

沉积物源判别的地球化学方法

王 轲^{1,2}, 翟世奎^{1,2}

(1. 中国海洋大学 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 对沉积物源判别的地球化学方法进行了分类总结, 并分析了各类方法中存在的问题, 进一步给出了应用建议, 以期更加实用。综合分析表明, 常量元素(组分)主要用于表征化学风化程度和判断源岩类型; 微量元素组成不仅可以示踪物源区, 还可以判别构造环境, 其中蛛网图和三角图是最有效的判别图解, Ce 异常是判断古海洋氧化还原环境的常用指标, Eu 异常常用于区分基性岩和热液流体与酸性岩和陆源物质; 直接指示物源的同位素指标以 Sr、Nd、Pb 同位素组成及其特征值最为有效, 不仅可用于追踪沉积物源, 还可用于确定沉积物的年龄、划分沉积地层和反映区域性或全球性的地质事件。古气候变化是影响生物碎屑碳酸盐中 C、O 同位素组成变化的重要因素, 而古气候直接影响物源供给。因此, 生物碎屑碳酸盐中 C、O 同位素组成可以间接反映物源供给情况。此外, 石英 $\delta^{18}\text{O}$ 对于河流、沙漠、黄土和风尘等沉积物的物源分析以及陆海源汇效应的研究具有重要意义。在利用地球化学方法进行物源分析时, 运用单一方法往往存在一定的局限性, 应当充分利用各类方法的优势, 考虑各种造成误判的因素, 利用多种方法综合分析, 必要时还应考虑沉积环境的其他要素。

关键词: 沉积物源判别; 地球化学方法; 构造背景; 古气候; 沉积环境

中图分类号: P736.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2020)12-0132-12

DOI: 10.11759/hyxx20191115001

沉积物源分析是还原沉积古环境不可或缺的一环, 其研究内容包括物源区地理位置、母岩性质和组合特征以及沉积物的搬运距离和路径等。根据物源分析结果还可以进一步了解物源区的气候条件和构造环境, 为重建古地理环境提供理论依据^[1-3]。由于元素在理化性质上的差异, 来自不同物源的沉积物在搬运和沉积过程中会出现不同的地球化学特征响应。沉积物的地球化学特征主要受控于物源和沉积盆地大地构造背景, 其横向和纵向变化特征反映了沉积盆地的沉积环境演化, 这为利用地球化学方法实现物源的精准分析提供了理论基础^[2]。

1 常量元素在沉积物源分析中的应用

1.1 判别构造环境

早期运用常量元素分析物源的方法是根据沉积物的元素含量差异直接判别物源, 所用的指标包括 TiO_2 、 FeO 、 MnO 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 和 Al_2O_3 等^[4-5]。总体上, 从大洋岛弧、大陆岛弧到活动大陆边缘再到被动大陆边缘, SiO_2 的质量分数 $m(\text{SiO}_2)$ 逐渐增大而 $m(\text{TiO}_2)$ 、 $m(\text{FeO})$ 、 $m(\text{MnO})$ 、 $m(\text{MgO})$ 、

$m(\text{CaO})$ 、 $m(\text{Na}_2\text{O})$ 和 $m(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 逐渐减小。造成上述变化的主要原因是矿物成熟度的变化, 从岛弧环境到被动大陆边缘, 沉积物中稳定矿物如石英逐渐增多而不稳定矿物如长石逐渐减少^[6]。此外, $m(\text{Fe}_2\text{O}_3) + m(\text{MgO})$ 、 $m(\text{TiO}_2)$ 、 $m(\text{Al}_2\text{O}_3)/m(\text{SiO}_2)$ 、 $m(\text{K}_2\text{O})/m(\text{Na}_2\text{O})$ 和 $m(\text{Al}_2\text{O}_3)/(m(\text{CaO}) + m(\text{Na}_2\text{O}))$ 也可作为判别沉积物源的依据^[7-11]。Fe 和 Ti 在海水中的存留时间较短并且具有较低的迁移性^[1]; $m(\text{TiO}_2)$ 可以指示石英的富集程度; $m(\text{K}_2\text{O})/m(\text{Na}_2\text{O})$ 可以指示沉积物中钾长石和云母相对于斜长石的含量; $m(\text{Al}_2\text{O}_3)/(m(\text{CaO}) + m(\text{Na}_2\text{O}))$ 表示稳定元素与不稳定元素的比值。通常情况下, 从

收稿日期: 2019-11-15; 修回日期: 2020-06-08

基金项目: 国家自然科学基金(41530963); 中海石油(中国)有限公司专项课题(CCL2013ZJFNO729); 国家科技重大专项课题(2011ZX05025-002-03)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, Grant/Award Number, No. 41530963; Project of China National Offshore Oil Corporation (CNOOC) Limited, Grant/Award Number, No. CCL2013ZJFNO729; National Science and Technology Major Project, Grant/Award Number, No. 2011ZX05025-002-03]

作者简介: 王轲(1993-), 男, 河北张家口人, 博士研究生, 主要从事海洋地质学研究, 电话: 13070809956, E-mail: wangke93511@163.com; 翟世奎(1958-), 通信作者, 男, 山东聊城人, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋地质学研究, E-mail: zhais2000@ouc.edu.cn

大洋岛弧、大陆岛弧到活动大陆边缘再到被动大陆边缘, $m(\text{Fe}_2\text{O}_3)+m(\text{MgO})$ 、 $m(\text{TiO}_2)$ 和 $m(\text{Al}_2\text{O}_3)/m(\text{SiO}_2)$ 逐渐减小而 $m(\text{K}_2\text{O})/m(\text{Na}_2\text{O})$ 和 $m(\text{Al}_2\text{O}_3)/(m(\text{CaO})+m(\text{Na}_2\text{O}))$ 逐渐增大。然而, 构造环境并不是影响常量元素含量的唯一因素, 因而在物源分析时可能造成误判。

1.2 判断源岩类型

函数判别法可以根据同一样品中多个元素的含量特征来示踪沉积物源^[2, 7, 12], 该方法依据计算公式 $F_i=a_i x_1+b_i x_2+\dots+p_i x_p \pm C$ 。式中, F_i 为判别函数, x_1, x_2, \dots, x_p 为各元素(组分)含量, a_i, b_i, \dots, p_i 为各元素判别系数, C 为常数。各元素判别系数的大小反映了其在物源分组时的相对重要性。Bhatia 等^[6]通过分析澳大利亚东部 5 种砂岩的 11 种元素进行沉积物源判别, 验证了函数判别法的可靠性。Roser 等^[13]在应用函数判别法对新西兰 4 种杂砂岩进行物源分析时提出, 若构造背景已知, 函数判别法可用于区分基性、中性、酸性火山岩物源区和成熟大陆石英质物源区以及样品中的硅质黏土岩和砂岩。应用效果表明函数判别法相对于元素含量分析法能削弱沉积物粒度对物源分析带来的影响。

1.3 表征化学风化程度

已有研究表明, 上地壳矿物主要由石英(21%)、斜长石(41%)和钾长石(21%)组成, 其中长石是含量最高的不稳定矿物^[14]。因此, 长石的风化是影响上地壳元素迁移的重要因素。在长石的风化过程中, Ca、Na 和 K 通常会首先从长石中析离出来, 因而在风化产物中稳定的 Al 相对于 Ca、Na 和 K 富集。因此, 沉积物中 Ca、Na、K 和 Al 的相对含量可以用来表征岩石的化学风化程度。化学蚀变指数(CIA)可以量化物源区硅酸盐矿物的风化程度^[9, 14]: $\text{CIA}=(m(\text{Al}_2\text{O}_3)/(m(\text{Al}_2\text{O}_3)+m(\text{CaO})+m(\text{Na}_2\text{O})+m(\text{K}_2\text{O}))) \times 100$, 式中 $m(\text{CaO})$ 表示岩石中硅酸盐矿物的 $m(\text{CaO})$, 因为碳酸盐和磷酸盐受生物作用的影响明显大于化学风化作用的影响。玄武岩的 CIA 大约在 30~45, 花岗岩在 45~55, 未经风化的钠长石、钙长石和钾长石的 CIA 一般在 50 左右, 而以黏土矿物为主的页岩的平均 CIA 可以达到 75, 其中高岭石和绿泥石甚至接近 100。一般情况下, 沉积物中稳定矿物含量越高意味着受风化程度越高, 具有较高的 CIA。值得注意的是, 稳定矿物中重矿物的含量在很大程度上受母岩性质和沉积过程中的动力分选控制, 并且在冰川作用等

特殊条件下, 细粒碎屑沉积物可能含有较低的铝土质黏土矿物和较高的未经风化的长石。CIA 是表征岩石化学风化的敏感指标, 而化学风化程度可以反演物源区的古气候。Wei 等^[15]在研究南海北部沉积物时提出, 23 Ma 以来该地区沉积物的 CIA 经历了 4 次比较大的波动, 并推断早中新世以来中国南部古气候经历了四次冷干-暖湿交替, 同位素和微体古生物的分析结果亦验证了该结论。

由于岩石的风化过程非常复杂, 所以风化过程并不一定朝着理想的方向进行。A-CN-K 三角图可以体现实际风化过程与理想状态之间的差异^[16-17], 其 3 个端员分别为 Al_2O_3 、 $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}$ 和 K_2O 。以物源组分估计值为起点在三角图中标出预测趋势线, 即理想的化学风化过程, 而实际测得的样品数据则代表实际风化过程。从图 1 中可以看出实际化学风化过程明显偏离了理想趋势, 并可以根据偏离的方式和程度进一步分析影响沉积物化学风化过程的因素。A-CN-K 三角图可以标注 CIA, 即样品落点处距离 CN-K 边界的高度。从图 1 中可以看出, 预测趋势线和实际趋势线的起点富集斜长石(表示未经风化), 而实际趋势线上端的 $m(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 相对较低, 可能是冰川作用形成的未经风化的岩石粉末与铝土质黏土矿物混合所致。

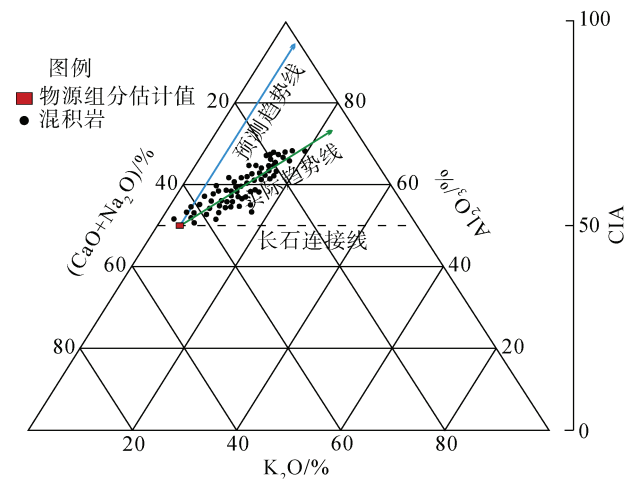


图 1 冈干达组混积岩的 A-CN-K 图解^[1-2, 14]
Fig. 1 A-CN-K diagram of the Ganganda formation migmatite^[1-2, 14]

2 微量元素在沉积物源分析中的应用

微量元素地球化学对于解释成岩的物理和化学过程具有重要意义, 也为识别不同板块构造体系提

供了理论依据。前人基于微量元素特殊的地球化学性质已经建立了诸多沉积物构造背景的判别方法。由于许多物源区因经历强烈的构造运动而受到破坏,所以利用沉积岩的微量元素特征解释早期的构造运动对于重建物源区的古地理环境具有重要意义。

微量元素在沉积物中的分配受母岩性质、源区风化强度、搬运距离和路径、成岩作用以及沉积环境的综合影响^[2, 18]。碎屑岩或沉积物中 REE(稀土元素)的含量主要受控于母岩性质,而风化和成岩作用对沉积岩(物)中 REE 的再分配影响不大^[19],因此 REE 相对于其他元素在示踪物源方面具有天然的优势。REE 示踪物源的核心思想是利用其在沉积物风化、搬运、沉积和成岩过程中所表现出来的惰性,将沉积物与潜在物源区的 REE 作对比,若两者的特征呈现出比较明显的一致性,则可以认为沉积物来自该物源区。

REE、Sc、Y、Th 和 Nb、Ta、Hf、Zr 等高场强元素以及部分大离子亲石元素(如 Rb、Ga、Cs 等)在岩石的风化过程中很不活泼,容易被碎屑颗粒吸附或结合,能够随碎屑颗粒进行长距离搬运和沉积,被视为判断源岩类型及物源区构造背景的有效工具^[19-20]。REE 以及 Th、Sc 等元素的迁移性很弱,沉积物中的相容元素 Sc 被认为完全来自源岩, $m(\text{Sc})/m(\text{Th})$ (Th 为不相容元素)可用于区分长英质组分和镁铁质组分^[20]。Zr 和 Y 因其强非迁移性而被认为是良好的物源示踪指标^[21]。另外,上述元素在海水中的含量极低、居留时间短且在海底沉积物中几乎全部来自陆源碎屑,能够较好地反映物源区的地球化学特征^[22-23]。

沉积物在沉积前后都会不同程度地受到同期或后期地质作用的改造,而且沉积物源本身具有复杂性^[24]。垂直的构造作用可以使物源区抬升或凹陷,同时混入不同年龄的沉积物;水平的构造作用可使物源区沉积物发生横向位移^[1];逆冲推覆作用可使古老沉积物覆盖于年轻沉积物之上甚至出露地表^[25]。因此,沉积物源必须结合物源区的构造背景综合分析,结论应当有构造背景方面的佐证。

微量元素主要通过蛛网图、双变量图和三角图的形式来判别沉积物源区的构造环境。蛛网图中,微量元素的含量被标准化,目的是去除奇偶效应的影响以反映样品真实的微量元素分配模式^[7, 26]。目前,不同构造环境下微量元素含量的变化范围主要通过分析大量样品数据来确定。Bhatia 等^[27]在分析澳大利亚东部砂岩中的微量元素时利用蛛网图总结了大

洋岛弧、大陆岛弧、活动大陆边缘和被动大陆边缘的微量元素特征。总体上,从大洋岛弧到被动大陆边缘,轻稀土的质量分数 $m(\text{LREE})$ 和 $m(\text{Ba})/m(\text{Sr})$ 、 $m(\text{Rb})/m(\text{Sr})$ 、 $m(\text{La})/m(\text{Y})$ 、 $m(\text{Ni})/m(\text{Co})$ 逐渐升高而 $m(\text{V})$ 、 $m(\text{Sc})$ 和 $m(\text{Ba})/m(\text{Rb})$ 、 $m(\text{K})/m(\text{Th})$ 、 $m(\text{K})/m(\text{U})$ 逐渐降低。大洋岛弧和大陆岛弧轻微富集 LREE 且没有出现 Eu 异常,活动大陆边缘出现轻微的 Eu 负异常,被动大陆边缘则出现明显的 Eu 负异常和 LREE 富集。Ce 具有 +3、+4 两种价态的离子,氧化条件下 Ce^{3+} 易被氧化为 Ce^{4+} 而被氧化物胶体吸附沉淀,使海水呈现 Ce 亏损;反之,还原条件下海水 Ce 亏损不明显甚至轻微富集。目前,Ce 异常是判断古海洋氧化还原环境的常用指标,在我国内陆及边缘海沉积环境研究中应用十分广泛^[28-30]。Eu 在斜长石中非常富集,基性岩常呈现 Eu 正异常,酸性岩由于斜长石的析出而呈现 Eu 负异常,因此 Eu 异常常用于区分基性岩和热液流体与酸性岩和陆源物质^[31-33]。此外,LREE 在风化过程中较 HREE(重稀土)不易发生迁移^[34],因此沉积物 $m(\text{LREE})/m(\text{HREE})$ 可以指示陆源碎屑物质输入的变化情况,南海西沙岛礁“西科 1 井”岩心样品的微量元素分析结果也证实了这一观点^[35]。

双变量图和三角图的原理基本一致,首先在图中圈定出不同构造环境下微量元素含量的变化范围,然后将样品数据投影在图中,根据落点情况进行物源判定。 $m(\text{La})-m(\text{Th})$ 、 $m(\text{Th})-m(\text{Zr})$ 、 $m(\text{V})-m(\text{Sc})$ 和 $(m(\text{La})/m(\text{Y}))-(m(\text{Sc})/m(\text{Cr}))$ 等双变量图以及 La-Th-Sc、Th-Sc-Zr 和 Th-Co-Zr 等三角图是区分大洋岛弧、大陆岛弧、活动大陆边缘和被动大陆边缘四种构造环境的有效工具^[6, 8, 16, 26]。

上述判别方法已经成为物源和构造背景分析的经典方法并被广泛应用。Shao 等^[36]应用 La-Th-Sc 和 Th-Sc-Zr 三角图对南海东沙群岛沉积堆积体的物源分析表明,该区样品均落入台湾样品(岛弧环境)的范围内,与代表珠江来源的冰后期沉积物样品(大陆边缘)差异较大,并推断南海北部陆坡高沉积速率堆积体来自南海东北部,显示了南海北部深海沉积物源的复杂性。Wei 等^[37]结合南海北部、北部湾、南沙群岛和菲律宾岛弧的样品数据分析了南海的 La-Th-Sc 元素特征,阐明了南海东西部的物源差异。南海北部琼东南盆地 LS33-1-1 岩芯样品的 Th-Co-Zr 三角图^[38]表明,崖城组地层与相邻的崖三段底部地层所处的构造环境存在明显差异(图 2),前者落在活

动大陆边缘附近而后者落在大洋岛弧附近,表明琼东南盆地沉积物的物源在渐新世中晚期发生突变,这与南海的构造演化进入裂陷晚期和岩浆活动强度减弱密切相关。

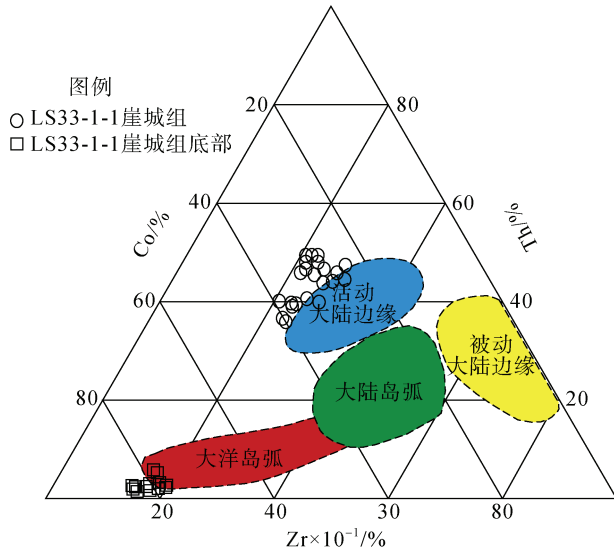


图2 琼东南盆地 LS33-1-1 钻井岩屑的 Th-Co-Zr 物源判别图^[38]

Fig. 2 Th-Co-Zr provenance discrimination of LS33-1-1 drilling core in Qiongdongnan Basin^[38]

通常情况下,从大陆边缘环境到岛弧环境的 $m(\text{Th})/m(\text{Sc})$ 应趋于减小,而代表岛弧环境的安第斯山脉前陆的样品却具有与古老上地壳几乎相同的 $m(\text{Th})/m(\text{Sc})$,这是因为在沉积循环和分选过程中该样品富集了来自古老地壳的重矿物^[39]。此外,相似的沉积物其物源可能大不相同,地球化学方法极大地提高了物源分析的精准度。已有研究表明,黄土高原和青藏高原都存在黄土沉积,但 La-Th-Sc 和 Th-Co-Zr 三角图显示两者的物源明显不同^[40],后者的物源为附近河谷和风的短距离搬运沉积,混合作用较弱,而前者物源的混合作用较强。Muhs 等^[41]通过分析西大西洋群岛红土的 REE 组成,推断其物源主要来自岛弧区域的火山灰和非洲大陆风尘,而非传统认识上的本地火成岩和深成岩以及碳酸盐岩的风化残余组分。

3 稳定同位素组成在沉积物源分析中的应用

稳定同位素地球化学是研究地球各圈层或天体中稳定同位素的形成、丰度、分布和演化规律的学

科,又可分为放射衰变成因同位素地球化学和非放射性成因同位素地球化学。两者的理论基础基本相同:在地质作用过程中,在宏观地质体形成的同时还发生了同位素组成的变化,该变化记录了地质作用发生的时间、过程和条件^[42]。但是,两者的应用领域既相互交叉又各有不同,前者主要用于地质计时和壳幔物质演化分析,后者主要用于沉积过程、物源示踪和环境演变等方面的研究。

3.1 Sr、Nd 和 Pb 同位素直接指示物源

Sr 同位素不会因温度、压力和微生物的作用而发生分馏,海相碳酸盐岩形成时从海水中获得 Sr 而不会引起 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 的变化^[43]。因此,同期形成的海相碳酸盐岩具有一致的 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$,能够反映地质历史中海水的 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 的变化^[44]。由于 Sr 在大洋海水中的居留时间(约 2×10^6 a)远长于海水的混合时间(约 1 500 a),在任一时刻全球范围内大洋海水的 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 是一致的^[43-44]。因此,海水的 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 是仅随时间变化的函数,为全球地层对比提供了科学依据^[45-47]。把未知年代海相地层中自生碳酸盐岩的 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 与已建立的地史时期海水的 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 的变化曲线进行对比,可以获得未知地层的年龄^[48-49]。目前,国内外已有较多的锶同位素地层学研究成果,时代覆盖了整个显生宙以及前寒武纪的部分时期^[45-47, 50]。显生宙以来全球海水 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 存在较大波动,造成波动的最主要原因是海水 Sr 源的不断变化。海水的 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 主要受壳源和幔源两个物源的控制:壳源锶主要由风化的陆源碎屑物提供,其平均 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 为 0.720 左右;幔源锶主要由岩浆和海底热液系统提供,其平均 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 约为 0.704^[43, 51-53]。陆地风化物质会随大气和地表径流进入海洋,地幔物质会通过岩浆和热液活动进入海洋,从而改变海水的 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 。气候变化、洋底构造作用、海底热液系统的变化、造山事件、冰川活动、海平面变化以及全球性的构造运动和灾难性事件等重大地质事件都会影响海洋的 Sr 源,从而造成海洋 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 发生变化^[54-56]。因此,海相沉积物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 变化曲线能够反映上述地质事件,进而为沉积物源区(幔源和壳源)的贡献、古环境演变以及地层划分和对比等提供重要依据。苏晓云等^[32]利用黄土高原洛川剖面黄土-古土壤的 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 对海水 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 变化的影响因素进行了定量分

析, 结果表明海底玄武岩的热液蚀变输入在引起海水 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 变化方面发挥着与河流输入同等重要的作用。Bi 等^[57]在分析西科 1 井岩芯碳酸盐岩的 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 变化时提出, 新近纪以来南海海水 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 的变化过程大致可以分为 3 个阶段(图 3): 21.6~13.6 Ma 为南海海水 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 的波动快速上升阶段; 13.6~5.7 Ma 为 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 平稳上升阶段, 波动幅度较小, 上升趋势明显; 5.7 Ma 以来为 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 剧烈波动阶段, 上升趋势渐缓,

出现最(极)大值。青藏高原隆升速率与琼东南盆地堆积速率之间良好的对应关系(图 3)表明, 新近纪以来青藏高原隆升所形成的风化剥蚀产物是南海沉积盆地的重要物源。虽然青藏高原隆升速率曲线与西科 1 井岩芯碳酸盐岩 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 曲线变化趋势一致, 但是两者在时间上却不吻合, 这既证明了 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 可以反映物源输入的变化, 又说明海相碳酸盐岩的 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 对物源输入变化的响应存在一定的滞后性。

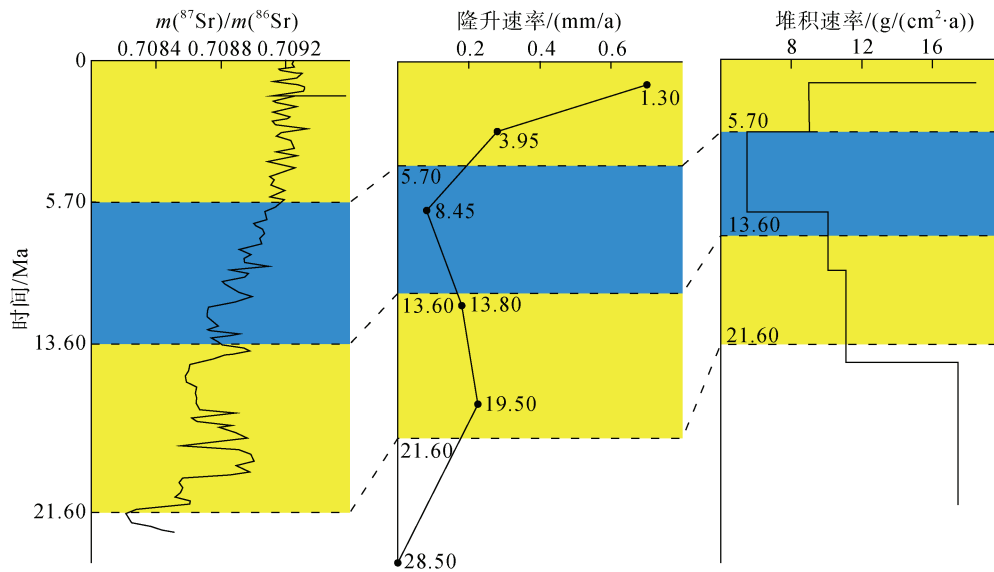


图 3 西沙岛礁西科 1 井岩芯碳酸盐岩 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 与青藏高原隆升速率和琼东南盆地沉积物平均堆积速率对比图^[57-60]
Fig. 3 Comparison of $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$ ratio of "Xike 1 well" reef core in Xisha island with uplift rate of Qinghai Tibet Plateau and average accumulation rate of sediments in Qiongdongnan Basin^[57-60]

Nd 在海水中的居留时间很短并且含量极低, 因此沉积岩(物)中 Nd 的丰度基本与源岩一致^[49]。McLennan 等^[48]总结了 Nd 同位素地球化学在限制沉积物源年龄和重建沉积古环境方面的优势, 弥补了岩石学方法分析物源的缺陷。由于陆源碎屑沉积物是剥蚀区出露岩石的风化产物, 而出露岩石的年龄不尽相同, 沉积物的 Nd 同位素模式年龄是年轻幔源物质与古老陆壳碎屑的平均年龄^[49]。Mondal 等^[61]通过分析印度西北部花岗岩的 Nd 模式年龄提出, 岩层中富钾花岗岩可能是由不均一的古老地壳重融形成。Pinarelli 等^[62]在分析意大利瓦尔卡诺火山硫化物时指出, Sr-Nd-Pb 同位素比值的显著变化是地壳在浅层岩浆房中同化所致。在地球分异过程中, 地壳中 Nd 的富集程度大于 Sm, 因而地壳中 ^{143}Nd 含量(由 ^{147}Sm 衰变产生)的增速小于地幔中 ^{143}Nd 含量(由 ^{147}Sm 衰变产生)的增速, 壳源 Nd 比幔源 Nd 具有更

低的 $m(^{143}\text{Nd})/m(^{144}\text{Nd})$ ^[63], 这与 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 特征相反, 因此二者在沉积物源分析中通常互为佐证。由于 Nd 在海水中的居留时间短于海水的混合时间, 因此在垂直剖面上和不同海盆之间的 Nd 同位素均有明显差异^[64-65]。邵磊等^[66]在分析南海北部陆源沉积物时发现, 以伶仃洋-东沙岛连线为界, Nd 同位素呈现东北高、西南低的特征, 揭示了南海北部沉积物的多源性。Wei 等^[37]根据 $(m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr}))-\epsilon\text{Nd}$ 双变量图对南海沉积物样品的物源进行圈定, 结果亦显示南海物源的复杂性(ϵNd 为样品 $m(^{143}\text{Nd})/m(^{144}\text{Nd})$ 相对于均一岩浆库 $m(^{143}\text{Nd})/m(^{144}\text{Nd})$ 的偏差值)。Weldeab 等^[34]根据尼罗河沉积物(高 ϵNd , 低 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$)和意大利东南部克里特岛附近沉积物(低 ϵNd , 高 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$)的 Sr、Nd 同位素组成特征, 利用 $(m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr}))-\epsilon\text{Nd}$ 双变量图分析了两者对东地中海沉积物源的贡献程度。郑力等^[67]通过

比较中国东部黄土与中国西北部黄土高原的 Sr-Nd 同位素特征,认为中国东部的黄土物质极有可能来自附近的干旱区,而非来自黄土高原的风尘沉积,具有明显的近源性。杨守业等^[68]利用 REE 和 Nd 同位素组成分析结果研究了上新世以来长江三角洲地区沉积物的物源变化,结果表明上新统沉积物与第四系沉积物的来源明显不同,前者主要来自长江中下游地区,后者则延伸至更广泛的长江上游地区。

自然界中的 Pb 存在 ^{204}Pb 、 ^{206}Pb 、 ^{207}Pb 和 ^{208}Pb 四种稳定同位素,其中只有 ^{204}Pb 尚未被发现有放射性母体,因此利用 Pb 同位素进行沉积物源分析的基本思路通常是通过比较研究区和潜在物源区的 Pb 同位素组成 ($m(^{206}\text{Pb})/m(^{204}\text{Pb})$), $m(^{207}\text{Pb})/m(^{204}\text{Pb})$), $m(^{208}\text{Pb})/m(^{204}\text{Pb})$) 等直接判断物源^[69],这与 Nd 同位素和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - ϵNd 双变量图分析物源的基本思路十分相似。另外,沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄也常被用于河流^[70]及海洋^[71]沉积物的物源分析,其基本思路是将研究区沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄谱图与潜在物源区沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄谱图做对比,年龄组合特征越相似表明后者为前者的物源的可能性越大。需要注意的是,实际上许多不同的物源区具有相似甚至重叠的锆石 U-Pb 年龄谱或 ($m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$)- ϵNd 变化范围,单一的碎屑锆石 U-Pb 年龄谱图或 ($m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$)- ϵNd 双变量图并不一定能将所有物源完全区分^[72]。因此,将各种同位素沉积物源分析方法与岩石学、矿物学等其他物源分析方法相结合进行物源分析是十分必要的。

以多种同位素为参数的二端员混合方程能够定量的分析两个端员对于沉积物的同位素比值的贡献度^[73]: $R_M = (R_A X_A f_A + R_B X_B f_B) / (X_A f_A + X_B f_B)$, 式中: R_M 代表混合物的同位素比值, R_A 、 R_B 分别代表端员 A 和端员 B 的同位素比值, X_A 、 X_B 分别代表端员 A 和端员 B 的相应元素含量, f_A 、 f_B 分别代表端员 A 和端员 B 的混合比例。Sr、Nd 同位素是二端员混合方程的常用参数,二者通常互为佐证共同揭示沉积物源的变化情况。Jamieson 等^[74]在研究热液喷口沉积物的形成条件时,分别测得热液和海水两个端员的 $m(\text{Sr})$ 和 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 以及沉积物中重晶石的 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$, 利用二端员混合方程计算两个端员的混合比例,量化了热液和海水两种物源对于重晶石 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 的贡献。孟宪伟等^[35]利用 Sr 同位素二端员混合方程对冲绳海槽表层沉积物进行了物源的定量分析,结果表明沉积物总体呈现中国大陆硅酸盐物质和海槽

火山碎屑的二端员混合特征,并且由西向东、由南向北陆源物质所占比例逐渐减小。Tütken 等^[75]利用以 Sr 同位素和 Nd 同位素为参数的二端员混合方程定量地分析了挪威北部北极地区海洋沉积物在冰期和间冰期的物源输入情况。如前所述,海洋沉积物的 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 是壳源锶和幔源锶混合的结果,两者的混合比例可以反映地史时期的物源输入情况。当研究由自生矿物和陆源碎屑矿物组成的海洋沉积物时,尽管自生矿物的 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 通常比陆源碎屑矿物低,但自生矿物中的 Sr 含量可以达到陆源碎屑矿物的 8 倍以上^[76-77]。因此,在计算混合比例时,两个端员的 Sr 含量不可忽视。

3.2 C、O 同位素间接指示物源

生物碎屑碳酸盐中的 $\delta^{13}\text{C}$ 可以反演古气候,而古气候的变化将直接影响海平面变化、生物活动以及陆源物质输入的通量。因此,生物碎屑碳酸盐中的 $\delta^{13}\text{C}$ 能够在一定程度上反映物源的变化情况^[78-79]。沉积时有机碳的氧化与相对埋藏量被认为是影响生物碎屑碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 的最重要因素^[80]。影响有机碳相对埋藏量的直接原因主要有生物活动、海平面变化和气候剧变。生物体和大气中相对富集 ^{12}C 而海水中富集 ^{13}C , 同时期的海水与形成于海水的生物碎屑碳酸盐具有一致的 $\delta^{13}\text{C}$ 。在温暖气候条件下,光合作用增强,生物大量繁殖,导致海水的 $\delta^{13}\text{C}$ 升高,同时冰川融化使海平面上升,有机碳加速埋藏,因此生物碎屑碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 升高大致对应温暖气候;反之,生物碎屑碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 降低大致对应寒冷气候^[81-82]。气候剧变可能会给海洋生物特别是狭温生物带来灾难性的影响,进而影响古生产力,生物碎屑碳酸盐表现为 $\delta^{13}\text{C}$ 降低。

$\delta^{18}\text{O}$ 受温度影响较大,冰盖中往往富集 ^{16}O 。冰期时,冰盖面积增大导致海平面下降和海水盐度升高, ^{16}O 被圈闭在冰盖中,造成海水 $\delta^{18}\text{O}$ 增大;间冰期时,冰川大规模消融导致海平面上升和海水盐度降低, ^{16}O 从冰盖中释放出来,造成海水 $\delta^{18}\text{O}$ 降低^[83-84]。因此生物碎屑碳酸盐的 $\delta^{18}\text{O}$ 也可以在一定程度上反演古气候的变化。Jian 等^[85]对南海有孔虫壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 的研究表明,在过去的 13 ka 里,两个 $\delta^{18}\text{O}$ 急剧下降的时间点(12.05 ka BP 和 7.7 ka BP)与地质历史中暖期的时间点相吻合。然而,碳酸盐岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 易受后期构造、热液及大气降水等作用的影响,古老地层的 $\delta^{18}\text{O}$ 指示意义一般较差^[80]。石英作为广泛存

在于岩石和沉积物的常见矿物,具有硬度大和化学性质稳定的特征。侯圣山等^[63]通过对黄土高原 7.0 MaBP 以来的黄土-红黏土堆积的石英氧同位素分析发现,石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 在没有发生重结晶的情况下几乎不受风化、剥蚀、搬运和沉积等表生作用的影响,并且与石英粒度和其母岩形成时的温度常呈反比关系,如低温形成的沉积岩的石英 $\delta^{18}\text{O}$ 通常比高温形成的火成岩的石英 $\delta^{18}\text{O}$ 高。因此,相同粒径范围石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 能够在一定程度上反映物源。目前,石英 $\delta^{18}\text{O}$ 已被广泛应用于河流^[67]、沙漠^[68]、黄土^[86]和风尘^[69]等沉积物的物源分析以及陆海源汇效应的研究。值得注意的是,变质石英 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围与岩浆石英和沉积自生石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围多有重叠,因此石英 $\delta^{18}\text{O}$ 对于形成条件复杂的变质石英的区分度较差^[70]。另外,石英 $\delta^{18}\text{O}$ 不能区分形成条件相同但形成时代不同的岩石或沉积物,因此在应用石英 $\delta^{18}\text{O}$ 进行物源分析时应特别谨慎。

4 讨论

沉积物源追踪(分析)和沉积古环境恢复是沉积盆地分析的基础,可为盆地的发展演化和沉积充填提供重要的科学依据,同时也是区域地层对比和油气储层预测中最基础性的工作,在油气资源勘探中意义重大。物源分析主要是回答 3 个问题:沉积物来自什么地方(地理位置)?沉积物来源于什么性质的地质体(岩石类型)?沉积物搬运的途径(沉积动力及其影响因素)?尽管海洋沉积物复杂多变,但主体包括陆源和自生(生物和化学)沉积两大部分。对于陆源物质我们关心的是来自哪里和沉积方式?对于自生沉积我们关心的是所反映的沉积环境。

地球是由化学元素组成的。在地球系统的各种地质作用形成宏观地质体的同时,无不伴随着元素的再分配过程。因此,元素的地球化学特征记录了地质作用发生的时间(同位素)、过程(元素的含量及特征比值变化)和结果(元素的富集和亏损)。因此,地球化学特征是地质作用过程的“指纹”。不同的沉积物类型其元素组成不同,这是物源追踪和古环境恢复的基础。

尽管在沉积物的风化和搬运过程中会经历各种改造和元素交换,但是陆源碎屑沉积总体上仍继承了源区的性质,特别是在风化、搬运和成岩过程中相对不易迁移的组分(如 REE 和 Sc、Zr 等微量元素),这为物源判别提供了基础。常量组分主要用来判断物源区的主要岩石类型和构造背景等,部分指标可以

指示环境。微量、稀土元素主要被用于细粒沉积物的源区及构造背景判定,因为其中有些元素(如 Zr、Th、Sc 和 Y 等)在风化搬运过程中显示出极强的惰性,又极易被胶体离子吸附而快速进入到细粒沉积物中。REE 的分配模式从源区到沉积区基本不会发生大的变化。REE 及某些微量元素的比值在沉积和变质作用过程中也具有较弱的惰性(稳定)。因此,沉积物中的上述元素是母岩地球化学特征的良好指示剂。源于不同构造环境的碎屑沉积具有不同的微量元素含量和比值特征,被广泛用于沉积盆地物源区构造环境的判别。

海洋沉积物中的矿物年龄(常用的碎屑锆石年龄)是判断物源的重要指标,一是可以直接指示物源地质体,二是可以说明物源地质体的性质,三是可以说明物源的大体范围。

海洋沉积物源分析的地球化学等方法有很多种,更有多种物源判别的指标和方法仍在探索和完善之中。每种方法都有各自的适用对象和针对的科学问题。因此,在利用地球化学指标分析沉积物源时应当充分考虑各种方法的适用性,有时需要多种方法的相互佐证。

5 结论

1) 常量元素的含量和比值特征可以判别构造环境和源岩类型。CIA 可以指示沉积物的化学风化程度,A-CN-K 三角图则可以体现实际风化过程与理想状态之间的差异。

2) 依据微量元素的判别图解可以区分物源区大的构造环境,其中以蛛网图、双变量图和三角图最为有效。Ce 异常是判断古海洋氧化还原环境的常用指标, Eu 异常常用于区分基性岩和热液流体与酸性岩和陆源物质。

3) 沉积物的 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 可用于划分全球沉积地层和指示区域性或全球性的地质事件。对比 Nd 同位素模式年龄和沉积年龄,可以判断沉积物是以幔源物质为主还是以古老地壳的碎屑为主。 $m(^{87}\text{Sr})/m(^{86}\text{Sr})$ 与 ϵNd 相结合可以大致圈定物源区。二端员混合方程能够量化两个端员对于沉积物的贡献度。生物碎屑碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 可以揭示古生产力的变化情况, $\delta^{18}\text{O}$ 能够反映冰川的凝聚与消融,二者均可以反演古气候的变化。石英 $\delta^{18}\text{O}$ 对于河流、沙漠、黄土和风尘等沉积物的物源分析以及陆海源汇效应的研究具有重要意义。

4) 在利用地球化学指标分析沉积物源时应当充分考虑各种方法的适用性,有时需要多种方法的相互佐证。

参考文献:

- [1] 徐亚军, 杜远生, 杨江海. 沉积物源分析研究进展[J]. 地质科技情报, 2007, 26(3): 26-32.
Xu Yajun, Du Yuansheng, Yang Jianghai. Advances in sediment source analysis[J]. Geoscientist Information, 2007, 26(3): 26-32.
- [2] 汪正江, 陈洪德, 张锦泉. 物源分析的研究与展望[J]. 沉积与特提斯地质, 2000, 20(4): 104-110.
- [3] 周新锋, 李继红, 王帅, 等. 沉积物源分析方法综述[J]. 地下水, 2013, 36(1): 113-114.
- [4] Ortiz E, Roser B P. Major and trace element provenance signatures in stream sediments from the Kando River, San'in district, southwest Japan[J]. Island Arc, 2010, 15(2): 223-238.
- [5] Tripathy G R, Singh S K, Ramaswamy V. Major and trace element geochemistry of Bay of Bengal sediments: Implications to provenances and their controlling factors[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2014, 397: 20-30.
- [6] Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. The Journal of Geology, 1983, 91(6): 611-627.
- [7] Armstrong-Altrin J S, Lee Y I, Kasper-Zubillaga J J, et al. Mineralogy and geochemistry of sands along the Manzanillo and El Carrizal beach areas, southern Mexico: Implications for palaeoweathering, provenance and tectonic setting[J]. Geological Journal, 2016, 52(4): 559-582.
- [8] Mader D, Neubauer F. Provenance of Palaeozoic sandstones from the Carnic Alps (Austria): Petrographic and geochemical indicators[J]. International Journal of Earth Sciences, 2004, 93(2): 262-281.
- [9] Pinto L, Herail G, Moine B, et al. Using geochemistry to establish the igneous provenances of the Neogene continental sedimentary rocks in the Central Depression and Altiplano, Central Andes[J]. Sedimentary Geology, 2004, 166(1/2): 157-183.
- [10] Halla J, Hunen J V, Heilimo E, et al. Geochemical and numerical constraints on Neoproterozoic plate tectonics[J]. Precambrian Research, 2009, 174(1-2): 155-162.
- [11] Wang Yang, Cheng Suhua. Field relation, geochemistry and origin of the Xinglonggou volcanic rocks in Beipiao area, Liaoning Province (China): Reappraisal on the foundering of lower continental crust of North China Craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 47: 35-50.
- [12] Barnes, Philip M. Provenance of Cretaceous accretionary wedge sediments: The Mangapokia Formation, Wairarapa, New Zealand[J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 1990, 33(1): 125-135.
- [13] Roser B P, Korsch R J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data[J]. Chemical Geology, 1988, 67(1-2): 119-139.
- [14] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 1982, 299(5885): 715-717.
- [15] Wei Gangjian, Li Xianhua, Liu Ying, et al. Geochemical record of chemical weathering and monsoon climate change since the early Miocene in the South China Sea[J]. Paleoclimatology, 2006, 21: PA4214.
- [16] Concepcion R A B, Dimalanta C B, Yumul G P, et al. Petrography, geochemistry and tectonics of a rifted fragment of Mainland Asia: Evidence from the Lasala Formation, Mindoro Island, Philippines[J]. International Journal of Earth Sciences, 2012, 101(1): 273-290.
- [17] Nesbitt H W, Young G M. Formation and diagenesis of weathering profiles[J]. The Journal of Geology, 1989, 97(2): 129-147.
- [18] 刘肖霞, 李建明. 稀土元素在物源分析研究中的应用: 以鄂尔多斯盆地上古生界为例[J]. 内蒙古石油化工, 2008, 18(6): 21-22.
Liu Xiaoxia, Li Jianming. The appliance of rare earth element in the study of provenance analysis: with the example of Ordos basin in Neoproterozoic[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2008, 18(6): 21-22.
- [19] 毛光周, 刘池洋. 地球化学在物源及沉积背景分析中的应用[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(4): 337-348.
Mao Guangzhou, Liu Chiyang. Application of geochemistry in provenance and depositional setting analysis[J]. Chinese Journal of Geoscience and Environment, 2011, 33(4): 337-348.
- [20] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution[J]. The Journal of Geology, 1985, 94(4): 57-72.
- [21] 李双应, 李任伟, 岳书仓, 等. 安徽肥西中生代碎屑岩地球化学特征及其对物源制约[J]. 岩石学报, 2004, 20(3): 667-676.
Li Shungying, Li Renwei, Yue Shucang, et al. Geochemistry of Mesozoic detrital rocks and its constraints on provenance in Feixi area, Anhui Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(3): 667-676.
- [22] Kato Y, Nakao K, Isozaki Y. Geochemistry of Late Permian to Early Triassic pelagic cherts from southwest Japan: Implications for an oceanic redox change[J]. Chemical Geology, 2002, 182(1): 15-34.
- [23] Norman M D, Deckker P D. Trace metals in lacustrine and marine sediments: A case study from the Gulf of Carpentaria, northern Australia[J]. Chemical Geology,

- 1990, 82(3-4): 299-318.
- [24] Dill H G. A review of heavy minerals in clastic sediments with case studies from the alluvial-fan through the nearshore-marine environments[J]. *Earth-Science Reviews*, 1998, 45(1): 103-132.
- [25] 王岳军, 范蔚茗, 林舸. 盆地沉积物示踪源区山脉隆升剥露的几种方法[J]. *地质科技情报*, 1999, 18(2): 85-89.
Wang Yuejun, Fan Weiming, Lin Ge. Several indicative methods of mountain uplift-erosion from basin sediments[J]. *Geotechnical Information*, 1999, 18(2): 85-89.
- [26] Floyd P A, Leveridge B E, Franke W, et al. Provenance and depositional environment of Rhenohercynian synorogenic greywackes from the Giessen Nappe, Germany[J]. *Geologische Rundschau*, 1990, 79(3): 611-626.
- [27] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of greywackes and tectonic discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 92(2): 181-193.
- [28] 严杰. 鸭绿江河口及近岸地区稀土元素分布特征及物源指示意义[D]. 南京: 南京大学, 2011.
Yan Jie. Rare earth element compositions and their implications for material sources in the sediments of Yalu Estuary and its coastal waters[D]. Nanjing: Nanjing University, 2011.
- [29] 朱赖民, 高志友, 尹观, 等. 南海表层沉积物的稀土和微量元素的丰度及其空间变化[J]. *岩石学报*, 2007, 23(11): 2963-2980.
Zhu Laimin, Gao Zhiyou, Yin Guan, et al. Content and spatial change of rare earth element and trace element of surficial sediment in the South China Sea[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(11): 2963-2980.
- [30] Webb G E, Kamber B S. Rare earth elements in Holocene reefal microbialites: a new shallow seawater proxy[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(9): 1557-1565.
- [31] Bi Dongjie, Zhai Shikui, Zhang Daojun, et al. Geochemical characteristics of the trace and rare earth elements in reef carbonates from the Xisha Islands (South China Sea): Implications for sediment provenance and paleoenvironment[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2019, 18(6): 1291-1301.
- [32] 苏晓云, 杨杰东, 陈骏. 从黄土 Sr 同位素探讨海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 变化的原因[J]. *南京大学学报: 自然科学版*, 2003, 39(3): 327-336.
Su Xiaoyun, Yang Jiedong, Chen Jun. Causes of changes in seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ from the study on Sr isotopes of loess of the Chinese Loess Plateau[J]. *Journal of Nanjing University: Natural Science Edition*, 2003, 39(3): 327-336.
- [33] 蓝先洪. 钕同位素在海洋地球化学研究中的意义[J]. *海洋地质前沿*, 1998, 4(1): 1-3.
- [34] Weldeab S, Emeis K C, Hemleben C, et al. Provenance of lithogenic surface sediments and pathways of riverine suspended matter in the Eastern Mediterranean Sea: Evidence from $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios[J]. *Chemical Geology*, 2002, 186(1): 139-149.
- [35] 孟宪伟, 杜德文, 吴金龙, 等. 冲绳海槽中段表层沉积物物质来源的定量分离: Sr-Nd 同位素方法[J]. *海洋与湖沼*, 2001, 32(3): 319-326.
Meng Xianwei, Du Dewen, Wu Jinlong, et al. Quantitative partition of mixed surface sediments from the middle Okinawa Trough into their end-members using Sr-Nd isotope[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2001, 32(3): 319-326.
- [36] Shao Lei, Li Xianhua, Wei Gangjian, et al. Provenance of a prominent sediment drift on the northern slope of the South China Sea[J]. *Science in China Series D*, 2001, 44(10): 919-925.
- [37] Wei Gangjian, Liu Ying, Ma Jinlong, et al. Nd, Sr isotopes and elemental geochemistry of surface sediments from the South China Sea: Implications for provenance tracing[J]. *Marine Geology*, 2012, 319-322(2): 21-34.
- [38] 李娜, 翟世奎, 刘新宇, 等. 琼东南盆地深水 LS33-1-1 钻井岩心微量元素地球化学特征及其沉积环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(3): 1-12.
Li Na, Zhai Shikui, Liu Xinyu, et al. The trace elements geochemistry and depositional environment changes recorded in the core of well LS33-1-1 in deepwater area of Qiongdongnan Basin[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2014, 34(3): 1-12.
- [39] Basu A, Sharma M, Decelles P. Nd, Sr-isotopic provenance and trace element geochemistry of Amazonian foreland basin fluvial sands, Bolivia and Peru: implications for ensialic Andean orogeny[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1990, 100(1): 1-17.
- [40] Sun J M. Loess sedimentation in Tibet: provenance, processes, and link with Quaternary glaciations[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(17): 2265-2280.
- [41] Muhs D R, Budahn J R, Prospero J M, et al. Geochemical evidence for African dust inputs to soils of western Atlantic islands: Barbados, the Bahamas, and Florida[J]. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 2007, 112(F2): F02009.
- [42] 韩吟文, 马振东, 张宏飞, 等. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 213-266.
Han Yinwen, Ma Zhendong, Zhang Hongfei, et al. *Geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 213-266.
- [43] 胡作维. 川东北地区三叠系飞仙关组白云岩的形成机制研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
Hu Zuwei. Dolomitization of the Triassic Feixianguan Formation, northeastern Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010.

- [44] 黄成刚, 黄思静, 吴素娟, 等. 100 Ma 来海水的锶同位素组成演化及主要控制因素[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(2): 23-28.
Huang Chenggang, Huang Sijing, Wu Sujuan, et al. Sr isotope composition and evolution in seawater over past 100 Ma and control factors[J]. Chinese Journal of Geoscience and Environment, 2006, 28(2): 23-28.
- [45] Veizer J, Ala D, Azmy K, et al. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater[J]. Chemical Geology, 1999, 161: 59-88.
- [46] Kristall B, Jacobson A D, Hurtgen M T. Modeling the paleo-seawater radiogenic strontium isotope record: A case study of the Late Jurassic-Early Cretaceous[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2017, 472: 163-176.
- [47] Kochnev B B, Pokrovsky B G, Kuznetsov A B, et al. C and Sr isotope chemostratigraphy of Vendian-Lower Cambrian carbonate sequences in the central Siberian Platform[J]. Russian Geology and Geophysics, 2018, 59(6): 585-605.
- [48] McLennan S M, Hemming S R, Mcdaniel D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics[J]. Special Paper of the Geological Society of America, 1993, 284: 21-40.
- [49] 赵红格, 刘池洋. 物源分析方法及研究进展[J]. 沉积学报, 2003, 21(3): 409-415.
Zhao Hongge, Liu Chiyang. Source analysis methods and research progress[J]. Acta Sedimentae Sinica, 2003, 21(3): 409-415.
- [50] 王文倩, 王伟, 冯先翠, 等. 锶同位素地层学在海相地层划分和对比中的应用: 以二叠纪乐平世海相碳酸盐岩地层为例[J]. 地层学杂志, 2014, 38(4): 402-416.
Wang Wenqian, Wang Wei, Feng Xiancui, et al. Strontium isotope stratigraphy on the division and correlation of marine sequences: An example from Lopingian marine carbonate sections[J]. Journal of Stratigraphy, 2014, 38(4): 402-416.
- [51] 黄思静, 石和, 张萌, 等. 锶同位素地层学在碎屑岩成岩研究中的应用[J]. 沉积学报, 2002, 20(3): 359-366.
Huang Sijing, Shi He, Zhang Meng, et al. Application of strontium isotope stratigraphy to diagenesis research[J]. Acta Sedimentae Sinica, 2002, 20(3): 359-366.
- [52] 史忠生, 陈开远, 何胡军, 等. 锶同位素在沉积环境分析方面的应用[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(2): 187-190.
Shi Zhongsheng, Chen Kaiyuan, He Hujun, et al. Application of Sr isotope to sedimentary environment analysis[J]. Petroleum and Natural Gas Geology, 2003, 24(2): 187-190.
- [53] 刘昊年, 黄思静, 胡作维, 等. 锶同位素在沉积学中的研究与进展[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(3): 59-65.
Liu Haonian, Huang Sijing, Hu Zuowei, et al. Advances of strontium isotope in sedimentology[J]. Lithologic Oil and Gas Reservoirs, 2007, 19(3): 59-65.
- [54] Bagherpour B, Bucher H, Schneebeili-Hermann E, et al. Early Late Permian coupled carbon and strontium isotope chemostratigraphy from South China: Extended Emeishan volcanism?[J]. Gondwana Research, 2018, 58: 58-70.
- [55] Wang Xun, Liu Sheng-ao, Wang Zhengrong, et al. Zinc and strontium isotope evidence for climate cooling and constraints on the Frasnian-Famennian (~372Ma) mass extinction[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2018, 498: 68-82.
- [56] Zakharov Y D, Dril S I, Shigeta Y, et al. New aragonite, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ records of Mesozoic ammonoids and approach to the problem of N, O, C and Sr isotope cycles in the evolution of the Earth[J]. Sedimentary Geology, 2018, 364: 1-13.
- [57] Bi Dongjie, Zhang Daojun, Zhai Shikui, et al. Seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values recorded by reef carbonates from the Xisha Islands (South China Sea) since the Neogene and its response to the uplift of Qinghai - Tibetan Plateau[J]. Geological Journal, 2019, 54(6): 3878-3890.
- [58] 毕东杰, 张道军, 翟世奎, 等. 青藏高原隆升、琼东南盆地沉降和西沙岛礁发育之间的耦合关系[J]. 海洋学报, 2017, 39(1): 52-63.
Bi Dongjie, Zhang Daojun, Zhai Shikui, et al. The coupling relationships among the Qinghai-Tibet Plateau uplifting, the Qiongdongnan Basin subsiding and the Xisha Islands' reefs developing[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(1): 52-63.
- [59] Jiang Xiaodian, Li Zhengxiang. Seismic reflection data support episodic and simultaneous growth of the Tibetan Plateau since 25 Myr[J]. Nature Communications, 2014, 5: 5453.
- [60] 黄维, 汪品先. 渐新世以来的南海沉积量及其分布[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36(9): 822-829.
- [61] Mondal M E A. Geochemical and Nd Isotopic Studies of the Neoproterozoic-Palaeoproterozoic granitoids of the Aravalli Craton, NW India: Evidence for heterogeneous crustal evolution processes[M]. Berlin: Springer, 2019: 324-350.
- [62] Pinarelli L, Gioncada A, Capaccioni B, et al. Mantle source heterogeneity in subduction zones: constraints from elemental and isotope (Sr, Nd, and Pb) data on Vulcano Island, Aeolian Archipelago, Italy[J]. Mineralogy and Petrology, 2018, 113: 39-60.
- [63] 侯圣山, 杨石岭, 孙继敏, 等. 风成沉积物 4~16 μm 石英氧同位素记录及其物质来源意义[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(6): 535-542.
- [64] 蓝先洪. 海洋锶同位素研究进展[J]. 海洋地质前沿, 2001, 17(10): 1-3.
- [65] Del Río C J, Martínez S A, McArthur J M, et al. Dating

- late Miocene marine incursions across Argentina and Uruguay with Sr-isotope stratigraphy[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2018, 85: 312-324.
- [66] 邵磊, 乔培军, 庞雄, 等. 南海北部近代沉积物钕同位素分布及意义[J]. *科学通报*, 2009, 54(1): 98-103.
Shao Lei, Qiao Peijun, Pang Xiong, et al. Nd isotopic variations and its implications in the recent sediments from the northern South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(1): 98-103.
- [67] 郑力. 中国东部主要黄土分布区的 Sr-Nd 同位素物源示踪研究[J]. *高校地质学报*, 2018, 24(2): 246-250.
Zheng Li. Provenances of the major loess deposits in eastern China based on Sr and Nd isotopic characteristics[J]. *Journal of University Geology*, 2018, 24(2): 246-250.
- [68] 杨守业, 韦刚健, 夏小平, 等. 长江口晚新生代沉积物的物源研究: REE 和 Nd 同位素制约[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(3): 339-346.
Yang Shouye, Wei Gangjian, Xia Xiaoping, et al. Provenance study of late Cenozoic sediments in the Changjiang delta: REE and Nd isotopic constraints[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(3): 339-346.
- [69] 朱茂旭, 骆庭川, 张宏飞. 南秦岭东江口岩体群 Pb、Sr 和 Nd 同位素地球化学特征及其对物源的制约[J]. *地质地球化学*, 1998, 26(1): 30-36.
Zhu Maoxu, Luo Tingchuan, Zhang Hongfei. Pb、Sr and Nd isotopic geochemical characteristics of Dongjiangkou plutons in Southern Qinling belt and constrains on their sources[J]. *Geology-Geochemistry*, 1998, 26(1): 30-36.
- [70] 岳保静, 廖晶. 黄河流域现代沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄物源探讨[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(5): 109-119.
Yue Baojing, Liao Jing. Provenance study of Yellow River sediments by U-Pb dating of the detrital zircons[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2016, 36(5): 109-119.
- [71] 何梦颖, 梅西, 张训华, 等. 南黄海陆架区 CSDP-1 孔沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄物源判别[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2019, 49(1): 85-95.
He Mengying, Mei Xi, Zhang Xunhua, et al. Provenance discrimination of detrital zircon U-Pb dating in the core CSDP-1 in the continental shelf of South Yellow Sea [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2019, 49 (1): 85-95.
- [72] 杨蓉, Seward D, 周祖翼. 长江流域现代沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄物源探讨[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(6): 73-83.
Yang Rong, Seward D, Zhou Zuyi. Provenance study by U-Pb dating of the detrital zircons in the Yangtze River[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(6): 73-83.
- [73] Mills R A, Teagle D A H, Tivey M K. Fluid mixing and anhydrite precipitation within the TAG mound[J]. *Proceedings of the Ocean Drilling Program: Scientific Results*, 1998, 158: 119-127.
- [74] Jamieson W J, Hannington M D, Tivey M K, et al. Precipitation and growth of barite within hydrothermal vent deposits from the Endeavour Segment, Juan de Fuca Ridge[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, 173: 64-85.
- [75] Tütken T, Eisenhauer A, Wiegand B, et al. Glacial– interglacial cycles in Sr and Nd isotopic composition of Arctic marine sediments triggered by the Svalbard/Barents Sea ice sheet[J]. *Marine Geology*, 2002, 182(3-4): 351-372.
- [76] Palmer M R, Edmond J M. The strontium isotope budget of the modern ocean[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 1989, 92(1): 11-26.
- [77] 刘秀明, 王世杰. (古)盐度研究的一种重要工具: 锶同位素[J]. *矿物学报*, 2000, 20(1): 91-96.
Liu Xiuming, Wang Shijie. Strontium as an essential indicator of paleosalinity[J]. *Acta Mineralogy Sinica*, 2000, 20(1): 91-96.
- [78] Zhao Quanhong, Wang Pinxian, Cheng Xinrong. A record of Miocene carbon excursions in the South China Sea[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2001, 44(10): 943-951.
- [79] 付淑清. 南海南部晚第四纪以来的古气候古环境研究[D]. 广州: 中国科学院地球化学研究所, 2007.
Fu Shuqing. Study on paleoclimate and paleoenvironment in the Southern South China Sea since the late Quaternary[D]. Guangzhou: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [80] 严兆彬, 郭福生, 潘家永, 等. 碳酸盐岩 C, O, Sr 同位素组成在古气候、古海洋环境研究中的应用[J]. *地质找矿论丛*, 2005, 20(1): 53-56.
Yan Zhaobin, Guo Fusheng, Pan Jiayong, et al. Application of C, O, and Sr isotope composition of carbonates in the research of paleoclimate and paleoceanic environment[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2005, 20(1): 53-56.
- [81] 张同钢, 储雪蕾, 张启锐, 等. 扬子地台灯影组碳酸盐岩中的硫和碳同位素记录[J]. *岩石学报*, 2004, 20(3): 353-360.
Zhang Tonggang, Chu Xuelei, Zhang Qirui, et al. The sulfur and carbon isotopic records in carbonates of the Dengying Formation in the Yangtze Platform, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(3): 353-360.
- [82] Lini A, Weissert H, Erba E. The Valanginian carbon isotope event: A first episode of greenhouse climate conditions during the Cretaceous[J]. *Terra Nova*, 1992, 4(3): 374-384.
- [83] Shackleton N J. Oxygen isotopes, ice volume and sea level[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1987, 6(3-4):

- 183-190.
- [84] Oppo D W, McManus J F, Cullen J L. Abrupt climate events 500, 000 to 340, 000 years ago: Evidence from subpolar north Atlantic sediments[J]. *Science*, 1998, 279(5355): 1335-1338.
- [85] Jian Zhimin, Chen Minben, Lin Huiling, et al. Stepwise paleoceanographic changes during the last deglaciation in the southern South China Sea: Records of stable isotope and microfossils[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 1998, 41(2): 187-194.
- [86] Xiao Jule. East Asian monsoon variation during the last 130, 000 years: Evidence from the Loess Plateau of central China and Lake Biwa of Japan[J]. *Quaternary Science Reviews*, 1999, 18(1): 147-157.

Geochemical methods for identification of sedimentary provenance

WANG Ke^{1, 2}, ZHAI Shi-kui^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Received: Nov. 15, 2019

Key words: determination of sedimentary provenance; geochemical methods; tectonic setting; paleoclimate; sedimentary environment

Abstract: The geochemical methods for the discrimination of sedimentary provenance are summarized, the problems existing in various methods are analysed and the application suggestions are further given. Comprehensive analysis shows that major elements (components) are mainly used to characterize chemical weathering degree and determine types of source rock. Trace elements composition can trace source area and distinguish tectonic setting by cobweb map and triangle map effectively. Ce anomaly is a common indicator to judge the redox environment of paleo seawater. Eu anomaly is often used to distinguish basic rock and acidic rock. Sr, Nd and Pb isotopic compositions and their characteristic values are the most effective indicators of provenance. They can not only be used to trace the sedimentary provenance, but also to determine the age of sediment, classify sedimentary strata and reflect regionally or globally geological events. Paleoclimate change is an important factor affecting the C and O isotopic composition of bio-clastic carbonates, while paleoclimate directly affects the source supply. Therefore, the C and O isotopic compositions of bio-clastic carbonates can indirectly reflect the supply of provenance. In addition, the $\delta^{18}\text{O}$ value of quartz is of great significance for the provenance analysis of river sediments, desert, loess and wind dust as well as the study of source-sink effect of land and sea. There are some limitations in using a single method. Thus it is significant to make full use of the advantages of various methods, consider various factors that may cause miscalculation and other factors of sedimentary environment when necessary.

(本文编辑: 刘珊珊)