

囊谦古近纪盆地砂岩地球化学特征及其对物源和沉积环境的指示作用

杜后发¹, 姜勇彪¹, 侯增谦^{1,2}, 严兆彬³, 郭福生¹, 郭国林³

(1. 东华理工大学 地球科学学院, 江西 抚州 344000; 2. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037;
3. 东华理工大学 核资源与环境教育部重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要: 砂岩地球化学特征对物质来源、古气候和沉积环境具有十分重要的示踪和指示作用。通过分析砂岩的微量元素和稀土元素含量的变化, 研究了囊谦盆地沉积环境、古气候及物源特征。结果表明: 囊谦古近纪盆地的古环境为气候干旱炎热、氧化环境, 微量元素中的深源元素低于地壳粘土岩中的平均值, 说明物源为陆源物质, 而陆源元素则与地壳粘土岩中的平均值相当, 反映沉积速度快; 砂岩的 REE 北美页岩和球粒陨石标准化配分模式表现出轻稀土元素富集、重稀土元素亏损但变化平缓, 反映典型的沉积成因特征; Th/Sc、Th/U、La/Th 元素比值和 La/Sc - Co/Th、Th - Hf - Co、La/Yb - Σ REE 以及砂岩函数判别图解显示囊谦古近纪盆地碎屑岩物源具有多样性, 主要来自于上地壳长英质源区, 源岩可能为沉积岩、酸性火山岩和拉斑玄武岩的混合。

关键词: 囊谦盆地, 微量元素, 稀土元素, 物源, 沉积环境

中图分类号: P588.21⁺2.3; P512.2

文献标识码: A

文章编号: 100-6524(2011)04-0654-11

Geochemical characteristics of Paleogene sandstones in Nangqen basin and their implications for provenance and sedimentary environments

DU Hou-fa¹, JIANG Yong-biao¹, HOU Zeng-qian^{1,2}, YAN Zhao-bin³, GUO Fu-sheng¹ and GUO Guo-lin³

(1. College of Earth Sciences, East China Institute of Technology, Fuzhou 344000, China; 2. Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China; 3. MOE Key Laboratory of Nuclear Resource and Environment, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Geochemical characteristics of detrital sandstones provide an extremely important trace and indication for provenance, paleoclimate, depositional environment and properties of source rock. On the basis of field geological investigation, the authors studied the characteristics of trace and rare elements of the sandstones and probed into the features of depositional environment, paleoclimate and provenance by analyzing the change of the trace and rare element components of the sandstones. Sampling was conducted along the section of well-developed outcrops, and the weathered and altered samples were rejected under a microscope. The trace element content of sandstone samples collected from Gonjo Formation was determined by inductive coupling plasma mass spectrometry (ICP-MS). The sedimentary environment and properties of the source region of the sandstones in the Gonjo Formation were also investigated by means of ratios of Sr/Ba, Ce/Ce*, Th/Sc, Th/U and La/Th as well as graphic interpretation of depositional structure background and cross-analysis of such multiple parameters as La/Sc - Co/Th, Th - Hf - Co, Th/Sc - Sc and La/Yb - Σ REE. The results show that cerium was subjected to deficiency, and that the physicochemical properties of water bodies belonged to the oxide environment, because

收稿日期: 2010-11-30; 修订日期: 2011-04-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U0933605); 中国地质调查局地质调查工作资助项目(1212010818096)

作者简介: 杜后发(1982-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事岩石学教学和研究工作, E-mail: dhf915@126.com

网络优先出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20110517.1516.002.html>

the ratio of Ce/Ce^* is between 0.80 and 0.93, and the index of Ce_{anom} is between -0.34 and -0.5 . The values of deep source elements in trace elements are lower than the average value of earth crust claystone, which indicates that the sources of sediments were mainly derived from terrestrial material. Terrestrial elements and the average of earth crust clayrock are evenly matched, which reflect high deposition rate. The ratios of trace elements show obviously that the sedimentary environments were of fresh water quality, oxidizing environments and arid torrid climate during the period of the deposition of Gonjo Formation in the Paleogene basin, with the further deposition of the sediments consisting of salt, gypsum and marl. The LREE content is obviously enriched in comparison with the HREE content, with negative Eu anomalies shown in the chondrite aerolite standard pattern of sandstone of Gonjo Formation. However, the LREE content is slightly enriched, with indistinct Eu anomalies shown in the North American shale standard pattern of sandstone, which suggests that the depositional environment was an oxidizing environment with typical sedimentary characteristics. Based on an analysis of the ratios of trace elements such as Th/Sc, Th/U and La/Th as well as an analysis of such diagrams as La/Yb- Σ REE, the authors have arrived at the conclusion that the diverse sources mainly came from felsic source region of the upper crust, and that their original rocks were sedimentary rocks, acid volcanic rock and tholeiite.

Key words: Nangqen basin; trace element; rare earth element; provenance; deposition environment

盆地陆源碎屑沉积岩间地球化学特性的差异与源区的岩石成分、沉积环境中的交换反应及成岩作用密切相关(朱如凯等,2002;赵永久等,2007;张文翔等,2009),尽管沉积过程中会有改造作用,碎屑岩的地球化学成分仍然主要受其物源区的控制(Rollinson,1993)。前人对盆地的构造环境、沉积特征、沉积体系(Horton *et al.*, 2000;王世锋等,2001;周江羽等,2002,2003)地层古生物方面(卫民,1985)做了大量研究,但对盆地的充填序列、沉积环境、物源还存在一些分歧。本文在野外调查的基础上,欲通过分析碎屑岩的 REE、Th、Sc、Cr 和 Co 等弱活动或相对不活动元素的比值,有效地指示盆地充填沉积物的物质来源、古气候特征、沉积环境和沉积物的源区性质。

1 区域地质概况

囊谦盆地是在印度与欧亚板块碰撞以及中生代基底经历长期隆升剥蚀的基础上,经早期逆冲-推覆和晚期走滑-拉分作用形成的(孙鸿烈,1998;施雅凤等,1998;潘裕生等,1998;莫宣学等,2003;张克信等,2007;姜勇彪等,2009)。盆地介于班公湖-怒江缝合带与金沙江缝合带之间,大地构造位置属羌塘微板块东部,澜沧江断裂带从区内穿过。盆地边界受北西-南东走向的断裂控制,西侧为侵蚀边界,周围是已复杂变形的古生界石炭系-二叠系海相碳酸盐岩建造、中生界三叠系-侏罗系的海陆交互相

碳酸盐岩和紫红色碎屑岩建造,是盆地沉积物的物源区,它们之间均为平行或角度不整合接触关系(图1)。盆地接受沉积较晚,地层时代为晚始新世-早渐新世(卫民,1985;王世锋等,2001;周江羽等,2002),发育较为齐全,沉积连续且出露完整,地层广泛褶皱,为一套巨厚层状的紫红色、红色陆相碎屑岩建造,含蒸发岩,并伴有大规模的高钾岩石(包括火山岩和次火山岩)(邓万明等,1999;朱丽等,2006),与红层大都呈侵入接触关系,少数为顺层产出。早期以火山碎屑岩类为主,具有爆发特点,分布在盆地东侧,晚期呈溢流状,以浅成侵入的钾长斑岩、安山岩、粗面岩等为主(程锦等,2008)。

囊谦盆地贡觉组的沉积地层序列自下而上为 $Eg^1 \sim Eg^5$ 。 Eg^1 为湖相粉砂岩、粉砂质泥岩与灰岩互层以及紫红色泥岩夹粉砂质泥岩; Eg^2 为冲积扇-河流相砾岩、砂砾岩及少量的粉砂岩和泥岩; Eg^3 为湖泊相紫红色粉砂质泥岩、蒸发岩、灰岩; Eg^4 下部为以河流相为主的紫红色、红色砂岩、粉砂质泥岩和泥岩,上部为以冲积扇为主的砾岩、砂砾岩; Eg^5 为一套以冲积扇-河流-三角洲相为主的红色巨厚层砾岩、砂砾岩,垂向上见薄层状砾岩与砂岩互层(杜后发等,2011)。

2 样品采集与测试

在对囊谦盆地野外露头观测的基础上,针对出露较好的剖面共采集了细碎屑岩样品15件,取样位

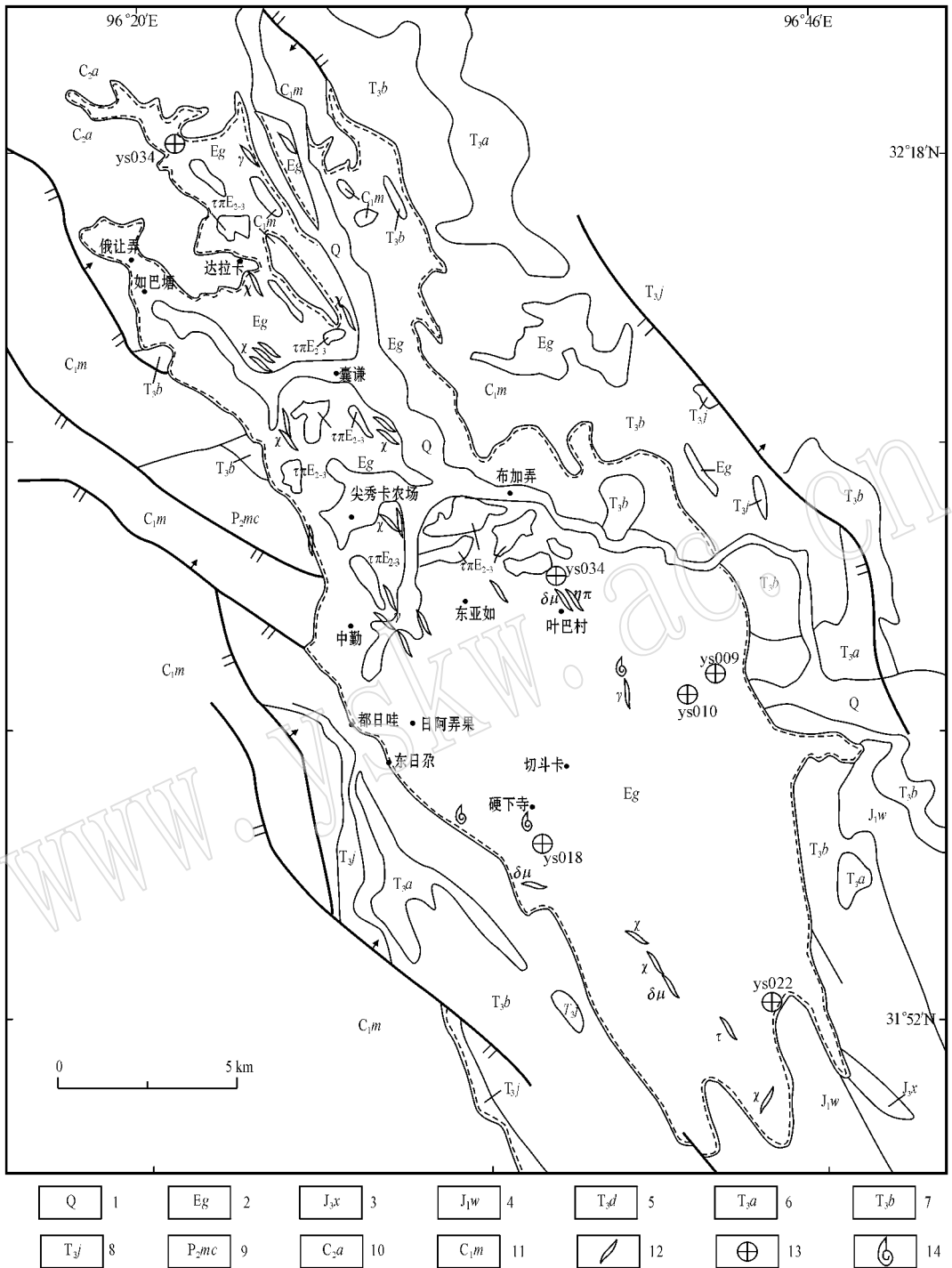


图 1 囊谦盆地地质略图

Fig. 1 Geological sketch map of Nangqen basin

1—第四系；2—贡觉组；3—小索卡组；4—汪布组；5—夺盖拉组；6—阿堵拉组；7—波里拉组；8—甲丕拉组；9—莽错组；10—鹭曲组；
11—马查拉组；12—岩体；13—采样位置；14—动物化石采集点

1—Quaternary；2—Gonjo Formation；3—Xiaosuoka Formation；4—Wangbu Formation；5—Duogaila Formation；6—Adula Formation；7—Bolila
Formation；8—Jiapila Formation；9—Mangcuo Formation；10—Aoqu Formation；11—Machala Formation；12—rock body；

13—sampling location；14—zoolith point

置见图1。经偏光显微镜下观察,剔除风化、蚀变样品,从中选出6件样品进行微量和稀土元素分析,样品由核工业北京地质研究院分析测试研究中心采用高分辨电感耦合等离子质谱 ICP-MS DZ/T0223-2001 测定完成。

2.1 实验工作条件

实验仪器为德国 Finnigan-MAT 公司生产的 ELEMENT 2 高分辨电感耦合等离子体质谱仪,质量范围(5~254) amu,分辨率300,灵敏度(^{115}In)大于 1×10^8 cps/($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$),固定工作频率45.88 MHz,分析功率连续可调,可在大气压下连续工作,分析速度快,避免了火花质谱法高真空和不连续操作的困难;ICP条件:等离子载气流量0.99 L/min,冷却气流量13.00 L/min,射频功率1350 W,辅助气流量0.85 L/min,玻璃同心雾化器,带水冷的玻璃雾化室,带膜去溶进样装置;Ms条件:镍锥,孔径0.8 mm,双聚焦磁质谱系统,分辨率300~10000。

2.2 样品处理方法

(1) 样品处理

称取 0.1000 ± 0.0001 g 试样于聚四氟乙烯密闭坩埚中,加1 mL 硝酸、3 mL 氢氟酸混均后加盖密闭,于微波炉上1000 W 预热1.0 min,冷却后转移到自动控温电热板上160℃消解48 h。待消解完全后,冷却至室温,开启密闭盖,蒸至近干,加1 mL 高氯酸蒸至白烟冒尽。冷却后,加2 mL 硝酸于自动控温电热板上加热使盐类溶解,蒸至近干,加1.5 mL 硝酸后加盖旋紧密闭,于自动控温电热板上160℃加热溶解12 h后,冷却至室温,开启密闭盖,加盖摇匀,于自动控温电热板上80℃保温10 h。

(2) 提取样品

冷却后,开启封闭盖,将溶液转移至50 mL 容量瓶,用硝酸溶液清洗坩埚,清洗液合并到该容量瓶中,再用硝酸溶液稀释至刻度,摇匀得到试样溶液 A_i ,上机测定。必要时,可分取一定体积试样溶液 A_i 进行稀释。稀释倍数(χ)视样品中被测元素的含量而定。稀释后,被测试样溶液 A_{χ} 中的被测元素含量应落在工作曲线内。

3 测试结果分析与讨论

3.1 稀土元素地球化学特征

3.1.1 碎屑岩的 REE 配分模式

囊谦古近纪盆地贡觉组砂岩样品的稀土元素分

析结果见表1。 $\sum \text{REE}$ 范围为 $76.79 \times 10^{-6} \sim 119.06 \times 10^{-6}$,不同层位差别较大(Eg^4 为 $81.3 \times 10^{-6} \sim 76.8 \times 10^{-6}$, Eg^3 为 $105.1 \times 10^{-6} \sim 106.3 \times 10^{-6}$, Eg^2 为 119.06×10^{-6})的原因可能与岩石中的矿物成分有关,表明砂岩中的 REE 含量在沉积后有微弱的变化。陈德潜等(1990)的研究表明,成岩期间 pH 值降低会引起 REE 活化,使之易于淋滤。因此,在成岩作用期间 HREE 易迁移, $\sum \text{HREE}$ 在 $7.86 \times 10^{-6} \sim 13.44 \times 10^{-6}$ 之间,而 LREE 难迁移, $\sum \text{LREE}$ 在 $68.93 \times 10^{-6} \sim 105.62 \times 10^{-6}$ 之间。 $\sum \text{LREE} / \sum \text{HREE}$ 比值范围为 7.86~9.24, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 比值范围为 8.23~10.28,显示轻重稀土元素分馏明显、轻稀土元素富集而重稀土元素相对较低等特征。 Eu 负异常明显,范围为 0.64~0.69; Ce 呈弱负异常($\delta \text{Ce} = 0.80 \sim 0.93$)表明在成岩作用期间 Eh 的变化引起了 Eu 、 Ce 价态改变,出现异常。从北美页岩标准化后的 REE 配分模式(图2)也可知 $(\text{La}/\text{Yb})_A$ 比值范围为 1.18~1.55,存在 δCe (0.92~0.98) 的弱负异常,没有明显的 Eu 负异常,总体上显示出相互平行的特点,轻稀土元素略为富集,则表明稀土元素含量大致同步变化,砂岩沉积环境为氧化环境;从球粒陨石标准化后的 REE 配分模式(图2)可知,图解中分布曲线的斜率大于1,曲线为右倾斜,La~Eu 段曲线略陡,显示轻稀土元素富集,Gd~Lu 段曲线变化较为平缓,但重稀土元素还是显示亏损,且具有明显的 Eu 负异常,具有典型砂岩的 REE 配分特点。

3.1.2 稀土元素全球平均大陆上地壳成分(UCC)标准化图解

由各组砂岩的稀土元素全球平均大陆上地壳成分(UCC)标准化图解可知,囊谦盆地各层段砂岩的稀土元素大陆上地壳标准化值变化较小(图2c),其中 Eg^4 上段砂岩总体呈轻稀土元素亏损、重稀土元素相对富集的左倾模式 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{UCC}} < 1$, 范围为 0.96~0.97, Eu 略显正异常; Eg^4 下段、 Eg^3 和 Eg^2 砂岩总体呈轻稀土元素相对富集的右倾模式, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{UCC}} > 1$, 范围为 1.01~1.17, 平均值为 1.07, Eg^2 砂岩样品 Eu 略显负异常, Eg^4 下段和 Eg^3 砂岩样品 Eu 显正异常。

3.1.3 Ce 异常及 Ce_{anom} 指数与古水介质条件

目前, Ce 异常与 Ce_{anom} 指数常被用来作为判断古水介质氧化还原条件的标志(王中刚等,1989; Murry, 1990; 赵振华, 1997)。 Ce 异常的计算或图解

表 1 囊谦古近纪盆地砂岩稀土元素地球化学分析数据和参数

 $w_B/\%$

Table 1 REE data and parameters of sandstone samples from Nangqen Paleogene basin

样号	ys009	ys010	ys018	ys022	ys034	ys043	均值	球粒陨石	北美页岩
层位	Eg ⁴ 上	Eg ⁴	Eg ⁴ 下	Eg ³	Eg ³	Eg ²		(Boynton ,	(Haskin ,
岩性	长石砂岩	岩屑长石砂岩		长石岩屑砂岩		长石石英砂岩		1984)	1968)
La	17.7	17.3	19.4	23.3	23.1	25.2	21.00	0.31	32
Ce	32.4	32.2	29.6	43.8	42.7	47.4	38.02	0.81	73
Pr	3.93	3.81	3.41	4.76	5.12	5.59	4.44	0.12	7.9
Nd	15.1	15.5	13.4	18.8	20.1	22.1	17.50	0.6	33
Sm	2.93	3.03	2.59	3.47	3.67	4.45	3.36	0.2	5.7
Eu	0.6	0.67	0.53	0.72	0.76	0.88	0.69	0.07	1.24
Gd	2.47	2.81	2.04	3.05	3.29	3.78	2.91	0.26	5.2
Tb	0.42	0.46	0.36	0.47	0.55	0.66	0.49	0.05	0.85
Dy	2.34	2.27	2.06	2.85	2.83	3.57	2.65	0.32	5.8
Ho	0.4	0.42	0.39	0.49	0.49	0.67	0.48	0.07	1.04
Er	1.22	1.31	1.22	1.5	1.62	2.06	1.49	0.21	3.4
Tm	0.2	0.19	0.19	0.22	0.24	0.32	0.23	0.03	0.5
Yb	1.34	1.32	1.4	1.46	1.6	2.07	1.53	0.21	3.1
Lu	0.2	0.21	0.21	0.23	0.23	0.31	0.23	0.03	0.48
Y	12.7	13.5	11.0	14.4	15.2	19.8	14.43		
ΣREE	81.25	81.5	76.79	105.12	106.3	119.06	95.00		
ΣLREE	72.66	72.51	68.93	94.85	95.45	105.62	85.00		
ΣHREE	8.60	9.00	7.86	10.26	10.85	13.44	10.00		
ΣLREE/ΣHREE	8.45	8.06	8.76	9.24	8.80	7.86	8.53		
(La/Yb) _A	1.28	1.27	1.34	1.55	1.40	1.18	1.34		
(La/Yb) _N	8.93	8.86	9.36	10.78	9.76	8.23	9.32		
δEu	0.66	0.69	0.68	0.67	0.66	0.64	0.67		
δCe	0.88	0.90	0.80	0.93	0.89	0.90	0.88		
Ce/Ce [#]	0.92	0.94	0.85	0.98	0.93	0.95	0.93		
Ce _{anom}	-0.37	-0.36	-0.53	-0.34	-0.37	-0.35	-0.39		
(La/Yb) _{UCC}	0.97	0.96	1.02	1.17	1.06	0.89	1.01		

$Eu/Eu^* = Eu_N / (Sm_N \times Gd_N)^{1/2}$, $Ce/Ce^* = Ce_N / (La_N \times Pr_N)^{1/2}$, $Ce/Ce^{\#} = Ce_A / (La_A \times Pr_A)^{1/2}$, $Ce_{anom} = \ln[3 Ce_N / (2 La_N + Nd_N)]$, 下标 N 表示元素相对于球粒陨石标准化, 下标 A 表示元素相对于北美页岩组合样标准化, 下标 UCC 表示元素相对于上陆壳标准化。

方法原理类似于 Eu, 本文采用 $\delta Ce = Ce_N / (La_N + Pr_N)^{1/2}$ 计算, 式中 Ce_N 、 La_N 、 Pr_N 分别为该元素实测值的球粒陨石标准化值; Ce/Ce^* 比值能灵敏地反映沉积环境的氧化还原条件, $Ce/Ce^* > 1.05$ 属正异常, $Ce/Ce^* < 0.95$ 属负异常(王中刚等, 1989)。本区砂岩样品的 Ce/Ce^* 比值介于 0.80~0.93 均值为 0.88(表 1), Ce 为负异常, 则表明岩石风化过程中, 弱酸性条件下, Ce^{4+} 极易水解而在原地停留下来, 使淋出的溶液中贫 Ce, 沉积环境为氧化环境。

Elderfield 和 Greaves(1982) 提出 Ce_{anom} 指数的定义, 当以北美页岩为标准时, $Ce_{anom} < -0.10$, 则表示 Ce 亏损, 为氧化条件; $Ce_{anom} > -0.10$, 则表示 Ce 富集, 为缺氧条件, 其计算公式为 $Ce_{anom} = \ln[3 Ce_N / (2 La_N + Nd_N)]$ 。本区砂岩的 Ce_{anom} 指数介于 -0.34~

-0.5 之间, 均小于 -0.1, 表明 Ce 亏损, 反映古水介质为氧化环境。

3.2 微量元素地球化学特征

研究区砂岩的微量元素分析结果及部分微量元素参数见表 2。与 Taylor & McLennan(1985) 提出的大陆地壳微量元素比较, 本区砂岩微量元素中黑色金属除 W 的丰度大于上地壳丰度外, 其余如 V、Co、Ni 等与上地壳丰度接近; 放射性元素 Th、U 值高于下地壳丰度; 稀有元素 Nb、Ta 丰度与下地壳丰度相近。从表中可见, Sc、V、Cr、Co、Ni、Cu、Rb、Sr、Ba 等绝大部分微量元素含量明显低于地壳粘土中微量元素的平均值, 具有陆源性质的元素 Zr、Hf 与粘土岩中的平均含量相当。

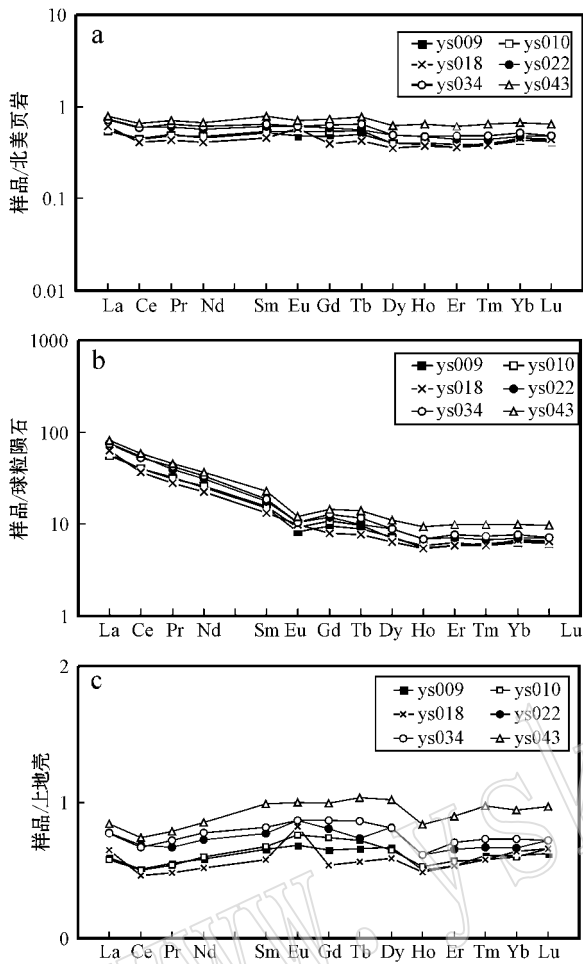


图 2 砂岩 REE 北美页岩标准化 (a)、球粒陨石标准化 (b) 和上地壳标准化 (c) 配分模式

Fig. 2 North American shale normalized (a), chondrite-normalized (b) and upper crust normalized (c) REE patterns of the sandstones

3.2.1 Sr/Ba 比值分析

一般情况下,淡水相沉积物的 Sr/Ba 小于 1,海相沉积物的则大于 1, Sr 比 Ba 迁移能力强,淡水与海水混合时, Ba 易成 BaSO₄ 沉淀(赵振华, 1997)。研究区北、西南地区 Eg⁴ 下段、Eg³ 和 Eg² 砂岩样品的 Sr/Ba 比值小于 1(表 2),为淡水介质,表明沉积期为淡水相沉积环境,属于大陆沉积环境;在无海水入侵的沉积岩中,盆中东部 Eg⁴ 上段、Eg³ 砂岩样品 Sr/Ba 比值大于 1,是由于伴有一定的膏岩、泥灰岩沉积,标志着当时沉积期阶段气候干旱-炎热,其比值越高,反映古气候干旱程度越大,水体盐度增高,造成 Sr 含量的局部增高。Sr/Ba 值能定性地反映介质古盐度,随着盐度提高其比值有明显增大的

趋势,基本上反映了沉积水体性质的变化。

3.2.2 Fe/Mn 比值分析

Fe 和 Mn 都是变价元素,由于其地球化学性质的差异,在搬运过程中二者要发生分异(冯增昭, 1993; 邵晓岩等, 2008)。Fe 和 Mn 对氧化还原环境的变化反映特别敏感,在盆地碎屑岩的两类氧化物 Fe₂O₃/FeO 比值介于 5.37~17.27,均值为 11.17(表 3),又由于 Mn 与 O 的亲合力明显低于 Fe 与 O 的亲合力,在沉积过程中 Fe、Mn 分离, Fe 先沉淀,导致 Fe/Mn 比值偏低,且小于 1,表明当时气候干旱炎热,氧化性很强,处于浅水环境。

4 沉积物源区分析

4.1 微量元素特征与沉积物源区分析

Bhatia & Taylor(1981), Bhatia & Crook(1986)通过对东澳大利亚 5 个已知构造背景的杂砂岩微量元素和稀土元素地球化学特征的研究,提出了一系列可反演物源区性质及构造属性的经典图解,表明砂泥岩中的一些不活泼微量元素(如 La、Th、Sc、Y、Zr、Ti、Co、Ni)及其比值(如 Th/Sc、Zr/Hf、Eu/Eu*、Ta/Nb、La/Sc、Th/U、Co/Th 等)在沉积过程中不发生明显改变,对确定砂岩源区类型和判别构造环境上效果显著。

在 Co/Th-La/Sc 关系图解(图 3)中, Co/Th 值变化相对较大(0.73~2.49,平均值为 1.36),而 La/Sc 值变化较小(3.87~5.49,平均值为 4.64),样品投点基本靠近长英质火山岩,少数靠近安山岩,表明囊谦群碎屑岩源岩以长英质火山岩占优势;在 Th-Hf-Co 图解上投点(图 4),样品靠近平均上陆壳(UC)而远离平均总陆壳(TC)和平均洋壳(OC),表明了囊谦群贡觉组母岩碎屑主要来自上陆壳。在 Roser 和 Korsch(1986)提出的物源区判别图解(图 5)中,囊谦盆地各有 2 个样品分别落入酸性火成岩物源区、成熟大陆石英岩沉积物源区和长英质火成岩物源区,反映碎屑岩物源具多样性。

Th/Sc 元素比值可较好地反映源区成分特征,是最适合于判别物源区性质的指标之一(Taylor and McLennan, 1985)。由表 2 可知, Th/Sc 元素比值(0.98~1.53)均高于上地壳(UCC)特征值 0.97,远远高于下地壳(LUU)特征值 0.03;在 Th/Sc-Sc 关系图解上投点(图 6),显示大部分样品的 Th/Sc 比值大于 1, Sc 含量主要集中在 4.7×10⁻⁶ 左右。因此,

表 2 囊谦古近纪盆地砂岩样品微量元素分析结果

 $\omega_B/\%$

Table 2 Trace element data of sandstone samples from Nangqen Paleogene basin

样号	ys009	ys010	ys018	ys022	ys034	ys043	均值	UCC	LCC	CC	OC	粘土岩
层位	E _g ⁴	E _g ⁴	E _g ⁴ 下	E _g ³	E _g ³	E _g ²						
岩性	长石 砂岩	岩屑长 石砂岩		长石岩 屑砂岩		长石石 英砂岩						
Sc	4.57	4.32	3.73	4.7	4.21	5.8	4.56	11	36	30	38	10
V	58.2	51.6	55	49.5	59.5	67.8	56.93	60	285	230	250	130
Cr	23	24.1	21.8	36.3	30.6	36.8	28.77	35	235	185	270	100
Co	4.01	6.63	5.87	9.52	16.1	6.53	8.11	10	35	29	47	20
Ni	9.56	11.9	13.1	16.6	21.3	14	14.41	20	135	105	135	68
Cu	16.3	31.5	19.6	60.3	19.6	12.6	26.65	25	90	75	86	57
Rb	43.1	28.2	62.1	40.4	41.4	59.3	45.75	112	5.3	32	2.2	200
Sr	198	134	110	141	226	201	168	350	230	260	130	450
Nb	6.82	4.97	6.5	7.86	8.89	9.92	7.49	25	6	11	2.2	20
Ba	152	103	355	525	194	504	305.5	550	150	250	25	800
Ta	0.598	0.51	0.64	0.813	0.911	0.901	0.73	-	-	-	-	3.5
W	3.54	18.7	15.3	43.9	50.2	8.36	23.33	-	-	-	-	8.8
Th	5.46	4.24	4.81	6.75	6.46	8.67	6.07	10.7	1.06	3.5	0.22	11
U	2.2	1.59	1.78	1.66	1.86	2.01	1.85	2.8	0.28	0.91	0.1	3.2
Zr	160	136	184	200	308	249	206.	190	110	100	80	200
Hf	4.16	3.74	4.4	4.88	7.24	6.65	5.18	-	-	-	-	6
B	35	25.4	28.2	41.3	67.3	64.5	43.62	1.5	8.3	10	4	6.2
Th/U	2.48	2.67	2.70	4.07	3.47	4.31	3.28	3.82	3.79	3.85	2.20	3.44
Th/Sc	1.19	0.98	1.29	1.44	1.53	1.49	1.33	0.97	0.03	0.12	0.006	1.10
La/Sc	4.00	3.87	5.20	4.96	5.49	4.34	4.64	2.73	0.31	0.53	0.09	-
La/Th	4.08	3.24	4.03	3.45	3.58	2.91	3.55	2.80	10.38	4.57	16.82	-
Sc/Th	0.84	1.02	0.78	0.70	0.65	0.67	0.78	1.03	34	8.57	172.7	0.91
Sr/Ba	1.30	1.30	0.31	0.27	1.16	0.40	0.79	0.63	1.53	1.04	5.2	0.56
Nb/Ta	11.40	9.75	10.16	9.67	9.76	11.01	10.26	-	-	-	-	5.71
Rb/Sr	0.22	0.21	0.56	0.29	0.18	0.30	0.27	0.32	0.02	0.12	0.02	0.44
Co/Th	0.73	1.56	1.22	1.41	2.49	0.75	1.34	0.93	33	8.29	213.6	1.82
Sc/Cr	0.20	0.18	0.17	0.13	0.14	0.16	0.16	0.31	0.15	0.16	0.14	0.10
Fe ₂ O ₃ / FeO	17.27	6.37	10.00	5.37	13.30	14.73	11.17					
Fe/Mn	0.99	0.45	0.53	0.54	0.32	0.59	0.57					

粘土岩资料据文献(中国科学院贵阳地球化学研究所,1977);UCC—大陆上地壳;LCC—大陆下地壳;OC—洋壳(数据引自 Taylor and McLennan,1985)。

沉积物源区物质以长英质为主,可能有幔源物质加入,原因是强烈的岩浆活动所致。

Th/U 和 La/Th 元素比值等也是确定物源类型的标志(Bhatia & Taylor,1981)。当 Th/U 值约为 2.5~3 时,其源岩主要为岛弧火山岩;Th/U 值约为 4.5 时,其物源主要以沉积岩为主,可能有岛弧火山岩碎屑岩的混入;当 Th/U 值约为 6 时,可以肯定其物源主要是再旋回沉积岩,且源岩可能存在 Th 的矿化(钍石、独居石)(姚纪明等,2009)。由(表 2)可知,钍铀(Th/U)元素比值范围为 2.48~4.31,推断源岩主要为岛弧火山岩和沉积岩。

4.2 稀土元素特征与沉积物源区分析

稀土元素特征常被用来判断现代和古沉积物的构造环境和源区性质(侯伟等,2010)。Murry (1990)对加利福尼亚海岸圣弗兰西斯科湾的燧石和页岩的研究表明,Ce 异常与沉积盆地的构造背景有关,大洋盆地为中等 Ce 异常,Ce/Ce[#] 元素比值为 0.55;大陆边缘区的 Ce 负异常消失或为正异常,Ce/Ce[#] 元素比值为 0.90~1.30。囊谦盆地砂岩以北美页岩作为标准化数值,对 Ce 进行标准化,Ce 显示负异常,Ce/Ce[#] 元素比值介于 0.80~0.93(表 2),属大陆边缘环境。

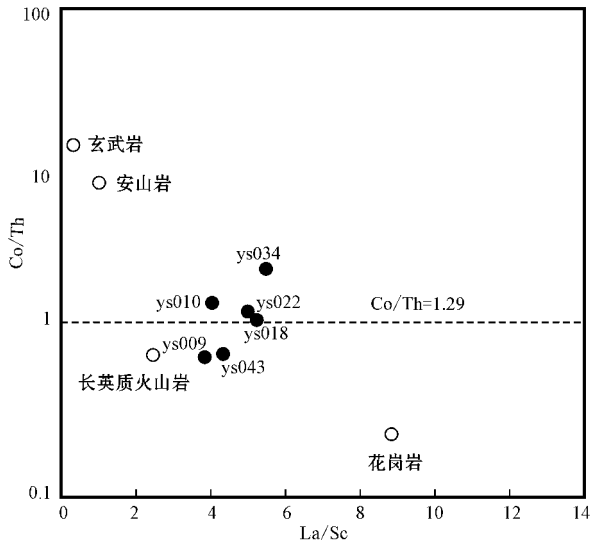


图 3 砂岩 Co/Th - La/Sc 图解

Fig. 3 Co/Th - La/Sc diagram of the sandstones

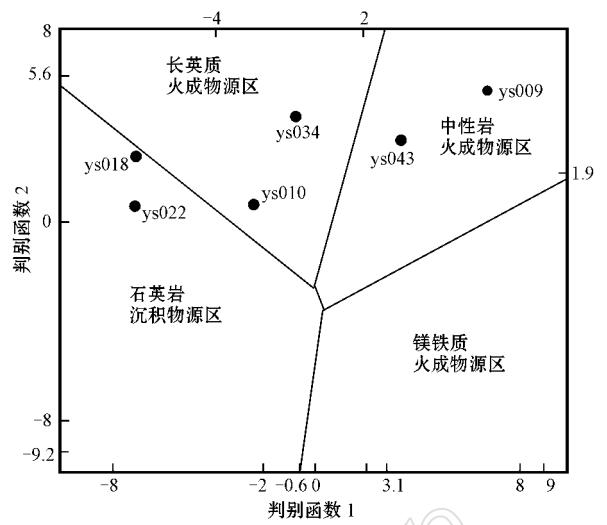


图 5 砂岩的主要元素判别函数图解

Fig. 5 Discrimination function diagram of main elements in sandstones

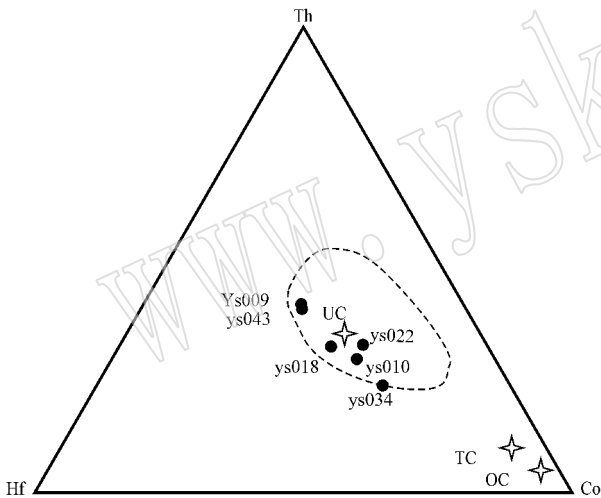


图 4 砂岩 Th - Hf - Co 图解

Fig. 4 Th - Hf - Co triangular diagram of sandstones

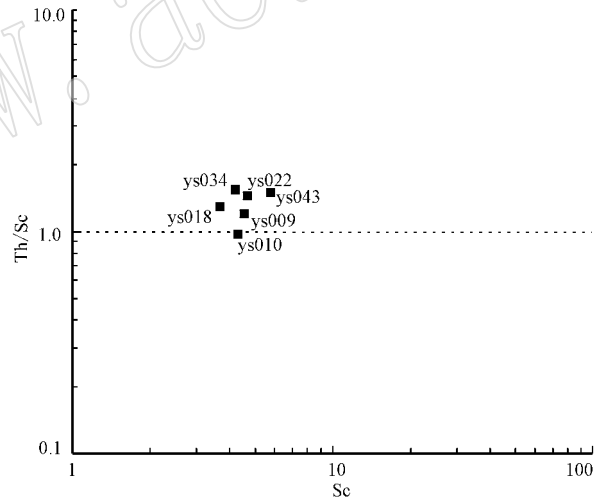


图 6 砂岩的 Th/Sc - Sc 关系图解

Fig. 6 Th/Sc - Sc diagram of sandstones

本区砂岩的稀土元素分布曲线较相似,说明沉积物具有同源性。依据砂岩轻重稀土元素比值与稀土元素总量 $La/Yb - \sum REE$ 图解 (Allegre, 1978), 样品投点主要落在沉积岩与大陆拉斑玄武岩交汇区 (图 7), 说明其碎屑岩源岩为沉积岩和拉斑玄武岩。根据 REE 的地球化学性质, 一般在岩浆岩与碎屑岩中无 Ce 的负异常 (陈德潜等, 1990), 而邓万明等 (2001) 研究表明, 囊谦盆地绝大多数火山岩均存在不同程度 Ce 的弱负异常, 这无疑是俯冲带物质、洋底沉积物等进入源区的一个证据。因此, 本次砂岩样品 Ce 的负异常, 可能是继承了源区拉斑玄武岩

Ce 的负异常特点。 δEu 值在稀土元素地球化学参数中占有较重要的地位, 可灵敏地反映体系内的地球化学特征, 可作为鉴别物源的重要参数 (王中刚等, 1989)。玄武岩大多没有 Eu 异常, 而花岗岩多具 Eu 负异常, 本文样品稀土元素经球粒陨石标准化后得出的 $Eu (0.64 \sim 0.69)$ 负异常明显, 表明源岩中有酸性岩。综上所述, 囊谦盆地碎屑岩物源具有多样性。

5 结论

通过砂岩的微量元素和稀土元素地球化学特征, 得出以下认识:

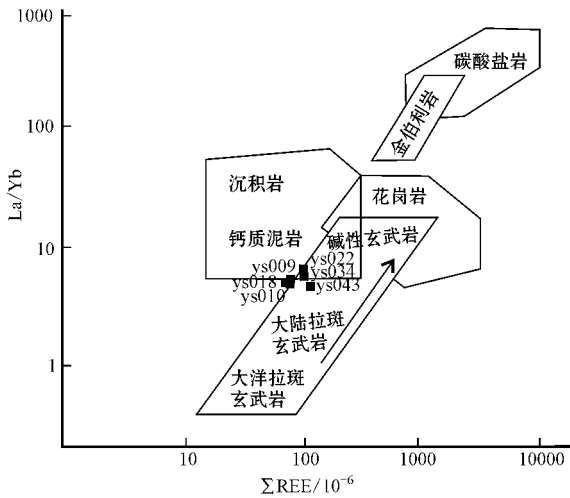


图7 砂岩样品 $La/Yb - \Sigma REE$ 图解

Fig. 7 $La/Yb - \Sigma REE$ diagram of sandstones

(1) 本区砂岩微量元素中的深源元素含量明显低于地壳粘土中微量元素的平均值,具有陆源性元素 Zr 、 Hf 的含量与粘土岩中的平均含量相当,说明沉积速度相对较快使得陆源元素相对富集。

(2) Ce/Ce^* 、 Sr/Ba 、 Fe/Mn 比值分析及 Ce_{anom} 指数的变化,反映当时囊谦早第三纪盆地沉积期处于淡水质、氧化环境中,气候干旱-炎热。

(3) 依据贡觉组砂岩稀土元素地球化学特征,北美页岩和球粒陨石标准化后的 REE 配分模式反映了典型的沉积成因特征; $La/Yb - \Sigma REE$ 图解及 Ce 、 Eu 负异常,显示囊谦盆地碎屑岩物源具有多样性,大体上为沉积岩、酸性火山岩和拉斑玄武岩的混合成因。

(4) $La - Th - Sc$ 、 $Sc/Cr - La/Y$ 、 $Co/Th - La/Sc$ 和 $Th - Hf - Co$ 构造环境判别图解以及砂岩的判别函数图解表明,囊谦盆地贡觉组沉积物的源岩为石英岩、长英质火成岩和酸性火成岩。 Th/Sc 、 Th/U 、 La/Th 和 $Th/Sc - Sc$ 元素图表明,源岩为沉积岩和火山岩,由于盆地频繁的岩浆活动,可能有幔源物质加入。

致谢 衷心感谢两位审稿人对本文提出的宝贵意见。

References

Allegre C T. 1978. Quantitative models of trace plane[J]. Earth Plant.

Sci. Lett., 38(1): 1~20.

Bhatia M R and Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of greywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. Contrib Mineral Petrol., 92(2): 181~193.

Bhatia M R and Taylor S R. 1981. Trace-element geochemistry and sedimentary provinces: A study from the Tasman Geosyncline, Australia [J]. Chem. Geol., 33(1/2): 115~125.

Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [A]. Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry [C]. Elsevier, 63~114.

Chen Deqian and Chen Gang. 1990. Practical Geochemistry of Rare Earth Element [M]. Metallurgical Industry Press, 1~265 (in Chinese).

Cheng Jin, Xia Bin and Zhang Yuquan. 2008. Geochemical characteristics of the Cenozoic potash-rich volcanic rocks in Nangqian Basin: Petrogenesis and tectonic implication [J]. Geotectonica et Metallogenia, 32(3): 382~391 (in Chinese with English abstract).

Deng Wanming, Sun Hongjuan and Zhang Yuquan. 1999. K-Ar ages of Cenozoic volcanic rocks from Nangqian Basin in Qinghai [J]. Chinese Science Bulletin, 23(44): 2554~2558.

Deng Wanming, Sun Hongjuan and Zhang Yuquan. 2001. Petrogenesis of Cenozoic potassic volcanic rocks in Nangqian basin [J]. Geological Sciences, 36(3): 304~318 (in Chinese with English abstract).

Du Houfa, Jiang Yongbiao, Yan Zhaobin, et al. 2011. Sedimentary characteristics and environment of Nangqian Paleogene basin in Qinghai Province [J]. Acta Geologica Sinica, 85(3): 383~395 (in Chinese with English abstract).

Elderfield H and Greaves M J. 1982. The rare earth elements in seawater [J]. Nature, 296: 214~219.

Feng Zengzhao. 1993. Sedimentary Petrology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1~217 (in Chinese).

Guiyang Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. 1977. Concise Geochemistry Manua [M]. Beijing: Science Press, 63~72 (in Chinese).

Haskin L A, Haskin M A, Frey F A, et al. 1968. Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths [A]. Ahrens L H. Origin and Distribution of the Elements, vol. 1 [C]. Oxford: Pergamon, 889~911.

Horton B K, Zhou Jianguy, Spurlin M S, et al. 2000. Paleogene deposystems and basin evolution in the eastern Tibetan Plateau: Nangqian and Xialaxiu basins [J]. Earth Science Frontiers, 7(suppl.): 282~283.

Hou Wei, Liu Zhaojun, He Yuping, et al. 2010. Application of REE geochemical characteristics of sandstone to study on provenance: a case from the Middle Jurassic of Mohe Basin in Northeast China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 4(28): 285~293 (in Chinese with English abstract).

Jiang Yongbiao, Hou Zengqian, Yan Zhaobin, et al. 2009. Prototype and evolution of the Tertiary Basin in Yushu area [J]. Geotectonica et

- Metallogenia, 33(4): 521~529 (in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Deng Jinfu, *et al.* 2003. The response of volcanism in the process of India-Asia continental collision [J]. Earth Science Frontiers, 10(3): 135~148 (in Chinese with English abstract).
- Murry R W. 1990. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale [J]. Geology, 18: 268~271.
- Pan Yusheng and Kong Xiangru. 1998. The Lithosphere Structure and Dynamic Evolution of Qinghai-Tiber Plateau [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Publishing House, 37~80 (in Chinese).
- Roser B P and Korsch R J. 1988. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminate function analysis of major-element data [J]. Chem. Geol., 67: 119~139.
- Rollinson H R. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation [M]. London: Longman Scientific Technical Press, 1~352.
- Shao Xiaoyan, Tian Jingchun, Yang Yulin, *et al.* 2008. Study on paleoenvironment of the Late Triassic Chang4+5 depositional period of the Baibao area in Ordos Basin [J]. Inner Mongolia Petrochemical, 34(18): 73~78 (in Chinese with English abstract).
- Shi Yafeng, Li Jijun and Li Bingyuan. 1998. The Uplift in Neogene Period and Environmental Changes of Qinghai-Xizang [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Publishing House, 118~135 (in Chinese).
- Sun Honglie. 1998. The Form Evolution and Development of Qinghai-Tiber Plateau [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Publishing House, 76~86 (in Chinese).
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution [M]. Oxford, London: Blackwell Scientific Publication, 277.
- Wang Shifeng, Yi Haisheng and Wang Chengshan. 2001. Sedimentary features of the Nangqian tertiary basin in Qinghai Province [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 28(1): 13~16 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhonggang, Yu Xueyuan and Zhao Zhenhua. 1989. Geochemistry of Rare Earth Elements [M]. Beijing: Science Press, 91~93 (in Chinese).
- Wei Min. 1985. Eocene ostracods from Nangqian in Qinghai [A]. Contribution to the Geology of the Qinghai-Xizang Plateau (17) [C], 313~325 (in Chinese with English abstract).
- Yao Jiming, Yu Bingsong and Chen Jianqiang. 2009. The geochemical characteristics of the Upper Jurassic to Cretaceous sedimentary rocks in north margin of the mid-Yangtze and tectonic setting discrimination [J]. Geochimica, 38(3): 231~241 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Kexin, Wang Guocan, Chen Fenning, *et al.* 2007. Coupling between the uplift of Qinghai-Tiber Plateau and distribution of basins of Paleogene-Neogene [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 32(5): 583~597 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wenxiang, Zhang Hucai, Lei Guoliang, *et al.* 2009. The $\delta\text{Ce}-\Sigma\text{REE}$ Instruction on the Sedimentary Facies [M]. Quaternary Sciences, 29(4): 789~796 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yongjiu, Yuan Chao, Zhou Meifu, *et al.* 2007. Post-orogenic extension of Songpan-Garzê orogen in Early Jurassic: Constraints from Niuxingou monzodiorite and Siguniangshan A-type granite of western Sichuan, China [J]. Geochimica, 36(2): 139~152 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua. 1997. The Geochemical Principle of Trace Elements [M]. Beijing: Science Press, 199~204 (in Chinese).
- Zhou Jianguy, Wang Jianghai, Spurlin M S, *et al.* 2003. Sedimentology and tectonic significance of Paleogene coarse clastic rocks in Eastern Tibet [J]. Acta Geologica Sinica, 77(2): 262~271 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jianguy, Wang Jianghai, Yin An, *et al.* 2002. Depositional pattern and tectonic setting of early tertiary basins in the NE margin of the Tibetan Plateau: A case study of the Nangqian and Xianlaxiu basins [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 20(1): 85~91 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Li, Zhang Huihua, Wang Jianghai, *et al.* 2006. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Chronology of high-K Magmatic rocks in Nangqian basins at the Northern segment of the Jinsha-Red River shear zone [J]. Geotectonica et Metallogenia, 30(2): 241~247 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Rukai, Guo Hongli, He Dongbo, *et al.* 2002. The REE geochemical characteristics of carboniferous mudstone in northwest area [J]. Geoscience, 16(2): 130~136 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈德潜, 陈刚. 1990. 实用稀土元素地球化学 [M]. 冶金工业出版社, 1~265.
- 程锦, 夏斌, 张玉泉. 2008. 囊谦盆地新生代高钾岩浆岩的地球化学特征: 岩石成因及其构造意义 [J]. 大地构造与成矿学, 32(3): 382~391.
- 邓万明, 孙宏娟, 张玉泉. 1999. 青海囊谦盆地新生代火山岩的 K-Ar 年龄 [J]. 科学通报, 23(44): 2554~2558.
- 邓万明, 孙宏娟, 张玉泉. 2001. 囊谦盆地新生代钾质火山岩成因岩石学研究 [J]. 地质科学, 36(3): 304~318.
- 杜后发, 姜勇彪, 严兆彬, 等. 2011. 青海囊谦古近纪盆地沉积特征及沉积环境分析 [J]. 地质学报, 85(3): 383~395.
- 冯增昭. 1993. 沉积岩石学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1~217.
- 侯伟, 刘昭君, 何玉平等. 2010. 砂岩稀土元素地球化学特征在沉积物源区分析中的应用——以中国东北漠河盆地中侏罗统为例 [J]. 沉积学报, 4(28): 285~293.

- 姜勇彪,侯增谦,严兆彬,等. 2009. 青海玉树地区第三纪盆地原型及其演化[J]. 大地构造与成矿学, 33(4): 521~529.
- 莫宣学,赵志丹,邓晋福,等. 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. 地学前缘, 10(3): 135~148.
- 潘裕生,孔祥儒. 1998. 青藏高原岩石圈结构演化和动力学[M]. 广州: 广东科学技术出版社, 37~80.
- 邵晓岩,田景春,杨玉林,等. 2008. 鄂尔多斯盆地白豹地区晚三叠世长4+5沉积期古环境研究[J]. 内蒙古石油化工, 34(18): 73~78.
- 施雅凤,李吉均,李炳元. 1998. 青藏高原晚新生代隆升与环境变化[M]. 广州: 广东科学技术出版社, 118~135.
- 孙鸿烈. 1998. 青藏高原形成演化与发展[M]. 广州: 广东科学技术出版社, 76~86.
- 王世锋,伊海生,王成善. 2001. 青海囊谦盆地第三纪盆地沉积学特征[J]. 成都理工学院学报, 28(1): 13~16.
- 王中刚,于学远,赵振华. 1989. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 91~93.
- 卫民. 1985. 青海囊谦早第三纪介形类[A]. 青藏高原地质文集(17[C]). 313~325.
- 姚纪明,于炳松,陈建强,等. 2009. 中扬子北缘上侏罗统-白垩系沉积岩地球化学特征与构造背景分析[J]. 地球化学, 38(3): 231~241.
- 张克信,王国灿,陈奋宁,等. 2007. 青藏高原古近纪-新近纪隆升与沉积盆地分布耦合[J]. 地球科学, 32(5): 583~597.
- 张文翔,张虎才,雷国良,等. 2009. 稀土元素指标 $\delta_{Ce-\Sigma REE}$ 对沉积相的指示研究[M]. 第四纪研究, 29(4): 789~796.
- 赵永久,袁超,周美夫,等. 2007. 松潘甘孜造山带早侏罗世的后造山伸展: 来自川西牛心沟和四姑娘山岩体的地球化学制约[J]. 地球化学, 36(2): 139~152.
- 赵振华. 1997. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 199~204.
- 中国科学院贵阳地球化学研究所. 1977. 简明地球化学手册[M]. 北京: 科学出版社, 63~72.
- 周江羽,王江海, Spurlin M S, 等. 2003. 青藏高原东缘古近纪粗碎屑岩沉积学及其构造意义[J]. 地质学报, 77(2): 262~271.
- 周江羽,王江海,尹安,等. 2002. 青藏东北缘早第三纪盆地充填的沉积型式——以囊谦和下拉秀盆地为例[J]. 沉积学报, 20(1): 85~91.
- 朱丽,张会化,王江海,等. 2006. 金沙江-红河构造带北段囊谦盆地新生代高钾岩石 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年代学研究[J]. 大地构造与成矿学, 30(2): 241~247.
- 朱如凯,郭宏莉,何东博,等. 2002. 中国西北地区石炭系泥岩稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. 现代地质, 16(2): 130~136.