

砂岩的主量元素特征与盆地物源分析

杨江海 杜远生 徐亚军 朱 杰

(中国地质大学 教育部生物地质与环境地质重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 一定的砂岩地球化学特征对应于特定的源区和构造环境, 利用主量元素图解可以进行盆地物源分析。在前人大量研究的基础上, 笔者选择性收集了不同构造背景的 569 个主量元素数据, 共分为 70 套平均值, 根据来源文献划分出克拉通内部、陆缘弧、碰撞造山带、大陆岛弧和大洋岛弧 5 种源区和构造环境。综合分析砂岩主量元素之间的相关性, 利用整体及不同源区构造背景下元素间相关系数, 得到 5 个主元素氧化物组合: SiO_2 、 Al_2O_3 + FeOT 、 K_2O + Na_2O 、 MnO + TiO_2 和 MgO + CaO ; 且建立了应用于 5 种源区判别的 $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{FeOT})/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2/(\text{MnO}+\text{TiO}_2)/100-\text{MgO}+\text{CaO}$ 三角图解。对收集的数据进行判别方程分析得到与 SiO_2 、 CaO 、 MgO 、 FeOT 、 K_2O 、 MnO 、 Al_2O_3 、 Na_2O 和 TiO_2 相关的判别方程 F1 和 F2, 并进行 F1-F2 双变量物源构造环境图解判别。根据主元素对砂岩碎屑组分的反映, 利用主元素摩尔含量分析石英、长石和基性岩屑矿物在砂岩中的含量, 进而对源区进行约束。所建立的 Qel—Fel—Lel 图解既反映了主量元素对砂岩物源和构造背景的判别, 也近似地表现出相应环境下砂岩的碎屑组成。

关键词: 砂岩; 主量元素; 物源; 构造环境

中图分类号: P591 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2007)06-1032-13

在特定的大地构造背景下, 由于受到板块位置^[1]及岩浆活动的控制^[2], 沉积盆地同其相应物源通过沉积物相互关联。一定的盆地通常接受特定源区的碎屑供应^[3], 因此盆地内的陆源碎屑在很大程度上反映了物源的特征。砂岩, 特别是浊积砂岩, 其地球化学组成与其沉积盆地的构造背景之间组存在着很好的对应关系^[3-5]。在长期应用中, 已经建立的常量元素判别图解时常表现出其不足之处, Holail et al^[6]、Shao et al^[7]研究发现应用这些图解判别的古代地体构造环境与所推测的并不能完全一致; 此外源区构造环境划分不全面、不详细^[8]也约束了这些图解的应用。Armstrong et al^[9]研究了 ODP 和 DSDP 所获得的中生代—现代砂岩和砂的地球化学常量元素特征, 并对常用的主元素构造环境判别图解——1 个判别方程图解^[9]和 5 个二元判别图解^[5, 10]进行了严格评价, 结果显示这些图解只有 0~62%, 多数低于 40% 的判别正确率; 他们认为这些图解不能再用来推断古代盆地的构造环境, 需要新的更有效的沉积地球化学判别图解。但需要强调的是: 用现代砂或砂岩来检验前新生代砂岩岩化图解的途径可能不一定恰当, 因为现代砂或砂岩没有经历过(或只有较短的)成岩等过程, 同中生代或者更老的岩石构造背景(这些岩石可能经历了压实、孔隙水作用、热事件影响和构造变形影响)存在较大差异。

1 砂岩形成的板块构造背景及物源类型研究现状

从 20 世纪 70 年代开始, 伴随着板块构造学说的兴起, 利用盆地碎屑沉积物来研究源区构造演化背景、分析古气候特征, 就被广泛应用于古大陆环境、地壳演化、盆-山相互作用等方面的研究中。Crook^[11]总结了现代深海砂及河流砂的矿物学数据, 发现古代杂砂岩组分变化与构造环境之间存在一定的关系, 认为贫石英杂砂岩($\text{SiO}_2 < 58\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 1$)是岩浆岛弧的象征, 中等石英含量杂砂岩(SiO_2 为 68%~74%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 1$)是安第斯型大陆边缘及大陆地壳上部的指示, 富石英杂砂岩($\text{SiO}_2 > 89\%$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 1$)代表大西洋型被动大陆边缘的沉积。Schwab^[12]在比较古代砂岩组成的基础上对该设想进行了肯定, 并把它推广到各种砂岩, 分辨出裂谷、大西洋型、安第斯型和西太平洋型大陆边缘 4 种沉积构造环境。Dickinson^[13]对来自不同类型盆地砂岩的碎屑构架模式进行研究, 建立起砂岩组分与板块构造之间的判别图解。Maynard et al^[14]专门讨论了与岛弧有关的现代深海砂成分, 构建起各种构造环境的现代深海砂骨架组分三角图, 并对其变化范围进行分析, 利用 Fe_2O_3 + $\text{MgO}-\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ 三元图解

收稿日期: 2007-03-16; 改回日期: 2007-05-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(40672080)资助。

作者简介: 杨江海, 男, 1984 年生, 硕士生, 古生物学与地层学专业, 从事造山带沉积学研究; E-mail: yjhcg@yahoo.com。

进行现代深海砂和古代杂砂岩的化学成分对比。源岩风化程度可以通过泥级细粒岩的主量化学元素组成指标 $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)]$ 和硅质碎屑砂泥的 $Al_2O_3 - CaO + Na_2O - K_2O / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)$ 投图来推断^[12-15]。在应用砂岩地球化学主量元素特征分析物源和判别构造背景方面, Bhatia^[9]、Roser et al^[10, 16]作了具体而深入的工作。Bhatia^[9]在研究澳大利亚东部杂砂岩时, 建立起 $TiO_2 - Fe_2O_3 + MgO, Al_2O_3 / SiO_2 - Fe_2O_3 + MgO, K_2O / Na_2O - Fe_2O_3 + MgO, Al_2O_3 / (CaO + Na_2O) - Fe_2O_3 + MgO$ 4个判别图解, 并且尝试应用含有11个变量的判别方程 F1-F2 来解决所研究浊积砂岩的构造背景问题, 划分出被动陆缘、活动陆缘、大陆岛弧和大洋岛弧4种构造环境。Roser et al^[10]首次利用 $SiO_2 - K_2O / Na_2O$ 图解来区分新西兰杂砂岩的被动陆缘、活动陆缘和大洋岛弧3种不同构造背景, 并作了不同时代砂岩的验证。Kroonenberg^[17]提出应用 $SiO_2 / 20 - K_2O + Na_2O - TiO_2 + Fe_2O_3 + MgO$ 三角图解讨论砂岩构造背景。以上判别图解都取得了一定成果, 并在后人的研究中得到广泛应用^[18-22]。

中国在研究砂岩地球化学主量元素判别盆地构造背景方面起步较晚, 方国庆^[23]给出以 $K_2O / (CaO + Na_2O)$ 和 SiO_2 / Al_2O_3 作变量的构造判别图解。该图解应用了5种氧化物指标, 但没有讨论其他主量元素的作用。

被动大陆边缘、活动大陆边缘、大陆岛弧和大洋岛弧的沉积大地构造背景划分已经得到广泛的认可^[5, 17, 19, 21, 22, 24-28], 但这并不能满足碎屑砂岩沉积环境更为深入准确地判别, 许多学者^[22, 29, 30]在研究过程中对物源构造环境的复杂性进行了思考, 进而分析了相应沉积盆地的性质。McLennan et al^[31]对现代不同板块构造环境的深海浊积岩进行了系统采样, 分析了样品的地球化学及 Nd 同位素特征, 将深海浊积岩沉积所属构造环境划分为6类: 板块后缘、大陆碰撞带、走滑断层带、弧后、大陆弧和前弧, 并进行对比分析。

总的来说, 沉积盆地砂岩碎屑源区所处的板块构造基本上可分为两种: 一种是被动型, 即构造不活跃, 没有板块碰撞和岩浆活动带, 如克拉通内部; 另一种就是活动型, 如俯冲碰撞带、陆缘弧、大陆岛弧和大洋岛弧等。笔者认为有必要进行更为系统的研究, 充分发挥砂岩主量元素在判别构造背景的应用, 为此收集已发表的中-细粒砂岩和粉砂岩地球化学数据, 对这些数据进行分选(去除 CaO 含量 $> 12\%$ 的样品), 从中选择合适的569个数据共70套平均值(表1), 并按物源构造环境进行分类, 整体划分为5种物源构造环境: 稳定环境的克拉通内部(A)、陆缘弧(B)、碰撞造山带(C)、大陆岛弧(D)、大洋岛弧(E)。

2 砂岩中主量元素间的相关性及判别图解

2.1 砂岩中主量元素的总体相关性

在砂岩中石英颗粒、长石碎屑及不稳定的岩屑存在着此消彼长的关系, 表明它们的主量元素间也会存在一定的关系。Bhatia et al^[9]在总结澳大利亚东部古生代典型构造环境杂

砂岩地球化学特征时, 给出了杂砂岩地球化学元素之间的相关系数, 并以该关系特征为基础, 建立了应用微量元素探讨砂岩沉积构造环境的图解。

对收集的砂岩地球化学主元素分析数据进行相关性讨论研究, 得到主量元素间的相关系数(表2)。与 Bhatia et al^[9]结果比较, 各主量元素间的关系总体一致, Si 与其他元素均呈负相关, 尤其与 Fe、Mn、Mg 和 Ti 的关系最为显著, 表明砂岩中石英及硅酸盐矿物颗粒很大程度上影响了全岩的化学性质; Fe 与 Mg、Ti、Mn 和 Al、Mn 与 Ti 的很好正相关性反映镁铁质组分中主量元素的构成; 此外, 显著的 K 与 Al 正相关性可能指示出长石类碎屑矿物对砂岩的化学贡献。

2.2 不同构造环境源区属性及其常量元素间相关性

笔者将沉积盆地碎屑物源分为克拉通内部、陆缘弧、碰撞造山带、大陆岛弧和大洋岛弧5种。克拉通内部物源主要是再旋回沉积物, 砂岩碎屑来自裸露的地质区及邻近的台地沉积序列, 其结构成熟度和成分成熟度高, 石英含量高, 一般沉积在裂谷早期、陆内克拉通盆地和被动大陆边缘等环境。典型的陆缘弧如南美洲西岸的安第斯弧, 位于洋壳俯冲带之上, 性质以切割岩浆弧^[32]为主, 碎屑主要沉积于陆缘弧型活动大陆边缘盆地。大陆岛弧以日本岛弧为例, 主要为切割岩浆弧^[33]性质, 碎屑可分散到弧后盆地、弧前盆地、弧内盆地及海沟等环境。现在的大洋岛弧主要分布于太平洋西南部海域, 如阿留申群岛、马六甲岛等, 表现出未切割弧^[34]性质, 碎屑常在弧前盆地、弧间盆地及海沟等区形成来自岛弧的火山岩碎屑浊流沉积。碰撞造山带物源组成较为复杂, 弧-陆碰撞造山或陆-陆碰撞造山, 代表了沿缝合线并列式出现的沉积岩和变质岩等的俯冲岩席, 在造山带内部可能会有岛弧岩浆源区物质不同程度的卷入; 碎屑主要以浊流形式沉积于残留洋(海)盆及邻近的前陆盆地。造山带内物质组成复杂, 导致源自该区的碎屑成分多样, 可以是高长石砂岩, 代表了造山带内隆起火成岩体的物源; 可以是高燧石砂岩, 表明卷入造山带的混杂岩体遭受剥蚀^[35]。

为了解不同物源区砂岩主量元素间相关性的差别, 分别就各组进行相关性分析(表3~7)。比较发现, Si 与其他主元素在不同源区条件下大体表现负相关性, 只在大洋岛弧物源区出现 Si 与 Al、K 和 Ca 之间高的正相关性; Al 与 Fe、Ti、Mn 与 Ti、Mg 与 Fe 正向相关性也体现在多数环境中。

2.3 元素间相关系数应用及图解

由于所选择的砂岩地球化学主量元素数据有些缺少挥发份和 P_2O_5 的数值, 为便于统一处理, 对数据进行重新计算得到去除挥发份和 P_2O_5 后的主量元素含量。根据各主量元素间的相关性, 以及元素的不同化学性质, 得到5个主元素氧化物指标组合: $SiO_2、Al_2O_3 + FeOT$ (相关性好)、 $K_2O + Na_2O$ (同为碱金属)、 $MnO + TiO_2$ (相关性好) 和 $MgO + CaO$ (同为碱土金属)。克拉通内部物源具有很高的 SiO_2 和很低的 $Na_2O、MgO、Al_2O_3$; 而 K_2O 和 SiO_2 在大洋岛弧物源含量最低, $MgO、TiO_2、MnO、CaO$ 和 $FeOT$ 在大洋岛弧源区砂岩中

表 1 各组碎屑岩(无挥发份)常量元素平均含量(%)
Table 1 Average abundances (%) of major elements on a volatile-free basis for various groups of sandstone

编号	样品数	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	FeO	参考文献
克拉通内部													
1	6	0.25	0.25	11.29	78.66		3.73	1.15	0.44	0.06	4.19		[8]
2	1	0.30	0.4	3.1	88.52		1.1	5.27	0.29	0.12	4.7	0.89	[31]
3	21	0.11	0.18	5.11	91.23	0.05	1.07	1.1	0.37	0.01	0.77		[18]
4	2	0.13	0.3	7.4	87.95	0.03	1.53	0.70	0.51	0.06	1.39		[18]
5	4	0.09	0.05	4.6	93.03	0.12	0.10	0.16	0.64	0.02	1.18		[32]
6	6	1.10	0.11	3.35	93.22	0.05	0.47	0.66	0.19	0.06	0.77		[33]
7	6	0.39	0.01	3.44	93.85	0.03	0.53	0.65	0.28	0.09	0.75		[33]
8	3	1.64	1.48	9.93	82.00		2.11	0.41	0.32	0.01		2.1	[33]
9	6	0.18	0.11	2.94	95.06	0.03	0.83	0.07	0.13	0.01	0.64		[34]
10	4	0.09	0.33	1.42	93.06	0.03		0.09	0.04	0.13	4.81		[34]
11	25	0.73	1.09	9.24	81.94	0.08	2.12	0.18	0.51	0.07	1.75	2.30	[35]
12	7	1.39	1.01	7.53	85.69	0.13	1.33	0.19	0.50	0.02	0.56	1.63	[5]
13	7	0.91	0.4	8.07	87.8	0.08	1.30	0.10	0.28	0.03	0.54	0.49	[36]
14	12	0.78	1.04	6.58	86.68	0.11	1.17	0.93	0.32	0.06	0.93	1.4	[36]
15	6	1.53	1.07	6.75	83.73	0.11	1.17	2.70	0.53	0.11	0.78	1.52	[36]
16	3	1.95	0.45	6.92	85.17	0.09	1.71	1.09	0.38	0.08	1.39	0.77	[36]
17	8	0.77	1.45	9.08	78.93	0.09	1.09	0.32	0.58	0.19	7.49		[37]
陆缘弧													
18	15	0.49	3.92	15.73	63.97	0.21	5.47	2.24	0.84	0.08	7.05		[38]
19	10	2.68	3.42	13.98	62.72	0.22	2.86	6.77	0.89	0.10	6.37		[38]
20	10	3.48	2.52	11.71	68.47	0.16	2.09	5.1	0.74	0.09	5.63		[38]
21	10	2.43	3.79	14.16	63.23	0.18	1.91	3.84	1.28	0.12	9.07		[38]
22	3	3.72	1.97	15.64	67.28		2.7	3.72	0.68	0.07		4.22	[31]
23	3	3.20	1.95	15.58	67.38		2.44	4.59	0.63	0.08		4.14	[31]
24	16	2.96	3.21	13.86	70.65	0.13	1.62	1.48	0.76	0.08	5.26		[39]
25	14	2.36	3.24	10.75	70.00	0.22	1.82	5.02	1.18	0.14	5.27		[40]
26	17	1.16	3.26	18.59	62.16	0.14	4.53	2.99	0.83	0.05	2.23	4.07	[41]
27	7	2.62	4.67	15.62	64.23	0.22	2.37	2.50	0.94	0.10	4.81	2.02	[6]
28	3	3.78	4.61	16.11	63.20	0.23	2.05	2.37	0.94	0.10	2.65	4.06	[6]
29	2	4.61	2.49	17.16	59.73	0.47	2.36	4.17	1.14	0.11	3.60	4.27	[6]
30	6	4.34	2.01	15.91	66.33	0.23	2.00	3.71	0.59	0.10	3.09	1.80	[6]
31	4	5.19	1.83	15.58	65.09	0.30	1.98	3.68	0.72	0.10	1.92	3.72	[6]
碰撞造山带													
32	1	2.31	1.26	10.58	73.99		1.68	6.80	0.63	0.06		2.68	[31]
33	12	3.13	1.08	14.41	71.35	0.10	3.27	2.59	0.47	0.09	1.21	2.28	[22]
34	6	0.37	2.14	12.19	71.31	0.21	1.87	5.85	0.66	0.08	4.67	0.65	[26]
35	5	1.65	3.51	10.23	71.44	0.18	1.79	5.84	0.69	0.07	1.12	3.49	[30]
36	3	2.75	1.36	14.63	71.77	0.07	3.32	1.42	0.52	0.05	3.81	0.28	[42]

续表 1

编号	样品数	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	FeO	参考文献
37	10	1.79	2.35	13.48	72.82	0.14	2.70	1.61	0.71	0.07	4.34		[43]
38	5	1.22	0.12	16.58	71.95	0.07	3.31	0.23	0.62	0.10	5.35	0.44	[44]
39	4	2.86	1.89	12.65	73.73	0.13	2.58	2.26	0.51	0.09	2.85	0.43	[44]
40	3	3.85	1.76	13.54	73.81	0.11	2.77	1.49	0.39	0.06	1.78	0.46	[44]
41	47	3.02	2.29	13.29	70.81	0.16	2.40	2.25	0.69	0.07		5.02	[29]
42	17	2.79	2.36	13.42	70.64	0.15	2.44	2.45	0.70	0.07		4.99	[29]
43	6	2.90	3.29	15.73	64.49	0.16	3.43	2.41	0.73	0.08		6.77	[29]
大陆岛弧													
44	2	4.13	2.14	13.21	70.51		1.95	3.52	0.54	0.06		3.95	[31]
45	4	3.51	2.57	15.83	66.54		2.64	2.95	0.72	0.12		5.13	[31]
46	4	3.61	1.93	13.85	70.31		3.10	3.25	0.47	0.06		3.40	[31]
47	14	2.64	3.00	16.13	65.4	0.12	3.37	1.99	0.76	0.09		6.50	[29]
48	29	2.52	1.49	12.25	74.38	0.12	1.82	2.66	0.66	0.08	1.04	2.96	[5]
49	9	3.24	1.91	12.47	73.14	0.17	1.55	2.26	0.62	0.07	1.08	3.48	[28]
50	15	1.89	1.8	13.44	73.67	0.16	1.89	1.89	0.64	0.07	1.31	3.24	[28]
51	14	2.89	1.63	13.52	73.95	0.16	1.89	1.31	0.64	0.06	0.73	3.24	[28]
52	7	3.11	3.39	13.86	68.65		1.97	2.69	0.82	0.10	3.84	1.68	[6]
53	3	2.84	3.42	13.52	69.2		1.63	3.06	0.86	0.10	2.00	3.48	[6]
54	7	1.72	2.49	13.03	64.7	0.14	2.33	5.95	0.66	0.07	5.39	3.53	[45]
55	8	1.95	2.28	13.67	69.75	0.13	3.18	2.09	0.60	0.05	4.09	2.20	[45]
56	5	3.64	2.96	16.73	67.64		2.07	0.99	0.48	0.08		5.42	[32]
57	14	2.75	2.10	16.15	69.3	0.14	3.13	0.98	0.83	0.07	1.56	3.01	[46]
大洋岛弧													
58	3	2.10	24.35	10.92	46.26		0.85	4.94	0.76	0.19		9.64	[31]
59	2	3.65	3.92	17.87	53.20		1.18	9.79	0.98	0.17		9.24	[31]
60	2	4.09	3.86	16.04	57.55		1.53	6.14	1.28	0.17		9.35	[31]
61	2	4.08	3.86	16.04	57.53		1.52	6.16	1.28	0.17		9.35	[31]
62	2	3.67	2.40	17.19	60.60		1.59	7.87	0.65	0.13		5.90	[31]
63	4	3.57	3.70	17.38	61.39		1.45	4.8	0.8	0.13		6.79	[31]
64	2	2.99	4.03	15.37	57.63	0.12	0.45	8.61	0.8	0.18	9.82		[47]
65	5	2.40	4.34	14.90	55.36	0.06	0.63	8.41	0.89	0.17	12.84		[47]
66	3	2.46	4.14	15.85	57.29	0.09	0.74	7.5	0.87	0.17	10.89		[47]
67	7	3.62	5.97	18.39	53.59	0.06	1.04	7.05	0.76	0.21	9.31		[47]
68	7	3.25	7.09	17.24	54.16	0.07	0.67	7.54	0.61	0.19	9.17		[47]
69	11	4.78	2.74	16.37	59.20	0.18	1.16	7.62	0.87	0.26	1.73	5.02	[5]
70	18	4.73	2.23	12.35	60.36	0.22	1.21	6.51	0.52	0.31	6.00		[48]

注:个别平均值直接来源于参考文献,其他均为笔者计算所得。

得到最大值。观察发现, $[(Al_2O_3+FeOT)/(K_2O+Na_2O)]/(MgO+CaO)$ 从克拉通内部到碰撞造山带降低, 从陆缘弧和大洋岛弧到大陆岛弧升高, 能很好地区分克拉通内部源区和碰撞造山带, 以及大陆岛弧、陆缘弧和大洋岛弧, 但对碰撞造

山带、陆缘弧与大洋岛弧判别性不好; $[SiO_2/(MnO+TiO_2)]/(MgO+CaO)$ 可以区分克拉通内部、大洋岛弧和其余 3 个物源。这样只剩下大陆岛弧和碰撞造山带二者之间不好判别, 这主要是由于造山带物源组成的复杂性所致。

表 2 砂岩中主量元素间相关系数(n=478)

Table 2 Correlation coefficient (n=478) of major elements in sandstones

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeOT
Na ₂ O	1.00									
MgO	0.21	1.00								
Al ₂ O ₃	0.37	0.27	1.00							
SiO ₂	-0.39	-0.60	-0.27	1.00						
P ₂ O ₅	0.06	0.20	-0.39	-0.72	1.00					
K ₂ O	-0.13	-0.02	0.57	-0.05	-0.26	1.00				
CaO	0.27	0.40	0.30	-0.36	-0.09	-0.09	1.00			
TiO ₂	0.22	0.21	-0.21	-0.68	0.75	-0.17	-0.02	1.00		
MnO	0.15	0.37	-0.18	-0.72	0.74	-0.28	0.18	0.67	1.00	
FeOT	0.25	0.58	0.52	-0.64	0.11	0.13	0.42	0.29	0.44	1.00

注:FeOT为全铁。

表 3 克拉通内部物源砂岩地球化学主量元素间相关系数

Table 3 Correlation coefficient of major elements in sandstones derived from craton interior provenance

N=129	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeOT
Na ₂ O	1.00									
MgO	0.349	1.00								
Al ₂ O ₃	0.280	0.617	1.00							
SiO ₂	-0.381	-0.758	-0.925	1.00						
P ₂ O ₅	0.185	0.415	0.200	-0.300	1.00					
K ₂ O	0.144	0.283	0.781	-0.738	0.013	1.00				
CaO	0.209	0.250	0.174	-0.355	0.243	0.182	1.00			
TiO ₂	0.193	0.441	0.630	-0.632	0.309	0.429	0.169	1.00		
MnO	-0.001	0.245	0.069	-0.258	0.159	-0.013	0.158	0.063	1.00	
FeOT	0.111	0.667	0.534	-0.742	0.246	0.371	0.098	0.401	0.534	1.00

注:FeOT为全铁。

表 4 陆缘弧物源砂岩地球化学主量元素间相关系数

Table 4 Correlation coefficient of major elements in sandstones derived from continental-margin arc provenance

N=115	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeOT
Na ₂ O	1.00									
MgO	-0.301	1.00								
Al ₂ O ₃	-0.271	0.198	1.00							
SiO ₂	0.190	-0.653	-0.624	1.00						
P ₂ O ₅	0.129	0.105	0.027	-0.217	1.00					
K ₂ O	-0.712	0.159	0.617	-0.404	-0.025	1.00				
CaO	0.146	0.185	-0.379	-0.331	0.142	-0.264	1.00			
TiO ₂	-0.157	0.375	-0.141	-0.256	0.059	-0.097	0.098	1.00		
MnO	0.121	0.337	-0.448	-0.141	0.147	-0.396	0.440	0.582	1.00	
FeOT	-0.297	0.606	0.391	-0.677	0.131	0.227	-0.075	0.581	0.314	1.00

注:FeOT为全铁。

表 5 碰撞造山带物源砂岩地球化学主量元素间相关系数

Table 5 Correlation coefficient of major elements in sandstones derived from the provenance of collisional orogenic belts

N=54	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeOT
Na ₂ O	1.00									
MgO	-0.207	1.00								
Al ₂ O ₃	-0.047	-0.263	1.00							
SiO ₂	0.202	-0.337	-0.735	1.00						
P ₂ O ₅	-0.434	0.620	-0.017	-0.429	1.00					
K ₂ O	-0.156	-0.275	0.716	-0.477	-0.093	1.00				
CaO	-0.354	0.624	-0.382	-0.267	0.536	-0.383	1.00			
TiO ₂	-0.658	0.429	0.220	-0.501	0.597	0.063	0.290	1.00		
MnO	-0.023	0.029	0.138	-0.282	0.298	-0.071	0.213	0.237	1.00	
FeOT	-0.519	0.291	0.536	-0.788	0.481	0.248	0.220	0.761	0.253	1.00

注:FeOT 为全铁。

表 6 大陆岛弧物源砂岩地球化学主量元素间相关系数

Table 6 Correlation coefficient of major elements in sandstones derived from continental island arc provenance

N=102	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeOT
Na ₂ O	1.00									
MgO	0.129	1.00								
Al ₂ O ₃	0.221	0.409	1.00							
SiO ₂	-0.147	-0.774	-0.725	1.00						
P ₂ O ₅	-0.272	-0.159	-0.186	0.140	1.00					
K ₂ O	-0.205	0.125	0.507	-0.401	-0.046	1.00				
CaO	-0.157	0.298	-0.219	-0.380	-0.052	-0.172	1.00			
TiO ₂	0.038	0.481	0.391	-0.481	0.074	0.219	-0.023	1.00		
MnO	0.095	0.442	0.075	-0.359	-0.162	-0.251	0.363	0.180	1.00	
FeOT	-0.191	0.688	0.398	-0.808	0.088	0.223	0.353	0.417	0.362	1.00

注:FeOT 为全铁。

表 7 大洋岛弧物源砂岩地球化学主量元素间相关系数

Table 7 Correlation coefficient of major elements in sandstones derived from oceanic island arc provenance

N=60	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeOT
Na ₂ O	1.00									
MgO	-0.229	1.00								
Al ₂ O ₃	0.265	-0.060	1.00							
SiO ₂	0.212	-0.012	0.958	1.00						
P ₂ O ₅	-0.264	-0.112	-0.957	-0.972	1.00					
K ₂ O	0.386	-0.046	0.636	0.639	-0.615	1.00				
CaO	-0.069	0.005	0.760	0.762	-0.785	0.219	1.00			
TiO ₂	0.185	-0.168	-0.715	-0.771	0.686	-0.414	-0.652	1.00		
MnO	-0.249	-0.064	-0.830	-0.887	0.853	-0.576	-0.697	0.718	1.00	
FeOT	0.063	0.133	0.413	0.391	-0.527	0.108	0.473	-0.095	-0.151	1.00

注:FeOT 为全铁。

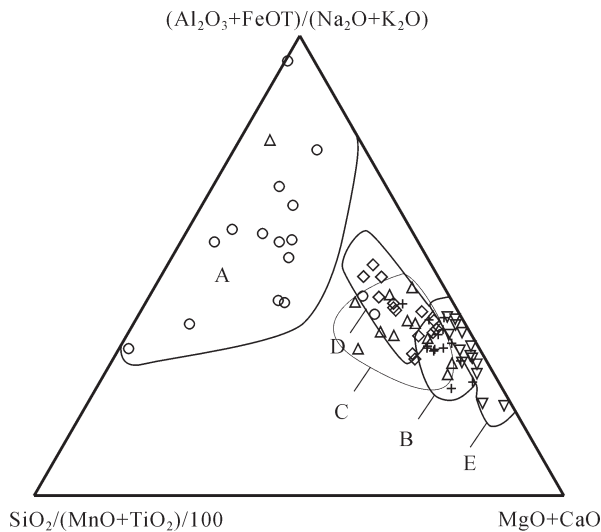


图1 砂岩物源环境 $(Al_2O_3+FeOT)/(Na_2O+K_2O)$ — $SiO_2/(MnO+TiO_2)/100$ — $MgO+CaO$ 三角图解
A—克拉通内部(空心圆圈);B—陆缘弧(十字形);C—碰撞造山带(正三角形);D—大陆岛弧(空心菱形);E—大洋岛弧(倒三角形)

Fig.1 Ternary diagram of $(Al_2O_3+FeOt)/(Na_2O+K_2O)$ — $SiO_2/(MnO+TiO_2)/100$ — $MgO+CaO$ for the sandstone provenance environment

A—Craton interior (hollow circle);B—Continental—margin arc (cross);
C—Collisional orogenic belt (regular triangle);D—Continental island—arc (hollow diamond);E—Oceanic island—arc (inverted triangle)

以 $(Al_2O_3 + FeOT)/(Na_2O + K_2O)$ 、 $SiO_2/(MnO + TiO_2)/100$ 、 $MgO+CaO$ 作为三角图解的端元判别砂岩物源环境,在图1克拉通内部、陆缘弧、大陆岛弧和大洋岛弧4种源区构造环境有很好的区分,但对于碰撞造山带物源分别与大陆岛弧、陆缘弧2种物源区有不同程度的重叠,表明了造山带内有后2种源区物质的卷入。

3 判别方程分析及图解

统计分析软件 SPASS 对于多数据的判别聚类分析具有很强的功能,应用该软件处理分析地质地球化学数据能够综合多种因素,建立多变量的判别方程^[5, 49],如:

$$D_i = a_i x_1 + b_i x_2 + c_i x_3 + \dots + p_i x_p \pm C \quad (1)$$

其中 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$ 是 p 个判别变量; $a_i, b_i, c_i, \dots, p_i$ 是 p 个判别方程系数; C 为常量, D_i 为判别因子。通过该方程使得预先分好的组能够最大限度地区分开来。与变量相联系的标准判别系数数值显示出了各个变量在判别分类过程中的相对重要性。

用9个主元素氧化物作为变量对70套平均数据分5组进行判别方程分析。判别方程F1和F2对所有数据变化的解释达到97.1%,而且具有相对较高的规范化相关系数和相对

表8 标准化判别方程系数

Table 8 Standardized canonical discriminant function coefficients

变量	方程				
	1	2	3	4	5
Na ₂ O	0.238	0.591	0.225	0.073	-0.084
MgO	0.164	-0.091	0.822	0.227	1.877
Al ₂ O ₃	0.554	-0.368	0.778	-0.661	2.493
SiO ₂	-0.488	-0.211	1.399	0.256	2.917
K ₂ O	-0.414	0.852	-0.115	0.855	0.391
CaO	0.339	-0.130	0.265	0.625	1.582
TiO ₂	0.056	0.287	1.084	0.447	0.134
MnO	0.209	-0.617	0.089	0.265	0.379
特征值	9.711	1.797	0.180	0.108	0.055
方差共献率	81.9	15.2	1.5	0.9	0.5
累计方差共献率	81.9	97.1	98.6	99.5	100.0
规范化相关系数	0.952	0.802	0.390	0.312	0.229
统计量	0.024	0.259	0.725	0.855	0.948

注:FeO代表全铁

较低的 Wilks' Lambda 值,这些都说明它们对数据的判别能力相对较强(表8),而F3、F4和F5只能解释数据变化的很小部分。70套砂岩主元素氧化物平均含量对判别方程显示出较好的区分结果(表9),88.8%平均样品相对于预先分组能够正确划分。

根据公式(1)对每个样品平均数据应用判别方程F1和F2计算相应的判别因子 D_i ,这里的 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$ 代表的是重新计算得到的9个主元素氧化物百分含量,而 $a_i, b_i, c_i, \dots, p_i$ 代表非标准化的判别方程系数(表10)。作方程F1对F2的判别图解(图2), Al_2O_3 和 SiO_2 值对方程F1有较大的贡献,说明石英和长石含量对其值有较大的影响,从克拉通内部到碰撞造山带和大陆岛弧、大洋岛弧有减少趋势。方程F2较多地受到 K_2O 和 MnO 的影响,这取决于钾长石和火山岩屑的变化,可应用于区分大陆岛弧、陆缘弧和大洋岛弧。在这个判别图解上,碰撞造山带源区砂岩与陆缘弧和大陆岛弧区联系紧密,明显的显示出后2种物源在碰撞造山带内的混合。

4 砂岩主量元素与碎屑组分之间的关系

尽管采用Gazzi-Dickinson的显微镜数点统计法^[4]能够根据砂岩中碎屑组分的成分和含量较为准确地反映出物源特征,但因砂岩中碎屑的分解和破坏而造成的源区特征的丢失仍不能避免^[6, 49, 51, 53],在这种情况下只能求助于地球化学分析^[4]。微量元素和稀土元素因其稳定性高、不易分解,从而携带有更多的源区信息^[24, 25],然而9个主量元素作为矿物的主要构成元素更能反映砂岩中主要碎屑颗粒的组成。K元素与钾长石和云母等含钾矿物对应,Si元素反映硅酸盐尤其是石英的含量,Fe、Mg、Mn和Ti主要表明基性岩屑和某些副矿物的

表 9 方程判别分类结果
Table 9 Classification based on the function discrimination

结果		预先分组					总计
		A	B	C	D	E	
个数	A	17	0	0	0	0	17
	B	0	12	1	1	0	14
	C	0	0	12	0	0	12
	D	0	1	1	11	0	13
	E	0	0	0	0	13	13
	未分类	0	0	0	1	0	1
百分比(%)	A	100	0	0	0	0	100
	B	0	85.7	7.1	7.1	0	100
	C	0	0	100	0	0	100
	D	0	7.7	7.7	84.6	0	100
	E	0	0	0	0	100	100
	未分类	0	0	0	100	0	100

注:88.8%的分组与预先分组一致。

表 10 非标准规范化判别方程系数
Table 10 Unstandardized canonical discriminant function coefficients

变量	方程				
	1	2	3	4	5
Na ₂ O	0.267	0.663	0.252	0.082	-0.094
MgO	0.068	-0.037	0.338	0.093	0.771
Al ₂ O ₃	0.259	-0.172	0.364	-0.309	1.167
SiO ₂	-0.122	-0.053	0.351	0.064	0.732
K ₂ O	-0.503	1.035	-0.140	1.038	0.475
CaO	0.193	-0.074	0.151	0.356	0.902
TiO ₂	.330	1.687	6.369	2.623	0.785
MnO	5.840	-17.250	2.489	7.421	10.603
常量	4.320	3.051	-35.701	-6.840	-74.164

存在。整个地壳中含量较多的矿物为石英、钾长石、钠长石、钙长石、紫苏辉石和透辉石^[6],砂岩中的碎屑来自地壳及其旋回沉积物为主,所以假定在砂岩中也以这些矿物为主,这样就可以用砂岩中主量元素的摩尔含量来近似表示其中碎屑颗粒的组成。计算公式如下:

$$Qel=Si-(K+Na) \times 5 \div 2 - Ca - Al \div 2 - (Fe+Mg)$$

$$Fel=(Al+Na+K) \div 2$$

$$Lel=(Fe+Mg) \div 2 + Ca \div 2 - (Al-K-Na) \div 4 + Ti + Mn$$

$$Pel/Fel=(Al-K+Na) \div (Al+K+Na)$$

其中,主量元素的摩尔含量=氧化物含量×分子式内主量元素原子个数除氧化物分子量;Qel:用主量元素(摩尔含量)表示的石英含量;Fel:用主量元素表示的长石含量;Lel:用主量元素表示的基性岩屑含量;Pel/Fel:用主量元素表示

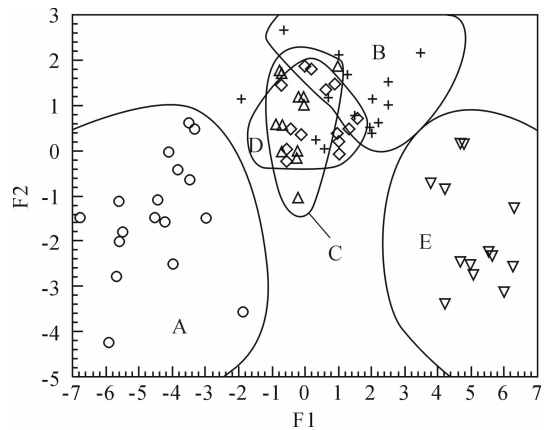


图 2 砂岩物源环境的 F1-F2 判别图解
A—克拉通内部(空心圆圈);B—陆缘弧(十字形);
C—碰撞造山带(正三角形);D—大陆岛弧(空心菱形);
E—大洋岛弧(倒三角形)

Fig.2 F1-F2 plot of sandstones for provenance discrimination
A-Craton interior (hollow circle);B-Continental-margin arc (cross);
C-Collisional orogenic belt (regular triangle);D-Continental island-arc (hollow diamond);E-Oceanic island-arc (inverted triangle)

的斜长石与长石总量的比值;各主量元素均为摩尔含量。

从克拉通内部到大陆岛弧和陆缘弧到大洋岛弧,石英含量逐渐减少,镁铁质矿物的基性岩屑逐渐增多(表 11),这一变化趋势明显的反映在以 Qel、Fel 和 Lel 为端元的三角判别图解(图 3)上。在大洋岛弧环境下斜长石/长石总量值最高,这与该环境下 K 含量极低和钾长石少有关。该图解仍然显示出碰撞造山带与陆缘弧和大陆岛弧二者不同程度的重叠,对另外 4 种物源区有较好的判别。

表 11 5 种不同物源构造环境下主量元素摩尔百分比平均特征值

Table 11 Discriminant parameters for molar percentages of major elements in five different provenances tectonic environments

	克拉通内部	陆缘弧	碰撞造山带	大陆岛弧	大洋岛弧
Qel	1.21	0.36	0.57	0.50	0.065
Fel	0.09	0.22	0.20	0.21	0.23
Lel	0.019	0.085	0.056	0.063	0.163
Qel/Fel	0.92	0.95	0.95	0.97	0.99

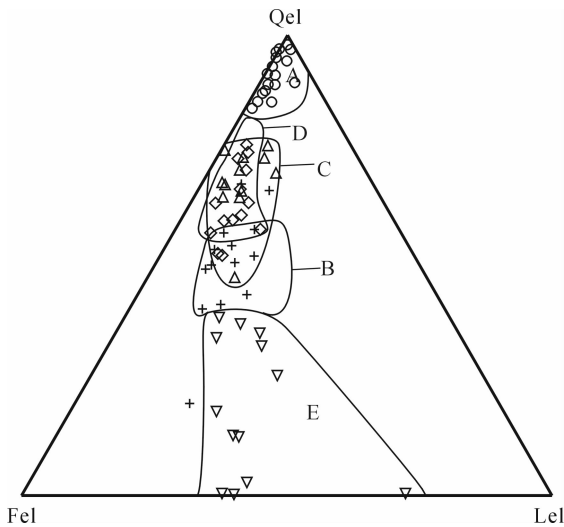


图 3 砂岩物源环境的 Qel—Fel—Lel 判别图解
A—克拉通内部(空心圆圈);B—陆缘弧(十字形);
C—碰撞造山带(正三角形);D—大陆岛弧(空心菱形);
E—大洋岛弧(倒三角形)

Fig.3 Qel—Fel—Lel plot of sandstones for provenance discrimination

A—Craton interior (hollow circle); B—Continental—margin arc (cross);
C—Collisional orogenic belt (regular triangle); D—Continental island—arc (hollow diamond); E—Oceanic island—arc (inverted triangle)

5 讨论和结论

在现代砂和古代砂岩碎屑中,石英和长石含量与 SiO_2 和 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值相对于不同构造环境存在明显变化^[3,4],因此 $\text{SiO}_2\text{—K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 图解^[10]可以用于砂岩—泥岩构造环境和源区的判别;它充分利用了 SiO_2 对环境 and 物源变化的敏感反应,以及 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值在成岩和变质等作用中的稳定性,克服了 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3\text{—K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ^[11]的不确定性。该图解简单易用,但没有考虑其他主量元素的特征,只突出了 Si、K 和 Na 3 种元素的作用,且构造环境的分类也较简单。而在 $\text{TiO}_2\text{—}$

$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2\text{—Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}\text{—Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})\text{—Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ 4 个判别图解^[5]中,Fe 和 Mg 的作用得到体现;而且涉及到 Fe、Ti 和 Mg 的稳定性, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 对砂岩中石英富集程度的反映, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 与钾长石和云母与斜长石比值的对应性,以及 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$ 体现的难溶元素对易溶元素的比值。然而这 4 个图解中有不同程度的构造环境区的重叠,而且相对于氧化物来说,元素摩尔百分比更适用于估算源区风化程度^[12,13],更能够体现砂岩中矿物组成特点。以同样的构造背景划分为基础的 $\text{SiO}_2/20\text{—K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}\text{—TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ 三角图解^[17],虽然考虑到多个元素参与判别的重要性以及 3 个端元进行约束的优越性,但是在图解中构造环境区分不够明显,4 种大地构造环境之间存在较大重叠区;还应注意, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 单独作为一个端元也不大合适,因为两种元素不稳定性的叠加可能导致判别误差的加大,利用数据处理软件对化学测试数据进行分析进而建立相应图解,其可行性已经在砂岩的物源分析中得到验证^[5,16,31]。这种方法可以综合多种因素进行源区分析,但其前提是所用数据的有效性和正确性。

笔者在前人研究的基础上,收集了 569 个已发表的砂岩地球化学主量元素分析数据,并依据相应参考文献划分出克拉通内部、陆缘弧、碰撞造山带、大陆岛弧和大洋岛弧 5 种环境和源区。从砂岩主量元素间相关性、判别方程分析和主元素与主要碎屑组分间对应关系 3 方面出发,利用 3 种途径建立了 $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO})/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{—SiO}_2/(\text{MnO} + \text{TiO}_2)/100\text{—MgO} + \text{CaO}$, F1—F2 和 Qel—Fel—Lel 3 个判别图解,并对相应特征值进行讨论。在这 3 个图解中,克拉通内部和大洋岛弧分别与其余 4 种源区有很好的区分,且陆缘弧、大陆岛弧二者之间也基本可以区分,只有碰撞造山带由于造山带本身构造演化和物质组成的复杂性,有多种物源卷入了造山带内部,导致其与大陆岛弧和陆缘弧分别存在部分重叠。按照威尔逊旋回理论,碰撞造山带是以大陆边缘(尤其是活动大陆边缘)为原型经褶皱冲断形成的;在不同的构造背景下,大陆岛弧、陆缘弧以及大洋岛弧构成了造山带的主体,所以造山带物源的原型地质体可能为大陆岛弧、陆缘弧及大洋岛弧,使得在判别图上碰撞造山带、大陆岛弧、陆缘弧及大洋岛弧常有不同程度的叠加。因此在应用判别图时,首先判别物源原型地质体,再结合其他地质特征(如构造运动面、不整合、不整合界面上下地质构造变形、变质异同等)判别物源是否为碰撞造山带。在 3 个图解中,碰撞造山带物源区均以虚线标出,表明其大致范围,以提醒源区可能具有碰撞造山带性质。

本文中图解的建立考虑到以下几个方面:

(1) 尽量避免生物成因的 CaO 含量对判别的影响,在数据收集阶段进行数据筛选,去除不符合要求的数据组合。所收集的数据从寒武纪杂砂岩到现代深海砂,涵盖了元古代后所有时代碎屑岩样品的数据,并按时代和位置进行分组,在一定程度上可以排除时间的影响;

(2) 利用各组砂岩主量元素平均含量进行物源判别图解

的建立,尽管应用平均值进行判别可能会掩盖存在于单组内的化学成分变化^[9];

(3)对收集到的数据进行进一步规范,重新计算不包括 P_2O_5 和挥发份的其他各主量元素的百分含量,进而求得其摩尔含量;

(4)强调各主量元素在砂岩构造环境划分中的作用,尽管其影响因子不尽相同;

(5)利用3个特征变量建立三角图解,对构造环境进行更多约束;

(6)对砂岩碎屑成分同主量元素之间的关系进行初步探讨,利用主元素摩尔百分比近似代表对应矿物的含量,避免由于成岩作用等对碎屑的破坏而造成的识别误差;

(7)对砂岩源区和构造环境在图解上进一步细化,基本上区分出克拉通内部、陆缘弧、碰撞造山带、大陆岛弧和大陆岛弧5种物源类型。

尽管如此,仍不能保证所建立图解判别的准确性,在3个图解中,主量元素没有很好地区分碰撞造山带同陆缘弧、碰撞造山带同大陆岛弧,这需要进一步的研究。但值得肯定的是,3个图解能够弥补前人图解的一些缺陷,是对主量元素应用于砂岩物源和构造环境判别的进一步探索。

致谢:本论文的完成过程中,张本仁院士和李方林教授对此提出了建设性意见,在此表示感谢。

参考文献(References):

- [1] Dickinson W R, Suczek C A. Plate tectonics and sandstone compositions [J]. The American Association of Petroleum Geologist Bulletin, 1979, 63(12):2164-2182.
- [2] 陈汉林, 杨树锋, 王清华, 等. 塔里木板块早—中二叠世玄武质岩浆作用的沉积响应[J]. 中国地质, 2006, 33(3):545-552.
Chen Hanlin, Yang Shufeng, Wang Qinghua, et al. Sedimentary response to the Early-Mid Permian basaltic magmatism in the Tarim plate[J]. Geology in China, 2006, 33(3):545-552(in Chinese with English abstract).
- [3] Crook K A W. Lithogenesis and geotectonics: the significance of composition in flysch arenites (graywackes)[C]//Dott R H, Shaver R H (ed.). Modern and Ancient Geosynclinal Sedimentation. Tulsa: SEPM Special Publication, 1974:304-310.
- [4] Schwab F L. Framework mineralogy and chemical composition of continental margin-type sandstone[J]. Geology, 1975, 3:487-490.
- [5] Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstone [J]. The Journal of Geology, 1983, 91(6):611-627.
- [6] Holail H M, Moghazi A K M. Provenance, tectonic setting and geochemistry of greywackes and siltstones of the Late Precambrian Hammamat Group, Egypt [J]. Sedimentary Geology, 1998, 116 (3-4):227-250.
- [7] Shao L, Statterger K, Garbe Schoenberg C D. 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, 71:37-49.
- [8] Cullers R L, Stone J. Chemical and mineralogical comparison of the Pennsylvanian Fountain Formation, Colorado, U. S.A. (an uplifted continental block) to sedimentary rocks from other tectonic environments[J]. Lithos, 1991, 27:115-131.
- [9] Armstrong-Altrin J S, Verma S P. Critical evaluation of six tectonic setting discrimination diagrams using geochemical data of Neogene sediments from known tectonic settings [J]. Sedimentary Geology, 2005, 177(1-2):115-129.
- [10] Roser B P, Korsch R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO_2 content and K_2O/Na_2O ratio [J]. The Journal of Geology, 1986, 94(5):635-650.
- [11] Maynard J B, Valloni R, Yu H S. Composition of modern deep-sea sands from arc-related basins [C]//Leggett J K (ed.). Trench-Forearc Geology. Oxford:Blackwell Scientific Publication, 1982: 551-562.
- [12] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. Nature, 1982, 299: 715-717.
- [13] Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and Paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance [J]. Geology, 1995, 23:921-924.
- [14] Nesbitt H W, Fedo C M, Young G M. Quartz and feldspar stability, steady and non-steady-state weathering, and petrogenesis of siliciclastic sands and muds [J]. Journal of Geology, 1997, 105 (2):173-191.
- [15] 阚泽忠, 梁斌, 王全伟, 等. 广元恐龙化石埋藏地沙溪庙组地球化学特征及对物源区和古风化作用的指示[J]. 中国地质, 2006, 33 (5):1021-1029.
Kan Zezhong, Liang Bin, Wang Quanwei, et al. Geochemistry of the Shaximiao Formation in a dinosaur fossil site Guangyuan, Sichuan, and its implication for the source area and paleoweathering[J]. Geology in China, 2006, 33(5):1021-1029(in Chinese with English abstract).
- [16] 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, 67:119-39.
- [17] Kroonenberg S B. Effects of provenance, sorting and weathering on the geochemistry of fluvial sands from different tectonic and climatic environments [C]//Proceedings of the 29th International Geological Congress Part A, 1994:69-81.
- [18] Wanas H A, Maguid N M. Petrography and geochemistry of the Cambro-Ordovician Wajid Sandstone, southwest Saudi Arabia: Implication for provenance and tectonic setting [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, 27(4):416-429.
- [19] 李志明, 刘家军, 胡瑞忠, 等. 兰坪中新世盆地沉积岩源区构造背景和物源属性研究[J]. 沉积学报, 2003, 20(4):547-552.
Li Zhiming, Liu Jiajun, Hu Ruizhong, et al. Tectonic setting and provenance of source rock for sedimentary rocks in Lanping

- Mesozoic -Cenozoic basin: evidences from geochemistry of sandstones [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 20(4):547-552 (in Chinese with English abstract).
- [20] 和政军, 李锦轶, 莫申果, 等. 漠河前陆盆地砂岩岩石地球化学的构造背景和物源区分析 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 2003, 33(12): 1219-1226.
He Zhengjun, Li Jinyi, Mo Shengguo, et al. The evidences for the tectonic background and provenance of Mohe foreland basin from the geochemistry of the sandstones [J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(12): 1219-1226 (in Chinese).
- [21] 李日俊, 孙龙德, 龚富华, 等. 藏北查桑上三叠统复理石沉积大地构造背景的初步探讨 [J]. *岩石学报*, 2000, 16 (3): 443-448.
Li Yuejun, Sun Longde, Gong Fuhua, et al. A preliminary study on the tectonic setting of Upper Triassic flysch at Chasang, North Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 16(3): 443-448 (in Chinese with English abstract).
- [22] 李利平, 田军, 张克信, 等. 东昆仑造山带下三叠统沉积地球化学特征 [J]. *同济大学学报*, 2002, 30(8): 938-943.
Li Liping, Tian Jun, Zhang Kexin, et al. Geochemical characteristics of Low to Middle Triassic sedimentary rocks of East Kunlun Orogenic Belt [J]. *Journal of Tongji University*, 2002, 30(8): 938-943 (in Chinese with English abstract).
- [23] 方国庆. $K_2O/(Na_2O+CaO) - SiO_2/Al_2O_3$: 一个用于推断复理石形成时板块构造背景的判别图 [J]. *西北地质科学*, 1993, 14(1): 121-125.
Fang Guoqing. $K_2O/(Na_2O + CaO) - SiO_2/Al_2O_3$: A -diagram for determining the plate tectonic setting of flysch [J]. *Northwest Geoscience*, 1993, 14(1): 121-125 (in Chinese with English abstract).
- [24] Bhatia M R. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic and mudrocks: Provenance and tectonic control [J]. *Sedimentary Geology*, 1985, 45(1-2): 97-113.
- [25] 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: 181-193.
- [26] Gu X X. Geochemical characteristics of the Triassic Tethys - turbidites in northwestern Sichuan, China: Implications for provenance and interpretation of the tectonic setting [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(21): 4615-4631.
- [27] 方国庆, 刘德良. 复理石杂砂岩的化学组成与板块构造 [J]. *沉积与特提斯地质*. 2000, 20(3): 105-12.
Fang Guoqing, Liu Deliang. Chemical composition of flysch greywacke and plate tectonics [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2000, 20(3): 105-12 (in Chinese).
- [28] She Z B, Ma C Q, Mason R. Provenance of the Triassic Songpan - Ganzi flysch, west China [J]. *Chemical Geology*, 2006, 231: 159-175.
- [29] Lahtinen R. Archean - Proterozoic transition: geochemistry, provenance and tectonic setting of metasedimentary rocks in central Fennoscandian Shield, Finland [J]. *Precambrian Research*, 2000, 104: 147-174.
- [30] 杨江海, 杜远生, 朱杰. 甘肃景泰正路下志留统复理石杂砂岩沉积地球化学特征 [J]. *地质科技情报*, 2006, 25(5): 27-31.
Yang Jianghai, Du Yuansheng, Zhu Jie. Geochemical characteristics of the Lower Silurian flysch greywacke in Zhenglu, Jingtai County, Gansu Province [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2006, 25(5): 27-31 (in Chinese with English abstract).
- [31] McLennan S M, Taylor S R, Mcculloch M T, et al. Geochemical and Nd - Sr isotopic composition of deep - sea turbidites: crustal evolution and plate tectonic associations [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54: 2015-2050.
- [32] 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.
- [33] Getaneh W. Geochemistry provenance and depositional tectonic setting of the Adigrat Sandstone northern Ethiopia [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2002, 35(2): 185-98.
- [34] Osae S, Asiedu D K, Banoeng - Yakubo B, et al. Provenance and tectonic setting of Late Proterozoic Buem sandstones of southeastern Ghana: Evidence from geochemistry and detrital modes [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2006, 44(1): 85-96.
- [35] 朱玉磷, 邱胜安. 福建西部早古生代杂砂岩特征及其物源区和构造背景 [J]. *地质评论*, 1989, 35(6): 501-511.
Zhu Yulin, Qiu Shengan. The characteristics of the Early Palaeozoic greywacke in Western Fujian and its provenance and tectonic setting [J]. *Geological Review*, 1989, 35 (6): 501-511 (in Chinese with English abstract).
- [36] 和政军, 牛宝贵, 任纪舜. 陕南山阳地区刘岭群砂岩岩石地球化学特征及其构造环境分析 [J]. *地质科学*, 2005, 40(4): 596-607.
He Zhengjun, Niu Baogui, Ren Jishun. Tectonic discriminations of sandstones geochemistry from the Middle - Late Devonian Liuling Group in Shannan area, Southern Shaanxi [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2005, 40(4): 596-607 (in Chinese with English abstract).
- [37] Burnett D J, Quirk D G. Turbidite provenance in the Lower Palaeozoic Manx Group, Isle of Man: implications for the tectonic setting of Eastern Avalonia [J]. *Journal of the Geological Society*, 2001, 158: 913-924.
- [38] Batumike M J, Kampunzu A B, Cailteux J H. Petrology and geochemistry of the Neoproterozoic Nguba and Kundelungu Groups, Katangan Supergroup, southeast Congo: Implications for provenance, paleoweathering and geotectonic setting [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2006, 44: 97-115.
- [39] Hegner E, Gruler M, Hann H P, et al. Testing tectonic models with geochemical provenance parameters in greywacke [J]. *Journal of the Geological Society*, 2005, 162: 87-96.
- [40] Carranza - Edwards A, Centeno - García E, Rosales - Hoz L, et al. Provenance of beach gray sands from western México [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2001, 14(3): 291-305.
- [41] Yan Z, Wang Z, Wang T, et al. Provenance and Tectonic Setting

- of Clastic Deposits in the Devonian Xicheng Basin, Qinling Orogen, Central China [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76:557-574.
- [42] 李双应, 李任伟, 孟庆任, 等. 大别山东南麓中生代碎屑岩地球化学特征及其对物源的制约[J]. *岩石学报*, 2005, 21(4):1157-1166.
- Li Shuangying, Li Renwei, Meng Qingren, et al. Geochemistry of the Mesozoic and Cenozoic detrital rocks and its constrains on Provenance in the southeast foot of Dabie Mountains [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21 (4):1157-1166 (in Chinese with English abstract).
- [43] Das B K, AL-Mikhlaifi A S, Kaur P. Geochemistry of Mansar Lake sediments, Jammu, India; Implication for source-area weathering, provenance, and tectonic setting[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 26(6):649-668.
- [44] 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 Shuangying, 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(in Chinese with English abstract).
- [45] 苏本勋, 陈岳龙, 兰中伍, 松潘—甘孜地块前寒武—三叠系沉积地球化学研究[J]. *沉积学报*, 2005, 23(3):437-446.
- Su Benxun, Chen Yuelong, Lan Zhongwu. Sedimentary and geochemical study on the Pream - brian -Triassic series of Songpan-Ganze block [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23 (3):437-446(in Chinese with English abstract).
- [46] 卢海峰, 王宗起, 王涛. 西秦岭关家沟组物源分析 [J]. *地质学报*, 2006, 80(4):508-516.
- Lu Haifeng, Wang Zongqi, Wang Tao, et al. Discussion of the tectonic setting of the Guanjiagou Formation of the Western Qinling Mountains[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(4):508-516 (in Chinese with English abstract).
- [47] Gill J B, Hiscott R N, Vidal P. Turbidite geochemistry and evolution of the Izu-Bonin arc and continents[J]. *Lithos*, 1994, 33 (1/3):135-168.
- [48] Blanc G. Geochemical studies on selected sediment samples from the Lau backarc basin: evidence for hydrothermal ponded sediments [J]. *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results*, 1994:689-707.
- [49] Molinaroli E, Blom M, Basu A. Methods of provenance determination tested with discriminant function analysis [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1991, 61(6):900-908.
- [50] Ingersoll R V, Bullard T F, Ford R L. The effect of grain size on the detrial modes;a test of the Gazzi -Dickson point -counting Method[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1984, 54:103-116.
- [51] Taylor S R, Mclennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. Oxford:Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [52] Winchester J A, Max M D. Tectonic setting discrimination in clastic sequences:an example from the Late Proterozoic Erris Group, NW Ireland [J]. *Precambrian Research*, 1989, 45(1/3): 203-214.

Major element characteristics of sandstones and provenance analysis of basins

YANG Jiang-hai, DU Yuan-shang, XU Ya-jun, ZHU Jie

(Key Laboratory of Biogeology and Environment Geology of Education Ministry of China, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: Major element characteristics of sandstones from different kinds of basin are a function of particular provenance types and tectonic environments, and provenance analysis of basins may be performed using major element diagrams. Based on previous research, the authors selectively collected 569 major element data of sandstones with different tectonic environments, which are divided into 70 sets of average values. According to related references, the authors identify five kinds of provenances and tectonic environments: craton interior, continental arc, collisional orogenic belts, continental island arc and oceanic island arc. Based on an integrated analysis of the correlation between major elements in the sandstones collected, by using the correlation coefficients of the whole and major elements in sandstones derived from different provenances, the authors obtain five assemblages of major element oxides: SiO_2 , $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeOT}$, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$, $\text{MnO} + \text{TiO}_2$ and $\text{MgO} + \text{CaO}$, and then a triangular discriminant diagram of $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeOT}) / (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{SiO}_2 / (\text{MnO} + \text{TiO}_2) / 100 - \text{MgO} + \text{CaO}$ is established. Two discriminant functions, F1 and F2, which are correlated with SiO_2 , CaO , MgO , FeOT , K_2O , MnO , Al_2O_3 , Na_2O and TiO_2 , are gained by a discriminant function analysis of the collected data and a discriminant diagram of tectonic environments for two-variable (F1 and F2) provenances is established. According to the main elements in detrital grains of sandstones, the contents of quartz, feldspar and basic lithic minerals in the sandstones are analyzed using the molar percentages of the major elements to constrain the provenances. The constructed Qel - Fel - Lel diagram not only reflects the discrimination of the provenance and tectonic environments of sandstone by major elements but also approximately shows the composition of fragments in sandstones in related environments.

Key words: sandstone; major element; provenance; tectonic environment

About the first author: YANG Jiang-hai, male, born in 1984, master candidate majoring in paleontology and stratigraphy, engages in the study of sedimentology and geology of orogenic belts; E-mail: yjhcug@yahoo.com.