

库车坳陷-天山中、新生代构造转折的砂岩碎屑 与地球化学记录*

李 忠^{①**} 郭 宏^② 王道轩^③ 林 伟^①

(① 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; ② 中国石油塔里木油田分公司, 库尔勒 841000;

③ 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009)

摘要 对天山南麓库车坳陷砂岩全岩主元素分析表明, 沉积记录在下三叠统-中三叠统、上侏罗统-下白垩统、下白垩统-古新统、中新统-上新统等 4 个界面发生较大变化或突变, 这与砂岩骨架、碎屑重矿物的成分(组合)变化基本一致. 中生代~新生代沉积过程呈 5 段式发展: (1) 碎屑组合主要表现为从褐红色粗碎屑沉积到灰色-深灰色细碎屑沉积、红色中-细碎屑沉积、红色-杂色碎屑夹膏盐沉积, 最后转变为褐灰色粗碎屑沉积, 岩屑成分成熟度相应呈不稳定-稳定-不稳定-较不稳定-极不稳定组合产出, 后晚侏罗世以碳酸盐岩等沉积岩岩屑的增加为显著特征; (2) 砂岩全岩的 CaO 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ 含量呈较高值-低值-高值-较高值-最高值序列变化, 后晚侏罗世急剧增高; (3) $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$ 和 $\ln(Q/(L + \text{CE}))$ 等反映碎屑成分风化指数的综合指标也呈较低值-高值-低值-较低值-最低值变化, 在后晚侏罗世显著降低. 第 1 和第 2 阶段和后 3 个阶段样品在 A-CN-K 和 A-CN-K-FM 图上明显可分. 研究表明, 早-中三叠世、晚侏罗世-早白垩世是研究区古构造-古气候重要的变革期或转折期, 而晚白垩世、中-上新世前后不同的沉积体系域和类似的砂岩风化指数说明主要与古构造变动即山盆差异升降有关.

关键词 天山 库车坳陷 盆山系统 沉积记录 构造转折 中生代~新生代

天山及其邻近地区在经历晚古生代复杂的块体拼合后^[1-5], 进入陆内叠加构造变形阶段^[6-16], 不仅控制着中生代盆山演变, 而且对塔里木等盆地古生界油气成藏产生了深刻的改造和调整作用^[17-19]. 位于天山南麓的库车坳陷是塔里木盆地最北缘的次

级构造单元, 其中发育了 6000 ~ 7000 m 的中新生界沉积, 是解析大陆盆山关系和构造演变的良好研究区. 中外学者对库车坳陷开展了大量的构造和沉积学研究^[18, 20-30], 认为晚古生代末、三叠纪末、白垩纪末和早第三纪末是该区重要的陆内构造变形和变革

2003-12-20 收稿, 2004-04-12 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划资助项目(编号: G1999043303)

** E-mail: lizhong@mail.igcas.ac.cn

期. 但对其构造属性争议明显, 对关键变革时期及其盆山关系的认识还比较模糊. 如欧美学者提出塔里木盆地中生代-早第三纪具有类似破裂前陆盆地^[26-27]或弧后前陆盆地^[20]的构造型式, 而晚第三纪~第四纪则具有碰撞继后盆地(Collisional successor basin)特征^[21]. 主要依据盆地构造分析, 一些中国学者的主流认识是库车盆地经历了晚二叠世~三叠纪前陆盆地、侏罗纪~早第三纪断陷与拗陷盆地、中新世以来“再生前陆盆地”的演化^[17,18,22,25,31]. 近年来, 从盆山系统角度对库车拗陷-天山开展了研究^[32,33]. 在此基础上, 本文试图结合沉积学和地球化学记录深入探索中生代~新生代充填过程的构造演化时限及其制约因素. 由于研究区具有“多期成盆、多期改造、多套烃源岩、多次生排烃、多期运聚散”的叠合盆地属性, 因此厘定盆地演化构造变革的关键时期具有重要意义.

1 天山-库车拗陷构造格架

天山呈东西向横亘于中国新疆中部并向西延伸进入吉尔吉斯斯坦和哈萨克斯坦, 东西长约 2500 km, 海拔高差最大逾 7000 m^[34], 是世界上地形高差较大的地区之一. 在中国境内, 天山南北分别与塔里木盆地和准噶尔盆地相接. 库车拗陷位于天山南麓(图1),

是塔里木盆地最北缘富含油气的次级构造单元. 自北向南可以将天山及其邻区划分为5个主要构造单元: 乌鲁木齐拗陷(褶皱带)或北部山盆过渡带、北天山缝合带或冲断-造山带、中天山弧造山带、南天山缝合带或冲断-造山带、库车拗陷(褶皱带)或南部山盆过渡带. 中天山与南、北天山之间被认为分别在晚泥盆世~早石炭世和晚石炭世~早二叠世缝合^[3-5].

对于上述主要构造单元特别是南、北天山冲断-造山带的构造属性和演化尽管尚有不同认识^[4,5,9,22,35], 但一般认为中天山具有明显的岛弧属性, 古生代火山岩发育; 南天山主要与晚泥盆世~早石炭世碰撞造山及其后的陆内变形作用密切相关, 表层主要由古生界被动大陆边缘沉积地层构成, 穿插了晚古生代火山岩, 发育一系列向南的逆冲断裂和相关褶皱. 北天山的形成与晚石炭世~早二叠世弧-陆碰撞造山及其后的陆内变形作用密切相关, 向北的逆冲断裂和相关褶皱发育. 乌鲁木齐褶皱带和库车褶皱带发育巨厚的中生界沉积, 并存在相向的推覆构造和滑覆(重力扩展)变形, 但对其形成时间、机制和影响范围尚存争议^[22,32,33].

2 样品与研究方法

在天山-库车拗陷接合部, 自西向东选取铁里克

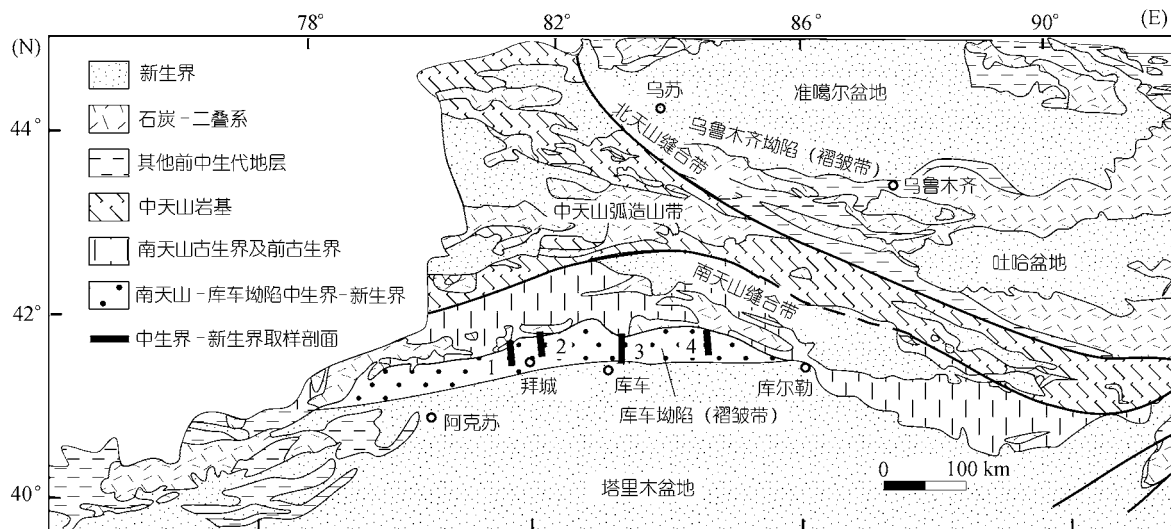


图1 天山-库车拗陷构造-地层框架与取样剖面位置
1. 铁里克温泉; 2. 克拉苏河; 3. 库车河; 4. 阳霞剖面

温泉、克拉苏河、库车河和阳霞4条中-新生界地层剖面进行观测研究(图1), 其岩石学及沉积相组合特征可参见前人资料^[29,321]。其中重点对克拉苏河、库车河和阳霞3条相对完整的地层剖面开展了165个砂岩样品、189个碎屑重矿物组分和134个砂岩样品岩石地球化学的配套分析和解释, 3类样品的数量并非一一对应(图2)。

本文中砂岩骨架颗粒组分的研究主要依据国际上成熟的研究方法和范例^[21,36~39]。对于碎屑重矿物

样品, 野外采集的重砂分析样品一般为中粗砂岩(平均粒度介于0.2~2 mm), 样品质量约0.5~1.5 kg。在室内, 样品分析的步骤为: (1) 经无污染粉碎至10目(最大岩块粒径约2 mm), 利用标准干筛筛选40~80目, 约0.45~0.18 mm粒级(略大于砂岩分析样品的最小平均粒度), 以保证分离出的重矿物为碎屑成因颗粒; (2) 根据Eynatten等人^[40]介绍的化学处理程序剔除颗粒粘土套、胶结物和假杂基; (3) 通过重液、精淘分离和电磁分离出电磁、无磁和强磁3部分重矿物; (4) 通

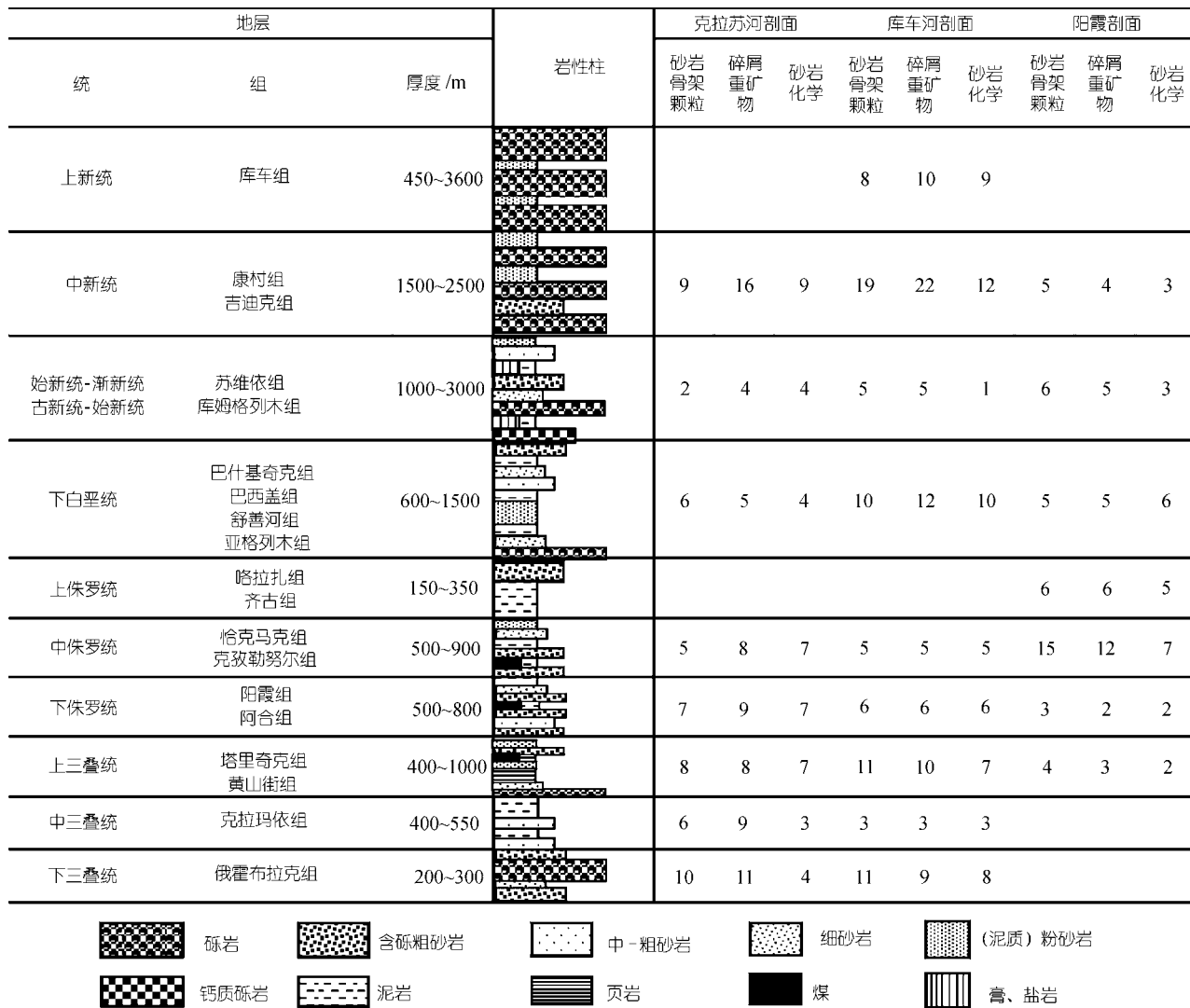


图 2 库车拗陷地层序列与不同分析项目的样品数量

1) 李 忠, 王道轩, 林 伟, 等. 库车拗陷中-新生界碎屑组分对天山物源演变的指示. 岩石学报(待刊)

过双目显微镜鉴定分离出不同的重矿物; (5) 采用高精度天平完成计量, 最终通过重矿物密度(平均值)^[41]将质量百分比换算为体积百分比。

从克拉苏河、库车河和阳霞 3 条剖面中选择 134 个质量约 1 kg 比较新鲜的砂岩进行岩石主量元素地球化学分析。首先将其无污染粉碎至 200 目, 从中缩分出 5 g 样品备用。样品熔样流程主要包括: (1) 准确称取 0.4 g 样品与 4 g 无水 $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, 倒入铂-黄坩埚中充分搅拌, 再加入浓度为 120 mg/mL 的 NH_4Br 溶液 5 滴及适量氧化剂均匀混合^[42,43]; (2) 将坩埚装在 CLAISSE 自动熔融制样机上, 按给定程序熔融; (3) 将熔好的高温熔体铸入铂-黄金制成的成型模具中, 待其冷却后装入塑料袋内, 并置于干燥器中保存。主量元素通过 PW1400 型 X 荧光光谱仪测定, FeO 含量根据高锰酸钾滴定法测定, 烧失量根据灼烧法测定。以上测试由中国科学院地质与地球物理研究所 X 荧光光谱实验室完成, 结果见表 1。

应该指出, 尽管砂岩岩石地球化学分析结果受到成岩作用的改造, 但由于受沉积分异影响小, 一些特征元素含量或比值能够很好地反映原始物源的构造属性^[44-46]。另一方面, 砂岩与母岩岩石地球化学组分之间的类同或差异性与沉积过程的元素地球化学行为密切相关, 因此特征地球化学参数在区域沉积背景——古气候和古构造条件研究中具有独特的作用^[44-50]。特别是地球化学分析结果的客观性克服了碎屑颗粒统计上的人为影响, 因此开展系统的碎屑组分和岩石地球化学的配套或对比研究, 将能够提高对沉积作用及其主控因素的认知水平。

3 沉积-地球化学综合记录

3.1 克拉苏河剖面

图 3 展示了克拉苏河剖面中、新生界砂岩骨架颗粒、碎屑重矿物与岩石地球化学综合记录。对比分析可以看出, 砂岩全岩特征主元素含量或比值与砂岩骨架、碎屑重矿物的成分变化基本一致, 反映天山南麓库车坳陷沉积记录在中三叠统克拉玛依组(T_2k)

下部、上侏罗统喀拉扎组(J_3k)-下白垩统亚格列木组(K_{1y})、下白垩统巴什基奇克组(K_{1b})-古新始~始新统库姆格列木组(E_{1-2k})3 个界面发生较大变化或突变。

对于 T_2k 下部界面, 主要表现为: (1) 从红色粗碎屑沉积转变为灰色-深灰色细碎屑沉积, 岩屑成分趋于减少, 而碎屑锆石-金红石-电气石组合逐渐占居优势¹⁾, 碎屑成分成熟度增大(图 3(a)和 2(b)); (2) 砂岩全岩的 CaO 含量在界面之上总体降低(图 3(c)), 这显然与强烈磨蚀条件下碳酸盐岩岩屑的减少密切相关; (3) 与早三叠统样品相比, 中上三叠统~中侏罗统的 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$ 等反映碎屑成分风化强度的综合指标显著增大, 而反映干热-强氧化条件的碎屑褐铁矿含量急剧降低。

相反, 对于 J_3k/K_{1y} 界面, 主要表现为: (1) 从灰色-深灰色细碎屑沉积转变为红色粗碎屑沉积, 碎屑成分趋于复杂, 成分成熟度趋于降低(图 3(a)和 2(b)); (2) 砂岩全岩的 CaO 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3^*+\text{MgO}$ 含量急剧增大(图 3(c)), 前者从小于 5% 增大到 15% 以上, 后者从 1%~2% 增大到 3% 以上; (3) 与前晚侏罗世相比, 后晚侏罗世样品的 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$ 指标从大约 50 以上显著减小到 10 以下(图 3(c)), 而碎屑褐铁矿含量从小于 5%~10% 急剧增大到 80% 以上(图 3(a))。

对于 K_{1b}/E_{1-2k} 界面, 主要表现为: (1) 从红色粗碎屑沉积转变为红色-杂色碎屑夹膏盐沉积, 碎屑成分变得更加复杂, 尤其以角闪石、辉石等不稳定碎屑重矿物以及碳酸盐岩岩屑的增加为显著特征, 成分成熟度急剧降低(图 3(a)和 2(b)); (2) 砂岩全岩的 CaO 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3^*+\text{MgO}$ 含量略有增大或保持较高值(图 3(c)); (3) $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$ 指标基本不变, 维持 10 以下低值(图 3(c)), 而碎屑褐铁矿含量略有增大或保持较高值, 约 80%~90% 以上(图 3(a))。

3.2 库车河剖面

库车河剖面砂岩骨架颗粒、碎屑重矿物与岩石地球化学综合记录也反映天山南麓库车坳陷沉积记

1) 同 17 页脚注

表 1 中新生界砂岩主元素成分与特征参数计算结果^{a)}

地层	序号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Fe ₂ O ₃ [*] +MgO	K ₂ O /Na ₂ O	CaO +Na ₂ O	Al ₂ O ₃ / (CaO+Na ₂ O)	FeO [*] +MgO
库车河剖面																		
T _{1e}	1	51.52	0.15	3.26	0.27	1.38	0.07	22.44	0.90	0.41	0.01	0.05	19.62	3.21	41.00	27.90	2.29	3.00
	2	83.75	0.18	6.55	0.44	0.84	0.06	2.18	0.59	0.67	0.01	0.05	4.66	2.01	67.00	2.30	38.24	1.87
	3	61.88	0.23	5.30	0.30	2.06	0.06	14.13	1.32	0.92	0.01	0.07	13.75	4.30	92.00	16.39	4.38	4.03
	4	74.11	0.27	6.44	0.78	2.31	0.06	5.87	1.38	0.79	0.01	0.09	7.90	4.95	79.00	6.38	12.60	4.60
	5	66.75	0.16	4.45	0.40	1.39	0.10	12.57	0.88	0.77	0.01	0.05	12.42	3.10	77.00	14.37	5.31	2.89
	6	66.82	0.16	4.44	0.43	1.35	0.10	12.58	0.88	0.79	0.02	0.06	12.33	3.09	39.50	14.38	5.30	2.88
	7	80.27	0.16	3.77	0.40	1.64	0.10	5.46	0.64	0.45	0.01	0.07	6.88	2.93	45.00	5.88	14.67	2.71
	8	87.94	0.14	4.95	0.36	0.98	0.05	0.83	0.38	0.88	0.01	0.05	3.27	1.82	88.00	0.87	104.69	1.68
T _{2-3k}	9	77.41	0.26	6.82	0.64	2.12	0.11	4.07	0.93	1.03	0.01	0.10	6.49	4.02	103.00	4.36	18.97	3.72
	10	88.94	0.11	3.53	0.30	0.90	0.09	1.80	0.37	0.54	0.01	0.05	3.46	1.66	54.00	1.87	49.14	1.53
	11	89.06	0.13	4.11	0.29	1.38	0.04	0.77	0.39	0.69	0.01	0.05	3.02	2.16	69.00	0.80	114.18	1.98
T _{3h}	12	85.74	0.15	6.31	0.46	0.78	0.05	0.56	1.51	1.97	0.70	0.06	1.75	2.85	2.81	1.28	68.05	2.72
	13	82.12	0.19	6.95	0.48	0.94	0.05	2.23	0.64	2.00	1.10	0.03	3.19	2.18	1.82	3.44	24.66	2.03
	14	86.99	0.14	5.48	0.44	0.97	0.05	1.07	0.45	1.26	0.68	0.06	2.28	1.96	1.85	1.79	49.71	1.81
T _{3t}	15	77.34	0.40	9.44	1.60	2.08	0.07	1.09	1.01	1.72	1.40	0.12	3.51	5.06	1.23	2.59	31.06	4.66
	16	84.73	0.19	7.01	0.37	0.47	0.04	1.13	0.34	1.57	0.82	0.05	3.31	1.26	1.91	2.02	43.45	1.17
	17	85.41	0.17	7.10	0.26	0.22	0.03	0.30	0.21	1.86	0.01	0.04	4.15	0.75	186.00	0.32	275.52	0.70
	18	88.23	0.10	5.61	0.36	0.13	0.04	0.95	0.11	1.59	0.01	0.03	2.81	0.66	159.00	0.99	91.91	0.60
J _{1a}	19	75.52	0.29	8.47	0.56	0.89	0.07	4.00	0.59	2.74	0.31	0.05	6.22	2.25	8.84	4.61	17.52	2.09
	20	87.50	0.05	4.80	0.33	0.29	0.06	1.34	0.16	2.13	0.37	0.02	2.82	0.84	5.76	1.76	51.17	0.77
	21	86.92	0.11	5.58	0.36	0.44	0.04	1.07	0.16	2.20	0.33	0.03	2.46	1.03	6.67	1.44	62.09	0.94
	22	86.05	0.24	6.80	0.27	0.26	0.04	0.59	0.15	2.71	0.17	0.04	2.34	0.73	15.94	0.78	113.22	0.67
J _{1y}	23	55.74	0.18	5.50	0.34	0.26	0.07	18.25	0.61	1.92	0.01	0.02	16.91	1.51	192.00	22.03	3.05	1.43
	24	93.58	0.13	2.44	0.21	0.28	0.03	0.39	0.26	0.58	0.01	0.01	1.97	0.79	58.00	0.41	233.95	0.74
J _{2k}	25	80.69	0.25	8.33	0.37	0.93	0.04	2.06	0.59	1.88	0.95	0.04	3.83	2.01	1.98	3.13	26.81	1.87
	26	85.21	0.13	6.90	0.37	0.36	0.03	0.65	0.62	1.79	0.82	0.04	3.06	1.44	2.18	1.52	57.97	1.36
	27	69.91	0.14	3.60	0.45	0.72	0.07	11.84	0.76	0.71	0.27	0.07	11.28	2.24	2.63	13.68	5.77	2.10
J _{2q}	28	60.78	0.59	6.11	1.30	1.39	0.11	13.47	1.38	1.16	0.42	0.04	13.09	4.86	2.76	16.01	4.38	4.53
	29	59.51	0.20	4.87	0.72	0.58	0.09	16.42	1.03	0.88	0.32	0.04	15.23	2.85	2.75	19.77	3.55	2.68
K _{1y}	30	70.54	0.19	5.06	0.69	1.39	0.06	9.58	1.42	0.83	0.78	0.08	9.42	3.95	1.06	11.43	6.81	3.71
	31	66.99	0.33	6.85	1.02	1.95	0.05	9.08	2.03	1.10	1.01	0.11	9.43	5.65	1.09	11.15	6.64	5.31
	32	72.28	0.33	7.04	0.55	2.01	0.05	6.19	1.49	1.32	1.17	0.08	7.26	4.44	1.13	7.96	9.82	4.16
	33	72.52	0.33	7.03	0.56	2.02	0.05	6.25	1.51	1.32	1.19	0.08	7.15	4.47	1.11	8.01	9.75	4.19
K _{1s}	34	62.38	0.52	8.80	0.44	1.96	0.08	10.49	1.33	1.05	1.68	0.11	10.78	4.25	0.63	13.70	5.13	3.98
	35	70.98	0.52	10.94	0.64	2.14	0.05	3.61	1.29	1.54	2.45	0.09	5.36	4.39	0.63	6.43	11.71	4.09
	36	59.73	0.18	7.01	0.42	0.32	0.09	14.63	1.01	1.04	2.14	0.05	13.25	2.07	0.49	19.36	3.56	1.98
K _{1b}	37	53.42	0.30	6.43	0.93	1.97	0.07	17.33	1.93	1.03	0.95	0.08	15.52	5.84	1.08	21.65	2.92	5.49
	38	58.50	0.32	7.14	0.91	1.98	0.06	13.42	2.04	1.38	0.50	0.08	13.46	5.83	2.76	16.12	4.20	5.48
	39	52.54	0.25	5.35	0.68	1.72	0.08	18.71	1.71	1.13	0.28	0.09	17.09	5.07	4.04	23.01	2.77	4.77
E _{1-2k}	40	63.81	0.35	8.64	0.54	1.55	0.05	9.92	1.01	1.70	2.50	0.06	9.53	3.51	0.68	13.78	5.14	3.27
N _{1j}	41	70.23	0.30	9.92	0.32	2.31	0.05	5.35	1.12	1.95	2.06	0.09	6.20	4.04	0.95	7.91	9.48	3.76
	42	74.65	0.31	9.79	0.39	2.83	0.04	2.79	1.16	1.72	1.87	0.07	3.93	4.63	0.92	4.87	16.02	4.28
	43	59.54	0.31	9.01	0.58	1.86	0.06	12.27	1.58	1.61	1.45	0.08	11.63	4.62	1.11	15.53	4.34	4.34
	44	47.33	0.38	7.93	0.55	2.61	0.06	19.50	1.82	1.41	0.96	0.06	17.30	6.10	1.47	24.77	2.31	5.71

续表

地层	序号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Fe ₂ O ₃ [*] +MgO	K ₂ O /Na ₂ O	CaO +Na ₂ O	Al ₂ O ₃ / (CaO+Na ₂ O)	FeO [*] +MgO
N _{1k}	45	63.09	0.40	8.55	0.95	2.18	0.05	9.59	1.77	1.87	1.11	0.10	9.98	5.58	1.68	11.93	5.90	5.22
	46	45.86	0.35	6.67	0.90	2.02	0.06	20.78	1.74	1.36	1.30	0.11	18.66	5.87	1.05	27.21	2.08	5.49
	47	45.90	0.35	6.63	0.92	1.99	0.06	20.82	1.76	1.37	1.31	0.10	18.87	5.88	1.05	27.25	2.07	5.51
	48	55.41	0.30	7.22	0.55	1.86	0.05	15.77	1.43	1.53	1.06	0.08	14.43	4.58	1.44	19.74	3.29	4.29
	49	52.46	0.31	6.34	0.92	1.54	0.07	17.17	1.84	1.55	0.82	0.10	16.40	5.30	1.89	21.64	2.92	4.99
	50	56.32	0.35	7.61	0.69	1.82	0.05	14.71	1.72	1.62	1.11	0.11	13.54	5.00	1.46	18.37	3.56	4.70
	51	56.97	0.15	3.84	0.33	0.78	0.05	19.04	0.86	1.00	0.31	0.02	16.21	2.41	3.23	23.22	2.94	2.27
	52	60.74	0.15	3.77	0.72	0.79	0.06	16.81	0.78	1.01	0.34	0.06	14.66	2.78	2.97	20.12	3.54	2.59
N _{2k}	53	58.65	0.19	4.46	0.58	1.22	0.05	16.96	1.08	1.13	0.37	0.06	14.85	3.47	3.05	20.45	3.38	3.25
	54	44.53	0.14	3.29	0.34	1.23	0.07	26.34	1.11	0.81	0.20	0.05	21.73	3.48	4.05	33.98	1.68	3.27
	55	49.03	0.24	6.31	0.49	1.74	0.05	20.49	1.45	1.36	0.59	0.06	18.10	4.56	2.31	25.77	2.33	4.29
	56	40.98	0.27	6.09	0.32	1.89	0.05	25.16	1.56	1.38	0.20	0.06	21.76	4.88	6.90	32.53	1.62	4.59
	57	40.98	0.26	5.80	0.49	1.67	0.06	25.50	1.55	1.32	0.29	0.06	21.87	4.83	4.55	33.07	1.59	4.54
	58	43.11	0.25	6.32	0.57	1.42	0.05	24.00	1.55	1.33	0.50	0.05	20.77	4.55	2.66	30.95	1.76	4.29
	59	51.56	0.17	4.89	0.41	1.44	0.05	20.56	1.07	1.17	0.44	0.07	17.76	3.62	2.66	25.66	2.46	3.39
	60	52.81	0.20	5.46	0.40	1.42	0.05	19.53	1.11	1.31	0.33	0.07	17.14	3.60	3.97	24.02	2.66	3.37
	61	51.82	0.19	5.49	0.64	0.96	0.05	20.02	1.22	1.28	0.65	0.05	17.49	3.51	1.97	25.09	2.51	3.31
克拉苏河剖面																		
T _{1e}	1	80.19	0.16	5.35	0.44	0.82	0.05	5.19	0.63	0.79	0.01	0.05	6.26	2.07	158.00	5.55	15.44	1.93
	2	85.51	0.12	3.77	0.19	0.75	0.04	3.72	0.55	0.79	0.08	0.04	4.39	1.58	9.88	3.98	22.50	1.48
	3	77.72	0.34	7.98	0.87	1.39	0.05	3.41	1.05	1.24	0.69	0.08	4.84	3.59	1.80	4.32	18.96	3.34
	4	84.45	0.28	7.95	0.20	2.04	0.03	0.38	0.25	1.47	0.01	0.15	2.78	2.58	294.00	0.40	219.35	2.35
T _{2-3k}	5	89.07	0.23	5.52	0.25	0.79	0.03	0.33	0.32	1.42	0.15	0.03	1.94	1.41	9.47	0.49	185.56	1.31
	6	84.58	0.24	7.46	1.09	0.68	0.03	0.56	0.62	1.66	0.73	0.02	2.21	2.57	2.27	1.32	65.57	2.38
	7	77.08	0.41	10.97	0.82	1.92	0.04	0.54	0.86	2.56	1.92	0.10	2.44	3.80	1.33	2.53	31.33	3.51
T _{3h}	8	84.91	0.31	7.06	1.19	0.72	0.04	0.46	0.53	1.43	1.45	0.07	1.70	2.62	0.99	1.95	44.46	2.41
	9	79.90	0.29	9.77	0.83	1.42	0.04	0.60	0.77	2.06	1.61	0.06	2.55	3.20	1.28	2.27	36.15	2.96
	10	79.85	0.29	9.70	0.87	1.38	0.04	0.60	0.80	2.07	1.68	0.07	2.38	3.23	1.23	2.34	35.02	2.99
	11	79.89	0.36	9.92	1.15	1.17	0.04	0.46	0.77	2.17	1.74	0.09	2.19	3.29	1.25	2.25	36.31	3.04
T _{3t}	12	90.74	0.15	5.01	0.23	0.44	0.03	0.17	0.37	0.89	0.60	0.03	1.28	1.08	1.48	0.78	117.84	1.01
	13	88.09	0.14	5.75	0.39	0.87	0.04	0.45	0.48	1.39	0.87	0.03	1.52	1.81	1.60	1.34	66.73	1.68
	14	88.59	0.16	6.09	0.44	0.79	0.03	0.29	0.41	0.61	0.19	0.04	2.36	1.73	3.21	0.49	184.56	1.60
J _{1a}	15	83.26	0.23	8.29	1.11	1.27	0.03	0.22	0.42	2.49	0.57	0.04	1.72	2.99	4.37	0.81	105.39	2.73
	16	87.57	0.09	6.28	0.22	0.66	0.03	0.42	0.07	2.49	0.25	0.02	1.44	0.99	9.96	0.68	130.70	0.90
	17	89.61	0.09	5.31	0.22	0.32	0.03	0.23	0.27	1.96	0.21	0.03	1.56	0.85	9.33	0.45	203.66	0.79
J _{1y}	18	77.46	0.39	10.61	2.10	1.09	0.04	1.01	0.95	1.85	0.01	0.02	4.38	4.58	370.00	1.06	76.32	4.22
	19	82.92	0.27	7.27	0.82	0.78	0.04	1.95	0.56	0.99	0.01	0.01	4.34	2.35	198.00	2.04	42.41	2.18
	20	89.84	0.13	5.01	0.39	0.40	0.03	0.38	0.43	1.31	0.11	0.04	1.93	1.29	11.91	0.50	183.35	1.20
	21	86.17	0.20	6.98	0.45	0.46	0.03	0.34	0.58	1.71	0.18	0.04	2.70	1.59	9.50	0.54	165.71	1.49
J _{2k}	22	79.28	0.23	7.42	0.54	0.41	0.03	3.42	0.69	1.94	0.99	0.02	4.75	1.79	1.96	4.64	17.98	1.68
	23	78.19	0.25	9.00	0.42	0.73	0.05	2.83	0.64	2.41	1.29	0.03	4.13	1.92	1.87	4.30	18.98	1.79
	24	80.28	0.24	7.04	0.27	0.67	0.04	3.44	0.53	2.29	0.76	0.02	4.25	1.57	3.01	4.39	19.11	1.47
J _{2q}	25	78.31	0.09	5.75	0.27	0.25	0.06	5.61	0.51	2.24	0.74	0.02	6.01	1.13	3.03	6.77	12.33	1.07
	26	78.54	0.09	5.70	0.26	0.27	0.05	5.64	0.48	2.25	0.78	0.02	5.78	1.10	2.88	6.82	12.23	1.04
	27	83.89	0.22	7.26	1.34	1.10	0.04	0.23	0.81	1.60	0.74	0.02	2.44	3.50	2.16	1.00	86.48	3.23
	28	55.02	0.13	3.71	0.69	0.70	0.20	19.62	1.01	1.26	0.35	0.03	17.17	2.99	3.60	24.14	2.76	2.82
K _{1y}	29	55.81	0.33	7.08	0.91	1.76	0.06	15.11	1.90	1.62	0.48	0.09	14.60	5.49	3.38	18.31	3.58	5.16

续表

地层	序号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Fe ₂ O ₃ ⁺⁺ MgO	K ₂ O/ Na ₂ O	CaO+ Na ₂ O	Al ₂ O ₃ / (CaO+Na ₂ O)	FeO ⁺ MgO	
K _{1s}	30	49.96	0.26	6.03	0.88	0.54	0.12	20.48	1.71	0.94	0.99	0.07	17.89	3.94	0.95	26.19	2.33	3.75	
	31	51.13	0.32	6.97	0.60	0.40	0.07	18.83	1.66	1.45	1.44	0.10	16.83	3.29	1.01	24.43	2.52	3.16	
	32	48.24	0.31	6.72	0.43	0.57	0.07	21.00	1.51	1.34	1.32	0.09	17.99	3.13	1.02	27.35	2.16	3.01	
E _{1-2k}	33	34.36	0.14	4.67	0.27	0.52	0.07	31.35	1.12	0.35	1.65	0.03	25.40	1.94	0.21	33.02	1.04	1.86	
	34	10.82	0.02	0.56	0.14	0.03	0.03	46.98	1.68	0.11	0.01	0.03	39.15	3.09	11.00	77.79	0.23	3.06	
	35	71.47	0.19	4.61	0.39	1.59	0.05	9.57	1.12	1.02	0.70	0.06	9.10	3.46	1.46	11.31	6.96	3.24	
E _{2-3s}	36	57.61	0.31	6.72	0.84	2.32	0.05	14.55	1.69	1.27	0.81	0.06	13.60	5.73	1.57	17.81	3.75	5.36	
	37	64.69	0.26	6.03	0.41	2.19	0.05	11.47	1.55	1.16	0.77	0.08	11.19	4.73	1.51	13.81	5.29	4.43	
N _{1j}	38	63.92	0.30	6.08	0.60	2.38	0.05	11.68	1.49	1.18	0.96	0.06	11.18	5.11	1.23	14.25	5.06	4.77	
	39	64.12	0.30	6.16	0.62	2.38	0.04	11.72	1.45	1.18	0.92	0.05	11.05	5.08	1.28	14.21	5.07	4.74	
	40	61.16	0.27	6.30	0.85	1.79	0.04	12.88	1.72	1.35	0.58	0.07	12.90	5.12	2.33	15.47	4.54	4.81	
	41	73.14	0.19	4.31	0.22	1.71	0.04	8.97	0.74	1.42	0.01	0.05	8.98	2.97	142.00	9.89	8.14	2.75	
N _{1k}	42	75.37	0.18	5.01	0.27	1.49	0.04	7.23	1.03	1.16	0.07	0.07	7.80	3.07	16.57	7.94	10.32	2.87	
	43	59.66	0.28	5.63	0.47	1.82	0.05	15.06	1.18	1.62	0.12	0.03	14.02	4.10	13.50	17.67	3.93	3.83	
	44	63.77	0.33	7.37	0.99	2.04	0.05	10.48	1.62	1.41	0.57	0.08	11.18	4.77	2.47	11.06	5.77	4.45	
	45	62.11	0.21	4.9	0.57	1.37	0.05	14.49	1.22	1.23	0.1	0.05	13.66	3.74	12.30	16.91	4.26	3.50	
阳霞剖面																			
T _{3t}	1	60.05	0.27	8.89	0.59	0.83	0.06	12.53	1.00	2.52	0.67	0.06	12.41	2.84	3.76	15.09	4.55	2.67	
	2	83.22	0.15	8.35	0.40	0.70	0.03	0.86	0.40	2.62	0.77	0.06	2.28	1.58	3.40	1.67	51.06	1.47	
J _{1y}	3	80.25	0.12	9.53	0.33	0.65	0.03	1.32	0.33	2.44	1.51	0.04	3.40	1.39	1.62	2.93	28.36	1.29	
	4	76.69	0.24	8.81	0.66	0.51	0.05	2.26	1.60	2.35	1.58	0.06	4.98	3.00	1.49	4.05	19.97	2.87	
J _{2k}	5	77.28	0.42	11.40	1.13	1.14	0.03	0.26	0.93	2.91	1.37	0.05	2.79	3.43	2.12	1.68	47.41	3.18	
	6	64.54	0.23	6.58	0.32	0.76	0.08	11.92	0.67	2.23	0.75	0.05	11.40	2.03	2.97	14.38	5.09	1.90	
	7	55.37	0.21	7.88	0.58	0.66	0.09	16.08	0.96	2.37	0.54	0.06	14.80	2.67	4.39	19.60	3.33	2.52	
J _{2q}	8	76.94	0.11	5.35	0.54	1.34	0.08	5.59	0.63	2.10	0.05	0.04	6.75	2.77	42.00	6.08	13.64	2.56	
	9	82.76	0.18	7.70	0.23	0.71	0.04	1.60	0.35	2.36	0.93	0.03	3.15	1.36	2.54	2.61	32.71	1.26	
	10	79.49	0.33	8.60	1.21	1.50	0.05	1.17	0.90	2.03	0.47	0.03	3.73	3.91	4.32	1.71	48.47	3.61	
	11	72.57	0.45	10.95	1.12	1.17	0.07	3.18	0.97	2.52	1.26	0.04	5.37	3.59	2.00	4.71	16.34	3.33	
J _{3q}	12	82.60	0.16	7.91	0.26	0.75	0.04	1.46	0.54	2.12	1.35	0.04	2.69	1.62	1.57	2.89	29.40	1.52	
	13	75.57	0.17	9.74	0.27	0.39	0.07	3.72	0.75	2.50	1.33	0.03	5.14	1.52	1.88	5.34	14.96	1.45	
	14	60.38	0.17	5.72	0.42	1.21	0.08	15.13	1.01	1.38	0.53	0.04	13.83	3.12	2.60	18.19	3.86	2.93	
	15	51.09	0.11	5.93	0.33	0.57	0.07	20.58	0.97	1.50	0.91	0.04	17.84	2.32	1.65	26.18	2.38	2.21	
J _{3k}	16	46.68	0.21	4.69	0.44	0.72	0.06	23.31	1.81	1.21	0.15	0.03	20.57	3.81	8.07	29.58	1.99	3.65	
	17	54.88	0.23	6.48	0.89	0.90	0.05	16.75	1.81	1.68	0.76	0.06	15.50	4.38	2.21	20.72	3.13	4.15	
K _{1y}	18	54.67	0.23	6.51	0.88	0.89	0.06	16.66	1.85	1.67	0.83	0.05	15.65	4.41	2.01	20.75	3.13	4.19	
	19	67.18	0.23	6.86	0.29	1.62	0.04	9.51	1.55	1.79	0.77	0.06	10.06	3.88	2.32	11.43	6.54	3.67	
	20	59.85	0.25	7.75	0.48	1.82	0.05	12.60	1.64	2.03	1.09	0.08	12.38	4.56	1.86	15.62	4.37	4.29	
	21	64.98	0.26	8.27	0.32	1.70	0.04	9.82	1.55	2.07	1.11	0.08	9.84	4.00	1.86	12.12	5.95	3.77	
	22	47.48	0.34	6.65	0.61	1.33	0.06	20.65	1.99	1.60	0.56	0.07	18.53	4.91	2.86	26.08	2.24	4.67	
E _{2-3s}	23	37.98	0.19	4.71	0.51	1.35	0.07	28.43	1.54	1.10	0.64	0.02	23.39	4.52	1.72	37.98	1.31	4.27	
	24	54.62	0.37	6.64	0.58	1.81	0.05	16.71	1.58	1.28	0.72	0.04	15.13	4.78	1.78	20.65	3.13	4.49	
	25	44.41	0.27	6.78	0.75	1.57	0.06	22.88	1.59	1.22	1.30	0.07	19.07	4.94	0.94	29.89	1.84	4.64	
N _{1j}	26	54.67	0.36	7.35	0.72	1.73	0.06	16.27	1.49	1.55	1.06	0.06	14.29	4.71	1.46	20.31	3.15	4.42	
	27	55.21	0.36	7.21	0.77	1.79	0.07	15.56	1.71	1.54	1.15	0.09	14.12	5.10	1.34	19.55	3.30	4.79	
	28	43.07	0.22	4.85	0.65	1.02	0.05	19.02	1.34	0.93	0.74	0.07	15.42	4.28	1.26	27.46	2.18	4.04	

a) 主元素成分的单位为%; LOI 烧失量; Fe₂O₃^{*} 表示以 Fe₂O₃ 代表总铁; FeO^{*} 表示以 FeO 代表总铁

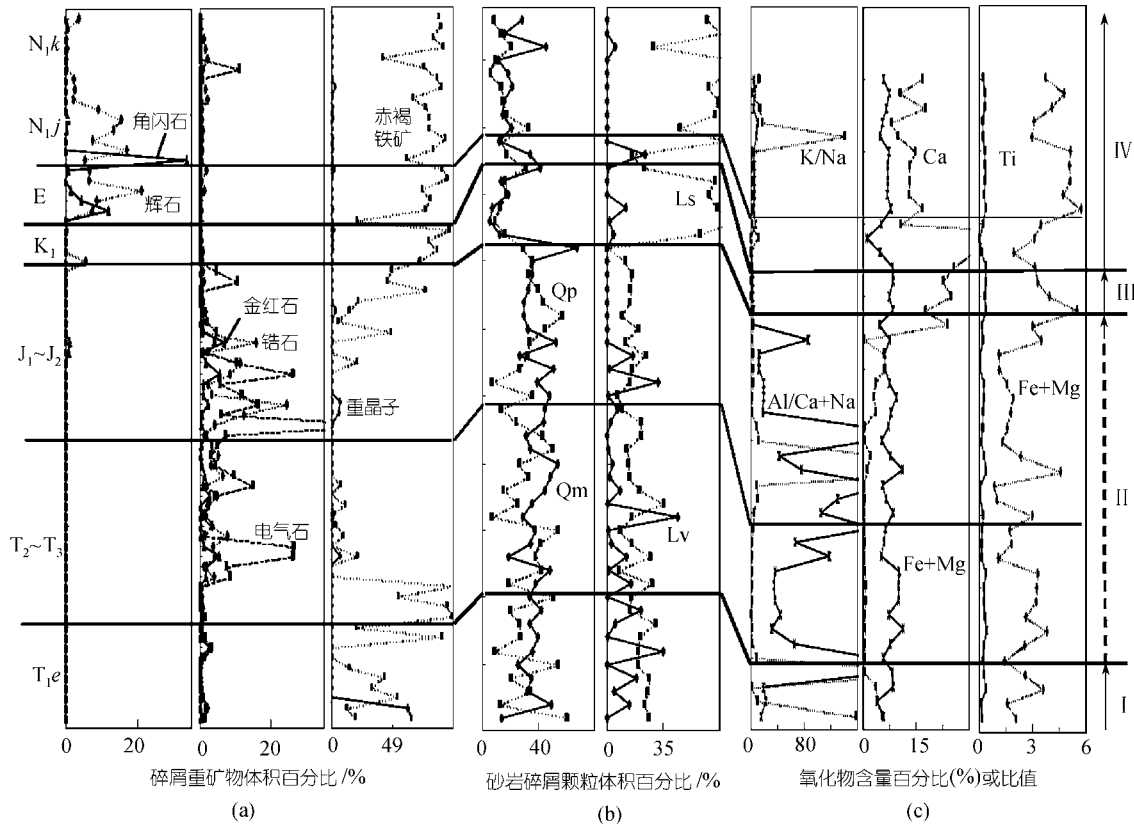


图 3 克拉苏河剖面沉积-地球化学综合记录

(a) 碎屑重矿物; (b) 砂岩骨架颗粒; (c) 砂岩全岩主元素氧化物及其特征比值。Qm, 单晶石英; Qp, 多晶石英(主要是燧石); Lv, 火山岩和变火山岩岩屑; Ls, 沉积岩和变沉积岩岩屑; K, Na, Al, Ca, Fe, Mg, Ti 分别表示 K_2O , Na_2O , Al_2O_3 , CaO , $Fe_2O_3^*$ (以 Fe_2O_3 代表总铁), MgO 和 TiO_2 ; I~IV 分别示第 1 至第 4 沉积演化阶段

录在 T_{1e} - T_{2k} , J_{3k} - K_{1y} , K_{1b} - E_{1-2k} 3 个界面发生较大变化或突变(图 4), 其在碎屑成分(组合)和化学组分特征方面与克拉苏河剖面基本类似. 主要差别在于 K_{1b} - E_{1-2k} 界面上下碎屑重矿物的变化不如克拉苏河剖面明显, 前者不稳定碎屑重矿物(角闪石、辉石)含量增加值小于 1%~2%, 而后者多大于 15%~20%.

此外, 对库车河剖面上新世库车组样品也开展了研究, 反映出中新统康村组(N_{1k})与上新统库车组(N_{2q})之间也存在比较大的碎屑成分和化学组分变化. 表现为: (1) 碎屑粒度明显变粗, 岩屑和不稳定碎屑重矿物含量进一步增大, 成分成熟度进一步降低(图 4(a)和 3(b)); (2) 砂岩全岩的 CaO 含量进一步增大, 而低活动性的 $Fe_2O_3^*+MgO$ 含量变化不明显(图 4(c)); (3) 与中新世样品相比, 上新世样品的 $Al_2O_3/(CaO+Na_2O)$ 和碎屑褐铁矿含量等反映碎屑成分风化

强度的指标没有明显变化(图 4(a)和 3(c)).

3.3 阳霞剖面

由于露头的限制, 阳霞剖面中生代~新生代砂岩骨架颗粒、碎屑重矿物与岩石地球化学记录并不完全, 但上侏罗统喀拉扎组(J_{3k})和下白垩统亚格列木组(K_{1y})之间或者说在上侏罗统内部、下白垩统巴什基奇克组(K_{1b})和下第三系(E)两个界面也反映了明显的沉积碎屑和地球化学成分差别, 指示重要的构造转折意义(图 5), 其多数对比参数和沉积记录的变化与克拉苏河剖面(图 3)、库车河剖面(图 4)基本类似或接近.

4 风化指数及其沉积背景

在相对稳定的物源条件下, 砂岩的 A-CN-K 图、A-CNK-FM 图^[47]和 $\ln(Q/(L+CE))-\ln(Q/F)$ 图^[49]能够比

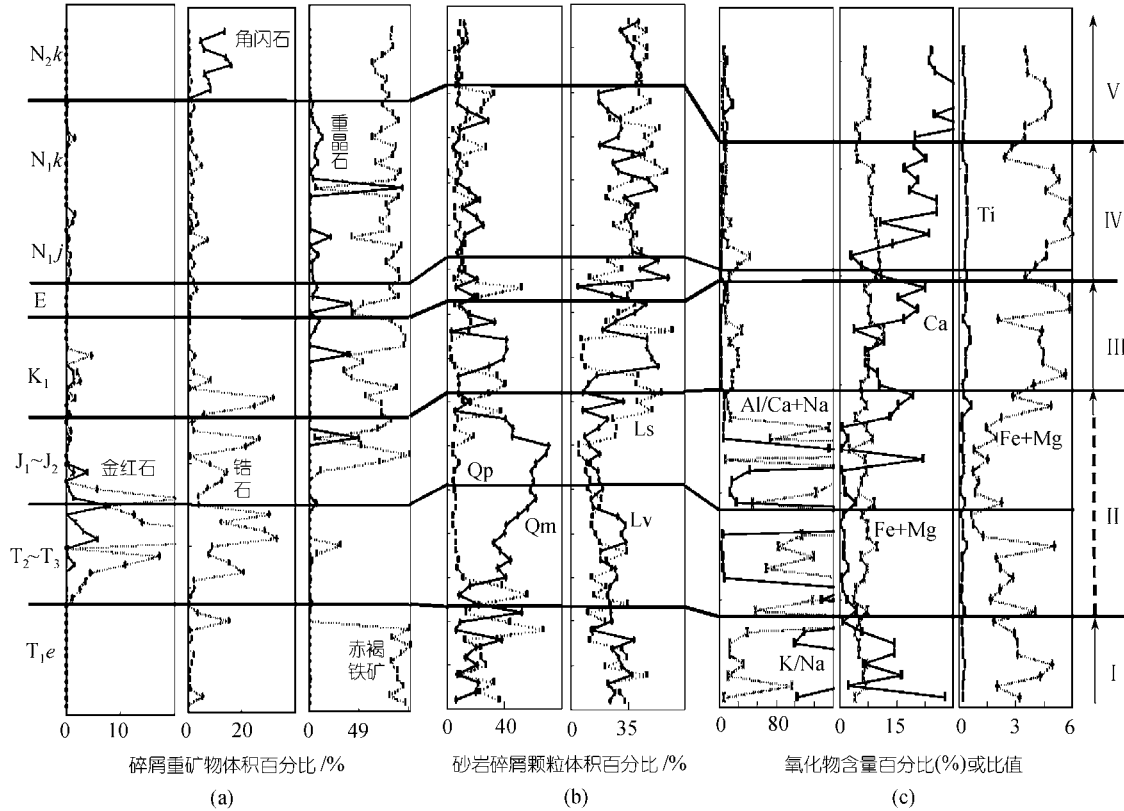


图 4 库车河剖面沉积-地球化学综合记录

(a) 碎屑重矿物; (b) 砂岩骨架颗粒; (c) 砂岩全岩主元素氧化物及其特征比值, 参数代号同图 3.

I~V 分别示第 1 至第 5 沉积演化阶段

较好地反映风化作用类型和强度. 风化作用不仅取决于气候条件, 而且受控于构造环境和活动性, 因此通过碎屑组分风化指数的研究可以追溯沉积期气候和构造演变的历史.

图 6 和 7 分别展示了克拉苏河、库车河剖面的砂岩 A-CN-K 图与 A-CNK-FM 图. 不难看出, 库车坳陷下三叠统俄霍布拉克组、中三叠统克拉玛依组-中侏罗统恰克马克组、下白垩统亚格列木组-上新统库车组砂岩样品明显可分, 尤其以 Al_2O_3 含量呈中-高-低值变化为特征, 显示了砂岩碎屑风化强度从中等、较高到较低的变化, 反映早期以近源、较快速搬运-沉积过程为特征, 中期以远源、慢速和经历比较充分的风化作用过程为特征, 晚侏罗世以后又以近源、快速搬运-沉积为特征, 至中新世-上新世这种趋势愈加明显.

克拉苏河、库车河和阳霞 3 条剖面的 $\ln(Q/(L+CE))$ 与 $\ln(Q/F)$ 相关图也反映类似的砂岩风化指数演变轨迹(图 8), 进一步表明了库车坳陷下三叠统、中三叠统~中侏罗统、下白垩统~上新统砂岩存在着明显不同的风化作用痕迹, 并呈现中等-强-弱的风化趋势. 其中, 中三叠统-中侏罗统与下白垩统-上新统砂岩的 $\ln(Q/F)$ 均大致在 0 值左右分界. 而在下白垩统~上新统, 明显反映出上新统砂岩风化指数相对最低. 需要指出的是, 下三叠统俄霍布拉克组砂岩样品介于强、弱风化作用群体之间(图 8(a)和 7(b)), 似乎具有过渡意义.

5 讨论

构造转折控制盆地原型的变更, 也直接导致盆地充填沉积记录的突变. 尽管沉积记录的表征是多

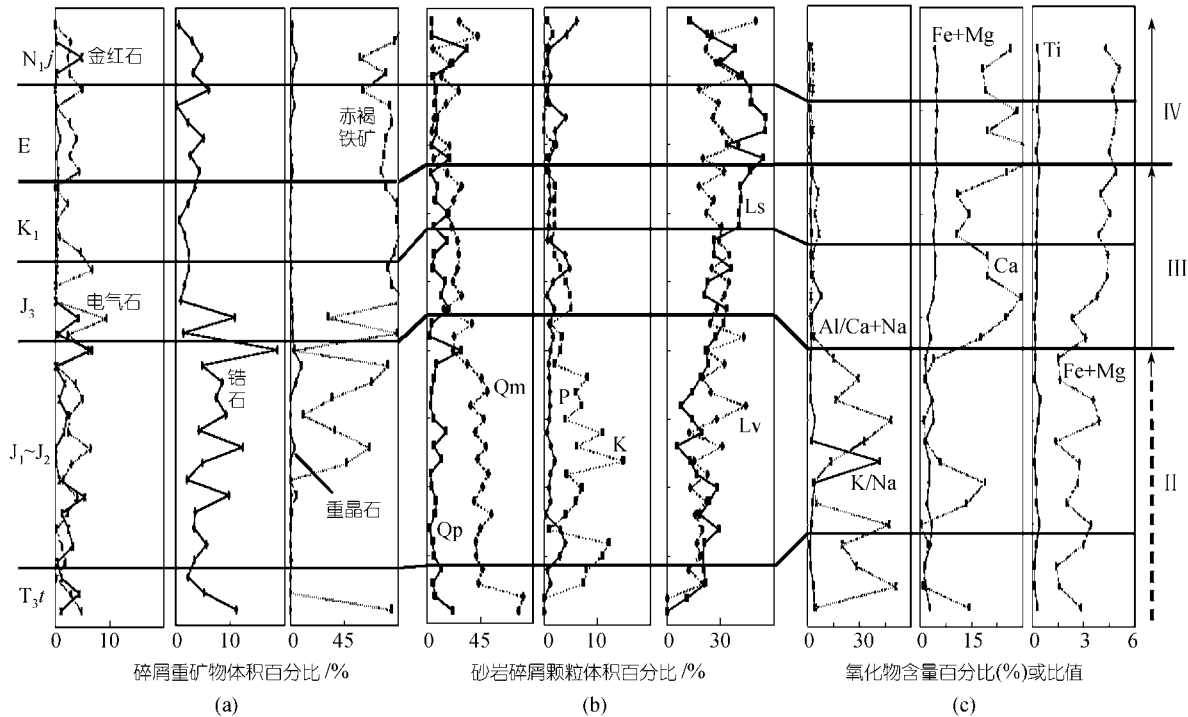


图 5 阳霞剖面沉积-地球化学综合记录

(a) 碎屑重矿物; (b) 砂岩骨架颗粒; (c) 砂岩全岩主元素氧化物及其特征比值, 参数代号同图 3.

II~IV 分别代表第 2 至第 4 沉积演化阶段

方面的, 但是研究对物源构造属性和盆山构造分异较为敏感的碎屑和沉积地球化学记录, 对比鉴别构造和气候变化的影响, 无疑具有重要意义^[36-38,44-48].

从库车坳陷沉积记录分析, 显然它们反映出: (1) 岩石组合从褐红色粗碎屑沉积到灰色-深灰色细碎屑沉积、红色中-细碎屑沉积、红色-杂色碎屑夹膏盐沉积, 最后转变为褐色粗碎屑沉积, 岩屑成分成熟度相应呈不稳定-稳定-不稳定-较不稳定-极不稳定组合产出, 特别是后晚侏罗世以碳酸盐岩等沉积岩岩屑的增加为显著特征, 成分趋于复杂, 成熟度急剧降低; (2) 砂岩全岩的 CaO 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO}$ 含量呈较高值-低值-较高值-高值-高值序列变化, 后晚侏罗世急剧增高; 而 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$ 等反映碎屑成分风化强度的综合指标呈较低值-高值-低值-较低值-最低值变化, 反映后晚侏罗世急剧降低。

研究提出^[32], 库车坳陷中生代古流体系大致呈现 3 阶段演化特征, 特别是在晚侏罗世以后, 总体上发育由北向南的古流体系, 结合沉积相分

析^[21,26,27]指示库车坳陷物源主要来自北部(天山)剥蚀的碎屑物质。基于上述特征, 显然不同剖面的砂岩骨架颗粒、碎屑重矿物(组合)成分与砂岩全岩主元素变化所表现出的一致性, 即库车坳陷沉积记录在 $\text{T}_1\text{e}-\text{T}_2\text{k}$, $\text{J}_3\text{k}-\text{K}_1\text{y}$, $\text{K}_1\text{b}-\text{E}_{1-2}\text{k}$ 和 $\text{N}_1\text{k}-\text{N}_2\text{k}$ 等界面的较大变化或突变, 说明天山-库车区域古构造-古地理背景或山盆格局在上述 4 个时间段内发生了明显变化, 其中第 1 个时间段对应盆山地势的减小, 后 3 个时间段则以盆山地势的增大为特征, 这与 Dumitru 等^[51]的磷灰石裂变径迹研究结果基本对应。

从风化指数分析, 下三叠统、中三叠统~中侏罗统、下白垩统(上侏罗统)~上新统砂岩的风化作用强度明显不同, 呈中等-强-弱的变化趋势, 与古气候以温暖-潮湿-干热演变的序列基本吻合^[26,32,52-54]。结合碎屑记录分析, 说明早-中三叠世、晚侏罗世-早白垩世两个时期古构造和古气候变化叠加作用强烈, 尤其以后者变化最为明显; 而晚白垩世~古新世、中新世~上新世时期沉积记录(尤其后者)主要显示强烈的

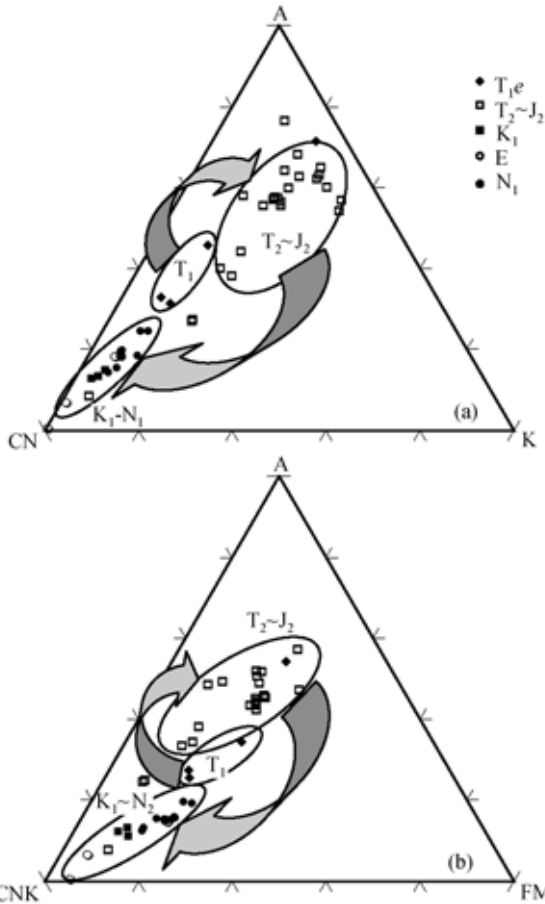


图 6 克拉苏河剖面砂岩 A-CN-K 图(a)与 A-CN-K-FM 图(b)
 A, Al₂O₃; CN, CaO + Na₂O; K, K₂O; CNK, CaO + Na₂O + K₂O; FM, FeO + MgO; CaO*表示 GO 经过磷的盐校正; FeO*表示以 FeO 代表总铁; 以上均以摩尔分数换算; 箭头方向指示演化趋势

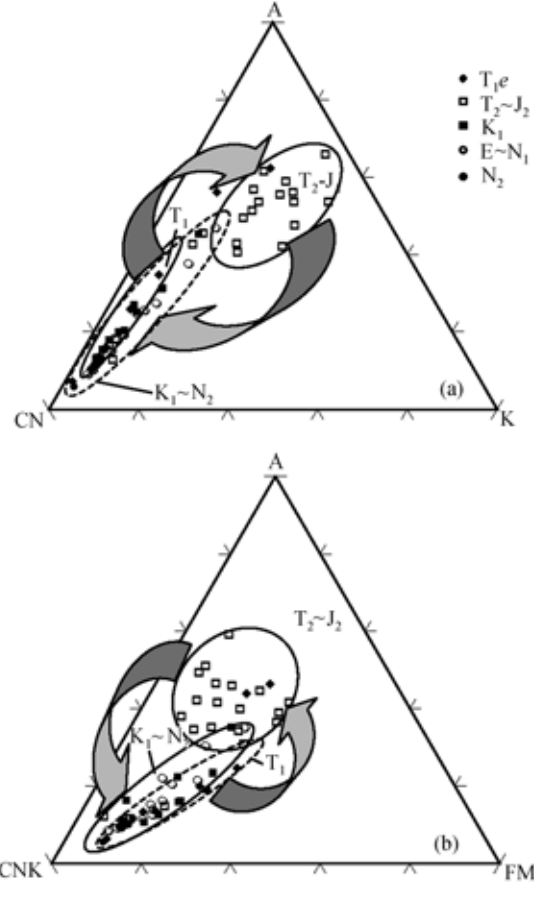


图 7 库车河剖面砂岩 A-CN-K 图(a)与 A-CN-K-FM 图(b)
 图例说明同图 6

山盆差异升降, 气候变化影响相对较小。

从沉积体系分析^[30,32], 库车拗陷早三叠世发育砾石质辫状河-冲积平原沉积体系, 自北向南进入库车拗陷的粗粒冲积体系发育; 中三叠世至中侏罗世为潮湿气候条件下的三角洲-湖泊体系, 沼泽沉积发育, 自北而南的山-盆地势被大大削弱; 而晚侏罗世至白垩纪以干热气候条件下的辫状河-三角洲-宽浅湖泊沉积体系发育为特征; 早第三纪至晚第三纪中新世, 在继承性干热气候条件下发育冲积平原与咸化湖泊沉积体系, 并伴随砂质和砾石质冲积沉积; 晚第三纪上新世, 以冲积扇体系为主。自晚侏罗世开始, 库车拗陷粗粒冲积体系前锋、沉积中心明显向南(盆地方向)迁移。显然, 碎屑组分、全岩主元素记录与沉

积体系(域)的展布变化相对应, 均表明该区沉积背景大致在早-中三叠世、晚侏罗世-早白垩世、晚白垩世~古新世和中~上新世发生重要变化, 而晚侏罗世-早白垩世由于构造变动和气候变化的耦合效应, 沉积记录的变化最为突出, 其中碳酸盐岩岩屑和全岩 CaO 的逐步增加可能与南天山的隆起及其源区古生界碳酸盐岩的剥露密切相关。

应该指出, 上述转折时期的厘定是对区域沉积记录综合分析的结果。如 T_{1e}-T_{2k} 界面在库车河剖面表现明显, 而在克拉苏河剖面这一时期则上移至 T_{2k} 中部。如果目前认识的主要建立在生物地层资料基础上的岩石地层划分是正确的(图 2), 那么上述界面在克拉苏河剖面的上移可能反映了局域构造的影响, 即天山和库车拗陷之间山盆升降东西分异的结果。

另一方面, 从沉积记录分析, 晚中生代最早从晚

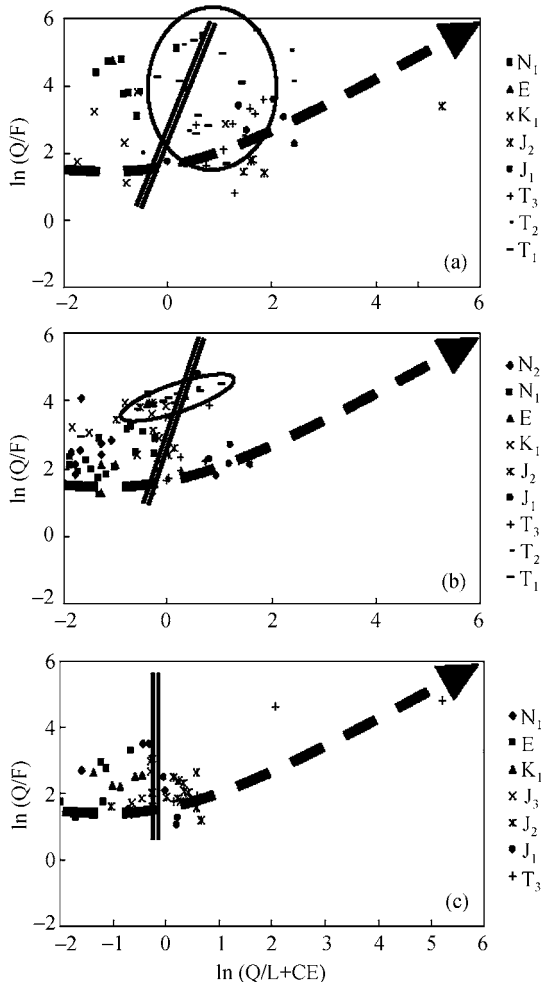


图 8 反映砂岩风化指数的 $\ln(Q/(L+CE))$ 与 $\ln(Q/F)$ 相关图 (a) 克拉苏河; (b) 库车河; (c) 阳霞剖面。Q, 碎屑石英; F, 碎屑长石; L, 非碳酸盐岩岩屑; CE, 陆源碳酸盐岩岩屑; 粗虚线箭头指示风化指数增大方向; 实封闭线区域指示下三叠统俄霍布拉克组; 双直线为中三叠统克拉玛依组-中侏罗统恰克马克组与上侏罗统齐古组-上新统库车组砂岩样品的分界; 地层代号同表 1

侏罗世开始就出现了以不稳定碎屑组合和低风化数为特征的沉积记录, 并常常与早白垩世亚格列木组沉积记录呈过渡关系, 这在阳霞剖面表现较为明显(图 5)。但库车坳陷下白垩统亚格列木组(K_{1y})发育比较稳定的砾岩层, 总厚度约 50~200 m, 与下伏地层具有明显的不整合关系。此外, 与下伏地层相比亚格列木组的碎屑粒度和不稳定组分含量均有了比较大的提高, 反映构造活动更加强烈。因此, 本文提出库车坳陷演化第 3 阶段应始于早白垩世, 并以干热气候

和盆山构造强烈分异条件而与第二阶段(特别是中三叠~中侏罗世)明显区分。这也说明, 始于晚侏罗世的区域气候转变比较早地反映在研究区的红色沉积记录中, 而对同期区域构造活动的沉积响应——库车坳陷亚格列木组粗碎屑沉积却相对滞后。对于这一点, 可能的机理是, 由于始于晚侏罗世的拉萨板块与欧亚大陆的碰撞, 引发或驱动了区域沉积背景的变动^[51], 而天山南麓地区沉积充填比较及时地记录了由此引起的大区域气候变化^[52-54], 而由于板块边界到内部的构造远程效应, 导致天山地区盆山分异和变形过程相对缓慢, 即区域构造转变对天山南麓沉积作用的控制相对滞后。

6 结论

(1) 与砂岩骨架、碎屑重矿物(组合)的成分变化一致, 砂岩全岩的主元素分析也反映天山南麓库车坳陷沉积记录在下三叠统俄霍布拉克组-中三叠统克拉玛依组、上侏罗统喀拉扎组-下白垩统亚格列木组、下白垩统巴什基奇克组-古新统-始新统库姆格列木组、中新统康村组-上新统库车组 4 个界面发生较大变化或突变, 呈 5 阶段演化。

(2) 对应上述 5 个阶段, 岩屑成分相应呈不稳定-稳定-不稳定-极不稳定-极不稳定组合产出, 特别是后晚侏罗世尤其以碳酸盐岩等沉积岩岩屑的增加为显著特征, 成熟度急剧降低; 砂岩全岩的 CaO 和 $Fe_2O_3^*+MgO$ 含量呈较高值-低值-高值-较高值-最高值变化, 后晚侏罗世急剧增高; 而 $Al_2O_3/(CaO+Na_2O)$ 和 $\ln(Q/(L+CE))$ 等反映碎屑成分风化指数的综合指标呈较低值-高值-低值-较低值-最低值变化, 反映在后晚侏罗世显著减小; 第 1, 第 2 和后 3 个阶段样品在 A-CN-K 和 A-CN-K-FM 图上明显可分。

(3) 分别以早-中三叠世、晚侏罗世-早白垩世为界, 其前后时期碎屑组分与砂岩风化指数的显著变化是古构造和古气候变化叠加作用的结果; 晚白垩世、中-上新世前后不同的沉积体系域但是类似的砂岩风化指数说明主要与古构造变动即山盆差异升降有关, 而气候变化影响相对较小。

致谢 本文资料调研工作得到中国石油塔里木分公司宋文杰和李曰俊先生的支持, 河北地质调查局实

实验室、中国科学院地质与地球物理研究所实验室分别在重矿物分离和化学分析中给予大力协助, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 Coleman R G. Continental growth of northwest China. *Tectonics*, 1990, 8: 621~636
- 2 王作勋, 郭继易. 天山多旋回构造演化及成矿. 北京: 地质出版社, 1990. 229~270
- 3 Windley B F, Allen M B, Zhang C, et al. Paleozoic accretion and Cenozoic reformation of the Chinese Tianshan Ranges, central Asia. *Geology*, 1990, 18: 128~131[DOI]
- 4 Allen M B, Windley B F, Chi Z. Paleozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tian Shan, central Asia. *Tectonophysics*, 1993, 220: 89~115[DOI]
- 5 Carroll A R, Graham S A, Hendrix M S, et al. Late Paleozoic tectonic amalgamation of northwestern China: Sedimentary record of the northern Tarim, northwestern Turpan, and southern Junggar basins. *Geological Society of America Bulletin*, 1995, 107: 571~594[DOI]
- 6 Molnar P, Tapponier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. *Science*, 1975, 189(4201): 419~426
- 7 Tapponier P, Molnar P. Active faulting and Cenozoic tectonics of the Tian Shan, Mongolia and Baykal regions. *J Geophys Research*, 1979, 84: 3425~3459
- 8 Nelson M, McCaffrey R, Molnar P. Source parameters for 11 earthquakes in the Tian Shan, Central Asia, determined by P and SH waveform inversion. *J Geophys Research*, 1987, 92(B12): 12629~12648
- 9 马瑞士, 叶尚夫, 王赐银, 等. 东天山造山带构造格架和演化. *新疆地质科学*, 1990, (2): 21~36
- 10 Avouac J P, Tapponier P, Bai M, et al. Active thrusting and folding along the northern Tian Shan and Late Cenozoic rotation of the Tarim relative to Dzungaria and Kazakhstan. *J Geophys Research*, 1993, 98: 6755~6804
- 11 高长林, 崔可锐, 钱一雄, 等. 天山微板块构造与塔北盆地. 北京: 地质出版社, 1993. 229~270
- 12 Yin A, Nie S, Craig P, et al. Late Cenozoic tectonic evolution of the southern Chinese Tian Shan. *Tectonics*, 1998, 17(1): 1~27[DOI]
- 13 Burtman V S, Skobelev S F, Molnar P. Late Cenozoic slip on the Talas-Ferghana fault, the Tian Shan, Central Asia. *Geological Society of America Bulletin*, 1996, 108: 1004~1021[DOI]
- 14 Burtman V S. Cenozoic crustal shortening between the Pamir and Tien Shan and a reconstruction of the Pamir-Tien Shan transition zone for the Cretaceous and Paleogene. *Tectonophysics*, 2000, 319: 69~92[DOI]
- 15 Allen M B, Vincent S J, Wheeler P J. Late Cenozoic tectonics of the Kepingtage thrust zone: Interpretation of the Tien Shan and Tarim Basin, Northwest China. *Tectonics*, 1999, 18: 639~654[DOI]
- 16 Chen J, Burbank D W, Scharer K M, et al. Magnetochronology of the Upper Cenozoic strata in the Southwestern Chinese Tian Shan: Rates of Pleistocene folding and thrusting. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 195: 113~130[DOI]
- 17 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气. 北京: 石油工业出版社, 1997. 348~364
- 18 刘和甫, 汪泽成, 熊宝贤, 等. 中国中西部中、新生代前陆盆地与挤压造山带耦合分析. *地学前缘*, 2000, 7(3): 55~72
- 19 康玉柱. 塔里木盆地油气藏(田)特征. *石油实验地质*, 2000, 22(2): 115~120
- 20 Graham S A, Xiao X, Carroll A R, et al. Mesozoic-Cenozoic basins of western China as an example of a partitioned retroarc foreland basin system. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1988, 72: 191
- 21 Graham S A, Hendrix M S, Wang L B, et al. Collisional successor basins of western China: Impact of tectonic inheritance on sand composition. *Geological Society of America Bulletin*, 1993, 105: 323~344[DOI]
- 22 刘和甫, 梁慧社, 蔡立国, 等. 天山两侧前陆冲断系构造样式与前陆盆地演化. *地球科学*, 1994, 19(6): 727~741
- 23 Lu H, Howell D G, Jia D. Rejuvenation of the Kuqa foreland basin, northern flank of the Tarim basin, northwest China. *International Geology Review*, 1994, 36: 1151~1158
- 24 何登发, 李德生. 塔里木盆地构造演化与油气. 北京: 地质出版社, 1996. 44~67
- 25 卢华复, 陈楚铭, 刘志宏, 等. 库车再生前陆逆冲带的构造特征与成因. *石油学报*, 2000, 21(3): 18~24
- 26 Hendrix M S, Graham S A, Carroll A R, et al. Sedimentary record and climatic implication of recurrent deformation of the Tien Shan: Evidence from Mesozoic strata of the north Tarim, south Junggar and Turpan basins. *Geological Society of America Bulletin*, 1992, 104: 53~79[DOI]
- 27 Hendrix M S. Evolution of Mesozoic sandstone compositions, southern Junggar, northern Tarim, and western Turpan basins, Northwest China: A detrital record of the ancestral Tian Shan. *Journal of Sedimentary Research*, 2000, 70(3): 520~532
- 28 Sobel E R. Basin analysis of the Jurassic-Lower Cretaceous southwest Tarim basin, NW China. *Geological Society of America Bulletin*, 1999, 111(5): 709~724[DOI]
- 29 顾家裕. 塔里木盆地沉积层序特征及其演化. 北京: 石油工业出版社, 1996. 28~292
- 30 林畅松, 刘景彦, 张燕梅, 等. 库车坳陷构造层序的构成特征及其对前陆构造作用的响应. *中国科学, D 辑*, 2002, 32(3): 177~183[摘要] [PDF]
- 31 贾承造, 杨树锋, 陈汉林, 等. 特提斯北缘盆地群构造地质与天然气. 北京: 石油工业出版社, 2001. 130~133
- 32 李忠, 王清晨, 王道轩, 等. 晚新生代天山隆升与库车坳陷构造转换的沉积约束. *沉积学报*, 2003, 21(1): 38~45
- 33 王清晨, 张仲培, 林伟. 库车盆地-天山边界的晚第三纪断层活动性质与应力状态. *科学通报*, 2003, 48(24): 2553~2559

- [\[摘要\]](#) [\[PDF\]](#)
- 34 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. 北京: 地质出版社, 1993. 1~5
- 35 高俊, 何国琦, 李茂松. 西天山造山带的古生代造山过程. 地球科学, 1997, 22(1): 27~32
- 36 Dickinson W R, Suczek C A. Plate tectonics and sandstone compositions. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1979, 63(12): 2164~2182
- 37 Pettijohn F J, Potter P E, Siever R. Sand and Sandstone, 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1987. 553
- 38 Ingersoll R V, Kretchmer A G, Valler P K. The effects of sampling scale on actualistic sandstone petrofacies. Sedimentology, 1993, 40: 937~953
- 39 李忠, 李任伟, 孙枢, 等. 合肥盆地南部侏罗系砂岩碎屑组分特征及其物源构造属性. 岩石学报, 1999, (3): 438~445
- 40 Eynatten H, Gaupp R. Provenance of Cretaceous synorogenic sandstones in the Eastern Alps: Constraints from framework petrography, heavy mineral analysis and mineral chemistry. Sedimentary Geology, 1999, 124: 81~111 [\[DOI\]](#)
- 41 Deer W A, Howie R A, Zussman J. An Introduction to the Rock-forming Minerals, 2nd ed. Hong Kong: Longman Scientific & Technical, 1992. 677
- 42 Norrish K, Hutton J T. An accurate X-ray spectrographic method for the analysis of a wide range of geological samples. Geochim Cosmochim Acta, 1969, 33: 431~454
- 43 杨玉华, 卢敬智, 茅祖兴, 等. X 射线荧光光谱法在岩石全分析中的应用. 见: 中国科学院地质研究所主编. 中国科学院地质研究所集刊. 北京: 科学出版社, 1987. 199~207
- 44 Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. The Journal of Geology, 1983, 91(6): 611~627
- 45 Bhatia M R. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control. Sedimentary Geology, 1985, 45: 97~113 [\[DOI\]](#)
- 46 Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. Contrib Mineral Petrol, 1986, 92: 181~193 [\[DOI\]](#)
- 47 Nesbitt H W, Young G M. Formation and diagenesis of weathering profiles. The Journal of Geology, 1989, 97(2): 129~147
- 48 Nesbitt H W, Young G M. Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments. Geochim Cosmochim Acta, 1997, 61(8): 1653~1670 [\[DOI\]](#)
- 49 Weltje G J. Provenance and dispersal of sand-sized sediments. Geol Ultraiectina, 1994, 121: 1~208.
- 50 邵磊, 刘志伟, 朱伟林. 陆源碎屑岩地球化学在盆地分析中的应用. 地学前缘, 2000, 7(3): 297~304
- 51 Dumitru T A, Zhou D, Chang E, et al. Uplift, exhumation, and deformation in the Chinese Tian Shan. Geological Society of America Memoir, 2001, 194: 71~99
- 52 Vakhrameyev V A, Doludenko M P. The Middle-Late Jurassic boundary, an important threshold in the development of climate and vegetation of the Northern Hemisphere. International Geology Review, 1977, 19: 621~632
- 53 Vakhrameyev V A. Classopollis pollen as an indicator of Jurassic and Cretaceous climate. International Geology Review, 1982, 24: 1190~1196
- 54 Parrish J T. Climate of the supercontinent Pangea. Journal of Geology, 1993, 101: 215~233