和氧化还原敏感元素高频波动的证据支持(Lehmann等, 2007; Cheng等, 2017, 2020). 这些特征与现代波罗的海受年际尺度海水入侵影响所导致的盆地氧化还原状态、生产力以及其他水文参数的波动一致(Algeo等, 2008; Dellwig等, 2018).

基于沉积岩Mo-U同位素和配套的C-S同位素特征, 有研究认为寒武纪早期全球海洋经历了脉冲式的氧化事件, 这其中有相当部分数据源自南华盆地(Chen等, 2015; Dahl等, 2019; He等, 2019; Wei等, 2020). 如果该结论正确, 南华盆地和广海之间氧化还原状态的差异——持续缺氧vs脉冲式氧化暗示两者之间存在物理上的解耦, 这与南华盆地中等到强烈的局限特征是一致的. 然而, 一方面近来的研究也指出海洋的Mo和U同位素组成可能受到硫化发育的强烈影响, 使得这些指标在指示全球海洋氧化还原状态上存在争议(Cole等, 2020; Qin等, 2022). 此外, 已有研究表明C和S同位素组成会受到较多局部或者区域性因素的干扰(例如, Fike和Grotzinger, 2008; Jiang等, 2012), 同样会影响其对全球海洋氧化还原状态的重建. 另一方面, 基于大洋玄武岩中铁价态的研究以及对海相沉积物中铁组分数据的统计都表明全球深海的氧化不早于晚古生代(Sperling等, 2015; Stolper和Keller, 2018). 因此, 寒武纪早期南华盆地内的氧化还原状态及其与广海的对比和对同时期深海氧化程度的指示都需要更多的研究来论证.

在寒武纪早期的第3期晚期(即研究剖面的上部), 盆地与广海连通性的增强将会导致更多的海水涌入(见5.3节), 这可能造成了盆地内水体密度跃层的弱化(图4b), 并进而导致了盆地内水体分层(Li等, 2017)和所观察到的盐度梯度的弱化(见5.2节). 已有报道表明在第3阶时南华盆地内中等水深的硫化发生了收缩而表层氧化水体则发生了扩大(Jin等, 2016; Li等, 2017). Li等(2018)提出当时南华盆地陆架的逐步氧化主要反映了大气氧含量的升高, 后者导致了同时期全球海洋表层海水的氧化. 如果该结论是正确的, 寒武纪早期南华盆地与广海连通性的增强应该会促进水体分层的减弱, 使得氧化的表层水体向深水扩张, 而增强的垂向水体混合也会抑制深部水体缺氧和硫化的发育, 从而实现南华盆地深水的通风. 这其中的细节还需要更多的研究来揭示.

5.5 对寒武纪早期生命与环境协同演化的启示

南华盆地是全世界范围内开展寒武纪大爆发相关研究最为深入的地区, 该区域为验证早期动物演化和海洋氧含量增加关系的各种假设提供了绝佳的条件(例如, Chen等, 2015; Li等, 2017, 2018; Wood等, 2019; 朱茂炎等, 2019b; Wei等, 2021; Zhang和Shu, 2021). 古生物的研究表明在下寒武的黑色页岩和泥岩中常发育海绵和小壳生物为主的生物组合, 向上逐渐转变为能

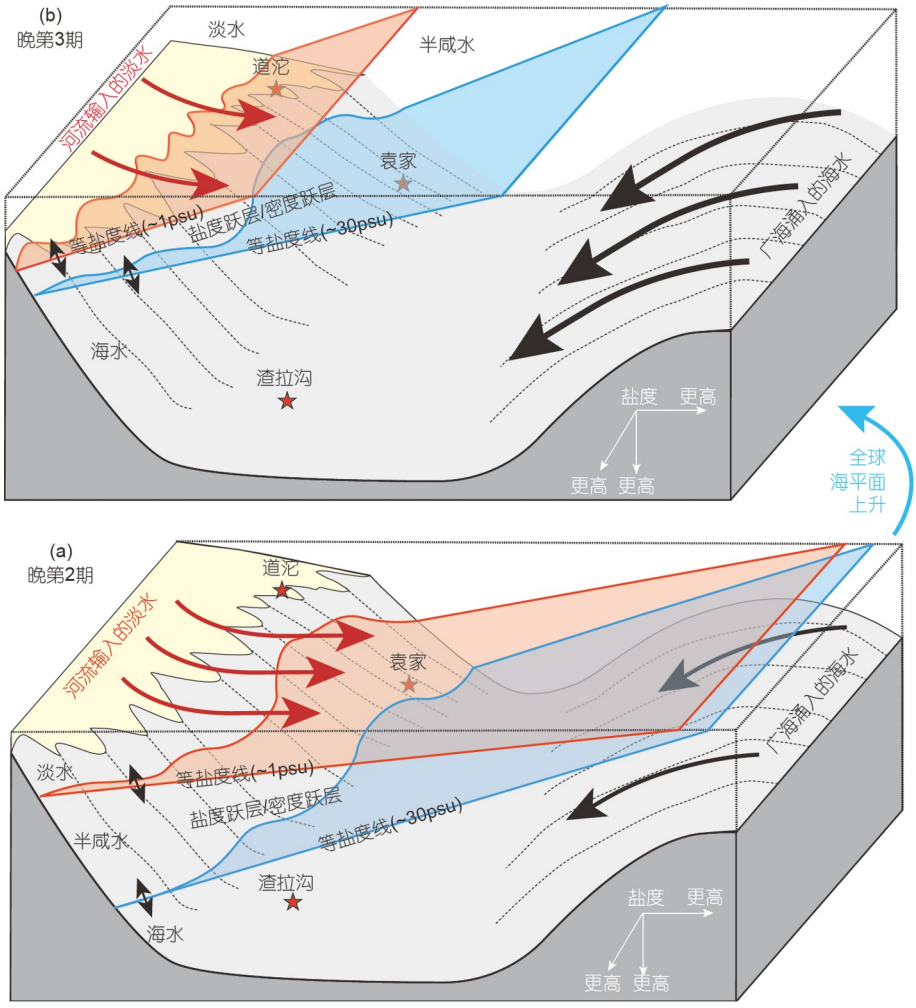

图 4　寒武纪早期南华盆地盐度和水化学结构概念图

(a) 晚第2期; (b) 晚第3期. 盆地内盐度跃层和密度跃层的位置以及氧化还原状态分层模式取决于淡水和海水输入的相对量. 尽管袁家和渣拉沟剖面的水深可能类似, 袁家剖面的盐度要比渣拉沟剖面更低, 这可能反映了袁家剖面离淡水输入的源更近(如河口)(注: 袁家剖面在渣拉沟剖面东北方向约300km处; 图1). 空间上淡水输入通量的差异体现在盐度跃层的深度上——袁家相对渣拉沟要更深. 盐度的长期演化主要受控于海平面控制的、与广海海水的交换过程, 也可能受到区域的构造作用的影响. 研究剖面上盐度从晚第2期(a)到晚第3期(b)的升高反映了全球海平面的升高或者是构造作用导致的水道的下沉. 更多细节见正文

够承载体型更加庞大、多样化程度更高的后生动物群落(朱茂炎等, 2019a). 很多研究都假定寒武纪早期南华盆地的氧化还原状态代表了当时全球海洋的特征(Chen等, 2015; Wang等, 2018). 然而, 我们的发现表明在寒武纪早期南华盆地内氧化还原状态的差异性, 尤其是在第2期至第3期约9Myr时间内缺氧分层的收缩和氧化的扩大与盆地内的盐度变化密切相关: 盆地内的氧化还原状态显著受到区域构造和全球海平面联合控制的盆地局限性的影响. 因此, 寒武纪早期南华盆地内生物群落组成的演变最好被解释为局部因素(如盆地局限程度)和全球因素(如海平面和大气氧含量的上升)作用下的盆地逐步氧化的结果.

6　结论

本研究所分析的B/Ga数据指示寒武纪早期南华盆地内的水体盐度在时间演化上和古地理相区间均存在显著差异. 在空间上, 尤其是在黑色页岩沉积时期, 浅水地台的盐度要低于深水盆地, 表明在寒武纪第2~3期, 南华盆地具有中等程度的局限特征. 在约9Myr的

研究时限内(约523~514Ma), 南华盆地的盐度经历了一个快速下降然后长期逐渐升高的过程, 其中盐度的升高主要受控于海平面上升所控制的海水输入的增强. 寒武纪早期南华盆地内氧化还原状态分层的弱化及其对应的氧化水体的扩大和缺氧水体的收缩与盐度的变化密切相关, 可能反映了全球海平面以及可能的区域构造的控制. 我们提出寒武纪早期南华盆地深水的氧化是局部和全球环境因素共同作用的结果, 这可能影响了寒武纪生命大爆发在局部区域上的表达. 我们的发现表明, 在利用边缘海沉积进行生物与环境协同演化研究中需要综合考虑水文动力条件的影响.

致谢 我们感谢贵州大学付勇教授、魏帅超同学和成都理工大学石炜博士在采样过程中给予的帮助, 感谢三位匿名审稿人及责任编委对论文提出的宝贵意见.

参考文献

袁金良, 赵元龙. 1999. 西南地区下寒武统划分与对比——兼论早寒武世系列生物群的时代. 古生物学报, 38(增刊): 116–131

朱茂炎, 杨爱华, 袁金良, 李国祥, 张俊明, 赵方臣, Ahn S Y, 苗兰云. 2019a. 中国寒武纪综合地层和时间框架. 中国科学: 地球科学, 49: 26–65

朱茂炎, 赵方臣, 殷宗军, 曾晗, 李国祥. 2019b. 中国的寒武纪大爆发研究: 进展与展望. 中国科学: 地球科学, 49: 1455–1490

Algeo T J, Heckel P H, Maynard J B, Blakey R C, Rowe H, Pratt B, Holmden C. 2008. Modern and ancient epeiric seas and the super-estuarine circulation model of marine anoxia. In: Dynamics of Epeiric Seas: Sedimentological, Paleontological and Geochemical Perspectives. Geol Assoc Canada Spec Pap, 48: 7–38

Algeo T J, Luo G M, Song H Y, Lyons T W, Canfield D E. 2015. Reconstruction of secular variation in seawater sulfate concentrations. Biogeosciences, 12: 2131–2151

Benedicto A, Degueldre C, Missana T. 2014. Gallium sorption on montmorillonite and illite colloids: Experimental study and modelling by ionic exchange and surface complexation. Appl Geochem, 40: 43–50

Cai C, Xiang L, Yuan Y, He X, Chu X, Chen Y, Xu C. 2015. Marine C, S and N biogeochemical processes in the redox-stratified early Cambrian Yangtze ocean. J Geol Soc Lond, 172: 390–406

Chen D, Wang J, Qing H, Yan D, Li R. 2009. Hydrothermal venting activities in the Early Cambrian, South China: Petrological, geochronological and stable isotopic constraints. Chem Geol, 258: 168–181

Chen Q, Zhang J, Tang X, Li W, Li Z. 2016. Relationship between pore type and pore size of marine shale: An example from the Sinian-Cambrian formation, upper Yangtze region, South China. Int J Coal Geol, 158: 13–28

Chen X, Ling H F, Vance D, Shields-Zhou G A, Zhu M, Poulton S W, Och L M, Jiang S Y, Li D, Cremonese L, Archer C. 2015. Rise to modern levels of ocean oxygenation coincided with the Cambrian radiation of animals. Nat Commun, 6: 7142

Cheng M, Li C, Zhou L, Algeo T J, Zhang F, Romaniello S, Jin C S, Lei L D, Feng L J, Jiang S Y. 2016. Marine Mo biogeochemistry in the context of dynamically euxinic mid-depth waters: A case study of the lower Cambrian Niutitang shales, South China. Geochim Cosmochim Acta, 183: 79–93

Cheng M, Li C, Zhou L, Feng L J, Algeo T J, Zhang F F, Romaniello S, Jin C S, Ling H F, Jiang S Y. 2017. Transient deep-water oxygenation in the early Cambrian Nanhua Basin, South China. Geochim Cosmochim Acta, 210: 42–58

Cheng M, Li C, Jin C, Wang H, Algeo T J, Lyons T W, Zhang F, Anbar A. 2020. Evidence for high organic carbon export to the early Cambrian seafloor. Geochim Cosmochim Acta, 287: 125–140

Cheng M, Zhang Z, Algeo T J, Liu S, Liu X, Wang H, Chang B, Jin C, Pan W, Cao M, Li C. 2021. Hydrological controls on marine chemistry in the Cryogenian Nanhua Basin (South China). Earth-Sci Rev, 218: 103678

Clarkson M O, Kasemann S A, Wood R A, Lenton T M, Daines S J, Richoz S, Ohnemueller F, Meixner A, Poulton S W, Tipper E T. 2015. Ocean acidification and the Permo-Triassic mass extinction. Science, 348: 229–232

Cole D B, Planavsky N J, Longley M, Böning P, Wilkes D, Wang X, Swanner E D, Wittkop C, Loydell D K, Busigny V, Knudsen A C, Sperling E A. 2020. Uranium isotope fractionation in non-sulfidic anoxic settings and the global uranium isotope mass balance. Glob Biogeochem Cycle, 34: e2020GB006649

Dahl T W, Connelly J N, Li D, Kouchinsky A, Gill B C, Porter S, Maloof A C, Bizzarro M. 2019. Atmosphere-ocean oxygen and productivity dynamics during early animal radiations. Proc Natl Acad Sci USA, 116: 19352–19361

Dávila P M, Figueroa D, Müller E. 2002. Freshwater input into the coastal ocean and its relation with the salinity distribution off austral Chile (35°–55°S). Cont Shelf Res, 22: 521–534

Dellwig O, Schnetger B, Meyer D, Pollehne F, Häusler K, Arz H W. 2018. Impact of the major Baltic Inflow in 2014 on manganese cycling in the Gotland Deep (Baltic Sea). Front Mar Sci, 5: 1–20

Fike D A, Grotzinger J P. 2008. A paired sulfate-pyrite δ^{34}S approach to understanding the evolution of the Ediacaran-Cambrian sulfur cycle. Geochim Cosmochim Acta, 72: 2636–2648

Guo Q, Strauss H, Zhu M, Zhang J, Yang X, Lu M, Zhao F. 2013. High

resolution organic carbon isotope stratigraphy from a slope to basinal setting on the Yangtze Platform, South China: Implications for the Ediacaran-Cambrian transition. Precambrian Res, 225: 209–217

Han T, Fan H, Wen H. 2018. Dwindling vanadium in seawater during the early Cambrian, South China. Chem Geol, 492: 20–29

Haq B U, Schutter S R. 2008. A chronology of Paleozoic sea-level changes. Science, 322: 64–68

He T, Zhu M, Mills B J W, Wynn P M, Zhuravlev A Y, Tostevin R, Pogge von Strandmann P A E, Yang A, Poulton S W, Shields G A. 2019. Possible links between extreme oxygen perturbations and the Cambrian radiation of animals. Nat Geosci, 12: 468–474

Hearing T W, Harvey T H P, Williams M, Leng M J, Lamb A L, Wilby P R, Gabbott S E, Pohl A, Donnadieu Y. 2018. An early Cambrian greenhouse climate. Sci Adv, 4: eaar5690

Hearing T W, Pohl A, Williams M, Donnadieu Y, Harvey T H P, Scotese C R, Sepulchre P, Franc A, Vandenbroucke T R A. 2021. Quantitative comparison of geological data and model simulations constrains early Cambrian geography and climate. Nat Commun, 12: 3868

Huang T, Chen D, Fu Y, Yeasmin R, Guo C. 2019. Development and evolution of a euxinic wedge on the ferruginous outer shelf of the early Cambrian Yangtze sea. Chem Geol, 524: 259–271

Jiang G, Kennedy M J, Christie-Blick N. 2003. Stable isotopic evidence for methane seeps in Neoproterozoic postglacial cap carbonates. Nature, 426: 822–826

Jiang G, Wang X, Shi X, Xiao S, Zhang S, Dong J. 2012. The origin of decoupled carbonate and organic carbon isotope signatures in the early Cambrian (ca. 542–520Ma) Yangtze platform. Earth Planet Sci Lett, 317-318: 96–110

Jin C, Li C, Algeo T J, Planavsky N J, Cui H, Yang X, Zhao Y, Zhang X, Xie S. 2016. A highly redox-heterogeneous ocean in South China during the early Cambrian (~529–514 Ma): Implications for biota-environment co-evolution. Earth Planet Sci Lett, 441: 38–51

Keren R, Mezuman U. 1981. Boron adsorption by clay minerals using a phenomenological equation. Clays Clay Miner, 29: 198–204

Krissansen-Totton J, Arney G N, Catling D C. 2018. Constraining the climate and ocean pH of the early Earth with a geological carbon cycle model. Proc Natl Acad Sci USA, 115: 4105–4110

Lee K, Kim T W, Byrne R H, Millero F J, Feely R A, Liu Y M. 2010. The universal ratio of boron to chlorinity for the North Pacific and North Atlantic oceans. Geochim Cosmochim Acta, 74: 1801–1811

Lehmann B, Nägler T F, Holland H D, Wille M, Mao J, Pan J, Ma D, Dulski P. 2007. Highly metalliferous carbonaceous shale and Early Cambrian seawater. Geology, 35: 403–406

Lemarchand D, Gaillardet J, Lewin É, Allègre C J. 2002. Boron isotope systematics in large rivers: Implications for the marine boron budget and paleo-pH reconstruction over the Cenozoic. Chem Geol, 190: 123–140

Li C, Jin C, Planavsky N J, Algeo T J, Cheng M, Yang X, Zhao Y, Xie S. 2017. Coupled oceanic oxygenation and metazoan diversification during the early-middle Cambrian? Geology, 45: 743–746

Li C, Cheng M, Zhu M, Lyons T W. 2018. Heterogeneous and dynamic marine shelf oxygenation and coupled early animal evolution. Emerg Top Life Sci, 2: 279–288

Liu Z H, Zhuang X G, Teng G E, Xie X M, Yin L M, Bian L Z, Feng Q L, Algeo T J. 2015. The lower Cambrian Niutitang Formation at Yangtiao (Guizhou, SW China): Organic matter enrichment, source rock potential, and hydrothermal influences. J Pet Geol, 38: 411–432

Liu Z R R, Zhou M F, Wang W. 2021. Mercury anomalies across the Ediacaran–Cambrian boundary: Evidence for a causal link between continental erosion and biological evolution. Geochim Cosmochim Acta, 304: 327–346

McAlister J A, Orians K J. 2015. Dissolved gallium in the Beaufort Sea of the Western Arctic Ocean: A GEOTRACES cruise in the International Polar Year. Mar Chem, 177: 101–109

Panahi A, Young G M, Rainbird R H. 2000. Behavior of major and trace elements (including REE) during Paleoproterozoic pedogenesis and diagenetic alteration of an Archean granite near Ville Marie, Québec, Canada. Geochim Cosmochim Acta, 64: 2199–2220

Park H, Schlesinger W H. 2002. Global biogeochemical cycle of boron. Glob Biogeochem Cycle, 16: 20-1–20-11

Peng S C, Babcock L E, Ahlberg P. 2020. The Cambrian Period. In: Gradstein F M, Ogg J G, Schmitz M D, Ogg G M, eds. The Geologic Time Scale 2020. Amsterdam: Elsevier. 565–629

Qin Z, Xu D, Kendall B, Zhang X, Ou Q, Wang X, Li J, Liu J. 2022. Molybdenum isotope-based redox deviation driven by continental margin euxinia during the early Cambrian. Geochim Cosmochim Acta, 325: 152–169

Remírez M N, Algeo T J. 2020. Paleosalinity determination in ancient epicontinental seas: A case study of the T-OAE in the Cleveland Basin (UK). Earth-Sci Rev, 201: 103072

Rudnick R L, Gao S. 2014. Composition of the continental crust. In: Holland H D, Turekian K K, eds. Treatise on Geochemistry. Amsterdam: Elsevier Science. 1–64

Shiller A M. 1998. Dissolved gallium in the Atlantic Ocean. Mar Chem, 61: 87–99

Sirocko F. 1994. Abrupt change in monsoonal climate: Evidence from the geochemical composition of Arabian Sea sediments. Dissertation for Doctoral Degree. Kiel: Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Sperling E A, Wolock C J, Morgan A S, Gill B C, Kunzmann M, Halverson G P, MacDonald F A, Knoll A H, Johnston D T. 2015. Statistical analysis of iron geochemical data suggests limited late Proterozoic oxygenation. Nature, 523: 451–454

Środoń J, Paszkowski M. 2011. Role of clays in the diagenetic history of nitrogen and boron in the Carboniferous of Donbas (Ukraine). Clay miner, 46: 561–582

Stolper D A, Keller C B. 2018. A record of deep-ocean dissolved O_2 from the oxidation state of iron in submarine basalts. Nature, 553: 323–327

Wang D, Ling H F, Struck U, Zhu X K, Zhu M, He T, Yang B, Gamper A, Shields G A. 2018. Coupling of ocean redox and animal evolution during the Ediacaran-Cambrian transition. Nat Commun, 9: 2575

Wang X, Shi X, Jiang G, Zhang W. 2012. New U-Pb age from the basal Niutitang Formation in South China: Implications for diachronous development and condensation of stratigraphic units across the Yangtze platform at the Ediacaran-Cambrian transition. J Asian Earth Sci, 48: 1–8

Wei G Y, Planavsky N J, Tarhan L G, Chen X, Wei W, Li D, Ling H F. 2018. Marine redox fluctuation as a potential trigger for the Cambrian explosion. Geology, 46: 587–590

Wei G Y, Planavsky N J, Tarhan L G, He T, Wang D, Shields G A, Wei W, Ling H F. 2020. Highly dynamic marine redox state through the Cambrian explosion highlighted by authigenic δ^{238}U records. Earth Planet Sci Lett, 544: 116361

Wei G Y, Planavsky N J, He T, Zhang F, Stockey R G, Cole D B, Lin Y B, Ling H F. 2021. Global marine redox evolution from the late Neoproterozoic to the early Paleozoic constrained by the integration of Mo and U isotope records. Earth-Sci Rev, 214: 103506

Wei W, Algeo T J. 2020. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks. Geochim Cosmochim Acta, 287: 341–366

Wei W, Algeo T J, Lu Y, Lu Y C, Liu H, Zhang S, Peng L, Zhang J, Chen L. 2018. Identifying marine incursions into the Paleogene Bohai Bay Basin lake system in northeastern China. Int J Coal Geol, 200: 1–17

Wen H, Fan H, Zhang Y, Cloquet C, Carignan J. 2015. Reconstruction of early Cambrian ocean chemistry from Mo isotopes. Geochim Cosmochim Acta, 164: 1–16

Williams L B, Hervig R L, Holloway J R, Hutcheon I. 2001. Boron isotope geochemistry during diagenesis. Part I. Experimental determination of fractionation during illitization of smectite. Geochim Cosmochim Acta, 65: 1769–1782

Wood R, Liu A G, Bowyer F, Wilby P R, Dunn F S, Kenchington C G, Cuthill J F H, Mitchell E G, Penny A. 2019. Integrated records of environmental change and evolution challenge the Cambrian Explosion. Nat Ecol Evol, 3: 528–538

Xu L G, Lehmann B, Mao J W, Qu W J, Du A D. 2011. Re-Os age of polymetallic Ni-Mo-PGE-Au mineralization in Early Cambrian black shales of south China—A reassessment. Econ Geol, 106: 511–522

Yan J F, Men Y P, Sun Y Y, Yu Q, Liu W, Zhang H Q, Liu J, Kang J W, Zhang S N, Bai H H, Zheng X. 2016. Geochemical and geological characteristics of the Lower Cambrian shales in the middle-upper Yangtze area of South China and their implication for the shale gas exploration. Mar Pet Geol, 70: 1–13

Yang C, Li X H, Zhu M, Condon D J, Chen J. 2018. Geochronological constraint on the Cambrian Chengjiang biota, South China. J Geol Soc Lond, 175: 659–666

Yao W H, Li Z X, Li W X. 2014. Was there a Cambrian ocean in South China?—Insight from detrital provenance analyses. Geol Mag, 152: 184–191

Ye Y H, Luo C, Liu S G, Xiao C, Ran B, Sun W, Yang D, Luba J, Zeng X. 2017. Characteristics of black shale reservoirs and controlling factors of gas adsorption in the lower Cambrian Niutitang Formation in the southern Yangtze Basin margin, China. Energy Fuels, 31: 6876–6894

Yuan W, Che, J, Teng H, Chetelat B, Cai H, Liu J, Wang Z, Bouchez J, Moynier F, Gaillardet J, Schott J, Liu C. 2021. A review on the elemental and isotopic geochemistry of gallium. Global Biogeochem Cy, 35: 1–27

Zhang S, Li H, Jiang G, Evans D A D, Dong J, Wu H, Yang T, Liu P, Xiao Q. 2015. New paleomagnetic results from the Ediacaran Doushantuo Formation in South China and their paleogeographic implications. Precambrian Res, 259: 130–142

Zhang X, Shu D. 2021. Current understanding on the Cambrian Explosion: Questions and answers. PalZ, 95: 641–660

Zhu M Y, Babcock L E, Peng S C. 2006. Advances in Cambrian stratigraphy and paleontology: Integrating correlation techniques, paleobiology, taphonomy and paleoenvironmental reconstruction. Palaeoworld, 15: 217–222

Zhu M, Zhang J, Steiner M, Yang A, Li G, Erdtmann B. 2003. Sinian-Cambrian stratigraphic framework for shallow- to deep-water environments of the Yangtze Platform: An integrated approach. Prog Nat Sci, 13: 951–960

(责任编委: 沈冰)