

塔里木盆地寒武统泥质烃源岩成烃生物组合的构造-沉积环境控制因素

胡广^{1,2,3}, 刘文汇^{2,3}, 腾格尔^{2,3}, 陈强路^{2,3}, 谢小敏^{2,3}, 王杰^{2,3}, 卢龙飞^{2,3}, 申宝剑^{2,3}

(1. 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092; 2. 中国石化油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214126;

3. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214151)

摘要:成烃生物组合是烃源岩研究的重要内容,目前关于成烃生物研究主要集中在生烃模拟实验,对成烃生物发育的地质控制因素研究在油气地质界还相对较少,然而这方面的研究是利用成烃生物预测优质烃源岩分布并指导油气勘探的重要环节。成烃生物面貌的研究结果表明,西山布拉克组和玉尔吐斯组主要以底栖藻类为主,含浮游藻类,但西山布拉克组主要以底栖藻类和浮游藻类为主,而东二沟剖面玉尔吐斯组则以底栖藻类(红藻)为主。稀土元素地球化学揭示西山布拉克组和玉尔吐斯组沉积时均受热水作用影响,且西山布拉克组受影响程度要强于玉尔吐斯组。泥岩稀土、主量和微量元素分析发现,西山布拉克组和玉尔吐斯组均为还原环境,但西山布拉克组水体还原性强度要弱,水动力条件稍强,活跃的火山活动使得库鲁克塔格地区西山布拉克组沉积期古地貌起伏程度要强于柯坪地区。对比现代藻类分布模式,构造活动、水体深度以及古地貌上差异可能是导致南雅尔当山剖面西山布拉克组和东二沟剖面玉尔吐斯组成烃生物面貌不同的主要原因。

关键词:成烃生物组合; 烃源岩; 玉尔吐斯组; 西山布拉克组; 下寒武统; 塔里木盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Tectonic-sedimentary constrains for hydrocarbon generating organism assemblage in the Lower Cambrian argillaceous source rocks, Tarim Basin

Hu Guang^{1,2,3}, Liu Wenhui^{2,3}, Tengger^{2,3}, Cheng Qianglu^{2,3}, Xie Xiaomin^{2,3}, Wang Jie^{2,3}, Lu Longfei^{2,3}, Shen Baojian^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China; 3. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC Exploration & Production Research Institute, Wuxi, Jiangsu 214151, China)

Abstract: Hydrocarbon generating organism is an important object for the source rock research. The studies, so far, were focused on their hydrocarbon-generation potential via simulation experiments, and less attention was paid to the geological settings that affect development and distribution of hydrocarbon generating organisms. However, the development and distribution of hydrocarbon generating organisms is very important for predicting source rocks and guiding petroleum exploration. In this study, the Lower Cambrian Xishanbulake and Yuertus formations were selected from the Southern Yaerdangshan and Dongergou sections in Kuluketage and Keping districts, respectively. Researches on two formations demonstrate that the hydrocarbon generating organisms in the Xishanbulake Formation are dominated by benthic algae, and include some planktonic algae; whereas hydrocarbon generating organisms in the Yuertusi Formation are benthic algae. Anomaly of elements Ce and Eu and REE patterns of cherts in the two formations imply that the two sections were affected by hydrothermal fluid, and that the influence in the Southern Yaerdangshan section was stronger than that in the Dongergou section. Major and trace elements analyses of mudstones indicate that the Xishanbulake Formation have less reduction water, and more active volcano in the Kuluketage district which might be resulted in more undulating terrain than that in the Keping district during the Early Cambrian. Correlated with distribution of extant algae, it could be concluded that the difference in tectonic activity, water depth, and paleo-terrian may be the major cause for the difference in hydrocarbon generating organism assemblages between the Xishanbulake Formation in the Southern Yaerdangshan section and the Yuertus Formation the Dongergou section.

收稿日期:2014-04-11; 修订日期:2014-08-12。

第一作者简介:胡广(1978—),男,博士、工程师,石油地质。E-mail:guanghu1198119@163.com。

通讯作者简介:刘文汇(1957—),男,博士、教授,天然气地质学及油气地球化学。E-mail:whliu_syky@sinopec.com。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2012CB214801)。

Key words: hydrocarbon generating organism assemblage, source rock, Yuertusi Formation, Xishanbulake Formation, Lower Cambrian, Tarim Basin

成烃生物研究关注的是保存在岩石中具备生烃能力的生物群^[1-2],是烃源岩研究的重要内容^[2-8]。目前关于成烃生物的研究主要集中在对现代生物和生物化石热模拟实验。关于现代藻类生烃热模拟研究较早,从上个世纪八十年代就已经开展,如吴庆余等对蓝藻进行热模拟实验讨论其产气能力及产物特征^[9];张惠之等对盘星藻进行了生烃模拟试验^[10];宋一涛等研究了浮游藻类的生烃能力、产物特征及生物标志物化合物^[11];郭汝泰和杨凤丽研究了65℃条件下多细胞马尾藻对低熟油的生烃贡献^[12];刘文斌等研究了海带的热演化程度对排油过程的影响^[13];叶云和李玉成等讨论了巢湖蓝藻腐殖化过程中形态与成份变化^[14]。在生物化石的生烃热模拟实验研究方面,最近秦建中等模拟了南方海相烃源岩中浮游藻和底栖藻的生烃特征^[15]。

这些模拟实验不仅积累了具体生物的生烃能力数据,同时也明确了不同生物的生烃潜力差别。为了从成烃生物角度预测优质烃源岩分布和发育规律,并更好利用这些模拟实验数据来指导油气勘探实践,还需进一步了解成烃生物发育的地质控制因素(特别是构造-沉积环境因素),目前关于这方面研究的报道和文献记载还相对较少。

塔里木盆地寒武统西山布拉克组和玉尔吐斯组是重要的烃源岩发育层位。目前该层位在盆地内钻遇少,但在库鲁克塔格和柯坪地区出露较好,为成烃生物的构造-沉积背景控制因素研究提供较好条件。此外,对下寒武统西山布拉克组和玉尔吐斯组的深入研究,还为今后预测西山布拉克组和玉尔吐斯组的分布提供重要线索。

因此本次研究首先对塔里木盆地东北缘库鲁克塔格隆起区南雅尔当山剖面的下寒武统西山布拉克组(ϵ_{1xs})和西北缘柯坪地区东二沟剖面的玉尔吐斯组(ϵ_{1y})进行较为系统的成烃生物研究,获取成烃生物组合基础数据,并找出两个地层组中成烃生物面貌差异,然后依据稀土元素、主量和微量元素地球化学数据分析两地构造-沉积背景差异,并与成烃生物进行对比研究,以期揭示探索塔里木盆地早古生代成烃生物特征与构造-环境之间的关系,为从成烃生物的角度对烃源岩的分布和发育提供认识和启发。

1 地质背景

古塔里木板块形成于元古宙晚期,自早震旦世开始发生裂解,在其北部边缘发育南天山大陆裂谷盆

地^[16],寒武纪-早中奥陶世塔里木板块与哈萨克斯坦板块分离形成南天山洋盆^[17]。总体上南天山裂陷作用东强西弱,东部火山活动发育,西部主要为浅海陆架沉积^[17]。研究区库鲁克塔格和柯坪地区属塔里木板块北缘被动大陆边缘的组成部分^[18]。

库鲁克塔格隆起位于塔里木盆地北缘东侧,南部以孔雀河断裂与孔雀河斜坡为界,北部以辛格尔断裂与南天山为界,东西走向的兴地断裂横穿库鲁克塔格隆起区^[19-20](图1)。兴地断裂以南古生代为半深海盆地,以北为浅水台地和水下低隆起^[17]。本次研究剖面之一南雅尔当山剖面位于孔雀河以北和兴地断裂以南(图1),该剖面下寒武统西山布拉克组出露较全,下段为墨绿色玄武岩为主,含硅质岩,底部含磷硅质岩;上段下部为黑色泥质页岩夹硅质泥岩,上段中部为深灰色、灰黑色泥质硅质岩,上段上部为深灰色粉晶白云岩^[21]。

柯坪隆起位于塔里木盆地北缘西侧,南以柯坪断裂和沙井子断裂截切于巴楚隆起和阿瓦提坳陷的西北边缘上,北以阿合奇断裂与南天山分隔开,东以喀拉玉尔滚断裂与库车坳陷相接^[22-23](图1)。位于柯坪隆起区的东二沟剖面出露的玉尔吐斯组底部为灰黑色含磷和磷结核硅质岩,中部为黑色炭质页岩及黄绿色、灰绿色、紫红色页岩夹砂质白云质灰岩;上部为灰白色薄层微晶白云岩、瘤状白云岩夹页岩^[21]。

2 样品与测试分析

为研究塔里木盆地北缘下寒武统成烃生物及其构造-沉积环境的控制因素研究,本次在库鲁克塔格南雅尔当山剖面共采集下寒武统西山布拉克组(ϵ_{1xs})新鲜样品4件,在柯坪东二沟剖面共采集下寒武统玉尔吐斯组(ϵ_{1y})新鲜样品10件(表1)。所有样品均进行成烃生物研究,成烃生物的识别为传统常规的古生物研究方法,先将样品磨制成岩石光薄片,然后在透射、反射光和荧光下,对成烃生物进行形态学鉴定。岩石主量和微量元素分析仅涉及两剖面中的泥岩,而稀土元素分析包括所有的泥岩和硅质岩。所有的分析测试均在中国石化无锡石油地质研究所测试分析中心完成。

2.1 成烃生物组合特征

对所有岩石样品的岩石薄片透光、反光、荧光研究发现两个剖面揭示的成烃生物种类并不多,主要由

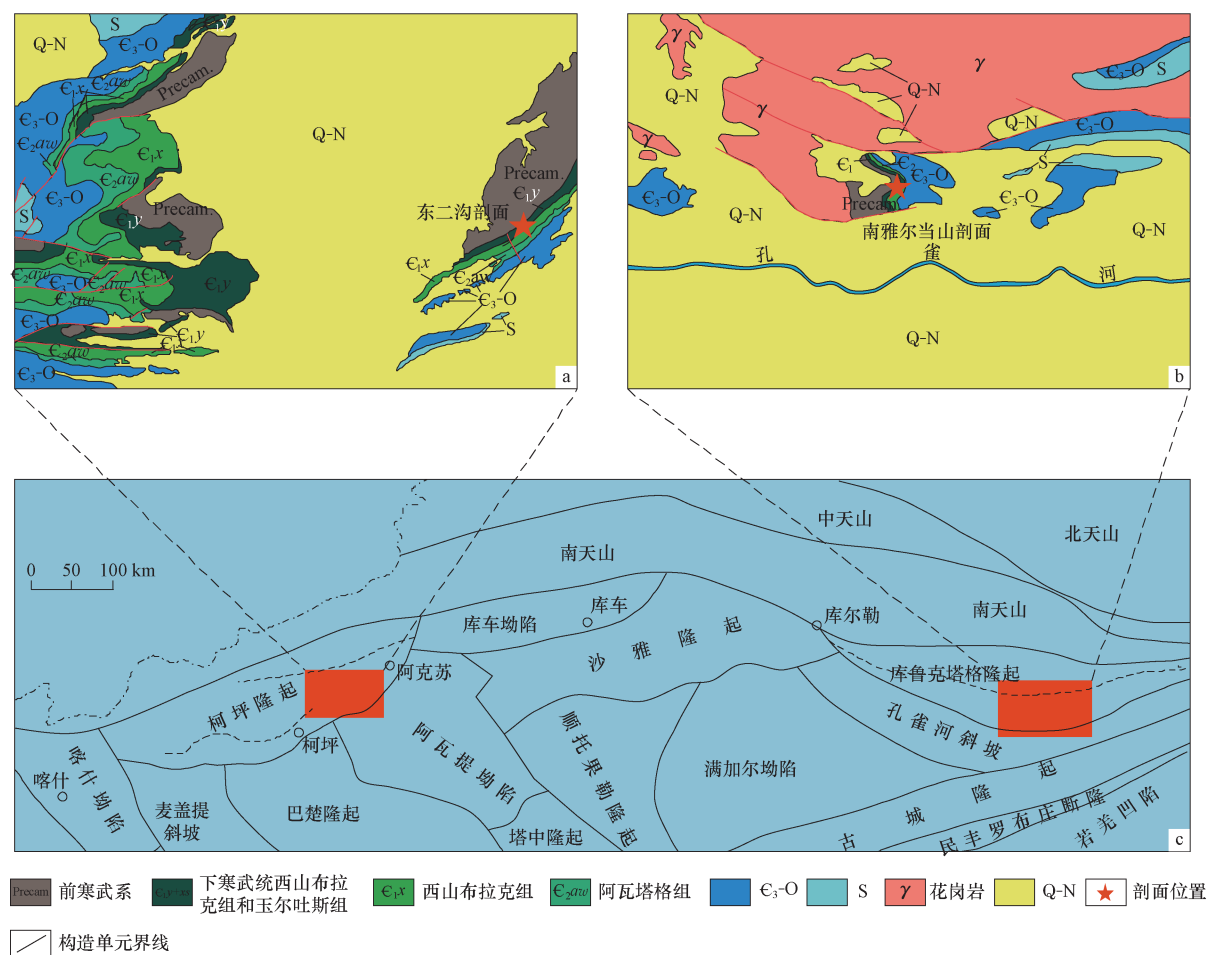


图 1 研究区地质略图及剖面位置

Fig. 1 Geologic sketch map of the study area and locations of outcrop sections

表 1 研究区样品及其岩性

Table 1 Samples and their lithology in the study area

剖面	样号	层位	岩性
南雅尔当山	TNY - 3	Є ₁ xs	黑色硅质岩
	TNY - 4	Є ₁ xs	黑色泥岩
	TNY - 5	Є ₁ xs	黑色泥岩
	TNY - 6	Є ₁ xs	黑色泥岩
东二沟	TDE - 11 - 1	Є ₁ y	黑色硅质岩
	TDE - 12 - 1	Є ₁ y	黑色硅质岩
	TDE - 13 - 1	Є ₁ y	黑色硅质岩
	TDE - 5	Є ₁ y	黑色泥岩
	TDE - 6	Є ₁ y	黑色泥岩
	TDE - 8	Є ₁ y	黑色泥岩
	TDE - 11 - 2	Є ₁ y	黑色泥岩
	TDE - 12 - 2	Є ₁ y	黑色泥岩
	TDE - 13 - 2	Є ₁ y	黑色泥岩
	TDE - 14 - 2	Є ₁ y	黑色泥岩

底栖类(以红藻为主)和浮游藻类(包括詹氏似鼓囊甲藻、绿藻、光面球藻、小刺球藻、球状甲藻、团藻等)组成。

南雅尔当山西山布拉克组 4 件样品的生物组合研

究表明成烃生物主要为宏观底栖藻类残片以及浮游藻类詹氏似鼓囊甲藻等(图 2)。底栖藻类残片叶状体较为清晰,叶状体皮层和髓部清晰可见(图 2a)。可能由于成熟度较高,导致叶状体碳化严重,髓部细胞网状排列结构不甚清晰。底栖藻类皮层主要是含叶绿素细胞紧密排列,与髓部可明显分开。在南雅尔当山上段样品中还可可见许多浮游藻类,其形态特征与底栖藻类完全不同,多以球状单体和集合体形式,例如球形,具厚胶质包被的球状甲藻(图 2c)。纵向上,南雅尔当山剖面西山布拉克组成烃生物可见明显的规律性变化,底部以底栖藻类为主,詹氏似鼓囊甲藻从中部黑色泥岩开始向上有逐渐增多的趋势,底栖藻类逐渐减少,顶部主要以蓝藻藻席和詹氏似鼓囊甲藻组成。呈现从底栖藻类为主逐渐转变为蓝藻藻席的过程。

对东二沟剖面玉尔吐斯组 10 件样品的成烃生物研究表明,该剖面以底栖藻类为主,可见大量的底栖藻类碎片和红藻囊果(图 2b)。球形的红藻囊果是鉴定红藻的特殊标志。红藻的有性繁殖都是卵生,有性繁殖器官包括雄性繁殖器官精子囊和雌性繁殖器官果胞,精子囊壁释放出精子进入果胞与卵子合并成合子,经过减数分裂形成果孢子体,称为囊果,其中产生许多

果孢子体,在图 2b 中展示一个大小为 50 μm 的囊果,其内见大量的果孢子。此外,在该剖面类似球状甲藻、绿藻、小刺藻等浮游藻类也有发现,数量较少,仅在个别样品中占主要地位,例如样品 TDE-8 中可见绿藻、团藻、小刺藻和球状甲藻等浮游藻类(图 2c,d 仅展示球状甲藻)。与南雅尔当山剖面西山布拉克组不同,东二沟剖面玉尔吐斯组下段黑色泥页岩在生物面貌上有一定的差异,但垂向上生物组合演化规律却大体相同。以样品 TDE-8 为界,以下生物的组合是以底栖藻类为主,少见浮游藻类,之上虽然还是以底栖藻类为主,但浮游藻类增加。

2.2 岩石地球化学特征

2.2.1 主量和微量元素地球化学特征

泥岩的元素地球化学(表 2,表 3),可以较好地揭示沉积时的构造-沉积背景,例如沉积区离物源的远近^[24],沉积时的氧化-还原环境^[25,26],水体深度等沉积条件^[27]。除去最高 Si 含量外,主量元素 Ca 的含量最高,其次为 Al。部分含钙质泥岩样品的 Ca 含量较高,例如 TNY-4 和 TDE-6,CaO 含量超过 20%,主量元素含量变化与岩性变化吻合。微量元素 Ba,V,Zn,Sr 和 Cr 含

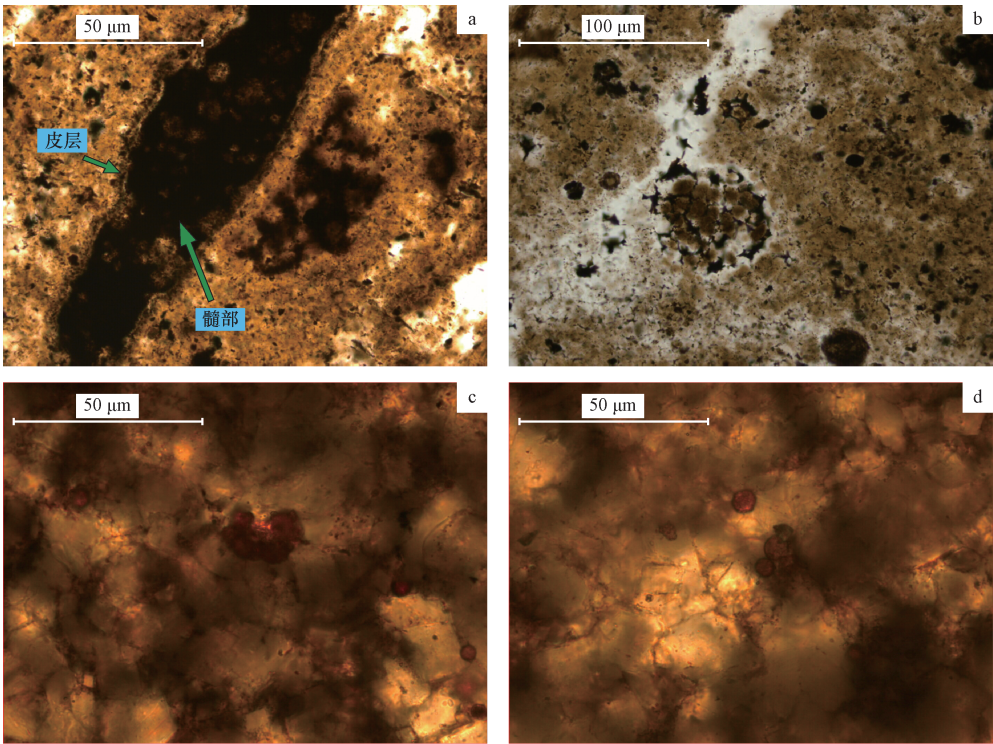


图 2 塔里木盆地北缘西山布拉克组和玉尔吐斯组代表性成烃生物

Fig. 2 Typical hydrocarbon generating organisms in the Xishanbulake Fm and Yuertus Fm at the northwestern margin of Tarim Basin

a. 底栖藻类叶状体,样品 TNY-4,西山布拉克组;b. 红藻囊果,样品 TDE-13-2,玉尔吐斯组;
c. 球状甲藻,样品 TNY-5,西山布拉克组;d. 球状甲藻,样品 TDE-8,玉尔吐斯组

表 2 西山布拉克组和玉尔吐斯组泥岩主量元素分析结果

Table 2 Major elements compositions of mudstones from the Xishanbulake Fm and Yuertus Fm

样号	主量元素含量/%							
	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	TiO ₂
TNY-4	6.24	37.05	1.16	3.67	1.21	0.006	0.68	0.23
TNY-5	4.29	0.58	2.11	1.95	0.36	0.045	0.17	0.19
TNY-6	3.90	14.72	1.54	1.69	9.65	0.095	0.47	0.19
TDE-5	0.55	7.40	0.54	0.18	0.09	0.061	0.56	0.025
TDE-6	0.17	0.24	0.27	0.05	0.06	0.054	0.64	0.054
TDE-8	0.08	0.49	0.53	0.02	0.03	0.094	0.11	0.017
TDE-11-2	0.49	0.58	0.80	0.13	0.06	0.040	0.40	0.24
TDE-12-2	3.39	4.49	1.89	1.73	1.80	0.027	0.23	0.18
TDE-13-2	0.65	0.12	0.45	0.66	0.25	0.030	0.47	0.15
TDE-14-2	1.90	0.77	1.10	0.90	0.36	0.042	0.23	0.22

量较高,平均含量分别为 $3\,255.01 \times 10^{-6}$, 756.32×10^{-6} , 417.9×10^{-6} , 365.87×10^{-6} 和 182.76×10^{-6} 。

2.2.2 稀土元素地球化学特征

下寒武统西山布拉克组和玉尔吐斯组硅质岩和泥岩的稀土元素分析结果见表 4 和表 5。硅质岩稀土元素含量明显小于泥岩样品,平均含量分别为 22.717×10^{-6} 和 112.203×10^{-6} ,但相同岩性样品的 ΣREE 相差不大,且稀土元素的分配模式相似。

对硅质岩而言, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 平均为 3.565,具

表 3 西山布拉克组和玉尔吐斯组泥岩样品微量元素分析结果

Table 3 Trace elements compositions of mudstones from the Xishanbulake Fm and Yuertus Fm														10 ⁻⁶
样号	Ba	Co	Cr	Cu	Li	Ni	Sr	V	Zn	Zr	Th	U	Rb	Mo
TNY-4	530.33	4.49	53.79	37.81	6.50	72.54	1 277.54	1 290.22	25.65	43.91	4.06	4.90	48.78	111.77
TNY-5	4 776.33	8.75	20.00	29.85	6.00	72.64	77.19	66.59	76.14	45.72	3.53	7.90	38.57	28.25
TNY-6	560.68	2.91	26.23	17.17	7.27	60.65	133.34	92.35	164.46	40.20	3.31	6.73	40.55	21.68
TDE-5	6 678.47	0.95	278.62	67.04	2.28	13.09	393.48	1 225.44	50.08	5.59	0.65	11.11	5.40	27.14
TDE-6	16 492.5	3.29	260.68	113.91	6.56	40.16	833.69	1 366.45	2 849.17	12.96	1.60	13.88	15.45	22.26
TDE-8	1 150.51	1.33	37.53	19.54	1.64	10.03	131.81	60.47	16.64	2.13	0.15	7.97	1.14	2.62
TDE-11-2	934.31	15.60	290.26	133.65	24.50	171.78	323.61	1 311.50	567.81	46.25	2.77	76.68	51.55	80.63
TDE-12-2	881.62	5.68	489.68	130.52	20.81	106.11	214.44	1 284.59	286.62	38.46	2.44	46.76	39.94	26.10
TDE-13-2	378.18	8.61	182.90	76.86	18.36	44.87	138.80	427.53	71.07	41.93	2.52	61.05	38.10	38.05
TDE-14-2	167.09	8.87	187.93	78.83	18.59	45.91	134.83	438.10	71.35	42.74	2.52	61.48	38.90	38.83

表 4 西山布拉克组和玉尔吐斯组硅质岩样品稀土元素分析结果

Table 4 REE compositions of cherts from the Xishanbulake Fm and Yuertus Fm															10 ⁻⁶
样品	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE
TNY-3	1.572	2.687	0.458	2.296	0.784	2.131	1.429	0.181	1.010	0.218	0.574	0.090	0.441	0.067	13.937
TDE-11-1	4.304	5.143	1.011	4.283	0.846	0.291	1.164	0.177	1.106	0.280	0.847	0.134	0.744	0.113	20.442
TDE-12-1	8.353	8.540	2.325	10.537	2.350	0.817	3.028	0.468	2.839	0.631	1.849	0.252	1.419	0.197	43.606
TDE-13-1	3.173	3.729	0.634	2.508	0.438	0.331	0.632	0.089	0.472	0.129	0.344	0.062	0.295	0.047	12.881

表 5 西山布拉克组和玉尔吐斯组泥岩样品稀土元素分析结果

Table 5 REE compositions of mudstones from the Xishanbulake Fm and Yuertus Fm															10 ⁻⁶
样品	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE
TNY-4	25.775	40.837	5.926	22.498	3.559	0.830	3.767	0.446	2.292	0.489	1.554	0.228	1.427	0.221	109.849
TNY-5	12.145	23.500	2.648	10.470	2.114	1.666	2.624	0.362	2.111	0.470	1.398	0.209	1.266	0.195	61.176
TNY-6	19.304	33.640	4.773	19.476	4.080	1.067	4.942	0.691	4.040	0.897	2.719	0.385	2.337	0.360	98.709
TDE-5	13.123	19.057	3.525	15.363	3.310	2.697	4.503	0.662	4.153	0.923	2.714	0.357	1.914	0.271	72.572
TDE-6	17.263	23.613	3.717	15.596	3.373	6.395	5.546	0.636	3.961	0.893	2.774	0.404	2.514	0.387	87.072
TDE-8	7.075	7.358	1.771	7.905	1.571	0.721	2.115	0.311	1.877	0.426	1.189	0.159	0.792	0.112	33.381
TDE-11-2	40.891	54.948	9.791	41.225	8.224	2.098	10.542	1.534	9.664	2.149	6.515	0.844	4.874	0.680	193.980
TDE-12-2	41.025	43.863	9.519	40.990	8.707	2.216	10.949	1.626	10.058	2.186	6.570	0.860	5.053	0.719	184.340
TDE-13-2	34.845	37.874	6.819	28.320	5.373	1.218	6.784	0.962	5.977	1.366	4.355	0.613	3.845	0.583	138.934
TDE-14-2	36.114	39.072	6.993	28.523	5.385	1.229	6.890	0.973	5.997	1.383	4.386	0.619	3.873	0.581	142.018

有轻稀土(LREE: La 至 Eu) 富集,重稀土(HREE: Gd 至 Lu) 亏损的特点。硅质岩稀土元素经球粒陨石标准化后 δCe 为 0.444 ~ 0.714,平均值为 0.567,表明存在一定的 Ce 负异常; δEu 为 0.082 ~ 0.565,平均值为 0.227,具有明显的负异常。

对泥岩而言, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 平均为 4.975,同样具有轻稀土富集,重稀土亏损的特点,且相对硅质岩来说更富集轻稀土。泥岩稀土元素经球粒陨石标准化后 δCe 为 0.489 ~ 0.911,平均值为 0.633,表明存在一定的 Ce 负异常; δEu 为 0.056 ~ 0.416,平均值为 0.129,具有明显的负异常。

3 讨论

3.1 塔里木北缘早寒武世构造背景差异

硅质岩稀土元素由于很少受后期成岩作用的影响,主要与物源有关,因此可以用来反映岩石沉积时的构造-沉积环境。热水沉积硅质岩稀土元素经北美页岩标准化后具有稀土元素总量低,Ce 为负异常,Eu 亏损不明显,甚至出现 Eu 正异常,重稀土元素有富集趋势^[28-32],出现这种规律性特征的原因可能是硅质岩沉积时发生热液与海水混合,导致热水沉积硅质岩能够保留海水固有的 REE 总量低、Ce 负异常等基本特征。4 件西山布拉克组和玉尔吐斯组硅质岩的稀土元素北美页岩标准化后普遍富集 HREE,存在 Ce 的负异常和 Eu 的正异常(图 3a),表明西山布拉克组和玉尔吐斯组的硅质岩受热水作用的影响^[33]。

另一方面,如果海相硅质岩的 Si 全部来自海水,那么海水标准化后的 REE 曲线应该表现为较水平分布的曲线。然而海水标准化后(海水 REE 组成引自 Kawabe 等发表的数据^[34]),出现 Ce 和 Eu 正异常,且曲线整体上右倾,轻稀土富集和重稀土亏损(图 3b)。一般来讲,热液相对于海水具有高 Ce 和 Eu,富集

LREE,亏损 HREE 的特征。因此样品海水标准化后 Ce 和 Eu 正异常,LREE 富集 HREE 亏损进一步表明这些硅质岩沉积时同时受到热水的影响。杨瑞东等 2006 年在该区的研究成果与本次认识一致^[35]。

实际上,西山布拉克组和玉尔吐斯组中黑色泥岩的微量元素也记录了热水作用的影响。一般来讲海相沉积物中的 Sr/Ba 一般大于 1,而淡水沉积物 Sr/Ba 一般小于 1,但是随着海底热水作用的加强,Ba 的含量会显著增加^[36]。10 件泥岩中具有明显偏高的 Ba 含量,表明这些黑色泥页岩可能与热水作用有关。另外,正常海水 V 含量小于 86×10^{-6} ^[37],而本次研究发现 V 的含量远远高出正常海水沉积物中 V 的含量。由此可见塔里木盆地北缘早寒武世西山布拉克组和玉尔吐斯组沉积期均存在热水作用。于炳松等^[38]和孙省利等^[39]的研究结果也说明了该区存在热水作用的影响。

虽然两地的硅质岩的稀土元素分析表明早寒武世均存在热水影响,但详细对比西山布拉克组和玉尔吐斯组硅质稀土元素配分曲线,还是存在一定的区别。如图 3c 所示,球粒陨石标准化后,来自西山布拉克组硅质岩样品 TNY-3 的 Ce 和 Eu 的负异常均小于玉尔吐斯组硅质岩,且 HREE 富集程度比玉尔吐斯组硅质岩强。Mills 等^[35]和 Grenne 等^[40]利用球粒陨石标准

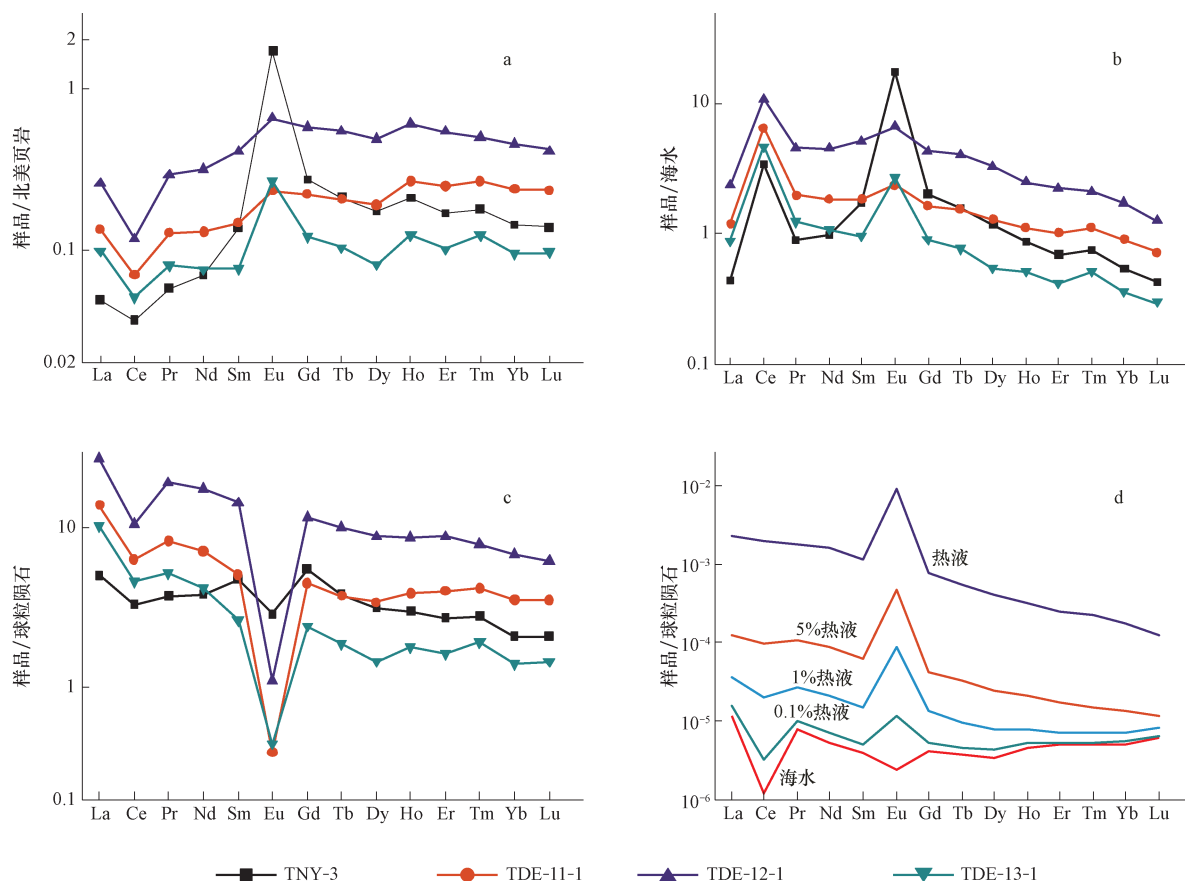


图3 西山布拉克组和玉尔吐斯组硅质岩稀土元素配分模式及不同比例热液混合稀土配分模式^[33]

Fig. 3 REE patterns of cherts from the Xishanbulake Fm and Yuertus Fm and calculated patterns of mixed hydrothermal fluid^[33]

化的稀土元素配分曲线对热液影响程度进行了详细研究(图3d),研究结果认为从正常海水到热液作用的过程中,稀土元素配分曲线呈现较规律的变化,HREE由上升变为下降,程度逐渐加大;Ce负异常逐渐消失,Eu由负异常变为正异常。由此可见,早寒武世库鲁克塔格地区受到的热水影响程度要高于柯坪地区。

导致早寒武世库鲁克塔格地区热水活动强的原因可能与库鲁克塔格地区的岩浆-火山活动活跃有关。前人研究表明,塔里木盆地结晶基底自新元古代末期形成,从震旦纪开始进入应力松弛构造发展阶段发生裂解,塔里木板块北缘总体为稳定的拉伸环境^[41]。两地虽然同处被动大陆边缘,但岩性却存在较大的区别,在东北部的库鲁克塔格地区震旦纪-早寒武世发育大量酸性和基性双峰式大陆裂谷火山岩系为特征,而西北缘的柯坪-阿克苏地区则主要以碎屑岩、碳酸盐岩夹黑色泥页岩^[42]。

综上所述,通过对两地早寒武世硅质岩稀土元素的详细研究,发现虽然两地下寒武统西山布拉克组和玉尔吐斯组沉积均受热水影响,但西山布拉克组的热水影响程度要强于玉尔吐斯组。这暗示了早寒武世,库鲁克塔格地区的岩浆活动更加剧烈。

3.2 塔里木北缘早寒武世沉积环境

在沉积过程中,沉积物与水介质之间有着复杂的地球化学平衡,不同元素之间存在离子交换、吸附能力等差异。这为利用沉积物微量元素及其含量进行古环境分析提供了理论依据^[43-46]。本文利用主微量和稀土元素对西山布拉克组和玉尔吐斯组的古沉积环境和古地貌进行研究。

沉积时水体的氧化还原条件是沉积环境研究的重要方面。利用泥岩稀土元素配分模式进行氧化还原恢复是常用手段^[24]。如图4所示泥岩稀土元素总的配分模式类似,均具有明显的Eu和Ce的负异常,表明

玉尔吐斯组和西山布拉克组的泥质岩形成环境总体类似。如前文所讨论,两个组均受到热水作用的影响,前人研究结果表明热水作用会使得Eu和Ce的负异常减弱,甚至出现Eu的正异常^[33],而本次研究中两个组中的泥岩均出现明显的Eu的负异常。明显Eu的负异常的通常解释是,在还原环境下 Eu^{3+} 被还原为 Eu^{2+} ,离子半径变大,相比其他稀土元素更难进入晶格中,从而导致Eu出现负异常^[27]。因此西山布拉克组和玉尔吐斯组的Eu负异常表明总体的沉积环境为还原环境。另外黑色纹层状炭质泥岩本身也指示还原环境,因为纹层是在底水缺氧的条件下缺乏生物扰动而形成的。

值得注意的是,对比西山布拉克组和玉尔吐斯组泥岩稀土元素的配分模式,发现3件南雅尔当山泥岩样品的Ce的负异常要小于东二沟剖面玉尔吐斯组的泥岩样品(图4)。Ce也是变价元素,水体呈氧化状态时,Ce被氧化成 CeO_2 与其他稀土元素分离,因此Ce异常程度也可以用来反映水体的氧化还原程度^[27],但由于前文的研究表明西山布拉克组沉积期热水作用强度要强于玉尔吐斯组,因此导致西山布拉克组Ce负异常程度比玉尔吐斯组弱的原因也可能是西山布拉克组热水作用程度强于玉尔吐斯组所造成的。总体上,玉尔吐斯组和西山布拉克组稀土元素分析表明沉积时水体总体上均为还原环境。

在对水体的氧化还原性研究过程中,许多金属元素比值在判断氧化还原环境中起到重要作用,例如 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$, V/Cr , Ni/Co 和 Th/U 。由于热水作用,往往会导致金属元素V,Ni,Cr,Co,Th和U含量异常,给这些金属元素比值在判断氧化还原条件时带来偏差。但 Th/U 比值与其他几个指标不同,热水作用对 Th/U 的影响是明确的。一般来讲,热水作用会使得 Th/U 变小。这是由于热水沉积有较高的沉积速率,常常相对富含U^[47]。而对于正常沉积而言,水体还原性越强 Th/U 越低^[48-49]。对西山布拉克组和玉尔吐斯组而

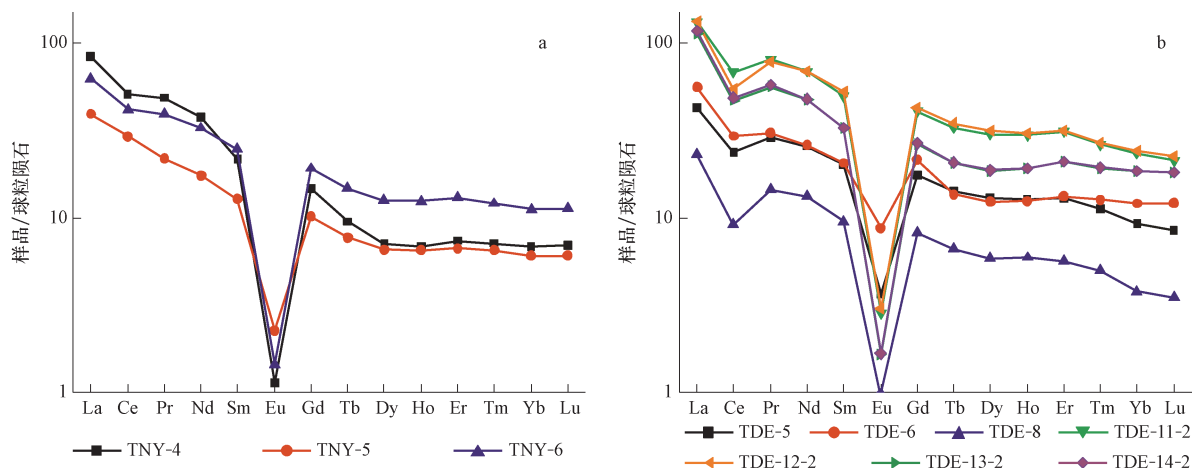


图4 西山布拉克组 a) 和玉尔吐斯组 b) 泥岩样品稀土元素配分模式

Fig. 4 REE patterns of mudstones from the Xishanbulake Fm and Yuertus Fm

言, Th/U 即包含有热水作用的信息, 也包含有氧化还原条件的信息。前文研究认为西山布拉克组热水作用程度强于玉尔吐斯组, 因此由于热水作用会导致西山布拉克组 Th/U 应小于玉尔吐斯组。如果西山布拉克组沉积时水体还原程度等于或者大于玉尔吐斯组沉积期, 叠加热水作用对 Th/U 的影响, 会导致西山布拉克组 Th/U 会更加小于西山布拉克组。然而从分析的数据来看, 西山布拉克组的 Th/U 要大于玉尔吐斯组(表6), 因此可能的解释是西山布拉克组沉积时水体还原程度要弱于玉尔吐斯组。

沉积岩中成烃生物面貌除受沉积时水体氧化还原程度的影响外, 还受成烃生物生活时的生态条件控制, 而水体动力条件和物源供应是生态环境的重要指标。腾格尔的研究认为 Zr/Rb 可以很好的反映沉积时水动力条件, 一般情况下, Zr/Rb 越大, 水动力条件越强^[50]。10 件泥岩的 Zr/Rb 非常接近, 范围在 0.84 到 1.84; 西山布拉克组 Zr/Rb 平均值为 1.03, 玉尔吐斯组 Zr/Rb 平均值为 0.99 (除去样品 TDE-8 一个高值)(表6)。表明总体上西山布拉克组水动力条件可能稍强于玉尔吐斯组。一般而言水动力条件越强, 水体的还原程度越弱, 该结论与前文关于水体氧化还原程度结论一致。

对成烃生物而言, 陆源碎屑供应量影响成烃生物生长的环境, 尤其是藻类需要进行光合作用, 泥质供应量较大会导致水体浊度升高, 使得水体透光性减弱, 从而消弱底栖藻类的数量。为进一步详细刻画沉积时陆源碎屑供应情况, 本次研究选择 Al_2O_3/MgO 和 Zr/Al 分别研究沉积岩中粘土和近源碎屑供应情况。 Al_2O_3 主要赋存于粘土矿物, 而 Zr 是典型的亲陆性元素, 主要以锆石榍石等重矿物形式存在, 在远离陆源沉积区的沉积岩中 Zr/Al 较低^[24]。从获得 Al_2O_3/MgO 和 Zr/Al 比值来看, 西山布拉克组的 Al_2O_3/MgO 要比玉尔吐斯组大, 且变化范围也大, 而 Zr/Al 却要小, 平均值分别为 0.001 8 和 0.008 3 (表6)。表明西山布拉克组的

粘土矿物的输入量要大于玉尔吐斯组, 而近源碎屑输入量要小。

前文研究表明西山布拉克组水体还原程度要小于玉尔吐斯组, 水动力条件要强于玉尔吐斯组, 然而 Al_2O_3/MgO 和 Zr/Al 比值表明西山布拉克组的粘土矿物的输入量大, 近源碎屑输入量小。因此可能暗示了库鲁克塔格地区南雅尔当山剖面或者远离陆源, 近源碎屑供应不足导致 Zr/Al 小; 或者存在高低起伏的水下地貌阻挡了部分陆源碎屑搬运, 从而导致西山布拉克组泥岩 Zr/Al 小。结合前文对两地构造差异研究的结果, 可能是由于库鲁克塔格地区构造-岩浆活动强烈, 火山堆积可能形成了水下隆起地貌。

3.3 塔里木北缘早寒武世构造-沉积背景差异对成烃生物发育的影响

保存在岩石中的成烃生物面貌主要受生物生活的生态环境(生境)和死亡后沉降到埋藏过程中的沉积环境的控制。此外, 成岩环境也会对成烃生物组合面貌进行改造, 特别是进入生烃阶段后, 成岩作用可能会导致保存在岩石中成烃生物组合面貌与沉积时存在一定的差别。前文的研究表明早寒武世西山布拉克组和玉尔吐斯组沉积期均为贫氧到缺氧的还原环境, 死亡沉降下来的有机质均能得到较好的保存, 且西山布拉克组和玉尔吐斯组沉积后所经历的成岩过程大体相同^[16-17]。因此造成成烃生物面貌的差异可能更大程度上受当时的生态环境所控制。

现代海洋藻类研究表明藻类分布受水体深度的控制, 在陆棚较深的部位发育褐藻, 随着水体深度变浅, 向上是依次是红藻和绿藻, 在近岸潮间带-潮上带以浮游藻类发育为特征, 例如蓝藻(图5)。对于浮游藻类, 大部分营漂浮生活, 生活在水体表层, 生活水域主要受营养供应和风浪作用的影响, 一般不受水体深度的限制。但由于风浪的作用, 浮游藻类会聚集在近岸带, 因此具有屏障和营养丰富的海岸带附近浮游藻类丰富, 现代海岸近岸赤潮的爆发与太湖下风区蓝藻的爆发就是最好的证明。对于底栖藻类, 如红藻和褐藻, 在水清的海区可以生长在低潮线以下 30~60 m, 甚至能生活在 200 m 深的海底^[51]。一方面的原因是红藻和褐藻细胞中的色素导致它们依靠蓝光进行光合作用, 而蓝光具有更强的穿透能力, 蓝光可直达较深水体。另一方面, 近岸生态位已被浮游藻类利用, 但是那些不能被浮游藻类所占据的稍深水区就成为这些底栖藻类聚集的场所。

由此可见水体深度、水体营养分布、水体透光程度以及水域风浪遮挡程度都影响着藻类的分布与发育。前文研究表明无论是在库鲁克塔格地区还是柯坪地区,

表6 研究区泥岩样品微量元素和主量元素比值

Table 6 Trace and major element ratios for mudstones

样号	层位	Th/U	Zr/Rb	Al_2O_3/MgO	Zr/Al
TNY-4	Є _{1xs}	0.83	0.90	5.17	0.001 3
TNY-5	Є _{1xs}	0.45	1.19	11.78	0.002 0
TNY-6	Є _{1xs}	0.49	0.99	0.40	0.001 9
TDE-5	Є _{1y}	0.06	1.03	6.18	0.001 9
TDE-6	Є _{1y}	0.12	0.84	2.90	0.014 3
TDE-8	Є _{1y}	0.02	1.87	2.43	0.005 3
TDE-11-2	Є _{1y}	0.04	0.90	8.05	0.017 8
TDE-12-2	Є _{1y}	0.05	0.96	1.89	0.002 1
TDE-13-2	Є _{1y}	0.04	1.10	2.55	0.012 2
TDE-14-2	Є _{1y}	0.04	1.10	5.24	0.004 3

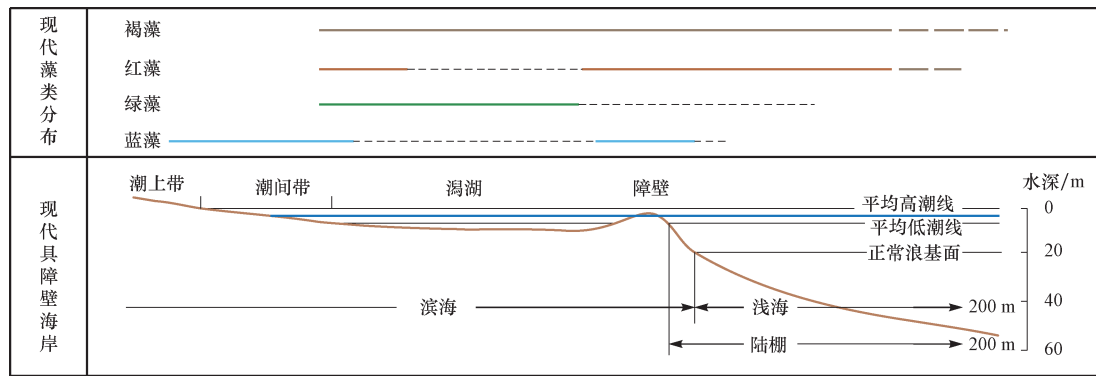


图5 现代藻类分布模式(据 Richard 修改,1988^[51],粗线表示分布最普遍)

Fig.5 Algal distribution(adapted from Richard L. et al.,1988^[51],heavy bars indicate where each type is most common)

西山布拉克组和玉尔吐斯组均为还原环境,水体深度均较大。因此造成成烃生物面貌上差异的很可能与水体营养和透光性以及水域风浪遮挡程度有关。构造-沉积背景的研究发现,塔里木盆地早寒武世东北缘的库鲁克塔格地区相对西北缘柯坪地区构造-岩浆活动强烈,火山喷发一方面带来丰富的营养物质,另一方面火山碎屑的倾泻使得水体透光性减弱,不利于底栖藻类生长,丰富的营养物质会导致浮游藻类变得丰富,再者火山堆积引起的隆起地貌形成了对波浪的天然屏障,为浮游藻类的繁盛提供了庇护场所。因此在库鲁克塔格地区西山布拉克组成烃生物以底栖藻类和浮游藻类为主。

然而在柯坪地区,构造活动相对平静,在相对深水区,利用蓝光进行光合作用的底栖藻类(红藻)占据有利的生态位,加之缺乏抵抗风浪的古地理地貌,使得营漂浮生活的浮游藻类随风浪作用聚集在水体相对较浅的海岸带,从而使得水体较深的玉尔吐斯组以底栖藻类为主。

4 结论

1) 塔里木盆地寒武统成烃生物以底栖藻类为主,含浮游藻类。盆地北缘东西存在一定的差异,东北缘西山布拉克组成烃生物主要以底栖藻类和浮游藻类为主,从底向顶浮游藻类增多底栖藻类减少;盆地西北缘玉尔吐斯组成烃生物以底栖藻类(红藻)为主,仅在个别样品中浮游藻类占主要地位。

2) 塔里木盆地寒武统西山布拉克组和玉尔吐斯组沉积时均受热水作用影响,但对西山布拉克组的影响程度要强于玉尔吐斯组,暗示库鲁克塔格地区早寒武世岩浆活动更加剧烈。

3) 塔里木盆地寒武统西山布拉克组和玉尔吐斯组均为还原环境,但相对东二沟剖面玉尔吐斯组而言,西山布拉克组具有水体还原性强度稍弱,水动力条件稍强,粘土矿物的输入量大,近源碎屑输入量小的特

征。活跃的火山活动可能会使得库鲁克塔格地区的古地貌起伏程度要强于柯坪地区。

4) 构造活动、水体深度以及古地貌上的差异可能是导致西山布拉克组和玉尔吐斯组成烃生物面貌不同的主要原因。

致谢:感谢南京大学边立曾教授、中石化勘探开发研究院黎茂稳教授和钱一雄教授在研究过程中提供的帮助,感谢中国科学院地质地球物理研究所兰州油气中心罗厚勇博士、北京大学张巍博士、中石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所储呈林博士和杨鑫博士在野外样品采集过程中的提供的帮助。

参 考 文 献

- [1] 张水昌,梁狄刚,张宝民,等.塔里木盆地海相油气的生成[M].北京:石油工业出版社,2004.
Zhang Shuichang, Liang Digang, Zhang Baoming, et al. Marine hydrocarbon generating of Tarim[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [2] 边立曾,张水昌,张宝明,等.海相烃源岩生烃母质生物构成特征//曹寅,钱志浩,秦建中,等.《石油地质样品分析测试技术应用》[C].北京:石油工业出版社,2006.
Bian Lizeng, Zhang Shuichang, Zhang Baoming, et al. The species component of organic matter in marine source rocks//Cao Yin, Qian Zhihao, Qing Jianzhong, et al. The analysis techniques for petroleum geological samples[C]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [3] 殷鸿福,谢树成,颜佳新,等.海相碳酸盐烃源岩评价的地球生物学方法[J].中国科学 D 辑,2011,41(7): 895-909.
Ying hongfu, Xie Shucheng, Yan Jiaxing, et al. The geobiology method for marine source rock evaluation[J]. Science in China Series D-Earth Sciences, 2011, 41(7): 895-909.
- [4] 张水昌,张保民,王飞宇,等.塔里木盆地两套海相有效烃源层—I 有机质性质、发育环境及控制因素[J].自然科学进展,2001,11(3): 261-268.
Zhang Shuichang, Zhang Baoming, Wang Feiyu, et al. Two sets of marine effective source rocks in the Tarim basin-the features, development environments and controls for type I organic matter[J]. Progress in Natural Science, 2001, 11(3): 261-268.
- [5] 张水昌,张宝民,边立曾,等.8 亿多年前由红藻堆积而成的下马岭组油页岩[J].中国科学(D 辑),2007,37(5): 636-643.

- Zhang Shuichang, Zhang Baoming, Bian Lizeng, et al. Rhodophyte stack in the Xiaomaling Formation oil shale before 800Ma[J]. Science in China Series(D-Earth Sciences), 2007, 37(5): 636-643.
- [6] 梁狄刚, 张水昌, 张宝民, 等. 从塔里木盆地看中国海相生油问题[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 534-547.
- Liang Digang, Zhang Shuichang, Zhang Baoming, et al. Understanding on marine oil generating in china based on Tarim basin[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4): 534-547.
- [7] Cao Jian, Bian Lizeng, Hu Kai, et al. Benthic macro red alga: A new possible bio-precursor of Jurassic source rocks in the northern Qaidam Basin, NW China[J]. Science in China Series(D-Earth Sciences), 2009, 52(5): 647-654.
- [8] 鲍芳, 腾格尔, 仰云峰, 等. 不同成烃生物的拉曼光谱特征[J]. 高校地质学报, 2012, 18(1): 174-179.
- Bao Fang, Tengger, Yan Yunfeng, et al. Raman Spectroscopic Characteristics of Different Hydrocarbon-Forming Organisms[J]. Geological Journal of China Universities, 2012, 18(1): 174-179.
- [9] 吴庆余, 盛国英, 傅家谟. 一种蓝细菌的热解产气模拟[J]. 科学通报, 1987, 18: 1419-1421.
- Wu Qingyu, Sheng Guoyin, Fu Jiamo. Thermal stimulation for cyanobacteria[J]. Chinese Science Bulletin, 1987, 18: 1419-1421.
- [10] 张惠之, 盛国英, 王开发, 李宜垠, 何承全, 1994. 盘星藻热模拟生油研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 23(3): 291-299.
- Zhang Huizhi, Sheng Guoying, Wang Kaifa Li Yiyang, He Chengquan. Study on the Thermal Simulation for Generating Oil by Pediatrum[J]. Journal of Tongji University, 1994, 23(3): 291-299.
- [11] 宋一涛, 李树. 颗石藻生烃的热模拟实验研究[J]. 高校地质学报, 1995, 1(2): 95-106.
- Song Yitao, Li Shuqing. X perimental study on simulating hydrocarbon generation of coccolithophoridaes by heating- I . generation rate and property of hydrocarbons, characteristic of alkanes and alkenes [J]. Geological Journal of University, 1995, 1(2): 95-106.
- [12] 郭汝泰, 杨凤丽. 藻类有机质的成烃机制探讨[J]. 同济大学学报, 2002, 30(1): 4-45.
- Guo Rutai, Yang Fengli. Inquisition to the hydrocarbon generation mechanism for algal organic matter[J]. Journal of Tongji University, 2002, 30(1): 4-45.
- [13] 刘文斌, 陆现彩, 秦建中, 等. 海带热模拟实验的固体残余物研究及其石油地质意义[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2005, 41(3): 234-244.
- Liu Wenbin, Lu Xiancai, Qin Jianzhong, et al. Soil residue of thermal simulation experiment of laminaria and its petroleum geological significance[J]. Journal of Nanjing University(Natural Sciences), 2005, 41(3): 234-244.
- [14] 叶云, 刘文汇, 腾格尔, 等. 巢湖蓝藻腐殖化过程中形态与成份变化研究[J]. 微体古生物学报, 2012, 29(2): 152-160.
- Ye Yun, Liu Wenhui, Tengger, et al. Research on cyanobacteria from the chaoahu lake during a simulating process of decaying: changes in morphology and organic composition[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2012, 29(2): 152-160.
- [15] 秦建中, 陶国亮, 腾格尔, 等. 南方海相优质页岩的成烃生物研究[J]. 石油实验地质, 2010, 32(3): 262-269.
- Qing Jiangzhong, Tao Guoliang, Tengger, et al. Hydrocarbon-forming organisms in excellent marine source rocks in south china[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2010, 32(3): 262-269.
- [16] 丁道桂, 汤良杰. 塔里木盆地的形成与演化[M]. 南京: 河海大学出版社, 1996.
- Ding Daogui, Tang Liangjie. The formation and development of Tarim basin[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1996.
- [17] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- Jia Chengzao. Thetectonic characteristics and petroleum of Tarim basin in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [18] 肖序常, 汤耀庆, 冯益民. 新疆北部及其邻区大地构造[M]. 北京: 地质出版社, 1992.
- Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Feng Yiming. Geotectonics of the northern Xingjiang Province and adjacent region[M]. Beijing: Geological Press, 1992.
- [19] 新疆维吾尔自治区地质局第二区域地质测量大队. 1:20 万库勒幅地质图说明书[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- The second geological brigade of the Xinjiang Uygur Autonomous Region Bureau of Geology. Geological map instruction of Koral at 1: 200000 scale[M]. Beijing: Geological Press, 1996.
- [20] 新疆地矿局第三地质大队. 新疆尉犁县兴地一带 1:5 万区域地质矿产调查报告[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- The third geological brigade of the Xinjiang Bureau of Geology. The geological and mineral investigation of Yuli and adjacent region in the Xinjiang Province at 1:50000 scale[M]. Beijing: Geological Press, 2006.
- [21] 张师本, 倪寓南, 龚福华. 塔里木盆地周缘地层考察指南[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- Zhang Shibei, Ni Yunan, Gong Fuhua. Field Guide of stratum in margin of Tarim basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [22] 蔡东升, 卢华夏, 贾东. 塔里木盆地西北缘柯坪造山带变形分析 // 童晓光, 梁狄刚, 贾承造. 塔里木盆地石油地质研究新进展[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- Cai Dongsheng, Lu Huafu, Jia Dong. Deformation analysis of the Keping orogenic belt in the Northwestern Tarim basin // Tong Xiaoguang, Liang Digang, Jia Chengzao. New progress on petroleum geology in Tarim basin[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [23] 卢华夏, 贾东, 蔡东升, 等. 塔西北柯坪剪切挤压构造[J]. 高校地质学报, 1998, 4(1): 49-58.
- Lu Huafu, Jia Dong, Cai Dongsheng, et al. On the kalpin transpression tectonics of northwest Tarim[J]. Geological Journal of China universities, 1998, 4(1): 49-58.
- [24] 席胜利, 郑聪斌, 李振宏. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系地球化学特征及其沉积环境意义[J]. 古地理学报, 2004, 6(2): 196-206.
- Xi Shengli, Zheng Congbin, Li Zhenhong. Geochemical characteristics and its sedimentary environment significance of the Ordovician in the western margin of Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2004, 6(2): 196-206.
- [25] Jones B, Manning D A C. Comparion of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. Chemical Geology, 1994, 111(1-4): 111-129.
- [26] Hatch J R, Leventhal J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennaylvanian(Missourian) Stark shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, USA [J]. Chemical Geology, 1994, 99(1-3): 65-82.

- [27] 刘英俊,曹励明.元素地球化学[M].北京:科学出版社,1984.
Liu Yingjun, Cao Liming. Element geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1984.
- [28] Shimizu H, Masuda A. Cerium in chert as an indication of marine environment of its formation[J]. Nature, 1977, 266: 346-348.
- [29] Fleet A J. Hydrothermal and hydrogeneous ferromanganese deposits// Rona P A. Hydrothermal Process at Sea Floor[M]. Spreading Centers, 1983, 537-570.
- [30] 王东安,陈瑞君.东昆仑中段奥陶系硅质岩地球化学特征及沉积大地构造环境判别[J].古地理学报, 1999, 1(1): 41-53.
Wang Dongan, Chen Ruijun. Geochemical features of the ordovician siliceous rocks in the middle part of east Kunlun and recognition of their sedimentary tectonic environments[J]. Journal of paleogeography, 1992, 1(1): 41-53.
- [31] 杨建民,王登红,毛景文,等.硅质岩岩石化学研究方法及其在“镜铁山式”铁矿床中的应用[J].岩石矿物学杂志, 1999, 18(2): 108-120.
Yang Jianmin, Wang Denghong, Mao Jingwen, et al. The petrochemical research method for silicalite and its application to the “Jingtieshan type” iron deposits[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1999, 18(2): 108-120.
- [32] 燕长海,彭翼,刘国印,等.东秦岭二郎坪群热水沉积硅质岩的地球化学特征[J].地质通报, 2007, 26(5): 560-566.
Yan Changhai, Peng Yi, Liu Guoyin, et al. Geochemical characteristics of hydrothermal sedimentary cherts in the Erlangping Group, East Qinling Range, China[J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(5): 560-566.
- [33] Mills R A, Elderfield H. Rare-earth element geochemistry of hydrothermal deposits from the active TAG Mound, 26° N Mid-Atlantic Ridge[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59: 3511-3524.
- [34] Kawabe I, Toriumi T, Ohta A, et al. Monoisotopic REE abundances in Seawater and the origin of seawater tetrad effect[J]. Geochemical Journal, 1998, 32: 213-229.
- [35] 杨瑞东,张传林,罗新荣,等.新疆库鲁克塔格地区早寒武世硅质岩地球化学特征及其意义[J].地质学报, 2006, 80(4): 598-605.
Yang Ruidong, Zhang Chuanlin, Luo Xingrong, et al. Geochemical characteristics of Early Cambrian cherts in Qurqutagh, Xinjiang, West China[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(4): 598-605.
- [36] 王益友,郭文莹,张国栋.几种地化标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用[J].同济大学学报, 1979, 7(2): 51-60.
Wang Yiyu, Guo Wenyin, Zhang Guodong. Application of some geochemical indicators in determining of sedimentary environment of the funing group (paleogene), Jin-Hu[J]. Journal of Tongji University, 1979, 7(2): 51-60.
- [37] Chen Z Y, Chen Z L, Zhang W G. Quaternary stratigraphy and trace element indicates of the Yangtze delta, eastern China, with special reference to marine transgressions[J]. Quaternary Research, 1997, 47: 181-191.
- [38] 于柄松,陈建强,李兴武,等.塔里木盆地肖尔布拉克剖面下寒武统底部硅质岩微量元素和稀土元素地球化学及其沉积背景[J].沉积学报, 2004, 22(1): 59-66.
Yu Bingsong, Chen Jianqiang, Li Xingwu, et al. Rare earth and trace element patterns in bedded-cherts from the bottom of the Lower Cambrian in the Northern Tarim basin, Northwest China: Implication for depositional environments[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(1): 59-66.
- [39] 孙省利,陈践发,刘文汇,等.塔里木盆地寒武统硅质岩地球化学特征及其形成环境[J].石油勘探与开发, 2004, 31(3): 45-48.
Sun Xingli, Chen Jianfa, Liu Wenhui, et al. Geochemical characteristics of cherts of Lower Cambrian in the Tarim Basin and its implication for environment[J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(3): 45-48.
- [40] Grenne T, John F. Slack Paleozoic and Mesozoic silica-rich seawater: Evidence from hematitic chert (jasper) deposits[J]. Geological Society of America, 2003, 31(4): 319-322.
- [41] 新疆维吾尔自治区地质矿产局.新疆维吾尔自治区区域地质志[M].北京:地质出版社, 1993.
The Geological and mineral Bureau of the Xinjiang Uygur Autonomous Region. Areal geology of the Xinjiang Uygur Autonomous Region[M]. Beijing: Geological Press, 1993.
- [42] 新疆维吾尔自治区地质矿产局.新疆维吾尔自治区岩石地层[M].北京:中国地质大学出版社, 2008.
The Geological and mineral Bureau of the Xinjiang Uygur Autonomous Region. Stratum of the Xinjiang Uygur Autonomous Region[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 2008.
- [43] Miller E K, Blum J D, Friedland A J. Determination of soil exchangeable cation loss and weathering rates using Sr isotope[J]. Nature, 1993, 362: 438-441.
- [44] Bailey S W, Hornbeck J W, Driscoll C T, et al. Calcium inputs and transport in a base poor forest ecosystem as interpreted by Sr isotopes[J]. Water Resource Research, 1996, 32: 707-719.
- [45] Reinhardt E G, Blenkinsop J, Paterson R T. Assessment of a Sr isotope ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) vital effect in marine taxa from Lee Stocking Island, Bahamas[J]. Geo-Marine Letters, 1998, 18(3): 241-246.
- [46] Wang Jie, Chen Jianfa, Bao Zhidong, et al. Influences of marine floor hydrothermal activity on organic matter abundance in marine carbonate rocks—A case study of middle-upper Proterozoic in the northern part of North China[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(5): 585-593.
- [47] Ronapa. Criteria for recognition of hydrothermal mineral deposits in oceanic crust[J]. Economic Geology, 1978, 73(2): 135-160.
- [48] Marchig V. Some geochemistry indicators for discrimination between diagenetic and hydrothermal metalliferous sediments[J]. Marine Geology, 1982, 58(3): 241-256.
- [49] Roma P A. Criteria for recognition of hydrothermal mineral deposits in ocean crust[J]. Economic Geology, 1987, 73(2): 135-160.
- [50] 腾格尔.海相地层元素、碳氧同位素分布与沉积环境和烃源岩发育关系—以鄂尔多斯盆地为例[D].兰州:中国科学院兰州地质研究所, 2004.
Tenger. The distribution of elements, Carbon and oxygen isotopes on marine strata and environmental correlation between them and hydrocarbon source rocks formation—An example from Ordovician basin, China[D]. Lanzhou: Lanzhou institute of geology, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [51] Richard L, Woods S, Tomlinson R, et al. The field guide to Ambergis Caye[M]. University of Texas, 1988.