

乌恰康苏河剖面上部沉积特征及其古海洋环境

刘娜¹, 张振国^{2*}, 高莲凤², 劳海港¹, 常国民¹, 董桂玉¹, 冷春鹏¹

¹华北理工大学矿业工程学院, 河北 唐山

²辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁 阜新

Email: liuna0329yu@163.com, *zzg0351@163.com

收稿日期: 2021年6月25日; 录用日期: 2021年7月19日; 发布日期: 2021年7月26日

摘要

乌恰康苏河剖面位于我国油气勘探重点的塔里木盆地西南边缘, 晚白垩世初期新特提斯洋海侵造成该区域发育大面积的海相沉积。本文以康苏河剖面为研究对象, 开展岩石学、地球化学等方面的分析。依据岩石学和样品主、微量和稀土元素特征显示, 研究区的沉积环境物源供应充分, 母岩以沉积岩-花岗岩为主, 伴有玄武岩, 沉积环境为气候温暖、湿润、风化强烈、沉积速率较高、古生产力增加的浅海环境; 应用TiO₂-(Fe₂O₃ + MgO)、La-Th-Sc沉积构造背景判别图解得出, 构造环境相对复杂, 为大陆边缘沉积特征, 且源岩类型主要为花岗岩与沉积岩的混合。

关键词

塔西南盆地, 元素地球化学, 构造背景, 物源分析

Sedimentary Characteristics and Palaeo-Marine Environment of Upper Kangsu River Section in Wuqia

Na Liu¹, Zhenguo Zhang^{2*}, Fenglian Gao², Haigang Lao¹, Guomin Chang¹, Guiyu Dong¹, Chunpeng Leng¹

¹School of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan Hebei

²School of Mines, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning

Email: liuna0329yu@163.com, *zzg0351@163.com

Received: Jun. 25th, 2021; accepted: Jul. 19th, 2021; published: Jul. 26th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 刘娜, 张振国, 高莲凤, 劳海港, 常国民, 董桂玉, 冷春鹏. 乌恰康苏河剖面上部沉积特征及其古海洋环境[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(7): 971-983. DOI: 10.12677/ag.2021.117093

Abstract

The Kangsu River section of Wuqia is located in the southwest margin of Tarim Basin which is the key oil and gas exploration area in China. The Neo-Tethys transgression in the early stage of Late Cretaceous resulted in the development of large area of Marine sediments in this area. In this paper, the Kangsu River section is taken as the research object to carry out petrological and geochemical analysis. According to petrology and the characteristics of major trace elements and rare earth elements of the sample, the sedimentary environment in the study area has sufficient provenance supply. The parent rocks are mainly sedimentary rock-granite accompanied by basalt, and the sedimentary environment is shallow sea environment with warm and humid climate, strong weathering and high deposition rate and increased palaeo-productivity; based on the discriminant diagram of $TiO_2-(Fe_2O_3 + MgO)$ and La-Th-Sc sedimentary tectonic background, the tectonic environment is relatively complex, the continental island arc type is dominant, and the sedimentary features of continental margin, and the source rock type is mainly the mixture of granite and sedimentary rock.

Keywords

Southwestern Tarim Basin, Geochemistry of Element, Tectonic Setting, Provenance Analysis

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

塔里木盆地是我国海相白垩系连续发育并出露良好的少数地区之一。自元古代晚期 800 Ma 的地质演化过程中, 沉积地层厚度累计高达 1 万米, 具备形成超大型巨型油气资源的客观条件和物质基础。其中以塔西南地区的油气资源最为丰富, 中生界地层发育良好, 具有优质的烃源岩、储集岩以及盖层。在白垩纪后期经历特提斯的海侵, 淹没了欧亚大陆东南部的塔西南, 物源从南天山褶皱带和昆仑山褶皱带到达塔西南, 因此晚白垩世开始发育海相沉积[1] [2]。

由于塔西南盆地整体埋深大, 后期构造运动剧烈, 导致盆地格局破碎, 增加了盆地恢复的难度。同时, 研究区地处偏远, 自然环境恶劣, 地质工作开展的时间较晚, 从 19 世纪 20 年代开始对塔里木盆地进行初步的科学考察, 塔里木盆地在近些年主要开展了高精度的年代学和高分辨率的古环境研究。通过国内外大批学者几十年的不懈努力, 为深入开展塔里木盆地环境演化研究提供了扎实的基础, 主要包括以下五个方面: 塔西南地区侏罗 - 白垩纪原型盆地的恢复、塔西南山前侏罗 - 白垩纪的沉积特征与环境演化、塔西南地区白垩系的地层划分对比和层序地层研究、塔西南山前侏罗 - 白垩系物源分析与古地理重建以及塔里木西缘晚白垩世海侵事件等[3]-[8], 对于古海洋环境研究相对薄弱。

2. 区域地质背景

2.1. 地层划分

塔西南地区乌恰康苏河的白垩系岩石地层单位自下而上依次为: 克孜勒苏群和英吉沙群的库克拜组、乌依塔格组和依格孜牙组[9]。

克孜勒苏群岩性主要为砖红色砾岩、砂质泥岩，夹少量灰绿色粉砂岩、泥岩，出现砂岩夹泥岩沉积，与下伏侏罗统呈不整合或假整合接触。英吉沙群的库克拜组(K₂k)下部以棕褐色泥岩、粉砂岩和砂岩，上部以灰绿、棕红色泥岩、粉砂质泥岩、黑色页岩及生物灰岩，泥岩中存在丰富的有孔虫、介形虫类等，黑色页岩段可能属海侵高潮时的产物，与克孜勒苏群呈整合接触。乌依塔格组(K₂w)与下伏库克拜组的界线是红色的颜色突变，岩性多为膏泥岩、泥质粉砂岩，部分层位含石膏，砂岩透镜体，与库克拜组砂岩整合接触。依格孜牙组(K₂y)岩性相对稳定，主要为褐红色厚层泥岩、砂质灰岩夹少量灰色泥质砂岩及含膏质泥岩，富含多种钙藻类、有孔虫等化石。研究区位置见图 1 所示。

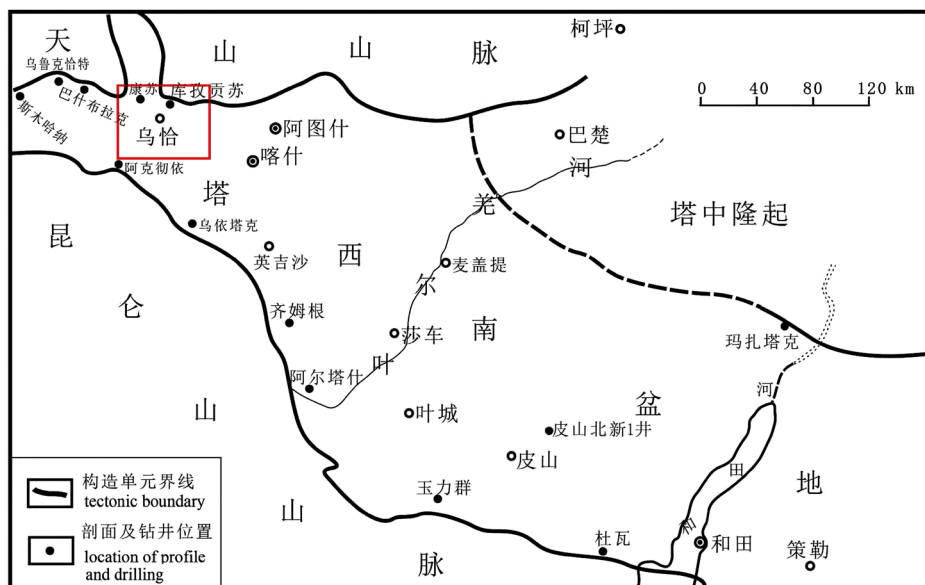


Figure 1. Sketch map of the study area showing the locations of sampling sections
图 1. 研究区采样剖面位置图

2.2. 地层剖面简述

康苏河剖面(见图 2)位于塔里木盆地西南地区乌恰县以东，坐标位置为：39°41'40"N，75°4'48"E，海拔：2120 米。地层层序自上而下为：

- | | |
|----------------------------|--------|
| 23. 褐红色砂质膏泥岩与泥质砂岩互层..... | 0.2 m |
| 22. 灰色砂质泥岩夹薄层红褐色泥岩 | 0.2 m |
| 21. 褐色泥岩夹红褐色泥岩..... | 0.42 m |
| 20. 灰黑色粉砂质泥岩夹细砂岩透镜体..... | 0.1 m |
| 19. 红褐色泥岩夹砂质泥岩..... | 0.23 m |
| 18. 灰黄色粉砂质泥岩..... | 0.26 m |
| 17. 灰黑色块状泥岩，底部为灰白色粉砂岩..... | 0.52 m |
| 16. 灰黄色粉砂岩夹砂岩透镜..... | 0.4 m |
| 15. 灰黄色粉砂质泥岩..... | 0.2 m |
| 14. 灰白色厚层粉砂质泥岩..... | 0.35 m |
| 13. 红棕色粉砂岩..... | 0.3 m |
| 12. 灰黑色页岩夹黄褐色泥岩..... | 0.3 m |

- 11. 灰黑色页岩夹砂岩透镜体.....0.5 m
- 10. 灰色 - 灰黑色粉砂质泥岩和泥岩.....0.25 m
- 9. 红褐色砂质泥岩与灰黄色泥岩互层.....0.2 m
- 8. 灰黑色页岩夹灰岩透镜体.....0.1 m
- 7. 灰黄色粉砂岩.....0.15 m
- 6. 灰黑色页岩夹灰岩透镜体.....0.2 m
- 5. 薄层黄褐色粉砂质泥岩.....0.05 m
- 4. 灰黑色页岩夹灰岩透镜体.....0.2 m
- 3. 灰黄色泥岩与灰黑色页岩互层.....0.35 m
- 2. 灰黑色页岩夹灰岩透镜体.....0.3 m
- 1. 灰黄色 - 褐色粉砂岩.....0.15 m

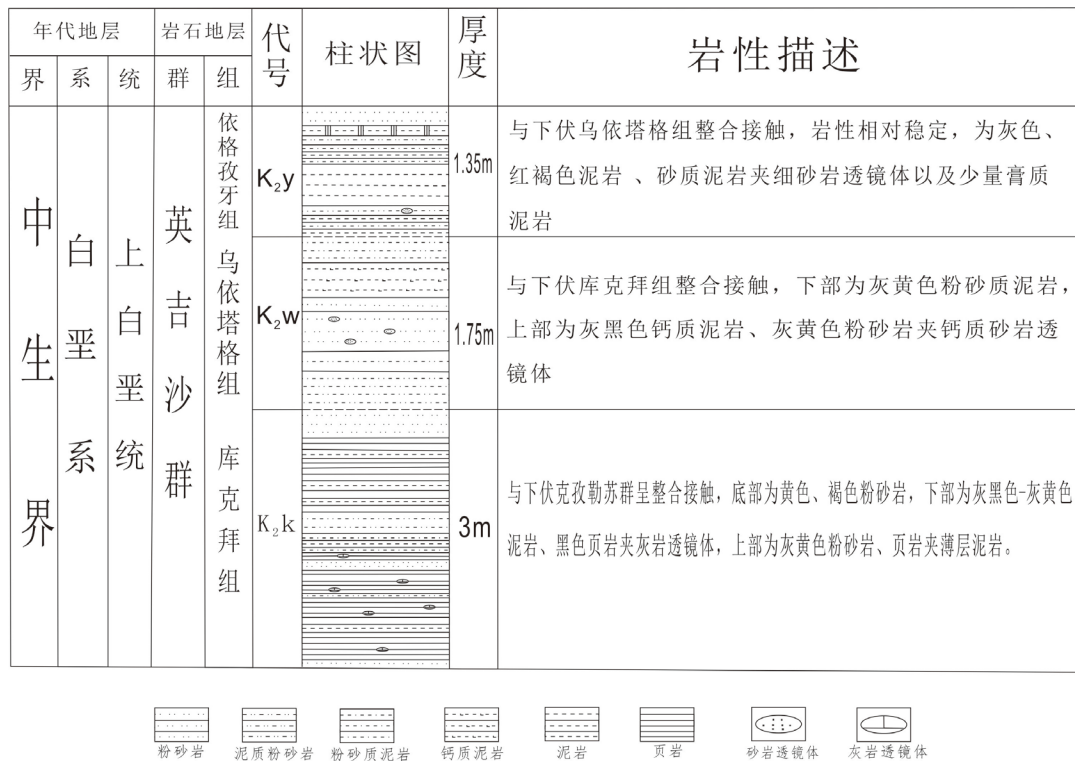


Figure 2. The measured stratigraphic histogram of Kangsu River
图 2. 康苏河实测地层柱状图

3. 元素地球化学分析

3.1. 常量元素地球化学特征

常量元素通常都包括 SiO₂、Al₂O₃、K₂O、Fe₂O₃ 等，不同环境下常量元素表现的特征也不同，可反映沉积环境的变化以及大地构造背景[10] [11]。Fe²⁺与 Fe³⁺的含量可以反映沉积环境的氧化还原条件；K 与 Na 为碱金属元素，依据与黏土矿物的吸附量大小来判别，K 的吸附量更大，当 K/Na 值越大，古盐度越高[12] [13] [14]；由于锰离子的稳定性更好，铁离子更早沉淀，因此 Mn 在深海区域更易富集，Fe 多在浅水区或离岸近的区域富集，即 Fe/Mn 比值可以指示水深，比值越大，水体越浅[15] [16]，Fe/Mn 比值与

古气候也有着良好的耦合关系；MgO 与 Al₂O₃ 的亲海性与亲陆性，可以用 $m = 100 \times (\text{MgO})/(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 判别沉积环境，m 值的大小可指示盐度，进而判别淡水向海水过渡的沉积环境[17] [18]。

康苏河剖面样品常量元素含量及其特征分见表 1 与表 2。

Table 1. Major element contents of the samples from the upper part of Kangsu River section

表 1. 康苏河剖面上部样品常量元素含量表

样品 编号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI
	w%											
1-1	37.56	8.75	35.99	0.65	1.54	0.54	0.38	2.22	2.24	0.39	0.29	12.49
1-2	63.63	17.73	2.17	2.91	2.52	0.32	0.93	3.61	0.08	0.76	0.18	5.29
1-3	63.61	17.18	1.17	2.49	1.54	0.35	0.35	3.24	0.04	0.67	0.09	9.34
1-4	63.98	17.7	1.39	3.56	2.55	0.42	0.78	3.74	0.03	0.65	0.25	4.92
1-5	61.28	19.15	2.14	1.66	1.75	0.33	0.29	3.69	0.01	0.73	0.09	9.03
1-6	59.86	19.88	2.93	2.19	2.24	0.27	0.53	4.09	0.04	0.73	0.09	7.27
1-7	84.55	6.72	0.57	0.99	0.44	0.99	0.32	0.97	0.03	0.28	0.62	3.54
1-8	63.04	12.37	10.18	1.19	1.22	0.41	0.43	2.61	0.32	0.62	0.17	8.35
1-9	60.49	19.79	2.29	3.35	2.76	0.29	0.67	4.49	0.04	0.71	0.15	5.17
1-10	60.51	16.30	6.54	1.74	1.55	0.28	0.49	3.44	0.07	0.70	0.14	8.87
1-11	58.39	19.09	4.74	2.41	2.37	0.47	0.61	4.24	0.17	0.69	0.24	6.99
1-12	64.63	8.84	13.79	0.93	1.17	1.36	0.83	2.22	0.32	0.49	0.91	5.73
1-13	59.58	19.82	1.29	2.38	1.87	0.56	0.43	4.26	0.01	0.84	0.29	8.77
1-14	73.63	13.45	0.73	1.71	1.23	0.53	0.58	3.22	0.01	0.53	0.29	4.09
1-15	65.49	16.56	1.36	1.84	1.49	0.59	0.52	3.49	0.01	0.72	0.28	7.69
1-16	56.89	10.37	19.14	0.74	0.94	0.81	0.59	2.34	0.56	0.51	0.45	8.22
1-17	61.26	18.51	1.71	2.06	1.96	0.34	0.49	3.95	0.02	0.73	0.14	8.99
1-18	59.69	17.31	5.17	1.56	1.62	0.37	0.49	3.71	0.09	0.71	0.18	9.57
1-19	59.78	19.55	1.29	2.25	1.86	0.24	0.37	3.85	0.02	0.73	0.13	10.01
1-20	91.59	3.21	1.91	0.29	0.18	0.19	0.24	0.66	0.01	0.26	0.04	1.59
1-21	75.07	11.13	2.43	1.16	1.09	0.45	0.76	2.67	0.07	0.52	0.27	4.55
1-22	69.71	13.29	1.42	1.97	1.18	0.29	0.48	2.54	0.09	0.63	0.19	8.24
1-23	75.21	11.86	2.32	0.98	0.94	0.58	0.69	2.82	0.03	0.45	0.44	3.89
1-24	61.97	17.64	3.44	1.57	1.58	0.22	0.39	3.66	0.19	0.67	0.12	8.89
1-25	62.54	17.59	1.88	3.05	2.49	1.26	0.81	3.61	0.05	0.63	0.96	5.26
1-26	61.79	18.99	2.31	2.19	1.88	0.21	0.57	4.17	0.07	0.74	0.11	7.08
1-27	59.45	17.32	5.54	2.24	1.81	0.26	0.47	3.59	0.17	0.72	0.15	8.69
1-28	64.43	10.65	4.80	5.29	1.53	1.03	0.59	2.29	0.38	0.57	0.56	8.35
1-29	62.19	16.26	4.06	2.14	1.43	0.23	0.85	3.26	0.15	0.69	0.13	8.95
1-30	49.16	8.79	11.77	9.54	2.10	1.14	0.46	2.08	1.04	0.43	0.47	14.01

Table 2. Characteristics of major element content of the samples from the upper part of Kangsu River section
表 2. 康苏河剖面上部样品常量元素含量特征

参数 类型	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅
	w%										
最高值	91.59	19.88	35.99	9.54	2.76	1.36	0.93	4.49	2.24	0.84	0.96
最低值	37.56	3.21	0.57	0.29	0.18	0.19	0.24	0.66	0.01	0.26	0.04
平均值	63.75	14.65	6.03	2.40	1.62	0.53	0.55	3.12	0.27	0.61	0.29

塔西南盆地的康苏河剖面的沉积物中, SiO₂ 的含量比较高, 大部分都 60%以上, 说明剖面富含长石, 石英等, 且矿物成分成熟度比较高, 同时表明陆源供给充足, 距离物源区较近; 康苏河剖面沉积物中 Fe²⁺ 的含量小于 Fe³⁺, Fe²⁺/Fe³⁺ ≈ 0.399, 反映氧化环境; K/Na = 5.67, K/Na 出现上下波动(图 3), 体现水体的动荡, 剖面自下而上盐度相对降低; 剖面沉积岩中 ΣFe 的平均含量远大于 ΣMn 的平均含量, Fe/Mn ≈ 28.06, 剖面自下而上, 比值减小(图 3), 指示浅海或近海沉积且气候温湿, 水体深度增加; 样品的 m 值介于 5.7~23.89 之间, 大部分 m 值大于 10, 即为海相沉积环境。

3.2. 微量元素地球化学特征

微量元素是一种良好的地球化学示踪剂, 可指示沉积物演化过程中的水体深浅、氧化还原环境、盐度、古生产力、古气候乃至追溯构造背景演化。

微量元素在不同沉积环境的相带组合不同, 从滨海沉积环境的 Fe 族(Fe、Cr、V、Ge)到水解性元素(Al、Ti、Zr、Ga、Nb)组合再到亲硫性元素(Pb、Zn、Cu、As)组合, 最终过渡成深海沉积的 Mn 族元素(Mn、Co、Ni、Mo)。V/(V + Ni)、V/Cr 和 U/Th [19] [20] [21]的比值可判断氧化还原环境(表 3)。利用 Cu、Zn、Ba 来表征古生产力, 尤其是 Ba 常以 BaSO₄ 形式存在, 迁移能力差, 保存时间长且损耗少, 其含量与上覆水体的生物通量有关, 沉积有机质含量越多, 相对应的沉淀的 BaSO₄ 越多, 说明古生产力水平越高[22] [23] [24] [25]。Rb/Sr、Sr/Cu 等比值变化与古气候有着相关耦合关系, 来反映气候的干旱和潮湿[26] [27]。当 Sr/Cu 大于 10 时表现为干热的条件, 当 1 < Sr/Cu < 10 时则表现为温暖潮湿的环境。

研究区具有指标性意义的微量元素含量如表 4 所示, 测试数据显示, 剖面沉积物中 Cr、V 的含量相对较多, 指示为滨浅海沉积环境; V/Cr、U/Th 的值分别为 1.34、0.41, 指示为氧化的海底环境。但 V/(V + Ni)值在 0.62~0.81 之间, 平均值为 0.75, 指示贫氧环境, 与出现黑色页岩相对应, 可能与大洋缺氧事件 OAE-2 有关; 除个别样品外, Ba 元素含量基本保持稳定, 平均值为 578.33 × 10⁻⁶, 其剖面下部低于上部, 即古生产力增大; 30 个样品中 Sr/Cu 的值均大于 1 小于 10, 则表明沉积时期为温暖潮湿的环境且保持稳定。

Table 3. Judging indexes of trace elements in paleoredox

表 3. 古氧相微量元素判别指标

判别指标	缺氧		富氧
	厌氧	贫氧	
V/(V + Ni)	>0.6	0.46~0.6	<0.46
V/Cr	>4.25	2.00~4.25	<2.00
U/Th	>1.25	0.75~1.25	<0.75

Table 4. Trace element contents of the samples from the upper part of Kangsu River section
表 4. 康苏河剖面上部样品微量元素含量表

样品 编号	Sc	V	Cr	Mo	Ni	Co	Cu	Zn	Rb	Sr	Ba	Hf	Th	U
	μg/g													
1-1	25.7	107	69.3	1.50	38.6	13.2	24.5	57.2	88.8	124	435	2.63	13.9	5.83
1-2	16.5	102	94.3	0.68	34.1	15.3	35.3	109	157	72.9	643	4.34	12.6	3.99
1-3	14.9	95.4	83.9	0.97	47	16.3	63.8	177	153	97.9	524	4.07	15.8	4.39
1-4	17.4	94.9	81.7	0.22	29.4	8.99	23.4	94.6	164	60.3	620	3.31	10.9	3.43
1-5	17.2	152	96.5	0.58	39.7	7.55	54.4	122	171	110	555	4.21	16.9	4.22
1-6	19.7	115	109	0.51	37.8	11	42.8	116	190	87.5	741	4.19	15.2	3.47
1-7	5.29	36.3	33.3	0.62	22.4	13.4	19.8	62.4	44.8	31.8	194	1.97	4.94	2.95
1-8	13.9	91.2	73.2	0.83	27.9	11.4	59.7	79.1	123	96	509	4.43	13.3	5.16
1-9	20.6	137	119	0.26	35.7	9.86	54.7	109	202	85	856	3.37	13.8	2.18
1-10	16.2	105	83.1	1.2	38.9	17.2	50.7	103	162	93.4	675	4.32	16.4	4.31
1-11	19.8	109	99.9	0.66	35.8	14.9	38.7	92.2	190	85.1	806	4.03	15.9	3.49
1-12	12.2	71.2	55.3	0.34	16.9	6.36	19.3	48.8	84.7	58.7	419	3.21	10.4	3.48
1-13	15.6	125	107	0.77	37.4	9.7	57.8	97.30	187	107	749	5.06	24.1	4.53
1-14	10.1	79.1	60.4	0.27	18.7	5.7	18.8	50.1	117	51.6	598	2.9	8.17	2.1
1-15	13.8	104	88.8	0.75	35.4	8.13	64	82.3	158	93.4	599	4.51	17.1	3.76
1-16	23.5	113	72.5	0.98	33.8	15.1	28.5	82.2	104	97.1	474	3.15	11.1	4.92
1-17	17.6	129	106	0.69	40.8	9.65	52.8	78.4	177	112	707	4.26	20.5	4.31
1-18	17.5	135	99.6	0.93	43.9	15.2	53.9	86.2	171	113	666	4.16	17.9	4.63
1-19	16.7	133	98.2	0.62	43.5	14	60.1	105	193	120	578	4.31	17.9	5.21
1-20	2.6	28.6	15.3	0.72	8.15	2.55	5.4	21.9	22.1	20.3	173	1.19	2.28	0.95
1-21	11.5	86.2	57.6	0.55	21.5	8.74	22.3	61.2	108	62.6	554	3.48	10.8	4.78
1-22	12.2	97	67	1.59	43.9	21.2	59.6	115	113	90.6	508	3.46	12.9	6.51
1-23	11.1	74.4	47.8	0.96	22.4	7.71	41.5	89.7	110	61.7	578	2.21	6.18	5.16
1-24	17.2	120	94.5	1.43	58.6	19	60.2	123	166	108	647	3.95	17.1	6.5
1-25	18.6	130	92.8	0.91	36.2	13.8	57.5	105	173	60.8	650	2.95	9.03	8.18
1-26	17.2	135	101	1.32	45.4	23.3	60.2	107	179	117	818	3.98	21.9	6.15
1-27	18.9	142	111	2.45	45.9	17.3	62.7	113	174	116	683	4.15	19.7	10.4
1-28	15.8	100	61.6	0.78	23.3	9.54	30.6	95.3	94.4	75.8	409	3.28	9.88	10.5
1-29	15.2	105	87.4	3.2	37.8	15.4	55.7	115	149	110	610	4.4	18.4	8.84
1-30	19.0	103	54	0.89	38.9	9.74	47.1	61	87	75.7	372	2.34	8.58	6.76

3.3. 稀土元素地球化学特征

稀土元素(REE)中 Al、Si、Sc、Zr、Ti 以及 Th 等高场强元素很不活泼, 化学性质稳定, 使岩石即使

经历了后期强烈的蚀变，也会保留其本身特征，在沉积过程中沉积的速率比较快，同时当受外界环境刺激的影响发生分散和聚集。

根据沉积物的稀土元素总量，轻稀土、重稀土的最大值，最小值，平均值以及 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 的平均值，来表征轻、重稀土元素富集程度/分异程度。REE 的分异程度指示碎屑颗粒在海水中沉降时间长短，用 La_n/Yb_n 表示，比值越小，沉积速率越高[28]。另外，Ce 在氧化条件下呈现为 Ce^{4+} 而沉淀，沉积物中 Ce 富集，在还原环境中，Ce 以 Ce^{3+} 存在，在水中溶解，沉积物中 Ce 亏损[29] [30] [31]；

康苏河剖面样品稀土元素含量如表 5 所示。剖面的 ΣREE 的值变化明显(图 3)，介于 $42.16 \times 10^{-6} \sim 259.47 \times 10^{-6}$ ，平均含量为 181.64×10^{-6} ，符合其岩性变化特征；样品的 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值介于 $3.34 \times 10^{-6} \sim 10.76 \times 10^{-6}$ 之间，均值为 7.74×10^{-6} ，相对北美页岩平均值略大，说明相对富集 LREE 和亏损 HREE。剖面的 La_n/Yb_n 值在 0.56~1.78 之间，下部为 1.23，上部为 1.15，沉积速率升高；稀土元素北美页岩标准化配分模式显示(图 4)，在 Ce 处呈“V”型，为 Ce 负异常，Eu 异常不明显，表明为缺氧的还原环境，与 $\text{V}/(\text{V} + \text{Ni})$ 的分析切合，与出现黑色页岩相符。

Table 5. REE contents of the samples from the upper part of Kangsu River section
表 5. 康苏河剖面上部样品稀土元素含量表

样品 编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE
	μg/g														
1-1	30.49	66.09	7.43	29.69	6.73	1.67	6.29	1.29	7.98	1.61	4.24	0.83	5.26	0.79	170.4
1-2	43.79	78.59	10.19	38.29	6.63	1.45	6.53	1.21	6.39	1.16	3.09	0.54	3.06	0.45	201.4
1-3	42.79	83.69	10.69	37.99	6.95	1.59	6.04	1.03	5.53	1.05	2.65	0.53	3.26	0.47	204.3
1-4	30.01	57.39	7.03	26.01	5.35	1.36	5.53	1.37	7.49	1.39	3.08	0.53	3.04	0.43	149.9
1-5	49.49	90.09	10.89	42.69	7.72	1.61	6.26	1.14	5.38	1.01	2.85	0.56	3.27	0.50	223.5
1-6	40.89	74.09	8.91	34.59	6.55	1.36	5.71	1.07	5.87	1.14	2.91	0.55	3.33	0.48	187.5
1-7	15.89	29.19	3.53	14.69	4.25	1.46	5.08	1.34	7.48	1.33	2.46	0.43	2.22	0.32	89.7
1-8	43.39	79.49	9.99	38.39	7.27	1.56	6.44	1.17	6.23	1.24	3.21	0.62	3.74	0.56	203.3
1-9	36.01	64.01	8.06	29.49	5.16	0.96	4.27	0.72	3.59	0.72	1.94	0.37	2.36	0.35	158
1-10	45.49	84.69	10.09	40.09	7.17	1.64	6.43	1.19	6.16	1.26	3.27	0.63	3.84	0.61	212.6
1-11	41.89	74.19	9.62	34.49	6.51	1.35	5.69	1.04	5.49	1.16	2.77	0.54	3.41	0.52	188.7
1-12	33.99	65.01	7.68	29.79	6.24	1.29	5.02	0.99	5.43	1.03	2.74	0.51	3.07	0.47	163.3
1-13	59.89	106	12.69	49.01	8.15	1.65	6.86	1.16	5.63	1.05	2.87	0.55	3.39	0.55	259.5
1-14	28.09	48.19	6.02	24.29	4.79	1.03	3.95	0.74	3.77	0.65	1.65	0.32	1.87	0.29	125.7
1-15	50.01	95.99	11.09	41.59	6.94	1.32	6.09	0.98	5.45	0.97	2.71	0.48	2.72	0.43	226.8
1-16	31.39	59.01	7.52	32.09	6.74	1.59	6.26	1.29	7.68	1.51	3.39	0.69	4.09	0.63	163.9
1-17	47.99	94.01	11.39	43.69	8.27	1.71	6.74	1.19	6.31	1.21	2.92	0.54	3.44	0.53	229.9
1-18	47.29	86.39	11.29	42.19	7.96	1.78	7.36	1.24	7.08	1.36	3.28	0.67	3.99	0.59	222.5
1-19	46.69	88.99	11.21	41.11	7.67	1.49	6.09	1.06	5.57	1.02	2.57	0.51	3.19	0.49	217.7
1-20	9.08	16.59	1.99	8.28	1.49	0.29	1.21	0.23	1.26	0.25	0.56	0.11	0.68	0.11	42.16
1-21	36.59	61.49	7.92	30.59	5.57	1.15	4.98	0.89	4.43	0.92	2.19	0.39	2.54	0.30	160.1
1-22	39.69	74.41	8.98	36.09	7.23	1.46	6.09	1.23	6.76	1.17	2.44	0.44	3.08	0.44	189.5

Continued

1-23	21.79	38.31	5.02	19.79	3.96	0.97	4.09	0.83	4.87	1.02	2.09	0.39	2.31	0.35	105.8
1-24	45.59	85.99	10.69	41.09	8.17	1.61	7.09	1.26	6.69	1.25	2.95	0.57	3.79	0.55	217.4
1-25	29.49	53.09	6.79	25.49	6.22	1.56	6.38	1.45	7.96	1.49	2.92	0.51	3.04	0.45	146.9
1-26	47.89	82.59	11.19	41.69	7.41	1.43	6.52	1.03	5.09	0.97	2.47	0.47	2.99	0.48	212.3
1-27	51.29	89.79	11.4	45.41	8.29	1.68	6.73	1.18	6.02	1.17	2.95	0.59	3.74	0.59	230.9
1-28	32.01	58.29	7.65	31.39	6.59	1.49	6.14	1.29	6.66	1.33	3.09	0.57	3.42	0.54	160.5
1-29	47.89	89.49	10.89	45.69	7.95	1.66	6.89	1.23	6.18	1.17	2.98	0.61	3.78	0.58	227.1
1-30	27.29	51.49	7.02	31.59	7.55	1.96	7.66	1.72	9.67	2.05	4.05	0.74	4.36	0.66	157.8

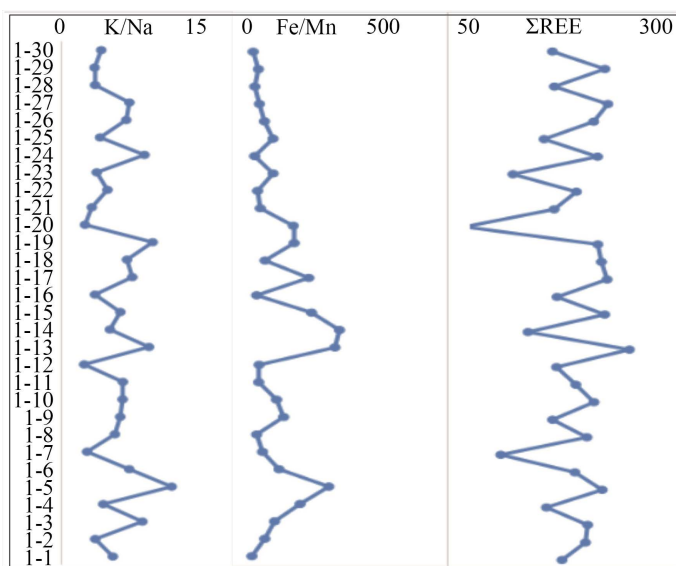


Figure 3. Longitudinal characteristics elements contents of the samples from the upper part of Kangsu River section

图 3. 康苏河剖面上部样品元素纵向特征图

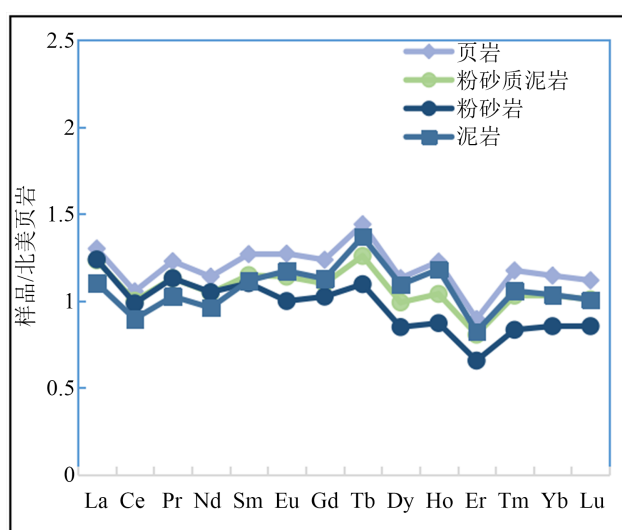


Figure 4. REE partition pattern of the upper sample of Kangsu River section

图 4. 康苏河剖面上部样品稀土元素配分曲线

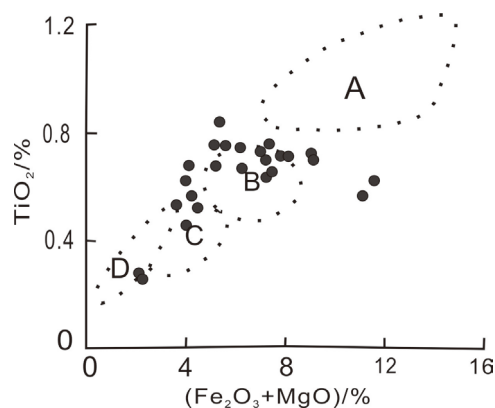
4. 讨论

在前人的基础上,运用地球化学分析方法,对康苏河剖面地层主量、微量和稀土元素的多元统计和数理分析,并结合沉积岩岩石学以及古海洋学对塔西南盆地乌恰康苏河剖面进行分析,从岩性变化可以看出,经过了复杂的古海洋演化,而地球化学特征也能更好验证这一变化。

4.1. 构造背景分析

沉积盆地中的陆源碎屑可以反映出物源的特征,利用砂岩地球化学特征来对应于特定的源区和构造环境,包括被动和活动大陆边缘、大陆弧、大洋弧[31][32]。可利用 SiO_2 、 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 、 TiO_2 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$ 等变量图或 La-Th-Sc、Th-Sc-Zr 和 Th-Co-Zr 等三角图指标因子进行构造背景判别,进而反映古海洋环境演化。

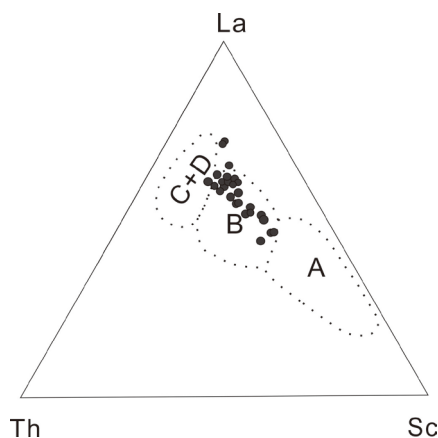
在 TiO_2 与 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ 双变量图解(图 5)显示,样品主要投到大陆岛弧范围,少数处于活动大陆边缘。在 La-Th-Sc 三角形图解(图 6)中,样品点同样主要落在大陆岛弧。以上两种判别方式显示,乌恰康苏河剖面的构造背景为大陆岛弧,兼有活动大陆边缘特征。



注: A. 大洋岛弧; B. 大陆岛弧; C. 活动大陆边缘; D. 被动大陆边缘

Figure 5. Tectonic discrimination diagrams of section samples based on TiO_2 - $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO})$

图 5. 剖面样品 TiO_2 - $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO})$ 构造环境判别图



注: A. 大洋岛弧; B. 大陆岛弧; C. 活动大陆边缘; D. 被动大陆边缘

Figure 6. Tectonic discrimination diagrams of section samples based on La-Th-Sc

图 6. 剖面样品 La-Th-Sc 构造环境判别图

4.2. 物源分析

中生代后期, 印度板块迅速向北推移, 特提斯海侵开始, 经中亚到达东阿莱依峡口, 沿昆仑山北麓前入侵, 淹没了欧亚大陆东南部的塔西南, 物源从南天山和昆仑山褶皱带到达研究区[33], 同时携带了大量的海相生物群, 包括菊石、有孔虫、蛤类、钙质超微化石、腹足类等化石。基于碎屑岩的化学组分来识别母岩特征, 分析物源、大地构造背景等, REE 在沉积岩的形成演化过程中有较强的抗迁移性, 可以提供源区的信息。该区碎屑岩中 SiO_2 、 Al_2O_3 含量相对, 表明富含石英、长石等矿物。根据 Allegre *et al.* [34] 提出的 $\text{La}/\text{Yb}-\Sigma\text{REE}$ 源岩判别图解进行样品的投点(图 7), 大部分投在沉积岩和花岗岩交汇区, 表明母岩主要为沉积岩与花岗岩的混合。

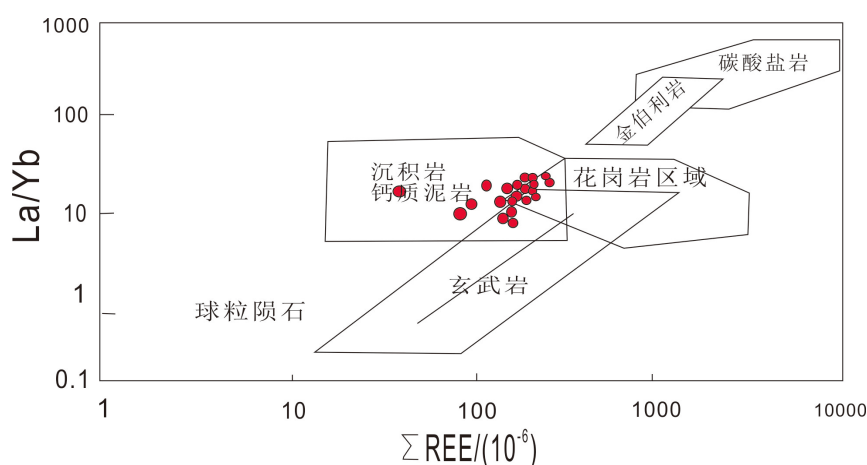


Figure 7. $\text{La}/\text{Yb}-\Sigma\text{REE}$ diagram of section sample
图 7. 剖面样品 $\text{La}/\text{Yb}-\Sigma\text{REE}$ 图解

5. 结论

1) 依据剖面岩性变化及元素地球化学特征, 塔西南盆地乌恰康苏河剖面发育于陆源碎屑供应充足, 气候温暖潮湿, 风化作用较强, 沉积速率升高、海水盐度较低, 生产力水平增加的浅海沉积环境。

2) 研究区沉积物源具有多元性。在特提斯海侵时期, 物源来自南天山与昆仑山褶皱带, 源岩类型的主体为沉积岩与花岗岩, 具有典型的大陆边缘沉积特征。

致 谢

感谢审稿专家们提出的宝贵意见和编辑老师们的辛勤劳动。

基金项目

本文由国家自然科学基金(编号: 41972004、41172015)、河北省自然科学基金项目(编号: E2019209339)和辽宁工程技术大学学科创新团队资助项目(编号: LNTU20TD-14)联合资助。

参考文献

- [1] 岳勇, 徐勤琪, 傅恒, 席党鹏. 塔里木盆地西南部白垩系-古近系沉积特征与储盖组合[J]. 石油实验地质, 2017, 39(3): 318-326.
- [2] 杨海军, 沈建伟, 张丽娟, 李猛, 黄智斌, 王月. 塔里木盆地西南地区古近系卡拉塔组龙介类化石及其古生态[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(11): 1634-1646.

- [3] 郝诒纯, 曾学鲁, 郭宪璞. 新疆塔里木盆地西部海相白垩系及其沉积环境探讨[J]. 地质学报, 1987(3): 205-217.
- [4] 郝诒纯, 苏新. 塔里木盆地西部晚白垩世钙质超微化石[J]. 现代地质, 1988(3): 305-314.
- [5] 黄永建, 王成善, 顾健. 白垩纪大洋缺氧事件: 研究进展与未来展望[J]. 地质学报, 2008, 81(1): 21-30.
- [6] 席党鹏, 唐自华, 王雪娇, 覃祚焕, 曹文心, 江湍, 等. 塔里木盆地西部白垩纪——古近纪海相地层框架及对重大地质事件的记录[J]. 地学前缘, 2020, 27(6): 165-198.
- [7] 郭宪璞, 丁孝忠, 何希贤, 李汉敏, 苏新, 彭阳. 塔里木盆地中生代海侵和海相地层研究的新进展[J]. 地质学报, 2002, 76(3): 299-307.
- [8] 郭宪璞, 叶留生, 李汉敏, 丁孝忠, 王大宁, 苏新. 塔里木盆地白垩纪地层对比及格架[J]. 中国西部油气地质, 2006, 2(2): 140-146.
- [9] 郭宪璞. 塔里木盆地西部海相白垩系——第三系界线划分的研究[J]. 地球科学, 1990(3): 325-335.
- [10] Bhatia, M.R. (1983) Plate Tectonics and Geochemical Composition of Sandstones. *The Journal of Geology*, **91**, 611-627. <https://doi.org/10.1086/628815>
- [11] Cox, R., Lowe, D.R. and Cullers, R.L. (1995) The Influence of Sediment Recycling and Basement Composition on Evolution of Mudrock Chemistry in the Southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **59**, 2919-2940. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00185-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00185-9)
- [12] 郑荣才, 柳梅青. 鄂尔多斯盆地长 6 油层组古盐度研究[J]. 石油与天然气地质, 1999(1): 22-27.
- [13] 焦养泉, 吕新彪, 王正海, 王敏芳. 从沉积到成岩两种截然不同的地质环境: 叶哈盆地砂岩型铀矿研究实例[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2004, 29(5): 615-620.
- [14] 熊小辉, 肖加飞. 沉积环境的地球化学示踪[J]. 地球与环境, 2011, 39(3): 405-414.
- [15] 伊海生, 林金辉, 周恩息, 李军鹏, 黄华谷. 可可西里地区中新世湖相叠层石成因及其古气候意义[J]. 矿物岩石, 2008, 28(1): 106-113.
- [16] 谢建磊, 赵宝成, 战庆, 李晓. 元素地球化学在古环境和古生态研究中的应用综述[J]. 上海国土资源, 2015, 36(3): 64-70+74.
- [17] Chen, Z. and Zhang, W. (1997) Quaternary Stratigraphy and Trace-Element Indices of the Yangtze Delta, Eastern China, with Special Reference to Marine Transgressions. *Quaternary Research*, **47**, 181-191. <https://doi.org/10.1006/qres.1996.1878>
- [18] 周长勇, 张启跃, 吕涛, 胡世学, 谢韬, 文芝, 等. 云南中三叠世罗平生物群产出地层的地球化学特征和沉积环境[J]. 地质论评, 2014, 60(2): 285-298.
- [19] Hatch, J.R. and Irving, J.S. (1992) Relationship between Inferred Redox Potential of the Depositional Environment and Geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U.S.A. *Chemical Geology*, **99**, 65-82. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(92\)90031-Y](https://doi.org/10.1016/0009-2541(92)90031-Y)
- [20] Jones, B. and Manning, D.A.C. (1994) Comparison of Geochemical Indices Used for the Interpretation of Palaeoredox Conditions in Ancient Mudstones. *Chemical Geology*, **111**, 111-129. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90085-X](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90085-X)
- [21] Tribouillet, N., Alueo, T.J., Lyons, T. and Riboulleau, A. (2006) Trace Metals as Palaeoredox and Paleo-Productivity Proxies: An Update. *Chemical Geology*, **232**, 12-32. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.02.012>
- [22] 白忠凯, 谢李, 韩淼, 吕修祥, 孙智超, 李清瑶, 等. 塔里木盆地柯坪地区寒武系肖尔布拉克组下段古生产力研究[J]. 中国地质, 2018, 45(2): 227-236.
- [23] McManus, J., Berelson, W.M., Klinkhammer, G.P., Johnson, K.S., Coale, K.H., Anderson, R.F., et al. (1998) Geochemistry of Barium in Marine Sediments: Implications for Its Use as a Paleo-Proxy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **62**, 3453-3473. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(98\)00248-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(98)00248-8)
- [24] Pfeifer, K., Kasten, S., Hensen, C. and Schulz, H.D. (2001) Reconstruction of Primary Productivity from the Barium Contents in Surface Sediments of the South Atlantic Ocean. *Marine Geology*, **177**, 13-24. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00121-9](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00121-9)
- [25] Wagreich, M. and Neuhuber, S. (2005) Stratigraphy and Geochemistry of an Early Campanian Deepening Succession (Bibereck Formation, Uosau Group, Austria). *Earth Science Frontiers*, **12**, 123-131.
- [26] 李春荣, 陈开远. 潜江凹陷潜江组元素演化特征及其古气候意义[J]. 石油地质与工程, 2007, 21(6): 18-21.
- [27] Johannesson, K.H., Lyons, W.B. and Bird, D.A. (1994) Rare Earth Element Concentrations and Speciation in Alkaline Lakes from the Western USA. *Geophysical Research Letters*, **21**, 773-776. <https://doi.org/10.1029/94GL00005>
- [28] 李双建, 肖开华, 沃玉进, 龙胜祥, 蔡立国, 等. 湘西、黔北地区志留系稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. 现代地质, 2008, 22(2): 273-280.

-
- [29] Debaar, H.J., Bacon, M.P., Brewer, P.G. and Bruland, K.W. (1985) Rare Earth Elements in the Pacific and Atlantic Oceans. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **49**, 1943-1959. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(85\)90089-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(85)90089-4)
- [30] Elderfield, H., Whitfield, M., Burton, J.D., Bacon, M.P., Liss, P.S., Charnock, H., *et al.* (1988) The Oceanic Chemistry of Rare Earth Elements. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, **325**, 105-116. <https://doi.org/10.1098/rsta.1988.0046>
- [31] Bhatia, M.R. (1985) Rare Earth Element Geochemistry of Australian Paleozoic Greywackes and Mudrocks: Province and Tectonic Control. *Sedimentary Geology*, **45**, 97-443. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(85\)90025-9](https://doi.org/10.1016/0037-0738(85)90025-9)
- [32] Bhatia, M.R. and Crook, K.A.W. (1986) Trace Element Characteristics of Graywackes and Tectonic Setting Discrimination of Sedimentary Basin. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **92**, 181-193. <https://doi.org/10.1007/BF00375292>
- [33] 庄锡进, 肖立新, 杨军. 塔里木盆地西南沉积相展布特征及演化[J]. 新疆地质, 2002, 20(z1): 78-82.
- [34] Allegre, C.J. and Minster, J.F. (1978) Quantitative Models of Trace Element Behavior in Magmatic Processes. *Earth and Planetary Science Letters*, **38**, 1-25. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(78\)90123-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(78)90123-1)