

南羌塘坳陷上三叠统一下侏罗统碳酸盐岩 元素地球化学特征及指示意义



谭梅¹⁾, 季长军²⁾, 周冰洋³⁾, 康少伟⁴⁾

1) 重庆自然博物馆, 重庆, 400700; 2) 中国地质科学院, 北京, 100081;

3) 湖北省地质科学研究所, 武汉, 430000; 4) 陕西省煤田地质集团有限公司, 西安, 710021

内容提要: 南羌塘坳陷三叠系与侏罗系地层之间存在广泛的沉积间断, 针对这一时期地层的研究对于南羌塘盆地在该时期的沉积环境以及构造演化具有重要意义。笔者等以南羌塘坳陷内上三叠统一下侏罗统索布查组碳酸盐岩的地球化学元素为对象进行相关分析。剔除陆源组分影响之后利用微量元素对碳酸盐岩进行沉积环境分析显示索布查组碳酸盐岩沉积时处于氧化环境, 且地层由下往上水体逐渐变深, 盐度逐渐增加, 且研究区在当时处于炎热干燥的气候环境下。碳酸盐岩中的 REE 含量主要受陆源组分的影响, Ce 与 Eu 主要反映的是陆源碎屑的特征。Ce 的负异常反映陆源碎屑源岩沉积时为氧化环境, Eu 的正异常主要来自含长石碎屑岩的风化淋滤导致。根据样品中与陆源碎屑相关的稳定元素特征结合区域地质调查推断陆源碎屑源岩为研究区北部中央隆起带附近的上三叠统土门格拉组地层。土门格拉组地层由于南、北羌塘地块汇聚隆升而成为索布查组碳酸盐岩中陆源碎屑的来源, 之后南羌塘坳陷开始拉伸, 索布查组碳酸盐岩开始沉积, 其形成表示南羌塘坳陷开始进入被动大陆边缘沉积的演化阶段。

关键词: 南羌塘坳陷; 晚三叠世—早侏罗世; 碳酸盐岩; 元素分析

自 20 世纪 90 年代以来, 青藏高原羌塘盆地因发现有巨大的油气资源潜力而备受关注, 是极有希望取得油气勘探突破的地区(乔德武等, 2011; 刘池阳等, 2016; 王剑等, 2020, 2022; 杨易卓等, 2020), 但同时也是勘探程度最低的陆域含油气盆地(曾胜强等, 2021)。三叠系与侏罗系地层作为羌塘盆地中分布最为广泛的海相地层一直都是盆地内进行油气资源调查的重点地层(胡明毅等, 2000; 付修根等, 2015; 季长军等, 2016; 刘池阳等, 2016; 纪占胜等, 2018; 吴珍汉等, 2019; 谭富荣等, 2020; 王剑等, 2020; 王忠伟等, 2022)。据前人的研究资料, 在三叠纪晚期, 羌塘盆地大部分地区已经隆升成为陆地并且开始遭受风化剥蚀(王剑等, 2007; 付修根等, 2009), 因此在盆地内的三叠系地层与上覆的侏罗系地层存在广泛的沉积间断, 目前只在南羌塘坳陷的部分地区发现有连续的地层, 而且针对这一时期地层的研究也鲜见发表, 因此对该时期连续地层的研究对于南羌塘坳陷沉积环境的演化分析具有十分

重要的意义。笔者等根据南羌塘坳陷索布查温泉以北的索布查沟所采集的上三叠统一下侏罗统索布查组碳酸盐岩进行地球化学分析, 对南羌塘坳陷在该时期的沉积环境的特征及其演化进行探讨与分析。

1 区域地质背景

南羌塘坳陷位于青藏高原北部的羌塘无人区, 坳陷北部为位于羌塘盆地中部的中央隆起带, 南部为班公湖—怒江缝合带。研究区的三叠系地层主要分布在坳陷北部的中央隆起带附近, 但是中央隆起带的三叠系地层与上覆侏罗系地层多为断层接触。采样剖面的位置位于色哇乡索布查温泉以北约 6 km 处(图 1), 为南羌塘坳陷内不多的三叠系与侏罗系连续沉积的地层。剖面内岩性主要为灰—深—灰色含泥质团块微晶灰岩、深灰色含生物碎屑泥晶、微晶灰岩及泥质灰岩等。索布查组碳酸盐岩的岩石学组合和生物组合特征显示出典型的浅海沉积的特征(图 2), 有学者通过对色哇地区的索布查组碳酸盐

注: 本文为中国地质调查局二级项目“羌塘盆地阿木错凹陷油气地质调查项目”(编号: DD20221855)、中国地质调查局二级项目“羌塘北部龙尾槽地区油气地质调查”(编号: DD20211343)、陕西省煤田地质集团有限公司科研项目“羌塘重点区块油气地质选区评价”(编号: SCG20211201)和中国地质科学院基本科研业务费项目“羌塘盆地古油藏调查及成藏机理研究”(编号: JKY202209)的成果。

收稿日期: 2022-06-27; 改回日期: 2022-11-18; 网络首发: 2022-12-20; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.12.011

作者简介: 谭梅, 女, 1989 年生, 硕士, 馆员, 主要从事沉积学、地层学和古生物方面的研究; Email: 1280273215@qq.com。通讯作者: 季长军, 男, 1986 年生, 博士, 副研究员, 主要从事石油地质和沉积地质研究; Email: jichangjun2007@sina.com。

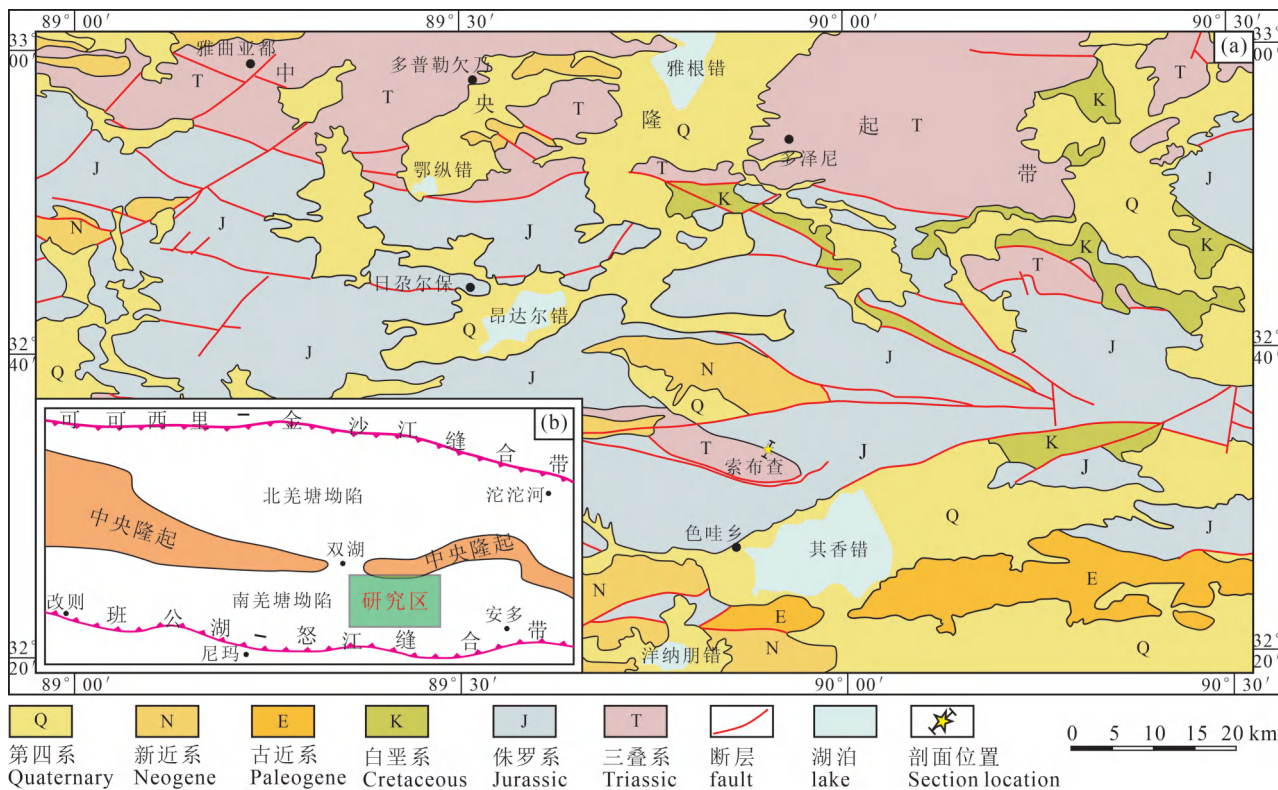


图 1 南羌塘坳陷区域地质及采样剖面位置图(a)和羌塘盆地构造图(b)
(据成都地质矿产研究所 1 : 50 万羌塘盆地地质图,略有修改)

Fig.1 Regional geology and sampling section location map of South Qiangtang Depression (a) and structural map of Qiangtang Basin (b) (from the 1 : 500000 Qiangtang Basin Geological Map of the Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, slightly modified)

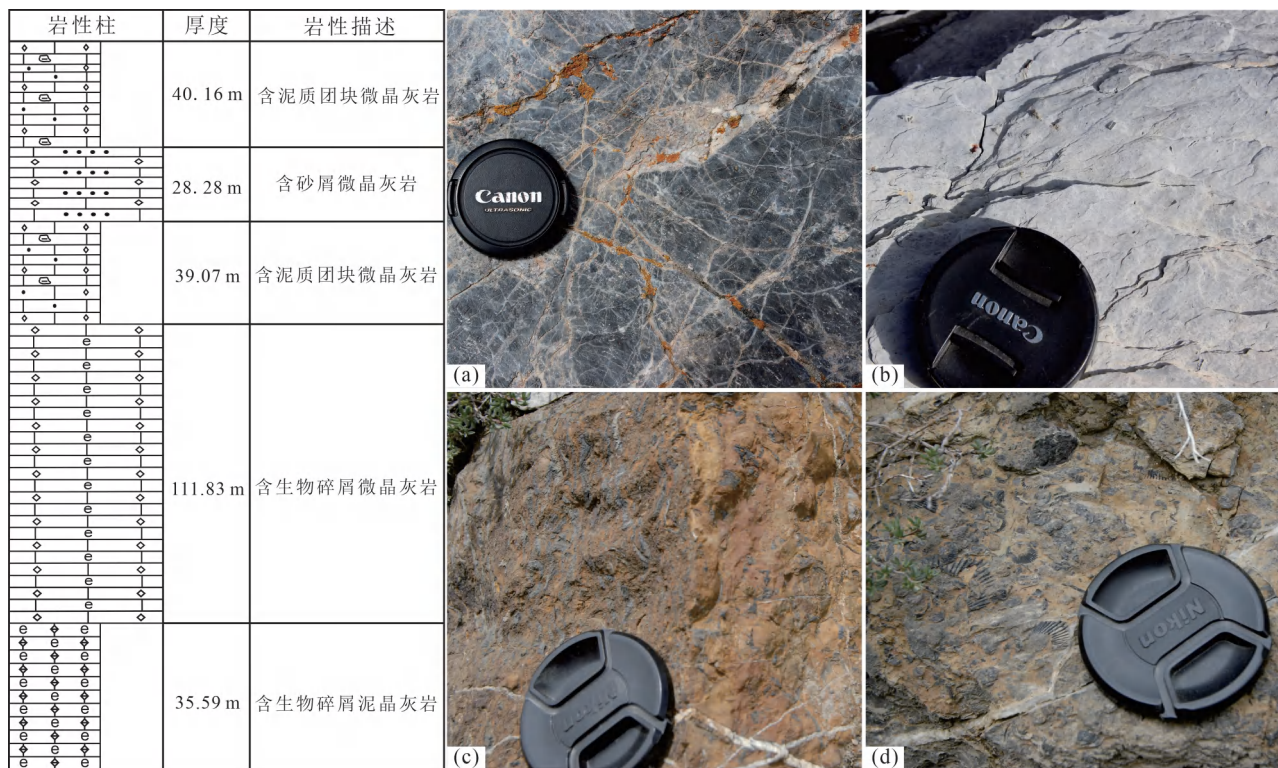


图 2 青藏高原南羌塘坳陷上三叠统一下侏罗统索布查组碳酸盐岩岩性柱状图

Fig. 2 Lithology column chart of the carbonate rocks of the Upper Triassic—Lower Jurassic Sobucha Formation in the Southern Qiangtang Depression of the Qinghai—Xizang(Tibet) plateau

(a) 含泥质团块微晶灰岩;(b) 含砂屑微晶灰岩;(c) 含生物碎屑泥晶灰岩;(d) 含生物碎屑微晶灰岩

(a) argillaceous agglomerate-bearing microcrystalline limestone; (b) sand-bearing microcrystalline limestone; (c) bioclastic micrite-bearing limestone; (d) bioclastic-bearing microcrystalline limestone

岩地层中的化石及地层特征确定其地质时代为晚三叠世—早侏罗世(王永胜等,2007)。索布查组碳酸盐岩地层的下伏地层为上三叠统日干配错群砂岩,上覆地层为下侏罗统曲色组泥页岩。索布查组碳酸盐岩的岩石单元上相当于羌塘盆地内肖茶卡群的上组上段。索布查组地层主要分布于其香错北索布查温泉、鲁雄错难切那、莎日嘎扎北、麻木卓约一带,呈较为明显的东西向展布,其出露面积超过 300 km²。

2 样品分析

本次样品共选取索布查组碳酸盐岩一共 10 件,其中含生物碎屑泥晶灰岩样品 2 件,含生物碎屑微晶灰岩 4 件。含泥质团块微晶灰岩 2 件,含砂微晶

灰岩 1 件。含泥质团块微晶灰岩 1 件。在测试前先将无污染样品研磨粉碎至 200 目,微量稀土元素在电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)上进行分析,采用该方法可以将稀土元素的含量的误差控制 5% 以下,样品的测试分析由核工业北京地质研究院分析测试中心负责完成。样品的常、微量元素与稀土元素的测定结果见表 1 与表 2。

3 微量元素对古沉积环境的指示

高场强元素 Sc、Ti、Zr、Nb、Hf、Ta、Th、Y 和 REE 等以及大离子亲石元素 Rb、Ga、Cs 等在岩石风化过程中很不活泼,不易随流体以离子态迁移,容易与固体物质结合并随之一起被搬运和沉积下来,这些

表 1 上三叠统一下侏罗统索布查组碳酸盐岩常、微量元素分析结果

Table 1 Analysis results of normal elements and trace elements of the Upper Triassic—Lower Jurassic Sobucha carbonate rocks

编号	SBC-1	SBC-2	SBC-3	SBC-4	SBC-5	SBC-6	SBC-7	SBC-8	SBC-9	SBC-10
Al ₂ O ₃	3. 67	3. 94	2. 84	8. 45	3. 50	6. 52	5. 16	4. 57	8. 57	9. 27
CaO	396. 80	461. 90	466. 00	451. 70	479. 50	458. 50	429. 00	430. 70	463. 20	453. 90
TFe ₂ O ₃	4. 85	2. 98	2. 75	2. 82	1. 96	2. 81	2. 58	2. 13	4. 81	4. 11
K ₂ O	0. 94	0. 87	0. 65	2. 10	0. 97	1. 57	1. 47	1. 31	2. 68	2. 77
MgO	10. 28	5. 55	5. 74	5. 72	4. 69	5. 76	4. 65	5. 01	6. 88	7. 78
Na ₂ O	0. 55	0. 58	0. 55	0. 62	0. 53	0. 62	0. 54	0. 53	0. 56	0. 60
Sc	1. 46	1. 31	1. 32	1. 80	1. 32	1. 71	1. 38	1. 43	1. 68	1. 67
Cr	24. 33	20. 44	21. 06	24. 63	20. 54	22. 49	23. 95	21. 39	20. 73	24. 98
Co	1. 47	1. 23	1. 18	1. 48	0. 80	1. 54	1. 38	1. 03	1. 62	1. 42
Ni	4. 78	2. 67	2. 51	5. 34	1. 77	3. 50	2. 90	4. 50	4. 98	4. 13
Cu	3. 13	2. 75	2. 25	4. 39	3. 05	3. 17	2. 44	3. 39	2. 40	2. 22
Zn	22. 52	24. 32	19. 62	35. 93	18. 64	45. 87	30. 51	11. 12	9. 45	11. 53
Ga	1. 09	1. 06	1. 05	1. 76	1. 01	1. 39	1. 30	1. 20	1. 76	1. 86
Ge	0. 13	0. 09	0. 09	0. 10	0. 07	0. 07	0. 08	0. 07	0. 12	0. 11
Rb	4. 93	4. 22	3. 15	10. 93	4. 76	7. 63	6. 78	6. 26	12. 59	13. 10
Y	7. 54	7. 02	5. 59	8. 48	5. 31	8. 64	6. 52	5. 53	6. 45	6. 18
Zr	15. 30	15. 00	16. 73	28. 02	17. 84	17. 98	16. 17	14. 96	18. 34	20. 17
Nb	1. 29	1. 80	1. 39	1. 96	1. 46	1. 84	1. 37	1. 26	1. 55	1. 51
Mn	182. 20	149. 10	163. 90	175. 20	117. 70	140. 10	132. 20	115. 30	173. 70	156. 90
Sr	518. 30	577. 00	480. 80	467. 00	453. 20	607. 90	514. 00	496. 20	553. 70	543. 20
Ti	99. 60	170. 50	88. 50	339. 00	117. 00	290. 40	180. 50	126. 70	215. 20	234. 20
Ba	15. 93	18. 26	14. 21	29. 89	15. 83	22. 04	20. 94	16. 78	28. 99	30. 40
Th	0. 49	0. 35	0. 62	1. 15	0. 58	0. 69	0. 61	0. 53	0. 80	0. 97
V	5. 02	5. 76	3. 25	16. 39	3. 83	8. 57	7. 02	5. 27	9. 83	12. 10

注:Al₂O₃、CaO、TFe₂O₃、K₂O、MgO 和 Na₂O 的单位为 mg/g,其他元素的含量为 μg/g。

表 2 索布查碳酸盐岩稀土元素分析结果(μg/g)

Table 2 Analysis results of rare earth elements of the Sobucha carbonate rocks(μg/g)												
编号	SBC-1	SBC-2	SBC-3	SBC-4	SBC-5	SBC-6	SBC-7	SBC-8	SBC-9	SBC-10	北美页岩	球粒陨石
La	3.52	4.08	3.31	6.31	3.06	4.00	3.42	3.28	3.94	4.11	32	0.32
Ce	3.75	3.82	3.37	6.85	3.03	4.91	4.74	4.26	6.98	7.06	73	0.94
Pr	0.64	0.69	0.60	1.10	0.57	0.73	0.66	0.65	0.85	0.83	7.9	0.12
Nd	1.81	1.98	1.63	3.59	1.52	2.22	1.93	1.72	2.47	2.41	33	0.6
Sm	0.40	0.34	0.27	0.76	0.36	0.41	0.38	0.33	0.46	0.48	5.7	0.2
Eu	0.14	0.16	0.13	0.19	0.13	0.16	0.14	0.13	0.19	0.21	1.24	0.073
Gd	0.54	0.56	0.45	0.79	0.46	0.61	0.53	0.46	0.57	0.55	5.2	0.31
Tb	0.07	0.07	0.05	0.11	0.05	0.08	0.06	0.06	0.08	0.06	0.85	0.05
Dy	0.48	0.43	0.31	0.65	0.32	0.54	0.40	0.36	0.43	0.44	5.8	0.31
Ho	0.17	0.16	0.13	0.21	0.13	0.20	0.15	0.14	0.17	0.17	1.04	0.073
Er	0.38	0.36	0.27	0.51	0.29	0.48	0.34	0.34	0.35	0.36	3.4	0.21
Tm	0.08	0.07	0.05	0.10	0.05	0.09	0.06	0.06	0.07	0.08	0.5	0.033
Yb	0.47	0.46	0.37	0.61	0.40	0.58	0.44	0.39	0.46	0.47	3.1	0.19
Lu	0.10	0.07	0.08	0.10	0.07	0.11	0.09	0.08	0.07	0.08	0.48	0.031

注:北美页岩稀土元素值据 Haskin 等(1966);球粒陨石稀土元素值据 Herrmann 等(1971)。

元素的普遍特征就是在海水含量中极低,几乎全部来自于碎屑物质,可以反映碎屑源区的地球化学性质。Ca 是标志性的水成元素,它主要存在于方解石或白云石矿物中。此外 Sr、Ba、Mn 等也是水成元素的代表,它们的含量和相互对比关系对沉积环境极为敏感,可以用来示踪沉积环境的古盐度、温度、pH 值等(Tribovillard et al., 2006)。而 V、Cr、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Mo、Cd 以及 U 等过渡金属元素在底层海水、沉积物中的循环很大程度上受沉积环境内的氧化还原条件的变化,可以用来示踪沉积水体的氧化还原状态(Calvert and Pedersen, 1993;Dean et al., 1997)。

但是在对碳酸盐岩的地球化学元素进行环境判别时需要考虑到是否有陆源碎屑组分参与其中。索布查组碳酸盐岩 Al₂O₃ 含量介于 0.71%~1.93%,均值 1.36%,相较于纯净的碳酸盐岩中的 Al₂O₃ 含量偏高,因此推断索布查组碳酸盐岩中含有较多的陆源碎屑组分,所以在计算时需要剔除陆源组分的影响。一般认为 Al 与 Ti 在海水中十分稳定,是典型的陆源元素,目前常用的剔除陆源组分的方法是用测试样品的目标元素含量减去标准样品如后太古宙澳大利亚页岩(PAAS)、平均页岩(AS)等的目标元素与 Al 或 Ti 的比值乘以所测样品的 Al 的含量。其公式为 $X_{\text{自生}} = X_{\text{样品}} - \text{Al}_{\text{样品}} \times (X/\text{Al})_{\text{标准样品}}$,其中 $X_{\text{自生}}$ 表示扣除陆源元素影响之后的目标元素含量, $X_{\text{样品}}$ 表示所测样品中的目标元素含量, $\text{Al}_{\text{样品}}$ 表示测试样品中的 Al 元素含量, $(X/\text{Al})_{\text{标准样品}}$ 表示所选的标准样品中的目标元素与 Al 元素的比值(张明亮

等,2017;杨晋东等,2020)。笔者等采用的标准样品为平均页岩(AS)(Turekian and Wedepohl, 1961),后文的地球化学分析均采用该方法剔除陆源组分的影响。

3.1 古氧相

前人研究表明,V、Cr、Ni 和 Co 元素具有在氧化状态下容易发生迁移,在还原状态下容易沉淀的特点,V/Cr、Ni/Co 的比值是判断古氧相的重要指标(Rimmer, 2004;Scheffler et al., 2006)。普遍认为当 V/Cr<4.25 为氧化环境,V/Cr>4.25 为还原环境(田洋等,2014);当 Ni/Co>7 为还原环境,Ni/Co<7 为氧化环境。通过数据分析,样品剔除陆源组分影响之后的 V/Cr 值介于 0.04~0.47,均值 0.15;Ni/Co 的值介于 0.16~5.38,均值 1.93,均表征氧化环境,这说明索布查碳酸盐岩沉积时整体均处于氧化环境。

3.2 古盐度

Sr/Ba 值是判断沉积物在沉积过程中水体盐度的常用数据指标,这是因为当水体盐度逐渐增加时 Ba 元素会形成 BaSO₄ 沉淀,当水体盐度继续增加,达到一定程度之后 Sr 元素也会以 SrSO₄ 的形式沉淀下来(朱丽霞等,2011)。当 Sr/Ba>1 时为咸水环境,当 Sr/Ba<1 时,为淡水环境(倪善芹等,2010)。通过计算,碳酸盐岩样品中剔除陆源组分影响之后的 Sr/Ba 值介于 101.33~277.45,均值 175.17。且地层从下往上,Sr/Ba 值有逐渐增加去趋势,也表明碳酸盐岩在沉积过程中的古盐度总体上也表现出上升的趋势(图 3)。

3.3 古水深

Sr 与 Ca 元素作为典型的水成元素,受陆源碎屑的影响微乎其微。Sr 的含量从浅水碳酸盐岩到深水碳酸盐岩中有逐渐增加的趋势,这是由于 Sr 在浅水地带的文石中的含量是最高的,其次为高镁方解石,最后为深水地带的低镁方解石(汪凯明等,2009)。1000×Sr/Ca 一般用来判断古海水深度,该值与沉积水体的深度和离岸距离有着良好的正相关关系。通过计算,得出索布查碳酸盐岩剔除陆源组分影响之后的 1000×Sr/Ca 的值介于 1.30~1.82,均值为 1.59。地层样品的值由下往上具有平稳到降低再逐渐升高的趋势,反映出沉积水体逐渐变深的趋势(图 3)。

3.4 古气候

Sr 的含量以及 Sr/Cu 值对古气候有着灵敏的反应,利用 Sr 含量的多寡以及 Sr/Cu 值来反映古气候条件有着较好的指示效果(范玉海等,2012;张天福等,2016)。以 10 为界,当 Sr/Cu<10 时,表征温暖、潮湿的气候环境,当 Sr/Cu>10 时表征炎热、干旱的气候环境;当 Sr 含量较低时指示潮湿的气候,当 Sr 含量较高时指示干旱气候。通过计算对比,碳酸盐岩样品剔除陆源组分影响之后的 Sr/Cu 介于 222.37~966.58,均值 412.89;剔除陆源组分之后的 Sr 元素含量介于 446.25~594.96 μg/g,均值 509.92 μg/g,含量较高。因此 Sr 的含量以及 Sr/Cu 值指示研究区在当时处于炎热干燥的气候环境中。

4 稀土元素分析

通过表 2 分析,样品中的稀土含量为 10.44~21.88 μg/g,均值 14.43 μg/g,其北美页岩标准化之后的值 LREE_N 的值介于 0.42~0.83,均值 0.55, HREE_N 的值介于 0.79~1.35,均值 0.99,可以看出 LREE_N<HREE_N,表现出明显的重稀土相对于轻稀土的富集。样品中 δCe 的值介于 0.49~0.83,均值为 0.62,表现出较强烈的 Ce 的负异常;δEu 的值介于 1.08~1.66,均值 1.42,表现出轻微的 Eu 正异常。

4.1 稀土元素的来源

碳酸盐岩作为内源沉积岩,其所含的大部分元素应该由沉积水体继承而来(Shields and Stille, 2001)。但是稀土元素还有可能来自于陆源碎屑物质,为此需要分析碳酸盐岩中的稀土元素来源。

通过对稀土元素与部分常、微量元素的相关性分析(图 4),碳酸盐岩样品的稀土含量与 Al₂O₃、Ti、Zr 有着极好的相关性,与 CaO、MgO、Sr 没有相关性或相关性极弱。而 Al、Ti、Zr 典型的陆源元素,Ca、Mg 和 Sr 则被认为是水成元素的代表,因此可以判断样品中的稀土元素主要是由陆源碎屑物质带入,由于沉积水体本身的稀土元素含量较低,因此样品中的稀土元素主要反映的是陆源碎屑组分的信息。

4.2 成岩作用的影响

REE 分布同样会受到后期成岩作用的影响,会

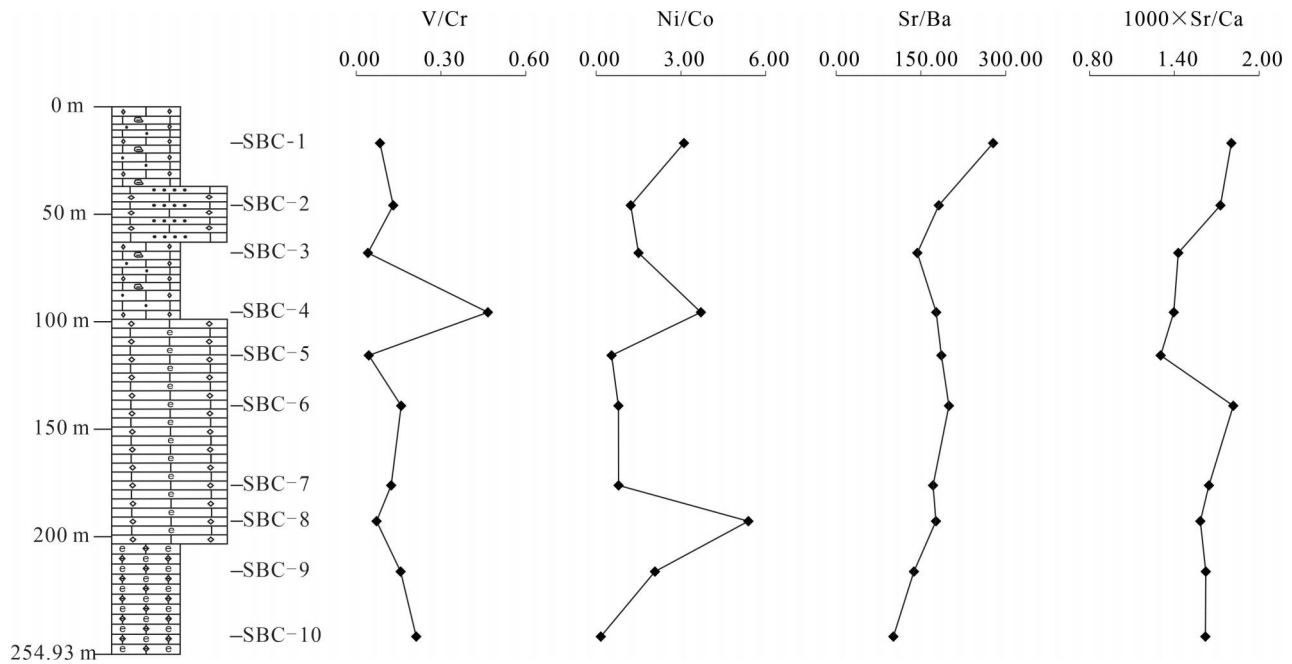


图 3 V/Cr、Ni/Co、Sr/Ba、1000×Sr/Ca 趋势图

Fig. 3 V/Cr, Ni/Co, Sr/Ba, 1000×Sr/Ca trend graph

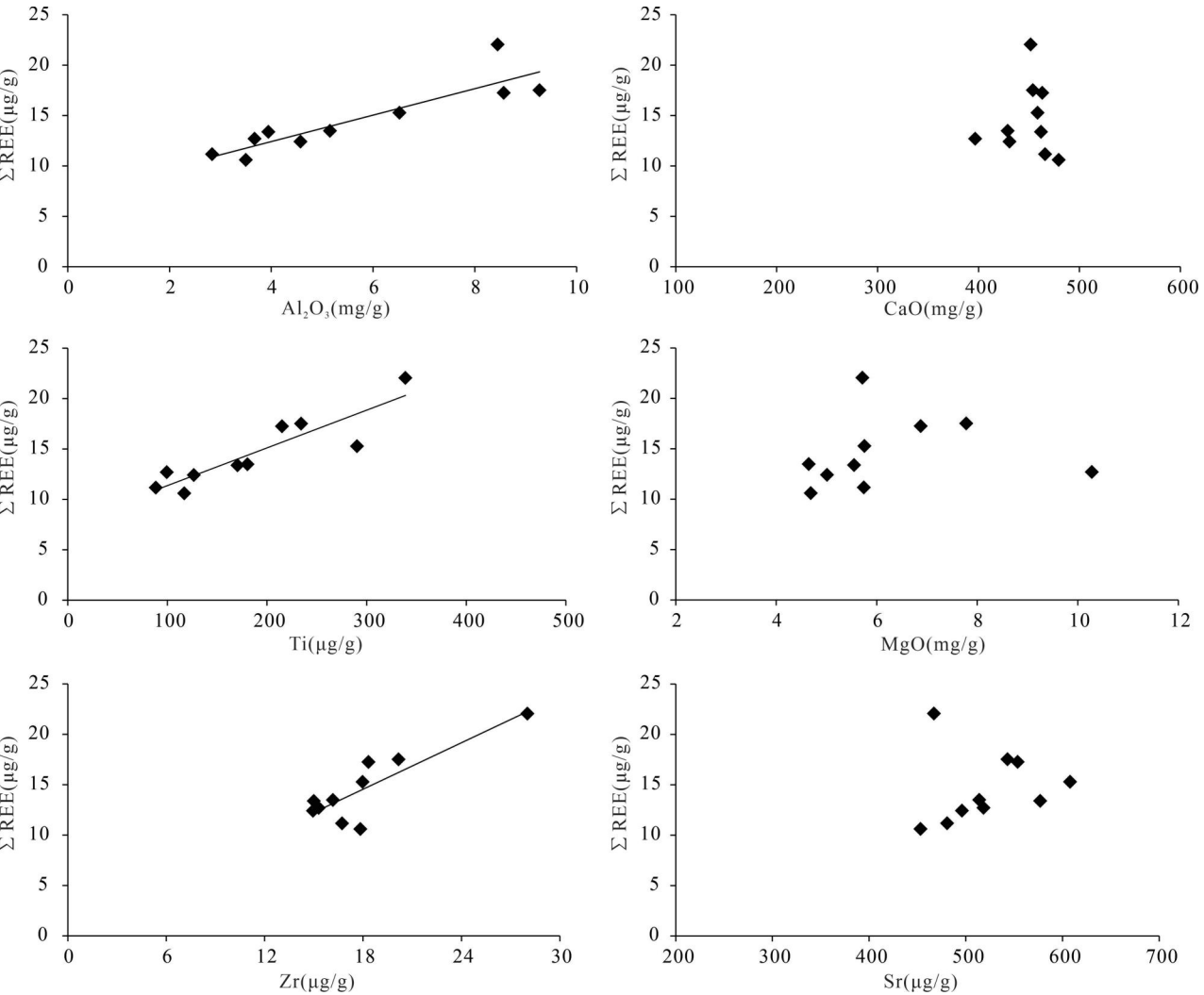


图 4 ΣREE 与 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Ti 、 Zr 、 Sr 含量相关性图

Fig. 4 Correlation diagrams of ΣREE and Al_2O_3 , CaO , MgO , Ti , Zr , Sr content

导致 REE 的配分模式出现 Ce 富集, Eu 亏损以及 $\text{Dy}_\text{N}/\text{Sm}_\text{N}$ 偏低, 从而会使 δCe 与 δEu , ΣREE 具有良好的相关性(胡俊杰等, 2014)。有学者认为当成岩作用对稀土元素地球化学特征有影响时, 会导致 δCe 与 δEu 存在一定的相关性, 而且 δCe 与 ΣREE 存在正相关性, δCe 与 $\text{Dy}_\text{N}/\text{Sm}_\text{N}$ 存在负相关性(Shields and Stille, 2001)。而通过以上数值的投影

(图 5), 可以明显看出碳酸盐岩样品中的 δCe 与 δEu 、 ΣREE 以及 $\text{Dy}_\text{N}/\text{Sm}_\text{N}$ 的相关性不明显或无相关性, 这就表明成岩作用对样品的稀土元素地球化学特征基本上无影响, 样品的稀土元素特征主要受控于陆源碎屑物质。

4.3 Ce、Eu 异常分析

碳酸盐岩样品中的 Ce 和 Eu 含量与 Al 呈正向

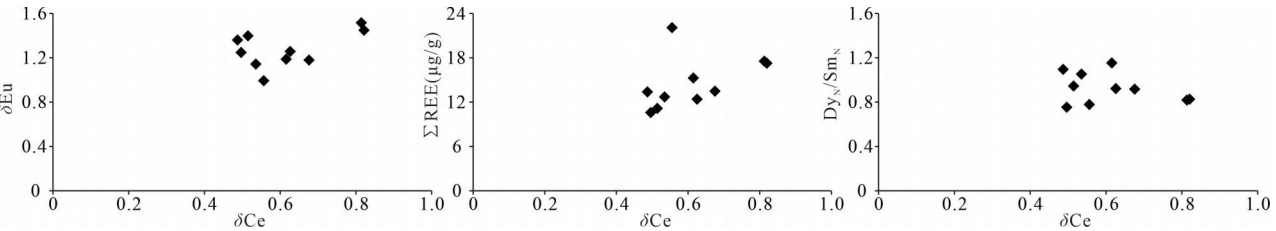


图 5 δCe — δEu 、 δCe — ΣREE 及 δCe — $\text{Dy}_\text{N}/\text{Sm}_\text{N}$ 相关性图

Fig. 5 Correlation diagrams of δCe — δEu , δCe — ΣREE and δCe — $\text{Dy}_\text{N}/\text{Sm}_\text{N}$

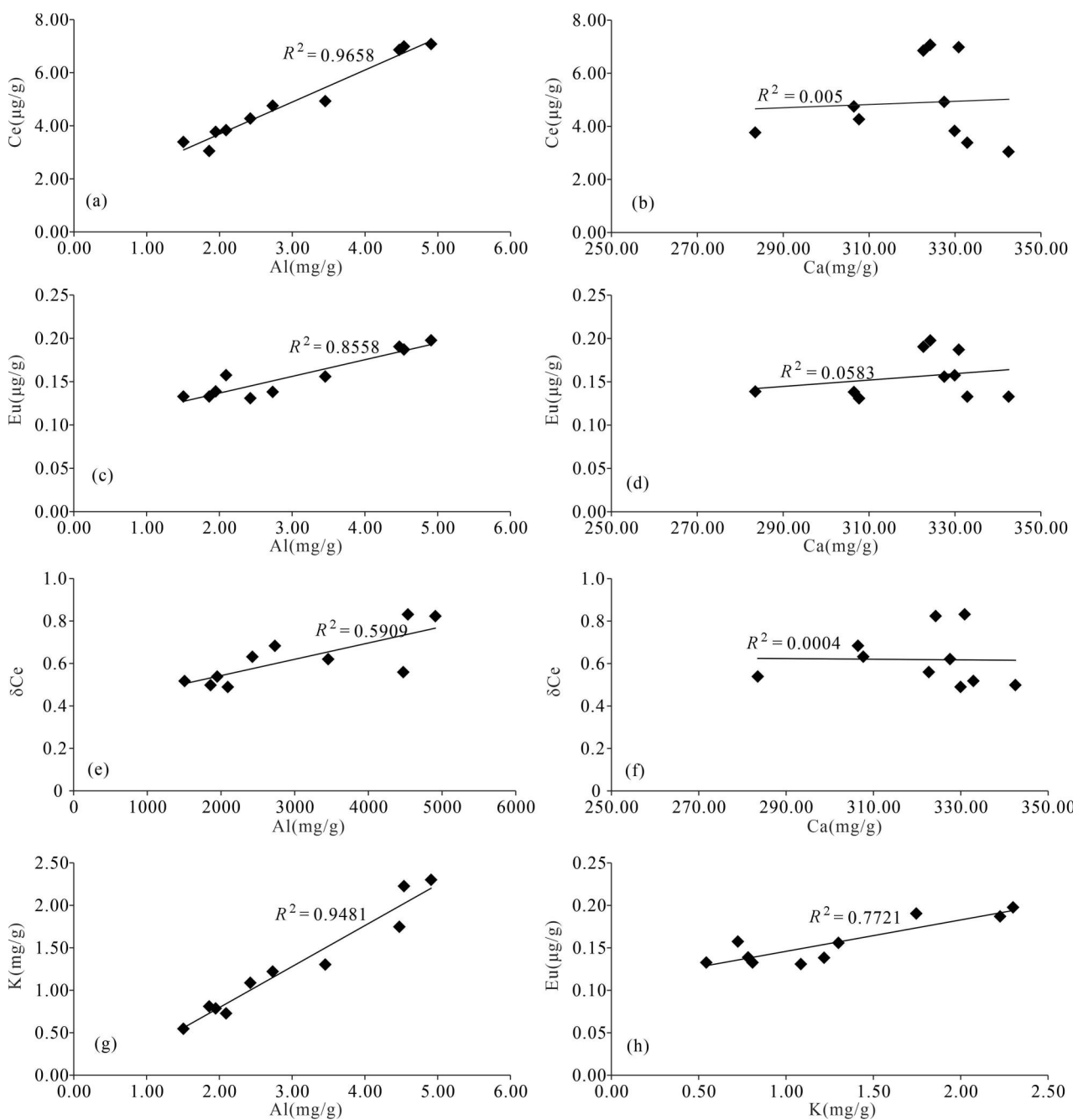


图 6 Ce—Al、Ce—Ca、Eu—Al、Eu—Ca、δCe—Al、δCe—Ca 及 K—Al、Eu—K 相关性图
Fig. 6 Correlation diagrams of Ce—Al, Ce—Ca, Eu—Al, Eu—Ca, δCe—Al, δCe—Ca, K—Al, and Eu—K

变化,相关系数分别为 0.98 和 0.93(图 6a,c),而与 Ca 相关系数极低,相关系数为 0.07 和 0.24(图 6b,图 6d)。由于水成的 REE 含量极低,即使碳酸盐岩沉积时也存在水成的 REE 加入,可能会影响岩石中稀土总量和 Ce、Eu 含量,但是样品中的 Ce 与 Eu 仍然主要反映的是陆源碎屑组分中的 Ce 与 Eu 的特征。

Ce 元素是 REE 中氧化还原敏感性最好的元

素,在氧化的水体条件下,Ce³⁺ 容易被氧化成 Ce⁴⁺ 进入 Fe—Mn 氧化物或氢氧化物、有机质或黏土矿物中造成 Ce 的亏损;在弱氧化或者还原环境中 Fe—Mn 的氧化物或氢氧化物溶解会导致 Ce⁴⁺ 被还原为 Ce³⁺ 进入水体,此时 Ce 表现出较弱的负异常甚至出现正异常(German et al., 1991;Guo Qingjun et al., 2007)。碳酸盐岩样品中的 δCe 值与 Al 含量具有较好的正相关性(图 6e),相关系数达到了 0.77;而

δCe 值与 Ca 含量没有相关性(图 6f),相关系数仅为 0.02。因此碳酸盐岩样品中 δCe 的值反映了陆源碎屑组分中 Ce 的特征。一般而言,经过北美页岩标准化之后的 δCe 值可以反映沉积环境的氧化还原性质,当 $\delta\text{Ce}>1$ 时,表征还原环境;当 $\delta\text{Ce}<1$ 时,表征氧化环境(梁世友等,2017)。样品中的 δCe 均值为 0.62,且总体上表现出较为强烈的负异常,说明陆源碎屑源岩沉积时处于氧化环境。

导致碳酸盐岩中的 Eu 正异常的原因可能有两种,一是陆源碎屑组分带入,如陆源碎屑源区含长石的岩石经风化后释放出 Eu^{2+} 进入沉积水体之中(Nozaki et al., 2000; Bolhar and Kranendonk, 2007; 白翔宇等,2022),这种情况下岩石中的 Eu 含量与组成长石的重要元素 K 的相关性较好;二是通过化学沉淀而来,正常化学沉积的 Eu 正异常一般与高温还原性热液流体相关(Bau and Dulski, 1996; Alexander et al., 2008; Debruyne et al., 2016; Robbins et al., 2016)。通过图 6g、图 6h 可以看出,碳酸盐岩样品中的 K 与 Al 、 Eu 与 K 的相关性都极好,相关系数分别为 0.97 与 0.88,可以判断样品中的 Eu^{2+} 主要来自于含长石的源岩风化后由碎屑组分带入。但是南羌塘盆地在三叠世—侏罗世时期火山活动较为活跃(付修根等,2007,2010; 王剑等,2007; 翟庆国等,2007; 付修根,2008; 汪正江等,2008),因此也不能排除可能会有岩浆热液流体的

影响。

有学者研究表明,海相沉积岩中的 $(\text{Fe}+\text{Mn})/\text{Ti}$ 、 Fe/Ti 以及 $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 间的比值可以用来判断沉积物中是否存在热水的参与。当 $\text{Fe}/\text{Ti}>20$, $(\text{Fe}+\text{Mn})/\text{Ti}>20\pm5$, $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})<0.35$ 时,可以认为有热水的参与(Boström K et al., 1973; 孙宇翔等,2019)。通过计算,碳酸盐岩样品中 $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 值介于 0.35~0.68,均值 0.55; Fe/Ti 值介于 5.82~34.05,均值 14.21; $(\text{Fe}+\text{Mn})/\text{Ti}$ 值介于 6.33~35.88;均值 15.18。表明碳酸盐岩沉积期并没有热水的参与,为正常的海水沉积。

5 稳定元素对大地构造背景的指示

5.1 陆源碎屑源区构造特征

有学者研究表明,一些惰性微量元素(La 、 Th 、 Y 、 Zr 等)在岩石中能稳定存在并能很好地继承陆源碎屑的特征,它们的含量和比值能用来判别物源区的构造环境(Bhatia, 1983; Roser et al., 1996)。已有学者证明用该方法验证碳酸盐岩中的陆源碎屑物质的构造背景同样取得了极好的效果(Bhatia and Crook, 1986; 杨晋东等,2020)。由于碳酸盐岩为化学沉积,其陆源碎屑组分虽然仍保留了源区构造背景特征的信号,但是陆源碎屑中保留的元素已经被稀释过,无法直接通过元素的含量对源区构造背景进行直接判断,因此采用元素之间的比值与相关性

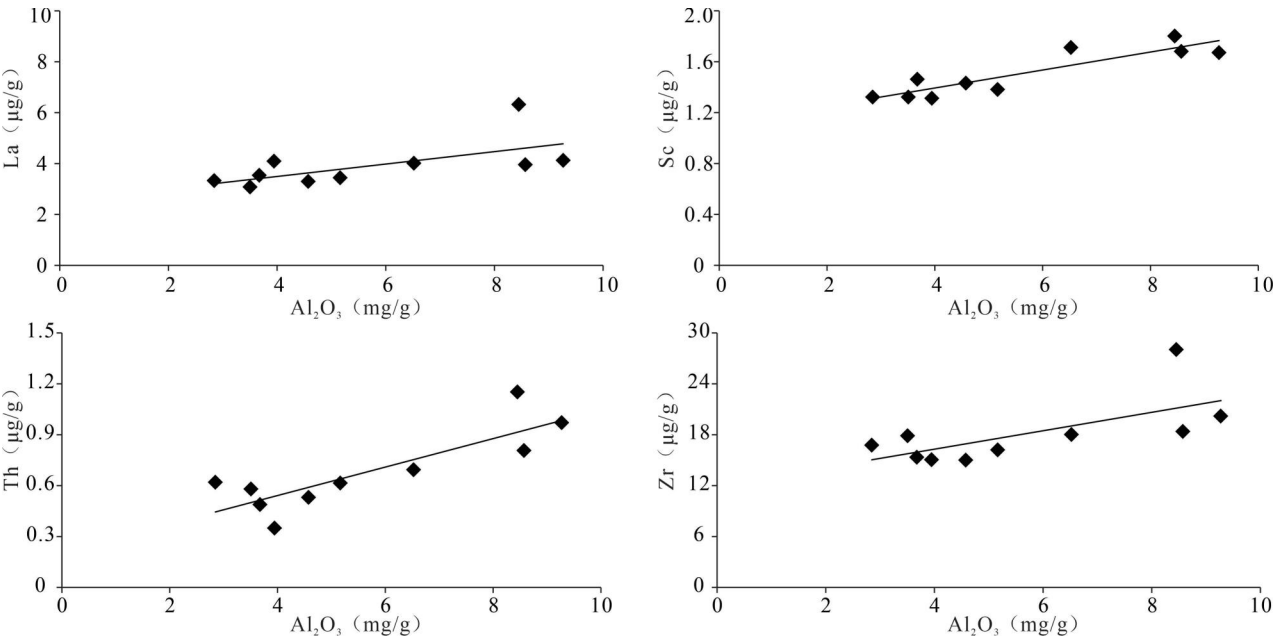


图 7 La 、 Sc 、 Th 、 Zr 与 Al_2O_3 相关性图

Fig. 7 Correlation diagrams of Al_2O_3 and La , Sc , Th , Zr content

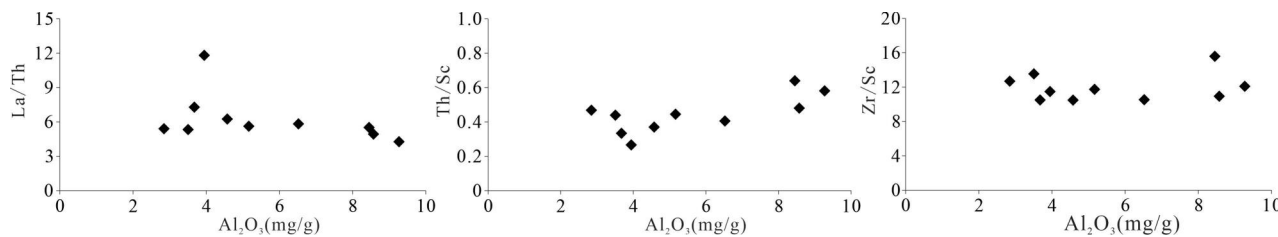


图 8 La/Th、Th/Sc、Zr/Sc 与 Al_2O_3 相关性图
Fig. 8 Correlation diagrams of Al_2O_3 and La/Th, Th/Sc, Zr/Sc ratio

进行判断更具准确性。与陆源碎屑相关的元素 La、Th、Zr 是强不相容元素,Sc 是强相容元素,因而它们的含量及其比值是沉积物源区及其构造环境反演的良好示踪剂。Sc、Th、Zr、La 等与 Al_2O_3 具有较好的正相关性(图 7),并且它们之间的比值 La/Th、Th/Sc、Zr/Sc 的值也比较稳定,其中 La/Th 的值介于 4.25~11.79,均值 6.20;Th/Sc 的值介于 0.26~0.64,均值 0.44;Zr/Sc 的值介于 10.48~15.57,均值 11.94,且这些值跟样品 Al_2O_3 的值不存在相关性而且基本保持稳定(图 8),反映出陆源碎屑物质对碳酸盐岩的样品的上述比值具有明显的控制作用,且受碳酸盐组分的影响较小。因此利用这些元素的比值可以用于陆源碎屑构造背景的判别(孙林华等,2010;梁薇等,2018)。通过 La—Th—Sc 以及 Th—Sc—Zr/10 三角图投影,发现样品投影点主要落入大陆岛弧区域(图 9),表明碳酸盐岩中的陆源碎屑

组分物源区总体上以大陆岛弧的构造背景为主。

5.2 陆源碎屑源岩特征

利用稀土元素对沉积岩的沉积物物质来源进行判断,是因为稀土元素极好的稳定性,不受风化、搬运及沉积作用的影响,可以用来判断源区的母岩类型及构造背景。球粒陨石的标准化可以反映样品对地球原始物质组成的分异程度,在利用稀土元素对沉积物的物源区进行判断的过程中,应注意稀土元素配分模式的曲线形态而不是稀土元素的含量(杨守业等,1999)。通过球粒陨石的标准化配分模式曲线(图 10)可以发现,样品稀土元素经球粒陨石均一化之后得到的曲线的形态特征较为一致,这说明碳酸盐岩沉积过程中,其陆源碎屑物质是来自于同一物源区。样品中的稀土元素主要是由陆源碎屑物质带入,对于陆源碎屑物质的物源可以采用 Allègre 图解(Allègre and Minster, 1978),即利用 ΣREE 与

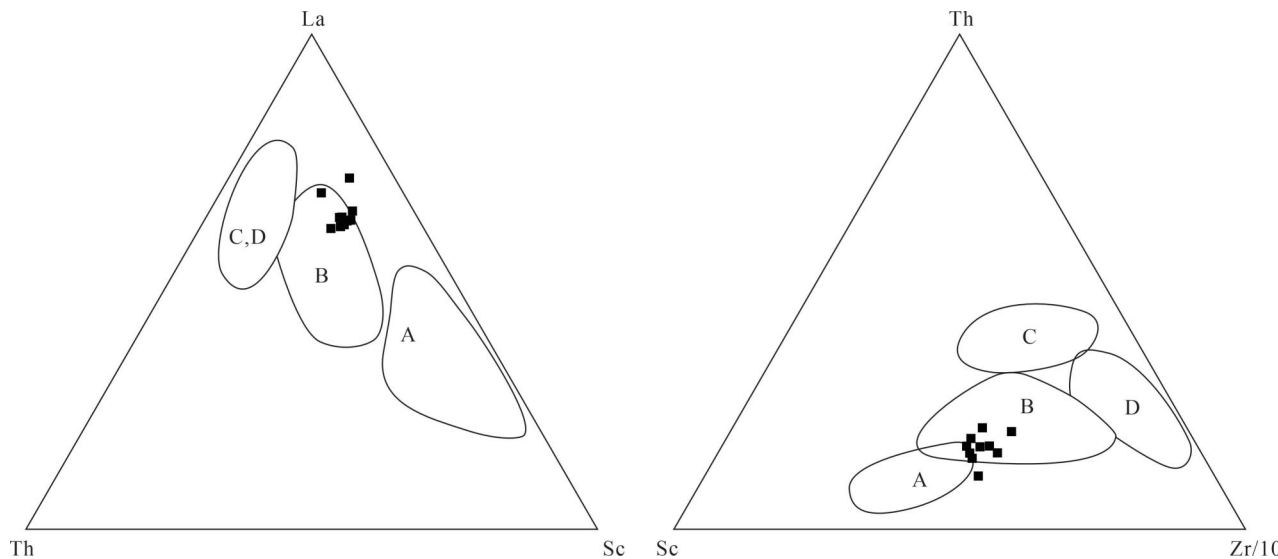


图 9 La—Th—Sc、Th—Sc—Zr/10 图解(底图根据 Bhatia et al., 1986)
Fig. 9 La—Th—Sc, Th—Sc—Zr/10 diagrams (Base map from Bhatia and Crook, 1986)

A—大洋岛弧;B—大陆岛弧;C—活动大陆边缘;D—被动大陆边缘
A—ocean island arc;B—continental island arc;C—active continental margin;D—passive continental margin

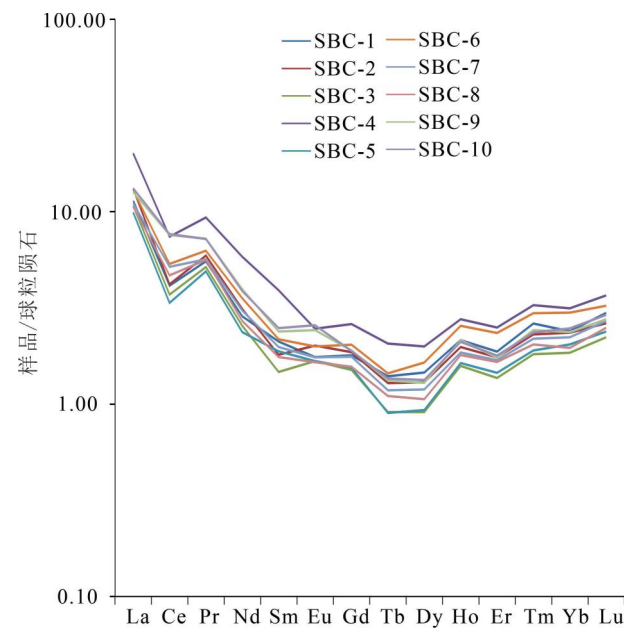


图 10 碳酸盐岩样品稀土的球粒陨石标准化模式
Fig. 10 Carbonate samples chondrite normalization model

La/Yb 之间的关系对样品进行分析(图 11),发现投影点均落在沉积岩区域,表明碳酸盐岩中的陆源碎屑组分主要来自于沉积岩而且并没有火山碎屑物质直接参与。表明是由羌塘盆地隆升成陆后,较老的地层遭受风化剥蚀而来。在晚三叠世—早侏罗世时期,研究区北部的中央隆起带附近发生过规模较大的火山活动(翟庆国等,2007),其喷出岩部分为一套凝灰岩、流纹岩与玄武岩建造(付修根等,2007;

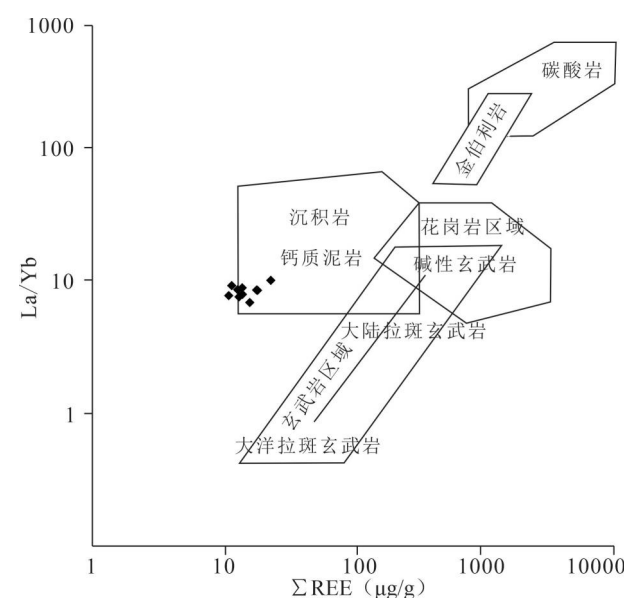


图 11 碳酸盐岩样品 Σ REE—La/Yb 图解
Fig. 11 Σ REE—La/Yb diagram of carbonate rock samples

付修根,2008),说明索布查组碳酸盐岩中的陆源碎屑物质主要来自于火山岩喷出之前的沉积岩。

5.3 陆源碎屑来源

从南羌塘盆地的构造演化特征来看,在中—晚三叠世之前南羌塘地块处于大陆剥蚀区,并未形成盆地(王剑等,2020)。南羌塘盆地的演化经历了晚三叠世早期的羌南裂谷阶段,晚三叠世晚期—晚侏罗世被动大陆边缘盆地阶段以及晚侏罗世—早白垩世的盆地萎缩阶段(南征兵等,2013),而南羌塘盆地内的火山岩主要发育于侏罗世之后,因此推测索布查组碳酸盐岩中的陆源碎屑组分来自于北羌塘地块,主要依据是:一是中晚三叠世时期,南羌塘地块与北羌塘地块发生碰撞(Zhang Kaijun et al., 2006, 赵珍等,2019),导致北羌塘地块隆升成为陆地开始发生风化与剥蚀(付修根等,2007;王剑等,2007),此时南羌塘地块还没有形成沉积盆地也并未接受沉积;二是晚三叠世羌塘盆地南部班公湖—怒江洋盆拉伸,盆地内部沉积物总体上呈现向南倾斜的楔状体,盆地内的物源主要来自于北部和东北部的大陆地区(南征兵等,2013)。

在中晚三叠世时期南羌塘板块向北与北羌塘板块发生汇聚碰撞之后,南羌塘地块俯冲于北羌塘地块之下(杨耀等,2016),导致北羌塘地块开始隆升直至暴露出海平面之上,中央隆起带地区的地层也在这一时期开始剥蚀,成为了物源区并向南羌塘拗陷提供碎屑组分。因此推断索布查组碳酸盐岩中的碎屑组分就是由北羌塘地块的隆升造成中央隆起带区域的地层剥蚀之后带入。通过对中央隆起带附近区域地层的特征分析与对比,发现隆起带附近的上三叠统土门格拉组地层可能为碳酸盐岩的陆源碎屑源区。其依据是:前文分析碳酸盐岩陆源碎屑组分可能来自含长石岩石的风化,且陆源碎屑源岩形成于氧化环境中,土门格拉组为海陆交互相地层,形成于氧化的环境中(汤朝阳等,2008),发育有较厚的含长石砂岩,加之有学者对该地层进行了相关分析,也证明土门格拉组的物源具有大陆岛弧的构造背景(冯兴雷等,2010)。而且根据土门格拉组中的双壳与孢粉化石判断其地质时代为晚三叠世卡尼期—诺利期(冯兴雷等,2010),而索布查组碳酸盐岩形成于晚三叠世瑞替期至早侏罗世普林斯巴期(王永胜等,2007),其形成时代较土门格拉组地层略晚但是地质时代是紧密相连的。因此推断索布查组碳酸盐岩中陆源碎屑来源于上三叠统土门格拉组碎屑岩,碳酸盐岩中陆源碎屑反映出的大陆岛弧的信号继承

于土门格拉组地层。

6 讨论

前人根据古生物化石判断索布查组碳酸盐岩沉积于晚三叠世瑞替期至早侏罗世普林斯巴期(王永胜等,2007),地质年代约在 203.6~183.0 Ma。而在 220~200 Ma 左右的晚三叠世时期,羌塘地块内部发生有较为强烈的岩浆活动(翟庆国等,2007;付修根,2008;付修根等,2010;王剑等,2010),有学者认为这是羌塘盆区域拉伸裂陷与班公—怒江洋盆开始扩张的表现(刘池阳等,2016)。还有学者研究表明,班公湖—怒江洋盆扩大,海水向北推进海平面升高的时期为早侏罗世时期(杨耀等,2016)。结合南羌塘坳陷晚三叠世以来的区域地层特征以及在研究区的实地踏勘,发现在索布查碳酸盐岩沉积之前,南羌塘盆地北部发生数次海退,第一次海退在多普勒欠乃—雅根错一带发育了以碎屑岩为主的上三叠统土门格拉组海陆交互相地层,随后则发生了规模更大的海退,在研究区出露了滨海相的日干配错组砂岩地层。此时土门格拉组地层暴露出地表开始发生剥蚀,为后期索布查组碳酸盐岩沉积的陆源碎屑组分的输入提供了有利条件。之后海平面逐渐上升在研究区连续沉积了浅海相的上三叠统一下侏罗统索布查组碳酸盐岩与陆棚相的下侏罗统曲色组泥页岩地层。索布查组碳酸盐岩与曲色组泥页岩整合接触,代表了在这一时期海平面持续性上升的过程。同样地,样品中的 Al 含量由地层底部往上含量逐渐降低,表明陆源碎屑物质逐渐减少,距离物源区逐渐变远,也侧面反映出海水逐渐加深。说明至少在索布查组碳酸盐岩沉积期,海水就已持续性地向北推进,这就表明班公湖—怒江洋盆扩张不应晚于晚三叠世瑞替期。晚三叠世瑞替期之前南羌塘盆地发生的数次海退,则可能与南羌塘地块向北羌塘地块的俯冲导致北羌塘地块相对隆升有关。

南羌塘地块向北羌塘地块俯冲隆升导致土门格拉组暴露出地表开始遭受剥蚀成为物源区,之后索布查组碳酸盐岩开始沉积并接受来自土

门格拉组的陆源碎屑组分,由于这两套地层形成的地质时代紧密相连,也间接表明晚三叠世由于南北羌塘地块汇聚碰撞导致中央隆起带的相对隆升与班公湖—怒江洋盆扩大、海水向北侵入在时间上是连续的。而索布查组碳酸盐岩与下伏日干配错组地层之间存在玄武质凝灰岩,且其地质年龄在 206 Ma 左右,且其出现要接近或晚于北羌塘那底岗日组的火山岩(刘池阳等,2016)。这一时间正好在索布查组碳酸盐岩沉积之前,该玄武质凝灰岩应是南北羌塘地块碰撞末期的产物。在此之后,南羌塘盆地北侧岩浆活动趋于沉寂,构造活动减弱,索布查碳酸盐岩沉积期没有热液参与也反映该时期没有岩浆活动,这是稳定被动大陆边缘沉积的标志之一。这一时期南羌塘盆地构造活动主要为盆地南侧的班公湖—怒江缝合带的拉伸,盆地处于拉张状态而导致地壳减薄并开始沉降,形成被动大陆边缘裂陷盆地(陈文西,2007)。南北羌塘地块的汇聚碰撞与班公湖—怒江洋盆的扩张是羌塘盆地十分重要的地质事件,索布查组碳酸盐岩正处于这两次事件转变的节点,索布查碳酸盐岩的出现应为南羌塘地块向北羌塘地块俯冲的结束和班公湖—怒江洋盆开始扩张的标志,海水由南向北推进,南羌塘地区开始进入被动大陆边缘沉积的演化阶段(图 12)。

7 结论

通过对南羌塘坳陷内上三叠统一下侏罗统索布查组碳酸盐岩的地球化学数据进行分析,可以得出

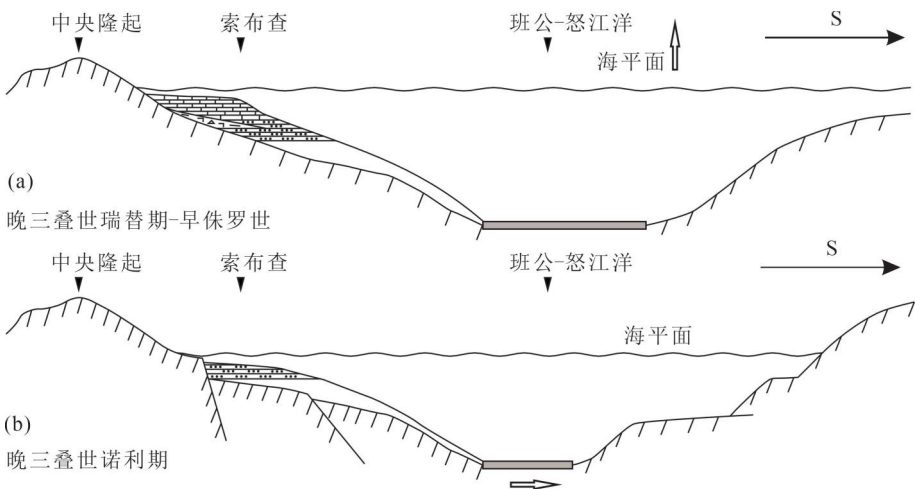


图 12 南羌塘坳陷晚三叠世—早侏罗世沉积—构造模式图 (根据王剑等,2004;陈文西,2007 修改)

Fig. 12 Late Triassic—Early Jurassic sedimentary—tectonic model map in the Southern Qiangtang Depression (Modified from Wang Jian et al., 2004& Chen Wenxi, 2007&)

如下结论:

(1)研究区索布查组碳酸盐岩沉积时处于浅海环境,微量元素特征表明沉积环境主要为氧化环境,水体盐度逐渐增加,沉积水体逐渐变深,其古气候环境表现为炎热干旱的特征。

(2)索布查组碳酸盐岩中的稀土元素主要由陆源碎屑中带入,且稀土元素的没有受到后期成岩作用的影响,稀土元素的特征主要反映陆源碎屑组分的特征,Ce 元素负异常主要受陆源碎屑源区的氧化环境的影响,Eu 元素正异常则是由陆源含长石砂岩风化淋滤出 Eu^{2+} 后由陆源碎屑带入沉积水体导致。

(3)利用能在岩石中稳定存在的元素(ΣREE 、La、Th、Zr、Sc 等)对碳酸盐岩陆源碎屑物质的物源区构造背景判别也具有很好的效果,结合碳酸盐岩中的稀土元素特征以及区域地层特征判断碳酸盐岩中的陆源碎屑组分可能来源于研究区北部中央隆起带附近的上三叠统土门格拉组含长石砂岩。

(4)索布查组碳酸盐岩地层与土门格拉组地层在形成时间上是连续的,南羌塘坳陷南部的班公—怒江洋盆的扩张时期应不晚于晚三叠世瑞替期,索布查碳酸盐岩应为南羌塘坳陷班公湖—怒江洋盆扩张的标志,自此南羌塘坳陷开始进入被动大陆边缘沉积的演化阶段。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

白翔宇,马郡伟,夏清萍,谭先锋,李开开. 2022. 北京西山下苇甸第三统/芙蓉统界线附近碳酸盐岩地球化学特征及古环境意义. 现代地质, 36(2): 729~741.

陈文西. 2007. 羌塘盆地晚三叠世—中侏罗世早期沉积盆地演化. 北京: 中国地质科学院博士论文. 导师: 王剑, 尹福光: 1~98.

范玉海, 屈红军, 王辉, 杨县超, 冯杨伟. 2012. 微量元素分析在判别沉积介质环境中的应用—以鄂尔多斯盆地西部中区晚三叠世为例. 中国地质, 39(2): 120~127.

冯兴雷, 付修根, 谭富文, 陈文彬. 2010. 北羌塘盆地沃若山剖面上三叠统土门格拉组沉积岩地球化学特征与构造背景分析. 现代地质, 24(5): 910~918.

付修根, 王剑, 汪正江, 陈文西. 2007. 藏北羌塘盆地上三叠统那底岗日组与下伏地层沉积间断的确立及意义. 地质论评, 53(3): 329~336.

付修根. 2008. 北羌塘中生代沉积盆地演化及油气地质意义. 导师: 王剑, 谭富文. 北京: 中国地质科学院博士论文: 1~119.

付修根, 王剑, 吴滔, 何江林. 2009. 藏北羌塘盆地大规模古风化壳的发现及其意义. 地质通报, 28(6): 696~700.

付修根, 王剑, 陈文彬, 冯兴雷. 2010. 羌塘盆地那底岗日组火山岩地层时代及构造背景. 成都理工大学学报(自然科学版), 37(6): 605~615.

付修根, 王剑, 谭富文, 陈明, 李忠雄, 陈文彬, 冯兴雷. 2015. 藏

北羌塘盆地油气地质勘探新进展. 沉积与特提斯地质, 35(1): 16~24.

胡俊杰, 李琦, 李娟, 张立, 孔秀, 刘勇. 2014. 羌塘盆地角木日地区二叠系碳酸盐岩元素地球化学特征及其对古沉积环境的指示. 高校地质学报, 20(4): 520~527.

胡明毅, 龚文平, 王志刚, 肖传桃, 姚政道, 张尚峰. 2000. 羌塘盆地三叠系、侏罗系石油地质特征和含油远景评价. 石油实验地质, 22(3): 245~249.

季长军, 伊海生, 夏国清, 谢拓, 尹青, 李启来, 金峰. 2016. 羌塘盆地油藏带特征及勘探意义. 地质科技情报, 35(1): 74~79.

纪占胜, 武桂春, 姚建新, 孙倩, 石秋圆, 何继富, 李浩, 刘振宇, 郭安臣, 侯召硕, 李东泽. 2018. 青藏高原油气勘探战略选区和战术突破目标的建议. 地球学报, 39(4): 387~400.

梁世友, 陈迎宾, 赵国伟, 王彦青, 胡烨. 2017. 四川盆地川西坳陷雷口坡组四段稀土元素地球化学特征及意义. 石油实验地质, 39(1): 94~98.

梁薇, 牟传龙, 郑斌嵩, 周恩恩, 葛祥英, 陈超. 2018. 湘西花垣排碧寒武系混积岩的沉积地球化学特征及陆源碎屑的物源属性. 矿物岩石地球化学通报, 37(4): 760~769.

刘池洋, 郑孟林, 杨兴科, 何碧竹, 任战利, 郭佩. 2016. 羌塘中生代海相盆地演化与后期改造及油气赋存. 地质学报, 90(11): 3259~3281.

南征兵, 张艳玲, 李永铁, 谭富文. 2013. 羌塘中生代盆地演化特征. 天然气地球科学, 24(3): 534~540.

倪善芹, 侯泉林, 王安建, 琚宜文. 2010. 碳酸盐岩中锶元素地球化学特征及其指示意义—以北京下古生界碳酸盐岩为例. 地质学报, 84(10): 1510~1516.

乔德武, 任收麦, 邱海峻, 姜文利. 2011. 中国油气资源勘探现状与战略选区. 地质通报, 30(2~3): 187~196.

孙林华, 桂和荣, 陈松, 马艳平, 王桂梁. 2010. 皖北新元古代贾园组混积岩物源和构造背景的地球化学示踪. 地球学报, 31(6): 833~842.

孙宇翔, 赵峰华, 刘东娜, 邹雨, 宋昌贵, 焦志恒. 2019. 神农架后山坪地区古城组碳酸盐岩地球化学特征及其意义. 矿物岩石地球化学通报, 38(2): 299~307.

谭富荣, 杨创, 尘福艳, 杜芳鹏, 刘志武, 许将, 李居云, 陈应涛, 罗婷婷, 雒铮, 范玉海. 2020. 羌塘盆地巴青地区上三叠统巴贡组沉积相及其对油气等资源的控制. 中国地质, 47(1): 57~71.

汤朝阳, 姚华舟, 段其发, 赵小明. 2008. 羌塘盆地中部晚三叠世地层特征. 地质论评, 54(1): 16~25.

田洋, 赵小明, 王令占, 涂兵, 谢国刚, 曾波夫. 2014. 重庆石柱二叠纪栖霞组地球化学特征及其环境意义. 沉积学报, 32(6): 1035~1045.

王剑, 付修根, 陈文西, 汪正江. 2007. 藏北北羌塘盆地晚三叠世古风化壳地质地球化学特征及其意义. 沉积学报, 25(4): 487~494.

王剑, 付修根, 沈利军, 谭富文, 宋春彦, 陈文彬. 2020. 论羌塘盆地油气勘探前景. 地质论评, 66(5): 1091~1113.

王剑, 付修根, 谭富文, 陈明, 何江林. 2010. 羌塘中生代(T₃—K₁)盆地演化新模式. 沉积学报, 28(5): 884~893.

王剑, 谭富文, 王小龙, 杜佰伟, 陈明. 2004. 藏北羌塘盆地早侏罗世—中侏罗世早期沉积构造特征. 沉积学报, 22(2): 198~205.

王剑, 王忠伟, 付修根, 宋春彦, 谭富文, 韦恒叶. 2022. 青藏高原羌塘盆地首口油气科探井(QK-1)新发现. 科学通报, 67(3): 321~328.

汪凯明, 罗顺社. 2009. 碳酸盐岩地球化学特征与沉积环境判别意

- 义—以冀北坳陷长城系高于庄组为例. 石油与天然气地质, 30(3): 343~349.
- 王永胜, 郑春子. 2007. 藏北色哇地区索布查组、曲色组岩石地层、层序地层、生物地层特征及三叠系与侏罗系界线. 地层学杂志, 31(4): 377~384.
- 汪正江, 王剑, 谭富文, 付修根, 陈文西, 陈明国. 2008. 青藏高原北羌塘盆地上三叠统那底岗日组火山岩的地球化学特征及其意义. 地质通报, 27(1): 83~91.
- 王忠伟, 肖杨, 占王忠, 余飞. 2022. 羌塘盆地东部上三叠统巴贡组泥岩特征及油气地质意义. 东北石油大学学报, 46(2): 1~12+131.
- 吴珍汉, 季长军, 赵珍, 杨易卓. 2019. 羌塘盆地半岛湖—东湖地区主力烃源岩及油气资源潜力. 地质学报, 93(7): 1738~1753.
- 杨晋东, 赵峰华, 秦胜飞, 邹雨, 宋昌贵, 孙宇翔. 2020. 华北克拉通北缘中元古界杨庄组碳酸盐岩地球化学特征及其地质意义. 天然气地球科学, 31(2): 268~281.
- 杨守业, 李从先. 1999. REE 示踪沉积物物源研究进展. 地球科学进展, 14(2): 164~167.
- 杨耀, 刘焰, 王显峰, 苑婷媛. 2016. 南羌塘盆地构造演化及其油气形成与构造保存条件研究. 地质科学, 51(1): 128~148.
- 杨易卓, 赵珍, 吴珍汉, 唐友军. 2020. 西藏羌塘盆地上侏罗统索瓦组油藏发现及地球化学特征. 地质论评, 66(5): 1230~1240.
- 曾胜强, 王剑, 陈文彬, 付修根, 宋春彦, 孙伟, 王东. 2021. 羌塘盆地东部晚三叠世—早中侏罗世沉积环境转变研究—来自地质浅钻岩芯的证据. 地质论评, 67(5): 1231~1244.
- 翟庆国, 李才. 2007. 藏北羌塘菊花山那底岗日组火山岩锆石 SHRIMP 定年及其意义. 地质学报, 81(6): 795~800.
- 张明亮, 郭伟, 沈俊, 刘凯, 周炼, 冯庆来, 雷勇. 2017. 古海洋氧化还原地球化学指标研究新进展. 地质科技情报, 36(4): 95~106.
- 张天福, 孙立新, 张云, 程银行, 李艳锋, 马海林, 鲁超, 杨才, 郭根万. 2016. 鄂尔多斯盆地北缘侏罗纪延安组、直罗组泥岩微量、稀土元素地球化学特征及其古沉积环境意义. 地质学报, 90(12): 3454~3472.
- 赵珍, 陆露, 吴珍汉. 2019. 羌塘盆地中央隆起带的抬升演化: 构造—热年代学约束. 地学前缘, 26(2): 249~263.
- 朱丽霞, 谭富文, 陈明, 付修根, 冯兴雷. 2011. 羌塘盆地那底岗日地区上侏罗统一白垩统碳酸盐岩微量元素与古环境. 成都理工大学学报(自然科学版), 38(5): 549~556.
- Alexander B W, Bau M, Andersson P, Dulski P. 2008. Continently-Derived Solutes in Shallow Archean Seawater: Rare Earth Element and Nd Isotope Evidence in Iron Formation from the 2.9 Ga Pongola Supergroup, South Africa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(2): 378~394.
- Allègre C J, Minster J F. 1978. Quantitative models of Trace Element Behavior in Magmatic Processes. *Earth & Planetary Science Letters*, 38(1): 1~25.
- Bai Xiangyu, Ma Junwei, Xia Qingping, Tan Xianfeng, Li Kaikai. 2022. Geochemistry of Carbonates Near the Cambrian Series 3—Furongian Boundary and Its Paleoenvironmental Constraints. *Geoscience*, 36(2): 729~741.
- Bau M, Dulski P. 1996. Distributions of Yttrium and Rare-earth Elements in the Penge and Kuruman Iron-formation, Transvaal Supergroup, South Africa. *Precambrian Research*, 79(1~2): 37~55.
- Bhatia M R, Crook K A W. 1986. Trace Element Characteristics of Geyaywakes and Tectonic Setting Discrimination of Sedimentary Basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92: 181~193.
- Bhatia M R. 1983. Plate Tectonics and Geochemical Composition of Sandstones. *Jour. Geol.*, 91(4): 611~626.
- Bolhar R, Van Kranendonk M J. 2007. A Non-marine Depositional Setting for the Northern Fortescue Group, Pilbara Craton, Inferred from Trace Element Geochemistry of Stromatolitic Carbonates. *Precambrian Research*, 155(3~4): 229~250.
- Boström M K, Kraemer T, Gartner S. 1973. Provenance and accumulation rates of opaline silica, Al, Ti, Fe, Mn, Cu, Ni and Co in Pacific pelagic sediments. *Chemical Geology*, 11(2): 123~148.
- Calvert S E, Pedersen T F. 1993. Geochemistry of Recent Oxidic and Anoxic Marine Sediments: Implications for the Geological Record. *Marine Geology*, 113(1~2): 67~88.
- Chen Wenxi. 2007. Later Triassic—Middle Jurassic Basin History of Qiangtang, Northern Tibet, China. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. Tutor: Wang Jian, Yin Fuguang: 1~98.
- Dean W E, Gardner J V, Piper D Z. 1997. Inorganic Geochemical Indicators of Glacial—interglacial Changes in Productivity and Anoxia on the California Continental Margin. *Geochim. cosmochim. acta*, 61(21): 4507~4518.
- Debruyne D, Hulsbosch N, Muchez P. 2016. Unraveling Rare Earth Element Signatures in Hydrothermal Carbonate Minerals Using a Source-sink System. *Ore Geology Reviews*, 72(1): 232~252.
- Fan Yuhai, Qu Hongjun, Wang Hui, Yang Xianchao, Feng Yangwei. 2012. The Application of Trace Elements Analysis to Identifying Sedimentary Media Environment: a Case Study of Late Triassic Strata in the Middle Part of Western Ordos Basin. *Geology in China*, 39(2): 120~127.
- Feng Xinglei, Fu Xiugen, Tan Fuwen, Chen Wenbin. 2010. Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Upper Triassic Tumengela Formation in Woruo Mountains, North Qiangtang Basin. *Geoscience*, 24(5): 910~918.
- Fu Xiugen, Wang Jian, Wang Zhengjiang, Chen Wenxi. 2007. Identification of Sedimentary Gap between the Late Triassic Nadi Kangri Formation and Its Underlying Strata in the Qiangtang Basin, Northern Xizang (Tibet) and Its Geological Significance. *Geological Review*, 53(3): 329~336.
- Fu Xiugen. 2008. Evolution of Mesozoic Sedimentary Basin in North Qiangtang and Its Significance in Petroleum Geology. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. Tutor: Wang Jian, Tan Fuwen: 1~119.
- Fu Xiugen, Wang Jian, Wu Tao, He Jianglin. 2009. Discovery of the Large-Scale Paleo-weathering Crust in the Qiangtang Basin, Northern Tibet, China and Its Significance. *Geological Bulletin of China*, 28(6): 696~700.
- Fu Xiugen, Wang Jian, Chen Wenbin, Feng Xinglei. 2010. Age and Tectonic Implications of the Late Triassic Nadi Kangri Volcanic Rocks in the Qiangtang Basin, Northern Tibet, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 37(6): 605~615.
- Fu Xiugen, Wang Jian, Tan Fuwen, Chen Ming, Li Zhongxiong, Chen Wenbin, Feng Xinglei. 2015. Recent Progress in Oil and Gas Geological Exploration in the Qiangtang Basin, Northern Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 35(1): 16~24.
- German C R, Holliday B P, Elderfield H. 1991. Redox Cycling of Rare Earth Elements in the Suboxic Zone of the Black Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(12): 3553~3558.
- Guo Qingjun, Shields G A, Liu Congqiang, Strauss H, Zhu Maoyan, Pi Daohui, Goldberg T, Yang Xinglian. 2007. Trace Element Chemostratigraphy of Two Ediacaran—Cambrian Successions in South China: Implications for Organosedimentary metal Enrichment

- and Silicification in the Early Cambrian. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 254(1~2): 194~216.
- Haskin M A, Haskin L A. 1966. Rare Earths in European Shales: A Redetermination. *Science*, 154(3748): 507~509.
- Herrmann A G, Yurium A L, Wedepohl K H. 1971. *Handbook of geochemistry*. 20p.
- Hu Junjie, Li Qi, Li Juan, Zhang Li, Kong Xiu, Liu Yong. 2014&. *Geochemical Characteristics and Its Application to Depositional Environment Analysis of Permian Carbonates in Jiaomuri Area, Qiangtang Basin*. *Geological Journal of China Universities*, 20(4): 520~527.
- Hu Mingyi, Gong Wenping, Wen Zhigang, Xiao Chuantao, Yao Zhengdao, Zhang Shangfeng. 2000&. *Petroleum Geological Characteristics and Oil-prospect Evaluation of the Trassic and the Jurassic in the Qiangtang Basin, Tibet*. *Experimental Petroleum Geology*, 22(3): 245~249.
- Ji Changjun, Yi Haisheng, Xia Guoqing, Xie Tuo, Yin Qing, Li Qilai, Jin Feng. 2016&. *Characteristics and Exploration Significance of Oil Reservoir in Qiangtang Basin*. *Geological Science and Techology Information*, 35(1): 74~79.
- Ji Zhansheng, Wu Guichun, Yao Jianxin, Sun Qian, Shi Qiuyuan, He Jifu, Li Hao, Liu Zhenyu, Guo Anchen, Hou Zhaoshuo, Li Dongze. 2018&. *Suggestions on the Strategic Selection of Petroleum Target Areas and the Tactic Breakthrough of the Oil and Gas Exploration in the Tibetan Plateau*. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(4): 387~400.
- Liang Shiyong, Chen Yingbin, Zhao Guowei, Wang Yanqing, Hu Ye. 2017&. *Geochemical Characteristics of Rare Earth Elements and Their Geological Significance in the Fourth Member of the Middle Triassic Leikoupo Formation in Western Sichuan Basin*. *Petroleum Geology & Experiment*, 39(1): 94~98.
- Liang Wei, Mou Chuanlong, Zheng Binsong, Zhou Kenken, Ge Xiangying, Chen Chao. 2018&. *Sedimentary Geochemical Characteristics of the Diamictite of Series 3 of Cambrian System in the Paibi Profile, Huayuan County, Hunan Province, China and the Provenance Attribute of Terrigenous Clastics of the Diamictite*. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*. 37(4): 760~769.
- Liu Chiyang, Zheng Menglin, Yang Xingke, He Bizhu, Ren Zhanli, Guo Pei. 2016&. *Evolution and Late Modification of Mesozoic Marine Qiangtang Basin and Its Hydrocarbon Occurrence*. *Acta Geologica Sinica*, 90(11): 3259~3281.
- Nan Zhengbing, Zhang Yanling, Li Yongtie, Tan Fuwen. 2013&. *Evolution Characteristics of the Qiangtang Basin in the Mesozoic Era*. *Natural Gas Geoscience*, 24(3): 534~540.
- Ni Shanqin, Hou Quanlin, Wang Anjian, Ju Yiwen. 2010&. *Geochemical Characteristics of Carbonate Rocks and Its Geological Implications—Taking the Lower Palaeozoic Carbonate Rock of Beijing Area as an Example*. *Acta Geologica Sinica*, 84(10): 1510~1516.
- Nozaki Y, Lerche D, Alibo D S, Snidvongs A. 2000. The estuarine geochemistry of rare earth elements and indium in the Chao Phraya River, Thailand. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(23): 3983~3994.
- Qiao Dewu, Ren Shoumai, Qiu Haijun, Jiang Wenli. 2011&. *The Present Situation of Oil & Gas Resources Exploration and Strategic Selection of Potential Area in China*. *Geological Bulletin of China*, 28(2~3): 187~196.
- Rimmer S M. 2004. *Geochemical Paleoredox Indicators in Devonian—Mississippian Black Shales, Central Appalachian Basin (USA)*. *Chemical Geology*, 206(3~4): 373~391.
- Robbins L J, Lalonde S V, Planavsky N J, Partin C A, Reinhard C T, Kendall B, Scott C, Hardisty D S, Gill B C, Alessi D S, Dupont C L, Saito M A, Crowe S A, Poulton S W, Bekker A, Lyons T W and Konhauser K O. 2016. Trace elements at the intersection of marine biological and geochemical evolution. *Earth—Science Reviews*, 163: 323~348.
- Roser B P, Cooper R A, Nathan S, Tulloch A J. 1996. Reconnaissance Sandstonegeochemistry, Provenance, and Tectonic Setting of the Lower Paleozoic Terranes of the West Coast and Nelson, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 39(1): 1~16.
- Scheffler K A, Buehmann D B, Schwark L C. 2006. Analysis of Late Palaeozoic Glacial to Postglacial Sedimentary Successions in South Africa by Geochemical Proxies—Response to Climate Evolution and Sedimentary Environment. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 240(1~2): 184~203.
- Shields G, Stille P. 2001. Diagenetic Constraints on the Use of Cerium Anomalies as Palaeoseawater Redox Proxies: An isotopic and REE Study of Cambrian Phosphorites. *Chemical Geology*, 175(1~2): 29~48.
- Sun Linhua, Gui Herong, Chen Song, Ma Yanping, Wang Guiliang. 2010&. *Provenance and Tectonic Setting of the Neoproterozoic Diamictites from Jiayuan Formation in Northern Anhui Province: Evidence from Geochemical Study*. *Acta Geoscientica Sinica*. 31(6): 833~842.
- Sun Yuxiang, Zhao Fenghua, Liu Dongna, Zou Yu, Song Changgui, Jiao Zhiheng. 2019&. *Geochemical Characteristics of Carbonates in the Gucheng Formation in the Houshanping Area of Shennongjia and its Significance*. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 38(2): 299~307.
- Tan Furong, Yang Chuang, Chen Fuyan, Du Fangpeng, Liu Zhiwu, Xu Jiang, Li Juyun, Chen Yingtao, Luo Tingting, Luo Zheng, Fan Yuhai. 2020&. *Sedimentary Facies and Its Control over Petroleum and Other Resources of Upper Triassic Bagong Formation in Baqing Area, Southeastern Qiangtang Basin*. *Geology in China*, 47(1): 57~71.
- Tang Chaoyang, Yao Huazhou, Duan Qifa, Zhao Xiaoming. 2008&. *Sedimentary Characteristic of the Late Triassic Strata in the Central Qiangtang*. *Geological Review*, 54(1): 16~25.
- Tian Yang, Zhao Xiaoming, Wang Lingzhan, Tu Bing, Xie Guogang, Zeng Bofu. 2014&. *Geochemical Characteristics and Its Paleoenvironmental Implication of Permian Qixia Formation in Shizhu, Chongqing*. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(6): 1035~1045.
- Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, Riboulleau A. 2006. Trace Metals as Paleoredox and Paleoproductivity Proxies: An Update. *Chemical Geology*, 232(1~2): 12~32.
- Turekian K K, Wedepohl K H. 1961. Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust. *GSA Bulletin*, 72(2): 175~192.
- Wang Jian, Tan Fuwen, Wang Xiaolong, Du Baiwei, Chen Ming. 2004&. *The Sedimentary and Tectonic Characteristics of Qiangtang Basin in the Early Jurassic in Northern Xizang (Tibet)*. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(2): 198~205.
- Wang Jian, Fu Xiugen, Chen Wenxi, Wang Zhengjiang. 2007&. *The Late Triassic Paleo-weathering Crust in the Qiangtang Basin, Northern Tibet: Geology, Geochemistry and Significance*. *Acta Sedimentologica Sinica*, 25(4): 487~494.
- Wang Jian, Fu Xiugen, Tan Fuwen, Chen Ming, He Jianglin. 2010&.

A New Sedimentary Model for the Qiangtang Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(5): 884~893.

Wang Jian, Fu Xiugen, Shen Lijun, Tan Fuwen, Song Chunyan, Chen Wenbin. 2020&. Prospect of the potential of oil and gas resources in Qiangtang Basin, Xizang(Tibet). *Geological Review*, 66(5): 1091~1113.

Wang Jian, Wang Zhongwei, Fu Xiugen, Song Chunyan, Tan Fuwen, Wei Hengye. 2022&. New Discoveries on the First Petroleum Scientific Drilling (QK-1) of the Qiangtang Basin, Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 67(3): 321~328.

Wang Kaiming, Luo Shunshu. 2009&. Geochemical Characters of Carbonates and Indicative Significance of Sedimentary Environment——An Example from the Gaoyuzhuang Formation of the Changcheng System in the Northern Hebei Depression. *Oil & Gas Geology*, 30(3): 343~349.

Wang Yongsheng, Zheng Chunzi. 2007&. Lithostratigraphy, Sequence Stratigraphy, and Biostratigraphy of the Suobucha and Quse Formations and the Triassic—Jurassic Boundary in the Sewa Area on the South Margin of the Qiangtang Basin, Northern Tibet. *Journal of Stratigraphy*, 31(4): 377~384.

Wang Zhengjiang, Wang Jian, Tan Fuwen, Fu Xiugen, Chen Wenxi, Chen Ming. 2008&. Geochemical Characteristics of Volcanic Rocks of the Upper Triassic Nadi Kangri Formation in the North Qiangtang Basin, Qinghai—Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 27(1): 83~91.

Wang Zhongwei, Xiao Yang, Zhan Wangzhong, Yu Fei. 2022&. Geochemical Characteristics of the Upper Triassic Bagong Formation mudstones in Eastern Qiangtang Basin and Its Petroleum Geological Significance. *Journal of Northeast Petroleum University*, 46(2): 1~12+131.

Wu Zhenhan, Ji Changjun, Zhao Zhen, Yang Yizhuo. 2019&. Main Source Rock and Oil Resource Potential of the Bandaohu—Donghu Area in the Northern Qiangtang Basin. *Acta Geologica Sinica*, 93(7): 1738~1753.

Yang Jindong, Zhao Fenghua, Qin Shengfei, Zhou Yu, Song Changgui, Sun Yuxiang. 2020&. Geochemical Characteristics and Geological Significance of Carbonate Rocks in the Middle Mesoproterozoic Yangzhuang Formation of Northern Margin of North China Craton. *Natural Gas Geoscience*, 31(2): 268~281.

Yang Shouye, Li Congxian. 1999&. Research Progress in REE Tracer for Sediment Source. *Advance in Earth Science*, 14(2): 164~167.

Yang Yao, Liu Yan, Wang Xianfeng, Yuan Tingyuan. 2016&. Oil—gas Formation, Preservation and Tectonic Evolution of the Southern Qiangtang Basin. *Chinese Journal of Geology*, 51(1): 128~148.

Yang Yizhuo, Zhao Zhen, Wu Zhenhan, Tang Youjun. 2020&. Discovery and Geochemical Characteristics of the Upper Jurassic Suowa Formation Reservoir in Qiangtang Basin, Xizang (Tibet). *Geological Review*, 66(5): 1230~1240.

Zeng Shengqiang, Wang Jian, Chen Wenbin, Fu Xiugen, Song Chunyan, Sun Wei, Wang Dong. 2021&. Late Triassic to Early—Middle Jurassic Depositional Environment Transformation Process Study in the Eastern Qiangtang Basin: Evidence from the Record by the Core Samples. *Geological Review*, 67(5): 1231~1244.

Zhai Qingguo, Li Cai. 2007&. Zircon SHRIMP Dating of Volcanic Rock from the Nadigangri Formation in Juhua Shan, Qiangtang, Northern Tibet and Its Geological Significance. *Acta Geologica Sinica*, 81(6): 795~800.

Zhang Kaijun, Cai Jianxin, Zhang Yuxiu, Zhao Taiping. 2006. Eclogites from central Qiangtang, northern Tibet (China) and tectonic implications. *Earth & Planetary Science Letters*, 245(3~4): 722~729.

Zhang Mingliang, Guo Wei, Shen Jun, Liu Kai, Zhou Lian, Feng Qinglai, Lei Yong. 2017&. New Progress on Geochemical Indicators of Ancient Oceanic Redox Condition. *Geological Science and Technology Information*. 36(4): 95~106.

Zhang Tianfu, Sun Lixin, Zhang Yun, Chen Yinhang, Li Yanfeng, Ma Hailin, Lu Chao, Yang Cai, Guo Genwan. 2016&. Geochemical Characteristics of the Juraasic Yan'an and Zhiluo Formation in the Northern Margin of Ordos Basin and Their Paleoenvironmental Implications. *Acta Geologica Sinica*, 90(12): 3454~3472.

Zhao Zhen, Lu Lu, Wu Zhenhan. 2019&. Uplifting Evolution of the Central Uplift belt, Qiangtang: Constraints from Tectonothermochronology. *Earth Science Frontiers*, 26(2): 249~263.

Zhu Lixia, Tan Fuwen, Chen Ming, Fu Xiugen, Feng Xinglei. 2011&. Trace Element in Carbonate Rocks and the Palaeoenvironment During the Late Jurassic—Early Cretaceous in the Nadigangri Area of Qiangtang Basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 38(5): 549~556.

Element geochemical characteristics and their indicative significance of the Upper Triassic—Lower Jurassic carbonate rocks in the Southern Qiangtang Depression

TAN Mei¹⁾, JI Changjun²⁾, ZHOU Bingyang³⁾, KANG Shaowei⁴⁾

1) *Chongqing Natural History Museum, Chongqing, 400700;*

2) *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081;*

3) *Hubei Institute of Geosciences, Wuhan, 430000;*

4) *Shaanxi Coal Geology Group Co. Ltd., Xi'an, 710021*

Objective: Sedimentary discontinuities exist between almost all of the Triassic and Jurassic stratas in the South Qiangtang Depression. The research on the stratas in this period has great significance to the sedimentary environment and its evolution. In this paper, the sedimentary environment and evolution characteristics of the study area are discussed by the analysis of the geochemical elements of the carbonate rocks of Upper Triassic—Lower

Jurassic.

Methods: The sedimentary environment of the rock was analyzed by the ratio value of V/Cr, Ni/Co, Sr/Ba, $1000\times\text{Sr/Ca}$, Sr/Cu et al. The source of REEs was analyzed by using the correlation between $\sum\text{REE}$ and the content of Al_2O_3 , Ti, Zr, CaO, Na_2O and Sr; the tectonic background of the provenance area were analyzed by using La—Th—Sc and Th—Sc—Zr/10 diagrams; the source of carbonate terrigenous clastic material were analyzed by using chondrite standardized pattern map of REE and $\sum\text{REE}-\text{La/Yb}$ diagrams.

Results: Through the elemental analysis of Sobucha carbonate rocks in the Upper Triassic—Lower Jurassic. After removing the influence of terrestrial components, the V/Cr value is distributed in 0.04~0.47, the Ni/Co value is distributed in 0.16~5.38, the Sr/Ba value is distributed in 101.33~277.45, and the $1000\times\text{Sr/Ca}$ value is distributed in 1.30~1.82, the Sr/Cu average value is more than 10. The $\sum\text{REEs}$ have positive correlation with Al_2O_3 , Ti and Zr, but have no correlation with CaO, Na_2O and Sr. The Ce and δCe have positive correlation with Al, the correlation coefficients are 0.98 and 0.77 but have no correlation with Ca. The Eu also have positive correlation with Al, K, the correlation coefficients are 0.93 and 0.88.

Conclusion: The Suobucha carbonate rocks were deposited in an oxidative environment, the paleo-salinity of the sedimentary water gradually increased, and the paleo-water depth also gradually increased. Rare earth elements are mainly derived from feldspar-bearing terrigenous clastic components. The Ce negative anomaly is related to the oxidative environment during the deposition of terrigenous clastic source rocks, and the Eu positive anomaly may be caused by the weathering and leaching of feldspar-bearing source rocks. The La—Th—Sc and Th—Sc—Zr/10 diagrams show that the terrigenous detrital components have the tectonic setting of continental island arcs. The chondrite normalized model of REE and the $\sum\text{REE}-\text{La/Yb}$ diagrams show that the terrigenous detrital components were mainly from the same sedimentary rocks. Combining the tectonic evolution and regional stratigraphic characteristics of the Qiangtang Basin, it is inferred that the source area of terrigenous clasts in the carbonate rocks is the Upper Triassic Tumengla Formation near the Central Uplift Belt, and the continental island arc structural background characteristics of terrigenous clasts are inherited in the clastic rocks of the Tumengla Formation. The Sobucha carbonate rock should be a sign of the expansion of the Bangong Lake—Nujiang ocean basin, and its formation indicates that the South Qiangtang Depression has entered the evolutionary stage of passive continental margin deposition.

Keywords: south Qiangtang depression; Late Triassic—Early Jurassic; carbonate rocks; elements analysis

Acknowledgement: This study was supported by the second-level project of China Geological Survey "Oil and Gas Geological Survey Project in Amucuo Depression, Qiangtang Basin" (No. DD20221855), the second-level project of China Geological Survey "Oil and Gas Geological Survey in Longweicuo Area, Northern Qiangtang" (No. DD20211343), the scientific research project of Shaanxi Coal Geology Group Co., Ltd. "Evaluation of Oil and Gas Geological Areas in Key Blocks of Qiangtang" (No. SCG20211201) and the Chinese Academy of Geological Sciences Fundamental Research Funds "Survey of paleo-reservoir in the Qiangtang Basin and Research on the Mechanism of Accumulation" (No. JKY202209)

First author: TAN Mei, female, born in 1989, master's degree, mainly engaged in research work of sedimentology, stratigraphy and paleontology; Email: 1280273215@qq.com

Corresponding author: JI Changjun, male, born in 1986, doctor's degree, associate researcher, mainly engaged in research work of petroleum geology and sedimentary geology; Email: jichangjun2007@sina.com

Manuscript received on: 2022-06-27; Accepted on: 2022-11-18; Network published on: 2022-12-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2022.12.011 **Edited by:** LIU Zhiqiang