

YANRONG FENGONGXING CHUJITI DIZHEN YUCE YU MUBIAO PINGJIA

岩溶缝洞型储集体 地震预测与目标评价

——以塔河油田为例



漆立新 李宗杰◎著

石油工业出版社

岩溶缝洞型储集体 地震预测与目标评价

——以塔河油田为例

漆立新 李宗杰 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统描述和总结了塔河油田碳酸盐岩缝洞型储集体地震预测与目标评价新方法、新技术,重点阐述了面向缝洞型储集体成像的高精度三维地震资料采集和处理关键技术,基于多尺度随机介质建模及正演模拟技术论述了复杂缝洞储层模型的地震响应特征,并列举了缝洞型圈闭描述技术及其应用的成功实例。

本书可供从事石油物探研究工作的科研生产技术人员和油气勘探专业研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

岩溶缝洞型储集体地震预测与目标评价——以塔河油田为例/漆立新,李宗杰著. —北京:石油工业出版社,2018.4

ISBN 978-7-5183-2483-5

I. ①岩… II. ①漆… ②李… III. ①塔里木盆地-碳酸盐岩油气藏-油气勘探-地震勘探-研究 IV. ①P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 045951 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址:www. petropub. com

编辑部:(010)64523543 图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2018 年 4 月第 1 版 2018 年 4 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:15

字数:375 千字

定价:130.00 元

(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

序 一

油气勘探工作是讲究科学的哲学思路的。

翻阅立新同志编著的这本《岩溶缝洞型储集体地震预测与目标评价——以塔河油田为例》，我看到了塔里木盆地海相碳酸盐岩油气勘探事业中的哲学精神。这些认知，是对客观世界认识以后的再实践，同时，这本专著是中国海相油气田勘探理论在塔河油田的技术实践，也是对焦方正同志十年前所著《海相碳酸盐岩非常规大油气田——塔河油田勘探研究与实践》在物探方法技术与岩溶地质理论相结合上的再认识，值得做进一步的研究与探讨。

塔里木盆地北部的缝洞型油藏，尤其是塔河油田，其地质条件的特殊性，在国内外油气勘探开发历史上可以说是极端典型甚至是绝无仅有。古隆起造就的鼻状构造和碳酸盐岩岩溶缝洞型储层在空间与时间上的叠置，岩溶历史、断裂体系、圈闭形成与油气运移关系错综复杂，这些都需要地质工作者选择合理的认知手段去分析、解剖、认知。本书所采取的现代岩溶地质（地貌）学和地球物理模型正演相结合不失为一个好的手段，前者提供了储层发育概率分布的理论基础，后者演绎了不同地质体在地球物理角度的识别可能。

在这本著作里，作者研究了塔河岩溶缝洞型油藏的特点，分析了地球物理勘探难点，提出了解决问题的思路与方法，针对地震资料采集、处理、解释这一基本程序，对岩溶缝洞型储层的勘探工作进行了深入而切合实际的分析，并开展了油气勘探工作的实践，取得了巨大的成功。及时总结这些理论、技术、方法和手段对于油气勘探工作者是非常有必要的。

都说地球物理资料是勘探家的眼睛，我们不仅要用好这双“千里眼”，还要将它发展成我们认识油藏、展现油藏的重要方法手段。面对信息化的未来，地球物理勘探作为最重要的勘探方法，与地质学的结合越发深入，我们仍然需要在学科融合上做深入的探索。

“上穷碧落下黄泉、两处茫茫皆不见”，已故著名地球物理学家赵九章先生这么形容地球物理学，就让我们用这句话来勉励在地球物理勘探上不懈努力、永不言弃的科研工作者。

中国工程院院士


2017.4.26.

序 二

塔里木盆地的油气勘探史是一部创业史,浓缩了40年来我们国家上下求索油气勘探的艰辛,是地质勘查工作者“三光荣”精神的升华,也是石油工作者“三老四严”精神的体现;塔里木盆地的油气勘探史也是一部物探技术进步史,既生动展现了我们物探工作者“卷席筒”的艰苦创业精神,也展现了物探技术人员不懈追求科技进步的每一个脚印。我们欣慰地看到,近年来物探技术的整体推进,在山前带地震勘探、沙漠区地震采集与处理解释等都取得了突破性的进展,这也使国内油气勘探工作者在推进缝洞型油藏勘探这一全新领域的占领认知高点具备了条件。从这个意义上说,我们取得的是“两论”在油气勘探事业具体运用的又一次胜利。

特殊条件下形成的岩溶缝洞,其复杂的空间结构已经远超我们想象,无论是广西桂林的冠岩还是贵州绥阳的双河溶洞,以及暴露在这些景观周围广阔的碳酸盐岩地层,目光所及,都会无比的震撼,感叹大自然的鬼斧神工。但是当这些景观、地层被破坏、被压实、被再次改造,然后沉寂于地下5000余米,充注着原油、天然气和水,形成当今的油藏,又该如何认识它?《岩溶缝洞型储集体地震预测与目标评价——以塔河油田为例》的著者用20年时间潜心研究与积极实践,从地震勘探角度向我们展现了塔里木盆地北部塔河油田岩溶缝洞型油藏的面貌。通过这本著作可以看到,对于这一特殊地质现象的认识,从表观构造到深入细致空间描述,对于问题的提出、分析、对策、化解、实践、再认识的全过程。尤为难得的是,从这本著作也能够了解到从地震勘探角度为了解目标所应当分步骤考虑的地震资料采集、处理、解释,以及应当系统构建的科学构架。

这本著作的更大亮点在于,为勘探工作者提供了充分利用地球物理资料、系统解决问题的思路,它已不是单纯的地球物理技术参考书,而是面向复杂地质条件下勘探工作者应当如何思考问题,制订全面攻关计划的范例。这是深入的“矛盾论”“实践论”在科研工作中的具体体现,也是每一个科技工作者所应遵循的系统论的工作方法。

塔里木盆地的油气勘探开发关系到国家石油工业的未来与国家能源安全,我衷心地希望本书的著者,能够继续为塔里木油气勘探开发事业实现新的跨越做出更大贡献,也希望本书的读者,能够汲取有益的思路与方法,运用于更广阔的科学技术领域中去。

中国工程院院士



2017.5.16

前 言

塔里木盆地塔河油田奥陶系碳酸盐岩特大型油气藏是埋藏深度大于 5300m 的超深层、碳酸盐岩缝洞型储层大面积连片不均匀含油、不具有统一油水界面的复杂油气藏。碳酸盐岩储层发育带的成功预测是勘探评价乃至开发动用的技术关键。奥陶系碳酸盐岩储层类型以缝洞型为主,发育极不规则,纵横向非均质性强,储层预测难度大,属于世界级难题。经过多年的攻关研究和勘探评价与开发实践,储层预测技术取得了重要进展,形成了针对碳酸盐岩缝洞型储集体的高精度三维地震资料采集、处理和解释一体化技术,应用该技术提高了断裂体系特征描述及古岩溶地貌刻画精度,细分了断裂的期次、级别,精细雕刻了岩溶残丘、古地表水系及地下暗河系统。在此基础上建立了塔河油田古岩溶发育模式及“串珠状”地震反射为主的缝洞体识别模式,明确了岩溶发育特征及纵横向展布规律。高精度三维地震技术应用进一步提高了缝洞型储集体三维空间识别与量化精度,建立了碳酸盐岩缝洞型圈闭评价与目标优选技术,提高了钻井命中率,为塔河奥陶系碳酸盐岩特大型油气田的勘探开发提供了技术支撑。

本书是多年来对塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型油气藏三维地震技术攻关研究及应用成果的系统总结,是针对奥陶系碳酸盐岩缝洞型储集体这一特殊地质对象的地震资料采集、处理和解释一体化与地质的有机结合,形成了塔河油田奥陶系碳酸盐岩储层地震预测的方法技术系列,实现了针对碳酸盐岩缝洞体的目标评价,是全体奋斗在塔河油田技术人员智慧的结晶。本书共分五章,第一章介绍了塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型储层预测技术发展历程;第二章重点阐述了塔河油田奥陶系碳酸盐岩缝洞型储集体成像的高精度三维地震资料采集、处理关键技术;第三章论证了如何基于缝洞型储层岩石物理特征分析、多尺度随机地震地质模型的建立及其正演模拟技术,建立缝洞型储层地震识别模式;第四章系统总结了缝洞型储层预测关键技术,形成包括缝洞型储层的识别模式和缝洞型储层预测关键技术系列;第五章列举了碳酸盐岩缝洞型圈闭描述技术及其应用的成功实例。本书主要由漆立新、李宗杰编写,刘群、顾汉明、马学军、禹金营、邓光校、王震、马灵伟等参与部分内容编写。

由于碳酸盐岩缝洞型油气藏储集体预测、描述与评价难度大,本书有些观点和认识可能存在不妥之处,敬请广大读者批评指正!

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 岩溶缝洞型储集体基本地质特征	(1)
第二节 地震预测与目标评价难点	(24)
第三节 地震预测与目标评价关键技术	(25)
第二章 高精度三维地震采集处理关键技术	(29)
第一节 高精度三维地震采集关键技术	(30)
第二节 高精度三维地震处理关键技术	(57)
第三节 高精度三维地震采集处理应用效果	(75)
第三章 缝洞型储集体正演模拟技术	(78)
第一节 塔河油田缝洞型储集体岩石物理特征	(78)
第二节 缝洞型储集体多尺度随机建模技术	(85)
第三节 非均质地震正演模拟方法	(93)
第四节 影响缝洞型储集体地震波场特征因素	(97)
第五节 复杂缝洞型储集体地震地质模型的地震响应特征	(124)
第四章 缝洞型储层预测关键技术	(136)
第一节 缝洞型储集体地球物理识别模式	(136)
第二节 隐蔽断裂精细刻画技术	(141)
第三节 古喀斯特岩溶雕刻技术	(146)
第四节 裂缝型储层叠前地震预测技术	(163)
第五节 缝洞型储集体量化预测技术	(167)
第六节 缝洞型储集体流体检测技术	(187)
第五章 目标评价与应用实例分析	(197)
第一节 缝洞型圈闭描述技术	(197)
第二节 缝洞型圈闭评价技术	(206)
第三节 目标优选及效果分析	(227)
展望	(230)
参考文献	(231)

第一章 概 述

第一节 岩溶缝洞型储集体基本地质特征

塔河油田位于新疆轮台县、库车县境内,构造上处于塔里木盆地沙雅隆起轮台断裂带南部(奥陶系碳酸盐岩分布区)。涉及沙雅隆起次级构造单元如阿克库勒凸起、哈拉哈塘凹陷、草湖凹陷及顺托果勒低隆起和满加尔坳陷的北部(图 1-1)。塔河油田奥陶系碳酸盐岩油气藏主要油气产层为奥陶系鹰山组及一间房组。

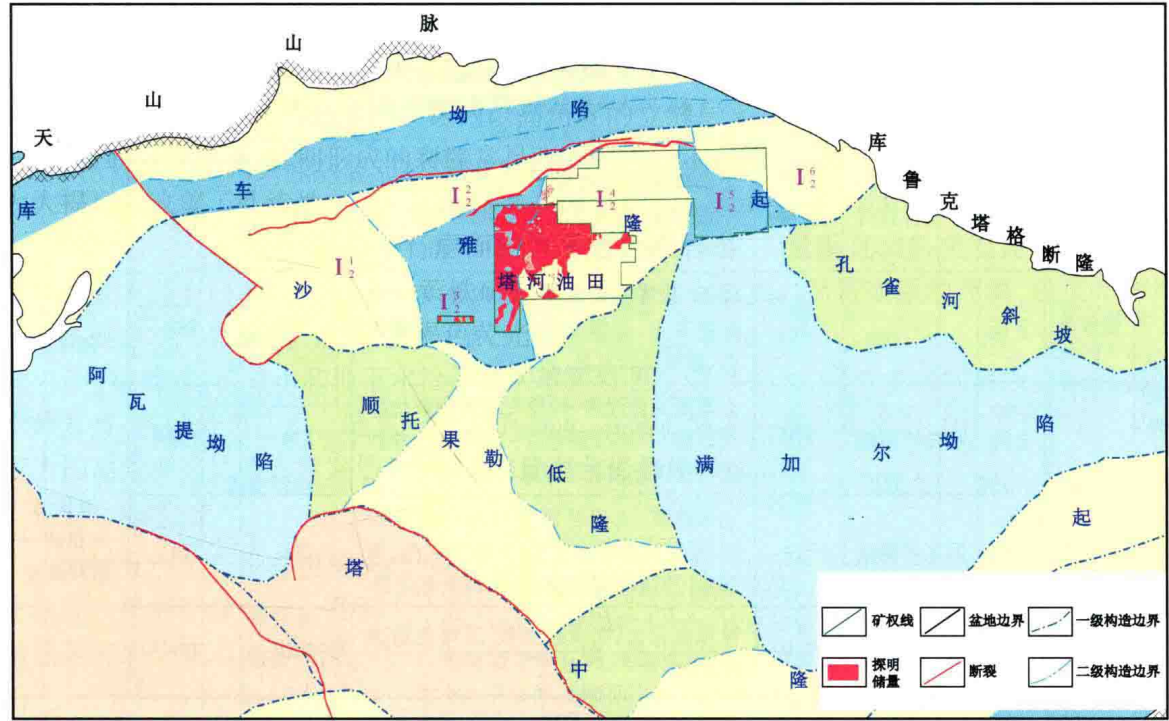


图 1-1 塔河油田区域构造轮廓与构造位置图

沙雅隆起(塔北隆起)的次级构造单元: I_2^1 —沙西凸起; I_2^2 —雅克拉断凸; I_2^3 —哈拉哈塘凹陷; I_2^4 —阿克库勒凸起;
 I_2^5 —草湖凹陷; I_2^6 —库尔勒鼻凸

一、钻遇地层特征

塔河油田钻井揭示的地层有:寒武系、奥陶系、下志留统、上泥盆统、下石炭统、下二叠统(火山岩)、三叠系、下侏罗统、白垩系、古近系、新近系和第四系(表 1-1)。钻井揭示最老地层为上寒武统下丘里塔格群,钻达深度 8408m(塔深 1 井)。由于多期构造运动对沙雅隆起区的剥蚀与沉积作用的控制,表现出各构造单元在不同的构造活动期地层剥蚀与残存状态迥异。尤其是海西运动早期,造成了沙雅隆起主体部位志留系—中泥盆统剥蚀殆尽,甚至奥陶系也遭受不同程度的剥蚀。

表 1-1 阿克库勒凸起钻井揭示地层简表

地层				地层 代号	岩性特征	厚度 (m)	代表井	沉积相
界	系	统	组(群)					
新生界	第四系			Q	灰白色砂层及黄灰色黏土层	63	TS1	
	新近系	上统	库车组	N ₂ k	浅灰、灰白色粉砂岩、细砂岩与黄灰色泥岩、粉砂质泥岩略等厚互层	2009	TS1	三角洲— 河流— 湖泊— 洪积相
		下统	康村组	N ₁₋₂ k	浅灰、灰白色粉砂岩、细砂岩与黄灰、棕褐色泥岩、粉砂质泥岩等厚互层,泥岩中常含分散状石膏	1052	TS1	
			吉迪克组	N _{1j}	上部灰黄、棕褐色泥岩段;中部为蓝灰色泥岩段;下部为棕褐色泥岩段,夹粉细砂岩	694	TS1	
			苏维依组	N _{1s}	灰白、黄褐、棕红色细砂层、粉砂岩为主,夹棕褐色泥岩、灰白色含砾中—细砂岩	306	TS1	
	古近系							
中生界	白垩系	上统	库木格列姆群	K ₂ -E	上部灰白、黄褐色中—细砂岩、粉砂岩为主夹泥岩;下部灰白、黄褐色细砂岩、粉砂岩略等厚互层夹泥岩	745	TS1	三角洲平原
		下统	卡普沙良群	K ₁ kp	上部棕红色泥岩为主,夹粉—细砂岩;中部棕褐、绿灰色粉砂质泥岩为主,夹粉砂岩、泥页岩;底部含砾中—粗砂岩	436	TS1	辫状河 三角洲
	侏罗系	下统		J ₁	浅灰、灰黄色含砾中—粗砂岩、细—中砂岩为主,与绿灰色粉砂质泥岩及泥岩、碳质页岩互层,夹煤线	76	TS1	河流— 沼泽相
	三叠系	上统	哈拉哈塘组	T ₃ h	上部深灰色泥岩、砂质泥岩夹浅灰色粉细砂岩,下部浅灰色中—细砂岩、粉砂岩与深灰色泥岩不等厚互层	174	TS1	辫状河 三角洲— 滨浅湖相
		中统	阿克库勒组	T ₂ a	上部深灰、灰黑色泥岩与灰白色细砂岩、粉砂岩略等厚互层;下部为灰色、灰白色巨厚砂岩段夹灰绿色、深灰色泥岩	298	TS1	
		下统	柯吐尔组	T ₁ k	深灰色泥岩、泥页岩夹灰、灰绿色粉砂岩、细砂岩	120	TS1	
	二叠系	下统		P	安山岩、英安岩、玄武岩、凝灰岩及火山碎屑岩	163	HT1	扇三角洲相, 潮坪相
	石炭系	下统	卡拉沙依组	C ₁ kl	上部棕褐、褐灰色泥岩、粉砂质泥岩与灰色粉细砂岩不等厚互层;下部深灰、棕褐色泥岩、粉砂质泥岩	537	TS1	
		巴楚组	C ₁ b	顶部深灰色灰岩夹深灰色含膏泥岩,中上部为深灰色泥岩,下部以砂砾岩为主	235	TS1		
古生界	泥盆系	上统	东河组	D ₃ d	以砂砾岩为主,由褐灰、灰色砂砾岩、石英砂岩、浅灰色粉砂岩组成几个反韵律组合	80	AD1	滨海海 岸沙坝
	志留系	下统	塔塔埃尔特格组	S ₁ t	上段灰白色粉砂岩与灰绿色、紫红色泥岩夹砂岩,下段黄灰色、褐灰色砂岩夹褐红色、灰绿色泥岩,砂岩中含沥青	480	TP39	潮坪相

续表

地层				地层 代号	岩性特征	厚度 (m)	代表井	沉积相
界	系	统	组(群)					
古 生 界	志留系	下统	柯坪塔格组	S ₁ k	灰绿色泥岩、灰、棕褐色灰质泥岩与浅灰色细粒岩屑石英砂岩、细粒含沥青质岩屑石英砂岩等厚—略等厚互层。	225	TP39	潮坪相
	奥陶系	上统	桑塔木组	O ₃ s	绿灰、灰绿色泥质、灰质粉砂岩,粉砂质泥岩夹泥岩;中段灰、浅褐灰色泥—粉晶灰岩、粉晶生屑灰岩及角砾状灰岩与粉砂质泥岩、泥灰质粉砂岩、泥岩不等厚互层	600	TP39	混积陆棚相
			良里塔格组	O ₃ l	褐灰色泥微晶灰岩、粉—细晶灰岩、角砾状生屑灰岩	120	S101	
			恰尔巴克组	O ₃ q	上段紫红色泥质灰岩及瘤状泥灰岩夹暗棕色灰质泥岩;下段灰色、棕红色泥微晶灰岩夹绿灰色泥质条带	25	S101	广海陆棚相
		中统	一间房组	O ₂ yj	灰白、灰色含生物屑、亮晶砂屑灰岩、泥微晶灰岩及细—粉晶灰岩,夹层孔虫—海绵礁灰岩、藻粘结灰岩	120	S101	局限台地— 开阔台地— 台地浅滩相
			鹰山组	O ₁₋₂ y	黄灰、浅褐灰色泥微晶灰岩、细—粉晶灰岩、亮晶砂屑灰岩,局部夹浅灰色白云质灰岩、灰质白云岩	900	TS1	
		下统	蓬莱坝组	O ₁ p	上部为灰白色白云质灰岩、灰质白云岩、泥微晶藻白云岩、砂砾屑白云岩;下部为细晶白云岩、中晶白云岩夹粉晶白云岩、深灰色硅化白云岩	400	TS1	
	寒武系	上统	下丘里塔格群	Є ₃ ql	灰色、浅灰及深灰色泥晶粉晶白云岩、细晶白云岩、中晶白云岩、粗晶白云岩等呈略等厚互层,夹灰色、浅灰色碎裂化中—细晶白云岩	800	TS1	局限台地— 开阔台地相
		中统	阿瓦塔格组	Є ₂ a	台地区以白云岩为主,夹泥质白云岩、含膏泥岩;台缘区岩性主要为深灰、浅灰色粉晶白云岩、细晶白云岩以及鲕粒云岩、亮晶砂屑云岩、藻粘结白云岩及碎裂化白云岩等	1000	S7	局限台地
			沙依里克组	Є ₂ s	灰、深灰、灰褐色粉晶白云岩	100	YH5	潮坪
		下统	吾松格尔组	Є ₁ w	深灰、灰色、灰黑色泥质白云岩、云质泥岩和白云岩不等厚互层	250	YH10	潮坪
			肖尔布拉克组	Є ₁ x	灰色、深灰色粉晶云岩、灰质云岩和硅质云岩	400	XH1	缓坡台地
			玉尔吐斯组	Є ₁ y	黑灰色碳质页岩、浅灰色硅质岩	50	XH1	斜坡—盆地

续表

地层				地层 代号	岩性特征	厚度 (m)	代表井	沉积相
界	系	统	组(群)					
新元古界	震旦系	上统	奇格布拉克组	Z ₂ q	上部为深灰、灰色泥晶白云岩、灰色砂屑泥晶白云岩、角砾状泥晶白云岩、浅灰色灰质泥晶白云岩,局部夹深灰色藻屑泥晶白云岩;中部灰、浅灰色泥晶白云岩、粉晶白云岩、灰黑、深灰色泥质泥晶白云岩,局部夹灰黑、深灰色泥岩、白云质泥岩;下部为浅灰色白云质泥晶灰岩、深灰色含白云质泥晶灰岩、浅灰色泥质泥晶灰岩、浅灰、浅棕色粉晶灰岩,局部夹灰色泥质泥晶白云岩、泥晶白云岩,底部为浅棕色泥质泥晶灰岩	240	XH1	台内藻礁
		下统	苏盖特布拉克组	Z ₁ s	褐色泥岩	40	XH1	台地—台缘

二、寒武—奥陶系沉积特征

(一) 寒武系

据沙雅隆起西部星火1井钻遇34m下寒武统玉尔吐斯组黑色泥页岩及震旦系与寒武系间的地震反射结构特征,推测寒武纪早期沙雅隆起上广泛沉积陆棚—斜坡相泥页岩,构成了震旦系白云岩与寒武系黑色泥页岩的储盖组合。更为重要的是这套陆棚—斜坡相泥页岩广泛分布于吐木休克—塔中I号断裂以北,包括现今的阿瓦提坳陷、顺托果勒低隆起和沙雅隆起,现今深埋于海拔9000m以下,是塔里木盆地最重要的烃源岩系(漆立新等,2015)。

在全球海平面上升及持续拉张的地质背景下,形成塔里木规模宏大的碳酸盐岩台地(傅恒,2011),露头及地震资料显示沙雅隆起、阿瓦提坳陷、顺托果勒低隆起稳定分布下寒武统肖尔布拉克组—中寒武统阿瓦塔格组厚达1000余米白云岩夹石灰岩、含膏云岩沉积,但膏云岩发育规模较小,不足以形成区域分布的潟湖相沉积。

塔河油田仅有塔深1井钻遇上寒武统下丘里塔格群,未穿,钻遇厚度1524m。主要为台地相灰色、浅灰及深灰色泥晶粉晶白云岩、细晶白云岩、中晶白云岩、粗晶白云岩等呈略等厚互层,夹灰色、浅灰色中—细晶白云岩。局部发育台地边缘“建隆”,岩性主要为亮晶砂屑云岩、亮晶鲕粒云岩、泥晶鲕粒云岩、薄层藻粘结云岩等生物屑云岩(云露,2008)。

(二) 中—下奥陶统

塔河油田中—下奥陶统受海西早期构造运动剥蚀,总体上呈南厚北薄,地层厚度为1100~1700m。靠近轮台断裂,中奥陶统一间房组和下奥陶统鹰山组上部受到不同程度的构造剥蚀。通过岩相古地理与构造剥蚀恢复,原始地层厚度在1700m左右。主要为一套海相台地相(局部发育小面积的点滩)碳酸盐岩沉积。

依据岩性及测井曲线特征,中—下奥陶统自下而上可划分为:蓬莱坝组、鹰山组、一间房组。下奥陶统蓬莱坝岩性上部为灰白色白云质灰岩、灰质白云岩、泥微晶藻白云岩、砂砾屑白云岩;下部为细晶白云岩、中晶白云岩夹粉晶白云岩、深灰色硅化白云岩;厚度599m(于奇6

井)。塔河油田区早奥陶世蓬莱坝组沉积时期,延续了寒武纪沉积格局,为开阔台地碳酸盐岩沉积,向东逐渐过渡为台地边缘、斜坡及盆地相。

中一下奥陶统鹰山组岩性主要为浅褐灰色泥微晶灰岩、细—粉晶灰岩、亮晶砂屑灰岩,局部夹浅灰色白云质灰岩、灰质白云岩,厚度约 1050m。早奥陶世—中奥陶世早期鹰山组沉积时期继承了蓬莱坝组沉积时期的沉积特点,塔河油田区为开阔台地相并向东逐渐过渡为台地边缘、斜坡及盆地相。

中奥陶统一间房组岩性主要为黄灰、灰、褐灰色砂屑灰岩、含生物屑或鲕粒灰岩、亮晶砂屑灰岩、泥微晶灰岩及细—粉晶灰岩,夹暗色燧石团块、层孔虫—海绵礁灰岩、藻粘结灰岩,厚度 140m。塔河油田区中奥陶世一间房组沉积时期在鹰山组沉积时期开阔台地相的基础上进一步扩大乃至鼎盛,水体变浅,生物繁盛,在广大的开阔台地的东部发育小规模台地边缘礁体,向东逐渐过渡为斜坡、盆地相。

(三) 上奥陶统

上奥陶统仅残留分布在轮台断裂带以南,塔河油田主体的阿克库勒凸起高部位被海西早期构造剥蚀。钻井揭示自下而上可划分为:恰尔巴克组、良里塔格组、桑塔木组。

发生在中奥陶世末的加里东中期 I 幕运动在塔河油田区表现较弱,仅剥蚀了一间房组顶部,造成了一间房组与上奥陶统恰尔巴克组平行不整合关系。晚奥陶世,塔里木发生了两次可与全球对比的大规模海侵(傅恒,2011)。第一次海侵发生于晚奥陶世的早期(恰尔巴克组沉积时期)淹没了塔里木北部低隆区,沉积了恰尔巴克组深水台地相;随着海平面相对下降,在恰尔巴克组深水台地相的基础上发育良里塔格组沉积时期塔里木北部孤立台地,南东方向为缓坡向深水区沉积减薄,北部以亚南断裂为界推测有台缘碳酸盐岩建造并向北过渡为陆棚泥页岩沉积(漆立新等,2015)。第二次海侵(桑塔木组沉积时期)致使良里塔格组沉积时期碳酸盐岩孤立台地消亡,进入桑塔木组沉积时期混积陆棚及浊积盆地相沉积。

(1) 恰尔巴克组:平行不整合于中奥陶统一间房组之上,岩性为棕褐、棕红色泥灰岩、瘤状泥灰岩,厚度 25~30m,属深水台地相。塔河油田区往南相变为混积陆棚,往东由混积陆棚过渡到盆地相。

(2) 良里塔格组:与恰尔巴克组整合接触,岩性为灰、深灰、褐灰色泥微晶灰岩、生屑灰岩、砾屑灰岩、鲕粒灰岩,夹含泥灰岩,局部发育小型生物礁,为开阔台地相。在塔河油田主体被剥蚀,往南钻井揭示厚度为几米至 170m,反映向南、向东由具有缓坡的由于水体加深而沉积减薄并逐渐相变为混积陆棚相;塔河油田主体以北推测为具陡坡的台缘碳酸盐岩建造,沉积厚度大于 170m。

(3) 桑塔木组:本组是海侵产物,在良里塔格组沉积时期孤立碳酸盐岩台地淹没、消亡的基础上沉积了一套陆棚—混积陆棚相的灰色灰质泥岩、泥岩为主夹泥微晶灰岩,沉积厚度为 548m 并向南、向东增厚。塔河油田区为混积陆棚—陆棚相,往南、向东则过渡到陆棚及浊积盆地相。

三、构造沉积演化特征

塔河油田区涉及塔里木盆地沙雅隆起、顺托果勒低隆起构造单元,本书着重论述古生代塔里木盆地构造与沉积演化在沙雅隆起及其周缘的表现。

塔里木盆地是大型复合叠加盆地。在早古生代就经历了稳定克拉通盆地阶段($Z-O_2$)和被动陆缘盆地阶段(O_3-S)两期盆地叠加即加里东构造运动与沉积演化;晚古生代经历了克

拉通周缘拗陷、陆内裂谷、前陆盆地三期盆地叠加即海西构造运动与沉积演化。

(一) 早古生代构造沉积演化

1. 塔里木中部古陆的形成与塔里木运动

塔里木运动相当于华南的晋宁运动,是元古宙晚期的一次重要构造运动,以震旦系与前震旦系之间的不整合为代表。塔里木运动标志着盆地前震旦系基底构造演化结束和盆地基底最终形成并进入盆地发展演化阶段,是盆地演化过程中发生的最重要的构造事件之一,这次运动之后塔里木盆地接受了真正的未变质的盖层沉积。震旦纪联合古陆解体,在现塔里木盆地中部残存一呈东西向展布,东西长约 600km、南北宽 80 ~ 120km 的古陆即塔中—巴楚古隆起,古陆的北界为图木休克—塔中 I 号断裂,南界为色力布亚—玛扎塔格塘北断裂带。古陆之北为南天山洋,之南为昆仑洋。钻井证实,塔中—巴楚古隆起缺失震旦纪—寒武纪早期(玉尔吐斯组沉积时期)沉积,如同 1、玛北 1、巴探 5、塔参 1 均钻遇花岗片麻岩,测得锆石年龄为 755 ~ 790Ma,表现为古陆特征。古陆的活动控制了南天山洋、昆仑洋海域的海相沉积相带分布。震旦纪第一套沉积地层分布于古陆南北两侧的变质岩基底上,主要为陆相冰碛岩。在震旦纪晚期拉张、海侵背景下,沉积台地相奇格布拉克组石灰岩。塔河油田区广泛分布震旦系陆相冰碛岩、台地相奇格布拉克组石灰岩。

2. 寒武纪玉尔吐斯组沉积时期深水泥页岩沉积与加里东早期运动 I 幕

加里东早期运动 I 幕又称柯坪运动,发生在震旦纪末,形成震旦系与寒武系平行不整合(地震 T_0)。在柯坪隆起,下寒武统玉尔吐斯组石灰岩、硅质泥页岩和磷块岩平行不整合于上震旦统奇格布拉克组白云岩之上,后者顶部白云岩发育古岩溶;库鲁克塔格隆起也可见下寒武统西山布拉克组薄层硅质岩、白云岩和含磷泥岩平行不整合于上震旦统汉格尔乔克组块状含砾砂岩和微晶白云岩之上;孔雀河斜坡西部尉犁 1 井下寒武统西山布拉克组直接覆盖于下震旦统育肯沟组之上;古城虚隆起塔东 1、塔东 2 井下寒武统西山布拉克组不整合于南华系白云岩之上;卡塔克隆起东部塔参 1 井中寒武统直接覆盖于南华系侵入岩之上;巴楚隆起方 1 井、和 4 井下寒武统肖尔布拉克组则覆于震旦系白云岩和火山岩之上;沙雅隆起星火 1 井揭示寒武系玉尔吐斯组平行不整合与震旦系奇格布拉克组白云岩之上。反映了加里东早期运动 I 幕造成了巴楚—塔中古陆(隆起)进一步隆升剥蚀,而古陆的南北两侧则沉陷,接受沉积。寒武纪初期(玉尔吐斯组沉积时期)进一步拉张、海侵作用,淹没了奇格布拉克组沉积时期碳酸盐岩台地。在古陆南北两侧沉积了陡岸的滨海相碎屑岩,而滨海之外广泛而稳定沉积了浅海陆棚—斜坡相泥页岩。根据露头及星火 1 井、库南 1 井、尉犁 1 井等揭示以深水陆棚—斜坡相黑色泥页岩为主,厚度 34 ~ 26m,分布广泛,构成盆地具有勘探意义的第一套区域烃源岩。塔河油田区玉尔吐斯组沉积时期陆棚相泥页岩发育,构成了现今油藏下伏直接烃源岩供烃的沉积基础。

3. 塔里木稳定克拉通碳酸盐岩建造($C_{1x}-O_2$)与加里东早期运动

加里东早期运动在塔里木表现持续拉张的背景。寒武纪—中奥陶世,持续的全球海平面上升淹没了塔中—巴楚古陆,使其为一个宽缓(低)台隆,并广泛向南北两侧洋盆方向加积形成南北大于 400km、东西大于 700km、纵向叠加厚度大于 4300m,平面分布面积大于 $30 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的联合台地。寒武纪末发生在塔里木碳酸盐岩台地上加里东早期运动 II 幕的暴露剥蚀与此时期全球海平面下降有关,处在拉张构造背景下的塔里木碳酸盐岩台地,在生长过程中发生的短暂暴露主要受控于全球海平面下降。

由于早寒武世玉尔吐斯组沉积期末的海平面上升,塔中—巴楚古陆淹没而形成以古陆为核心的早寒武世(肖尔布拉克组沉积时期)—中奥陶世(一间房组沉积时期)统一的大型碳酸盐岩台地。分布面积30多万平方千米,纵向叠加厚度4300多米。寒武纪碳酸盐岩沉积厚度2000余米,在中寒武世,古陆及其附近为蒸发环境下膏盐岩发育的局限台地(实钻井普遍钻遇厚达300m的中寒武统膏盐岩,地震剖面解释膏盐岩不连续发育面积在 $14 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上)。在古陆以北、以南向洋盆地区则表现为开阔台地向深水盆地过渡的碳酸盐岩沉积建造,膏盐岩不发育。晚寒武世由于海平面再度上升,形成了面积广大的统一台地,并为奥陶纪早—中世开阔碳酸盐岩台地发育奠定了基础。中—下奥陶统整体表现为开阔台地碳酸盐岩建造。最大沉积厚度达2300余米,平面分布面积大于 $30 \times 10^4 \text{ km}^2$,为塔里木盆地下古生界碳酸盐岩缝洞型储层提供了稳定的物质基础。

4. 早古生代被动陆缘盆地阶段(O_3 —S)与加里东中、晚期运动

1) 加里东中期运动与奥陶纪晚期被动陆缘盆地沉积

加里东中期运动在塔里木有三幕,第一幕发生在中奥陶世末,第二幕发生在奥陶纪晚期,第三幕发生在奥陶纪末。

(1) 加里东中期运动 I 幕与盆地沉积演化:加里东中期运动 I 幕发生在中奥陶世末,形成中—下奥陶统与上奥陶统之间角度、平行不整合,即地震 T_7^4 界面。该构造变动是北昆仑洋向其南部的中昆仑微陆块强烈俯冲,其缝合带(蛇绿岩带)主要沿乌依塔格—库地—阿其克库勒湖一线分布,导致塔里木陆块南缘由拉张背景转变为挤压。其结果是塔里木陆块内部由南向北挤压形成近东西走向的隆、拗格局,造成了塔里木盆地寒武纪—中奥陶世统一的大型碳酸盐岩台地消亡,并使得前述塔中—巴楚古陆复活,隆升剥蚀,古隆起带钻井普遍缺失一间房组和鹰山组上段,恰尔巴克组直接覆盖在鹰山组之上,中—下奥陶统剥蚀最大厚度500~600m。但沙雅低隆起隆升幅度小,钻井表现为恰尔巴克组覆盖在一间房组之上,仅缺失中奥陶统2~3个牙行刺带。据加里东中期运动 I 幕构造运动在各地表现特征,将盆地内碳酸盐岩分布区加里东中期 I 幕古地质单元划分为:西南拗陷、麦盖提—塘古斜坡、巴楚—塔中隆起、阿东—顺托—顺南斜坡、阿瓦提—满加尔拗陷、塔北斜坡、沙雅低隆起。这些古构造单元均呈东西向展布,是由南向北逐步挤压应力作用的结果。此次暴露剥蚀与全球海平面下降同步,由于巴楚—塔中隆起中—下奥陶统碳酸盐岩普遍遭到剥蚀(剥蚀厚度达500~600m),岩溶储层相对发育,而沙雅低隆起及阿东—顺托—顺南斜坡、阿瓦提—满加尔拗陷、塔北斜坡仅部分缺失奥陶系一间房组顶部地层,岩溶作用不太发育。盆地性质由克拉通被动大陆边缘向前陆盆地(在塔西南为周缘前陆盆地)转化。由于南缘北昆仑—阿尔金洋渐次关闭导致了晚奥陶世早期(恰尔巴克组沉积时期)海侵开始了碳酸盐岩台地的第一次淹没——深水台地沉积、晚奥陶世中期(良里塔格组沉积时期)海平面上升与隆起复活——孤立台地沉积、晚奥陶世晚期(桑塔木组沉积时期)裂陷槽盆浊积岩相快速沉积。

(2) 塔里木下古生界(O_3)深水陆棚—浊积盆地沉积:晚奥陶世再次海侵,原复活的古隆起均淹没于水下,由于古陆南北两侧断裂性质由加里东中期运动 I 幕的逆冲而转变为良里塔格组沉积时期的生长正断层,形成塔中—巴楚(南北具备台缘的“浅水台地”)、沙雅低隆起(北部台缘和南部缓坡的“深水台地”)两大分离台地,其间以深水海槽相隔。加里东中期运动 II 幕发生在晚奥陶世中期,形成上奥陶统内部的良里塔格组与桑塔木组岩性界面,即地震 T_7^2 界面。加里东中期运动 II 幕是在北昆仑—阿尔金洋关闭隆升过程中及东北缘库鲁克塔格形成的

边缘隆起提供大量物源注入于满加尔、塘古近东西向延伸海槽浊流沉积由东往西推进有关。并造成良里塔格组沉积时期两大孤立碳酸盐岩台地第二次淹没接受了浅海陆棚沉积。由于奥陶纪晚期桑塔木组槽盆区扩大,表现为台地淹没和桑塔木组混积陆棚的广泛发育。塘古—麦盖提及其以南、阿东—顺托—顺南、满加尔—阿瓦提为槽盆浊积沉积,构成广泛覆盖的区域盖层。造就了塔里木寒武纪—中奥陶世统一的大型碳酸盐岩台地之上覆盖巨厚的上奥陶统泥岩盖层。从地震层序结构看,隆起区上奥陶统陆棚相桑塔木组沉积最大厚度约 1000 余米,而槽盆区浊积岩相沉积厚度达 2000m 至 5000 余米(不包括加里东中晚期—海西早期剥蚀厚度),是加里东中期运动 I 幕古构造背景下,下古生界碳酸盐岩的直接区域盖层。

(3) 加里东运动中后期 III 幕与志留纪沉积:发生于奥陶纪末期的加里东中期运动 III 幕构造运动是受北昆仑洋关闭影响,造成吐木休克—塔中 I 号断裂带及其以南冲断隆升、剥蚀。自盆地南缘向塔中—巴楚隆起发生由南向北冲断隆升,致使上奥陶统剥蚀厚度达 1000m 以上,是志留系沉积的物源区。受塔中 I 号—吐木休克断裂的控制,下志留统柯坪塔格组下段仅分布于断裂下盘,中上段不同层位越过断裂带由北往南超覆沉积于加里东中期运动 III 幕构造活动带上。而天山洋仍处于拉张沉积阶段,表现在塔中 I 号—吐木休克断裂下盘至塔里木北部广大地区上奥陶统基本未遭受剥蚀,上奥陶统与下志留统为假整合—过渡沉积。志留纪早期具有拉张期深水陆棚沉积特点,中—晚期沉积进一步扩大。南天山地区中—下志留统为巨厚碳酸盐岩—碎屑岩夹多期火山岩,厚度 2000 ~ 6000m;上志留统为碳酸盐岩,厚度 1600m;志留系顶部为火山碎屑岩夹硅质岩和石灰岩,厚度 1300m;南天山志留系累计厚度 4900 ~ 8900m。推测塔里木南部边缘为滨浅海碎屑岩沉积,厚度约 3500m;塘南—麦盖提、塔中—巴楚为浅海碎屑岩、碳酸盐岩台地沉积,厚度可达 4000m;而吐木休克—塔中 I 号断裂带以北至塔北地区则为浅海陆棚相碎屑岩夹碳酸盐岩沉积,厚度约 3500m。

2) 加里东晚期运动与泥盆纪沉积

发生于泥盆纪沉积之前的区域构造运动——加里东晚期运动造成了塔里木盆地志留系与泥盆系之间的平行不整合,即地震 T_6^1 界面。上覆下泥盆统克兹尔塔格组砂砾岩中未见寒武系—奥陶系碳酸盐岩屑,可见其剥蚀程度有限。盆内仅在海西早期发生褶皱运动的向斜带内存在下泥盆统与中—下志留统平行不整合接触关系的地质记录。有学者认为原划分为中志留统的依木干他乌组划归下泥盆统,如此则加里东晚期构造运动在台盆区造成志留系为成藏组合的大规模油气聚集以及志留系中—上统被剥蚀,最终破坏了志留系油藏,形成现今下志留统广泛分布的干沥青质砂岩。据南天山海槽沉积特征与柯坪露头 and 盆内钻井揭示,以及成藏地质研究成果,油气藏形成需要上覆盖层基本厚度约 2000 余米,此时下寒武统烃源岩埋深达 7500 ~ 8000m,达到成熟阶段,在加里东晚期构造运动下运移、聚集形成规模宏大的志留系油藏(有学者估算可达百亿吨规模)。因此,估计塔中—巴楚隆起及其以南地区加里东晚期构造剥蚀可达 1500 ~ 2000m,残留下志留统厚度 200 ~ 1000m;吐木休克—塔中 I 号断裂带以北至塔北地区剥蚀厚度 1000 ~ 1500m,残留下志留统厚度 1000 ~ 1500m。笔者认为加里东晚期构造运动在寒武—奥陶系碳酸盐岩分布区并没有剥蚀掉其上覆盖层,也不足以形成此期碳酸盐岩岩溶储层。

由于加里东晚期构造运动影响,阿尔金山、塔里木盆地南部为隆起物源区,可能缺失早泥盆世沉积,或有边缘相沉积,厚度可能有 1000 余米;塔中—巴楚隆起及其以北地区为浅海碎屑岩沉积,厚度 1500m;南天山地区以槽盆相区沉积为特征,中—下泥盆统总厚度达 12500m,下泥盆统为绿色片岩夹大理岩、碎屑岩、火山岩,厚度大于 5000m,中泥盆统下部为浅海相浅变质

碎屑岩、碳酸盐岩夹火山岩、火山碎屑岩,厚约 5000m,上部为白云质灰岩,厚约 2500m。

(二)晚古生代构造沉积演化

海西运动在塔里木表现有两期,早期发育在晚泥盆世,晚期发育在石炭—二叠纪。

1. 海西早期运动

海西早期运动发生于晚泥盆世,塔里木盆地北部表现为上泥盆统或下石炭统由北向南依次超覆在下奥陶统、中奥陶统、上奥陶统及志留系之上,该角度不整合为地震 T_0^0 界面,剖面上可见清晰的下削、上超现象。

受泥盆纪末塔里木南部北昆仑洋关闭造山及北部南天山洋俯冲综合作用的影响,发生大规模的褶皱与断裂活动。据海西早期构造运动在各地表现特征,将盆地内古地质单元划分为:和田复背斜构造带(隆起带)、麦盖提—塘古复向斜带(斜坡或坳陷带)、巴楚—塔中复背斜构造带(隆起)、阿瓦提—满加尔复向斜带(坳陷带)、沙雅(含现今的库车坳陷)复背斜带(隆起带)。这些古构造单元走向也均呈东西向,是南北挤压应力的结果。三大复背斜带(隆起带)抬升、变形,并遭受规模空前的剥蚀。如沙雅隆起,由于南天山洋俯冲作用的影响更大,沙雅隆起主体及北部剥蚀 4500m 以上,寒武—奥陶系碳酸盐岩剥露,形成约 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的古喀斯特地貌景观。和田古隆起高部位已剥至下奥陶统蓬莱坝组,也经历了大规模的喀斯特化。而塔中—巴楚隆起虽然受北昆仑洋关闭影响,同样遭受较大程度的剥蚀,但剥蚀厚度小,未剥至寒武—奥陶系碳酸盐岩,由于东西走向古断裂复活使塔中—巴楚隆起及其以南麦盖提—塘古地区下伏寒武系盐体差异活动,形成一系列北北东向狭窄断垒与宽缓断堑,断堑内,大部分地区仅剥蚀至志留系或上奥陶统,仅在一系列北东向断垒上剥蚀至下奥陶统碳酸盐岩。因此奥陶系碳酸盐岩海西早期的岩溶型储层在塔中—巴楚隆起、麦盖提—塘古地区分布,明显差异于沙雅隆起、和田古隆起。塔河油田区大部处于海西早期运动奥陶系碳酸盐岩剥露区,形成大面积古喀斯特地貌与地质景观,夷平后保存了岩溶缝洞系统,构成了塔河油田区碳酸盐岩缝洞型储层。

2. 海西晚期运动

海西晚期运动发生在石炭纪—二叠纪(地震界面 T_5^0),对塔里木陆块的构造演化具特殊意义,是北天山洋和泛华夏大陆早古生代弧—盆地南缘古特提斯洋(包括南昆仑洋—阿尼玛卿洋)关闭造山的构造响应,从此塔里木陆块成为欧亚大陆的南缘,石炭纪后结束了大范围的海相沉积。由于北天山洋向伊犁微陆块(石炭纪—二叠纪已与塔里木陆块拼贴为一体)俯冲消减碰撞造山,南昆仑洋向中昆仑岛弧(石炭纪—二叠纪也与塔里木陆块拼贴为一体)俯冲消减碰撞造山,塔里木陆块内部实际处于广义的弧后扩张状态。石炭纪广泛接受了海陆交互相碎屑岩沉积及海相碳酸盐岩沉积,二叠纪除局部发育海陆交互相碎屑岩沉积及海相碳酸盐岩沉积外,还普遍发育基性岩浆侵入和火山喷发,二叠纪末开始转换为前陆盆地陆相碎屑沉积。

海西晚期运动 I 幕主导塔里木海陆变迁,由于南北挤压造山,塔里木整体隆升成陆,陆内拱张形成一系列南北走向的拱张断裂带(5~6 条/百千米)并发生多期次的大规模火山侵位、喷发与河湖相沉积活动。是塔里木盆地寒武—奥陶系碳酸盐岩储层形成重要地质因素——热液碳酸盐岩储层形成机制的关键时期。

海西晚期运动 II 幕是三叠系沉积前的二叠纪末期构造隆升剥蚀运动,也是塔河油田奥陶系油藏重要成藏期。由于轮台断裂带由北向南的逆冲运动,造成了沙雅隆起带由北而南的剥蚀,即北部将二叠系、石炭系大部分层位剥蚀,而南部如阿克库勒凸起南部、哈拉哈塘凹陷南

部、顺托果勒北部仅剥蚀上二叠统沙井子组。在轮台断裂带附近发生油气逸散、水洗氧化与稠油沥青封堵带的形成,造成塔河油田奥陶系油藏调整成现今复杂状态。

(三) 中生代构造与沉积

晚古生代末期,塔里木陆块与周缘造山带拼合,在山前带转换为前陆盆地陆相碎屑沉积初始阶段。中生代塔里木周缘前陆和陆内坳陷沉积主要受控于中、新特提斯域构造的影响。当然,特提斯域构造活动对塔里木是远源影响,主要导致海西晚期拱张断裂复活并转变为压扭性断裂,整个盆地构造随着特提斯域构造活动而逐步发生右旋活动。

1. 印支运动

始于三叠纪末(地震界面 T_4^6),是含塔里木陆块在内的欧亚板块与羌塘微陆块碰撞造山,即金沙江洋关闭的构造响应。塔里木周缘开始进入陆内造山发展阶段,主要以整体隆升构造运动为主。库车前陆盆地、西南前陆盆地进入发展阶段,而沙雅隆起区、满加尔—阿瓦提、塔中—巴楚隆起、麦盖提—塘古则为大面积的陆内坳陷型河湖相沉积区。

2. 燕山运动

燕山运动发生于侏罗纪到白垩纪(地震界面 T_4^0),羌塘微陆块与欧亚板块拼贴,是羌塘中部澜沧江洋、羌塘南部班公—怒江洋(泛华夏大陆晚古生代—中生代弧—盆地)关闭的构造响应。塔里木周缘陆内造山进一步发展,主要仍以整体隆升及陆内坳陷沉积交替旋回为主。

侏罗纪末的燕山中期运动结束了塔里木陆内坳陷沉积,进入大规模的整体隆升与暴露剥蚀状态,形成了大区域的侏罗系甚至三叠系被剥蚀,而库车前陆则剥蚀较弱。如沙雅隆起残存下侏罗统含煤岩系,巴楚—塔中隆起东部残存中—下三叠统。在燕山中期运动的夷平作用下,塔里木又进入伸展陆内坳陷型湖泊—河流相沉积阶段,广泛分布白垩系。

白垩纪末的燕山晚期运动远不及燕山中期运动的强烈,但在巴楚西部、麦盖提则造成强烈隆升剥蚀,上二叠统沙井子组普遍遭受不同程度剥蚀。塔里木其他地区如沙雅隆起仅剥蚀了上白垩统。

3. 喜马拉雅运动

喜马拉雅运动始于古近纪(地震界面 T_3^0),是印度板块与欧亚板块碰撞,即雅鲁藏布江洋关闭的构造响应。天山、昆仑山强烈陆内造山,形成了库车、塔西南两个陆内前陆盆地,山前均接受了巨厚(超过 10000m)的陆相碎屑沉积。而广大塔里木陆内坳陷基本与库车前陆、西南前陆连为一体,接受坳陷型湖泊相碎屑岩沉积。随着雅鲁藏布江洋渐次关闭,对塔里木最直接的作用是周缘山系崛起,前陆冲断带产生和陆内坳陷盆地内海西期断裂再度复活并发生挤压逆冲与断褶运动。

四、储层特征及形成地质因素

(一) 岩石学特征与成岩作用

碳酸盐岩相对于陆源碎屑岩而言,其最大的特点在于以内源沉积为主,对生物具有强烈的依赖性,而且受成岩作用影响明显。碳酸盐岩储集体的形成与原始沉积物类型及后期的成岩改造作用息息相关,因此研究碳酸盐岩沉积物的岩石学特征和成岩作用就显得尤为重要,同时也是分析储集体成因和控制因素的基础。塔里木盆地寒武系和奥陶系发育了多种类型的碳酸盐岩,而且这些岩石经历了复杂和漫长的地质演化过程,各类成岩作用对岩石的改造也非常明显。