

北羌塘坳陷东缘石炭纪砂岩地球化学特征及构造背景

冯兴雷^{1,2}, 付修根³, 陈文彬^{1,2}

FENG Xinglei^{1,2}, FU Xiugen³, CHEN Wenbin^{1,2}

1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610082;

2. 自然资源部沉积盆地与油气重点实验室, 四川 成都 610082;

3. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610599

1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610082, Sichuan, China;

2. Key Laboratory for Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610082, Sichuan, China;

3. College of Geosciences and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610599, Sichuan, China

摘要:为了探讨羌塘盆地石炭纪的演化特征,于羌塘盆地北坳陷东部刻莫地区采集了一批早石炭世早期杂多群砂岩样品,对其进行了全岩地球化学测试。地球化学研究结果表明,岩石矿物成分主要在方解石-石英到含镁黑云母组分端元之间,部分样品接近钾长石组分端元;化学风化作用指标(CIW)、化学蚀变作用指标(CIA)和A-CN-K图解,反映该组砂岩的碎屑成分受到了中等的风化作用,并在风化过程中发生微弱钾交代,长石发生伊利石化。化学组分指标(ICV)表明岩石碎屑为第一次旋回沉积物,受沉积分选和再循环作用影响不大;A-CN-K图解还反映出砂岩碎屑源岩中斜长石含量高于钾长石含量,主要在花岗岩和花岗闪长岩之间变化。主量、微量和稀土元素特征指示,该组砂岩的沉积构造背景为活动大陆边缘和大陆岛弧的性质,说明在早石炭世早期古特提斯大洋已经开始进入俯冲消亡和萎缩阶段。

关键词:石炭系;砂岩;地球化学;构造背景;北羌塘坳陷东缘

中图分类号:P534.45;P588.21⁺2.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)11-1957-10

Feng X L, Fu X G, Chen W B. Geochemical characteristics and tectonic setting of Carboniferous sandstone in the eastern part of north Qiangtang depression. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(11): 1957-1966

Abstract: In order to explore the evolution history of Carboniferous Qiangtang basin, samples were collected from Early Carboniferous Zaduo Group sandstone in the Kemo area, the east of north depression of Qiangtang basin, to carry out the geochemical studies. The results indicate that the sandstones mainly consist of K-feldspar, calcite, magnesium biotite and quartz etc. The chemical indexes of weathering (CIW), alteration (CIA) parameters and the A-CN-K plot of the sandstone suggest that the clastic constituents were moderately weathered in the area, and the clastic constituents underwent K-metasomatism and replacement of feldspar by illite during weathering processes. The chemical composition index (ICV) indicates that some clastics represent the first cycle sediment, which is not affected by sedimentation sorting and recycling. The A-CN-K diagram also shows that the content of plagioclase in sandstone source rocks is higher than that of potash feldspar, and the variation is mainly between granite and granodiorite. The characteristics of major, trace and rare earth elements indicate that the sedimentary tectonic background of sandstone represents active continental margin and continental island arc, which suggests that the ancient Tethys Ocean began to enter the stage of subduction extinction and shrinkage in the Early Carboniferous.

Key words: Carboniferous; sandstone; element geochemistry; tectonic setting; eastern Qiangtang depression

收稿日期:2021-04-26;修订日期:2021-11-02

资助项目:中国地质调查局项目《西南地区自然资源动态监测与风险评估》(编号:DD20211392)

作者简介:冯兴雷(1982-),男,硕士,高级工程师,从事沉积学、石油地质学研究。E-mail: xingleifeng@qq.com

碎屑沉积岩中较好地保存了丰富的源区物质组成和早期地壳生长演化的信息,因此,沉积物的地球化学特征,对沉积盆地的演化具有重要的指示意义,被广泛应用在分析盆地物源、构造背景、沉积环境演化、盆地周边各构造单元之间的相互关系等方面^[1-2]。

位于青藏高原北部的羌塘盆地是中国重要的含油气盆地之一,盆地形成演化受特提斯洋构造带地球动力学背景的控制,是在古特提斯洋和中特提斯洋消亡、板块碰撞的基础上发展起来的叠合盆地^[3-5]。多期次的构造旋回叠加作用,使盆地演化过程较复杂,因此,分析各时期的大地构造特征,成为研究羌塘盆地沉积演化的重要内容之一。本次选取羌塘盆地晚古生代石炭系杂多群砂岩为研究对象,通过主量、微量元素含量、元素比值等地球化学参数的分析,探讨该套地层的岩石学特征、物源特征及其反映的构造背景,为恢复羌塘盆地石炭纪大地构造背景提供依据,对正确认识羌塘古生代盆地中晚期演化特征具有重要的意义。

1 地质背景及样品

羌塘盆地位于青藏高原中北部,东经 $85^{\circ}\sim 95^{\circ}$ 、北纬 $32^{\circ}\sim 35^{\circ}$,南北宽 300 km,东西长 640 km,面积约 $18.5\times 10^4\text{ km}^2$ 。盆地南、北侧分别以班公湖—怒江缝合带和可可西里—金沙江缝合带为界,东、西侧以中生界尖灭线为界。盆地内构造复杂,根据航磁异常和大地电磁(MT)基底测深资料,可将羌塘盆地划分为 3 个次级构造单元,即北羌塘拗陷、中央隆起和南羌塘拗陷(图 1-a)^[6]。盆地内发育古生代—新生代一套完整的沉积地层,本次研究的石炭系杂多群最早由青海省第二区调队(1982)^①创名于杂多县,主要出露在羌塘盆地北羌塘拗陷东部地区的刻莫、杂多和治多地区,由北西至南东呈条带状展布,与区域构造方向基本一致(图 1-b)。根据岩性组合和地层层序特征,可划分为 2 个岩性组,下部为碎屑岩组(C_1s),上部为碳酸盐岩组(C_1t),二者之间为连续沉积。本次选取下部的碎屑岩组作为研究对象。

本次采集样品的地层剖面位于盆地东北部,属于北羌塘拗陷,行政区域属于青海省格尔木市刻莫乡。剖面杂多群碎屑岩组底部出露不全,顶部与始新统沱沱河组为角度不整合接触,控制厚度 325.28

m。剖面底部采集到植物化石 *Archaeocalamites* sp.,该属仅有一个种,为 *A. scobicutatus* (Schloth) Sew(浅沟古芦木)。据此,前期研究者认为该套沉积地层应属于早石炭世早期的岩关阶期^[7]。地层岩石以粗碎屑沉积物为主,发育大量灰白色岩屑砂岩、岩屑石英砂岩、长石石英砂岩和少量石英砂岩,细碎屑沉积物为各类砂岩中夹的粉砂质泥岩和泥页岩(图 2);砂岩单层厚度以中厚层为主,发育平行层理、小型交错层理;泥岩中发育水平层理。砂岩与泥岩呈互层状产出,沉积韵律性好,显示向上变细的退积型基本层序。砂岩中石英含量中等—高,平行层理、交错层理等沉积构造组合发育,整体显示砂质沉积物是在中等能量的条件下形成的;与之相对,泥页岩则是在能量极低的条件下形成的。因此,该套沉积物总体显示为滨海相环境,包括滨岸砂坝和砂坝海湾沉积。

2 样品采集与测试

共采集了 28 件新鲜砂岩样品用于本次研究。样品的后期化学处理与主量、微量元素测试由中国核工业集团北京地质研究院完成。主量元素测试采用硅酸盐岩石化学分析方法(B/T14506.28—2010),通过 PhillipPW2404 X 射线荧光光谱仪分析测试样品的主量元素含量;微量元素测试依据《电感耦合等离子体质谱分析方法通则》(DZ/T0223—2001),运用 HR-ICP-MS 仪器进行测试。样品用玛瑙研钵磨细至 200 目,过尼龙筛;称取 40 mg 样品,加入 0.5 mL 1:1 HNO_3 、0.5 mL HCl 、1 mL HF ,在 150°C 下蒸至近干;再加溶液,升温到 200°C ,保温 5 d,开盖,蒸至近干。加入 0.2 mL 1:1 HNO_3 ,于 150°C 烘箱保温置放 12 h,再次蒸至近干。加 0.2 mL 1:1 HNO_3 ,拧紧罐盖并保温 12 h,冷却后将溶液转移到 50 mL 容量瓶中,加入 1 mL、500 ng/g 的 In 作内标,用 1% HNO_3 稀释至刻度,摇匀后在电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定元素含量(以干重计)。以上元素数据误差小于 5%;重复样分析结果吻合,样品分析具有较高精度。测试结果见表 1。

3 岩石地球化学特征

3.1 杂多群砂岩化学成分特征

化学成分特征能有效地反映砂岩的类型及其矿

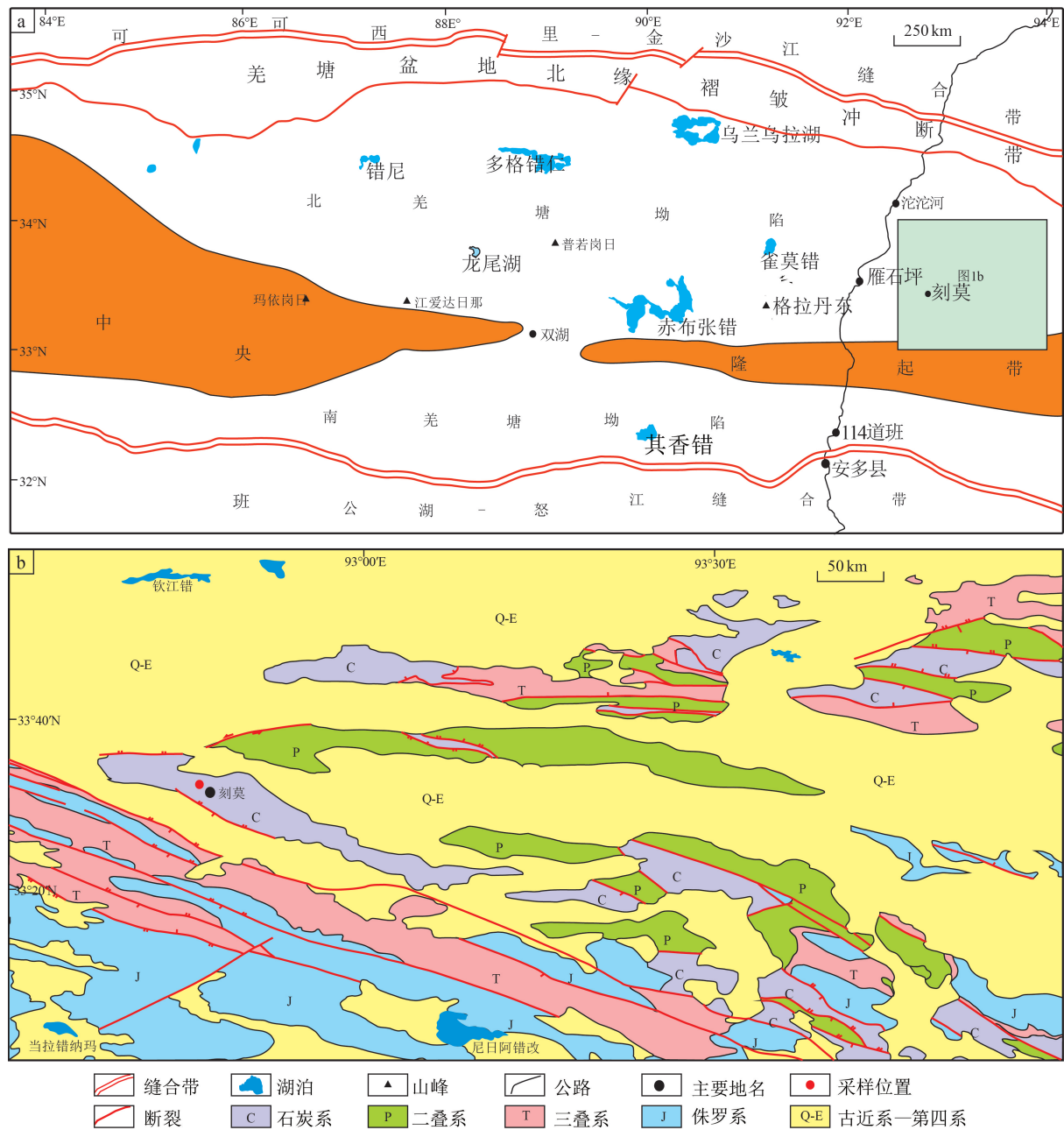


图 1 羌塘盆地构造纲要图(a)和刻莫地区地质图(b)

Fig. 1 Simplified tectonic map of Qiangtang Basin (a) and the geological map of the Kemo area (b)

物组成。杂多群砂岩总体 SiO_2 含量较高, 介于 63.01%~80.6% 之间, 平均值为 76.19%, 说明该套砂岩中石英或富含硅质矿物(如长石等)含量较高, 岩石矿物成熟度中等—较高。 Al_2O_3 含量中等, 为 8.96%~14.47%, 平均值为 9.6%, 说明岩石也富含云母、粘土矿物等富 Al 矿物。 SiO_2 - Al_2O_3 图解^[8] 显示, SiO_2 和 Al_2O_3 之间呈较好的负相关关系, 岩石矿物成分

主要在石英和钾长石、斜长石之间变化(图 3)。而在 Fe_2O_3 - Al_2O_3 图解(图 4)上^[9], 石炭系杂多群砂岩介于方解石-石英和含镁黑云母组分端元之间, 部分样品接近钾长石组分端元, 由石英组分端元逐渐接近含镁黑云母组分端元, 说明砂岩主体石英含量最高, 其次为富铝矿物; 向黑云母和钾长石端元迁移的过程说明, 粘土矿物在砂岩成岩演化中起着重要的作用。

表 1 刻莫地区杂多群砂岩地球化学元素测试结果

Table 1 Geochemical analytical results of the Zaduo Group sandstone in the Kemo area

样品号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	Co	Sc	Zr	Th	La	CIA	CIW	ICV
KM-1	76.46	9.26	0.78	1.94	1.70	1.38	1.38	1.86	0.78	8.44	9.63	350.00	19.40	73.80	65.21	72.23	0.85
KM-2	77.10	9.14	0.81	1.82	1.67	1.28	1.36	1.90	0.69	8.50	6.56	296.00	14.00	51.70	64.96	71.91	0.84
KM-3	74.99	9.79	0.85	1.92	2.18	1.33	1.50	1.88	0.56	8.27	7.33	198.00	12.00	40.70	63.78	70.69	0.85
KM-4	63.01	14.47	2.79	2.57	1.74	2.32	2.81	1.36	0.77	16.70	12.70	179.00	13.30	45.10	71.00	82.36	0.81
KM-5	78.51	8.96	0.76	1.70	1.44	1.11	1.28	1.91	0.60	7.28	6.90	238.00	11.90	43.40	65.93	72.79	0.79
KM-6	75.29	10.22	1.16	1.86	1.50	1.38	1.58	1.89	0.52	8.55	6.95	151.00	9.51	35.30	67.28	75.09	0.79
KM-7	74.56	9.69	1.53	1.57	2.12	1.46	1.47	1.88	0.68	8.32	7.13	284.00	13.40	49.40	63.92	70.78	0.94
KM-8	70.72	10.20	1.96	1.77	3.19	1.64	1.76	1.67	0.55	10.70	7.38	137.00	8.07	28.50	60.64	67.73	1.06
KM-9	73.84	10.58	1.74	1.79	1.58	1.33	2.00	1.63	0.48	11.00	6.85	129.00	8.49	32.00	67.00	76.72	0.83
KM-10	75.28	9.97	1.59	1.75	1.70	1.20	1.73	1.70	0.41	9.34	6.45	104.00	7.40	28.70	66.03	74.57	0.84
KM-11	77.54	9.52	0.94	1.49	1.56	1.02	1.54	1.87	0.47	6.88	5.91	196.00	9.16	32.20	65.70	73.51	0.78
KM-12	77.70	9.77	1.68	1.04	1.01	0.93	1.61	1.89	0.46	8.02	6.10	117.00	10.00	32.90	68.42	77.11	0.78
KM-13	78.74	9.32	1.86	0.80	0.90	0.85	1.50	1.85	0.54	7.90	6.36	189.00	14.10	45.50	68.68	77.22	0.80
KM-14	71.58	11.38	1.89	1.93	1.77	1.60	2.09	1.76	0.53	12.10	7.50	115.00	10.00	33.30	66.94	76.32	0.85
KM-15	78.25	9.12	1.25	1.42	1.35	0.98	1.66	1.77	0.38	7.15	5.75	97.50	8.68	29.50	65.61	74.51	0.81
KM-16	78.30	9.02	1.33	1.19	1.56	0.89	1.60	1.81	0.41	7.67	6.45	113.00	11.60	36.60	64.47	72.80	0.84
KM-17	78.75	8.75	1.55	1.19	1.38	0.88	1.59	1.74	0.48	6.05	5.11	154.00	10.80	36.90	65.01	73.72	0.87
KM-18	78.24	9.20	1.34	1.46	1.08	1.02	1.66	1.71	0.58	6.98	7.02	210.00	14.00	45.60	67.40	76.73	0.80
KM-19	78.05	9.13	1.36	1.42	1.29	0.97	1.67	1.70	0.55	7.11	5.63	179.00	12.30	39.90	66.21	75.33	0.83
KM-20	80.60	7.77	1.12	1.48	1.52	0.70	1.34	1.68	0.42	5.05	6.52	146.00	12.00	40.40	63.12	70.83	0.87
KM-21	75.86	10.38	1.68	1.72	0.98	1.14	1.96	1.69	0.42	9.30	6.38	102.00	8.67	28.60	69.15	79.54	0.76
KM-22	77.45	9.24	1.52	1.31	1.54	0.97	1.69	1.74	0.54	7.19	4.52	189.00	12.50	37.10	65.02	73.80	0.87
KM-23	77.85	8.96	1.41	1.48	1.60	1.02	1.63	1.66	0.41	7.01	5.47	120.00	8.05	29.40	64.69	73.32	0.86
KM-24	75.42	9.67	1.43	1.57	2.10	1.11	1.81	1.69	0.45	8.79	7.72	150.00	11.00	37.00	63.33	71.84	0.89
KM-25	78.04	9.04	1.42	1.50	1.35	1.03	1.64	1.72	0.45	7.25	6.25	136.00	10.50	35.50	65.75	74.65	0.84
KM-26	74.23	9.64	1.49	1.42	2.83	1.15	1.86	1.67	0.38	8.10	6.01	105.00	9.54	30.30	60.25	68.18	0.97
KM-27	78.55	8.87	1.08	1.50	1.56	0.90	1.62	1.74	0.42	7.62	4.70	138.00	8.62	30.20	64.32	72.88	0.83
KM-28	78.48	8.74	1.05	1.50	1.65	0.98	1.60	1.70	0.44	6.90	4.60	147.00	9.77	32.20	63.84	72.29	0.85
平均值	76.19	9.64	1.41	1.58	1.64	1.16	1.68	1.75	0.51	8.36	6.64	166.77	11.03	37.92	65.49	73.91	0.85

注: CIA (蚀变作用指标) = $Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O) \times 100$; CIW (化学风化作用指标) = $Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O) \times 100$; ICV (化学组分指标) = $(Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + TiO_2) / Al_2O_3$; 主量元素含量单位为%, 微量元素含量单位为 10^{-6}

3.2 化学风化作用判别

选取 A-CN-K 判别图、化学蚀变作用指标 (CIA) 和化学风化作用指标 (CIW) 判断杂多群砂岩的源区风化强度。运用 McLennan 给出的方法^[10], 进行 CaO 校正, 最终获得 A-CN-K 判别图解、 CIA 和 CIW 值计算结果。

3.2.1 A-CN-K 判别图解

A-CN-K 图解主要用于判别风化作用、钾交代作用和碎屑组分。按照动淋滤速率推测, 如果没有其他作用影响, 斜长石-钾长石风化形成粘土矿物的过程应该平行图解的 CN 一侧^[11]。例如, 英云闪长岩 (T)、花岗闪长岩 (Gd) 和花岗岩 (G) 在长石连

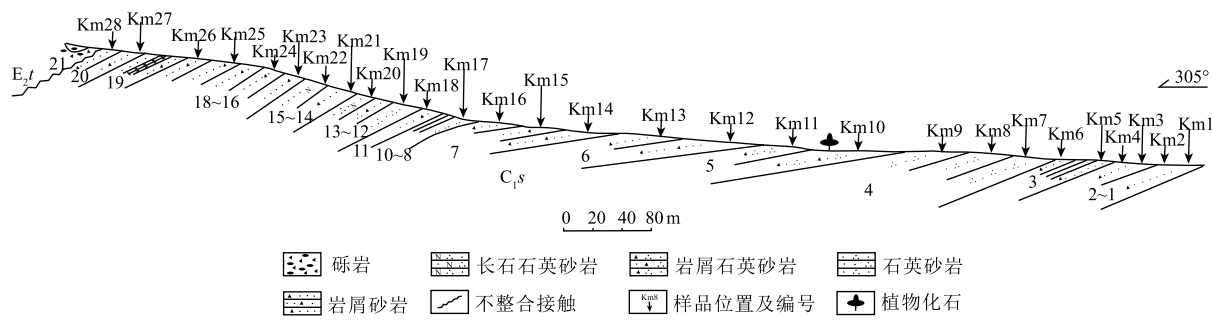


图 2 刻莫地区杂多群地层剖面图

Fig. 2 Geological section of the Zaduo Group in the Kemo area

线上,其理想的风化趋势是沿着平行 CN 虚线的方向(图 5 中虚线①、②和④);但在风化作用过程中,砂岩发生钾交代作用可能有 2 个极端方式:一种方式是富含 A1 的矿物(如高岭石、长石)可能发生伊利石化;另一种方式是斜长石可能变成自生钾长石。因此,砂岩实际风化趋势线相对图中理想线向右倾斜(图 5 中实线③)。但无论经过任何一种钾交代作用,风化趋势线与钾长石和钾长石-斜长石连线的交点仍然能够估计风化作用以前的斜长石与钾长石比率(图 5 中实线左端点)。

图 5 显示,杂多群砂岩发生了微弱钾长石交代

斜长石,主要是由于钾交代作用导致长石发生高岭石化和伊利石化,使风化趋势线向右,与标准风化趋势线之间呈微弱夹角;变化趋势线反向延长与斜长石-钾长石连线的交点,分布在花岗闪长岩和花岗岩端元之间,反映砂岩碎屑源岩中斜长石含量比钾长石高,比率约为 3 : 1。

3.2.2 CIA 和 CIW 指标

CIA 和 CIW 指标都是运用砂岩中的稳定元素氧化物和不稳定元素氧化物之间的比值变化判断风化强度的指标。其计算公式分别为 :CIA(蚀变作用指标) = $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) \times$

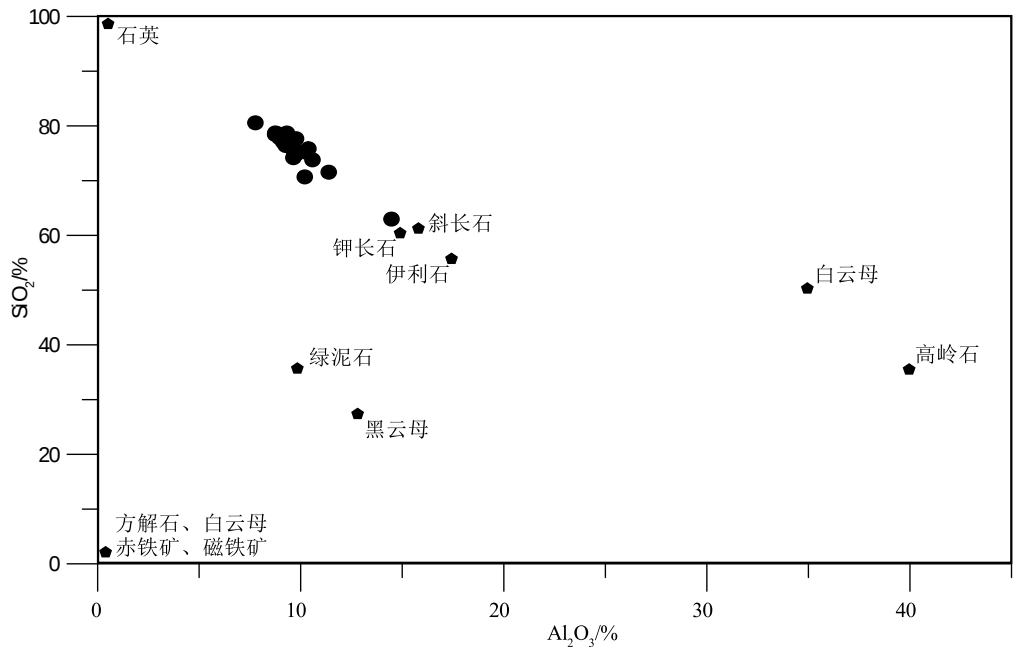
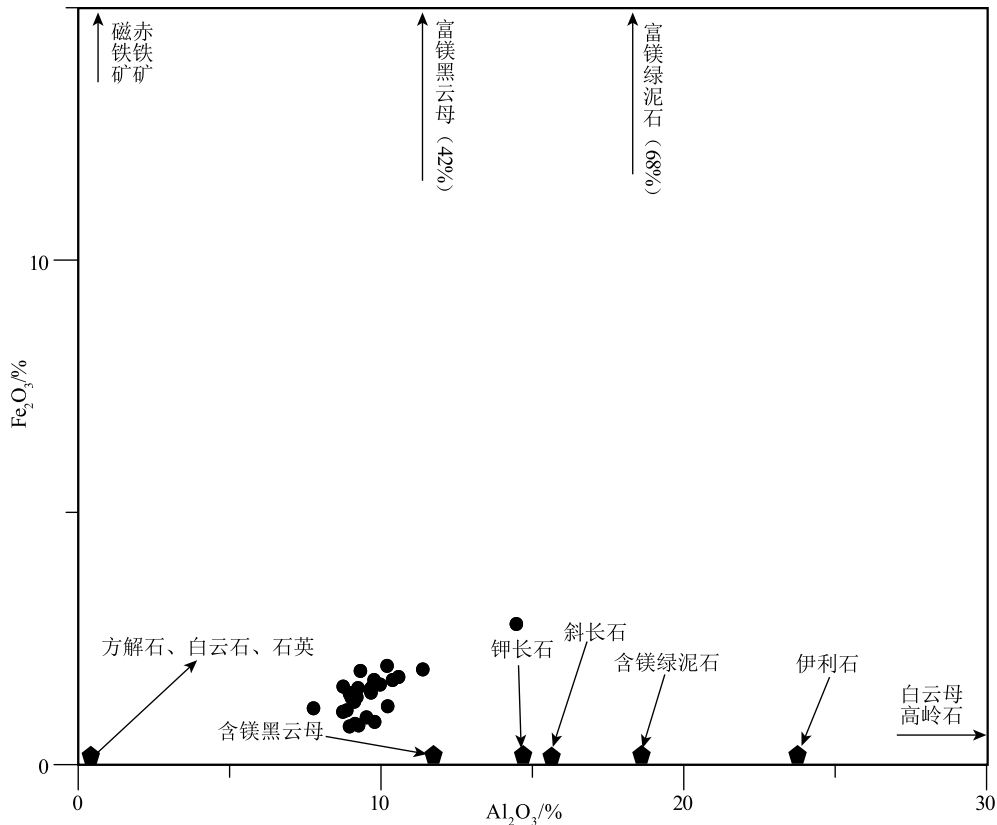


图 3 刻莫地区杂多群砂岩 Al_2O_3 - SiO_2 图解

Fig. 3 Al_2O_3 - SiO_2 diagram of the Zaduo Group sandstone in the Kemo area

图4 刻莫地区杂多群砂岩 Al_2O_3 - Fe_2O_3 图解Fig. 4 Al_2O_3 - Fe_2O_3 diagram of the Zaduo Group sandstone in the Kemo area

100, CIW (化学风化作用指标) = $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}) \times 100$, 高值代表受到的风化作用强烈^[12-13]。刻莫地区杂多群砂岩样品实际计算出的 CIW 值在 60.25~71 之间(表 1), 平均值为 65.49; 但根据 Fedo 给出的 A-CN-K 图解矫正方案^[11], 得到的 CIW 值为 64~76, (图 5 中虚线①交点处的 CIW 值), 但大部分介于 64~70 之间(图 5), 可见研究区砂岩经历了中等的风化作用, 并且由于钾交代作用, CIW 值降低。此外, 经计算 CIW 值为 67.72~82.35 (表 1), 平均值为 73.9, 变化特征与 CIW 值一致, 也反映了较中等的风化环境。

3.3 化学组分变化与再循环

化学组分指标 $ICV = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2) / \text{Al}_2\text{O}_3$, 和一些重矿物元素指标(如 Th、Sc、Zr 等元素)配合, 能够有效地判断沉积岩的碎屑源岩成分。

判断碎屑源岩成分的 ICV 指标中, 非粘土矿物碎屑源岩组分比粘土矿物组分高。其中, 粘土矿物

含量较低的砂岩 ICV 值明显大于 1, 这种砂岩经常作为第一次旋回的沉积物在构造活动的地区沉积^[14]。含有大量粘土矿物的砂岩, 形成于较小的隆起地区, 伴随强—中等的风化作用; 形成的第一次旋回陆源沉积物, 在粘土中滞留较长的时间, 可能进一步被风化, 使 ICV 值趋向小于 1^[15]。因此, ICV 值大于 1 的砂岩很可能为第一次旋回的沉积物, 而 ICV 值小于 1 的砂岩可能被再旋回, 或者为遭受进一步风化的第一次旋回沉积物^[16]。计算结果显示, 刻莫地区杂多群砂岩的 ICV 值大部分小于 1, 在 0.77~1.05 之间, 平均值为 0.84, 因此杂多群砂岩可能为再循环砂岩, 或者为经历风化作用的第一次旋回沉积物。但在重矿物相关的 Th/Sc-Zr/Sc 图解(图 6)中, 样品点均与成分演化线(BFG)接近, 表明样品成分主要受源区岩石成分控制, 沉积分选和再循环作用影响不大, 主要为第一旋回沉积物。由此认为, 杂多群砂岩应该是粘土含量较高, 遭受进一步风化作用后形成的第一次旋回沉积物^[17]。

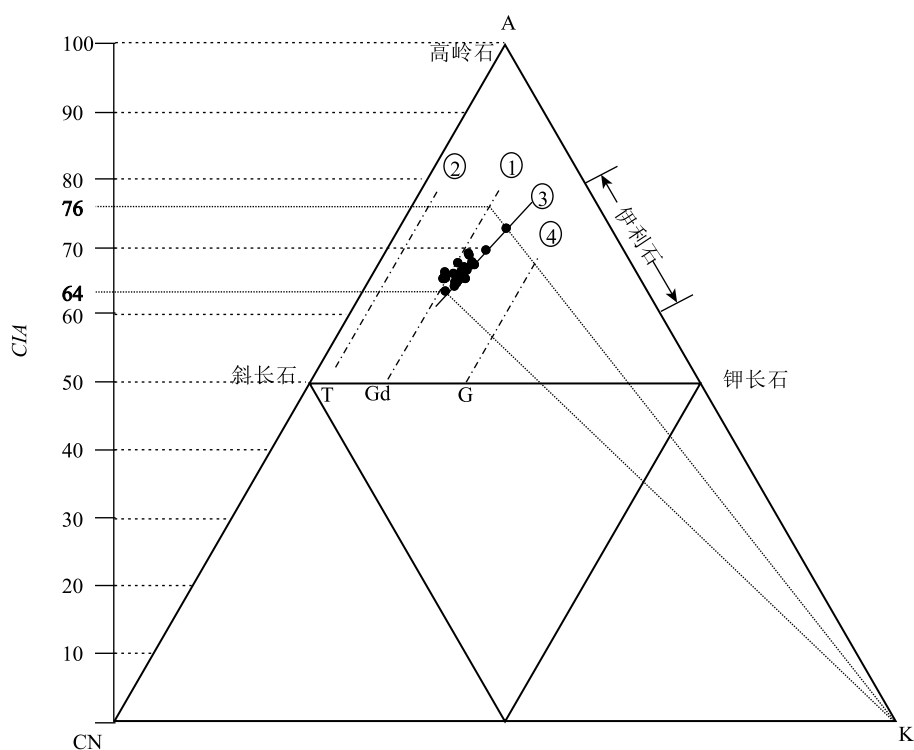


图 5 刻莫地区杂多群砂岩 A-CN-K 判别图解

Fig. 5 A-CN-K triangular diagram of the Zaduo Group sandstone in the Kemo area

T—英云闪长岩; Gd—花岗闪长岩; G—花岗岩; A=Al₂O₃; CN = CaO+Na₂O; K=K₂O

4 构造环境分析

碎屑岩的元素含量变化与沉积物源区构造背景之间有内在的必然联系,碎屑岩元素可以很好地

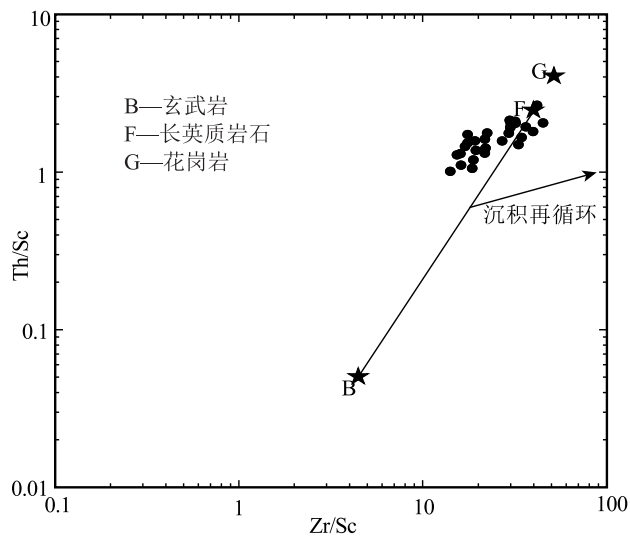


图 6 刻莫地区杂多群砂岩 Zr/Sc-Th/Sc 图解

Fig. 6 Zr/Sc-Th/Sc diagram of the Zaduo Group sandstone in the Kemo area

反映物源区的大地构造背景和构造演化特征。前人已总结出板块构造环境碎屑岩化学组成特征的一系列判别图解和数据,且这些判断数据和图解得到地学界的认可和广泛应用^[2]。笔者运用多种图解进行判断,相互约束得出较准确的构造背景。

4.1 主量元素判别

前人经过研究,得出运用砂岩中的 SiO₂、K₂O、Na₂O、TiO₂、Al₂O₃ 等主量元素的比值及相关性判断沉积盆地构造环境的方法。将盆地构造环境分为大洋岛弧、大陆岛弧、活动大陆边缘和被动大陆边缘 4 种类型^[19]。其中,火山岛弧区贫石英的砂岩系列 SiO₂ 平均值为 58%, K₂O/Na₂O ≤ 1; 活动边缘(安第斯型)的中等含石英的砂岩系列 SiO₂ 为 68%~74%, K₂O/Na₂O > 1; 被动陆缘具有高含量石英的石英砂岩系列 SiO₂ 为 89%, K₂O/Na₂O < 1。随着构造环境从被动大陆边缘到大洋岛弧的变化,砂岩的化学成分也发生变化, TiO₂、Al₂O₃/SiO₂ 增高,而 K₂O/Na₂O、Al₂O₃/(CaO+Na₂O) 值降低^[20]。

对研究区各个样品化学组成的分析结果进行计算,将获取的参数分别投入 TiO₂-(TF₂O₃+MgO)、Al₂O₃/SiO₂-(TF₂O₃+MgO)、Al₂O₃/(CaO+Na₂O)-

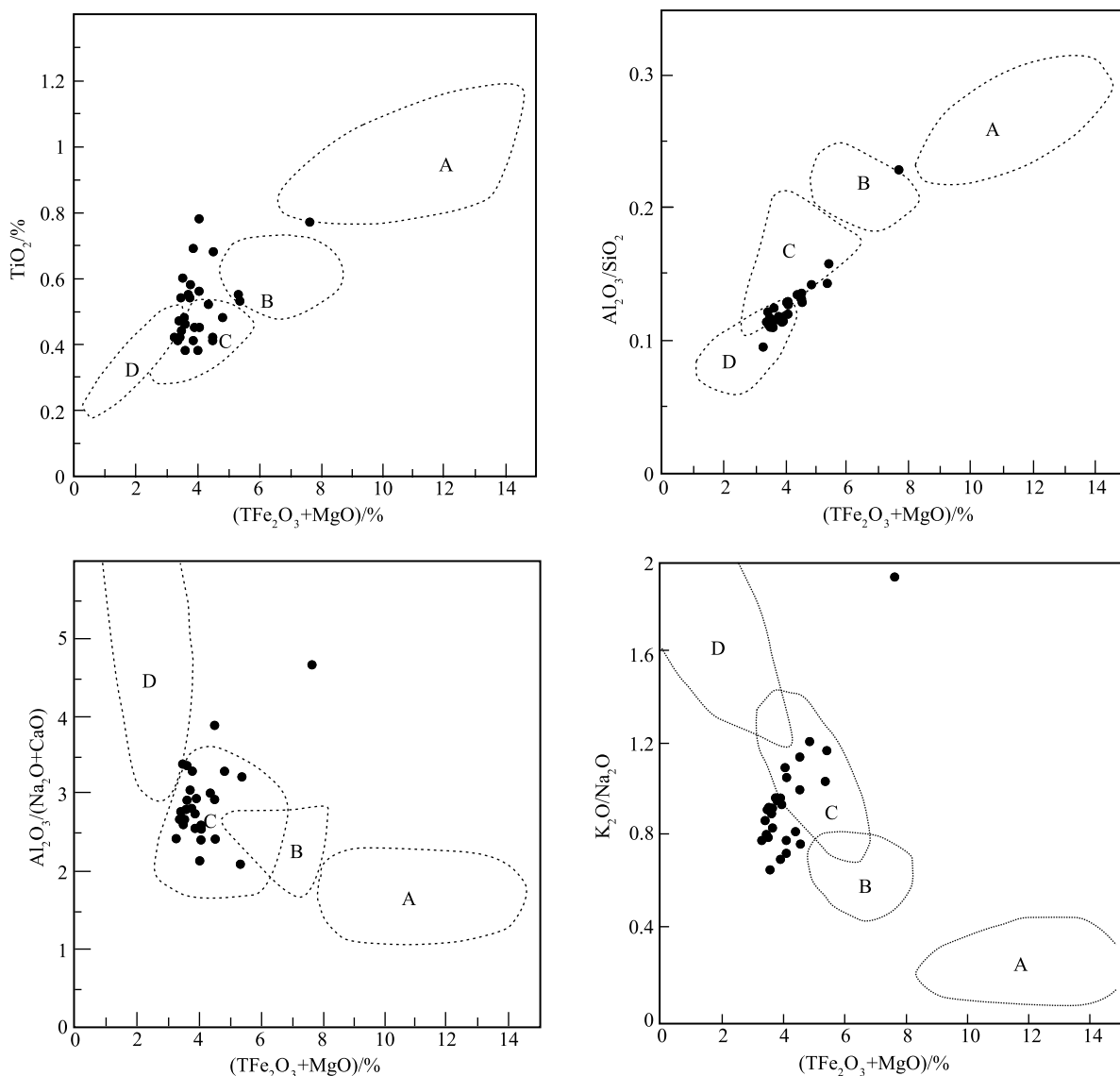


图7 刻莫地区杂多群砂岩主量元素构造背景判别图解

Fig. 7 Major element compositions of the Zaduo Group sandstones in the Kemo area for tectonic setting discrimination

A—大洋岛弧; B—大陆岛弧; C—活动大陆边缘; D—被动大陆边缘

($\text{TFe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$)、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 源区构造环境判别图(图7)中。可见,刻莫地区杂多群砂岩碎屑源区构造背景主要为活动大陆边缘,只有少量落入大陆岛弧区域。

4.2 微量元素判别

微量元素对构造背景的判别,主要是运用沉积岩中 La、Th、Sc、Co、Zr、U、Hf 等元素的比值或相关性进行构造环境判别。因为不同构造位置砂岩的微量元素丰度和比值不同,从大洋岛弧→大陆岛弧→活动大陆边缘→被动大陆边缘, LREE (La、Ce、Nd)、Hf、Ba/Sr、La/Y 和 Ni/Co 值增加,而镁铁质

元素如 Sc、V、Cu、Co、Zn 和 Ba/Rb、K/Th、K/U 值减少,这与源区的变化(从安山岩→英安岩→花岗片麻岩→沉积岩)是同步的^[18]。

根据以上判别方法,对研究区样品进行 La-Th-Sc、Co-Th-Zr/10 和 Sc-Th-Zr/10 投图(图8),结果均落在活动大陆边缘和大陆岛弧构造背景。这与主量元素的分析结果一致,进而验证了判别结果的有效性。

4.3 构造背景

石炭纪是古特提斯洋演化的重要阶段,也是古特提斯大洋从扩张到开始消亡的转换阶段。前人

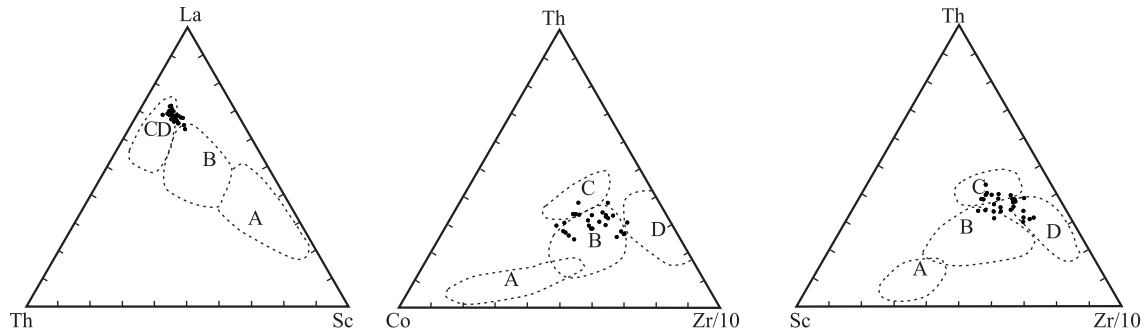


图8 刻莫地区杂多群砂岩 La-Th-Sc、Co-Th-Zr/10 和 Sc-Th-Zr/10 构造背景判别图解

Fig. 8 Tectonic setting discrimination of La-Th-Sc, Co-Th-Zr/10 and Sc-Th-Zr/10

for the Zaduo Group sandstone in the Kemo area

A—大洋岛弧; B—大陆岛弧; C—活动大陆边缘; D—被动大陆边缘

研究认为,自石炭纪开始,冈瓦纳大陆进一步破裂,洋盆扩大了沉积范围,而且出现了真正的深水洋盆及大洋岩石圈,这个洋盆就是通常所指的古特提斯洋。到石炭纪晚期,虽然古特提斯大洋仍在扩张,但大洋边缘海洋岩石圈的倾没、消亡作用已经开始,而且是大体呈对称状向两侧消亡,类似于现今的太平洋^[21-22]。本文对下石炭统岩关阶杂多群砂岩的研究结果显示,该套砂岩是大陆岛弧和活动大陆边缘的构造背景,这与前人得出的在石炭纪晚期进入大洋消亡阶段的结论不同。该结果表明在早石炭世早期的岩关阶,古特提斯洋已经为活动大陆边缘的构造环境,古特提斯洋的消亡应该在早石炭世早期已经开始。

5 结 论

(1) 羌塘盆地刻莫地区早石炭世杂多群砂岩石英含量中等—较高,砂岩成分主要在方解石—石英—含镁黑云母组分端元之间变化,少量样品接近钾长石组分端元;矿物向黑云母和钾长石端元迁移的过程说明,粘土矿物在砂岩成岩演化中起着重要的作用。

(2) 早石炭世杂多群砂岩为第一次旋回沉积物。风化指标参数和 A-CN-K 图解反映,砂岩的碎屑成分受到了中等的风化作用,并在风化过程中发生微弱钾交代,长石发生伊利石化。

(3) 早石炭世杂多群砂岩形成于活动大陆边缘和大陆岛弧的沉积构造背景,说明在早石炭世早期古特提斯大洋已经开始进入消亡和萎缩阶段。

致谢:在从事青藏高原地质调查研究工作中,

潘桂棠先生给予了悉心的指导和热情帮助,谨以此文表达衷心的感谢。

参考文献

- [1] Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. *Journal of Geology*, 1983, 91: 611-627.
- [2] McLennan S M, Taylor S R. Sedimentary rocks and crustal evolution: tectonic setting and secular trends[J]. *Journal of Geology*, 1991, 8: 1-21.
- [3] 王成善, 伊海生, 李勇, 等. 羌塘盆地地质演化与油气远景评价[M]. 北京: 地质出版社, 2001: 184-251.
- [4] 王剑, 丁俊, 王成善, 等. 青藏高原油气资源战略选区调查与评价[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 210-214.
- [5] 黄继钧. 羌塘盆地性质及构造演化[J]. *地质力学学报*, 2000, 6(4): 58-66.
- [6] 赵政璋, 李永铁, 叶和飞, 等. 青藏高原大地构造特征与盆地演化[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 23-25.
- [7] 李勇, 李亚林, 段志明, 等. 中华人民共和国区域地质调查报告——温泉兵站幅(146C003002)[M]. 北京: 地质出版社, 2015: 27-31.
- [8] Cullers R L. The controls on the major and trace element variation of shale, silt stones, and sandstones of Pennsylvanian-Permian age from uplifted continental blocks in Colorado to platform sediment in Kansas, USA[J]. *Geochimica et Cosmochim Acta*, 1994, 58: 4955-4972.
- [9] Pettijohn F J, Potter P E, Siever R. Sand and sandstone[M]. New York: Springer-Verlag, 1972: 1-618.
- [10] McLennan S M. Weathering and global denudation[J]. *The Journal of Geology*, 1993, 101: 295-303.
- [11] Fedo C M, Nesbitt H W, Young G M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for weathering conditions and provenance[J]. *Geology*, 1995, 23: 921-924.
- [12] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 1982, 299: 715-717.

- [13] 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: 181-203.
- [14] Van de Kamp P C, Leake B E. Petrography and geochemistry of feldspathic and mafic sediments of the northeastern Pacific margin[J]. Trans. R. Soc. Edinburgh Earth Sci., 1985, 76: 411-449.
- [15] Cox R, Low D R, Cullers R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1995, 59: 2919-2940.
- [16] Johnsson M J. Tectonic assembly of east central Alaska: Evidence from Cretaceous Tertiary sandstones of the Kandik River terrane[J]. Geol. Soc. Amer. Bull., 2000, 112: 1023-1042.
- [17] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks; influence of provenance and sedimentary processes[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 1989, 21(1): 169-200.
- [18] McLennan S M. A geochemical approach to sedimentary provenance[C]// GSA. GSA Abstracts with Programs. Boulder: GSA, 1991, 23(5): 108.
- [19] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basin[J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 1986, 92: 181-193.
- [20] Roser B, Korsch R. Determination of tectonic setting of sandstone - mudstone suites using content and ratio [J]. Journal of Geology, 1986, 94(5): 635-650.
- [21] Pan Y S. Geological Evolution of the Karakorum and Kunlun Mountains[M]. Beijing: Seismological Press, 1996: 1-288.
- [22] 潘裕生, 方爱民. 中国青藏高原特提斯的形成与演化[J]. 地质科学, 2010, 45(1): 92-101.
- ①青海省第二区调队. 1: 20 万《杂多县幅》区域地质调查报告(地质部分). 1982: 12-31.

《地质通报》第 40 卷第 12 期要目预告

- 川西大渡河泸定段大型古滑坡发育特征与稳定性评价 郭长宝等
- 川西巴塘断裂带黄草坪滑坡形成机制 吴瑞安等
- 四川巴塘扎马古滑坡发育特征与复活趋势 张怡颖等
- 基于 LiDAR 地形与钻探滑面重构的滑坡体积计算方法——以四川省巴塘县德达古滑坡为例 李彩虹等
- 澜沧江卡若—察雅段滑坡发育特征及形成机制 张佳佳等
- 西藏察雅县城地震滑坡群特征及稳定性 田尤等
- 西藏易贡藏布高陡岸坡卸荷带发育特征及其工程意义 杜世回等
- 多源遥感技术在藏东南艰险复杂山区泥石流物源识别中的应用 苗晓岐
- 鲜水河断裂带炉霍—道孚段泥石流分布特征 曾璐等
- 川西藏东地区冰湖主要成因类型与分布规律 杨宗佶等
- 西藏波密丹卡弄巴冰湖发育特征与潜在风险 刘建康等
- 西藏天摩沟泥石流物源特征与动态演变 陈龙等
- 青藏高原中东部水热体系热储温度 Mg^{2+} 校正及其热害机理 利满霖等
- 西藏甲玛矿区三维地质建模与层状矽卡岩靶区预测 王素芬等
- 滇中峨山地区中元古代末期碱闪霓石正长岩体的发现及其对格林威尔造山的约束 刘军平等
- 川西归宁地区西康群物源和构造背景: 来自碎屑岩地球化学约束 刘大明等
- 赣州地区土壤-水稻系统重金属含量特征及健康风险评价 周墨等
- 北京植被时空变化与气候因子相关性 刘泽等
- 澳大利亚高勒克拉通约克半岛 Moonta-Wallaroo 矿集区北部 Hiltaba 岩套锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征 赵宇浩等
- 北秦岭官坡地区稀有金属伟晶岩锡石 U-Pb 年龄 曾威等
- 云中山地区古元古代霞石正长岩的发现与意义 康健丽等
- 大兴安岭北段古生代扎兰屯岛弧增生演化的锆石 U-Pb 年龄证据 汪岩等