

地球化学在物源及沉积背景分析中的应用

毛光周^{1,2}, 刘池洋²

(1. 山东科技大学地质科学与工程学院 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室, 山东 青岛 266590;
2. 西北大学含油气盆地研究所 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要: 物源分析是盆地分析和古地理分析不可或缺的内容和方法, 地球化学在物源及沉积背景分析中起着非常重要的作用。运用文献研究法对“地球化学在物源及沉积背景分析中的应用”有关文献进行了研究, 分析阐述了常量元素分析、稀土-微量元素分析以及裂变径迹、K-Ar、Ar-Ar、Rb-Sr、Sm-Nd、U-Pb、Re-Os、S、O、Si 同位素分析等方法及其优势与不足。结果表明: 常量元素、稀土-微量元素分析在源区物质组成、构造背景、源区风化强度、成分成熟度及氧化-还原条件判别方面有很好的应用效果; 各种同位素分析体系在不同目的的研究中具有自身优势, 均得到了很好的应用。但影响岩石化学成分的因素较多, 特别是对于沉积岩, 很容易受外生营力的影响; 物源及沉积背景分析中的地球化学方法运用单一; 对研究区区域地质情况的研究不足。为此, 建议在利用地球化学方法进行物源及沉积背景分析时, 需要充分认识影响碎屑沉积物化学组成的因素, 综合运用多种方法进行物源区分析, 扬长补短, 同时要特别注意对区域地质情况的研究。

关键词: 物源分析; 构造背景; 常量元素; 稀土元素; 微量元素; 裂变径迹; 同位素; 地球化学

中图分类号: P512.2; TE121.3 文献标志码: A 文章编号: 1672-6561(2011)04-0337-12

Application of Geochemistry in Provenance and Depositional Setting Analysis

MAO Guang-zhou^{1,2}, LIU Chi-yang²

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Depositional Mineralization and Sedimentary Minerals, School of Geological Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China; 2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Institute of Petroliiferous Basin, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract: Provenance analysis is indispensable to basin and palaeogeography analysis, and geochemistry plays an important role in provenance and depositional setting analysis. The related literatures about the application of geochemistry in provenance and depositional setting analysis were studied; major element analysis, rare earth element-trace element analysis and isotope analyses such as fission track, K-Ar, Ar-Ar, Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb, Re-Os, S, O, Si, etc. were discussed, and the advantage and disadvantage of the above methods were analyzed. The results showed that major element analysis and rare earth element-trace element analysis had good application effect on material composition, tectonic setting, weathering intensity, compositional maturity and oxidation-reduction condition of provenance; the isotope analyses had their own advantages in different studies, and all had good application effect. There were many factors on chemical composition of rocks, especially for sedimentary rock, it was easily affected by exogenous effect; geochemistry methods in provenance and depositional setting analysis were few; the research on regional geology was inadequate. Therefore, it is suggested that the factors on chemical composition of clastic sediment should be fully studied when geochemistry methods are used to analyze the provenance and depositional setting, and multiple methods can be synthetically used and the study on regional geology should be paid more attention to.

收稿日期: 2011-02-01

基金项目: 西北大学大陆动力学国家重点实验室科学技术部专项项目(BJ081334); 国家自然科学基金重点项目(90814005); 国家科技重大专项研究项目(2008ZX05023-001-002); 国家重点基础研究发展计划项目(2003CB214600); 山东科技大学科学研究“春蕾计划”项目(2010AZZ009)

作者简介: 毛光周(1978-), 男, 甘肃甘谷人, 讲师, 工学博士, 从事能源地质及岩矿教学与研究。E-mail: gzmao_nju@yahoo.com.cn

Key words: provenance analysis; tectonic setting; major element; rare earth element; trace element; fission track; isotope; geochemistry

0 引言

沉积物的地球化学特征在物源及沉积背景分析中具有非常重要的作用,前人利用地球化学在该领域取得了研究成果^[1-46]。除了气候、地形、搬运距离和成岩作用,一般认为碎屑岩组分主要受物源区母岩性质和构造背景影响^[1-2],因此,利用碎屑岩的化学成分可以判断母岩特征,并分析研究盆地沉积环境、大地构造背景和构造演化等。

陆源碎屑岩总的化学成分常是源区性质、剥蚀和搬运过程的反映。其地球化学特别是在风化、搬运和成岩过程中相对不易迁移的组分(如稀土元素(rare earth element, REE)和 Zr、Th、Sc、Y 等一些微量元素^[3-4]),提供了物源区成分的信息,并且包括物源区地质体成分随时间变化的信息^[5]。

由于不同成因的岩石有不同的元素组合,因此研究沉积物中元素或元素组合的时空变化规律,可以揭示沉积物的物源、沉积控制因素以及沉积环境。沉积岩形成过程中的化学风化、搬运方式和介质、迁移距离、分选作用、沉积古地理、沉积物蚀变或再循环等沉积成岩后生作用,加上沉积物物源的非单一性及不同物源区贡献的差异等因素都会影响碎屑沉积岩的化学组成^[16,19],为利用碎屑沉积物的地球化学特征进行物源分析及成岩构造背景判别带来了多解性与复杂性。

笔者阐述了地球化学方法在物源及沉积背景分析中的应用,并对相关方法在应用中应该考虑的影响因素进行了总结分析。充分认识影响碎屑沉积物化学组成的因素,综合运用多种方法进行物源区分析,扬长补短,同时注意对研究区区域地质情况的研究,可以取得较好的效果。

响因素进行了总结分析。充分认识影响碎屑沉积物化学组成的因素,综合运用多种方法进行物源区分析,扬长补短,同时注意对研究区区域地质情况的研究,可以取得较好的效果。

1 常量元素分析

1.1 源区物质组成

黏土及粉砂粒级全岩样最能反映沉积物物源区的物质组成特征^[2]。MgO/(Al₂O₃ × 100)可以用来表示各种环境中陆源组分和海洋组分的比例。K₂O/Al₂O₃ 可以用来确定细碎屑岩物源区成分,当泥质岩石中 K₂O/Al₂O₃ > 0.5 时,说明母岩中具有相当数量的碱性长石,当 K₂O/Al₂O₃ < 0.4 时,说明母岩中只含少量的碱性长石^[6]。

利用碎屑岩的主量元素组合图,比如 log(Na₂O/K₂O)-log(SiO₂/Al₂O₃), log(Fe₂O₃*/K₂O)-log(SiO₂/Al₂O₃), CaO-Na₂O-K₂O, (Fe₂O₃* + MgO)-Na₂O-K₂O 以及 SiO₂/Al₂O₃-ΣREE, Na₂O/K₂O-ΣREE 可以判断其类型(图 1~3)。其中,Fe₂O₃*为全铁。

1.2 构造背景判别

一般认为,砂岩中的化学成分反映其矿物成分,与其成熟度有关。据砂岩主要化学成分可分析其构造背景。

可以利用砂岩的主量元素如 TiO₂-(Fe₂O₃* + MgO)、Al₂O₃/SiO₂-(Fe₂O₃* + MgO)、K₂O/Na₂O-(Fe₂O₃* + MgO)、Al₂O₃/(CaO + Na₂O)-(Fe₂O₃* + MgO)判断砂岩形成的大地构造环境(表 1、图 4)^[9]。

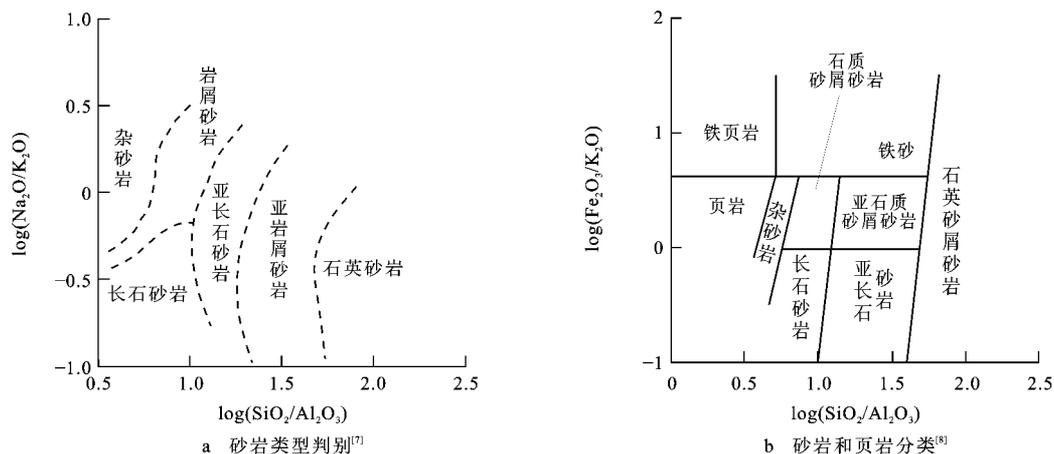
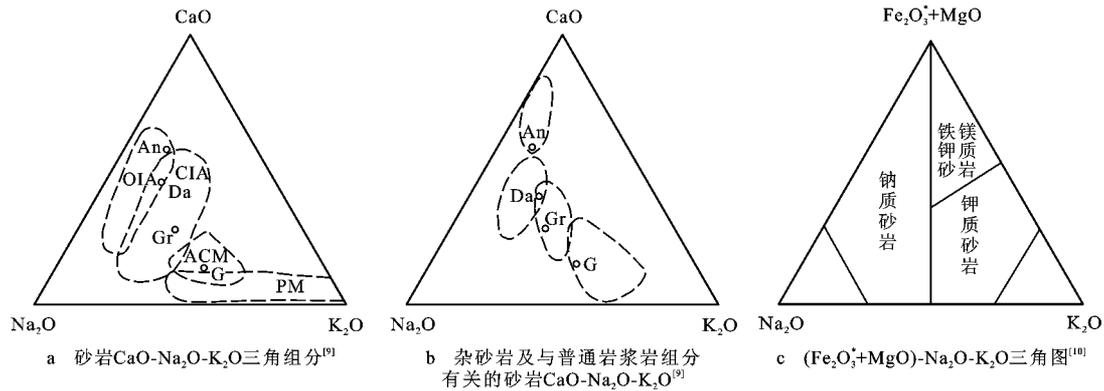


图 1 常量元素砂岩类型判别图及砂岩和页岩分类

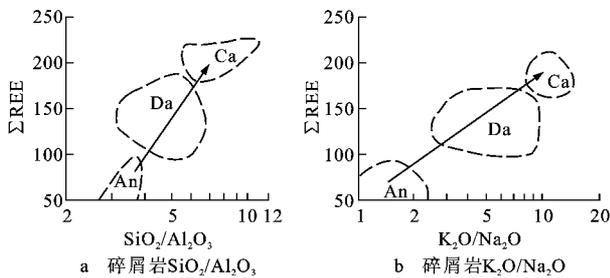
Fig. 1 Distinction of Sandstone Types and Classification of Sandstones and Shales Based on Major Elements



注:安山岩(An)、英安岩(Da)、花岗闪长岩(Gr)、花岗岩(G)平均组分,ACM—活动大陆边缘;PM—被动大陆边缘;OIA—大洋岛弧;CIA—大陆岛弧。

图 2 不同性质源岩的常量元素判别

Fig. 2 Distinction of Different Mother Rocks Based on Major Elements



注:封闭虚线表示不同的物源区^[11];箭头指示从安山岩(An)到英安质(Da)到花岗岩片麻岩及沉积(Ca)物源区,成熟度逐渐增加,分别相当于 OIA、CIA、ACM 与 PM 构造环境^[10];图中元素含量均指质量分数。

图 3 不同性质源岩的碎屑岩常量元素-ΣREE 图解

Fig. 3 Distinction of Different Mother Rocks Based on Major Element and ΣREE of Detrital Rocks

表 1 各类大地构造环境砂岩常量元素含量

Tab. 1 Major Element Content of Sandstones in Different Tectonic Settings

常量元素	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃ /SiO ₂	K ₂ O/Na ₂ O	Al ₂ O ₃ /(CaO+Na ₂ O)
大洋岛弧	58.83	1.06	17.11	1.95	5.52	0.15	3.65	5.83	4.10	1.60	0.26	0.29	0.39	1.72
大陆岛弧	70.69	0.64	14.04	1.43	3.05	0.10	1.97	2.68	3.12	1.89	0.16	0.20	0.61	2.42
活动大陆边缘	73.86	0.46	12.89	1.30	1.58	0.10	1.23	2.48	2.77	2.90	0.09	0.18	0.99	2.56
被动大陆边缘	81.95	0.49	8.41	1.32	1.76	0.05	1.39	1.89	1.07	1.71	0.12	0.10	1.60	4.15

注:表中元素质量分数/%;引自文献^[9]。

表 2 砂、泥岩源区判别函数的变量及其系数

Tab. 2 Variables and Their Coefficients of Discriminant Function for Provenance of Sandstone and Mudstone

变量	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	常数
F ₁ 系数	-1.773	0.607	0.76	-1.5	0.616	0.509	-1.224	-9.090
F ₂ 系数	0.445	0.070	-0.25	-1.142	0.438	1.475	1.426	-6.816

注:判别公式: $F = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + C$, 其中, $x_1 \sim x_n$ 为 n 个判别变量, $a_1 \sim a_n$ 为其相应系数, C 为常数;引自文献^[12]。

酸盐矿物中 CaO 与 Na₂O 通常以 1 : 1 的比例存在,所以认为当 CaO 的摩尔数大于 Na₂O 时,可认为 $mCaO^* = mNa_2O$;而小于 Na₂O 时, $mCaO^* =$

利用砂、泥岩物源区判别函数(表 2)^[12]及砂岩构造环境判别函数(表 3)^[9]投点作图(图 5),可判断碎屑岩的源区性质及构造背景。

根据对砂、泥岩套提出的 SiO₂-K₂O/Na₂O、TiO₂-SiO₂ 图解^[13]及 K₂O/Na₂O-SiO₂/Al₂O₃ 图解^[1](图 6),也可判别源区的构造背景及沉积环境。

1.3 源区风化强度和成分成熟度

细碎屑沉积岩比与其共生的砂岩更能反映源区风化强度的变化^[1]。可以用 CIA 指数(chemical index alteration)来确定物源区的化学风化程度^[14]。CIA 指数的计算公式: $CIA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)$,式中化学成分含量均为摩尔数,CaO* 是指存在于硅酸盐矿物中 CaO。由于硅

铁钾质砂岩 钾质砂岩

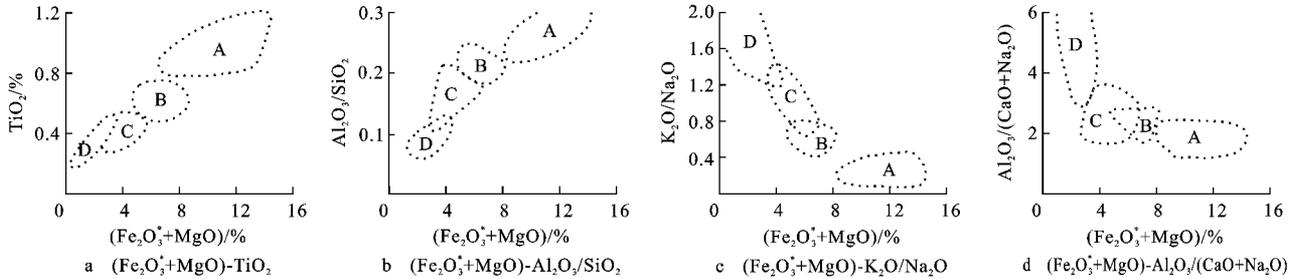
$mCaO$ ^[1,15]。CIA 值可以用绝对数来表示,通常认为,CIA 值在 50 左右的碎屑沉积岩,其物源区岩石未遭受化学风化,CIA 值为 100 时,表明其物源区岩

表 3 砂岩构造环境判别函数的变量及其系数

Tab. 3 Variables and Their Coefficients of Discriminant Function for Tectonic Setting of Sandstone

变量	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	常数
F ₁ 系数	-0.044 7	-0.472 0	0.008	-0.267	0.208	-3.082	0.140	0.195	0.719	-0.032	7.510	0.303
F ₂ 系数	-0.421	1.966	-0.526	-0.551	-1.610	2.720	0.881	-0.907	-0.177	-1.840	7.224	43.570

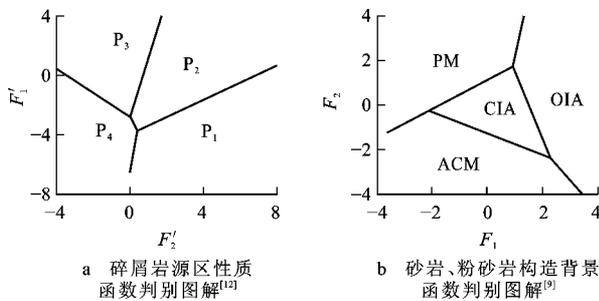
注:判别公式: $F = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + C$, 其中, $x_1 - x_n$ 为 n 个判别变量, $a_1 - a_n$ 为其相应系数, C 为常数; 引自文献[9]。



注: A—大洋岛弧; B—大陆岛弧; C—活动大陆边缘; D—被动大陆边缘; 引自文献[9]。

图 4 砂岩、粉砂岩主要元素构造环境判别图解

Fig. 4 Major Element Discrimination Diagrams of Sandstones and Siltstones for Tectonic Setting



注: P₁—基性火山岩物源区; P₂—中性火山岩物源区; P₃—酸性火山岩物源区; P₄—成熟大陆石英质物源区。

图 5 碎屑岩源区性质及构造背景函数判别图解

Fig. 5 Distinction of Provenance Character and Tectonic Setting Based on Major Element Function Plot of Detrital Rocks

石遭受了强烈的化学风化。

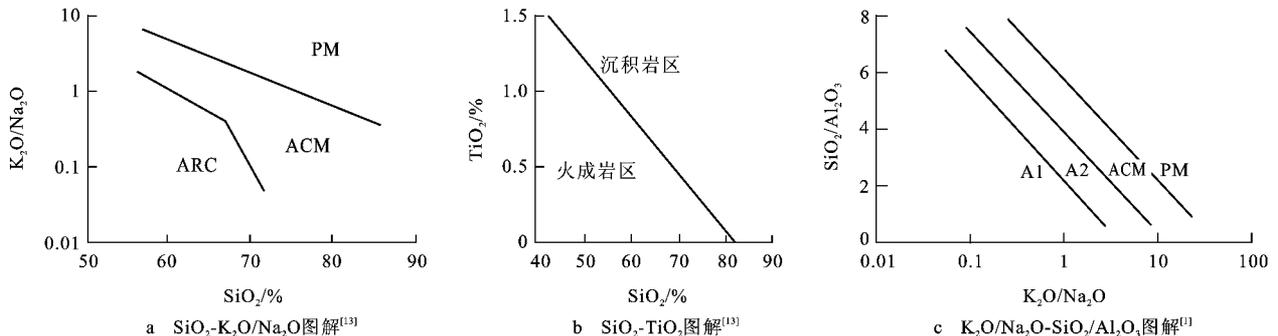
成分成熟度与沉积物形成的气候背景和构造背景有关, ICV(index chemical variation) 指数可以用来确定沉积物的成分成熟度^[6]。构造活动区泥质岩

石的成分成熟度低, 而在构造稳定区或强烈的化学风化背景下泥质岩的成分成熟度高^[15]。

常量元素分析的基础是沉积物对母岩的主元素组合和重矿物组合的继承性。一般在短距离搬运和化学风化很弱的条件下, 二者具有较好的可比性。但应注意主元素的活动性和可迁移性带来的可能变化。在进行矿物组合和元素组合分析时, 还要考虑到搬运过程中的稀释作用, 即应注意相对含量而非绝对含量。

2 稀土元素-微量元素分析

细粒沉积物中的微量元素和稀土元素已广泛应用于沉积源区的确定、构造背景及大陆生长的分析^[3]。这些元素在水体中停留时间短暂, 能快速进入到细粒沉积物中, 对层内溶蚀作用也不敏感^[16]。沉积岩中稀土元素含量的差异, 主要由源区化学风化作



注: A1—岛弧构造背景; A2—演化岛弧背景; ACM—活动大陆边缘; PM—被动大陆边缘; ARC—大洋岛弧; 图中元素含量均指质量分数。

图 6 砂岩、粉砂岩常量元素源区构造背景判别图解

Fig. 6 Major Element Ratios Diagrams of Sandstones and Siltstones for Tectonic Setting

用或在搬运和沉积过程中的交换反应所造成^[3,16-17], 稀土分布模式从源岩到沉积物没有明显变化^[3,16]。REE 及一些微量元素比值(如 La/Yb、Eu/Eu*、La/Th、La/Sc、Th/Sc、Co/Th、Cr/Th、Cr/V、V/Ni 等)在沉积和变质作用过程中也具有较强的抗迁移性。因此,它们被转移到沉积物中仍能反映母岩的地球化学学习性,是很好的物源指示剂^[3,7,18]。

稀土元素配分曲线位置的高低、倾斜程度、铈异常和铕异常以及曲线总体形态的相互对比是进行成因和物源分析的重要指标。

2.1 源区物质组成

不同岩类克拉克值有一定的丰度特征,盆地沉积物元素丰度及其比值反映了剥蚀区的母岩性质^[3,18]。

REE 在源区岩石中的丰度以及源区的风化条件是控制沉积物中 REE 的主要因素,在搬运、沉积和成岩过程中对沉积物中 REE 含量的改变甚微,因此源区岩石 REE 特征能够被可靠保存在沉积物中^[11],砂岩的 REE 被广泛用作判别源区岩石的主要标志^[4,11,19]。

REE、Sc、Al、Y、Th 和 Nb、Ta、Hf、Zr、Ti 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,往往被固体物质吸附或者结合其中,随颗粒物一起搬运和沉积^[3,20],常被用来判断源区源岩类型以及构造背景的重要工具^[3-4,19]。Zr 和 Y 即使在变质作用过程中也被认为是非迁移的,因此,砂岩 Zr/Y 能够比较好的追踪物源^[5]。另外,它们在海水中的含量往往极低,存留时间较短,在自生颗粒物质中富集程度很低,因此在海底沉积物中,这些元素几乎全部来自碎屑物质,反映了碎屑源区的地球化学特征^[3,21-22]。海底沉积物中自生沉积物的存在使利用这些不活泼元素不能准确反映物源特征。在这种情况下,选用某些特征元素作标准,以元素对比值来反映源区地球化学特征会

有很好的效果,通常选用 Sc、Al、Ti 等。

Al 在沉积过程中相对稳定且主要富集于细粒沉积物中,许多元素特别是大多数微量元素与 Al 在沉积物的不同粒级中具有相似的富集规律,因此元素的富集因子($Fe = (Me/Al)_{\text{sediments}} / (Me/Al)_{\text{crust}}$)可以指示沉积物中元素的地壳或非地壳来源^[23]。富集因子接近 1 表示其内地壳来源,大于 10 表示为非地壳来源^[24]。

溶解 Ti 在海水中的分布类似于营养元素,可能存在于生物/非生物的捕获机制使其在自生沉积物中富集^[25],但 Ti 在碎屑物质中的含量较高,自生沉积物的贡献对沉积物中 Ti 的总含量影响甚微,利用 Ti 标准化比值可以减轻沉积物中海洋自生组分对元素的稀释作用^[26]。因此 Ti 往往被当作碎屑组分的量化指标用于扣除碎屑组分对沉积物的贡献,这种做法在讨论海洋沉积物的自生沉积物变化中得到较好应用^[27-28]。稳定元素对比值 Ti/Al 是判断不同沉积物来源是否一致的较好指标。

北美页岩(NASC)以及澳大利亚后太古宙平均页岩(PAAS)中的稀土元素常被用来代表上地壳中稀土元素的特征^[3],据此可以根据沉积岩中稀土元素分布特征对沉积物的来源进行判别。表 4 为稀土元素在作为标准页岩中的含量及特征值。

利用 La/Yb-ΣREE 及 Co/Th-La/Sc 图解(图 7)^[11,30-31]可以反映某些岩石大类的成因特征。用 La-Th-Sc、Th-Hf-Co 和 Th-Sc、La-Sc、Ni-Cr 含量的变化关系(图 8、9)可以判别沉积物来源及物源区特征;Ni-Cr 可以区分早、晚、后太古代泥岩^[3]。

物源差异还可以从一些微量元素含量得到佐证。Sr 是生源碳酸盐沉积作用的指示元素,Ti、Zr 是陆源碎屑的指示元素。Br、B、Sr、Ba 等元素的含量与盐度有关,因此可以用来区分海相或陆相沉积环境(表 5),进而反映离岸远近及水体的深度变化。

表 4 标准页岩稀土元素含量及其特征参数

Tab. 4 REE Contents and Characteristic Parameters of Standard Shales

元素	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
PAAS	38	80	8.9	32	5.6	1.1	4.7	0.77	4.4	1	2.9	0.4	2.8	0.43
NASC	32	73	7.9	33	5.7	1.24	5.2	0.85	5.8	1.04	3.4	0.5	3.1	0.48
UCC	30	64	7.1	26	4.5	0.88	3.8	0.64	3.5	0.8	2.3	0.33	2.2	0.32
特征值	ΣREE	L/H	La _N /Yb _N	La _N /Sm _N	Gd _N /Yb _N	(La/Yb) _{UCC}	(La/Sm) _{UCC}	(Gd/Yb) _{UCC}	备注					
PAAS	183.0	9.5	9.2	4.3	1.0	1.0	1.0	0.66	PAAS 和 NASC 分别为:澳大利亚后太古宙平均页岩 ^[3] 和北美页岩组合样 ^[29] ,					
NASC	173.2	7.5	7.0	3.5	0.8	0.8	1.0	0.70	UCC 为全球平均大陆上地壳成分 ^[3]					
UCC	146.4	9.5	9.2	4.2	1.4			0.65						

注:稀土元素质量分数/10⁻⁶。

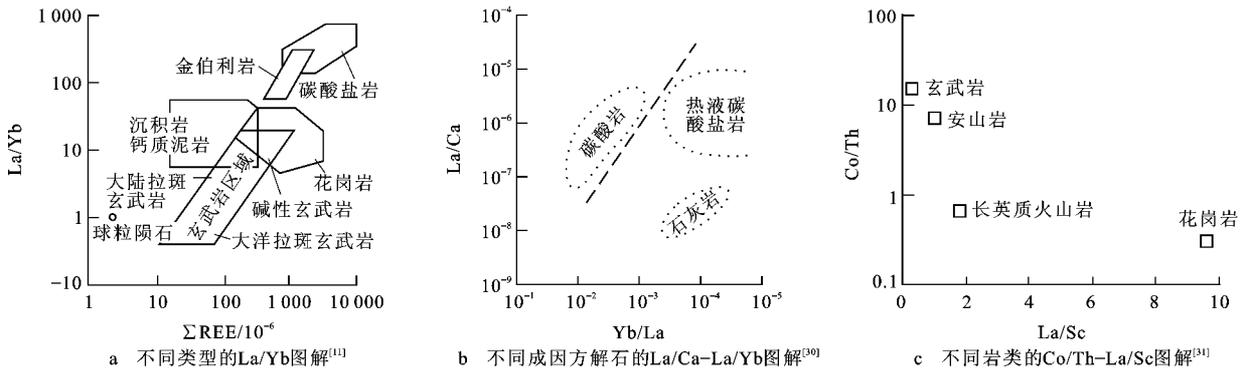
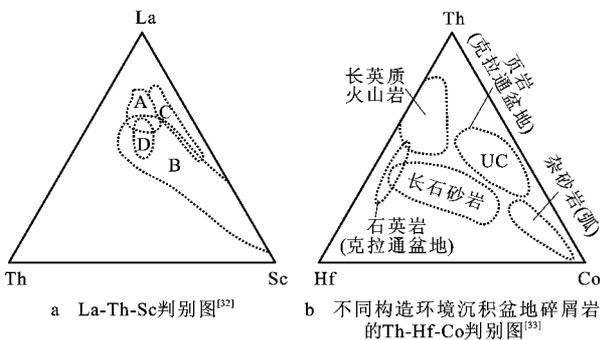


图 7 泥岩的源岩判别图解

Fig. 7 Discrimination Diagrams for Source Rocks of Mudstone

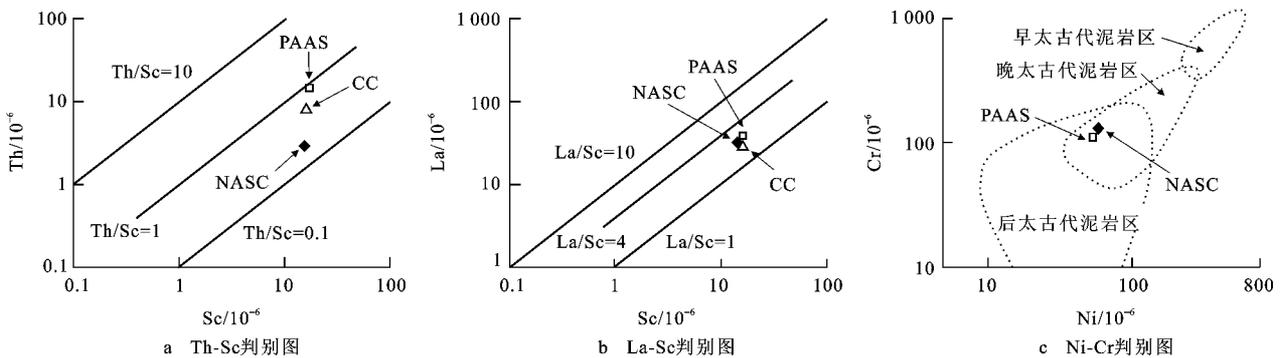


注：A—被动大陆边缘沉积物；B—与岩浆弧有关的沉积物；C—洋岛碱性玄武岩；D—后太古代澳大利亚页岩沉积物(UC为平均上地壳成分)^[33]。

图 8 碎屑岩微量元素构造环境判别

Fig. 8 Discrimination Diagrams of Tectonic Setting Based on Trace Element of Detrital Rocks

某些元素比值可以用来判断沉积地层相对时间,如 Gd/Yb 及 Sm/Nd。在地球演化初期,Gd 较高,随着元素分馏作用,Gd 越来越小,Gd/Yb 也就随地层时代变新而变小^[1,3],太古代地层的 Gd/Yb 常大于 2.0,而后太古代地层则小于 2.0。Sm/Nd 也随地层时代变新而变小。它们在沉积过程中受地



注:PAAS—后太古代澳大利亚页岩^[3];NASc—北美平均页岩成分^[35];CC—大陆地壳成分^[36];引自文献^[3,34]。

图 9 微量元素对物源区特征判别

Fig. 9 Discrimination Diagrams of Provenance Based on Trace Element Ratios

表 5 海相和陆相沉积环境中的部分微量元素含量及比值

Tab. 5 Contents and Ratios of Some Trace Elements in Marine Facies and Continental Facies

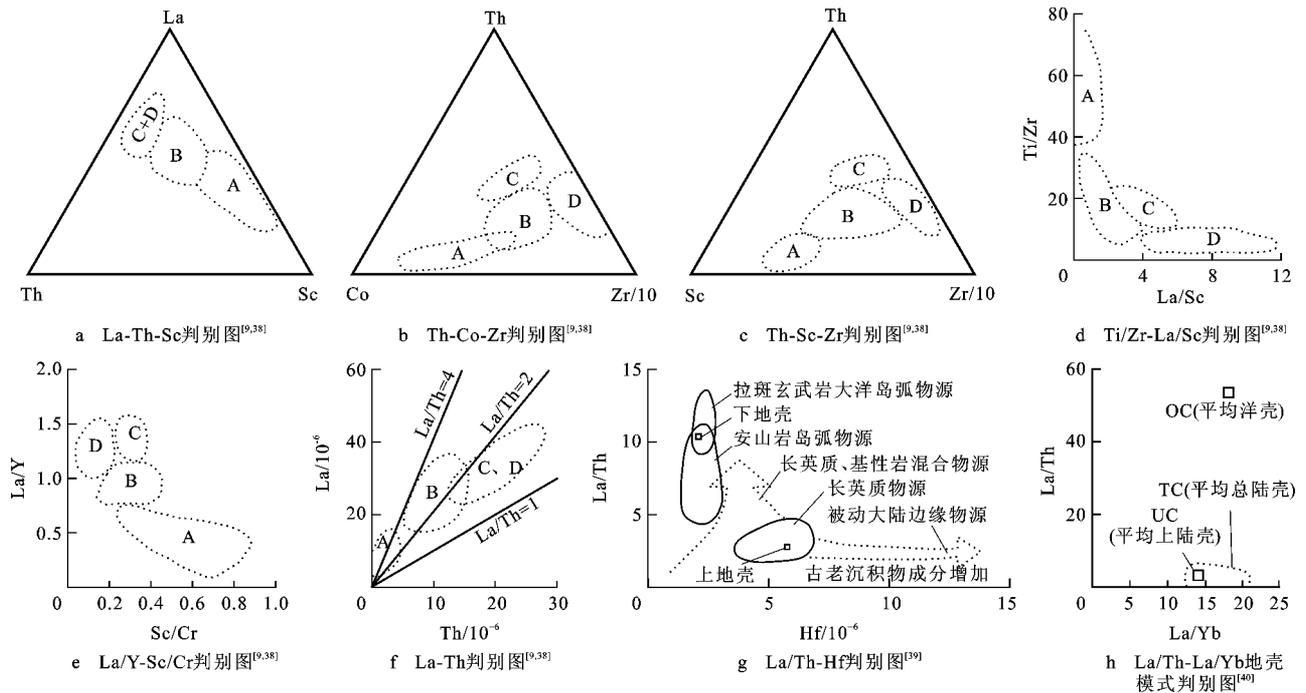
特征值	石盐岩中 Br	B	B/Ga	Sr/Ba
海相	$>60 \times 10^{-6}$	>100	>4.2 或 $4.5 \sim 5$	>1
陆相	$<20 \times 10^{-6}$, 甚至 小于 10×10^{-6}	<80	<3.3	<1
资料来源	[37]	[17]	[17]	[17]

质作用干扰较小,主要反映母岩的特点。

2.2 构造背景判别

利用 La-Th-Sc、Th-Co-Zr/10、Th-Sc-Zr/10、Ti/Zr-La/Sc、La/Y-Sc/Cr、La-Th、La/Th-Hf 和 La/Th-La/Yb 等判别图(图 10)可以进行源区构造环境的判别^[9,38-40]。Bhatia 等研究表明,从大洋岛弧依次到大陆岛弧、活动大陆边缘、被动大陆边缘的杂砂岩,一般 LREE、Hf、Ba/Sr、Rb/Sr、La/Y、Ni/Co 系统增大,Ba、Rb、Pb、Th、U 和 Nd 含量逐渐增高,而过渡性元素 Sc、V、Co、Cu、Zn 和 Ba/Rb、K/Th、K/V 比值都系统地减少^[38]。

碎屑岩中 La、Ce、Nd、Th、Zr、Nb、Y、Sc 和 Co



注: A—大洋岛弧; B—大陆岛弧; C—活动大陆边缘; D—被动大陆边缘; 图中元素含量均指质量分数。

图 10 微量元素对构造环境判别

Fig. 10 Discrimination Diagrams for Tectonic Setting Based on Trace Element

等不活泼元素在研究物源区类型和判别构造环境上作用很大^[38]。Bhatia 等还根据澳大利亚东部古生代浊积砂岩的微量元素特征,提出了判别沉积盆地构造环境的最佳图解和微量元素标志(表 6)^[38]。

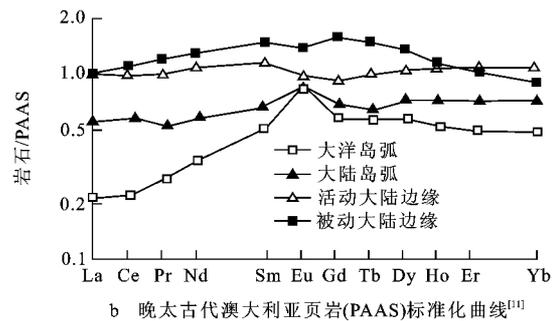
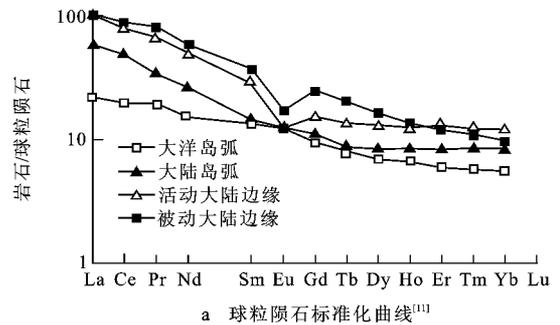
表 6 不同构造环境砂岩的微量元素特征

Tab. 6 Trace Element Features of Sandstone in Different Tectonic Settings

特征值	大洋岛弧	大陆岛弧	活动大陆边缘	被动大陆边缘
Pb/ 10^{-6}	6.9±1.4	15.1±1.1	24.0±1.1	16.0±3.4
Rb/Sr	0.05±0.05	0.65±0.33	0.89±0.24	1.19±0.40
Th/ 10^{-6}	2.27±0.7	11.1±1.1	18.8±3.0	16.7±3.5
Zr/ 10^{-6}	96±20	229±27	179±33	29.8±8.0
Hf/ 10^{-6}	2.1±0.6	6.3±2.0	6.8	10.1
Nb/ 10^{-6}	2.0±0.4	8.5±0.8	10.7±1.4	7.9±1.9
K/Th	405±1 524	1 296±250	1 252±360	681±194
Th/U	2.1±0.78	4.6±0.45	4.8±0.38	5.6±0.7
Zr/Th	48.0±13.4	21.5±2.4	9.5±0.7	19.0±5.8
Ti/%	0.48±0.12	0.39±0.06	0.26±0.02	0.22±0.06
Ti/Zr	56.8±21.4	19.7±4.3	15.3±2.4	6.74±0.9
Sc/ 10^{-6}	19.5±5.2	14.8±1.7	8.0±1.1	6.0±1.4
V/ 10^{-6}	131±40	89±13.7	48±5.9	31±9.9
Co/ 10^{-6}	18±6.3	12±2.7	10±1.7	5±2.4
Zn/ 10^{-6}	89±18.6	74±9.8	52±8.6	26±2.4
Sc/Cr	0.57±0.16	0.32±0.06	0.3±0.02	0.16±0.02

注:微量元素含量均指质量分数;引自文献^[38]。

Bhatia 归纳总结的不同构造背景下杂砂岩 REE 特征值和模式曲线特征(图 11、表 7)被广泛应用于 REE 物源区分析^[11]。



注:岩石/球粒陨石、岩石/PAAS 均为质量分数之比。

图 11 不同构造环境杂砂岩的稀土元素球粒陨石-PAAS 标准化曲线

Fig. 11 Chondrite and PAAS-normalized REE Patterns of Greywacke in Different Tectonic Settings

表 7 不同构造背景沉积盆地杂砂岩的稀土元素特征

Tab. 7 REE Features of Greywacke in Sedimentary Basins from Different Tectonic Settings

构造背景	物源区类型	La/10 ⁻⁶	Ce/10 ⁻⁶	REE/10 ⁻⁶	La/Yb	(La/Yb) _N	LREE/HREE	δEu
大洋岛弧	未切割的岩浆弧	8±1.7	19±3.7	58±10	4.2±1.3	2.8±0.9	3.8±0.9	1.04±0.11
大陆岛弧	切割的岩浆弧	27±4.5	59±8.2	146±20	11.0±3.6	7.5±2.5	7.7±1.7	0.79±0.13
安第斯型大陆边缘	上隆的基底	37.0	78	186.0	12.5	8.5	9.1	0.60
被动大陆边缘	克拉通内部构造高地	39.0	85	210.0	15.9	10.8	8.5	0.56

注:各元素含量均指质量分数;据文献[11]。

2.3 源区风化强度及氧化-还原条件

通常认为,沉积物中的 Sc 均来自源岩,通过其他不相容元素与 Sc 的比值可反映源区特征^[3,21]。经 Sc 标准化的结果以及一些特征元素比值的变化与气候密切相关,从而可以通过陆源碎屑输入量、结晶岩石风化比例等因素来指示周边陆壳风化强度的变化^[28]。

Ce/Ce* 能灵敏反映沉积环境的氧化还原条件,Ce/Ce* > 1 为正异常,表示还原环境;Ce/Ce* < 0.95 为负异常,表示氧化环境。该比值可以反映陆源碎屑输入量变化以及周边陆壳风化强度的一些变化^[28]。

Eu/Eu* 的变化和自生沉积物没有什么关系,而完全反映碎屑物源的组成。一般经高度结晶分异的地壳岩石,如花岗岩等酸性岩石, Eu 负异常比较明显;因而 Eu 异常的变化可能反映在这些时期输入的碎屑中;从花岗岩等结晶岩石风化后的产物的相对变化不难看出,陆壳风化强度的变化^[28]。

微量元素比值,比如 V/Cr、Ni/Co、Ni/V 和 V/(V±Ni)等是目前常用的较为可靠的古氧相地球化学判别标志^[41]。V/Ni 应用到沉积环境的描述中是特别有用的,相对于 Ni 来说,V 聚集在强烈还原的富硫化氢环境中^[42],V/(V±Ni)的变化主要由氧化还原电位控制。

3 同位素分析

3.1 裂变径迹分析

裂变径迹分析已成功应用于和沉积有关的地层年龄、地壳隆升、埋藏、成岩史等研究。对砂岩中榍石、磷灰石、锆石等重矿物的单颗粒或组合方式通过裂变径迹分析,即可确定母岩地层年龄。Hurford 等总结了裂变径迹测年法在物源研究中的应用,并指出该技术的主要不足在于沉积物的热史可能使径迹部分或全部退火而重新调整径迹年龄。磷灰石径迹退火温度较低(<100 °C),但碎屑锆石退火温度

较高(200 °C ~ 250 °C)^[43]。为了全面获取源区信息,运用锆石低温裂变径迹和高温 U-Pb 年龄相结合的方法对泰国 Khorat 盆地在 Khorat 群沉积时盆地与周缘构造演化关系进行了卓有成效的探讨^[44]。

3.2 K-Ar 和 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 分析

该方法普遍应用于矿物的定年研究,通过该方法测年获取的矿物组合年龄谱对分析物源区热演化史有重要意义。但沉积过程中可能的 Ar 丢失会导致年龄测定值偏小,某些低于临界温度的矿物可能代表物源区冷却或隆升年龄而非原始矿物的形成年龄;因混入组分可能使测得的年龄仅反映物源区矿物的平均值。利用喜马拉雅前陆盆地沉积物白云母 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年,确定了喜马拉雅山脉隆升剥蚀历史在 28 Ma BP 左右^[45]。

3.3 Rb-Sr 分析

Rb-Sr 等时定年可为碎屑矿物提供年龄数据,也可为混积的多源性提供佐证。利用 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值与 ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 比值图解分析线性相关程度,如果相关则说明存在物源供给关系。但沉积作用可能使成熟砂岩的 Rb-Sr 发生不同程度偏移,造成等时线的不准确。

根据沉积盆地内沉积物中黑云母和与黑云母共存长石中的 Rb、Sr 同位素分析,可计算与盆地毗邻山脉的隆升剥蚀速率。对孟加拉湾早中新世沉积物中黑云母和与黑云母共存长石中的 Rb-Sr 同位素分析,计算出喜马拉雅山脉 30 Ma 以来的隆升速率为 1~3 mm/a^[46-47]。

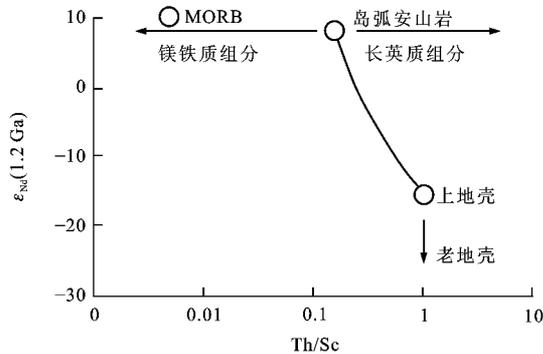
3.4 Sm-Nd 分析

Sm-Nd 同位素性质稳定,在沉积过程中变化较小,且不同来源母岩具有不同的 Nd 同位素组成;因此,利用 Nd 同位素示踪源区的研究开展较多^[48]。

沉积岩及其浅变质产物的 Nd 同位素模式年龄可用于沉积物物源区的研究^[48],沉积岩的钆模式年龄代表其物源区岩石钆同位素模式年龄的平均值。

Nd 同位素数据能较好地反映沉积物(岩)的物

源性质。以古老的上陆壳为源区的沉积物,其 ϵ_{Nd} 值一般小于 -10。而以洋中脊玄武岩(MORB)为源区的沉积物(岩),其 ϵ_{Nd} 值一般大于 5^[49](图 12)。



注: MORB、岛弧安山岩和上地壳成分据文献[3],图中元素含量均指质量分数;引自文献[49]。

图 12 Th/Sc- ϵ_{Nd} 构造背景区分图

Fig. 12 Th/Sc- ϵ_{Nd} Discrimination Diagram for Tectonic Setting

Sm-Nd 分析的优点在于风化、变质作用影响相对较小,可用于现代沉积,也可用于古老岩石,但是有可能无法区分具相同地壳沉降年龄的不同物源区,而且某些富含稀土的重矿物还可能使沉积物中的 Sm-Nd 含量发生偏移。

3.5 U-Pb 分析

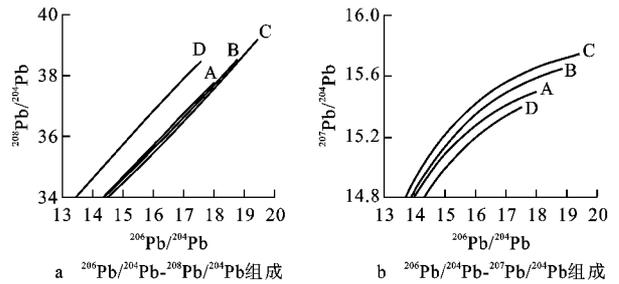
该方法在示踪源区山脉隆升剥蚀变化等研究上有其优越性。沉积物中颗粒锆石 U-Pb 年龄频谱中存在多个频率峰值,每一个峰值代表不同性质的源区特征。选择沉积盆地内控制性层位的样品进行单颗粒锆石 U-Pb 年龄测定,获取盆地沉积物的 U-Pb 年龄谱系,可以了解某一沉积时期沉积物源区的多样性及盆地不同沉积时期物源性质的变化特征^[47, 50-51]。

碎屑岩中锆石 U-Pb 年龄的分布反映了源区的岩浆/变质事件,进而反映源区构造层的结构。提取沉积物中锆石年龄信息,通过与盆地毗邻山脉出露岩体的年龄进行对比,则可以判断该层位沉积时的物源组成。利用锆石的 U-Pb 年龄论证了松潘—甘孜地区的三叠系碎屑沉积岩物源是扬子克拉通^[52]。

通常认为,岩浆成因的锆石其 Th/U 值大于 0.1,而变质成因锆石的 Th/U 值小于 0.1^[53]。利用铅同位素组成变化(图 13)^[2] 可以判断地壳不同深度来源铅的贡献,从而判别物源。

3.6 Re-Os 分析

Re 和 Os 由于其不同的相容性而在壳幔作用过程中发生分离。地壳往往显示较高的 Re/Os,一



注: A—地幔演化; B—造山带; C—上地壳对造山带的贡献; D—下地壳对造山带的贡献;据文献[2]。

图 13 不同构造环境铅同位素组成

Fig. 13 Lead isotope Composition of Different Tectonic Settings

般为 10~1 000。地幔中则由于低的 Re 含量而呈现低 Re/Os 特征,一般在 0.1 左右^[54]。

已有研究发现,陨石和地幔的 $^{187}\text{Re}/^{186}\text{Os}$ 均为 3.2,现代地幔的 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ 为 1.055^[55]。地壳的 $^{187}\text{Re}/^{186}\text{Os}$ 约为 400,地壳的 $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ 为 10 左右。因此,可以利用样品中这些值的对比来判定其源区。

3.7 稳定同位素分析

稳定同位素应用于物源区分析的实例不多,其主要原因是原始同位素组成既可在母岩中相同,也可因热液或其他变质作用使沉积物中含量发生变化。相对而言,低级成岩作用对许多碎屑矿物稳定同位素组成影响不大。

从硫同位素的成因机理讲,海相成因的盐岩,往往富集轻同位素 $\delta^{32}\text{S}$,陆相成因的盐岩,往往富集轻重同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 。

利用 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{30}\text{Si}$ 、 $\delta^{30}\text{Si}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 可以判断碎屑岩的物源情况^[56], ^{14}C 测年也可对近代沉积物来源和沉积环境判断做出一定贡献。

3.8 同位素分析在物源分析中存在的问题

同锆石 U-Pb 及 FT 方法相比,Rb-Sr、K-Ar 等方法在反演物源区山脉隆升速率、物源区构造热事件等方面具有自身优势。但由于物源多样性影响,所得到的年龄可能为混合年龄,导致在对混合物源的界定方面可能出现偏差,所以在应用时需要特别注意。

单独使用某种同位素方法分析物源区的实例较多,但综合应用几种同位素方法的不多。成分成熟度和颗粒大小对其数值有影响。通常同位素分析在未成熟砂岩和细粒碎屑(如泥岩)应用更准确有效,前者在确定特殊物源区上有优势,后者适于大区域范围的平均成分分析。

4 地球化学在物源分析中需注意问题

与其他物源分析方法相比,地球化学具有自己独特的优势,可以解决一些其他方法无法解决的难题。但由于影响岩石化学成分的因素较多,特别是对于沉积岩,很容易受外生营力的影响,所以在分析中要结合具体地质情况进行合理解释。

尽管文中所列的判别函数及图解得到了广泛应用,但这些函数及图解基本均为通过已知构造背景下特定的岩石组合总结得出,虽得到后人的检验,但有限样品数量及样品差异均为这些函数及图解的有效应用带来不利影响。

以盆地沉积物示踪源区反演区域构造演化的研究具有重要的科学意义,可以为盆-山耦合研究提供新的思路和途径。但在应用时必须注意结合区域构造背景,有选择地进行多种方法综合分析;不同研究区采取不同的研究手段,同时特别要注意对研究区区域地质情况的研究。

碎屑沉积岩的物源属性判别和成岩构造背景识别都是基于碎屑沉积岩的化学组成特征。然而,沉积岩形成过程中的化学风化、搬运方式和介质、迁移距离、分选作用、沉积古地理、沉积物蚀变或再循环等沉积成岩后生作用,加上沉积物物源的非单一性及不同物源区贡献差异等因素都会影响碎屑沉积岩的化学组成^[16,19,57],为利用碎屑沉积物的地球化学特征进行物源分析及成岩构造背景判别带来多解性与复杂性。充分认识这些因素对判别参数的影响,获取更为合理、有效的判别参数,同时应注意将多种方法相结合,扬长补短^[58],才能使地球化学方法在物源分析及构造背景判别中的应用得到更为可靠的结果。

5 结语

(1)物源分析是盆地分析和古地理分析不可或缺的内容和方法。地球化学在物源及沉积背景分析中起着非常重要的作用,可分为常量元素分析、稀土元素-微量元素分析及同位素分析 3 种。

(2)与其他物源分析方法相比,地球化学具有自己独特的优势,解决一些其他方法无法解决的难题。但由于影响岩石化学成分的因素较多,特别是对于沉积岩,很容易受外生营力的影响,因此在分析中要结合具体地质情况进行合理解释。

(3)充分认识影响碎屑沉积物化学组成的因素,综合运用多种方法进行物源区分析,扬长补短,同时

注意对研究区区域地质情况的研究,可以取得较好的效果。

参考文献:

- [1] McLennan S M, Hemming S, McDaniel M J, et al. Geochemical Approaches to Sedimentation, Provenance and Tectonics [C]//Jonhanson M J. Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments. Boulder: Geological Society of America, 1993:21-40.
- [2] Rollinson H R. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation [M]. New York: Longman Scientific Technical, 1993.
- [3] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution: an Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [4] Girty G H, Hanson A D, Knaack C, et al. Provenance Determined by REE, Th, and Sc Analyses of Metasedimentary Rocks, Boyden Cave Roof Pendant, Central Sierra Nevada, California [J]. Journal of Sedimentary Research, 1994, 64(1): 68-73.
- [5] 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.
- [6] Cox R, Lowe D R, Cullers R L. The Influence of Sediment Recycling and Basement Composition on Evolution of Mudrock Chemistry in the Southwestern United States [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(14): 2919-2940.
- [7] Prudencio M J, Figueiredo M O, Cabral J M P. Rare Earth Distribution and Its Correlation with Clay Mineralogy in the Clay-sized Fraction of Cretaceous and Pliocene Sediments (Central Portugal) [J]. Clay Minerals, 1989, 24(1): 67-74.
- [8] Herron M M. Geochemical Classification of Terrigenous Sands and Shales from Core or Log Data [J]. Journal of Sedimentary Research, 1988, 58(5): 820-829.
- [9] Bhatia M R. Plate Tectonics and Geochemical Composition of Sandstones [J]. The Journal of Geology, 1983, 91(6): 611-627.
- [10] Banerjee D M, Bhattacharya P. Petrology and Geochemistry of Greywackes from the Aravalli Supergroup, Rajasthan, India and the Tectonic Evolution of a Proterozoic Sedimentary Basin [J]. Precambrian Research, 1994, 67(1/2): 11-35.
- [11] Bhatia M R. Rare Earth Element Geochemistry of Australian Paleozoic Graywackes and Mudrocks: Provenance and Tectonic Control [J]. Sedimentary Geology, 1985, 45(1/2): 97-113.
- [12] 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.
- [13] Roser B P, Korsch R J. Determination of Tectonic Setting of Sandstone-mudstone Suites Using SiO₂ Content and K₂O/Na₂O Ratio [J]. The Journal of Geology, 1986, 94(5): 635-650.

- [14] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites[J]. *Nature*, 1982, 299: 715-717.
- [15] 梁斌,王全伟,阚泽忠. 珙县恐龙化石埋藏地自流并组泥质岩地球化学特征及其对物源区和古风化作用的指示[J]. *矿物岩石*, 2006, 26(3): 94-99.
- [16] Condie K C. Another Look at Rare Earth Elements in Shales[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(9): 2527-2531.
- [17] Ortega-Huertas M, Palomo I, Moresi M, et al. A Mineralogical and Geochemical Approach to Establishing a Sedimentary Model in a Passive Continental Margin (Sabbetic Zone, Betic Cordilleras, SE Spain)[J]. *Clay Minerals*, 1991, 26(3): 389-407.
- [18] Crichton J G, Condie K C. Trace Elements as Source Indicators in Cratonic Sediments; a Case Study from the Early Proterozoic Libby Creek Group, Southeastern Wyoming[J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101(3): 319-332.
- [19] Bhatia M R, Taylor S R. Trace-element Geochemistry and Sedimentary Provinces; a Study from the Tasman Geosyncline, Australia[J]. *Chemical Geology*, 1981, 33(1/2): 115-125.
- [20] Nesbitt H W, Markovics G, Price R C. Chemical Processes Affecting Alkalis and Alkaline Earths During Continental Weathering[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44(11): 1659-1666.
- [21] Morman M D, Deckker D P. Trace Metals in Lacustrine and Marine Sediments; a Case Study from the Gulf of Carpentaria, Northern Australia[J]. *Chemical Geology*, 1990, 82(1): 299-318.
- [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] Nolting R F, Ramkema A, Everaarts J M. The Geochemistry of Cu, Cd, Zn, Ni and Pb in Sediment Cores from the Continental Slope of the Banc d'Arguin (Mauritania)[J]. *Continental Shelf Research*, 1999, 19(5): 665-691.
- [24] Taylor S R. Abundance of Chemical Elements in the Continental Crust; a New Table[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, 28(8): 1273-1385.
- [25] Oriens K J, Boyle E A, Bruland K W. Dissolved Titanium in the Open Ocean[J]. *Nature*, 1990, 348: 322-325.
- [26] Murray R W, Knowlton C, Leinen M, et al. Export Production and Terrigenous Matter in the Central Equatorial Pacific Ocean During Interglacial Oxygen Isotope Stage 11[J]. *Global and Planetary Change*, 2000, 24(1): 59-78.
- [27] Murray R W, Leinen M. Scavenged Excess Aluminum and Its Relationship to Bulk Titanium in Biogenic Sediment from the Central Equatorial Pacific Ocean[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(20): 3869-3878.
- [28] 韦刚健,陈毓蔚,李献华,等. NS93-5 钻孔沉积物不活泼微量元素记录与陆源输入变化探讨[J]. *地球化学*, 2001, 30(3): 208-216.
- [29] Haskin M A, Haskin L A. Rare Earths in European Shales; a Redetermination[J]. *Science*, 1966, 154: 507-509.
- [30] Allegre C J, Minster J F. Quantitative Models of Trace Element Behavior in Magmatic Processes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 38(1): 1-25.
- [31] Gu X X, Liu J M, Zheng M H, et al. Provenance and Tectonic Setting of the Proterozoic Turbidites in Hunan, South China; Geochemical Evidence[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2002, 72(3): 393-407.
- [32] Savoy L E, Stevenson R K, Mountjoy E W. Provenance of Upper Devonian-lower Carboniferous Miogeoclinal Strata, Southeastern Canadian Cordillera; Link Between Tectonics and Sedimentation[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2000, 70(1): 181-193.
- [33] 卢海峰,王宗起,王涛,等. 西秦岭关家沟组物源分析[J]. *地质学报*, 2006, 80(4): 508-516.
- [34] 李秋根,刘树文,韩宝福,等. 新疆库鲁克塔格震旦系冰碛岩的地球化学特征及其对物源区的指示[J]. *自然科学进展*, 2004, 14(9): 999-1005.
- [35] Gromet L P, Haskin L A, Korotev R L, et al. The "North American Shale Composite": Its Compilation, Major and Trace Element Characteristics[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(12): 2469-2482.
- [36] Wedepohl K H. The Composition of the Continental Crust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(7): 1217-1232.
- [37] Holser W T. Trace Elements and Isotopes in Evaporates[C]// Burns R G. *Mineralogical Society of America Short Course Notes: Volume 6, Marine Minerals*. Washington DC: Mineralogical Society of America, 1979: 295-346.
- [38] Bhatia M R, Crook K A W. Trace Element Characteristics of Graywackes and Tectonic Setting Discrimination of Sedimentary Basins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 92(2): 181-193.
- [39] Floyd P A, Leveridge B E. Tectonic Environment of the Devonian Gramscatho Basin, South Cornwall; Framework Mode and Geochemical Evidence from Turbiditic Sandstones[J]. *Journal of the Geological Society*, 1987, 144(4): 531-542.
- [40] Shao L, Statterger K, Garbe-Schoenberg C. Sandstone Petrology and Geochemistry of the Turpan Basin (NW China); Implications for the Tectonic Evolution of a Continental Basin[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2001, 71(1): 37-49.
- [41] Davis C, Pratt L, Silter W, et al. Factors Influencing Organic Carbon and Trace Metal Accumulation in the Upper Cretaceous La Luna Formation of the Western Maracaibo Basin, Venezuela[M]. Boulder: Geological Society of America, 1999.
- [42] Lewan M D. Factors Controlling the Proportionality of Vanadium to Nickel in Crude Oils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(11): 2231-2238.
- [43] Hurford A J, Carter A. The Role of Fission Track Dating in Discrimination of Provenance[C]// Houghton D W, Morton A

- C, Todd S P. Developments in Sedimentary Provenance Studies. London: Oxford University Press, 1991: 67-78.
- [44] Carter A, Moss S J. Combined Detrital-zircon Fission-track and U-Pb Dating: a New Approach to Understanding Hinterland Evolution[J]. *Geology*, 1999, 27(3): 235-238.
- [45] Najman Y M R, Pringle M S, Johnson M R W, et al. Laser $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating of Single Detrital Muscovite Grains from Early Foreland-basin Sedimentary Deposits in India: Implications for Early Himalayan Evolution [J]. *Geology*, 1997, 25(6): 535-538.
- [46] Galy A, France-Lanord C, Derry L A. The Late Oligocene-Early Miocene Himalaya Belt Constraints Deduced from Isotopic Compositions of Early Miocene Turbidites in the Bengal Fan [J]. *Tectonophysics*, 1996, 260(1/2): 109-118.
- [47] 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.
- [48] DePaolo D J. Neodymium Isotope Geochemistry: an Introduction[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1988.
- [49] McLennan S M, Taylor S R, McCulloch M T, et al. Geochemical and Nd-Sr Isotope Composition of Deep-sea Turbidites: Crustal Evolution and Plate Tectonic Associations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(7): 2015-2050.
- [50] 裴先治, 孟 勇, 丁仁平, 等. 祁连-秦岭造山带交接部位 25 亿年碎屑锆石的发现及其地质意义[J]. *地球科学与环境学报*, 2007, 29(2): 111-116.
- [51] 赖绍聪, 秦江锋. 勉略缝合带三岔子辉绿岩墙锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素组成——古特提斯洋壳俯冲的年代学证据[J]. *地球科学与环境学报*, 2010, 32(1): 27-33.
- [52] 刘 飞, 陈岳龙, 苏本勋, 等. 松潘-甘孜地区三叠系碎屑沉积岩地球化学特征及其锆石年龄研究[J]. *地球学报*, 2006, 27(4): 289-296.
- [53] Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, et al. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronological and Geochemical Evidence for Neoproterozoic Arc-magmatism Along the Western Margin of the Yangtze Block, South China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 196(1/2): 51-67.
- [54] Horan M F, Morgan J W, Grauch R I, et al. Rhenium and Osmium Isotopes in Black Shales and Ni-Mo-PGE-rich Sulfide Layers, Yukon Territory, Canada, and Hunan and Guizhou Provinces, China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(1): 257-265.
- [55] Walker R J, Morgan J W. Rhenium-osmium Isotope Systematics of Carbonaceous Chondrites [J]. *Science*, 1989, 243: 519-522.
- [56] 张连昌, 姬金生, 曾章仁, 等. 东天山康古尔金矿床成矿物源的同位素地球化学特征[J]. *现代地质*, 1998, 12(3): 380-387.
- [57] Cullers R L. The Geochemistry of Shales, Siltstones and Sandstones of Pennsylvanian-Permian Age, Colorado, USA: Implications for Provenance and Metamorphic Studies [J]. *Lithos*, 2000, 51(3): 181-203.
- [58] 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.

热烈祝贺《地球科学与环境学报》编委舒德干教授 被增选为中国科学院院士

2011 年中科院院士增选结果 12 月 9 日揭晓,《地球科学与环境学报》编委舒德干教授被增选为中国科学院地学部院士。《地球科学与环境学报》编辑部在此特向舒德干院士表示热烈的祝贺!

舒德干院士 1969 年毕业于北京大学地质地理系古生物学专业,1981、1987 年分别在西北大学和中国地质大学(北京)获硕士学位和博士学位,是德国洪堡学者、中国长江学者,现任西北大学特聘教授和中国地质大学(北京)教授;任全国地层委员会委员、国务院学位委员会学科评审组成员、教育部科技委员会委员、陕西省科协常委。其科研成果曾被评选列入“1999 年中国十大科技进展”和“2001 年中国十大科技进展”、“2004 年中国高校十大科技进展”中;以第一完成人或并列第一完成人获第二届“长江学者成就奖”一等奖、“国家自然科学基金”一等奖、“陕西省科学技术最高成就奖”;被授予“全国先进工作者”、“全国模范教师”、“全国杰出专业技术人员”等荣誉称号。

值得一提的是,舒德干院士在《地球科学与环境学报》2009 年第 2 期发表了题为“寒武纪大爆发与动物树的成型”的论文,在学术界产生了广泛影响。