

doi: 10.12029/gc20200621001

岳勇, 蒋恕, 田景春, 林新. 2024. 塔里木盆地西南部晚白垩世—早古新世沉积环境演化: 来自皮山 PBX1 井的地化证据[J]. 中国地质, 51(2): 592–605.

Yue Yong, Jiang Shu, Tian Jingchun, Lin Xin. 2024. Late Cretaceous to Early Paleocene sedimentary environment evolution: Geochemical evidences of Well PBX1 in the southwestern Tarim Basin[J]. Geology in China, 51(2): 592–605(in Chinese with English abstract).

塔里木盆地西南部晚白垩世—早古新世沉积环境演化: 来自皮山 PBX1 井的地化证据

岳勇¹, 蒋恕², 田景春³, 林新⁴

(1. 中海石油(中国)有限公司上海分公司研究院, 上海 200335; 2. 中国地质大学武汉构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074; 3. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 4. 中国石化西北油田分公司勘探开发研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:【研究目的】白垩纪与古近纪之交发生过地质历史上重大的灾变和异常事件, 致使 K/Pg 界线成为全球最重要的地质界线之一。通过对塔里木盆地晚白垩世—早古新世沉积环境的研究, 有助于重建特提斯北部盆地群塔里木盆地的古环境。【研究方法】本文通过塔里木盆地西南部 PBX1 井岩心的地球化学元素敏感指标研究 K/Pg 上下环境的变化。【研究结果】晚白垩世晚期古气候属于干热型, 早古新世呈现短暂温湿型。古盐度由晚白垩世正常海洋环境向早古新世半咸水、海陆过渡盐湖环境转换, K/Pg 界线位置处, 古盐度达到最低值。氧化-还原环境由晚白垩世富氧→贫氧的弱氧化-弱还原环境经历了 K/Pg 事件之后短暂向早古新世富氧环境转化, 而后整体上由贫氧的弱氧化-弱还原环境向极贫氧的还原环境演化。【结论】PBX1 井地球化学元素敏感指标揭示了中生代—新生代之交灾变异常事件在塔里木盆地响应特征, 也是特提斯洋北部盆地群晚白垩世—早古新世沉积环境演化的有效证据。

关键词: 环境演化; 干热型; 湿热型; 白垩纪—古近纪界线; PBX1 井; 地质调查工程; 塔西南

创新点: 采用地球化学元素方法分析晚白垩世—早古新世塔里木盆地内沉积环境变化, 丰富完善了特提斯北部盆地群 K/Pg 界限上下的古环境研究。

中图分类号: P595 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)02-0592-14

Late Cretaceous to Early Paleocene sedimentary environment evolution: Geochemical evidences of Well PBX1 in the southwestern Tarim Basin

YUE Yong¹, JIANG Shu², TIAN Jingchun³, LIN Xin⁴

(1. Shanghai Branch of CNOOC Ltd., Shanghai 200335, China; 2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China; 3. Sedimentary Geology Institute, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 4. Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC Northwest Company, Xinjiang 830011, Urumqi, China)

收稿日期: 2020-06-21; 改回日期: 2020-10-18

基金项目: 中国地质调查局项目“雪峰古陆周缘页岩气地质调查”(DD20190558)与国家重点研发计划项目课题(2022YFF0801202)联合资助。

作者简介: 岳勇, 男, 1980 年生, 副研究员, 主要从事石油地质研究工作; E-mail: 284434090@qq.com。

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

[Objective] The catastrophe and extinctions that occurred in Late Cretaceous is during geological history make the K/Pg boundary become one of the most important geological boundaries in the world. The study of Late Cretaceous–Early Paleocene sedimentary environment evolution of Tarim is helpful to reconstruct the paleogeography in the northern Tethys basins. **[Methods]** This study employs the sensitivity index analysis of geochemical elements from core samples of Well PBX1 located in the southwestern Tarim Basin to investigate the environment evolution associated with the K/Pg boundary. **[Results]** The climate was hot and dry in Late Cretaceous and transitioned to a short-term warm and humidity environment in Early Paleocene. The paleo-salinity changed from normal marine environment in Late Cretaceous to brackish water or marine to saline lake in Early Paleocene. The salinity reached minimum at the K/Pg boundary. For redox environment, it experienced the oxic to anoxic environment and weak redox environment in Late Cretaceous to a short-term oxic environment near the boundary to a major anoxic and weak redox environment in Early Paleocene. **[Conclusions]** The geochemical element sensitivity index of well PBX1 reveals the response characteristics of the catastrophic anomaly event between Cretaceous and Paleocene in the Tarim Basin, which is effective evidence of the of Late Cretaceous–Early Paleocene sedimentary environment evolution in the northern basins of Tethys Ocean.

Key words: sedimentary environment evolution; hot and dry type; warm and humidity type; K/Pg boundary; Well PBX1; geological survey engineering; southwestern Tarim Basin

Highlights: The geochemical element method is used to analyze the sedimentary environment changes in the Tarim Basin from Late Cretaceous to Early Paleocene, which enriches and improves the paleo-environment research in the northern Tethys basins above and below K/Pg boundary.

About the first author: YUE Yong, male, born in 1980, associate researcher, mainly engaged in petroleum geology research; E-mail: 284434090@qq.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey “Geological Survey of Shale Gas around Xuefeng Ancient Land” (No. DD20190558) and National Key R&D Program (No.2022YFF0801202).

1 引言

在全球环境变化中,白垩纪—古近纪之交,发生了重大的生物绝灭事件(Kauffman, 1986; Raup and Sepkoski, 1986; Fastovsky and Sheehan, 2005),最引人注目的是在中生代恐龙类的集群绝灭之后的古近纪生物劫后复苏以及哺乳动物的兴起事件(Hunter et al., 2002)。目前主流观点认为天绝事件起因于地外天体对地球的撞击(Gannapathy, 1980; Alvarez et al., 1982)。Alvarez et al.(1980)在意大利 Gubbio 附近 K/Pg(白垩纪—古近纪)界线黏土层中发现稀有金属元素铍含量的巨大异常(比上下层位高出约 30 倍),以及撞击石英(Bohor et al., 1987)和玻璃质的球形微粒(Keller et al., 2003),并由此提出灾变假说对地学界产生了深刻影响。塔里木盆地西南部作为中国陆上同时代海相地层最为发育的地区之一,位于新特提斯洋北缘,白垩纪—古近纪的沉积构造演化可划分为两个主要阶段(王永和傅德荣, 1996):早白垩世为继承性走滑—断陷盆地;晚白垩世—古近纪为前陆盆地发展阶段,白垩系—古近系以海陆交互沉积为主。晚白垩统—古近系地

层由下至上为滨岸—碳酸盐岩台地—滨岸—河流的沉积(薛莲花等, 1998)。晚白垩统依格孜牙组表现为碳酸盐岩台地—台地边缘的过渡沉积,古新统早吐依洛克组为宽广潮坪(郭群英等, 2014)。古新世早期,从卡拉库姆盆地向东至费尔干纳—阿富汗—塔吉克盆地再到塔西南地区,在空间上表现为一个自西向东水体盐度逐渐升高的“湖链”系统(张华等, 2015)。塔里木与中亚晚白垩世—古新世古“盐湖”发育受控于特提斯构造事件及海侵—海退旋回(曹养同等, 2016),白垩纪晚期,受燕山期构造活动影响,特提斯海水自塔里木盆地西北侵入盆地内部,但并未影响到麦盖提斜坡,在古近纪,海侵得到继承和发展(郝谄纯等, 2001)。

以往塔里木盆地西南地区针对上白垩统—古新统及沉积环境演化的研究基本局限于盆缘昆仑山前及南天山山前,而缺乏盆地腹地实钻资料支撑下的盆内基础研究。鉴于目前盆地已有钻井揭示到晚白垩世—古近纪地层,证实特提斯海水自白垩纪晚期已侵入到塔里木盆地内部塔西南坳陷麦盖提斜坡地区,笔者基于前人研究成果,结合盆地岩石地球化学特征,开展盆内晚白垩世—早古新世的

沉积环境演化研究,将有助于探晚白垩纪—新世塔里木盆地古气候、古盐度等以及重建特提斯北部盆地群的古环境。

2 区域地质概况

塔西南地区现今位于帕米尔突刺东侧,帕米尔突刺北侧和西侧分别为阿莱盆地(谷地)和塔吉克盆地,两盆地相邻,并与费尔干纳盆地比南天山相隔(岳勇等, 2017)。塔西南构造格局的显著特征是中—塔交界的帕米尔高原向北挤入形成的突刺状构造,该构造主要形成时间晚于古近纪(李江海等, 2013; 侯平等, 2014)。古新世,印度板块与欧亚板块碰撞初始,帕米尔突刺形成雏形;渐新世—中新世,突刺向北碰撞挤压作用变强,昆仑山、天山陆内造山作用变强,至中新世末,塔西南莎车隆起雏形形成;晚新世后,受印度板块与欧亚大陆强烈(硬)碰撞影响,昆仑山、天山强烈陆内造山,帕米尔突刺向北强烈位移、隆升、推覆,形成现今的构造格局(张达景等, 2007)。塔西地区包括塔西南坳陷和巴楚前缘隆起。其中塔西南坳陷发育喀什北山前冲断带、喀什凹陷、西昆仑山前冲断带、叶城凹陷、和田凹陷、麦盖提斜坡 6 个二级构造单元。塔西南在古生代主要发育克拉通构造,到晚二叠世末,区域隆

升,出现了三叠系沉积间断,在中—新生代时期,成为了南天山山前及西昆仑山山前的前陆盆地(任泓宇等, 2017)。晚白垩世开始的全球海平面上升,特提斯海侵经塔吉克盆地、阿莱谷地淹没了欧亚大陆东南部的塔西南,上白垩统赛诺曼阶(Cenomanian)—马斯特里赫特阶(Maastrichtian)发育海相泥岩、膏泥岩、碳酸盐岩沉积,自下而上依次为库克拜组(K_1k),乌依塔克组(K_1w)和依格孜牙组(K_1y)。古近系古新统丹尼阶(Danian)至坦尼特阶(Thanetian)自下而上为吐依洛克组(K_1t)、阿尔塔什组(K_1a)、齐姆根组(E_{1-2q})下段,并发育海相膏泥岩、膏盐岩、细砂岩沉积(郝诒纯等, 2001; 傅恒等, 2016^①)(图 1)。

3 材料与方 法

用于本次研究的 111 个样品采自塔里木盆地 PBX1 井 6850~7150 m,其中主量、微量元素样品 86 件, Sr 同位素样品 25 件,以角砾岩、膏岩、膏质泥岩和泥岩为主。主量、微量元素样品中覆盖依格孜牙组—吐依洛克组的连续岩屑样品 67 件,岩心样品 19 件。主量元素由 AB-104L、PW2404 X 射线荧光光谱仪在在温度 20℃、相对湿度 30%测定,微量元素样品由 ELEMENT-XR 等离子体质谱分析仪、在温度 20℃、相对湿度 30%测定,由中石化

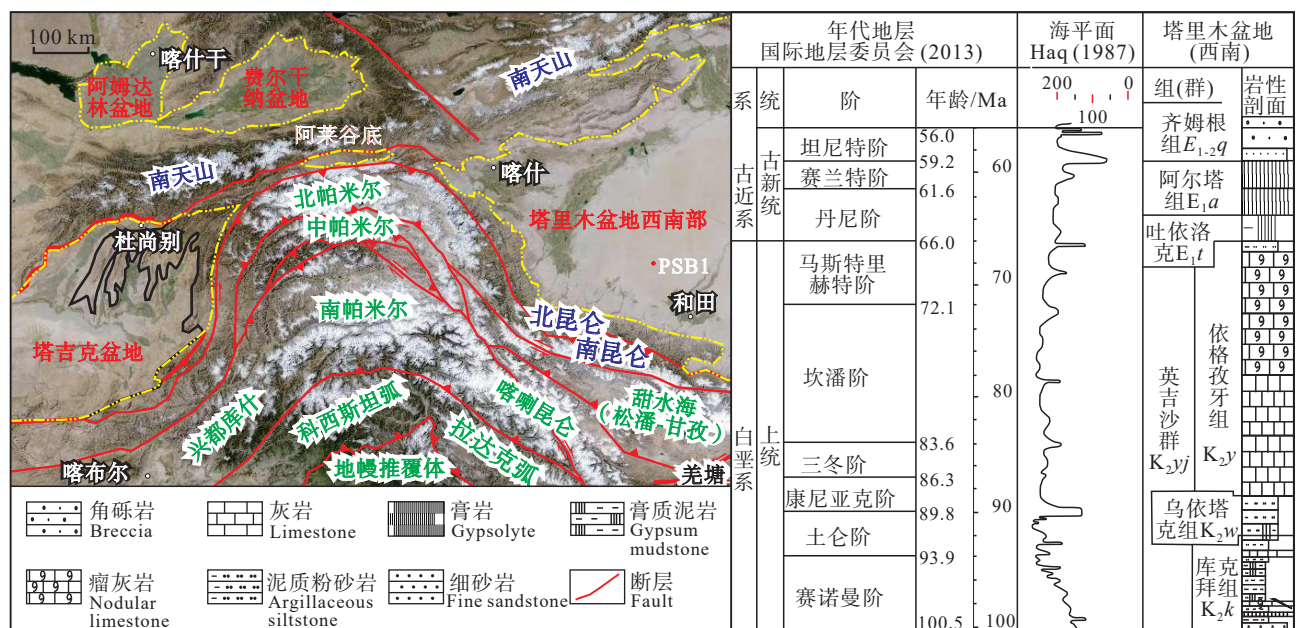


图 1 塔里木盆地西南部构造位置及地层发育特征
Fig.1 Tectonic location and stratigraphic development in the southwestern Tarim Basin

西北油田分公司勘探开发研究院实验室完成测试。Sr 同位素样品前处理及测试分析由北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室高分辨多接收电感耦合等离子质谱完成。

4 晚白垩世—古新世沉积背景与地层特征

4.1 K/Pg 界线盆内划分讨论

塔里木盆地西部 K/Pg 界线位置争议较大,有吐依洛克组/阿尔塔什组之间、依格孜牙组/吐依洛克组之间和吐依洛克组内部 3 种不同方案(郭宪璞, 1990; 席党鹏等, 2019)。塔里木盆地边缘阿尔塔什剖面 K/Pg 界线事件的标志研究(叶得泉等, 1992)发现, K/Pg 界线处存在铯及伴生的微量元素与稀土元素的异常。在依格孜牙组 (K_2y) 和吐依洛克组 (E_1t) 之间发育有海相白垩世—古近—新近系的界线黏土层(郭宪璞等, 2000)。基于盆内钻井系统采样研究, 罗少辉等(2018)通过铯元素异常, 碳、氧稳定同位素明显异常变化将盆内 PBX1 井 K/Pg 定义在吐依洛克组/阿尔塔什组之间的 7068 m 处。李建交等(2019)通过古生物地层学、元素地球化学资料将 PBX1 井 K/Pg 也同样定义在吐依洛克组/阿尔塔什组之间, 界线为 7086 m。盆内依格孜牙组、吐依洛克组与盆缘露头对比, 表现非典型特征, 为一套角砾岩沉积, 按照其分布不稳定特征, 依格孜牙组/吐依洛克组两套角砾岩之间存在铯元素异常。本文赞同罗少辉与李建交两位学者将 K/Pg 界线定义在吐依洛克组/阿尔塔什组之间的观点, 至于 PBX1 井 K/Pg 界线具体深度, 后续刊文再进一步详细论述。

4.2 晚白垩世—古新世沉积环境

在晚白垩世依格孜牙组—古新世吐依洛克组沉积期间, 受特提斯海洋壳扩张影响, 海水多次自西向东侵漫到喀什—叶城及和田等地, 形成了西塔里木海湾, 发育了滨海—浅海—潟湖相沉积, 塔西南地区沉积环境变化较大, 西侧为特提斯海, 是海水侵入塔里木盆地最边缘地带。依格孜牙组 (K_2y) 在古昆仑山山前带形成了由近海冲积扇—滨海沙滩—泥砂坪—碳酸盐台地等组成的复杂沉积体系。塔西南 PBX1 揭示了晚白垩世中—晚期(赛诺—马斯特里赫特期)海水展布及海相性呈现了南北分异的格

局, 即南部昆仑山前有一定深度的正常浅海, 海相性强于北部天山前正常浅海环境, 南强北弱(郭宪璞等, 2018)。

古新世吐依洛克期, 受燕山运动落幕影响, 海水迅速西退, 在早期依格孜牙的古地理格局下, 塔里木西南缘滨线大幅度向海推进, 昆仑山山前带的海岸线已经退至阿克彻依、吐依洛克、阿尔塔什一线, 在早期生物丘或浅滩的障壁下变成了分散孤立的潟湖群, 并结束了碳酸盐岩沉积, 转变为吐依洛克的碎屑岩和蒸发岩沉积。从阿克彻依至阿尔塔什地区, 该组底部均发育厚度不等的含生物碎屑砂砾岩、细砂岩。生物碎屑主要由固着蛤、苔藓虫、棘皮动物、有孔虫类的生物碎片组成, 生物碎屑泥晶化及磨蚀现象普遍。生物碎屑滩相, 受风暴作用影响常堆积成层, 与生物碎屑灰岩组成韵律层。吐依洛克组沿昆仑山山前带自西向东岩石类型差异明显、沉积相变较大, 且从下至上显示出向上变浅的海退沉积序列, 在塔西南地区地势低洼部位, 于封闭、半封闭的沉积环境中沉积碎屑岩与蒸发岩地层, 吐依洛克组的分布呈现不连续的, 在大的海退背景下孤立潟湖仍可以接受间隙性海水补给, 沉积了膏溶或近缘堆积的碳酸盐岩角砾岩地层。

4.3 上白垩统依格孜牙组 (K_2y)

依格孜牙组与下伏乌依塔克组紫色砂泥岩整合接触, 沿昆仑山前阿尔塔什、吐依洛克、阿克彻依剖面沉积巨厚的海相生物屑碳酸盐岩。其中吐依洛克组剖面则依格孜牙组顶底分别发于一套细砂岩沉积; 而在南天山山前为潮上带膏质泥岩, 在库孜贡苏剖面以潟湖泥岩为主(图 2)。在中国晚白垩世沉积盆地中, 仅塔西南地区为海相碳酸盐岩沉积, 在麦盖提斜坡为则表现为角砾岩, 角砾岩平面分布局限, 上超于二叠系之上, 受控于下伏底劈作用形成环形凹陷区域(岳勇等, 2019)。PBX1 井依格孜牙组 7077.77~7125 m 井段岩心砾石成分较复杂, 主要为粉晶和中晶白云岩、硅质岩、膏岩、粉晶生物屑灰岩、含黄铁矿含细粉砂质泥岩, 杂基为有机质+碳酸盐泥+方解石碎屑+泥质+少量陆源碎屑, 见较多的陆源石英碎屑、石膏, 局部可见少量黄铁矿(图 3)。

4.4 古近系下统吐依洛克组 (E_1t) —阿尔塔什组 (E_1a)

吐依洛克组在南天山地层小区库孜贡苏剖面

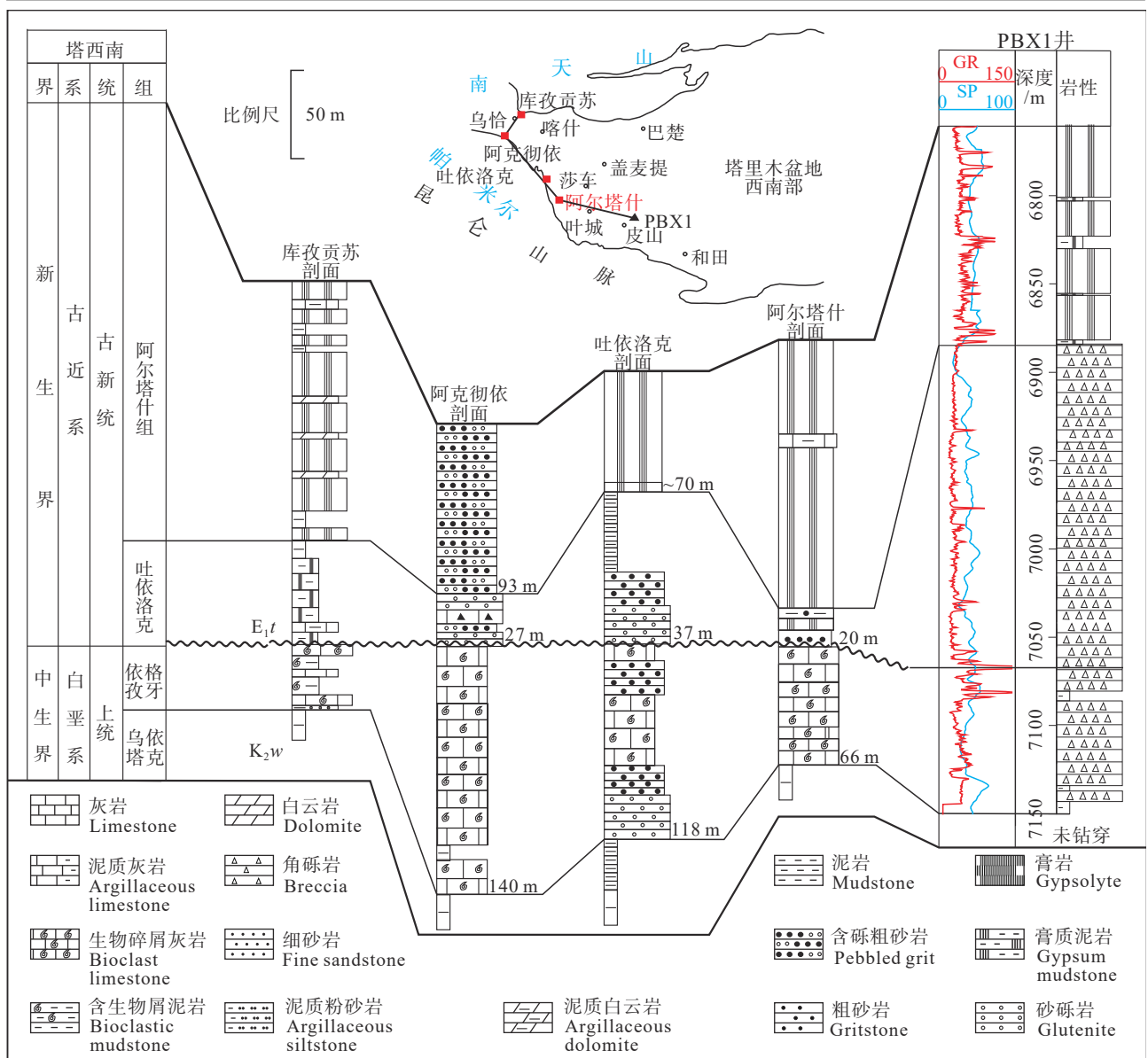


图2 塔西南上白垩统依格孜牙组—古新统吐依洛克组地层对比图

Fig.2 Stratigraphic correlation of Upper Cretaceous Yigeziya Formation and Paleocene Tuyiluke Formation, Southwestern Tarim Basin

自下而上为膏泥岩夹砂泥岩, 昆仑山地区小区阿克彻依、吐依洛克下部为灰色及紫灰色含角砾砂岩, 上部紫红色细砂岩、泥岩、膏岩, 细砂岩且呈交错层理, 间夹灰岩角砾; 阿尔塔什剖面则为泥岩夹薄层膏岩; 盆内麦盖提斜坡则与上白垩统依格孜牙组相似的岩石结构特征, 为一套角砾岩(图2)。PBX1井吐依洛克组下段 6924~6942.3 m(取心), 角砾成分单一, 主要为以粉晶、细晶、中晶白云岩为主, 以及少量砂屑和鲕粒灰岩, 杂基也主要为白云石、碳酸盐岩泥、方解石, 陆源碎屑含量少。吐依洛克组

上段 6902~6924 m 角砾成分较复杂, 主要为细晶、中晶、粗晶白云岩、硅质岩、藻黏结岩和亮晶鲕粒灰岩, 蓝绿藻灰岩, 杂基为白云石、碳酸盐岩泥、方解石。古近系阿尔塔什组岩性在昆仑、南天山地区小区为厚层状膏岩, 夹薄层泥质膏岩、膏质泥岩。昆仑最北部阿克彻依剖面则为一套含砾粗砂岩。

5 晚白垩世—古新世沉积环境演化

受水介质、电位及沉积物等因素的影响, 元素的分布和配置随沉积环境变化而有着不同的配比,

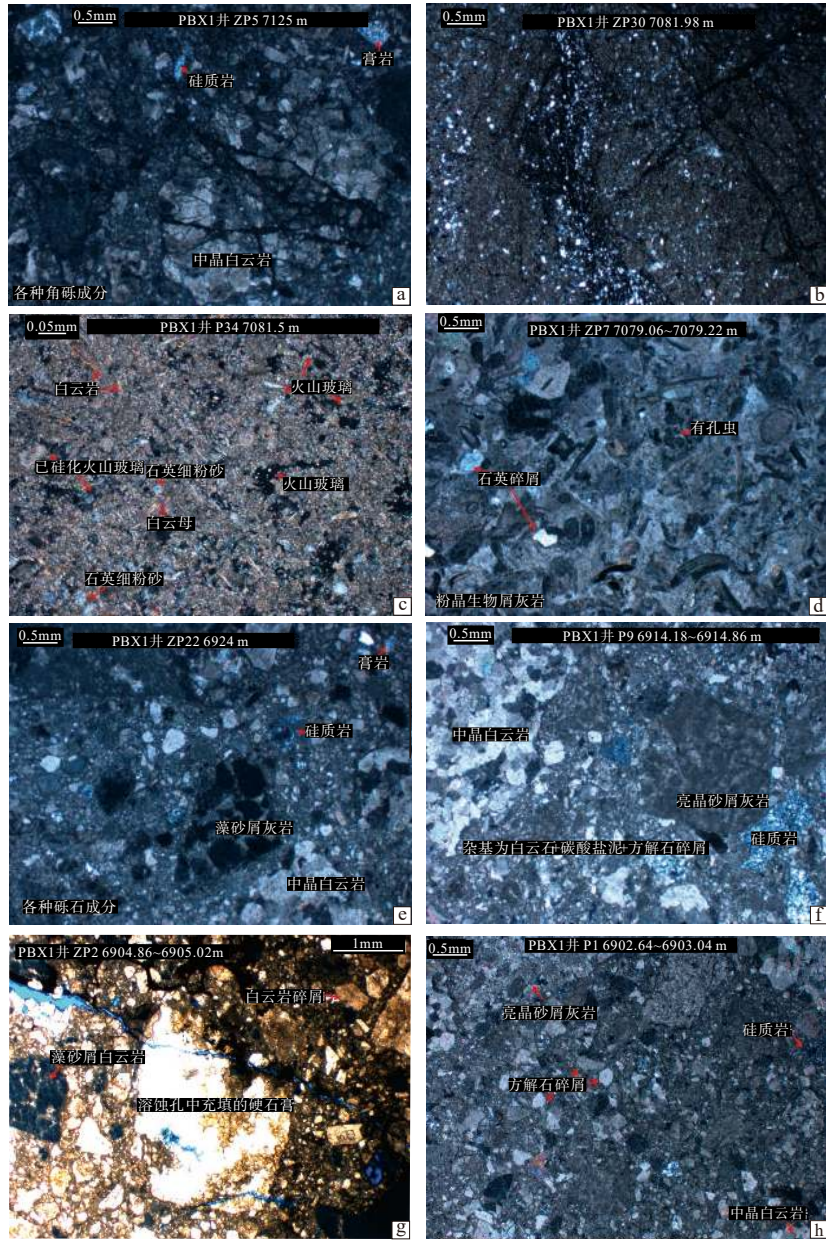


图 3 PBX1 上白垩统依格孜牙组—古新统吐依洛克组角砾岩成分

a—7125 m, 硅质岩、中晶白云岩、膏岩; b—7081.98 m, 泥粉晶白云岩、石英碎屑充填裂缝; c—7081.5 m 杂基成分为石英细砂、硅化火山玻璃、白云母等; d—7079.06~7079.22 m, 生物碎屑灰岩, 含石英碎屑; e—6924 m, 中晶白云岩、亮晶砂屑灰岩、硅质岩、膏岩, 杂基为白云石、碳酸盐岩泥、方解石; f—6914.18~6914.86 m, 角砾岩为中晶白云岩、亮晶砂屑灰岩、硅质岩, 杂基为白云石、碳酸盐岩泥、方解石; g—6904.86~6905.02 m, 角砾岩为藻砂屑白云岩、粉晶白云岩, 杂基主要为白云石碎屑等; h—6902.64~6903.04 m, 角砾岩主要为中晶白云岩、亮晶砂屑灰岩、硅质岩, 杂基主要为方解石碎屑

Fig.3 Breccia composition of Upper Cretaceous Yigeziya Formation and Paleocene Tuyiluke Formation, PBX1
 a—7125 m, siliceous rock, meso-crystal dolomite, gypsum rocks; b—7081.98 m, the fractures are filled with argillaceous dolomite and quartz debris; c—7081.5 m, the matrix composition is quartz fine sand, silicified volcanic glass, white mica and so on; d—7079.06~7079.22 m, bioclastic limestone; e—6924 m, mesocrystalline dolomite, sparry arenaceous clastic limestone, siliceous rock, paste rock, mixed group is dolomite, carbonate slime, calcite; f—6914.18~6914.86 m, the breccia consists of mesocrystalline dolomite, sparry arenaceous clastic limestone and siliceous rock, while the complex group consists of dolomite, carbonate slime and calcite; g—904.86~6905.02 m, breccia is algal clastic dolomite, silt-crystal dolomite, and the mixed group is mainly dolomite clasts; h—6902.64~6903.04 m, the breccia mainly consists of meso-crystalline dolomite, sparry arenaceous clastic and siliceous, and the complex group is mainly calcite clasts

尤其是一些相关元素的比值在沉积相带区分、氧化或还原状态的示踪上十分敏感(范萌萌等, 2019), 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(刘刚和周东升, 2007; 杨旭罡等, 2013)。

5.1 沉积古气候演化

不同元素在不同沉积环境下的富集程度有所差异, 存在喜湿型元素及喜干型元素差异富集。根据离子半径较大的 Rb 元素容易在温湿条件下被黏土吸附富集, Sr 元素一般则是在偏干旱时沉积, 因而温湿环境下 Rb/Sr 比值呈高值, 且 $1 < \text{Sr}/\text{Cu} < 10$, 一般指示温湿气候, $\text{Sr}/\text{Cu} > 10$, 指示干热气候(范玉海等, 2012)。

由研究区目的层位的 86 件样品测试结果计算表明, 晚白垩世依格孜牙组沉积期 Sr/Cu 平均值 23.22, 明显低于吐依洛克组—阿尔塔什组 Sr/Cu, 同时代表干热气候(图 4)。早古新世吐依洛克组—阿尔塔什组 Sr/Cu 比值平均值为 52.70, 属于典型的干热气候, K/Pg 界线之上, 7057~7065 m 连续 3 个低于 10 的值, 说明塔西南地区晚白垩世—古新世早期由干热气候短暂变为温湿气候, 后期变为干热气候与早古新世吐依洛克组—阿尔塔什组发育膏泥岩与膏岩的环境相符; 这其实又与 K/Pg 界线以下的生物大灭绝以及 K/Pg 界线以上生物劫后复苏具有一致性。

此外, 以氧化物形式存在的 MgO、Al₂O₃、CaO、SiO₂、K₂O、Fe₂O₃ 等主量元素的量值对古气候反映较为敏感。前人研究认为, Ti 元素含量的变化反映的是陆源物加入的程度(赵克斌和孙长青, 2004), 值越高则表明陆源物含量越丰富, 指示了一种可能温暖潮湿的气候背景, 而 P 元素高含量则代表着气候相反。Mn 元素在湖水中常以 Mn²⁺ 稳定存在, 只有当海(湖水)强烈蒸发致使 Mn²⁺ 饱和时大量沉淀, 在沉积岩中显示高值。主量元素的比值, 如 MgO/CaO 对气候变化较为敏感, 当钠盐、钾盐等易溶性盐类参与沉淀时, Na⁺、K⁺ 的相对高值和 MgO/CaO 低值共同指示干热气候, 而当钠盐、钾盐等易溶性盐类不参与沉淀时, MgO/CaO 高值指示干热气候, 低值指示潮湿气候。

晚白垩世依格孜牙组—早古新世吐依洛克组主量元素的变化图看(图 5), 塔西南晚白垩世依格

孜牙组—早古新世吐依洛克组沉积期 Ti、Mn 存在相同的变化趋势, 表现为晚白垩世依格孜牙组与早古新世吐依洛克组沉积期都较为干旱。P 元素的富集应与 Ti、Mn 呈相反的趋势, 但盆内 PBX1 井测试数据则趋势与其相同, 可能受上下两套角砾岩具有相似沉积及物源成因所致, 但也从另一方面表明, K/Pg 上下都为干旱的古气候, 变化程度较小。此外, 晚白垩世依格孜牙组 K₂O、Na₂O 为 1.16%~7.37%、0.04%~0.27%, 表明钠盐、钾盐等易溶性盐类不参与沉淀, MgO/CaO 高值则指示干热气候。早古新世吐依洛克组沉积期 K₂O、Na₂O 含量较晚白垩世依格孜牙组低, 也同样未参与化学沉淀, MgO/CaO 指示早古新世吐依洛克组沉积晚期干热气候环境。因此, 综合分析表明塔西南地区晚白垩世—早古近纪早期由依格孜牙组干热气候经历 K/Pg 事件后短暂变为温湿气候, 后期再度变为干热气候。

5.2 物源区风化作用

元素在特定的风化条件下迁移能力具有差异性, 造成各种元素按其迁移能力的强弱依次从母岩中分离出来, 其中 Cl、S 元素受风化作用的水迁移能力最强, Al、Fe、Ti 等元素迁移能力极弱, 属于微弱迁移元素, 而 Si 几乎不发生迁移。在化学风化作用过程中, Cl、S、Al、K、Na、Ca 极易发生分离。Nesbitt and Young(1982)等提出可以用 CIA 指数来确定物源区的化学风化程度, 而该指数也是目前判断物源区风化特征最主要的化学指标。当源岩基本未遭受化学风化时, CIA 指数一般小于 50; 而 CIA 值在 50~100 时, 表明其遭受到一定强度的化学风化; CIA 值越高则代表其受到的化学风化作用越强(张天福等, 2016)。ICV 指数与沉积物的成分成熟度呈负相关, 即 ICV 指数越低, 其成分成熟度越高, 反之亦然。构造活动区泥质岩石的成分成熟度一般较低, 而构造稳定区或强烈化学风化背景下泥质岩石的成分成熟度相对较高(刘平等, 2007)。PBX1 井白垩纪晚期角砾岩一般 $50 < \text{CIA} < 70$, 白垩纪晚期大多数角砾岩遭受一定化学风化作用, $1.23 < \text{ICV} < 21.49$, 其成分成熟度较高, 横向上具有一定的搬运距离搬运(图 6), 与晚白垩世依格孜牙组角砾岩 SiO₂ 的含量较高相吻合(图 5)。早古近纪吐依洛克组沉积期, 角砾岩 $5 < \text{CIA} < 69$, $68.98 < \text{ICV} < 5456$, 表明未遭受化学风化作用, 角砾成分成熟度

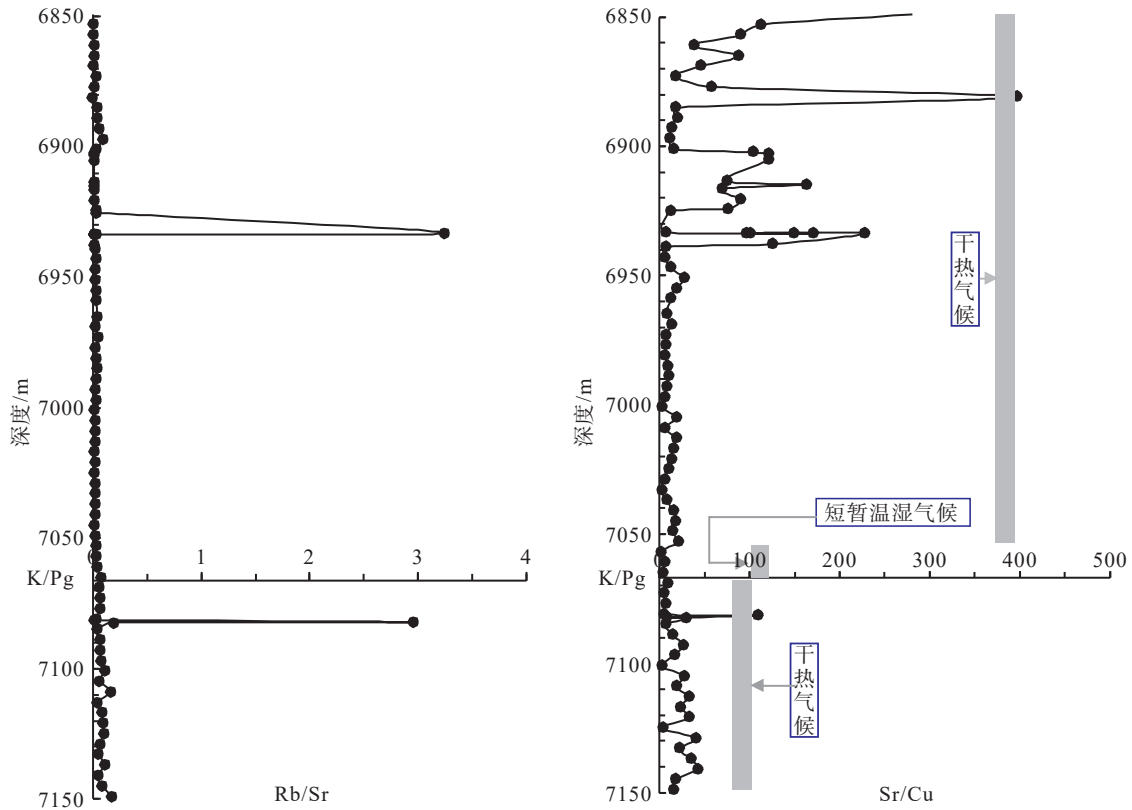


图 4 PBX1 井 K_2Y-E_1a Rb/Sr、Sr/Cu 比值变化
Fig.4 Ratios of Rb/Sr and Sr/Cu from K_2Y-E_1a , PBX1 Well

较低,个别 CIA 高值区域,主要角砾物源来源于下覆依格孜牙组角砾岩,也同时表明搬运距离较近,与 SiO_2 的含量很低、以 MgO 和 CaO 为主的主量元素特征相吻合(图 5)。晚白垩世—早古新世构造活动较为活跃,角砾岩成分成熟度较低,且未遭受强烈的化学风化作用(图 5,图 6)。

5.3 沉积古水深演化

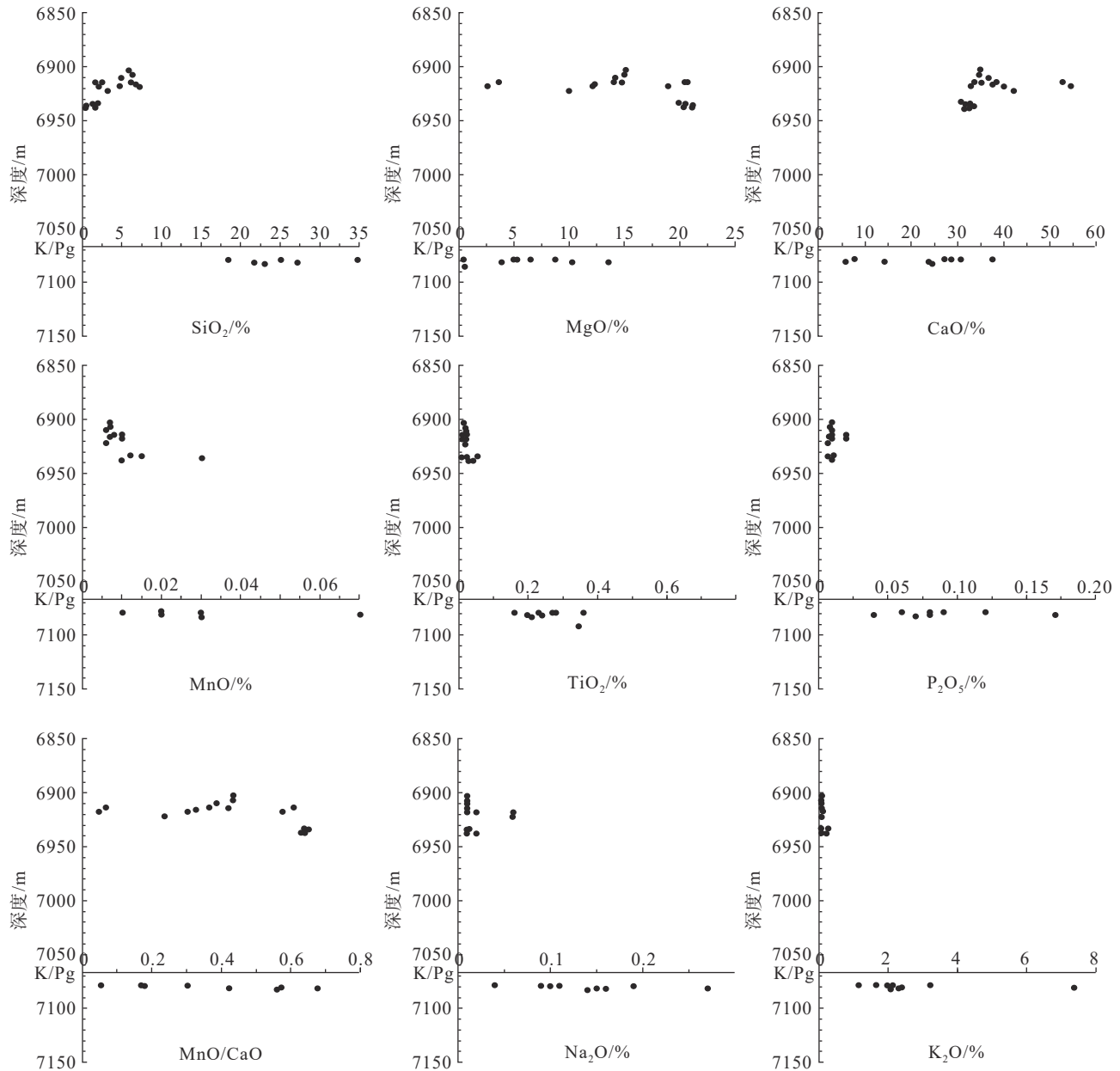
V 元素在还原条件下易于富集,而 Cr 元素易于富集于氧化环境,因而,沉积环境水体的深浅可以根据 V/Cr 的比值来判断(张妮等, 2012)。在古水体较深的还原性沉积环境下 V/Cr 比值较高,而古水体较浅时, V/Cr 低。PBX1 井样品中的 V/Cr 值表明塔里木盆地西南部晚白垩世—早古近世具有相似的古水深特征,只是在 K/Pg 界线之上,古近纪吐依洛克组沉积早期古水深有加深现象,然后逐渐水体向上变浅,至早古近纪吐依洛克组沉积期末,水体存在一定程度的加深,这也与古新世早期吐依洛克组为海侵—高位体系域特征一致。 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 亦为指示古水深的有效指标。晚白垩世与早古近纪 $^{87}Sr/^{86}Sr$

Sr 与 V/Cr 表现得较为一致,其值均整体逐渐趋于变小,说明晚白垩世—早古近纪古水深特征有一定的加深(图 7)。此外主量元素氧化物 Al_2O_3 、 K_2O 含量可以代表陆源碎屑的泥质含量,它们随着水体逐渐加深而增大(图 5),PBX1 井晚白垩世—早古近纪主量与微量元素表现出较为一致的趋势。

5.4 沉积古盐度演化

Sr/Ba 比值随着盐度提高有明显增大的趋势。Ba 元素离子半径大,易被黏土和有机质吸附聚集,而 Sr 元素活动性强,只有当湖水浓缩到一定程度后才会产生沉淀。淡水与海水相混时,淡水中的 Ba 与海水中的 SO_4^{2-} 结合生成 $BaSO_4$ 沉淀,而 $SrSO_4$ 溶解度较大,可以继续迁移到远海。通过生物途径沉淀下来。水体盐度常用 Sr/Ba 值大小进行判断,一般认为: $Sr/Ba < 0.6$ 代表陆相淡水沉积, $0.6 < Sr/Ba < 1$ 代表半咸水的海陆过渡相沉积, $Sr/Ba > 1$ 代表海相(咸化湖泊)咸水沉积。

PBX1 井晚白垩世依格孜牙组 24 件样品 Sr/Ba 平均值 0.9798,最小值 0.018,有两个大值数据(异常

图 5 PBX1 井 $K_{2y}-E_{1t}$ 主要元素及比值变化图Fig.5 Major elements and their ratio variation from $K_{2y}-E_{1t}$, PBX1 Well

数据), 分别为 16.047、2.026。从样品分析的角度看, 应该是半咸水环境。但郭宪璞等 (2018) 在 PBX1 井发现晚白垩世中—晚期 (赛诺—马斯特里赫特期) 地层岩心中发现 *Dentalina*、*Dentalinoides*、*Lagena* 等钙质微孔壳类型为主的有孔虫化石, 认为代表了有一定深度的正常浅海环境。本文分析认为塔西南晚白垩世依格孜牙组为正常海洋环境, PBX1 井区可能受破火山口等地貌形态控制, 沉积角砾岩及一些陆缘碎屑物质, 影响了正常的海水环

境。早古近纪吐依洛克组沉积期 62 个样品, Sr/Ba 平均值 1.75, 但 44 件样品数据值均小于 1, 平均值 0.18, 主要分布在吐依洛克组中下部, 高值区域主要分布在吐依洛克组上部, 古新世早期吐依洛克组代表半咸水的海陆过渡相沉积 (图 8)。塔西南晚白垩世依格孜牙组—早古新世吐依洛克组沉积期海水盐度转换过程中, 整体由晚白垩世正常海洋环境向吐依洛克组半咸水海陆过渡相 (咸化湖泊) 转换, K/Pg 界线 Sr/Ba 值域达到最低, 代表此时水体盐度

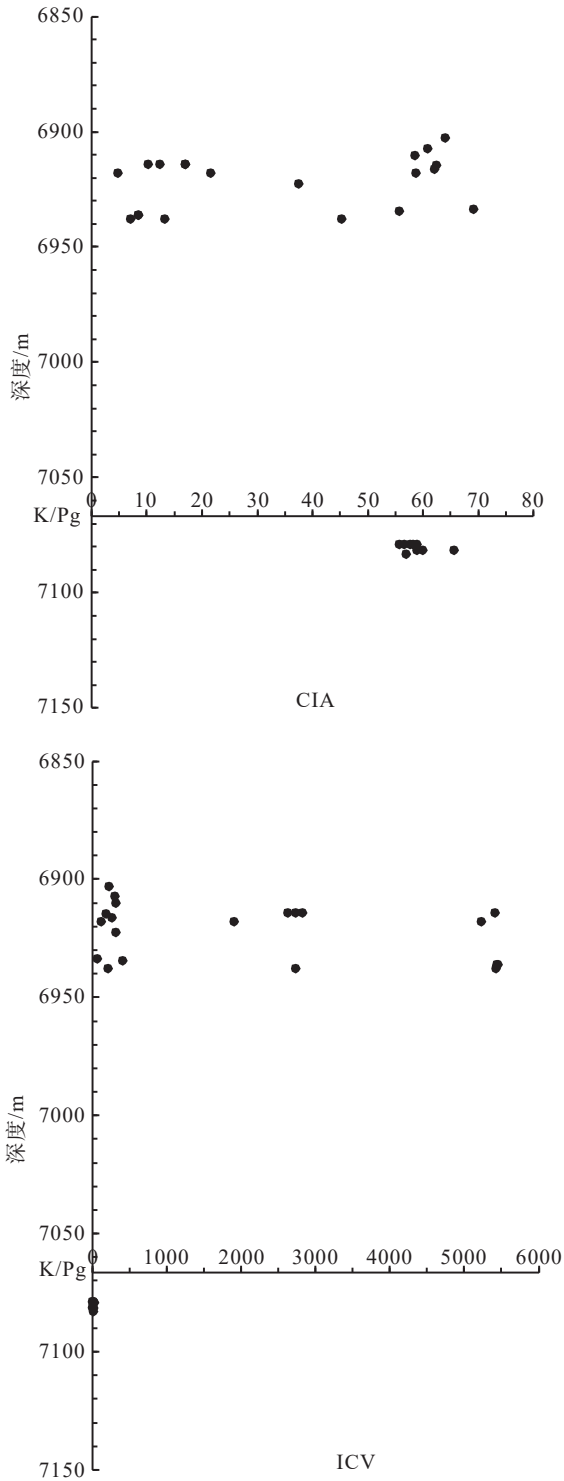


图 6 PBX1 井 K_2y-E_1t 样品 CIA、ICV 指标变化图
Fig.6 Ratio variation of CIA and ICV from K_2y-E_1t , PBX1 Well

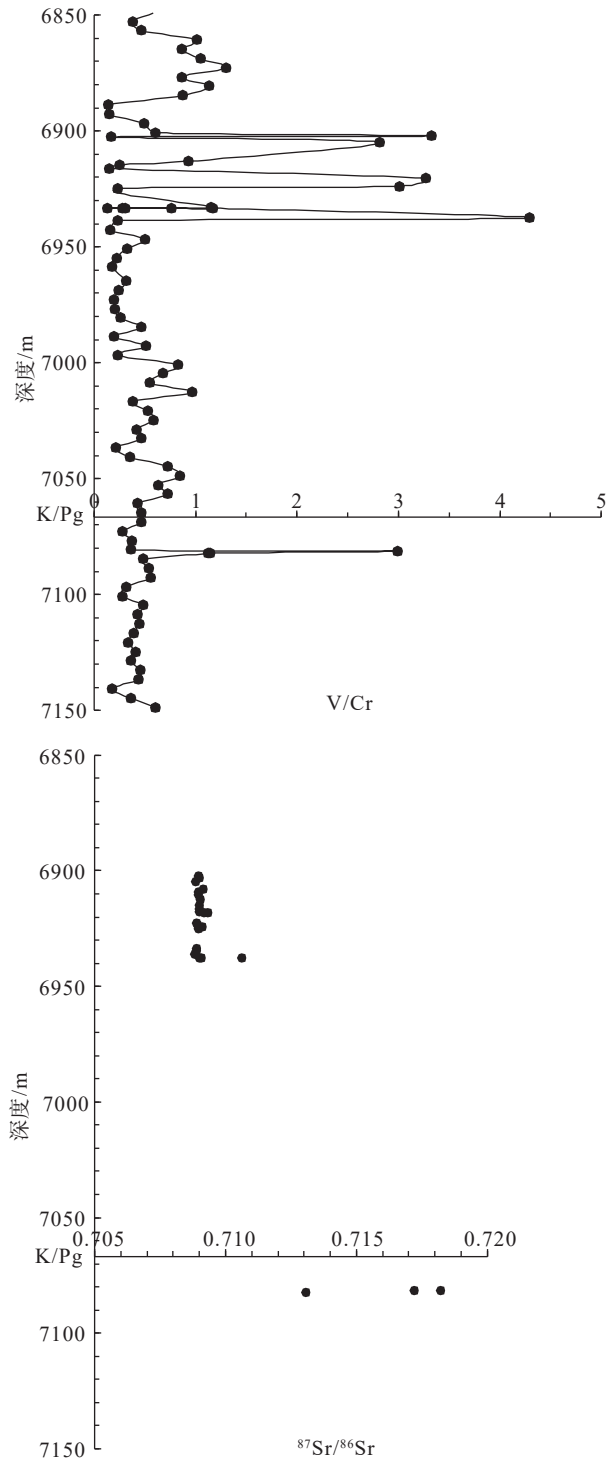


图 7 PBX1 井 K_2y-E_1t V/Cr 和 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值变化
Fig.7 Ratio variation of V/Cr and $^{87}Sr/^{86}Sr$ from K_2y-E_1t , PBX1 Well

最低。

5.5 氧化-还原环境

本文主要利用 U/Th、Ni/Co、Ce/Ce*、V/(V+Ni)

等 4 个特征比值对研究区氧化-还原条件做了分析。

U/Th>1.25 是代表缺氧环境, U/Th 在 0.75~1.25 是代表贫氧环境, U/Th<0.75 是代表氧化环境。因

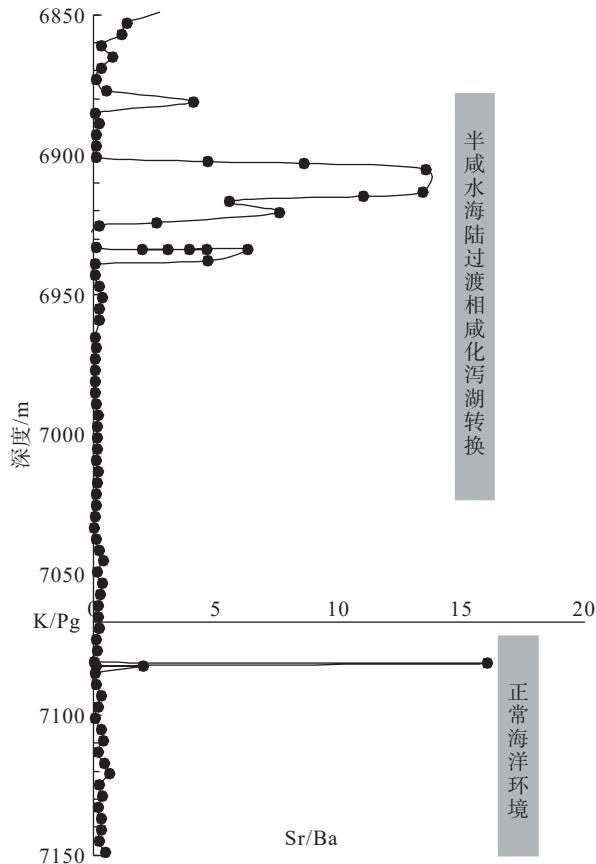


图8 PBX1井K_{2y}-E_{1a} Sr/Ba比值变化图

Fig.8 Ratio variation of Sr/Ba from K_{2y}-E_{1a}, PBX1 Well

此,可以用 U/Th 来判断地层的氧化还原环境。Ce* = $\sqrt{La \times Pr}$, 通常认为, Ce/Ce* > 1 为正异常, 指示氧化环境; Ce/Ce* < 1 为负异常, 指示还原环境。从大陆来的陆源物质和水不存在明显的轻、重稀土分异, 存在明显的 Ce 正异常。Ni/Co 比值也常用于指示沉积环境, 可以用来反演富氧情况。V/(V+Ni) 比值通常用于判断沉积物沉积时底层水体分层强弱 (Hatch and Leventhal, 1992), 当 V/(V+Ni) > 0.77 时, 指示水体处于极贫氧的还原环境; 当 V/(V+Ni) = 0.6~0.77 时, 代表水体处于次富氧—贫氧的弱氧化—弱还原环境; 当 V/(V+Ni) < 0.6 时则表示水体处于富氧的氧化环境 (Davis et al., 1999)。

塔西南 PBX1 井晚白垩世依格孜牙组沉积期, U/Th 比值中下部表现为平均值 0.60, 最小值 0.16、最大值 2.64 (但都仅为 1 个样本点), 表现为角砾岩异常输入, 但不影响整体数据的分析。上部 U/Th 均值 3.55, 整体上大于 1.25, 表现为缺氧环境。颜佳新等 (1998) 在总结前人研究成果后认为 Ni/Co 比

值小于 5.0 是富氧环境, 在 5.0~7.0 是贫氧环境。PBX1 井 Ni/Co 比值小于 5.0, 整体表现为一种富氧环境。Ce/Ce* 平均值 3.88, 最小值 3.70, 最大值 4.26, 整体 > 1 为正异常, 代表了氧化环境。从大陆来的陆源物质和水不存在明显的轻、重稀土分异, 存在明显的 Ce 正异常。V/(V+Ni) 平均值 0.69, 最小值 0.39, 最大值 0.89, V/(V+Ni) 比值介于 0.6~0.77, 表现为次富氧—贫氧的弱氧化—弱还原环境。

塔西南 PBX1 井早古近纪吐依洛克组沉积期, U/Th > 1.25, 且整体大于白垩纪晚期值域, 表现为缺氧环境。Ni/Co < 5, 整体表现为一种富氧环境。Ce/Ce* 平均值 3.88, 最小值 3.72, 最大值 4.30, 整体 > 1 为正异常, 代表了氧化环境。从大陆来的陆源物质和水不存在明显的轻、重稀土分异, 存在明显的 Ce 正异常。V/(V+Ni) 平均值 0.74, 最小值 0.48, 最大值 0.87, V/(V+Ni) 比值介于 0.6~0.77, 表现为 K/Pg 界线之上由小于 0.6, 逐渐向上演化为介于 0.6~0.77, 直至大于 0.77, 表明经历了 K/Pg 事件后, 水体由处于富氧的氧化环境向次富氧—贫氧的弱氧化—弱还原环境至极贫氧的还原环境转变 (图 9)。

U/Th 与 Ni/Co、Ce/Ce*、V/(V+Ni) 分析的整体相反, 作为特提斯海陆缘, PBX1 井晚白垩世依格孜牙组—早古新世吐依洛克组沉积期为—套原岩主要为碳酸盐岩角砾岩, 角砾岩属于溶塌角砾岩和滑塌角砾岩, 具有原地和近缘再沉积的特征, U/Th 显示的贫氧还原环境与角砾岩的母岩物源的原始环境是贫氧环境有关。因此, 晚白垩世依格孜牙组—早古新世吐依洛克组沉积期, 由晚白垩世次富氧—贫氧的弱氧化—弱还原环境经历 K/Pg 事件之后, 短暂向富氧环境及贫氧的弱氧化—弱还原环境至极贫氧的还原环境转变。

6 结论

晚白垩世赛诺曼期之后特提斯海水由中亚费尔干纳及塔吉克盆地经阿莱依谷地大举侵入塔里木盆地, 形成塔西南晚白垩世依格孜牙组碳酸盐岩为主要类型的边缘沉积。至早古新世, 全球性海退, 致塔西南吐依洛克组—阿尔塔什组除阿克彻依发育滨海相砂砾岩外, 主体为潟湖相沉积。演化特点如下:

(1) 塔西南地区在 K/Pg 界线附近, 古气候变化

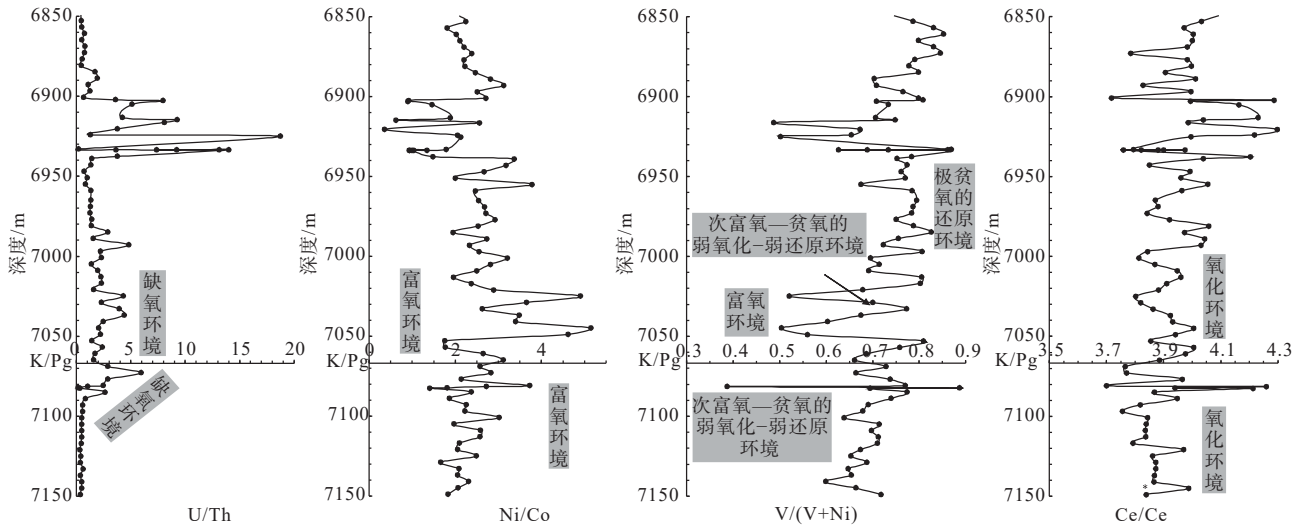


图 9 PBX1 井 K_2y-E_1a 样品 U/Th、Ni/Co、V/(V+Ni)、Ce/Ce* 比值变化图
Fig.9 Ratio variation of U/Th, Ni/Co, V/(V+Ni) and Ce/Ce* from K_2y-E_1a , PBX1 Well

明显。界线之下晚白垩世依格孜牙组沉积期气候属于干热型气候,未导致源区强烈的化学风化作用,但受大海退背景影响,角砾岩岩石成分成熟度稍高,具有一定的搬运距离, SiO_2 的含量较高。K/Pg 界线之上,气候由短暂温湿型并转变为干热气候,源区呈现一定的化学风化,但因气候作用时间较短,未遭受化学风化作用,角砾成分成熟度较低, SiO_2 的含量也较低。

(2)晚白垩世依格孜牙组—早古新世吐依洛克组沉积期海水盐度转换过程中,盐度先增高,再降低。整体由晚白垩世正常海相环境向吐依洛克组半咸水海陆过渡相咸化湖泊转换,K/Pg 界线处,盐度达到最低。

(3)塔西南作为特提斯海延伸最东缘,晚白垩世为次富氧—贫氧的弱氧化—弱还原环境,经历 K/Pg 事件之后,向短暂富氧环境而后贫氧的弱氧化—弱还原环境至极贫氧的还原环境转变。

致谢: 论文撰写中,成都理工大学赵应权副教授、中国地质大学(北京)席党鹏副教授、中国地质调查局成都地质调查中心王正和副研究员、中国地质调查局武汉地质调查中心张国涛副研究员提出了有益建议,审稿人对本文提出了宝贵的建议,一并表示感谢!

注释

① 傅恒. 2016. 塔西南地区白垩系—古近系地层沉积演化研究

[R]. 乌鲁木齐: 中石化西北油田分公司勘探开发研究院.

References

Alvarez L, Alvarez W, Asaro F, Michel H. 1980. Extraterrestrial cause for the Cretaceous Tertiary extinction[J]. *Science*, 206: 1095–1108.

Alvarez W, Alvarez L, Asaro F, Michel H. 1982. Current status of the impact theory for the terminal Cretaceous extinction[J]. *Geological Society of America Special Paper*, 190: 517–528.

Bohor B, Modreski P, Foord E. 1987. Shocked quartz in the Cretaceous–Tertiary boundary clays: Evidence for a global distribution[J]. *Science*, 236(4802): 705–709.

Cao Yangtong, Liu Chenglin, Yan Hui, Jiao Pengcheng, Zhang Hua, Lu Fenglin, Ding Ting. 2016. Research on evaporite deposit and its controlling factors for saline lake chain of Tarim Basin and Central Asia Basin during Mesozoic–Cenozoic period[J]. *Mineral Deposits*, 35(3): 591–604 (in Chinese with English abstract).

Davis C, Pratt L, Sliter W, Mompert L, Murat B. 1999. Factors Influencing Organic Carbon and Trace Metal Accumulation in the Upper Cretaceous La Luna Formation of the Western Maracaibo Basin, Venezuela[M]. Boulder, Colorado: Geological Society of America, 203–230.

Fan Mengmeng, Bu Jun, Zhao Xiaoyan, Kang Bao, Li Wenhui, Zhang Weiguo. 2019. Geochemical characteristics and environmental implications of trace elements of Yanchang Formation in southeastern Ordos Basin[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 49(4): 633–642 (in Chinese with English abstract).

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 them idle part of western Ordos Basin[J]. *Geology in China*, 39(2): 382–389 (in Chinese with English abstract).

- Fastovsky D, Sheehan P. 2005. The extinction of the dinosaurs in Noah America[J]. *GSA Today*, 15(3): 4–10.
- Gannapathy R. 1980. A major meteorite impact on the Earth 65 million years ago: Evidence from the Cretaceous–Tertiary boundary clay[J]. *Science*, 209: 921–923.
- Guo Qunying, Li Yue, Zhang Liang, Zeng Changmin, Guo Feng, Wang Feng. 2014. Sedimentary facies characteristics of the Cretaceous in southwestern Tarim Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 16(2): 169–177 (in Chinese with English abstract).
- Guo Xianpu. 1990. Study on marine Cretaceous–Tertiary boundary in the western train basin[J]. *Earth Science*, 15(3): 325–335 (in Chinese with English abstract).
- Guo Xianpu, Hao Yichun, Ye Liusheng, Yao Peiyi, Fu Derong, Li Minhan, Ruan Peihua. 2000. Abnormal geochemical characteristics of the boundary between the marine Cretaceous–Tertiary in the southwestern Tarim Basin[J]. *Geoscience*, 14(3): 348–353 (in Chinese with English abstract).
- Guo Xianpu, Ding Xiaozhong, Zhao Ziran, Li Jianfeng. 2018. The north–south differentiation on the marine feature in the southwest Tarim Basin during Middle–Late of the Late Cretaceous[J]. *Geological Review*, 64(5): 1078–1086 (in Chinese with English abstract).
- Hao Yichun, Guo Xianpu, Ye Liushen. 2001. Marine Cretaceous–Tertiary Boundary Line in Southwestern Tarim Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Hatch J, Leventhal J. 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 Country, Kansas, U. S. A[J]. *Chemical Geology*, 99(1/3): 65–82.
- Hou Ping, Tian Zuoji, Zheng Junzhang, Wang Zhaoming, Wu Yiping. 2014. Evaluation of conventional hydrocarbon resources in sedimentary basins of central Asia region[J]. *Earth Science Frontiers*, 21(3): 56–62 (in Chinese with English abstract).
- Hunter J, Archibald J, Hartman J, Johnson K. 2002. Mammals from the end of the age of dinosaurs in north Dakota and southeastern Montana, with an appraisal of geographic differentiation among Lancian mammals[J]. *Geological Society of America Special Paper*, 361: 191–261.
- Kauffman E. 1986. High–Resolution Event Stratigraphy, Regional and Global Cretaceous Bio–Events[M]. Berlin: Springer–Verlag, 279–335.
- Keller G, Stinnesbeck W, Adatte T, Holland B, Stueben D, Harting M, de–Leon C, de la Cruz J. 2003. Spherule deposits in Cretaceous–Tertiary boundary sediments in Belize and Guatemala[J]. *Journal of the Geological Society of America*, 160: 783–795.
- Li Jianghai, Cheng Yalin, Li Weibo, Mao Xiang. 2013. A discussion on architecture and tectonic evolution of basins in China and its adjacent areas: Evidence from new progress of the long profile[J]. *Geology in China*, 40(1): 74–82 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianjiao, Li Huili, Guo Xianpu, Qiao Guilin. 2019. A discussion on geologic time of metamorphosed strata of breccia section of Well PBX1 in Tarim Basin, China[J]. *Advances in Geosciences*, 9(12): 1310–1318 (in Chinese with English abstract).
- Liu Gang, Zhou Dongsheng. 2007. Application of microelements analysis in identifying sedimentary environment: Taking Qianjiang Formation in the Jiangnan basin as an example[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 29(3): 307–310 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ping, Zhang Ping, Xing Qiang, Song Chunhui, Tang Yuhu, Zhang Jun, Kuang Yongsheng, Xia Weiming, Pan Meihui, Lu Xinchuan. 2007. Geochemistry of Neogene sedimentary rocks in Tianshui Basin and tectonic–weathering process of its source[J]. *Earth and Environment*, 35(3): 239–246 (in Chinese with English abstract).
- Luo Shaohui, Li Jiumei, Wang Hui. 2018. Age determination of dolomite breccia in well PSBX1 of Markit slope in Tarim Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 48(5): 1405–1415 (in Chinese with English abstract).
- Nesbitt H, Young G. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299(5885): 715–717.
- Raup D, Sepkoski J. 1986. Periodic extinction of families and genera[J]. *Science*, 241: 94–96.
- Ren Hongyu, Fu Heng, Ji Jia, Guan Yueshan, Zhu Da. 2017. Correlation of Cretaceous–Palaeogene sedimentary evolution in southwestern Tarim Basin and adjacent central Asian Basins[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 37(3): 103–112 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yong, Fu Derong. 1996. The sedimentary–tectonic evolution of the southwest Tarim Basin from Cretaceous to Paleogene[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 17(1): 32–40 (in Chinese with English abstract).
- Xi Dangpeng, Wan Xiaoqiao, Li Guobiao, Li Gang. 2019. Cretaceous integrative stratigraphy and timescale of China[J]. *Science China Earth Sciences*, 62: 256–286.
- Xue Lianhua, Chen Guojun, Wang Qi, Shi Jian, Xiao Lixin, Yang Jun, Zhao Kebin. 1998. Cyclic sequences and depositional systems in the Upper Cretaceous–Eocene of Southwest Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 16(3): 66–71 (in Chinese with English abstract).
- Yan Jiabin, Xu Siping, Li Fanglin. 1998. Geochemistry of the dysaerobic sedimentary environments of the Qixia Formation in Badong, Hubei[J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 18(6): 27–32 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xugang, Hu Baoqun, Gao Haidong, Xu Deru, Li Mangen, Guo Tao. 2013. Geochemical characteristics of Beiyi and Nanliu ore bodies in the Shilu iron deposit in Hainan province[J]. *Journal of Geomechanics*, 19(4): 403–412 (in Chinese with English abstract).
- Ye Dequan, Tang Wensong, Wei Jingming, Mao Xueying. 1992. Geochemical markers of the Cretaceous–Tertiary boundary event in the Altai section, Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 13(2): 202–208 (in Chinese with English abstract).
- Yue Yong, Xu Qinqi, Fu Heng, Xi Dangpeng. 2017. Reservoir–cap rock assemblage and sedimentary characteristics of Cretaceous–Palaeogene in southwestern Tarim Basin[J]. *Petroleum*

- Geology and Experiment, 39(3): 318–326 (in Chinese with English abstract).
- Yue Yong, Tian Jingchun, Zhao Yingquan. 2019. Stratigraphy, origin and significance of oil and gas exploration of Cretaceous breccia in Well PBX1, southwestern Tarim Basin[J]. Earth Science, 44(11): 3894–3909 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dajing, Hu Jianmin, Meng Yifeng, Zheng Menglin, Fu Maolan. 2007. Characteristics of Qimugen thrust nappe structure in the southwestern Tarim basin, Xinjiang, China, and its relationship with hydrocarbon[J]. Geological Bulletin of China, 26(3): 266–274(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hua, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Cao Yangtong, Han Erbin. 2015. Sedimentary condition and genetic mode of Paleocene evaporites in the southwestern depression of the Tarim Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 89(11): 2028–2035 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ni, Lin Chunming, Zhou Jian, Chen Shunyong, Zhang Meng, Liu Yurui, Dong Guiyu. 2012. Geochemical characteristics of the 1st member of Paleogene Dainan Formation in Gaoyou Depression of the North Jiangsu Basin, and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 86(2): 269–279 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Tianfu, Sun Lixin, Zhangyun, Cheng Yinhang, Li Yanfeng. 2016. Geochemical characteristics of the Jurassic Yanan and Zhiluo Formations in the northern margin of Ordos Basin and their Paleoenvironmental implications[J]. Acta Geologica Sinica, 90(12): 3454–3472 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Kebin, Sun Changqing. 2004. Application of hydrocarbon geochemical exploration technique in natural gas exploration[J]. Petroleum Geology and Experiment, 26(6): 574–579 (in Chinese with English abstract).
- 郝谄纯, 郭宪璞, 叶留生. 2001. 塔里木盆地西南地区海相白垩系—第三系界线[M]. 北京: 地质出版社.
- 侯平, 田作基, 郑俊章, 王兆明, 吴义平. 2014. 中亚沉积盆地常规油气资源评价[J]. 地学前缘, 21(3): 56–62.
- 李江海, 程雅琳, 李微波, 毛翔. 2013. 中国及邻区沉积盆地群结构与构造演化探讨——来自长剖面的研究对比[J]. 中国地质, 40(1): 74–82.
- 李建文, 李慧莉, 郭宪璞, 乔桂林. 2019. 塔里木盆地皮山北新 1 井角砾岩段地层时代归属讨论[J]. 地球科学前沿, 9(12): 1310–1318.
- 刘刚, 周东升. 2007. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用——以江汉盆地潜江组为例[J]. 石油实验地质, 29(3): 307–310.
- 刘平, 张平, 刑强, 宋春晖, 唐玉虎, 张军, 匡永生, 夏维民, 潘美慧, 鲁新川. 2007. 天水地区新近纪沉积物地球化学特征及其意义[J]. 地球与环境, 35(3): 239–246.
- 罗少辉, 李九梅, 王辉. 2018. 塔里木盆地麦盖提斜坡皮山北新 1 井白云质角砾岩地层时代厘定[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 48(5): 1405–1415.
- 任泓宇, 傅恒, 纪佳, 关月珊, 朱达. 2017. 塔里木盆地西南地区与相邻中亚盆地白垩系—古近系沉积演化对比[J]. 沉积与特提斯地质, 37(3): 103–112.
- 王永, 傅德荣. 1996. 塔里木盆地西南部白垩系—早第三纪沉积构造演化[J]. 地球学报, 17(1): 32–40.
- 席党鹏, 万晓樵, 李国彪, 李罡. 2019. 中国白垩纪综合地层和时间框架[J]. 中国科学:地球科学, 49(1): 257–288.
- 薛莲花, 陈国俊, 王琪, 史基安, 肖立新, 杨军, 赵克斌. 1998. 塔里木盆地 K₂—E 旋回层序与海平面变化[J]. 沉积学报, 16(3): 66–71.
- 颜佳新, 徐四平, 李方林. 1998. 湖北巴东栖霞组缺氧沉积环境的地球化学特征[J]. 岩相古地理, 18(6): 27–32.
- 杨旭星, 胡宝群, 高海东, 许德如, 李满根, 郭涛. 2013. 海南石碌铁矿北—南六矿体地球化学特征[J]. 地质力学学报, 19(4): 403–412.
- 叶得泉, 唐文松, 魏景明, 魏景明, 毛学瑛. 1992. 塔里木盆地阿尔塔什剖面白至—第三系界线事件的地球化学标志[J]. 石油学报, 13(2): 202–208.
- 岳勇, 徐勤琪, 傅恒, 席党鹏. 2017. 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, 39(3): 318–326.
- 岳勇, 田景春, 赵应权. 2019. 塔里木盆地西南部皮山北新 1 井角砾岩的地层归属、成因及油气勘探意义[J]. 地球科学, 44(11): 3894–3909.
- 张达景, 胡健民, 蒙义峰, 郑孟林, 付茂兰. 2007. 塔里木盆地西南部齐姆根逆冲推覆构造的特征及其与油气的关系[J]. 地质通报, 26(3): 265–274.
- 张华, 刘成林, 焦鹏程, 曹养同, 韩二斌. 2015. 塔西南坳陷古新统蒸发岩沉积条件及成因模式初探[J]. 地质学报, 89(11): 2028–2035.
- 张妮, 林春明, 周健, 陈顺勇, 张猛, 刘玉瑞, 董桂玉. 2012. 苏北盆地高邮凹陷古近系戴南组一段元素地球化学特征及其地质意义[J]. 地质学报, 86(2): 269–279.
- 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[J]. 地质学报, 90(12): 3454–3472.
- 赵克斌, 孙长青. 2004. 油气化探在天然气勘探中的应用[J]. 石油实验地质, 26(6): 574–579.

附中文参考文献

- 曹养同, 刘成林, 颜辉, 焦鹏程, 张华, 吕凤琳, 丁婷. 2016. 中—新生代塔里木与中亚盐湖蒸发岩沉积及其控制因素初探[J]. 矿床地质, 35(3): 591–604.
- 范萌萌, 卜军, 赵筱艳, 康博, 李文厚, 张卫国. 2019. 鄂尔多斯盆地东南部延长组微量元素地球化学特征及环境指示意义[J]. 西北大学学报(自然科学版), 49(4): 633–642.
- 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[J]. 中国地质, 39(2): 382–389.
- 郭群英, 李越, 张亮, 曾昌民, 郭峰, 王峰. 2014. 塔里木盆地西南地区白垩系沉积相特征[J]. 古地理学报, 16(2): 169–177.
- 郭宪璞. 1990. 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, 15(3): 325–335.
- 郭宪璞, 郝谄纯, 叶留生, 姚培毅, 付德荣, 李汉敏, 阮培华. 2000. 新疆塔西南区海相白垩系—第三系界线的地球化学异常[J]. 现代地质, 14(3): 348–353.
- 郭宪璞, 丁孝忠, 赵子然, 李建锋. 2018. 塔里木盆地西南地区晚白垩世中晚期海相性南北分异研究[J]. 地质论评, 64(5): 1078–1086.